



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

기후변화에 의한 제주도 하천유출 및  
가뭄 영향 분석

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

李 準 護

2016年 8月

# 기후변화에 의한 제주도 하천유출 및 가뭄 영향 분석

指導教授 陽 城 基

李 準 鎬

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2016年 8月

李準鎬의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長

김 상 진



委 員

김 남 형



委 員

백 원 배



委 員

김 등 수



委 員

양 성 기



濟州大學校 大學院

2016年 8月

# Impact Analysis of Discharge and Drought of Climate Change Scenario in Jeju Island

Jun-Ho Lee

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Engineering

2016. 8.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Jin Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Nam-Hyeong Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Won-Bae Park , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Dong-Su Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sung-Kee Yang , Prof. of Civil engineering

August. 2016

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 目 次

目 次 .....	i
LIST OF FIGURES .....	iv
LIST OF TABLES .....	vi
Summary .....	viii
I. 서 론 .....	1
1. 연구의 배경 .....	1
2. 연구의 목적 .....	2
3. 연구의 동향 .....	3
4. 연구의 방법 .....	5
II. 자료 및 연구방법 .....	7
1. 기후변화 시나리오 영향 .....	7
1.1 수자원 영향평가 .....	7
1.2 전지구 기후모형(GCM) .....	8
1.3 온실가스 배출시나리오 .....	11
2. 기후변화 시나리오의 혼합상세화 .....	16
2.1 혼합상세화 .....	16
2.2 분위사상법 .....	18
3. SWAT 모형 .....	20
3.1 SWAT모형의 이론 .....	21
3.2 지표유출 .....	23
3.3 증발산 .....	35
3.4 토양수 .....	38
3.5 유출 추적 .....	40
4. 가뭄심도지수 .....	42
4.1 가뭄의 분류 .....	42
4.2 SPI 공식 .....	44

III. 연구대상 유역 및 기상관측소 .....	49
1. 연구대상 유역 .....	49
1.1 유역 형상 및 지형적 특성 .....	50
1.2 유역의 표고 및 경사 분석 .....	50
2. 기상관측소 선정 .....	55
IV. 기후변화 시나리오의 상세화 .....	60
1. 기후변화 시나리오 .....	60
2. 강수량자료 상세화 .....	61
3. 기온자료 상세화 .....	79
V. 미래 기후변화 시나리오의 적용 .....	96
1. 대상유역의 수문·지형자료 .....	97
1.1 기상관측소 선정 .....	97
1.2 토지피복도 .....	98
1.3 토양도 .....	101
2. SWAT모형의 보정 .....	103
2.1 ADCP 관측기기 .....	103
2.2 현장 유출량 관측 결과 .....	104
2.3 매개변수 최적화 .....	106
3. 기후변화에 따른 지표유출량 예측 .....	110
2.1 장기 지표유출량 분석 .....	110
2.2 계절 지표유출량 분석 .....	112
4. 기후변화에 따른 가뭄지수 예측 .....	116
4.1 기상관측소 선정 .....	116
4.2 과거 가뭄 분석 .....	117
4.3 기후변화에 따른 가뭄지수 분석 .....	121
VI. 기후변화에 따른 제주도 수자원의 영향 분석 .....	124

1. 강수량의 장기변동과 발생빈도 .....	124
2. 지표유출량의 발생빈도와 계절적 변화 .....	128
2.1 지표유출량 크기에 따른 발생빈도 변화 .....	128
2.2 지표유출량의 계절적 변화 .....	133
3. 가뭄지수의 발생빈도와 가뭄심도 .....	137
3.1 기후변화에 따른 가뭄 발생빈도 변화 .....	137
3.2 기후변화에 따른 가뭄심도 변화 .....	143
4. 기후변화에 따른 지표유출량의 민감도 분석 .....	144
VII. 결 론 .....	150
참고문헌 .....	152

## List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart on the study. ....	6
Fig. 2.1 Process for climate change impact & vulnerability assessment and adaaptation strategies. ....	7
Fig. 2.2 Schematic illustration of model structure at a single grid box. ....	9
Fig. 2.3 Atmospheric CO2 concentrations as observed at Mauna Loa from 1958 to 2008 (black dashed line) and projected under the 6 SRES marker and illustrative scenarios .....	13
Fig. 2.4 Representative concentration pathways. ....	15
Fig. 2.5 Schematic of Pathways Available for Water Movement in SWAT. ....	22
Fig. 2.6 Infiltration profile for the Green & Ampt model. ....	28
Fig. 2.7 Influence of      and      on fraction of surface runoff released. ....	35
Fig. 2.8 Trapezoidal channel dimensions. ....	41
Fig. 2.9 Time series of precipitation mass of SPI 3. ....	45
Fig. 3.1 Basins for the study .....	49
Fig. 3.2 Altitude and slope analysis of Oaedo stream watershed .....	51
Fig. 3.3 Altitude and slope analysis of Gangjeong stream watershed .....	53
Fig. 3.4 Location map of weather stations used in study. ....	55
Fig. 3.5 Trend of mean and extreme rainfall index. ....	59
Fig. 4.1 Wet-Dry Day Correction .....	60
Fig. 4.2 Monthly differences between observed and GCM .....	62
Fig. 4.3 Monthly differences between precipitation observed and GCM .....	78
Fig. 4.4 Monthly differences between Maximum temperature observed and GCM .....	93
Fig. 4.5 Monthly differences between Minimum temperature observed and GCM .....	95
Fig. 4.3 An illustration of the soil and water assessment tool(UCROSS, 2016). ....	96
Fig. 5.1 Map of land use of Oaedo stream. ....	98
Fig. 5.2 Map of land use of Gangjeong stream. ....	100
Fig. 5.3 Map of soil type of Oaedo stream. ....	101
Fig. 5.4 Map of soil type of Gangjeong stream. ....	102
Fig. 5.5 Observation of discharge using ADCP: a) Principle of ADCP ; b) ADCP	

equipped with 9 beams (SonTek RiverSurveyor M9); c) Management of ADCP in scene .....	104
Fig. 5.6 Comparison of stream baseflow discharge. ....	106
Fig. 5.8 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo stream.	107
Fig. 5.9 Result of the present runoff simulation of the basin of Gangjeong stream. ....	107
Fig. 5.10 Result of calibration of Oaedo stream. ....	109
Fig. 5.11 Result of calibration of Gangjeong stream. ....	119
Fig. 5.12 Future present comparison of direct runoff of Oaedo stream. ....	110
Fig. 5.13 Future present comparison of direct runoff of Gangjeong stream. ....	110
Fig. 5.14. Future present comparison of direct runoff of Oaedo stream. ....	111
Fig. 5.15 Future present comparison of direct runoff of Gangjeong stream. ....	112
Fig. 5.16 Climate change impacts on seasonal discharges at Oaedo stream. ....	114
Fig. 5.17 Climate change impacts on seasonal discharges at Gangjeong stream. ....	115
Fig. 5.18 Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 and SPI 12. ....	119
Fig. 5.19 Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 and SPI 12 with simulated weather data. ....	123
Fig. 5.20 Variation of simulated year precipitation of weather station. ....	126
Fig. 5.21 Future present comparison of Discharge of Oaedo stream. ....	130
Fig. 5.22 Future present comparison of Discharge of Gangjeong stream. ....	131
Fig. 5.23 Trends of event discharge at streams .....	133
Fig. 5.24 Future simulated discharge of Oaedo stream of Box-plot. ....	135
Fig. 5.25 Future simulated discharge of Gangjeong stream of Box-plot. ....	136
Fig. 5.26 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Jeju weather station. ....	139
Fig. 5.27 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Seogwipo weather station. ....	140
Fig. 5.28 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Gosan weather station. ....	141
Fig. 5.29 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Seongsan weather station. ....	142

Fig. 5.30 Relationship between  $\Delta T$ ,  $\Delta ET$ ,  $\Delta Q$  and  $\Delta P$  at each basin. .... 145

Fig. 5.31 Relationship of between change in Temperature and Actual ET. .... 147

Fig. 5.32 Relationship of between change in Mean precipitation and discharge. 148

## List of Tables

Table 2.1 Variables of GCM .....	10
Table 2.2 Details of SRES different Storylines .....	12
Table 2.3 Median temperature anomaly over pre-industrial levels and SRES comparisons based on nearest temperature anomaly .....	14
Table 2.4 Manning roughness coefficient by overland flow .....	31
Table 2.5 Manning roughness coefficient by channel flow .....	34
Table 2.6 Water contents for various soils at different moisture conditions .....	39
Table 2.7 Classification of drought intensity using PDSI .....	48
Table 3.1 Geological features of basin for study .....	50
Table 3.2 Altitude analysis result of Oaedo Stream watershed .....	52
Table 3.3 Slope analysis result of Oaedo Stream watershed .....	52
Table 3.4 Altitude analysis result of Gangjeong Stream watershed .....	54
Table 3.5 Slope analysis result of Gangjeong Stream watershed .....	54
Table 3.6 Specification of weather stations .....	56
Table 4.1 Results of monthly mean precipitation of weather stations .....	63
Table 4.2 Statistical analysis of monthly precipitation of Jeju weather station ..	65
Table 4.3 Statistical analysis of monthly precipitation of Seogwipo weather station .....	68
Table 4.4 Statistical analysis of monthly precipitation of Seongsan weather station .....	71
Table 4.5 Statistical analysis of monthly precipitation of Gosan weather station .....	74
Table 4.6 Statistical analysis of monthly temperature of Jeju weather station ..	80
Table 4.7 Statistical analysis of monthly temperature of Seogwipo weather station .....	83
Table 4.8 Statistical analysis of monthly temperature of Seongsan weather station .....	86
Table 4.9 Statistical analysis of monthly temperature of Gosan	

weather station .....	89
Table 5.1 Specification of weather stations .....	97
Table 5.2 Analysis result of land use of Oaedo Stream watershed .....	99
Table 5.3 Analysis result of land use of Gangjeong Stream watershed .....	100
Table 5.4 Analysis result of soil type of Oaedo Stream watershed .....	102
Table 5.5 Analysis result of soil type of Gangjeong Stream watershed .....	103
Table 5.6 Comparison of stream baseflow discharge measurement method .....	105
Table 5.7 Hydrological model performance criteria .....	108
Table 5.8. Calibrated parameters .....	108
Table 5.9 Specification of weather stations .....	116
Table 5.10 Computation of standardized precipitation index of weather stations .....	120
Table 5.11 Variation of simulated monthly precipitation of weather station .....	127
Table 5.12 Variation of simulated discharge of study streams .....	137
Table 5.13 Variation of standardized precipitation index of weather stations .....	144
Table 5.14 Regression equations between $\Delta ET$ and $\Delta T$ variation .....	146
Table 5.15 Regression equations between $\Delta Q$ and $\Delta P$ variation .....	147
Table 5.16 Regression equations among variation rates of $\Delta Q$ , $\Delta P$ and $\Delta ET$ ..	149

## Summary

With increasing the frequency of precipitation extremes due to climate changes, flood damages and drought damages are predicted to grow in Jeju island. To estimate the effect of stream discharges and droughts caused by climate change in jeju island, climate change impact assessment was conducted with a climate change scenario. the climate change scenario was constructed through quantile mapping. A discharge scenario was simulated by SWAT model and an integrated hydrological modeling.

The quantile mapping of hybrid downscaling method, by effectively reducing errors of the local climate model, enabled to produce reliable regional precipitation scenarios for water resource impact assessment of Jeju island in the precipitation scenarios. the precipitation consistently increased in all of four regional meteorological. In seasonal precipitation analysis, fall and winter showed a large precipitation increase.

the discharge scenarios were applied to Oaedo stream in northern jeju and Gangjeong stream in southern Jeju. The annual average discharge was found to decrease slightly in the north area of Jeju and increase for the south area of Jeju. However, the maximum discharge frequency increased for both sides. Especially, Summer/Fall discharge was estimated to have no benefit for the water resource security but to increase flood damages. A drought scenario was estimated using the standardized precipitation index SPI. SPI was applied to four regional meteorological in Jeju island. In predicted drought scenarios, SPI 12 relatively simple fluctuations compared to SPI 6 at observatories. The predicted drought scenario showed a large increase in fluctuations in all weather stations. Seasonally, it was predicted that severe drought (PSI -1.5 or below) would occur during spring and that drought damages would increase.

As the results of the impact of climate changes on the water resources of Jeju island, it was found that the intensity and frequency of droughts and discharge

would increase and enhance flood damages and drought damages. Therefore, as the results of climate changes, water resource security and be threatened and stream management can be challenging in Jeju island. Also, regional water resource response plans for climate changes need because the results varied by regions over time.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

### 1.1 연구의 배경

기후변화(Climate Change)는 광의적인 의미로 현재의 기후계가 인위적인 요인과 자연적인 요인에 의해 점차 기후가 변화하고 있다. 최근 기후변화의 중요한 요인은 인위적인 요인으로 기존의 기후변화 속도보다 급격하게 변화하는 현상으로 정의 될 수 있다(Sang and Choi, 2012).

기후변화 4차보고서(IPCC, 2007)에서는 이상기후로 인해 지난 100여 년 동안 지구 평균기온이 약 0.74℃ 증가하여 태풍 및 가뭄 피해는 전 지구뿐만 아니라 한반도에도 더욱 심화되고 있다(Meteorological Administration, 2011). 또한, 평균기온이 3.0℃ 오를 경우에는 아시아에서만 연간 700만 명 이상이 이상기후로 인한 자연재해를 입을 위기에 처할 수 있다고 경고하고 있다.

지난 50년간 우리나라는 전지구 평균기온에 비해 1.5℃ 정도 상승하여 강수일수는 감소하였으나, 80 mm 이상인 집중호우의 발생빈도와 그 피해는 증가하고 있다(Choi, 2002). 지구 온난화 현상은 미래의 기상현상에 큰 변화를 발생시킬 것으로 예상하고 있다. 물순환 과정의 변화는 강수량, 지표수 유출, 토양 함수량 증발산량 등이 변화하는 것을 의미하며, 미래의 물순환 뿐만 아니라 자연재해인 홍수와 가뭄도 빈번히 발생할 것으로 보고되고 있다(Ahn et al., 2001; Yang, 2006).

최근 제주도는 이상기후로 인한 극한사상의 발생빈도가 점차 증가하고 있어 집중호우, 태풍 등에 의한 자연피해가 점차 증가하고 있으며, 제11호 ‘나리’ 태풍은 2007년 9월 15일부터 16일까지 사상 초유의 14명의 사상자와 약 130,646백만원의 피해가 발생하였다(Jeju Special Self-Governing Province, 2007). 하천 범람을 유발하는 호우일수의 발생횟수가 증가함에 따라 예·경보 없이 발생하는 홍수피해도 지속적으로 증가 될 것으로 예측되고 있으며, 한편으로는 가뭄의 발생주기도 점차 짧아지고 있어 그 피해도 증가하고 할 것으로 보인다.

하천수를 주 수원으로 이용하는 우리나라 내륙지역과는 달리 제주도는 생활 및 산업, 농업에 필요한 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있다. 따라서 기후변화가 미래 제주도 수자원에 미치는 영향을 연구하는 것은 안정적인 물 공급과 수재해 방재를 위한 관리정책 수립에 유용한 정보를 제공할 것이다.

## 1.2 연구의 목적

기후변화에 능동적으로 대응하기 위해서 수자원관리는 신뢰성 있는 하천유량 및 기상관측 자료와 정밀한 기후변화 시나리오의 산출을 요구한다. 또한, 기후변화로 인한 제주도 수자원의 변동성을 정량적으로 평가하고, 이에 대한 취약점을 분석하여 적절한 대응 및 대책을 수립해야만 한다.

기후변화를 예측하기 위해서는 온실가스 배출 시나리오를 활용한 미래 기후변화 시나리오가 요구된다. 이를 위해 널리 사용하고 있는 방법은 전지구 기후모형(Global Climate Model; GCM)에 의한 기후변화모의법이 주로 사용되고 있다. 유럽, 미국 등의 선진국에서는 GCM을 개발하여 지역적 차원에서 수자원에 미치는 영향을 평가하는데 활용하고 있다.

기상청의 기후정보포털(Korea Global Atmosphere Watch Center; KGAWC)에서 제공하고 있는 기후변화 시나리오는 전지구 기후모델(HadGEM2-AO)에 인위적 기후변화 강제력을 적용하여 전지구 기후변화 시나리오(135 X 135 km)를 산출하고 있다. 또한 지역 기후모델(HadGEM3-RA)를 이용한 역학적 상세화로 남한상세 시나리오(12.5 X 12.5 km)를 제공하고 있는 실정이다. 그러나 제주도 격자 19 ~20개로 표현되어 그대로 수자원의 영향 분석에 적용하는 것은 한계가 있어 통계적 상세화 기법이 필요하게 된다.

본 연구에서는 기후변화가 제주도 하천유출 및 가뭄에 미치는 영향 등을 분석하였다. 이를 위해 기후변화 시나리오에 분위사상법을 적용하고 장기유출 모델인 SWAT모형을 활용하여 제주도 북부와 남부지역의 미래 유출시나리오와 표준가뭄 지수로 각 지역(북부, 남부, 동부, 서부)별 미래 가뭄 시나리오를 산정하였다.

## 2. 연구의 동향

기후변화가 수자원에 미치는 영향 분석은 1970~1999년 기간 동안 여러 GCM에 대한 연평균 편차를 분석하고 월별 평균 강수량, 기온 등을 비교하면서 시작되었다. 국내에서는 차유미 등(2007)은 ECHO-G/S를 활용하여 미래 동아시아의 기후를 전망하고 양해근(2007)은 전주와 춘천을 연구대상으로 선정하여 과거 30년간의 실측 기상자료를 통계적인 방법으로 경향성 분석을 하였다. 건설교통부(2008)에서는 전국 30개 관측소의 과거자료인 강우량에 대하여 12개의 통계적으로 극한 강수사상에 대한 경향성 분석을 실시한 바 있다.

미국, 영국 등의 선진국은 기후변화가 물순환에 미치는 영향에 대해 수자원 계획, 관리에 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한, Takaya Miyano(1994)는 주요 국가별 기온자료를 선형 및 비선형 회귀식을 이용하여 분석하였으며, John. M 등(1999)은 Minnesota의 43개 하천을 대상으로 실측 기온자료를 Least-square regression을 사용하였다. Hong tian 등(2006)은 Jianghuai유역 41개의 관측지점에서 43년간(1961~2003년)의 실측 기상자료를 계절별로 분석하고 여름의 가뭄, 홍수, 집중호우 등과 같은 극한 이상기후에 대한 시공간적으로 변화를 조사하였다. 방재연구소(2008)는 22개 관측소를 기준으로 과거 관측자료를 통한 T-test, Sen-test 등에 적용하여 물이 가장 부족한 봄과 겨울에는 감소, 홍수가 발생하는 여름과 가을에는 연평균강수량을 증가하는 경향을 제시하였다. 또한, 국내의 기후변화에 따른 수자원 영향 평가에 대해 안재현 등(2001a, 2001b)은 기후모델인 IRSHAM96 모델을 이용하여 지역적인 기후특성을 반영하기 위한 연구를 수행하였다.

GCM을 이용한 수자원 영향 평가를 위해서는 최소 30 km 정도의 해상도를 갖추어야 한다. 개발된 GCM은 100~500 km의 해상도를 가지고 있어 상세화 기법이 필요하며 상세화 기법은 크게 동역학적 상세화기법(Dynamic downscaling)과 통계학적 상세화기법(Statistical downscaling)이 있다. 동역학적 상세화기법은 GCM과 동일한 수학적 체계를 가지고 있으며, GCM에 고해상도의 격자를 적용하는 기법으로 제시하였다(Von Storch et, 2000; Cocke and RaRow, 2000).

제주도 수자원에 관한 연구로는 생활 및 산업 활동에 필요한 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있어 그동안 수자원 관련 연구는 대부분 지하수를 중심으로 진행

되어 왔다(Yang, 2007). 기후변화에 대한 제주도 관련 연구로는 송성호 등(2013)은 제주도를 북부 남부 서부권역으로 구분하여 기후변화에 의한 가뭄지수를 평가하였다. 이준호 등(2015)은 기후시나리오를 역학적 방법과 통계적 방법의 두 기법을 동시에 적용한 혼합 상세화기법의 적용성을 평가하고 관측소별 확률 강우량 산정 방법을 제시하였으며, 강보성 등(2015)은 강우량 증가에 따른 강우를 4 Case로 구분하여 분석하고, 분석된 결과를 토대로 기후변화에 따른 홍수피해가 발생할 수 있는 위험을 제시하였다.

이러한 연구들의 대부분은 적분기간이 기후변화를 모의하기에는 불충분한 10년 미만이거나, 기후변화 영향분석이 기상대에 국한되어 있어 기후변화에 따른 영향 평가하기는 한계가 있다. 따라서 기후변화가 제주도 하천유출 및 가뭄에 미치는 영향을 보다 정밀하게 평가하고 신뢰성을 높이기 위해서는 IPCC 5차 보고서의 RCP 8.5 대표농도를 근간한다. 또한, 장기 적분한 결과를 상세화하여 신뢰도를 높이는 평가가 필요하다. 기후변화에 대응하는 수자원 정책을 수립하기 위해서는 특정 기상대에 국한된 평가가 아니라 지표유출과 가뭄 영향에 미치는 체계적인 평가가 필요하다.

### 3. 연구의 방법

기후변화에 따른 제주도 수자원 영향 평가를 하기 위하여 미래 기후예측 자료로 기상청의 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>, 2015)에서 제공하고 있는 RCP 8.5 온실가스 시나리오의 지역 기후모델(HadGEM3-RA)자료를 활용하였다. 그러나 이들 자료는 해상도 크기가 12.5 km 으로서 이를 그대로 수자원 영향 평가에 적용하는 것은 무리가 있다. 따라서 지역규모에서의 기후 자료로 변환하기 위한 상세화 기법(down scaling) 기법인 혼합상세화 기법을 적용하였다.

상세화기법은 지역기후모형과 함께 통계적인 기법을 결합하여 기후시나리오를 상세화하는 것으로 일반적인 통계적 기법은 크게 3가지로 구분한다. 첫 번째는 역학적 상세화 기법과 기상발생기(weather generator)를 결합하는 방법, 두 번째는 역학적 상세화기법에 편의보정하는 방법, 세 번째는 역학적 상세화에서 생산된 CF를 이용하여 생산하는 방법이다(Lee, 2013). 본 연구는 분위사상법을 적용하였다.

기후변화에 따른 유출량 변화를 분석하기 위하여 제주도 북부의 외도천 유역, 남부의 강정천 유역을 연구대상 유역으로 선정하여 장기유출 모델인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형을 적용하고 미래 유출량 모의하기 위해 매개변수 민감도 분석을 실시하였다. 또한, 2011년 7월부터 2014년 12월까지 신뢰도 높은 유량 관측 자료를 얻기 위해 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)와 SIV(Surface Image Velocimetry)를 이용한 유량관측 자료를 이용하여 모델의 결과보정을 실시하였다. 각 유역의 매개변수 보정을 실시한 후 2100년까지 미래 지표 유출량의 변화를 분석하였다.

또한, 제주도의 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있어 기후변화에 따른 수자원 영향 중에서 가뭄에 대한 지속적인 관심과 연구가 필요하다. 따라서 대표적인 표준 강수지수를 작성한 기준에 맞게 분류하고 각 지역특성(4개 기상대 제주, 서귀포, 고산, 성산기상대)을 SPI 가뭄지수를 분석하였다. 본 연구내용의 흐름도는 Fig. 1.1과 같다.

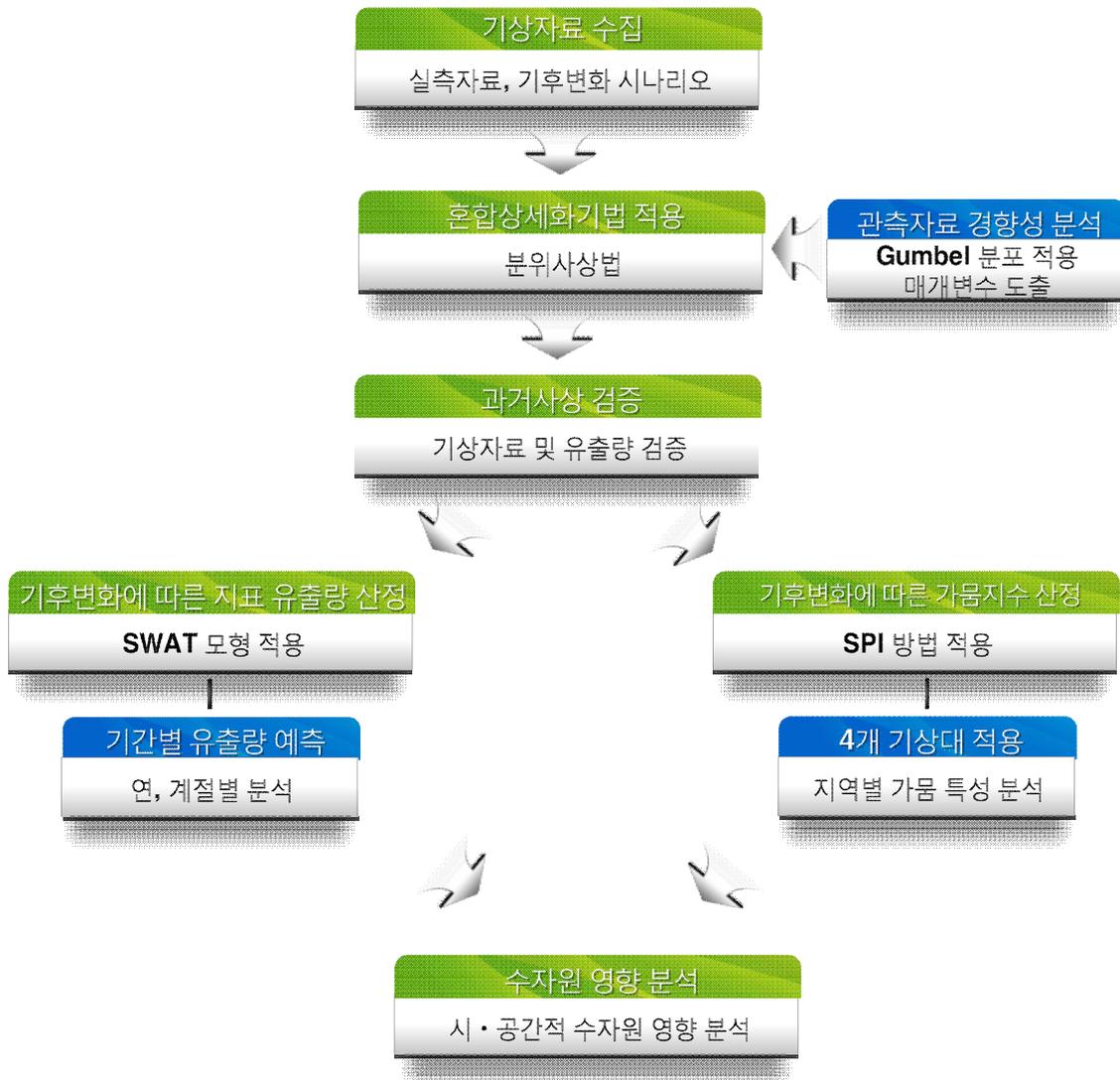


Fig. 1.1 Flow chart on the study.

## II. 자료 및 연구방법

### 1. 기후변화 시나리오

#### 1.1 수자원 영향평가

기후변화를 고려한 수자원 영향 평가하는 방법은 과거 기상관측자료를 이용하여 기상변화 경향을 분석하는 방법과 시나리오를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다(배덕효와 정일원, 2005). 20세기 이후의 관측 자료만을 이용하여 기상인자의 경향성을 찾아내는 방법은 과거의 현상을 통해 미래 기후의 특성을 파악할 수 있는 큰 장점이 있으나, 관측 값만으로 불확실성이 큰 미래 기후변화에 따른 수자원영향을 분석하기엔 것은 무리가 따르게 된다. 따라서 최근 연구에서는 기후모델에서 생산된 기후자료를 수문모델에 입력하여 수자원의 영향을 평가하고 있는 추세이다(Fig. 2.1). 이러한 방법을 통해 수자원 변화를 파악하고 이에 대한 대응정책을 수립하게 된다.

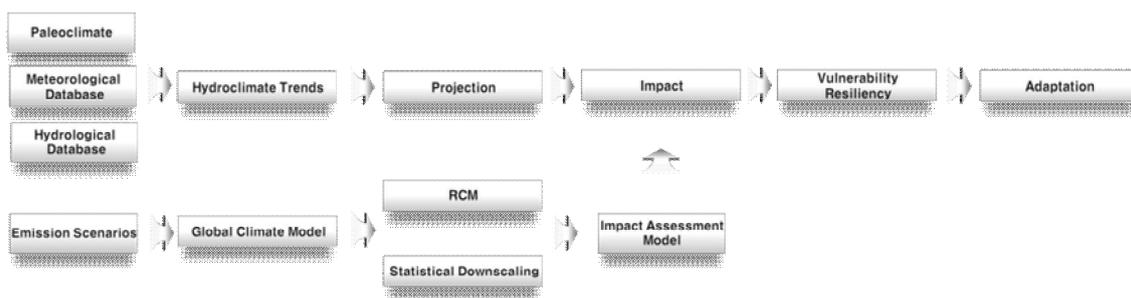


Fig. 2.1 Process for climate change impact & vulnerability assessment and adaptation strategies.

전지구 모델로 전망된 변화에 대한 신뢰성은 연구유역이 작아질수록 감소하기 때문에 지역적, 국지적 범위의 기후변화를 연구를 수행하기 위해 지역적 기후모델이나 상세화기법 같은 방법들이 지속적으로 개발되었다.

## 1.2 GCM(Global Climate Model)

1975년 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 GARP(Global Atmospheric Research Programme)에서는 기후시스템을 대기권, 수권, 빙하권, 대륙권, 생물권으로 구성되어 있다고 정의하고 있지만 현재의 기후 시스템에 대한 해석은 대기권, 수권, 설빙권, 생물권, 지권 등으로 구성되며, 이들은 각종 물리적 과정들이 서로 존재하여 지금의 기상상태 또는 기후를 유지하고 해석하고 있다(Henderson-sllers and McGuffie, 1997). 세계적으로 평균적인 기후변화를 측정하기 위해 비교적 단순한 모델이 보급되고 있으나, GCM은 지역적인 모델과 결합 가능하고 기후변화의 영향분석이 필요한 기후변화 측정과 일치하는 지리학적, 물리학적 정보를 제공하고 있다.

GCM은 기후시스템의 상호작용을 물리적 개념을 통하여 모의하는 도구이며 지구를 격자단위로 분할하고 기온(T), 습도(q), 기압(p), 바람(u, v, w) 등의 시간적 변화를 물리법칙에 기초하여 산출한다. GCM은 하나의 격자 내에서 분석되는 대기, 해양, 지표의 상호작용을 나타내며, 각 격자점에서의 평균적인 대기의 특성이 분석되고 각 격자의 대기상태는 인접한 격자점과의 상호작용을 통하여 변화된다(정일원, 2007)(Fig. 2.2).

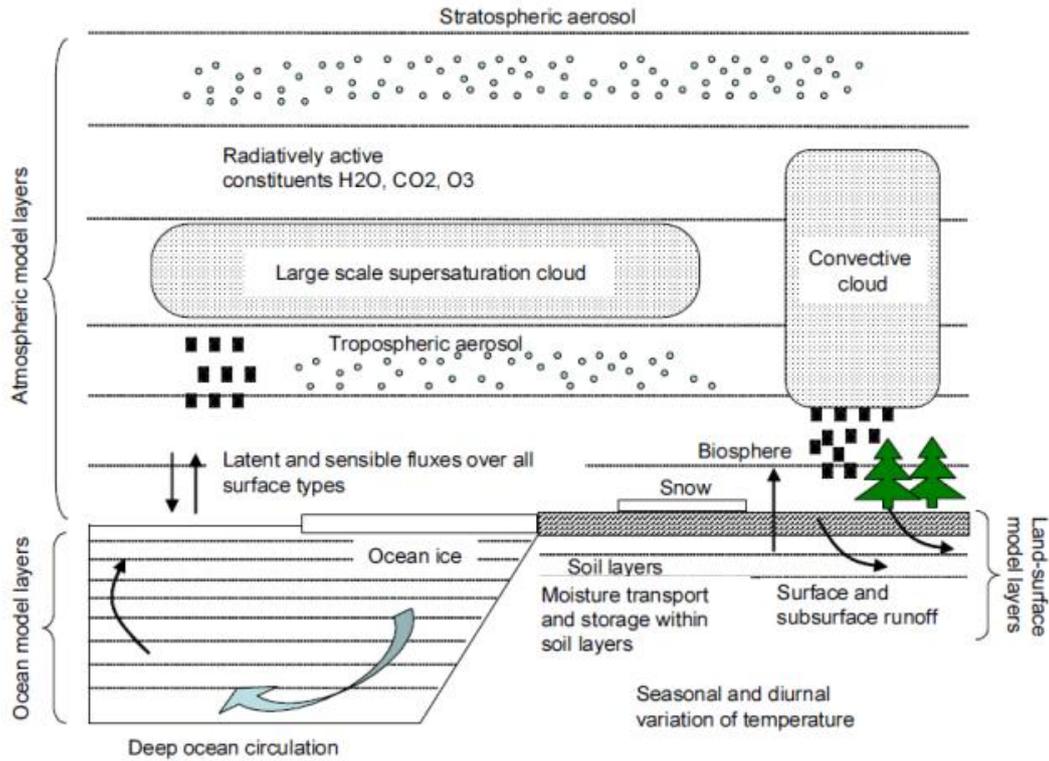


Fig. 2.2 Schematic illustration of model structure at a single grid box(Henderson-sellers and McGuffice, 1997).

이러한 각 격자점에서의 대규모의 운동량과 열, 수분 플럭스의 이동은 식 2.1 ~ 식 2.4의 지배방정식을 이용하여 산정된다. 이 식들은 운동량 방정식, 연속방정식, 에너지 방정식, 이상기체 방정식을 나타낸다.

$$\frac{DV}{Dt} = -2\Omega \times V - \frac{\nabla p}{P} + g + F \quad (2.1)$$

$$\frac{DP}{Dt} = -P\nabla \times V + C - E \quad (2.2)$$

$$\frac{DI}{Dt} = -p \frac{dP^{-1}}{dt} + Q' \quad (2.3)$$

$$P = -PRT \quad (2.4)$$

여기서,  $V$  : 속도,  $t$  : 시간,  $D/D_t$  : 시간에 대한 전미분( $\partial/\partial t + V \times \nabla$ ),  $\Omega$  : 각 속도벡터,  $P$  : 대기밀도,  $g$  : 중력가속도,  $p$  : 대기압,  $F$  : 단위질량당 힘,  $C$  : 대기

구성요소의 생성율,  $E$  : 대기 구성요소의 소멸율,  $I$  : 단위질량당 내부에너지,  $Q'$  : 단위질량당 난방율,  $R$  : 기체 상수,  $T$  : 온도

Manabe and Brian(1969)는 최초로 GCM을 개발한 이후 여러 물리적, 시간적 프로세스의 발전으로 인해 현재에서 많은 연구개발이 이루어지고 있다. PCMDI에서는 총 25개의 GCM 모의결과를 제공하고 있으며 Table 2.1은 GCM의 대표적인 모의변수들을 제시하였다.

Table 2.1 Variables of GCM

Variable	Description	Unit
huss	surface specific humidity	fraction
orog	surface altitude	km
pr	total precipitation	kg/m <sup>2</sup> /s
psl	sea level pressure	pa
rsds	surface downwelling shortwave flux in air	W/m <sup>2</sup>
sftgif	land area fraction	%
tas	near surface air temperature	K
tasmax	2m mean max air temperature	K
tasmin	2m mean min air temperature	K
uas	zonal surface wind speed	m/s
vas	meridional surface wind speed	m/s

GCM에서 모의된 결과들을 수문분석에 직접 적용하여 분석하기는 매우 어렵고 변수는 단위가 다르고 각 변수마다 의미하는 것이 관측 자료와는 상이하다. “pr”는 실강수량이 아니라 가강수량(precipitable water)으로 단위면적당 대기수증기량을 의미한다. Climate Impacts Groups(2009)는 기존의 문제를 보완하기 위하여 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmosphere Administration, NOAA)에서 제공하고 있는 NCEP(Nation Center for Environmental Prediction)의 자료를 제공하고 있으며 NCEP는 과거 기상자료를 격자로 제공하고 있으며 GCM의 결과변수와 비슷한 형태로 제공하고 있다.

Climate Impacts Groups(2009)는 이를 관측 자료와 상관관계를 형성하고 비교하는 것을 추천하고 있으며, 국내에서도 GCM자료를 분석한 연구사례가 있다. 하지만 NCEP자료와 GCM 모의결과의 편차가 크게 나타나 이를 그대로 적용하기엔 부적합하고 기본적으로 불확실성이 큰 GCM 모의결과이기 때문에 한계를 지고 있다.

### 1.3 온실가스 배출시나리오

최근 온실가스의 대기의 농도는 산업혁명 이전보다 농업, 화석연료와 토지피복 변화에 관한 인간의 활동에 의해 매우 증가하였다. IPCC 4차 평가보고서는 2007에 SRES(Special Report on Emission Scenario)에서 발표한 온실가스 배출시나리오를 기준 시나리오로 채택하였다. IPCC SRES에 대한 구체적인 사항은 Table. 2.2로 제시되었으며 인구, 기술, 경제성장 등 미래 온실가스 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루고 있어 크게 4가지 A1, A2, B1, B2의 배출시나리오를 제시하였다.

Table 2.2 Details of SRES different Storylines(IPCC, 2007)

Driver	A1				A2	B1	B2
	A1C	A1G	A1B	A1T			
Population growth	Low	Low	Low	Low	High	Low	Medium
GDP Growth	Very high	Very high	Very high	Very high	Medium	High	Medium
Energy Use	Very high	Very high	Very high	Very high	High	Low	Medium
Land-Use Change	Low-Medium	Low-Medium	Low	Low	Medium/High	High	Medium
Availability of Conventional and Unconventional Oil and Gas	High	High	Medium	Medium	Low	Low	Medium
Pace of Technological Change	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Slow	Medium	Medium
Direction of Technological Change Favoring	Coal	Oil & Gas	Balanced	Non-fossils	Regional	Efficiency & Dematerialization	"Dynamics as usual"

A와 B는 경제(economic)와 환경(environmental) 지향 구분이며 1과 2는 지구(global), 지역(regional)인자를 나타낸다. A1의 시나리오는 전 세계가 경제성장이 급격한 증가와, 인구는 최고점에 이르렀다가 이후 감소하는 추세, 기존보다 더욱더 효율적인 기술도입으로 표현한다. A2는 지속적인 인구증가와 지역적으로 편중된 경제 발전 등으로 표현한다. B1은 A1과 비슷한 인구증가가 금세기 중반에 최고점에 이르렀다가 감소하고 정보경제로 경제 구조가 급격하게 변화하고 자원관리를 효율적인 기술의 도입이 이루어지는 것으로 하고 있다(IPCC, 2001).

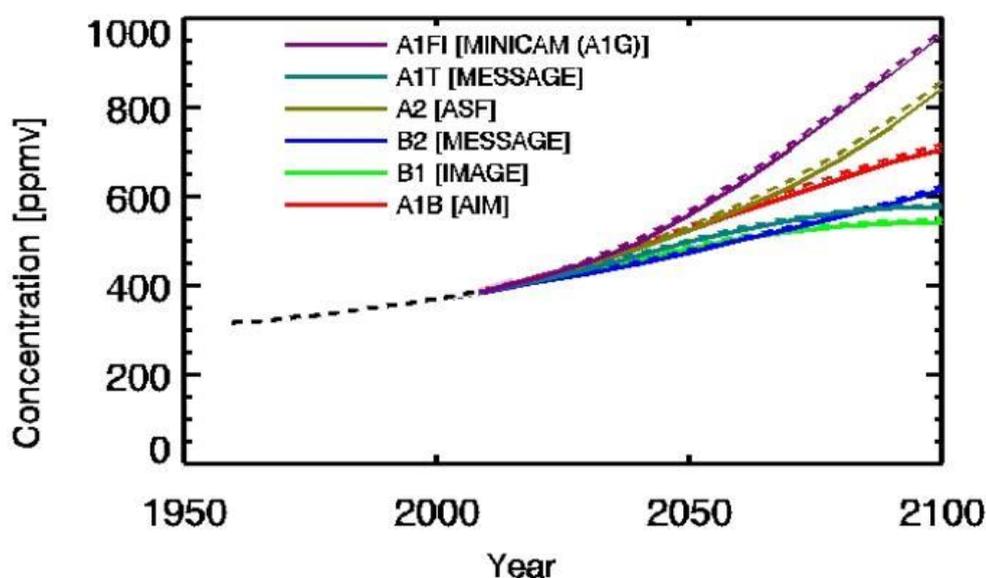


Fig. 2.3 Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations as observed at Mauna Loa from 1958 to 2008 (black dashed line) and projected under the 6 SRES marker and illustrative scenarios(IPCC, 2007).

2014년 IPCC 5차 보고서에서는 RCP(Representative Concentration Pathways) 대표농도로 채택하였다. 5차 보고서는 인간 활동이 대기에 영향을 미치는 복사량인 온실가스 대표농도로 결정하였으며, 복사량에 의해 사회와 경제는 여러 가지로 될 수는 의미로 대표(Representative)로 정의하였다. 대표적인 농도 변화(RCP)에 대한 시나리오를 결정하기 위해 주요한 복사 강제력을 고려한 4개(MES-A2R, AIM, MiniCAM, IMAGE)에서 개별적으로 개발하였으며, 이를 각각 RCP2.6, RCP4.5,

RCP6.0, RCP 8.5으로 구분하였다(Table 2.3).

Table 2.3 Median temperature anomaly over pre-industrial levels and SRES comparisons based on nearest temperature anomaly(IPCC, 2014)

Name	Radiative forcing	CO <sup>2</sup> (p.p.m.)	Temp anomaly (°C)	Rathway	SRES temp anomaly
RCP8.5	8.5 w/m <sup>2</sup> in 2100	940	49	Rising	A1F1
RCP6.0	6 w/m <sup>2</sup> in 2100	670	3.0	Stabilization without overshoot	B2
RCP4.5	4.5 w/m <sup>2</sup> in 2100	540	2.4	Stabilization without overshoot	B1
RCP2.6	3 w/m <sup>2</sup> in 2100	420	1.5	Peak and decline	-

여기서 RCP의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m<sup>2</sup> 지상에 도달되는 태양복사가 약 238 W/m<sup>2</sup> 이므로 RCP 8.5, 6.0, 4.5, 2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당된다.

RCP 2.6은 지구시스템이 기후변화에 대한 회복할 수 있는 한계값으로 정해졌으며, RCP 8.5는 현재 추세로 온실가스가 지속적으로 배출하고 있는 BAU(Business As Usual)으로 설정되었다. Fig. 2.4는 미래 사회구조를 중심으로 산정한 SRES 시나리오와 기후변화 대응과 정책 및 연계를 중심으로 산정된 RCP 시나리오를 비교하였다.

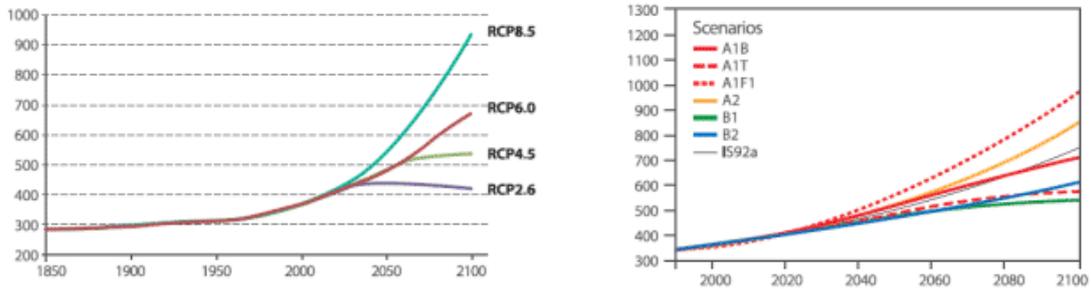


Fig. 2.4 Representative concentration pathways(IPCC, 2014).

온실가스 농도를 기준으로 RCP 8.5 시나리오가 940ppm으로 가장 극단적인 BAU 시나리오이며, 이 후 다원화사회를 대표하여 830ppm으로 정해진 A2 시나리오, 세 번째가 720ppm으로 설정된 A1B 고성장사회 시나리오이다. 어느 정도 온실가스 저감대책이 실현되었을 때 설정된 RCP 6.0 시나리오는 2100년까지의 온실가스 농도가 670ppm으로 사회가 지속 발전하는 시나리오이며, B1 시나리오는 550ppm으로 많은 온실가스 저감정책이 실현된 경우로 540ppm으로 설정한 RCP 4.5 시나리오의 온실가스 농도와 매우 유사하다.

420ppm으로 정해진 RCP 2.6는 지구시스템이 회복이 가능하여 전지구 평균온도의 상승이 2℃ 이하인 경우를 가정하고 있다. RCP 8.5 시나리오와 RCP 2.6 시나리오를 제외하고 RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오의 경우는 기후변화의 대응하기 위한 정책과 실현으로 2007년 이후 기상관측 값의 변화와 온실가스 변화 경향성을 고려한 새로운 시나리오이다.

## 2. 기후변화 시나리오의 혼합상세화

### 2.1 혼합상세화

상세화기법은 역학적 상세화 및 통계적 상세화로 구분되며 여기서 역학적 상세화 기법은 GCM의 결과인 경계조건을 활용하여 지역기후모델을 통해 시나리오를 상세화하는 방법을 통해 공간적인 세분화된 정보를 생성할 수 있다. 또한 역학적 상세화는 물리적인 생산으로 인하여 비선형적 예측과 비정상성을 기초로 하여 자료 생성이 가능하여 급격한 기후변화를 모의할 수가 있다.

그러나 기후자료를 생성하는데 시간 및 비용이 많이 드는 문제점이 있어 앙상블 자료를 생성하기는 쉽지 않고 GCM의 구조적, 모수화 과정 등의 한계로 오차가 발생하는 한계가 나타나게 된다. 통계적 기법은 역학적 기법 대비 많은 시간이 필요하지 않아 사용자가 편하게 사용이 가능하다는 장점이 있으나, 통계적 기법을 적용하기 위해서는 장기간의 신뢰성 있는 기상관측소의 자료가 있어야 한다는 점과 복잡한 지형을 갖는 지역에서는 예측변수 사이에 상관성을 찾기 어렵다는 단점이 있다(정일원, 2007). 따라서 각 기법들의 장·단점을 고려하고 신뢰도 높은 평가 하기 위해 기후모형에 통계적 기법을 적용하여 기후변화 시나리오를 상세화가 필요하다.

혼합상세화는 지역기후모형에 통계적 기법을 적용하고 기후변화 시나리오를 시간적과 공간적으로 상세화하기 위한 통계적 기법은 일반적으로 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 역학적 상세화 기법과 기상발생기(weather generator)를 결합하는 방법, 두 번째는 역학적 상세화기법에 편의보정하는 방법, 세 번째는 역학적 상세화에서 생산된 CF를 이용하여 생산하는 방법이다. 기존 연구에서 많이 사용되고 있는 선형보정기법, 분위사상법을 선택하였다.

### 2.1.1 선형보정방법

선형보정방법은 기후변화 시나리오에서 가장 많이 쓰이는 보편적인 방법으로 이 기법은 기준기간동안 관측치와 모의치의 월별 편차를 계산하여 미래기간에도 같은 편차가 발생한다고 가정하고 미래기간의 모의치에 적용하는 방법이다. 모의된 기후변화시나리오와 관측치의 오차를 월별로 분리하고 산정된 기후변화 시나리오에 적용하게 된다. 기온 식 2.5, 강수량 식 2.6과 같이 관측치와 모의치의 비를 적용하게 된다.

$$T_{fut} = T_{fut.s} + \left( \sum_{i=1}^{ref} T_{obs} - \sum_{i=1}^{ref} T_{ref.s} \right) \quad (2.5)$$

$$P_{fut} = P_{fut.s} \times \frac{\sum_{i=1}^{ref} P_{obs}}{\sum_{i=1}^{ref} P_{ref.s}} \quad (2.6)$$

여기서,  $T_{obs}$ 와  $P_{obs}$  : 기온과 강수량의 관측치,  $T_{fut.s}$ 와  $P_{fut.s}$  : 보정된 미래 기온과 강수량,  $T_{ret.s}$ 와  $T_{fut.s}$  : 모의된 과거기간 및 미래기간의 기온이고,  $P_{ret.s}$ 과  $P_{fut.s}$  : 모의된 과거기간과 미래기간의 강수량

변화량(Change Factor) 기법은 GCM에서 생산된 정보의 경우 불확실성이 많다는 점과 상세화를 많은 단계를 거치게 되면 그 불확실성이 커진다는 것을 전제하여 GCM 정보 중 과거 대비 미래의 변화만을 고려하는 방법이다. 즉, 기준기간과 미래기간의 월별 변화율 및 변화량을 산정하여 과거기간 관측 자료에 그 변화율만큼 적용한 시나리오를 생산하는 방법이다. 모의된 기후시나리오 기준기간과 미래기간의 차이를 월별로 산정하여 식 2.7, 2.8와 같이 과거 관측 자료에 적용하는 방법이다.

$$T_{fut} = T_{obs} + \left( \sum_{i=m}^{fut} T_{fut.s} - \sum_{i=n}^{ref} T_{ref.s} \right) \quad (2.7)$$

$$P_{fut} = P_{obs} \times \frac{\sum_{i=m}^{fut} P_{fut.s}}{\sum_{i=n}^{fut} P_{ref.s}} \quad (2.8)$$

여기서,  $T_{obs}$ 와  $P_{obs}$  : 기온과 강수량의 관측치,  $T_{ref.s}$ 와  $T_{fut.s}$  : 모의된 과거 및 미래기간의 기온,  $P_{ref.s}$ 와  $P_{fut.s}$  : 모의된 과거 및 미래기간의 강수량

## 2.1 분위사상법

분위사상법은 편의보정기법 중에 가장 많이 활용되고 있으며 비 초과확률을 기반으로 한 기후시나리오의 편의보정 기법중 하나이다. GCM의 일단위 강수량과 실측 기상자료의 강수량을 활용하고 확률분포의 누가밀도 함수를 추정하게 되어 일반적인 GCM 및 RCM과 같은 기후모형은 내륙에 도달하는 강수량을 모의하게 아니라 대기에서의 강수량을 예측하기 때문에 오차가 발생하게 된다. 관측 자료에서 강수가 발생하는 비 초과확률 지점을 calibrated threshold라 하고 그 확률 아래의 모의 강수를 무강수로 가정한다. GCM의 임의강수량( $x_i$ )을 식을 통해 보정기후시나리오( $x_i'$ )로 보정한다. 일반적으로 강수량의 확률분포형은 Gumbel 분포의 극치 분포를 이용하고 기온의 경우는 정규분포를 이용한다.

$$x_i' = F_{obs}^{-1}(F_{GCM}(x_i)) \quad (2.9)$$

본 연구에서는 강수량의 확률분포형은 Gumbel 분포를 사용하고 매개변수는 모멘트법을 이용하여 추정하였다. 식 2.10은 Gumbel 분포의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF), 식 2.11은 누적확률밀도함수(Cumulative Density Function, CDF)이다.

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{x-x_0}{a} - \exp\left(-\frac{x-x_0}{a}\right)\right], -\infty < x < \infty \quad (2.10)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{a}\right)\right] = e^{-e^{-y}} \quad (2.11)$$

여기서,  $a > 0$  : 축적매개변수,  $x_0$  : 최대확률이 발생하는 위치

매개변수 추정을 위한 모멘트법을 이용하면 아래 식 2.12, 2.13와 같이 매개변수 산정이 가능하다.

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - 0.5772158\hat{a} = \bar{x} - 0.45s \quad (2.12)$$

$$a = 0.7797s \quad (2.13)$$

여기서,  $\bar{x}$ 와  $s$  : 각각의 표본자료  $x$ 의 평균값 및 표준편차

기온은 정규분포(Gaussian Distribution)를 적용하였으며 정규분포의 확률밀도 함수를 나타내는 식 2.14은 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi^e}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.14)$$

여기서,  $\mu$  : 표본의 평균,  $\sigma$  : 표본의 표준 편차

### 3. SWAT모형

#### 3.1 SWAT모형의 이론

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 산하 농업연구소 (Agricultural Research Service, ARS)에서 Jeff Aronld가 개발한 프로그램으로 이후 지속적인 업그레이드를 통한 개선된 모형이다. SWAT모형 내 모의 수문요소는 수문, 기상, 유사, 토사, 식생, 영양물질, 화학물질, 토지관리 등이다. 수문순환 과정은 NRCS 혹은 Green-Ampt 침투공식을 적용한 토양층에서의 침투, 침루, 증발산, 지하수 순환, 지표하 유출, 지표수 유출, 하도의 저류시설물 요소, 이송 손실 등이다 (Arnold and Foher, 2005; Neitsch et al., 2005).

##### 3.1.1 수문순환의 기본방정식

SWAT모형에서는 토양부분의 물순환 과정을 면밀히 모의하기 위해 물수지 방정식에 근거를 통해 강수, 지표 유출, 기저 유출, 증발산, 지하수 등에 대한 수문반응 단위 별로 모의가 가능하다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} + Q_{surf} - E_a - w_{seep} + Q_{gw}) \quad (2.15)$$

여기서,  $SW_t$  : 최종의 토양수분량(mmH<sub>2</sub>O),  $SW_0$  :  $i$ 일의 초기토양수분량 (mmH<sub>2</sub>O),  $t$  : 시간(일),  $R_{day}$  :  $i$ 일의 강수량(mmH<sub>2</sub>O),  $Q_{surf}$  :  $i$ 일의 지표유출량 (mmH<sub>2</sub>O),  $E_a$  :  $i$ 일의 증발산량(mmH<sub>2</sub>O),  $w_{seep}$  :  $i$ 일의 토양면으로부터의 투수층으로 투수되는 총량(mmH<sub>2</sub>O),  $Q_{gw}$  :  $i$ 일의 회귀수량(mmH<sub>2</sub>O)

### 3.1.2 기상

SWAT에서 필요한 기상 데이터는 일 강수량, 최고·저 온도, 일사량, 풍속 및 상대습도가 필요하며, 이 값들은 관측 자료를 통해 입력 자료로 구축되며 모의를 통해 계산한다. 기상발생기(Weather Generator)은 일 기상자료를 월평균 값들로 각 소유역마다 모의하며, 눈은 일평균 기온을 이용하여 강수량을 강우 또는 진눈깨비 혹은 눈으로 구분한다.

### 3.1.3 수문

강수는 식물의 잎 혹은 가지에 의해 부착되어 차단되거나 지표면에 떨어지며, 지표면의 물은 토양층으로 침투되거나 지표면에서 유출이 발생하게 되고 또한 침투된 물은 토양 내에 흡착, 증발산 되거나 지표수로 천천히 움직인다. SWAT 모형의 HRU(Hydrologic Response Unit)에서 모의되는 물의 이동 경로는 다음 Fig. 2.5과 같다.

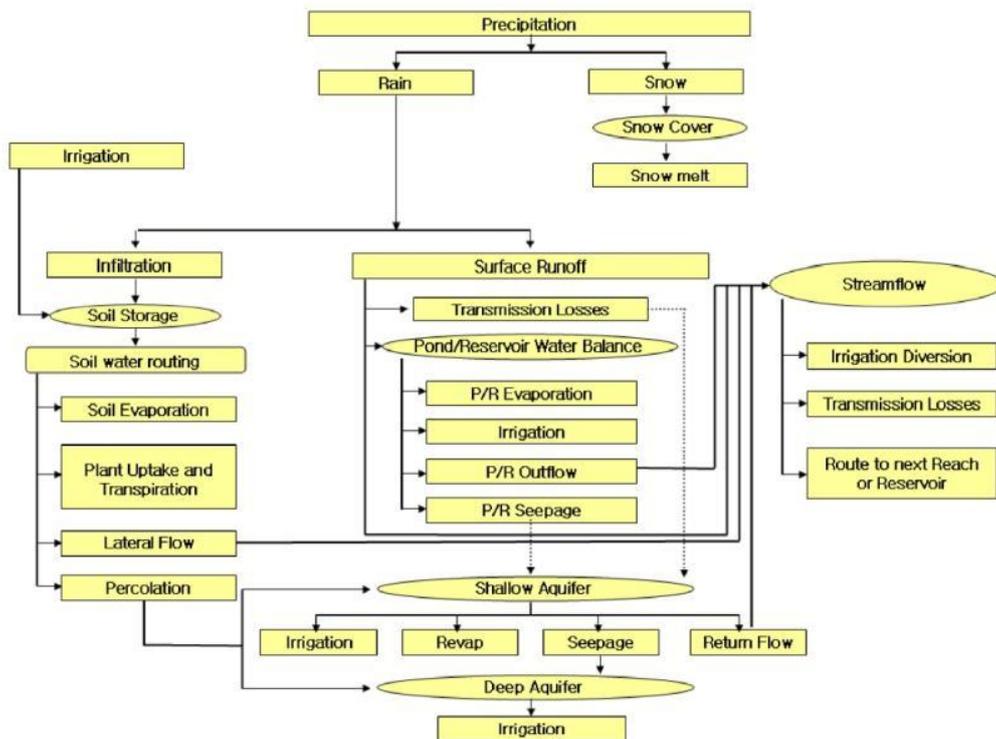


Fig. 2.5 Schematic of Pathways Available for Water Movement in SWAT(Neitsch et al., 2002).

차단저류는 식생의 표면에서 차단된 물이며, 식생표면에서 부착되어 증발하게 된다. SWAT모형에서는 토지피복에 대한 최대엽면적지수의 입력이 가능하도록 되어 있어 이 값과 엽면지수는 모형에서 의해 피복 혹은 작물의 성장 사이클 기간에 대한 최대 저류값을 계산하는데 사용된다. 침투는 토양 표면에서 토양층으로 물이 들어가는 것을 말하며, 초기 침투 속도는 표면에 강우가 유입되기 전의 토양 수분 함량에 영향을 미치게 되고 마지막인 최종 침투 속도는 포화수리전도도(Saturated hydraulic conductivity)와 같아지게 된다. SWAT 모형에서는 Green & Ampt infiltration method를 이용하여 침투를 계산하게 된다.

재배분(Redistribution)은 토양 표면에서 물의 유입이 끝난 후에 토양층을 통한 물의 연속된 이동을 의미하며, SWAT에서는 각 토양층내의 물 흐름을 계산하기 위하여 저류 추적 기법을 사용한다. 연직방향 흐름, 또는 침투는 토양층 포장용수량(Field Capacity)이 초과하였거나 그 아래 토양층이 불포화상태일 때 일어나게 되며, 재배분은 토양 온도에 영향을 받아 특정 토양층의 온도가 0℃ 혹은 그 이하이면 그 토양층에서는 재배분이 일어나지 않는다. 증발산은 지구 표면에서 액체 또는 고체 상의 물이 대기 중의 수증기로 되는 모든 과정에 대한 포괄적인 용어이며, SWAT에서는 토양과 식물로부터의 증발이 Ritchie(1972)에 의해 제안된 식을 통해 구분되어 계산한다. 잠재 토양 수분 증발은 잠재증발산과 엽면적지수의 함수에 의해 추정되며, 실제 토양수분 증발은 토양심과 수분량의 지수함에 의해 산정하게 된다. 식물의 증산은 잠재증발산과 엽면적지수의 선형 함수에 의해 모의하며 SWAT모형에서는 잠재증발산량을 산정하기 위해 가장 주로 사용되고 있는 Penman-Monteith(Monteith, 1965) 방법을 사용하고 있다.

측방 지표하 흐름 혹은 중간유출은 지표면 아래 포화상태의 암석층 상부에서 흘러나는 것으로 토양층에서 측방 지표하 흐름은 지배분에 의해 동시에 계산하게 된다. SWAT 모형에서는 운동과 저류 모형이 개별적인 토양층에서 측방 흐름을 추정하는데 사용된다. 지표유출은 경사진 지표면을 따라 발생하는 흐름을 말하며, 일 또는 시간단위의 강우량을 이용하여 각 HRU에서의 지표 유출량과 침투 유출량을 모의한다.

지표 유출 볼륨(Surface runoff Volume)은 보완된 SCS 유출지수곡선 방법 또는 Green & Ampt 침투 공식을 적용하여 계산한다. 유출지수는 유출이 토양의 수분에

의해 비선형적인 변화가 나타나고 토양 내에 물이 포화되면 100에 가깝게 된다. Green & Ampt 공식은 최소 일단위 강수량을 요구하고 있고 유효수리전도도에 의해 침투는 계산하지 않아 침투하지 못한 물은 지표유출로 된다. SWAT모형은 표층의 토양온도가 0℃ 이하일 때 동결된 것으로 인정하여 이에 따라 지표유출로 발생하게 된다.

### 3.2 지표유출

지표유출은 지표면에서부터 강수량이 침투율 보다 초과할 때 발생하게 되며 모형에서는 지표유출을 산정을 위해 SCS 유출지수곡선법(SCS, 1972) 또는 Green & Ampt 침투법(1911)의 방법을 활용하고 있다.

#### 3.2.1 SCS 유출곡선법

SCS방법은 1950년대부터 주로 사용되는 경험공식으로 다양한 토지이용과 토양형태에서 지표유출을 모의할 위한 신뢰성 높은 기준을 위해 개발되었다(Rallison and Miller, 1981). SCS 유출곡선식은 다음과 같다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day}I_a)}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2.16)$$

여기서,  $Q_{surf}$  : 누가유출량 또는 초과강우(mmH<sub>2</sub>O),  $R_{day}$  : 일 강수량,  $I_a$  : 유출전의 지면저류, 차단과 침투를 포함하는 초기손실(mmH<sub>2</sub>O),  $S$  : 저류 매개변수(mmH<sub>2</sub>O)

저류 매개변수는 토양도, 토지피복도, 지형의 변화에 따라 공간적인 영향을 미치며, 토양수분 변화량에 의해 변화하고 저류매개변수는 다음 식 2.17으로 정의된다.

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2.17)$$

여기서, CN : 일 유출곡선지수,  $I_a$  : 보통 0.2S, 유출은  $R_{day} > I_a$  일 때 발생

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2.18)$$

### 3.2.2 수문학적 토양군

미국 Natural Resource Conservation Service(NRCS)에서는 토양의 침투특성에 따라 토양을 4가지 수문학적 토양군으로 분류하였다. NRCS 토양조사국(1996)에서는 유사한 강우와 토지피복에 의해 비슷한 유출 특성을 나타내고 있는 토양군을 수문학적 토양군으로 정의하였다. 토양은 4개의 토양군(A, B, C, D) 중 하나로 분류된다.

### 3.2.3 선행토양함수조건(AMC)

SCS는 3가지 선행토양함수조건을 정의하였고 I-건조, II-보통습윤, III-습윤으로 구분하여 선행함수조건 중 I에서 유출곡선지수는 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 선행함수조건 I와 III에서의 유출곡선지수는 다음 식 2.19, 2.20에 의해 계산된다.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 X (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 X (100 - CN_2)])} \quad (2.19)$$

$$CN_3 = CN_2 X \exp[0.00673 X (100 - CN_2)] \quad (2.20)$$

여기서,  $CN_1$ ,  $CN_2$ ,  $CN_3$  : 선행함수조건 I, II, III에서의 유출곡선지수

저류 매개변수는 다음 식 2.21에 따라, 토양층의 수분함량에 따라 변한다.

$$S = S_{\max} X \left( 1 - \frac{SW}{SW + \exp(W_1 - W_2 X SW)} \right) \quad (2.21)$$

여기서,  $S$  : 주어진 수분함량(mm)에 대한 저류 매개변수,  $S_{\max}$  : 주어진 날에 얻을 수 있는 매개변수의 최대값,  $SW$  : 위조점에서의 토양층의 수분량을 제외한 전체 토양층의 수분함량(mmH<sub>2</sub>O)

$W_1$ 과  $W_2$ 는 형상계수이며, 최대저류 매개변수인  $S_{\max}$ 는  $CN_1$ 을 이용하여 식 2.17를 이용하여 계산하게 하며 형상계수는 식 2.21을 이용하여 결정하고 다음과 같은 가정을 필요하다.

- 1) 선행함수조건 I에서의 유출곡선지수에 대한 저류 매개변수는 최대 토양 수분함량과 일치한다.
- 2) 선행함수조건 II에서의 유출곡선지수에 대한 저류 매개변수는 토양층의 최대 저류능과 일치한다.
- 3) 토양은 완전히 포화되었을 때 99( $S=2.54$ )의 유출곡선지수를 가지게 된다.

$$W_1 = \ln \left[ \frac{FC}{1 - S_3 X S_{\max}^{-1}} - FC \right] + W_2 X FC \quad (2.22)$$

$$W_2 = \frac{\left( \ln \left[ \frac{FC}{1 - S_3 X S_{\max}^{-1}} - FC \right] \ln \left[ \frac{SAT}{1 - 2.54 X S_{\max}^{-1}} - SAT \right] \right)}{(SAT - FC)} \quad (2.23)$$

여기서,  $W_1$  : 첫 번째 형상계수,  $W_2$  : 두 번째 형상계수,  $FC$  : 포장용수량에서의 토양층 수분함량(mmH<sub>2</sub>O),  $S_3$  : 선행함수조건 III에서의 유출곡선지수에 대한 저류 매개변수,  $S_{\max}$  : 선행함수조건 I에서의 유출곡선지수에 대한 저류 매개변수,  $SAT$  : 완전히 포화되었을 때의 토양층 수분함량(mmH<sub>2</sub>O)

그리고 식 2.23의 값 2.54는 유출곡선지수 99에 대한 저류 매개변수 값이며 토양의 최상부층이 얼었을 때, 저류 매개변수는 다음 식 2.24을 이용하여 수정된다.

$$S_{frz} = S_{max} X [1 - \exp(-0.000862 X S)] \quad (2.24)$$

여기서,  $S_{frz}$  : 결빙상태에서 조정된 저류 매개변수(mm),  $S_{max}$  : 일정한 기간에 이용 가능한 저류 매개변수의 최대값(mm),  $S$  : 식 2.21으로 계산된 수분함량에 대한 저류지 매개변수(mm)

선행토양함수조건인 토양수분함량에 조정된 일 유출곡선지수는 식 2.17을 재해석하고 토양수분함량에 대하여 계산된 저류 매개변수를 대입하여 다음과 같이 계산하게 된다.

$$CN = \frac{25,400}{(S+254)} \quad (2.25)$$

여기서,  $CN$  : 주어진 날에 대한 유출곡선지수,  $S$  : 토양수분을 고려한 저류 관련 매개변수 값

### 3.2.4 경사보정(Slope Adjustment)

선행함수조건 II에서의 유출곡선지수는 약 5%의 경사에 대한 값으로 가정되며, 상이한 경사마다 적용이 가능한 지수를 조정할 수 있다.

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} X [1 - 2 X \exp(-13.86 X slp)] + CN_2 \quad (2.26)$$

여기서,  $CN_{2s}$  : 경사 보정에 가능한 선행함수조건 II에서의 유출곡선지수,  $CN_3$  : 경사 5%에 대한 III의 유출곡선지수,  $CN_2$  : 경사 5%에 대한 II의 유출곡선지수,  $slp$  : 소유역의 평균경사(%)

SWAT모형에서는 경사에 대한 유출곡선지수를 조정하지 않아 사용자가 경사에 대한 유출곡선지수를 조정하기 원하면 입력파일에서 유출곡선지수를 입력하기 전에 조정이 필요하다.

### 3.2.5 유출체적(Runoff Volume)

Green & Ampt 방정식은 전 기간에 대해 지표면에서의 과잉수를 가정하여, 침투를 예측하기 위해 개발되었다(Green & Ampt, 1911). 이 방정식은 토양층이 균질하며, 선행함수는 토양층 내에 균질하게 분포하고 가정하고 있다. 물이 토양 속으로 침투함에 따라 wetting front 위에 토양은 완전히 포화된 것으로 가정하고, wetting front 에서의 토양수분함량에 있어 가파른 변화(sharp break)를 나타낸다. Fig. 2.6은 실제로 발생하는 침투의 양상과 Green & Ampt 방정식에 의한 모형화된 수분의 분포 상이의 차이를 나타내었다.

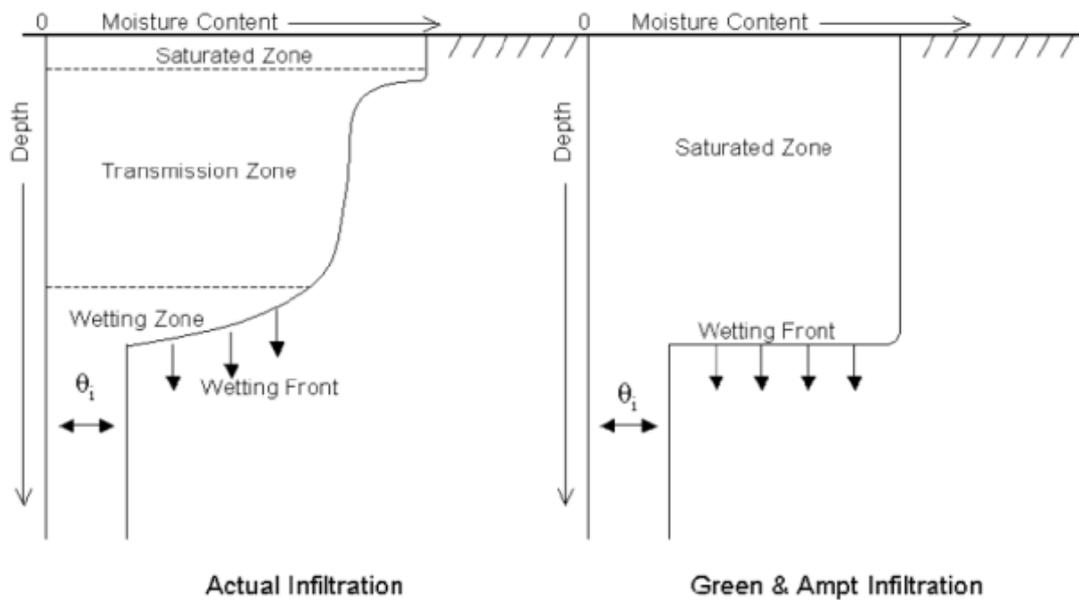


Fig. 2.6 Infiltration profile for the Green & Ampt model.

Green & Ampt Mein-Larson 초과 강수량 방법은 지표유출을 결정하기 위해 SWAT에 포함되었으며, 이 방법은 일단위 이하의 (sub-daily) 강수량자료가 필요하

다.

$$f_{\infty,t} = K_e \cdot \left( 1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty,t}} \right) \quad (2.27)$$

$$F_{\infty,t} = F_{\infty,t-1} + R_{\Delta t} \quad (2.28)$$

여기서,  $F_{\infty,t}$  : 주어진 시간단계에서의 누적 침투량(mm H<sub>2</sub>O),  $F_{\infty,t-1}$  : 전 시간 단계에서의 누적 침투량(mm H<sub>2</sub>O),  $R_{\Delta t}$  : 그 시간 동안의 강우의 총량(mm H<sub>2</sub>O)

침투율은 침투량의 함수이며, 이 침투율은 다시 이전 시간 단계에서의 침투율의 함수가 된다.

$$F_{\infty,t} = F_{\infty,t-1} + K_e \cdot \Delta t + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v \cdot \ln \left[ \frac{F_{\infty,t} + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty,t-1} + \Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v} \right] \quad (2.29)$$

Green & Ampt 유효수리전도도 매개변수,  $K_e$ 는 토양의 포화수리전도도인  $K_{sat}$ 의 절반과 근사하며(Bouwer, 1969), Nearing et al.(1996)은 포화수리전도도와 유출곡선 지수의 함수로서 유효수리전도도를 계산하는 방정식을 개발하였다. 이 방정식의 유효수리전도도에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$K_e = \frac{56.82 \cdot K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 \cdot \exp(0.062 \cdot CN)} - 2 \quad (2.30)$$

여기서,  $K_e$  : 유효수리전도도(mm/hr),  $K_{sat}$  : 포화수리전도도(mm/hr), CN : 유출 곡선지수

### 3.2.6 침투유출율(Peak Runoff Rate)

침투유출율은 주어진 강우사상에서의 최대 유출율이며, 침투유출율은 호우의 침식

능력을 나타내고 유수량 손실을 예측하기 위해 사용된다. 모형에서는 수정 합리식을 활용하고 최대 지표유출량을 산정하게 된다.

합리식은 수로(배수로), 하도와 빗물제어 시스템 등의 설계에 널리 사용되고 있으며, 합리식은 강우강도  $I$ 가  $t = 0$ 에서 시작하여 무한히 연속적이라고 가정하여 강우강도가 도달시간인  $t = t_{conc}$ 일 때까지 증가할 것이다. 전체 소유역 면적이 유역 출구에서의 유출량에 기여한다면, 합리식은 다음과 같다.

$$Q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad (2.31)$$

여기서,  $Q_{peak}$  : 첨두유출량( $m^3/sec$ ),  $C$  : 유출계수,  $I$  : 강우강도( $mm/hr$ ),  $Area$  : 소유역 면적( $Km^2$ ),  $3.6$  : 변환상수

### 3.2.7 도달시간(Time of Concentration)

도달시간은 강우가 시작한 시간부터 전체 소유역 출구까지 흐른 총시간을 말하며, 강우로 인한 유수가 소유역 내의 가장 먼 지점으로부터 유역의 출구까지 도달하는데 소요되는 시간이다. 도달시간은 지표흐름 시간(overland flow time) 즉, 어느 한 유역에서의 가장 긴 지점에서 도달하는 유출량이 발생하는 시간과 하도유출 시간(Channel flow time)인 최상류부의 하도에서 유역 최종점에 도달하는 유출량이 발생하는 시간의 합으로 계산하게 된다.

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (2.32)$$

여기서,  $t_{conc}$  : 소유역에 대한 도달시간(hr),  $t_{ov}$  : 지표유출에 대한 도달시간(hr),  $t_{ch}$  : 하도유출에 대한 도달시간(hr)

### 3.2.8 지표유출 도달시간(Overland Flow Time of Concentration)

지표유출 도달시간인  $t_{ov}$ 는 다음 식을 사용하여 계산된다.

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 \cdot V_{ov}} \quad (2.33)$$

여기서,  $L_{slp}$  : 소유역의 경사길이(m),  $V_{ov}$  : 지표 유출 속도(m/sec), 3600 : 변환 상수

지표 유출 속도는 경사표면 아래로 1 m 폭을 잘라냄으로서 Manning 방정식으로 부터 산정이 가능하다.

$$V_{ov} = \frac{q_{ov}^{0.4} \cdot slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad (2.34)$$

여기서,  $q_{ov}$  : 평균 지표 유출율( $m^3/sec$ ),  $slp$  : 소유역의 평균경사(m/m),  $n$  : 소유역에 대한 Manning의 조도계수

Table 2.4 Manning roughness coefficient by overland flow

Characteristics of Land Surface	Median	Range
Fallow, no residue	0.010	0.008-0.012
Conventional tillage, no residue	0.090	0.060-0.120
Conventional tillage, residue	0.190	0.160-0.220
Chisel plow, no residue	0.090	0.060-0.120
Chisel plow, residue	0.130	0.100-0.160
Fall disking, residue	0.400	0.300-0.500
No till, no residue	0.070	0.040-0.100
No till, 0.5-1 t/ha residue	0.120	0.070-0.170
No till, 2-9 t/ha residue	0.300	
Rangeland, 20% cover	0.600	0.170-0.470
Short grass prairie	0.150	0.100-0.200

### 3.2.9 하도유출 도달시간(Channel Flow Time of Concentration)

하도유출 도달시간인  $t_{ch}$ 는 다음 식을 사용하여 계산된다.

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 \cdot V_c} \quad (2.35)$$

여기서,  $L_c$  : 소유역에 대한 평균유출 하도길이(km),  $V_c$  : 평균하도유속(m/sec),  
3.6 : 변환상수

평균유출 하도길이는 다음 식을 사용하여 산정된다.

$$L_c = \sqrt{L \cdot L_{cen}} \quad (2.36)$$

여기서,  $L$  : 소유역의 가장 먼 지점에서 유역 출구까지의 하도길이(km),  $L_{cen}$  : 하도에서 소유역의 중심까지의 거리(km)

평균유속은 Manning 공식으로부터 산정하게 되며, 사다리꼴 하도에서 측면 경사를 2:1, 바닥의 폭과 높이의 비율을 10 : 1로 가정하게 되면 다음 공식으로 평균 유속을 산정하게 된다.

$$V_c = \frac{0.489 \cdot q_{ch}^{0.25} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad (2.37)$$

여기서,  $V_c$  : 평균하도유속(m/sec),  $q_{ch}$  : 평균하도 유출율( $m^3/sec$ ),  $slp_{ch}$  : 하도경사(m/m),  $n$  : 하도에 대한 Manning의 조도계수

mm/hr의 단위로 나타나는 평균하도 유출율을 표현하기 위해서 다음 식이 사용된다.

$$q_{ch} = \frac{q_o \cdot Area}{3.6} \quad (2.38)$$

여기서,  $q_{ch}$  : 평균하도 유출율(mm/hr),  $Area$  : 소유역 면적( $km^2$ )

평균하도 유출율은 단위면적당 유출율과 연관이 있으며, 이때 단위면적은 1ha.

$$q_{ch} = q_o \cdot (100 \cdot Area)^{-0.5} \quad (2.39)$$

여기서,  $q_o$  : 단위면적당 유출율(mm/hr),  $Area$  : 소유역 면적( $km^2$ )

단위면적당 유출율은 6.35 mm/hr라 가정하면,

$$V_c = \frac{0.317 \cdot Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad (2.40)$$

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad (2.41)$$

여기서,  $t_{ch}$  : 하도유출 도달시간(hr),  $L$  : 가장 먼 지점으로부터 소유역 출구까지의 하도길이(km),  $n$  : 하도에 대한 Manning의 조도계수,  $Area$  : 소유역 면적(km<sup>2</sup>),  $slp_{ch}$  : 하도경사(m/m)

Table 2.5 Manning roughness coefficient by channel flow

Characteristics of Channel	Median	Range
Excavated or dredged		
Earth, straight and uniform	0.025	0.016-0.033
Earth, winding and sluggish	0.035	0.023-0.050
Not maintained, weeds and brush	0.075	0.040-0.140
Natural streams		
Few trees, stones or brush	0.050	0.025-0.065
Heavy timber and brush	0.100	0.050-0.150

### 3.2.10 지표 유출 지체(Surface Runoff Lag)

1일 이상의 도달시간을 나타내는 큰 소유역의 경우에는 지표면 유출의 일부가 그날 주 하도에 도달하게 된다. 지표면 유출은 유출곡선지수 혹은 Green & Ampt 방법으로 계산하고 주 하도에 배출되는 지표면 유출의 총량이 계산하게 된다.

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left( 1 - \exp\left[ \frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (2.42)$$

여기서,  $Q_{surf}$  : 주어진 날에 주 하도로 배출되는 지표 유출량의 총량(mmH<sub>2</sub>O),  
 $Q'_{surf}$  : 주어진 날에 소유역에서의 발생하는 지표 유출량의 총량(mmH<sub>2</sub>O),  $surlag$  :  
 지표면 유출 지체계수,  $t_{conc}$  : 소유역의 도달시간(hr)

$(1 - \exp[-surlag/t_{conc}])$ 은 어떤 날에 구간(reach)에 입력될 수 있는 총 유효수분량의 비율이다. 다음 Fig. 2.7 은  $surlag$ 와  $t_{conc}$ 의 다양한 결과에 대한 유역 출구에서 발생하는 지표 유출의 비율이다. 즉, 주어진 도달시간  $surlag$ 가 감소함으로써 좀 더 많은 수분이 저류하게 되며 지표면 유출은 지체시간이 유출 수문곡선을 완만하게 한다.

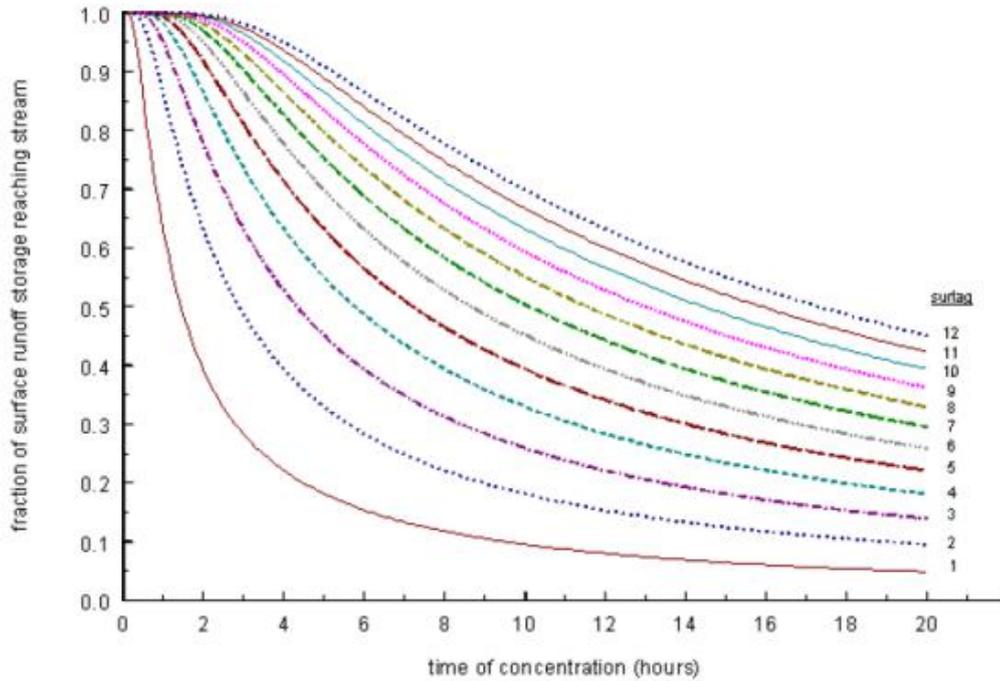


Fig. 2.7 Influence of *surlag* and  $t_{conc}$  on fraction of surface runoff released.

### 3.3 증발산(Evapotranspiration)

지표면에서 있는 물이 수증기로 변환하는 모든 과정을 증발산이라고 하며, 토양 및 식생피복으로 부터의 증발, 증산, 승화 등의 증발을 모두 포함한다. 증발산은 유역에 내린 강수량이 약 62%가 증발산이 된다.

#### 3.3.1 피복저류(Canopy Storage)

식생피복은 침투, 지표유출, 증발산에 중요한 영향을 주는 요소로 강우가 내릴 때 피복차단으로 인한 강우의 침식에너지를 감소시키고, 강우의 일정 부분을 저류시키게 한다. SWAT 모형에서는 피복 저류로 인해 가능 최대 수분량을 엽면적지수의 함수로 일별로 변환하여 계산이 가능하다.

$$can_{day} = con_{day} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (2.43)$$

여기서,  $con_{day}$  : 주어진 일정 기간의 피복에 저류될 수 있는 최대 수분량 (mm/day),  $can_{mx}$  : 식생이 완전히 성장하였을 때 피복에 저류될 수 있는 최대 수분량(mm),  $LAI$  : 주어진 일정 기간의 엽면적 지수,  $LAI_{mx}$  : 주어진 식생의 최대 엽면적지수

### 3.3.2 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration)

잠재증발산(Potential Evapotranspiration; PET)이란 개념은 Thomthwaite(1948)의 의해 처음 도입되었으며, Thomthwaite는 PEI를 무한 토양수분 공급이 가능하고 이류나 열저류 효과가 없어 성장하는 식생으로 인해 균일하게 피복된 넓은 유역으로부터 증발산이 발생하는 비율로 정의하였다. 증발산 비율은 식생 표면에 크게 영향을 미치기 때문에 Penman(1956)은 물 부족이 전혀 없는 상태의 작물에 의해 증산되는 수분량이라고 정의하고 있다. Penman은 기준작물로서 잔디(grass)를 사용하고 있다. PEI를 산정하기 위해 많은 방법들이 개발되었으며, 이중 Penman-Monteith 방법을 사용하였다.

### 3.3.3 Penman-Monteith 방법

Penman-Monteith 방법에는 증발산을 발생하기 위해 수증기인 에너지를 제거를 위한 표면저항, 공기역학저항, 기작의 강도를 산정하기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{*t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (2.44)$$

여기서,  $\lambda$  : 점열강도( $MJm^{-2}d^{-1}$ ),  $E$  : 증발율의 깊이(mm/d),  $\Delta$  : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기  $de/dt$ (kpa/°C),  $H_{*t}$  : 순복사량(net radiation)( $MJm^{-2}d^{-1}$ ),  $G$  :

지열플럭스(heat flux density to the ground)( $MJm^{-2}d^{-1}$ ),  $\rho_{air}$  : 공기밀도( $kg/m^3$ ),  
 $c_p$  : 일정 압력에서의 비열( $MJm^{-2}d^{-1}$ ),  $e_x^o$  : 높이  $z$ 에서의 포화수증기압(kpa),  $e_x$  :  
 높이  $z$ 에서의 수증기압(kpa),  $\gamma$  : 습도상수(the psychrometric constant)(kpa/°C),  $r_c$   
 : 식생피복저항(s/m),  $r_a$  : 대기층의 확산저항(s/m)

### 3.3.4 실제증발산(Actual Evapotranspiration)

잠재증발산이 결정된 이후, 실제증발산이 계산하게 되며, SWAT 모형에서는 식생  
 피복에 의해 차단되는 강우로부터 증발산을 계산하고 Richtie(1972)의 방법과 비슷  
 한 접근법으로 최대 증산량, 최대 승화 혹은 토양 증발량을 계산한다. 그리고 실제  
 승화량과 토양으로부터의 실제증발량이 계산하며 HRU에 눈이 있는 경우는 승화가  
 일어나고 있지 않아 토양으로부터의 증발만 일어나게 하였다.

### 3.3.5 차단된 강우의 증발

피복에 고여 있는 강우(free water)는 쉽게 증발이 되고 차단강우에 의해 기여되  
 는 실제증발량은 차단강우의 증발량이 큰 산림지역의 경우 특히 중요한 부분이다.  
 SWAT 모형에서는 실제 증발량을 산정할 경우 피복저류로부터 가능한 많은 수분  
 을 제거하고 있다. 만약 잠재증발산인  $E_o$ 가 피복에 고인 강우량  $R_{INT}$  보다 적으면,

$$E_a = E_{can} = E_o \quad (2.45)$$

$$R_{f(f)} = R_{f(i)} - E_{can} \quad (2.46)$$

여기서,  $E_a$  : 유역에서 발생하는 실제증발산량( $mmH^2O$ ),  $E_{can}$  : 피복에 고인 강우  
 에 의한 증발량( $mmH^2O$ ),  $E_o$  : 잠재 증발산량( $mmH^2O$ ),  $R_{f(i)}$  : 피복에 남은 최종  
 강우량( $mmH^2O$ )

만약, 잠재증발산량이 피복에 고인 물의 양보다 많으면,

$$E_{can} = R_{f(i)} \quad (2.47)$$

$$R_{f(i)} = 0 \quad (2.48)$$

피복에 고인 물이 일단 증발된 후, 남은 증발 수요량은 식생과 눈, 토양 등으로 할당된다.

### 3.4 토양수(Soil Water)

토양 속으로 들어간 물은 여러 가지의 경로를 따라 이동하게 되며, 식물에 의한 이용 또는 증발에 의해서 소모하게 된다. 토양수는 토양체의 바닥까지 침투되어 대수층에 충전하게 된다. 최종적인 선택은 측방으로 이동하여 하천에서 기여하게 되는 것으로 이런 여러 가지 경로들 중에서 토양으로 들어가는 상당부분의 토양수가 식물체의 의하여 흡수된다.

#### 3.4.1 토양구조(Soil Structure)

토양은 기상, 액상, 고상으로 총 3가지로 분류할 수 있다. 고상은 무기물 혹은 유기물로 구성되고 이는 토양의 형태 또는 구조를 이루고 있다. 토양물질 사이에는 액상과 기상을 보유하는 토양공극이 형성되고 토양용액은 토양공극을 완전히 또는 부분으로 채우게 된다. 토양이 불포화 상태이면 토양의 용액 상태는 입자를 따라 얇은 막이나 입자의 쉼기, 좁은 공극 통로에서 고립체의 형태로 나타난다.

다음 Table 2.6는 수분상태별 수분함량을 세 가지 토성에 대해 나타내고 있고 포화상태에서의 총 공극율은 사토에서 가장 낮고, 점토에서 가장 높다.

Table 2.6 Water contents for various soils at different moisture conditions

Texture	Clay Content (%, Solids)	Water Content		
		Saturation	Field Capacity	Permanent Wilting Point
sand	3%	0.40	0.06	0.02
Loam	22%	0.50	0.29	0.05
Clay	47%	0.60	0.41	0.20

식물의 가용수분은 유효수분량으로 표현하고 포장용수량에서의 수분량의 영구위조점에 수분량의 차이로 계산된다.

$$AWC = FC - WP \quad (2.49)$$

여기서,  $AWC$  : 식물의 유효수분량,  $FC$  : 포장용수량,  $WP$  : 영구위조점에서의 수분량

위 Table 2.6에서 제시된 토성들의 사토는 0.04의 유효수분량을 나타내고 양토 0.24, 점토는 0.21의 값을 나타내고 있다. 이러한 특성은 일반적인 사실이며, SWAT 모형은 각각의 토양층에 대해 수분함량을 추정한다.

$$WP_{ly} = 0.40 \cdot \frac{m_c \cdot \rho_b}{100} \quad (2.50)$$

여기서,  $WP_{ly}$  : 층 부피에 대해 나타낸 영구위조점에서 수분함량,  $m_c$  : 각 층에서의 점토 함양율(%),  $\rho_b$  : 토양층에 대한 용적밀도( $Mg/m^3$ )

토양에서의 물은 포화 또는 불포화상태로 흐르며, 포화토양에서의 흐름은 중력에 의해 유도되고 보통 아랫방향으로 흐른다. 불포화흐름은 수분함량의 고저에 따라 발생하는 경사도(gradient)에 의해 유도되고 불포화흐름은 어떤 방향으로도 발생할 수 있으며, SWAT 모형은 직접적으로 포화흐름만을 추정한다. 모형에서 여러 토양층에 대한 수분함량을 분석하지만, 주어진 토양층에서의 수분함량 분포는 일정하다고 가정하고 있다. 또한, 수평방향으로의 불포화흐름을 산정할 필요가 없어지게 된다. 각각의 토양층 불포화흐름에서는 식물의 수분흡수의 능력 및 증발량에 따라 대략적인 모의하게 된다.

## 2.5 유출 추적(Water routing)

개수로 흐름은 하천에서의 흐름 또는 부분적으로 채워진 파이프흐름처럼, 자유수면을 가진 하도흐름으로 정의된다. SWAT 모형에서는 유속과 유량을 정의하기 위해 Manning 공식을 사용하고 있으며 유출은 Muskingum 하도추적법을 이용하여 하천망을 통해 추적한다. 변동저류추적법과 Muskingum 하도추적법 모두 kinematic wave 모형의 변형들이다.

### 2.5.1 하도특성(Channel characteristics)

SWAT 모형에서는 주하천 및 하도들의 단면을 다음 Fig. 2.8 같이 사다리꼴로 가정한다.

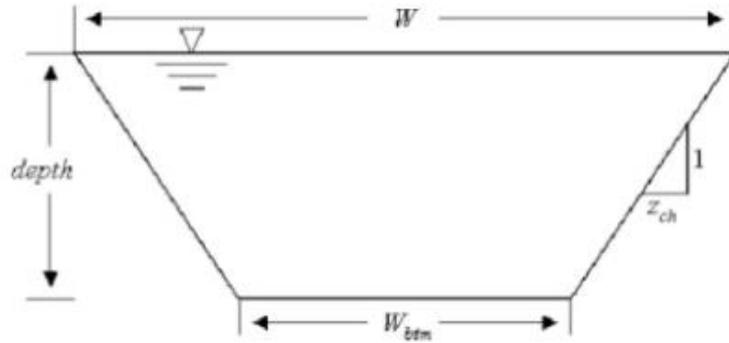


Fig. 2.8 Trapezoidal channel dimensions.

사용자는 하도길이, 하도경사, Manning의 조도계수(n) 뿐만 아니라 만수일 때의 수면폭과 수심을 정의해 주어야 한다. SWAT 모형에서는 하도의 측면경사를 2:1로 가정한다. 또한 바닥폭은 만수시 수면폭과 수심으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$W_{btm} = W_{bnkfull} - 2 \cdot Z_{ch} \cdot depth_{bnkfull} \quad (2.51)$$

여기서,  $W_{btm}$  : 하도의 바닥폭(m),  $W_{bnkfull}$  : 만수시의 수면폭(m),  $Z_{ch}$  : 하도 측면경사의 역수,  $depth_{bnkfull}$  : 만수시의 수심(m)

$$Z_{ch} = \frac{(W_{bnkfull} - W_{btm})}{2 \cdot depth_{bnkfull}} \quad (2.52)$$

주어진 수심에 대해, 수면에서의 하도폭은 다음과 같다.

$$W = W_{btm} + 2 \cdot Z_{ch} \cdot depth \quad (2.53)$$

여기서,  $W$  : 수면에서의 하도폭(m),  $W_{btm}$  : 하도의 바닥폭(m),  $Z_{ch}$  : 하도경사의 역수,  $depth$  : 하도 수심(m)

흐름의 단면적은 다음과 같이 계산한다.

$$A_{ch} = (W_{btm} + Z_{ch} \cdot depth) \cdot depth \quad (2.54)$$

여기서,  $A_{ch}$ : 하도에서의 흐름의 단면적( $m^2$ ),  $W_{btm}$ : 하도의 바닥폭(m),  $Z_{ch}$ : 하도경사의 역수,  $depth$ : 하도수심(m)

## 4. 가뭄심도지수

### 4.1 가뭄의 분류

미국 기상국(U.S Weather bureau)에서 가뭄은 어느 지역의 동·식물 생육에 저해를 가져올 수 있을 정도의 강수의 부족이 매우 심각하게 장기간 지속되는 상태거나 생활용수와 수력발전에 필요한 용수를 정상적으로 확보하지 못한 상태라고 정의하고 있다. 태풍과 홍수와 같은 자연재해 중 가뭄은 상대적으로 국부적이고 한시적인 다른 재해와 달리 가뭄의 특성상 자연재해 시작과 끝이 불명확 하고, 가뭄 피해에 따른 시간과 공간적인 범위 구분이 어려울 뿐만 아니라 가뭄의 심도를 평가하기 위한 그 정의가 매우 다양하여 단순히 한두 단위로 명확한 정의를 내리기 매우 어렵다.

농업적 가뭄(Agricultural drought)은 분명한 농업에 영향을 미치는 가뭄을 의미하며 용수 이용할 수 있는 토양수분량에 관심을 두고 있으며, 수문학적 가뭄(Hydrological drought)은 물의 공급에 관심을 두고 하천유량 또는 저수량 등과 관련된 지수를 사용할 수 있다. 기상학적 가뭄(Meteorological drought)은 정상상태보다 적은 강우의 지속시간 또는 정상보다 높은 기온의 지속기간 등에 관심을 두고 있다.

가뭄에 대한 대부분의 정의는 사용할 수 있는 물의 정상(Normal) 상태보다 상당히 낮게 지속하는 기간이라는 개념을 포함하고 있으며, 이러한 기간은 몇 주, 몇 달이 될 수도 있다. 정상상태보다 상당히 낮다는 개념은 일부 활동이 다른 것에 비

해 물 부족에 매우 민감하기 때문에 상황에 따라 매우 달라가지게 된다.

#### 4.1.1 기상학적 가뭄(Meteorological drought)

우선 일반적인 기상학적 가뭄이란 일반적인 정상상태 즉, 일반적인 혹은 평균적인 상태와 비교하여 건조한 상태 및 건조한 기간에 지속기간을 바탕으로 정의하고 있다. 기상학적 가뭄의 정의에서는 강우의 부족을 초래하는 대기상태는 지역에 따라 상당히 변하기 때문에 특정 지역에 근거하여 고려가 필요하며, 기상학적 가뭄의 정의 중 일부는 특정한 기준보다 작은 강수일수를 바탕으로 가뭄 기간을 정의하고 있다.

#### 4.1.2 농업적 가뭄(Agricultural drought)

농업적 가뭄은 기상학적 가뭄의 다양한 특성을 실제증발산, 토양의 수분, 저수지 수위 등과 같은 농업에 초점을 맞추어 농업적 영향에 연결시키고 있다. 식물의 소요는 기후상태, 식물의 생물학적 특성, 성장단계, 토양의 물리적 및 생물학적 특성에 의존하고 있으며, 농업적 가뭄은 식물의 싹틈에서부터 성장까지 곡물발달 동안 곡물의 다양한 민감성을 반영할 수 있도록 고려가 필요하다.

#### 4.1.3 수문학적 가뭄(Hydrological drought)

수문학적 가뭄은 지표나 지표하 수분인 하천유출, 저수지나 호수위, 지하수 등 공급에 대한 강우 부족기간과 매우 관련이 있다. 수문학적 가뭄과 극심한 가뭄의 정도는 지역단위 규모로 정의되고 있으며 모든 가뭄이 강우의 부족으로 초래되지만 수문학적 가뭄은 물 부족이 어떠한 물순환 시스템의 영향을 미치는지에 대한 초점이 맞추어 지고 있다. 수문학적 가뭄은 단순한 기후뿐만 아니라 토지이용 및 이에 따른 산림훼손, 토양 침식, 댐의 건설과 같은 모든 활용이 유역의 수문학적 특성에 영향을 미치고 있다.

최근 상류지역의 개발에 따른 토지피복 변화는 유출율, 침투와 같은 물순환에 큰

영향을 미치고 있으므로 지표유출을 더욱 증가시키며, 하류부에는 수문학적 가뭄을 발생 빈도를 증가 시키고 있다.

## 4.2 SPI 공식

McKee et al.(1993, 1995)에 의해 개발되었으며 SPI(Standardized Precipitation Index)는 가장 많이 사용되고 있는 가뭄지수이며 가뭄을 분석할 때 가장 쉽게 가장 많이 활용하고 있다. 특정 지역에 대한 장기간의 강수량자료와 비교하여 단기의 강수 부족으로 가뭄을 정의하기 위한 방식으로 확률분포를 이용하여 심도를 정하는 방법이다. 개발 이후 Guttman(1998)에 의해 과거의 Palmer 가뭄지수를 비교하고 검증하여 신뢰성을 증명하였으며, Bhuiyan et al.(2006)은 인도 지역에 SPI를 적용하고 이를 평가하였다.

강수부족이 하천유량, 저수지, 토양, 지하수 등에 많은 영향을 미치고 있으며, 가뭄을 야기한다는 점을 고려한 SPI는 대상지역의 강수량자료만 사용하여 비교적 단순한 과정을 통해 산정이 가능하며 3, 6, 9, 12개월의 장·단기 지속기간의 가뭄 평가가 가능하다. 여기서 단기간 지속기간인 1, 3개월의 SPI는 기상학적 가뭄 및 농업적 가뭄을 위해 이용되며, 장기간 지속기간인 9, 12개월의 SPI는 수자원 공급관리 등 수문학적 가뭄에 활용되고 있다. 비교적 짧은 지속기간에 가뭄 평가를 효과적으로 분석할 수 있으며, 추가적으로 연 단위의 장기적인 가뭄의 평가를 분석하기도 한다. 그러나 통계적인 분석을 위해서 30년 이상의 기상 관측자료가 요구되고 있어 장기간의 관측소 선정이 필수적이다.

SPI 산정 절차는 다음과 같으며, 최초 SPI 산정을 위하여 시간단위별로 누가강수 시계열을 구성한다. 이는 시간단위로 연속적인 중첩을 통해 산정하는 이동 누가 방법 중 하나이다(Fig. 2.9).

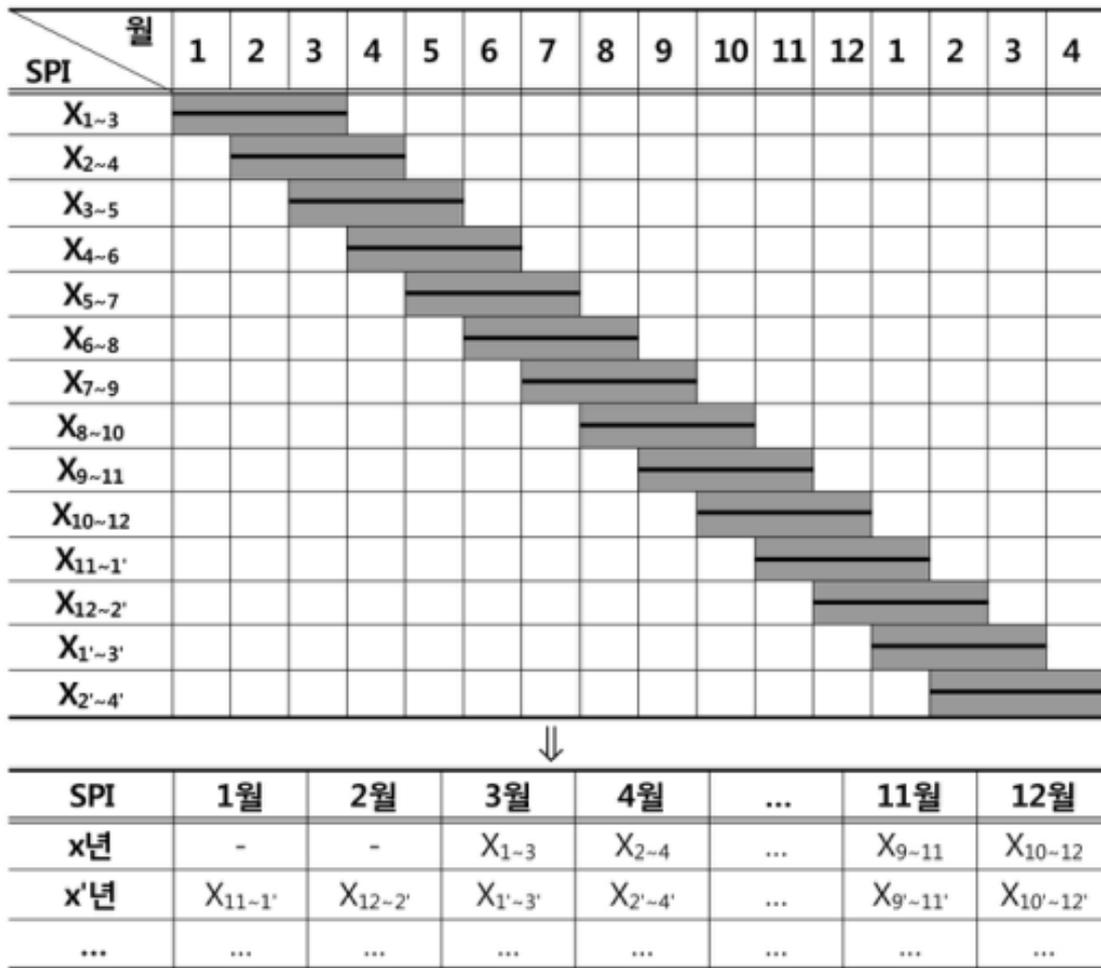


Fig. 2.9 Time series of precipitation mass of SPI 3

또한, 누가강수시계열을 월별로 각각 산정하고 기간에 따른 지속시간별 시계열을 구한다. 월별로 시계열을 분석하고 이에 따른 적절한 확률분포형을 산정하게 되며, 다음 식 2.55의 Gamma 확률분포함수를 사용한다.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/\beta} \quad (2.55)$$

여기서,  $x$  : 강수량,  $a$  : 형상매개변수(Shape parameter),  $\beta$  : 축척매개변수(Scale parameter),  $\Gamma(a)$  : Gamma 함수

각각의 지점과 지속기간인 3개월, 6개월, 9개월, 12개월에 따라 다른 값들이 추정

되며, 추출된 표본자료가 나올 수 있는 확률이 최대가 되도록 매개변수를 선택하는 방법인 최우도법(Maximum Likelihood Method)을 이용하여 추정된다. 식 2.56과 식 2.57에 의하여  $a$ ,  $\beta$ 에 대한 매개변수를 추정할 수 있다.

$$a = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2.56)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{a} \quad (2.57)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (2.58)$$

여기서, A : 식 , n : 입력되는 자료의 수

$\Gamma(a)$ 는 Gamma 함수의 식 2.58과 같이 표현된다.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy \quad (2.59)$$

Gamma 확률분포함수를 이용하여 계산한 매개변수를 각 대상구간의 시간간격에 대하여 누가확률을 계산한다.

$$G(x) = \int_0^{\infty} g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^a \Gamma(\hat{a})} \int_0^x x^{\hat{a}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (2.60)$$

$t = x/\beta$ 로 치환하면 다음 식 2.61으로 표현할 수 있다.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{a})} \int_0^x t^{\hat{a}-1} e^{-t} dx \quad (2.61)$$

Gamma 함수는  $x = 0$ 인 경우에서 정의되지 않지만 강수량의 경우 무강수가 발생하기 때문에  $x = 0$  다음 식 2.62와 같은 혼합 분포형으로 나타낼 수 있다.

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (2.62)$$

여기서,  $H(x)$ 는 누가확률 분포함수이고,  $q$ 는 무강수의 확률로 강우 관측일수에 대한 무강일수의 비로 나타낼 수 있다.

$$q = m/n \quad (2.63)$$

각각의 관측소에 대한 시간위별 누가확률의 평균은 0이며, 분산은 1인 표준정규분포의 임의의 변수로 적용 필요하며, 식 2.64과 식 2.65을 통하여 표준정규분포로 변환된 임의의 변수  $Z$ 가 SPI 지수가 된다.

$$Z = SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.64)$$

$$Z = SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (2.65)$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}, \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.66)$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}, \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.5 \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517 & c_1 &= 0.802853 & c_2 &= 0.010328 \\ d_0 &= 1.432788 & d_1 &= 0.189269 & d_2 &= 0.001308 \end{aligned} \quad (2.68)$$

위와 동일한 방법으로 산정할 수 있는 표준가뭄지수는 총 7개의 분류가 가능하며 습윤 또는 건조의 정도를 나누고 있다. 일반적으로 -1 이하의 값을 가뭄으로 판단

하고, -1.5이하를 극심한 가뭄으로 판단하게 된다. Table 2.7은 SPI의 분류에 따른 가뭄의 정도를 제시하였다.

Table 2.7 Classification of drought intensity using SPI

Classification	Drought Condition
over 2.00	Extremely wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near Normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately dry
-1.50 ~ -1.99	Severe dry
under -2.00	Extremely dry

### Ⅲ. 연구대상 유역 및 기상관측소

#### 1. 연구대상 유역

제주도의 하천은 한라산을 중심으로 남부와 북부지역에 주로 경사가 급하게 분포하고 있으며, 동부와 서부 지역은 사면경사가 완만할 뿐만 아니라 상대적으로 하천의 발달이 미약한 편이다.

본 연구에서는 제주 북부에 위치한 외도천과 남부에 위치한 강정천을 대상으로 기후변화에 따른 유출 특성을 분석하기 위해 연구 대상유역으로 선정하였다(Fig. 3.1). 유역의 하천 유출량 관측 자료는 ‘제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축(MLTMA and KICTEP, 2015)’ 연구결과를 활용하였으며, 2011년 7월부터 2014년 12월까지 최신정밀 관측기기인 ADCP와 SIV를 이용한 현장실측자료를 이용하여 SWAT 모형 보정을 실시하였다.

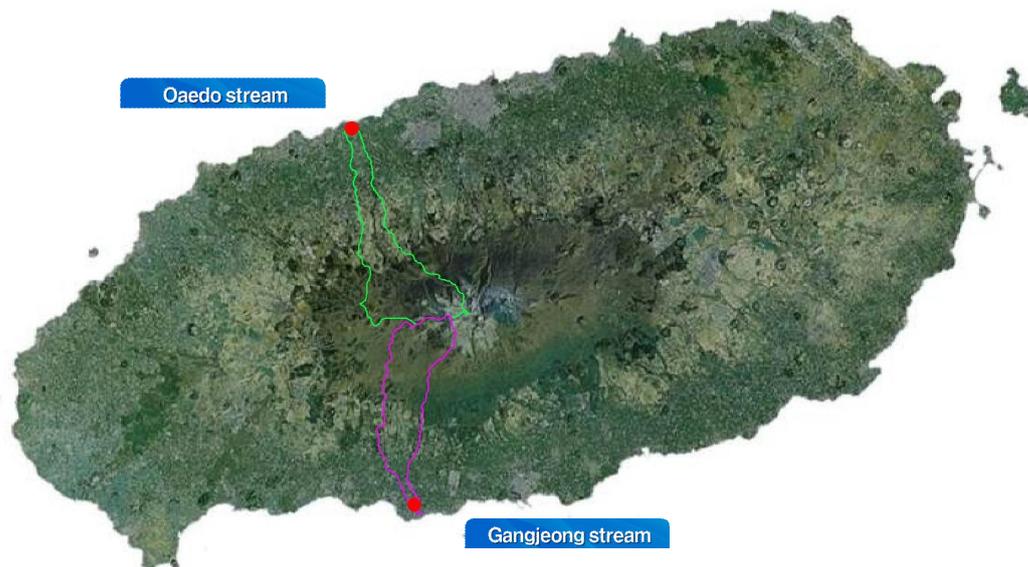


Fig. 3.1 Basins for the study.

## 1.1 유역 형상 및 지형적 특성

연구대상 유역의 지형적 특성을 분석하기 위해 제주도 수치지도(1/5,000)를 이용하여 연구 대상 유역인 면적, 유로연장, 평균폭, 유역형상 등을 GIS 분석을 실시하였다(Table 3. 1). 유역형상은 지도상에 투영된 형태로 지표유출에 큰 영향을 미치고 형상계수가 증가할수록 지표유출이 증가함으로 침투유출량이 증가한다.

외도천 및 강정천은 용천수에 의해 상시 흐름을 형성하는 기저유출 하천으로 외도천 유역의 유역면적은  $41.42 \text{ km}^2$ 으로 산정되었으며, 유로연장  $18.70 \text{ km}$ , 유역평균폭 2.21, 형상계수 0.12, 강정천 유역의 유역면적은  $38.24 \text{ km}^2$ , 유로연장은  $16.63 \text{ km}$ , 유역의평균폭 2.30, 형상계수가 0.14으로 분석되었다.

Table 3.1 Geological features of basin for study

Watershed	Watershed Area ( $\text{km}^2$ )	Stream Length ( $\text{km}$ )	Average width (A/L)	Form factor ( $\text{A/L}^2$ )
Oaedo stream	41.42	18.70	2.21	0.12
Gangjeong stream	38.24	16.63	2.30	0.14

## 1.2 유역의 표고 및 경사 분석

### 1.2.1 외도천 유역

유역의 표고는 강수량 과 증발산량에 영향을 주는 인자이며, 경사는 강우에 의한 침투와 지표면 유출속도, 유출량에 큰 영향을 미치는 유역의 기울기이며, 지표면 유속과 지역적인 바람, 유역의 침식능 등에 의해 영향을 미친다. 외도천 유역의 표고 및 경사 분석을 수행하였다(Fig. 3.2).

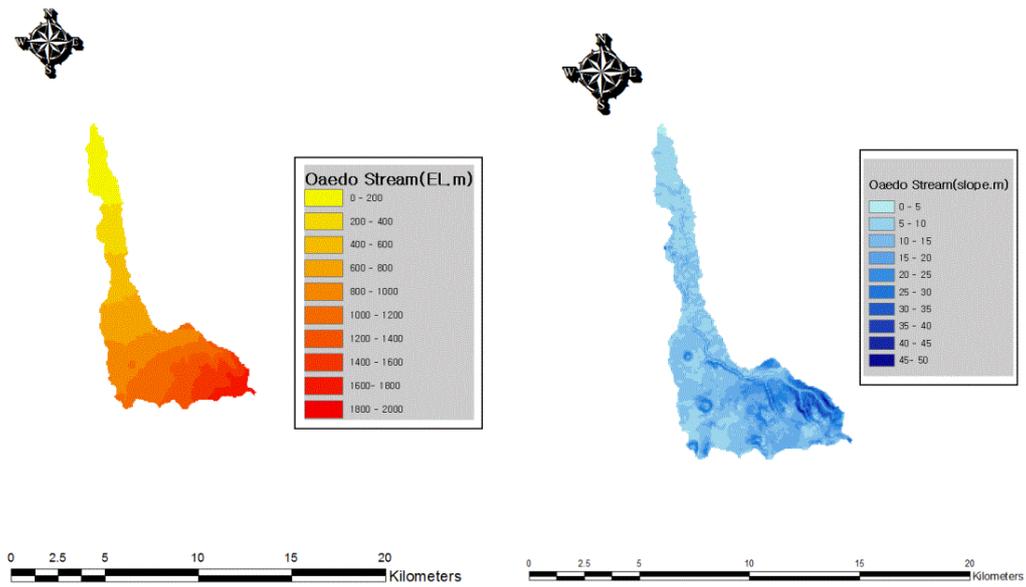


Fig. 3.2 Altitude and slope analysis of Oaedo stream watershed.

외도천 유역의 표고분석 결과, 해발 200 m이하 지역은 유역 전체의 11.03%를 차지하고 있고, 200~600 m 지역은 15.24%, 600~1,000 m 지역은 31.36%, 1,000 m 이상인 지역은 42.36%로 분석되었다(Table 3.2).

Table 3.2 Altitude analysis result of Oaedo Stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
0 ~ 200	4.57	11.03	4.57	11.03
200 ~ 400	3.35	8.09	7.92	19.13
400 ~ 600	2.96	7.15	10.88	26.28
600 ~ 800	5.64	13.62	16.53	39.90
800 ~ 1,000	7.35	17.74	23.87	57.64
1,000 ~ 1,200	7.43	17.94	31.30	75.58
1,200 ~ 1,400	4.82	11.63	36.12	87.21
1,400 ~ 1,600	3.40	8.21	39.52	95.43
1,600 ~ 1,800	1.85	4.47	41.37	99.90
1,800 ~ 2,000	0.04	0.10	41.42	100.00

외도천 유역의 경사 분석 결과를 보면, 5°이하의 평탄지역은 전체면적의 0.54%, 5~10°인 완경사지는 27.43%, 토지의 활용도가 높은 경사 20°이하 지역은 80.98%로 분석되었다(Table 3.3).

Table 3.3 Slope analysis result of Oaedo Stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
0 ~ 5	0.22	0.54	0.22	0.54
5 ~ 10	11.36	27.43	11.59	27.97
10 ~ 15	15.30	36.93	26.88	64.90
15 ~ 20	6.66	16.07	33.54	80.98
20 ~ 25	3.75	9.05	37.29	90.03
25 ~ 30	2.58	6.22	39.86	96.25
30 ~ 35	0.83	2.00	40.69	98.25
35 ~ 40	0.46	1.10	41.15	99.35
40 ~ 45	0.19	0.46	41.33	99.80
45 ~ 50	0.08	0.20	41.42	100.00

## 1.2.2 강정천 유역

동일한 방법을 이용하여 강정천 유역의 표고 및 경사 분석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 3.3과 같다.

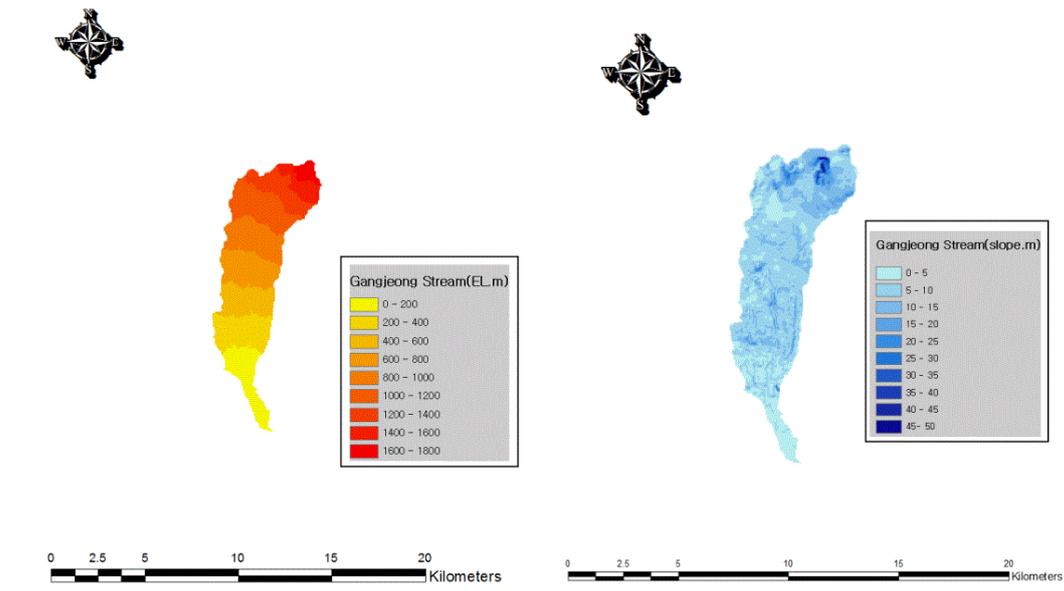


Fig. 3.3 Altitude and slope analysis of Gangjeong stream watershed.

강정천 유역의 표고분석 결과, 해발 200 m이하 지역은 유역 전체의 12.18%를 차지하고 있고, 200~600 m 지역은 25.97%, 600~1,000 m 지역은 27.48%, 1,000 m이상인 지역은 34.37%로 분석되었다(Table 3.4).

Table 3.4 Altitude analysis result of Gangjeong Stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
0 ~ 200	4.66	12.18	4.66	12.18
200 ~ 400	5.34	13.95	9.99	26.14
400 ~ 600	4.60	12.02	14.59	38.16
600 ~ 800	5.21	13.64	19.81	51.79
800 ~ 1,000	5.29	13.84	25.10	65.64
1,000 ~ 1,200	5.99	15.67	31.09	81.30
1,200 ~ 1,400	3.86	10.11	34.96	91.41
1,400 ~ 1,600	2.18	5.70	37.13	97.11
1,600 ~ 1,800	1.11	2.89	38.24	100.00

강정천 유역의 경사 분석 결과를 보면, 5°이하의 평탄지역은 전체면적의 21.09%, 5~10°인 완경사지는 52.45%, 토지의 활용도가 높은 경사 20°이하 지역은 97.37%로 분석되었다(Table 3.5).

Table 3.5 Slope analysis result of Gangjeong Stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 ( $km^2$ )	비율 (%)	누적 유역면적 ( $km^2$ )	누적 비율 (%)
0 ~ 5	8.07	21.09	8.07	21.09
5 ~ 10	20.06	52.45	28.13	73.55
10 ~ 15	7.45	19.48	35.57	93.02
15 ~ 20	1.66	4.35	37.24	97.37
20 ~ 25	0.55	1.44	37.79	98.81
25 ~ 30	0.24	0.62	38.02	99.43
30 ~ 35	0.10	0.27	38.13	99.70
35 ~ 40	0.04	0.11	38.17	99.81
40 ~ 45	0.04	0.10	38.21	99.91
45 ~ 50	0.03	0.09	38.24	100.00

## 2. 기상관측소 선정

제주도의 관측소는 총 24개의 관측소가 설치·운영되고 있어 관측밀도는 높은 편이다. 과거 경향성을 분석하기 위해 최소 30년 이상의 장기간 기상관측 자료가 필요하다(Semenov and Barrow, 2002). 따라서 Fig. 3.4과 같이 제주, 서귀포, 성산, 고산의 4개 관측소를 선정하여 30년 이상의 실측 강수량 자료를 이용하였다. 그러나 고산기상대는 관측년수가 최대 28년으로 30년 미만이지만 제주도의 지역적(북부, 남부, 서부, 동부) 기후변화 특성을 분석하기 위하여 금회 연구대상 관측소에 포함하였다(Table 3.6).



Fig. 3.4 Location map of weather stations used in study.

Table 3.6 Specification of weather stations

Weather station	Latitude	Longitude	E.L. (m)
Jeju	33° 30' 51.0''	126° 31' 46.7''	20.5
Seogwipo	33° 14' 46.0''	126° 33' 55.2''	47.0
Seongsan	33° 23' 13.6''	126° 52' 48.7''	17.8
Gosan	33° 17' 37.7''	126° 09' 61.1''	71.5

## 2.1 기상관측소 경향성 분석

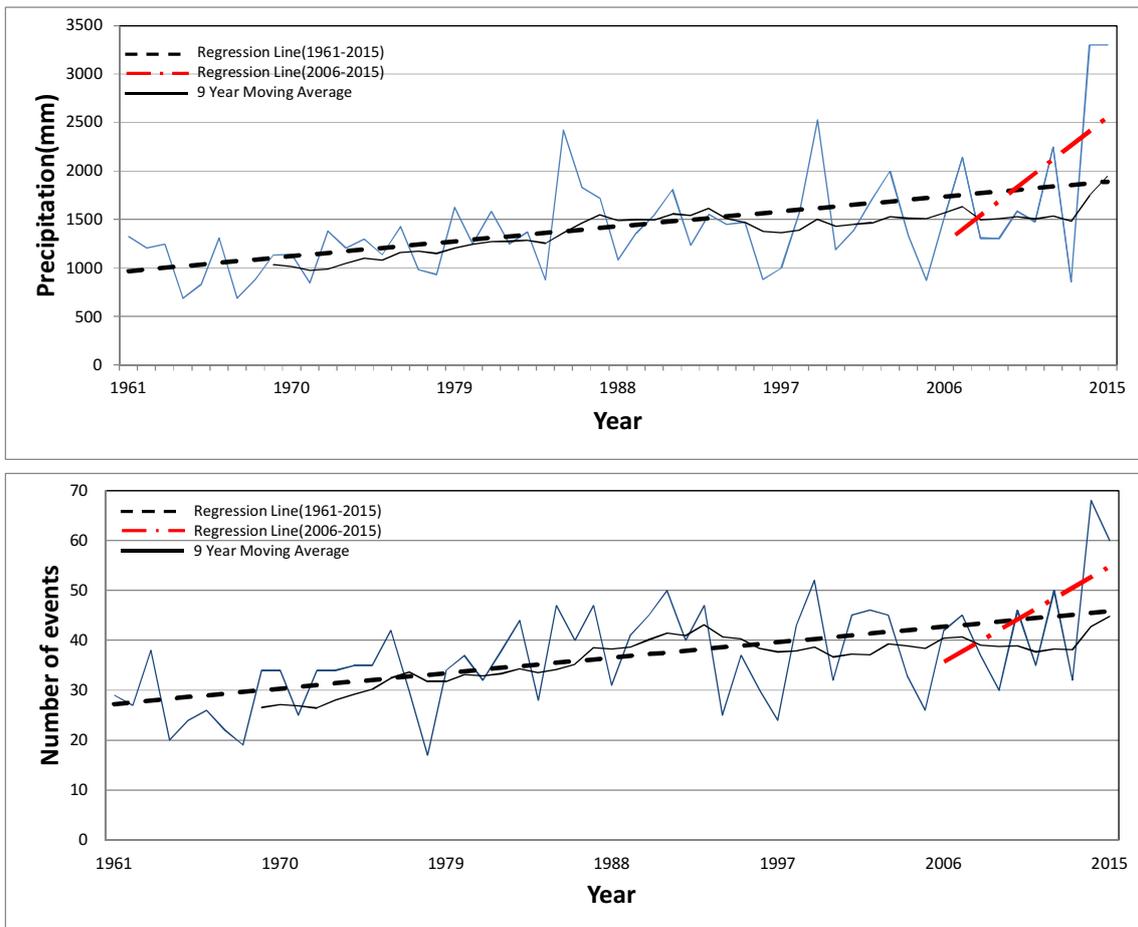
우선 기후변화에 따른 기상 변동성을 분석하기 위해 과거의 경향성 분석을 실시하였으며, 강수량자료는 4개의 기상대의 일강수량 자료를 관측시점부터 2014년까지 수집하였다. 최근 10년(2005 ~ 2014)간 각 지역(제주, 서귀포, 성산, 고산)의 관측소의 강수량자료를 사용하여 최근 기후지표들의 변동성을 가지는 의미를 평가하기 위해 제주, 서귀포기상대는 총 54년(1961 ~ 2014), 성산기상대 42년(1973 ~ 2014), 고산기상대 28년(1988 ~ 2014)간의 장기 경향성 분석을 통해 변화추세를 비교·검토하였다.

제주기상대의 연강우량의 변동은 최근 10년간의 기율기가 총 54년간 기율기 대비 약 771% 이상 증가하고 있으며, 상위 90% 크기의 일강수량을 초과하는 강우일수의 기율기는 511% 이상 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3.5(a)). 이는 2014년의 태풍 및 호우발생이 과거년도에 비해 급격한 증가으로 인한 영향으로 다소 과대하게 산정한 것으로 보인다.

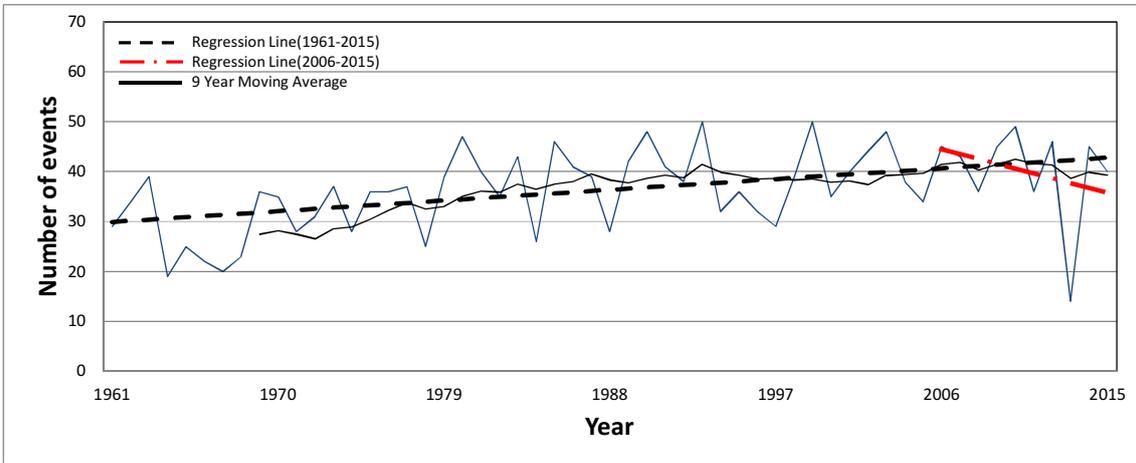
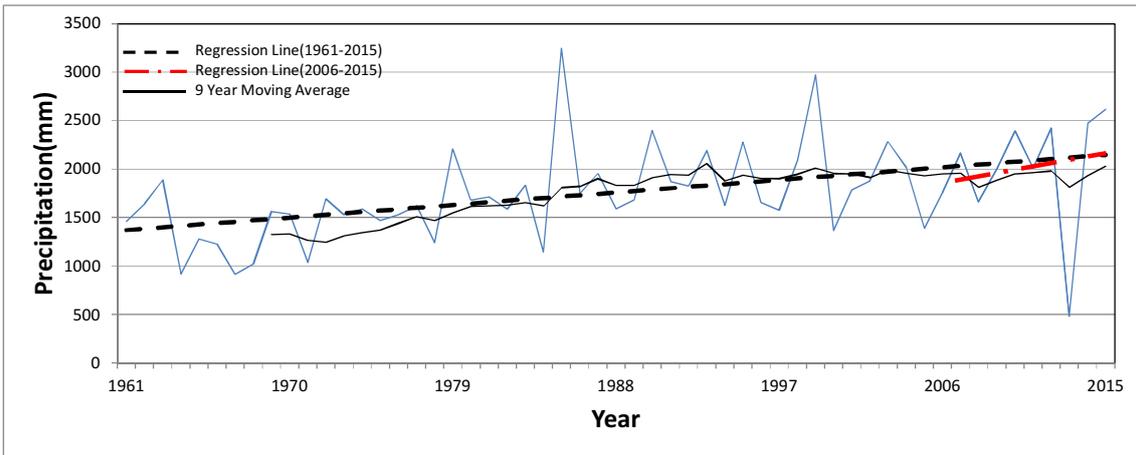
서귀포기상대는 최근 강우량의 기율기가 기존에 비해 104% 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 상위 90% 크기인 일 강수량을 초과하는 강우일수 기율기는 기존 기율기보다 483% 정도로 감소하고 있어(Fig. 3.5(b)) 이는 제주관측소와는 대조를 보이고 있다.

성산기상대는 최근 10년간의 기율기가 총 기간 대비 93% 정도 감소하고 있으며,

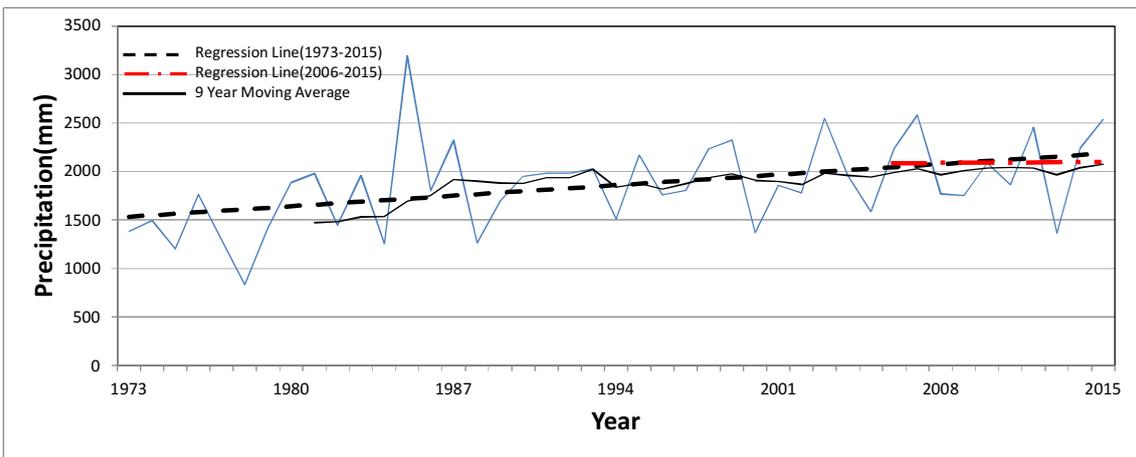
상위 90% 크기의 일강수량을 초과하는 강우일수 기울기는 기존보다 79% 정도 증가하는 것으로 나타났으며(Fig. 3.5(c)), 고산기상대는 최근 강우량의 기울기가 기존에 비해 41% 정도 증가하는 것으로 나타났으나, 상위 90% 크기인 일 강수량을 초과하는 강우일수 기울기는 기존보다 34% 정도로 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 3.5(d)). 각 지역(북부, 남부, 동부, 서부)의 기상대 모두 최근 강우량은 증가하고 있지만 관측소별 강수량의 변화 경향상은 서로 상이하게 나타나고 있다.

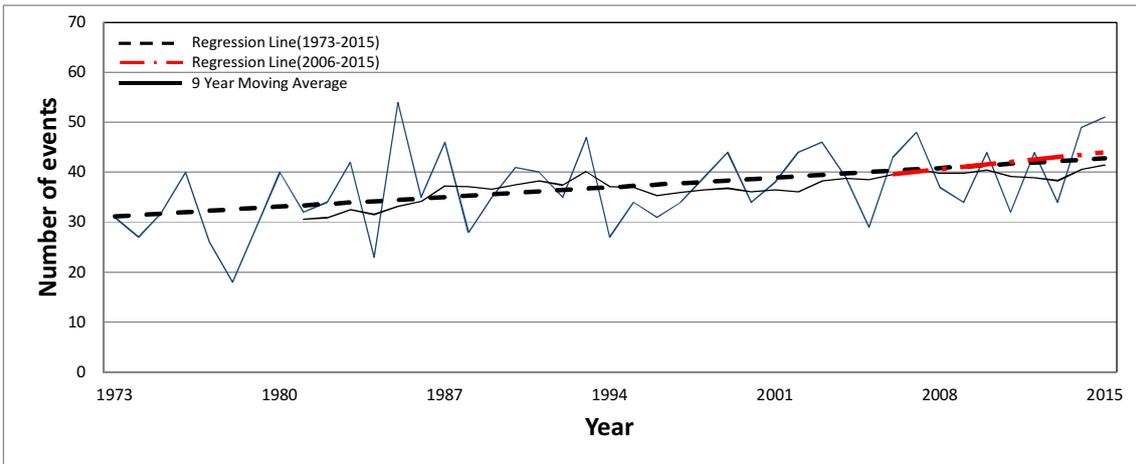


(a) Jeju weather station

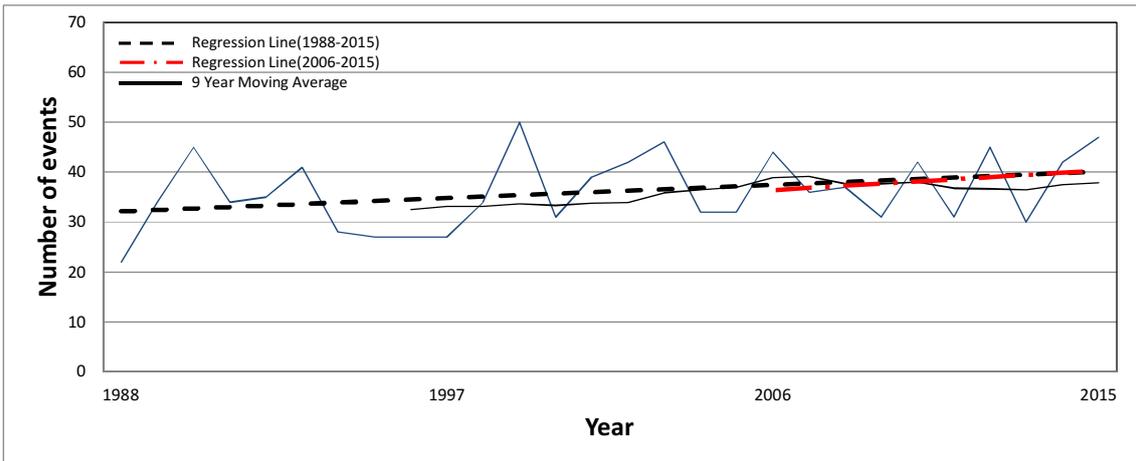
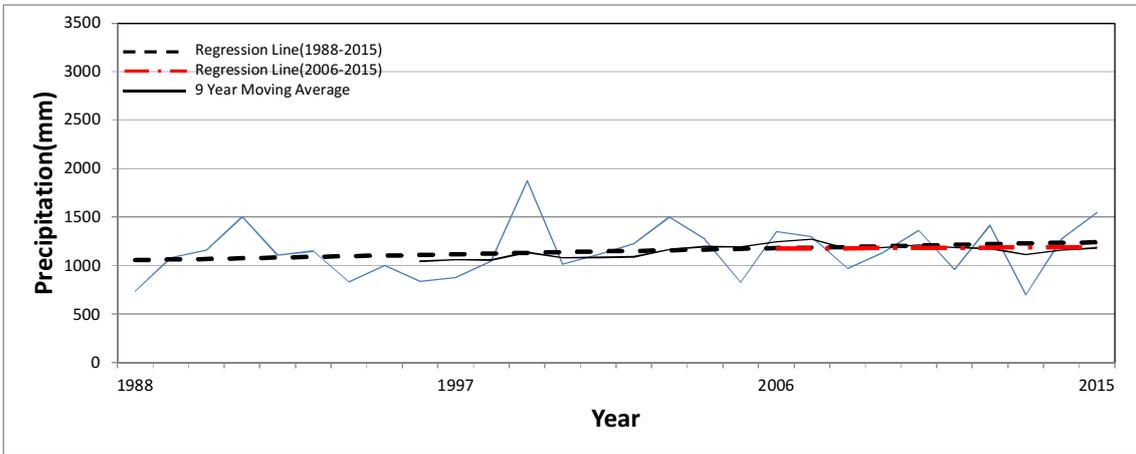


(b) Seogwipo weather station





(c) Seongsan weather station



(d) Gosan weather station

Fig. 3.5 Trend of mean and extreme rainfall index.

## IV. 기후변화 시나리오의 상세화

### 1. 기후변화 시나리오

기후변화로 인한 수자원 영향분석을 위해서는 우선 기후변화시나리오를 구축해야 하며, 기후변화 영향을 효과적인 분석을 위해서는 기초 자료인 수문 입력 자료의 정확한 추정이 기후변화 관련 연구에서는 가장 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기상청의 기후정보포털에서 제공하고 있는 기후변화시나리오는 전지구 기후모델(HadGEM2-AO)에 인위적 기후변화 강제력을 적용한 전지구 기후변화 시나리오와 지역 기후모델(HadGEM3-RA)를 적용한 시나리오를 이용하였다.

일반적으로 GCM과 같은 기후모형은 내륙에 도달하는 강수량을 모의하는 모형이 아닌 대기에서의 강수량을 추정하기 때문에 실제 강수량에 비해 다소 적은 강수량이 과다하게 추정하게 된다. 따라서 기후모형으로 적용된 기후변화 시나리오를 이용하여 여러 단계로 가공하고 모형의 입력 자료로 사용하기 위해 혼합상세화 중 분위사상법을 통해 기후변화시나리오를 상세화하였다(Fig. 4.1).

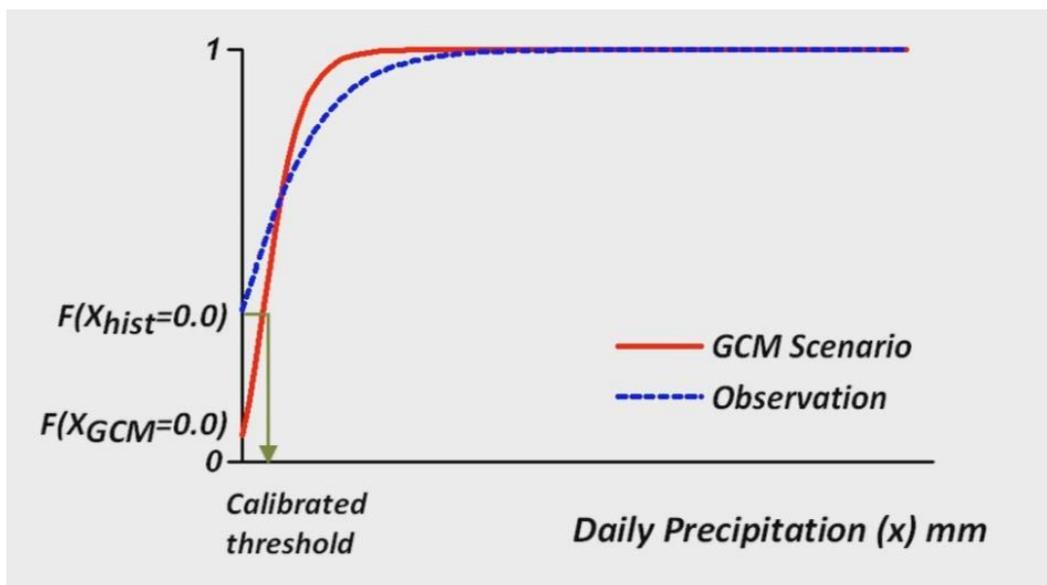
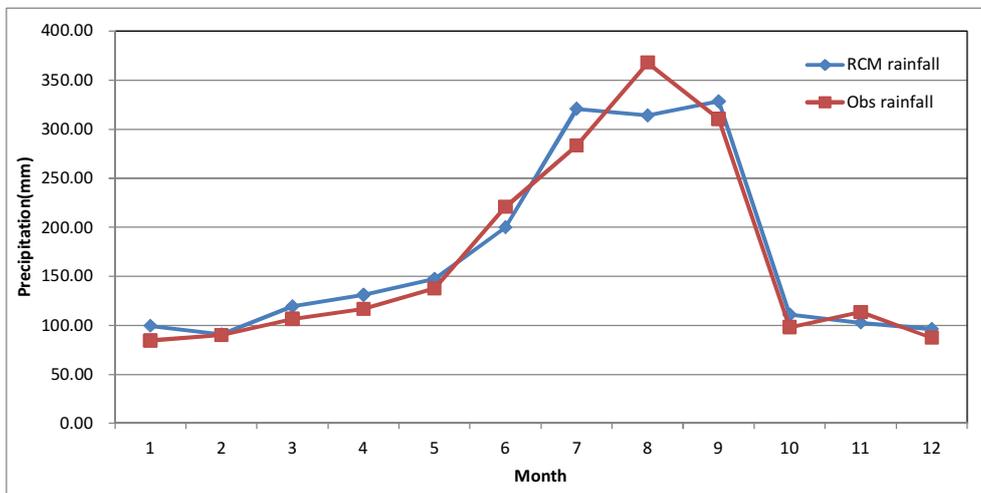


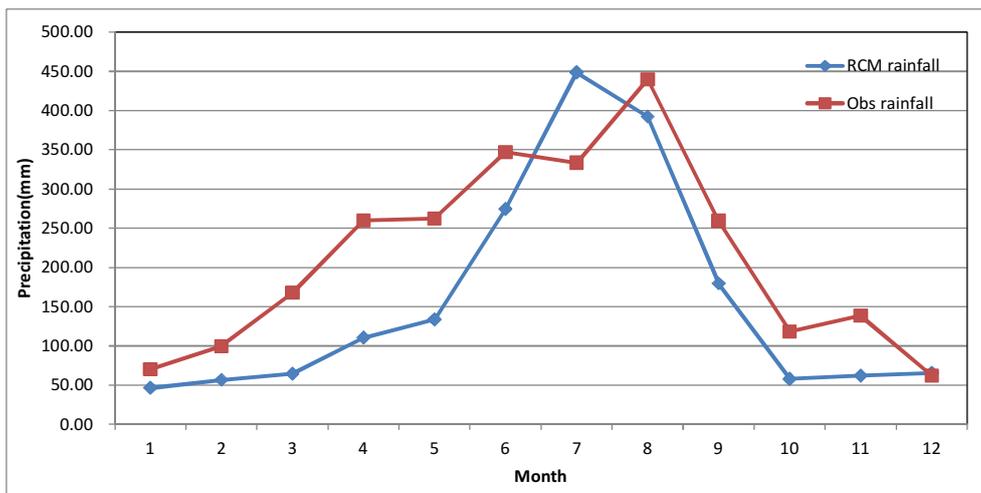
Fig. 4.1 Wet-Dry Day Correction(Bae, 2013)

## 2. 강수량자료 상세화

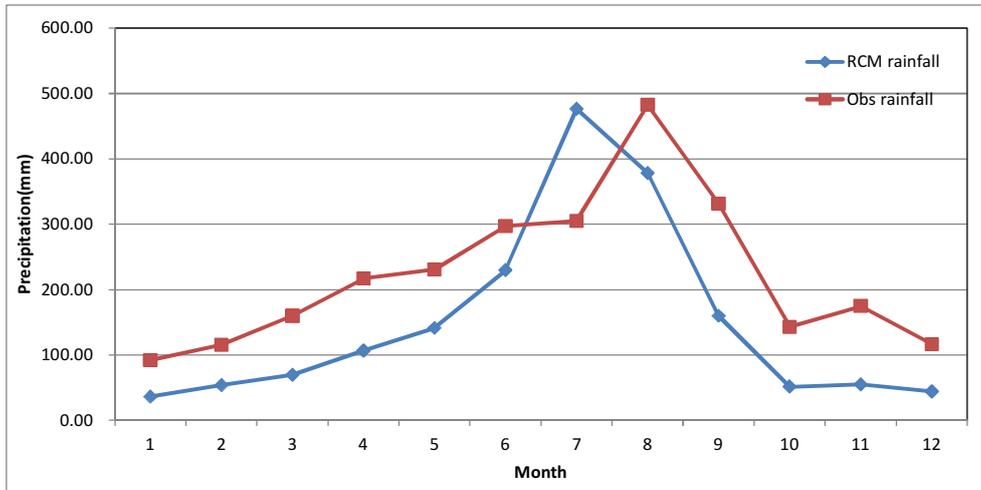
본 연구에서는 미래 수문해석을 분석하기 위해 지역 기후시나리오의 편의보정 신뢰성을 검토하기 위해 검·보정기간으로 나누어 평가하고, 결정된 매개변수를 통해 미래 기후시나리오에 적용하였다. 다음 그림은 각 기상대의 강수량 자료와 기상청에서 제공하고 있는 기후변화 시나리오의 월 평균 강수량자료를 비교하였다(Fig. 4.2, Table 4.1).



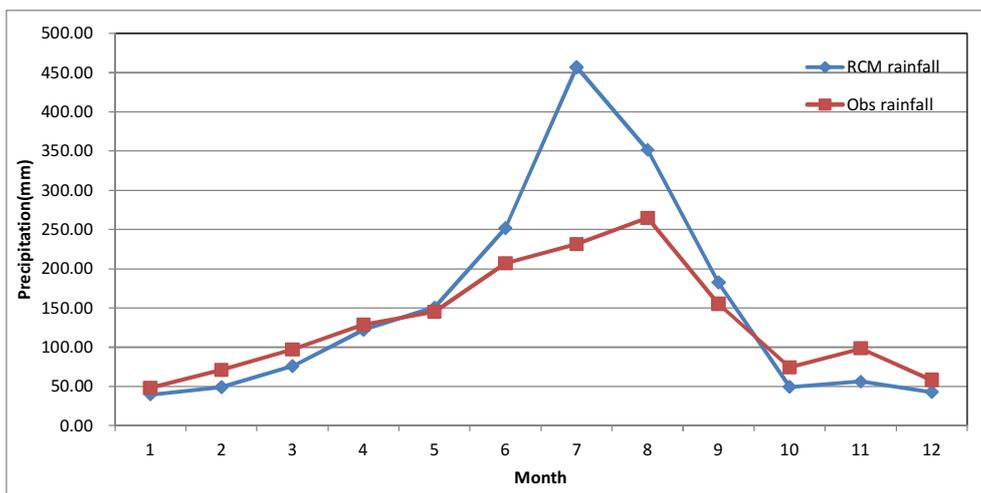
(a) Jeju weather station



(b) Seogwipo weather station



(c) Seongsan weather station



(d) Gosan weather station

Fig. 4.2 Monthly differences between observed and GCM

Table 4.1 Results of monthly mean precipitation of weather stations

month	Jeju weather station			Seogwipo weather station		
	Obs.	GCM	Error(%)	Obs.	GCM	Error(%)
Jan	84.43	99.52	-17.87	70.58	46.46	34.17
Feb	90.12	90.82	-0.78	99.63	56.59	43.20
mar	106.62	119.55	-12.13	167.61	64.49	61.52
Apr	116.54	131.03	-12.43	259.99	110.50	57.50
May	137.66	147.34	-7.03	262.46	133.74	49.04
Jun	220.74	200.03	9.38	346.86	274.38	20.90
Jul	283.36	320.83	-13.22	333.47	448.82	-34.59
Aug	367.83	314.01	14.63	440.00	392.26	10.85
Sep	310.38	328.36	-5.79	259.38	179.62	30.75
Oct	98.14	110.96	-13.06	118.65	57.83	51.26
Nov	113.67	102.72	9.63	138.34	62.17	55.06
Dec	87.33	96.26	-10.23	62.17	65.33	-5.08

month	Seongsan weather station			Gosan weather station		
	Obs.	GCM	Error(%)	Obs.	GCM	Error(%)
Jan	92.09	36.23	60.66	48.08	39.58	17.68
Feb	115.58	53.79	53.46	70.98	49.13	30.78
mar	159.90	69.63	56.45	96.96	75.79	21.83
Apr	217.15	106.70	50.86	129.12	122.27	5.31
May	231.05	141.31	38.84	145.28	150.59	-3.66
Jun	297.13	229.90	22.63	207.10	251.63	-21.50
Jul	305.48	476.71	-56.05	231.64	456.96	-97.27
Aug	482.49	378.27	21.60	264.69	351.51	-32.80
Sep	331.93	159.88	51.83	155.20	182.63	-17.67
Oct	142.93	51.56	63.93	74.31	49.28	33.68
Nov	174.78	55.14	68.45	98.34	56.23	42.82
Dec	116.88	44.27	62.12	58.32	42.73	26.73

기후변화 시나리오와 실측 강수량의 제주 기상관측소의 경우가 가장 경향성이 비슷하게 나타났으나, 고산기상관측소인 경우는 실측 강수량 대비 97%로 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 제주도의 한라산의 지형적인 특성과 계절 및 월별로 각각 상의하여 각 관측소마다 월별로 모의된 기후변화 시나리오 및 관측치를 활용하여 상세화 기법을 수행하였다(Table 4.2 ~ 4.5).

강수량의 확률분포형은 Gumbel 분포를 사용하하고 매개변수는 모멘트법을 이용하여 추정하였다. 식 4.1의 Gumbel 분포 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)과 식 4.2의 누적확률밀도함수(Cumulative Density Function, CDF)이다.

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{x-x_0}{a} - \exp\left(-\frac{x-x_0}{a}\right)\right], \quad -\infty < x < \infty \quad (4.1)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{a}\right)\right] = e^{-e^{-y}} \quad (4.2)$$

여기서,  $a > 0$  : 축적매개변수,  $x_0$  : 최대확률이 발생하는 위치

매개변수 추정을 위한 모멘트법을 이용하면 아래 식 4.3, 4.4와 같이 매개변수 산정을 실시하였다.

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - 0.5772158\hat{a} = \bar{x} - 0.45s \quad (4.3)$$

$$a = 0.7797s \quad (4.4)$$

여기서,  $\bar{x}$ 와  $s$  : 각각의 표준자료  $x$ 의 평균값 및 표준편차

다음 Table 4.2 ~ 4.5는 각 관측소별 월 평균, 표준편차를 선정하고, 이를 이용하여 축적매개변수인  $a$ , 최대확률이 발생하는 위치의  $x_0$ 를 산정하였다.

Table 4.2 Statistical analysis of monthly precipitation of Jeju weather station

	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
			raw	curtailed	corrected		
Jan	Mean rainfall, mm	2.0427419	2.4076613	2.3665323	2.2731243		
	S.D., mm	6.2600374	5.9720072	5.987098	6.1711913		
	$\alpha$	4.8809512	4.656374	4.6681403	4.8116779		
	X0	-0.774275	-0.279742	-0.327662	-0.503912	0.4334383	0.554
Feb	Mean rainfall, mm	2.3924779	2.4110619	0.6114286	2.3581336		
	S.D., mm	5.9687721	6.1626881	6.1626881	5.9822894		
	$\alpha$	4.6538516	4.8050479	4.8050479	4.6643911		
	X0	-0.29347	-0.362148	-2.161781	-0.333897	0.3989463	0.044
mar	Mean rainfall, mm	2.5794355	2.8923387	2.8820565	2.8256461		
	S.D., mm	7.3140504	7.0989302	7.1029102	7.2155483		
	$\alpha$	5.7027651	5.5350359	5.5381391	5.625963		
	X0	-0.711887	-0.30218	-0.314253	-0.421351	0.4200831	0.486
Apr	Mean rainfall, mm	2.9135417	3.2758333	3.2589583	3.2190013		
	S.D., mm	8.5407071	8.2696744	8.2759885	8.4216703		
	$\alpha$	6.6591894	6.4478651	6.4527883	6.5663763		
	X0	-0.929777	-0.44552	-0.465237	-0.57075	0.4245508	0.552
May	Parameter	Obs	GCM			calibrated	Threshold

		r	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
	Mean rainfall, mm	3.3304435	3.5647177	3.5548387	3.4726001	threshold	for present GCM curtailment
	S.D., mm	11.705003	11.724026	11.726936	11.66214		
	$\alpha$	9.1263907	9.1412233	9.143492	9.0929708		
	X0	-1.936808	-1.711094	-1.722282	-1.775363	0.4493413	0.329
	Parameter	Obs	GCM				
	r		raw	curtailed	corrected		
Jun	Mean rainfall, mm	5.5185417	5.0008333	5.0008333	5.44422	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	14.693714	13.604195	13.604195	14.72116		
	$\alpha$	11.456689	10.607191	10.607191	11.478089		
	X0	-1.09363	-1.121054	-1.121054	-1.180302	0.40614	0.000
	Parameter	Obs	GCM				
	r		raw	curtailed	corrected		
Jul	Mean rainfall, mm	6.8554435	7.7620968	7.6756048	7.4912089	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	20.981372	19.907001	19.938756	20.743056		
	$\alpha$	16.359175	15.521489	15.546248	16.173361		
	X0	-2.586174	-1.196054	-1.296836	-1.843166	0.4280255	1.353
	Parameter	Obs	GCM				
	r		raw	curtailed	corrected		
Aug	Mean rainfall, mm	8.8989919	7.5969758	7.5330645	9.9964973	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	26.383358	17.983141	18.00853	25.940769		
	$\alpha$	20.571104	14.021455	14.041251	20.226018		
	X0	-2.973519	-0.495437	-0.570774	-1.676849	0.4226477	1.600
Sep	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present
	r						

		raw	curtailed	corrected				
	Mean rainfall, mm	7.759375	8.2089583	8.1425	8.4454514	GCM curtailment		
	S.D., mm	30.393843	27.506155	27.525105	30.195751			
	$\alpha$	23.69808	21.446549	21.461325	23.543627			
	X0	-5.917855	-4.168812	-4.243797	-5.142636		0.4603632	1.277
Oct	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	r		raw	curtailed	corrected			
	Mean rainfall, mm	2.3743952	2.6844758	2.6629032	2.6777652			
	S.D., mm	8.0159594	7.4662974	7.4735003	7.909999			
	$\alpha$	6.2500436	5.8214721	5.8270882	6.1674263			
X0	-1.232787	-0.675358	-0.700172	-0.881734	0.4457671	0.566		
Nov	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	r		raw	curtailed	corrected			
	Mean rainfall, mm	2.8416667	2.5679167	2.5608333	3.0058972			
	S.D., mm	8.7754291	7.2516337	7.2540427	8.7179237			
	$\alpha$	6.8422021	5.6540988	5.6559771	6.7973651			
X0	-1.107276	-0.695319	-0.703486	-0.917168	0.4324691	0.302		
Dec	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	r		raw	curtailed	corrected			
	Mean rainfall, mm	2.1127016	2.3288306	2.3231855	2.1698325			
	S.D., mm	5.5377547	5.8063041	5.8084827	5.5149821			
	$\alpha$	4.3177873	4.5271753	4.528874	4.3000316			
X0	-0.379288	-0.284006	-0.290632	-0.311909	0.4086338	0.219		

Table 4.3 Statistical analysis of monthly precipitation of Seogwipo weather station

	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
			raw	curtailed	corrected		
Jan	Mean rainfall, mm	1.7074597	1.1239919	1.1169355	1.8829304		
	S.D., mm	5.6345081	3.1518039	3.154134	5.5734597		
	$\alpha$	4.393226	2.4574615	2.4592783	4.3456265		
	X0	-0.828069	-0.29432	-0.302425	-0.625127	0.4450487	0.225
Feb	Mean rainfall, mm	2.6449115	1.5024336	1.5022124	2.7645921		
	S.D., mm	9.3301835	4.9595498	4.9596147	9.2941754		
	$\alpha$	7.2747441	3.8669609	3.8670116	7.2466686		
	X0	-1.553671	-0.729364	-0.729614	-1.417787	0.4508284	0.150
mar	Mean rainfall, mm	4.0550403	1.5602823	1.5586694	4.3601242		
	S.D., mm	12.48387	4.3355397	4.3361023	12.375031		
	$\alpha$	9.7336733	3.3804203	3.380859	9.6488115		
	X0	-1.562701	-0.390711	-0.392577	-1.20864	0.4304286	0.187
Apr	Mean rainfall, mm	6.4997917	2.7625	2.7625	6.4997917		
	S.D., mm	19.322111	8.4521476	8.4521476	19.322111		
	$\alpha$	15.06545	6.5901395	6.5901395	15.06545		

	X0	-2.195158	-1.040966	-1.040966	-2.195158	0.4237162	-0.037	
			GCM					
	Parameter	Obs	raw	curtailed	corrected			
May	Mean rainfall, mm	6.3497984	3.2356855	3.2328629	6.8532836	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	S.D., mm	19.927616	9.0957531	9.0967298	19.750394			
	$\alpha$	15.537563	7.0919587	7.0927202	15.399382			
	X0	-2.617629	-0.857403	-0.860666	-2.034394	0.4319113	0.383	
				GCM				
	Parameter	Obs	raw	curtailed	corrected			
Jun	Mean rainfall, mm	8.6714583	6.8595833	6.8595833	8.6714583	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	S.D., mm	22.484151	32.714043	32.714043	22.484151			
	$\alpha$	17.530892	25.50714	25.50714	17.530892			
	X0	-1.446409	-7.861736	-7.861736	-1.446409	0.4002892	0.000	
				GCM				
	Parameter	Obs	raw	curtailed	corrected			
Jul	Mean rainfall, mm	8.0677419	10.858468	10.81754	8.4532607	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	S.D., mm	20.689031	25.060957	25.077986	20.525937			
	$\alpha$	16.131238	19.540028	19.553305	16.004073			
	X0	-1.242322	-0.418963	-0.467553	-0.783411	0.3984571	1.207	
				GCM				
	Parameter	Obs	raw	curtailed	corrected			
Aug	Mean rainfall, mm	10.645161	9.490121	9.4542339	11.60941	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment	
	S.D., mm	27.528425	20.238326	20.254326	27.095645			
	$\alpha$	21.463913	15.779822	15.792298	21.126474			
				GCM				
				GCM				

	X0	-1.74263	0.3828745	0.3397872	-0.58363	0.3994232	1.738
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Sep	Mean rainfall, mm	6.4845833	4.4904167	4.48625	6.8684339	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	22.054705	13.829255	13.83057	21.932056		
	$\alpha$	17.196053	10.78267	10.783695	17.100424		
	X0	-3.440034	-1.732748	-1.737506	-3.000991	0.4431068	0.487
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Oct	Mean rainfall, mm	2.8705645	1.3989919	1.3866935	3.3484296	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	11.811433	4.6282683	4.6316287	11.670397		
	$\alpha$	9.2093747	3.6086608	3.6112809	9.0994086		
	X0	-2.444581	-0.683729	-0.697539	-1.903249	0.4683297	0.313
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Nov	Mean rainfall, mm	3.4585417	1.5541667	1.5470833	4.2227665	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	12.783948	4.3505841	4.3528734	12.518113		
	$\alpha$	9.9676441	3.3921504	3.3939354	9.7603729		
	X0	-2.294235	-0.403596	-0.41171	-1.410384	0.4554497	0.411
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Dec	Mean rainfall, mm	1.5040323	1.5806452	1.5522177	1.861044	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	5.1754767	3.8653379	3.8753866	5.0364191		
	$\alpha$	4.0353192	3.0138039	3.0216389	3.926896		
	X0	-0.824932	-0.158757	-0.191706	-0.405345	0.451508	0.532

Table 4.4 Statistical analysis of monthly precipitation of Seongsan weather station

	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
			raw	curtailed	corrected		
Jan	Mean rainfall, mm	2.2280242	0.8766129	0.8766129	2.2280242		
	S.D., mm	6.5485414	2.9163311	2.9163311	6.5485414		
	$\alpha$	5.1058978	2.2738634	2.2738634	5.1058978		
	X0	-0.718819	-0.435736	-0.435736	-0.718819	0.4266331	-0.071
Feb	Mean rainfall, mm	3.0683628	1.4280973	1.4280973	3.0683628		
	S.D., mm	9.0890687	4.7350636	4.7350636	9.0890687		
	$\alpha$	7.0867469	3.6919291	3.6919291	7.0867469		
	X0	-1.021718	-0.702681	-0.702681	-1.021718	0.4258759	-0.118
mar	Mean rainfall, mm	3.8685484	1.6846774	1.68125	4.1757845		
	S.D., mm	11.581442	4.5175088	4.5187322	11.468011		
	$\alpha$	9.0300503	3.5223016	3.5232555	8.9416081		
	X0	-1.3431	-0.348202	-0.352179	-0.98482	0.4264309	0.215
Apr	Mean rainfall, mm	5.42875	2.6675	2.6675	5.42875		
	S.D., mm	14.153514	8.5311284	8.5311284	14.153514		
	$\alpha$	11.035495	6.6517208	6.6517208	11.035495		

	X0	-0.940331	-1.171508	-1.171508	-0.940331	0.4025098	-0.544
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
May	Mean rainfall, mm	5.5899194	3.41875	3.4169355	5.9279535	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	16.139949	9.0459875	9.0466577	16.013265		
	$\alpha$	12.584318	7.0531565	7.053679	12.485543		
	X0	-1.673058	-0.651944	-0.65406	-1.278016	0.4195464	0.342
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Jun	Mean rainfall, mm	7.4283333	5.7475	5.7475	7.4283333	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	18.430493	15.617248	15.617248	18.430493		
	$\alpha$	14.370256	12.176769	12.176769	14.370256		
	X0	-0.865389	-1.280262	-1.280262	-0.865389	0.3925752	0.000
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Jul	Mean rainfall, mm	7.3905242	11.533266	11.260685	8.8407545	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	20.058428	21.695394	21.823928	19.346435		
	$\alpha$	15.639556	16.915898	17.016117	15.084415		
	X0	-1.635768	1.770339	1.4399178	0.1348589	0.4086274	3.648
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Aug	Mean rainfall, mm	11.673185	9.1516129	9.075	13.001456	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	28.738129	17.696899	17.733425	28.087653		
	$\alpha$	22.407119	13.798272	13.826752	21.899943		

	X0	-1.258973	1.1880083	1.0949587	0.3620119	0.3901775	2.025
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Sep	Mean rainfall, mm	8.298125	3.9970833	3.973125	9.121105	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	25.841791	10.493722	10.502311	25.537873		
	$\alpha$	20.148844	8.1819548	8.1886522	19.911879		
	X0	-3.330681	-0.725091	-0.752915	-2.370938	0.4302281	0.668
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Oct	Mean rainfall, mm	3.4580645	1.247379	1.247379	3.4234947	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	12.065519	4.4126669	4.4126669	12.075325		
	$\alpha$	9.407485	3.4405564	3.4405564	9.415131		
	X0	-1.971419	-0.738321	-0.738321	-2.010402	0.4482664	0.019
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Nov	Mean rainfall, mm	4.369375	1.3785417	1.3777083	4.7182767	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	14.005755	3.9759583	3.9762372	13.885751		
	$\alpha$	10.920287	3.1000547	3.1002722	10.82672		
	X0	-1.933215	-0.41064	-0.411598	-1.530311	0.4359977	0.167
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		
Dec	Mean rainfall, mm	2.8278226	1.0709677	1.0709677	2.8278226	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	8.6081024	3.5303023	3.5303023	8.6081024		
	$\alpha$	6.7117374	2.7525767	2.7525767	6.7117374		
	X0	-1.045823	-0.517668	-0.517668	-1.045823	0.4303923	-0.048
	Parameter	Obs	GCM				
			raw	curtailed	corrected		

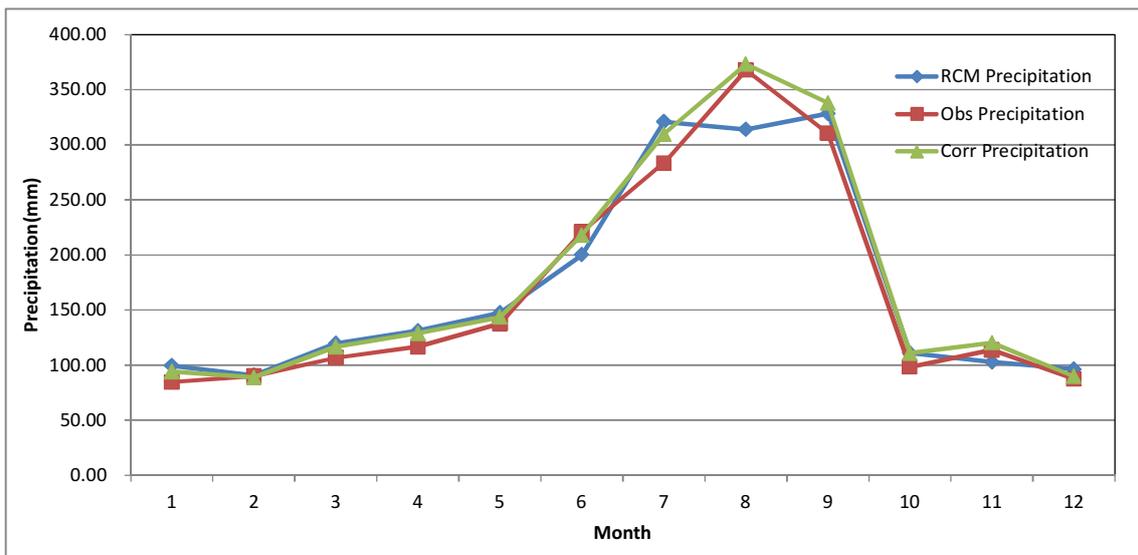
Table 4.5 Statistical analysis of monthly precipitation of Gosan weather station

	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
			raw	curtailed	corrected		
Jan	Mean rainfall, mm	1.1633065	0.9574597	0.9574597	1.1633065		
	S.D., mm	3.5427582	3.6183685	3.6183685	3.5427582		
	$\alpha$	2.7622886	2.8212419	2.8212419	2.7622886		
	X0	-0.430935	-0.670806	-0.670806	-0.430935	0.4381758	-0.129
Feb	Mean rainfall, mm	1.8845133	1.3042035	1.3042035	1.8845133		
	S.D., mm	5.7306837	4.8272513	4.8272513	5.7306837		
	$\alpha$	4.4682141	3.7638078	3.7638078	4.4682141		
	X0	-0.694294	-0.86806	-0.86806	-0.694294	0.4329475	-0.199
mar	Mean rainfall, mm	2.3457661	1.8336694	1.8336694	2.3457661		
	S.D., mm	6.8755945	5.9537354	5.9537354	6.8755945		
	$\alpha$	5.3609011	4.6421275	4.6421275	5.3609011		
	X0	-0.748251	-0.845512	-0.845512	-0.748251	0.425856	-0.111
Apr	Mean rainfall, mm	3.2279167	3.0566667	3.0566667	3.2279167		
	S.D., mm	9.0959127	9.6652314	9.6652314	9.0959127		
	$\alpha$	7.0920831	7.5359809	7.5359809	7.0920831		
	X0	-0.865244	-1.292687	-1.292687	-0.865244	0.4177994	-0.267

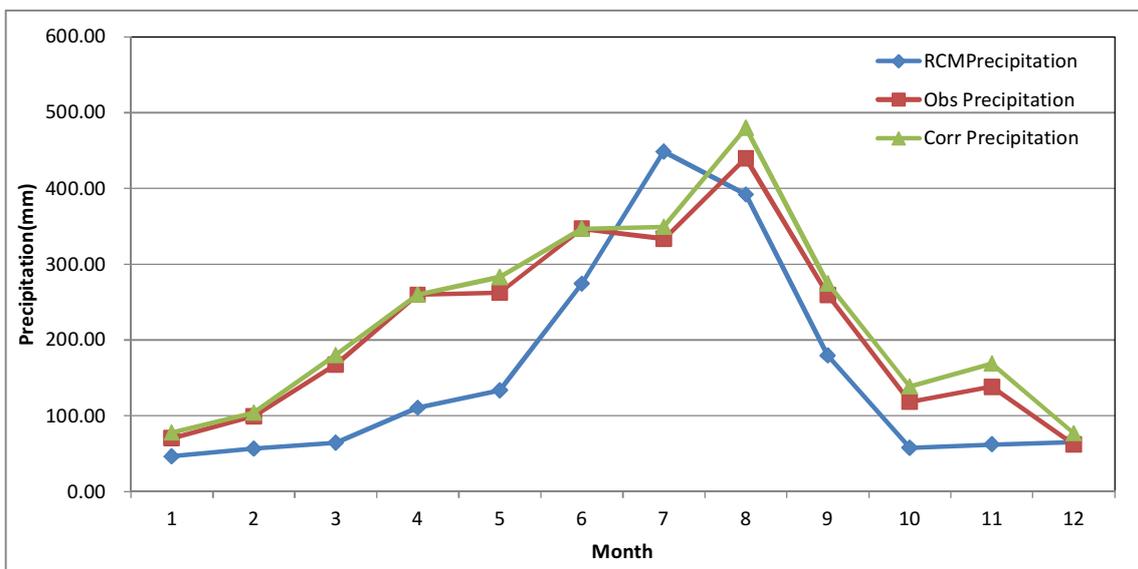
	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
			raw	curtailed	corrected		
May	Mean rainfall, mm	3.5149194	3.6433468	3.6282258	3.8769959		
	S.D., mm	11.845546	10.702332	10.707149	11.723794		
	$\alpha$	9.2359718	8.3446084	8.3483641	9.1410425		
	X0	-1.815576	-1.172703	-1.189991	-1.398712	0.4436624	0.558
Jun	Mean rainfall, mm	5.1775	6.290625	6.290625	5.1775		
	S.D., mm	13.720241	17.784136	17.784136	13.720241		
	$\alpha$	10.697672	13.866291	13.866291	10.697672		
	X0	-0.996608	-1.712236	-1.712236	-0.996608	0.4055261	0.000
Jul	Mean rainfall, mm	5.6042339	11.055444	10.847984	6.6205556		
	S.D., mm	15.609444	22.486144	22.577005	15.138518		
	$\alpha$	12.170684	17.532447	17.603291	11.803502		
	X0	-1.420016	0.9366787	0.6883315	-0.191777	0.4137089	3.126
Aug	Mean rainfall, mm	6.4038306	8.5042339	8.4235887	7.2845333		
	S.D., mm	16.573629	16.885724	16.922921	16.153588		
	$\alpha$	12.922459	13.165799	13.194801	12.594953		
	X0	-1.054302	0.905658	0.8082745	0.0154187	0.4006977	2.082
Sep	Parameter	Obs	GCM			calibrated threshold	Threshold

		raw	curtailed	corrected			
	Mean rainfall, mm	3.88	4.5658333	4.5152083	4.5832213	threshold	for present GCM curtailment
	S.D., mm	14.082445	12.59794	12.614604	13.838627		
	$\alpha$	10.980082	9.822614	9.8356064	10.789977		
	X0	-2.4571	-1.10324	-1.161363	-1.644161	0.4528273	1.184
	Parameter	Obs	GCM				
		raw	curtailed	corrected			
Oct	Mean rainfall, mm	1.7977823	1.1921371	1.1899194	1.9336398	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	6.8047232	4.09522	4.0958391	6.7654585		
	$\alpha$	5.3056427	3.193043	3.1935258	5.275028		
	X0	-1.264343	-0.650712	-0.653208	-1.110817	0.4615095	0.170
	Parameter	Obs	GCM				
		raw	curtailed	corrected			
Nov	Mean rainfall, mm	2.4585417	1.4058333	1.4058333	2.4585417	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	7.8230756	4.8765049	4.8765049	7.8230756		
	$\alpha$	6.099652	3.8022109	3.8022109	6.099652		
	X0	-1.061842	-0.788594	-0.788594	-1.061842	0.4375497	-0.064
	Parameter	Obs	GCM				
		raw	curtailed	corrected			
Dec	Mean rainfall, mm	1.4108871	1.033871	1.0322581	1.4589386	calibrated threshold	Threshold for present GCM curtailment
	S.D., mm	4.5994117	3.1946644	3.1951617	4.5839415		
	$\alpha$	3.5861613	2.4908798	2.4912676	3.5740992		
	X0	-0.658848	-0.403728	-0.405565	-0.603835	0.4451764	0.123
	Parameter	Obs	GCM				
		raw	curtailed	corrected			

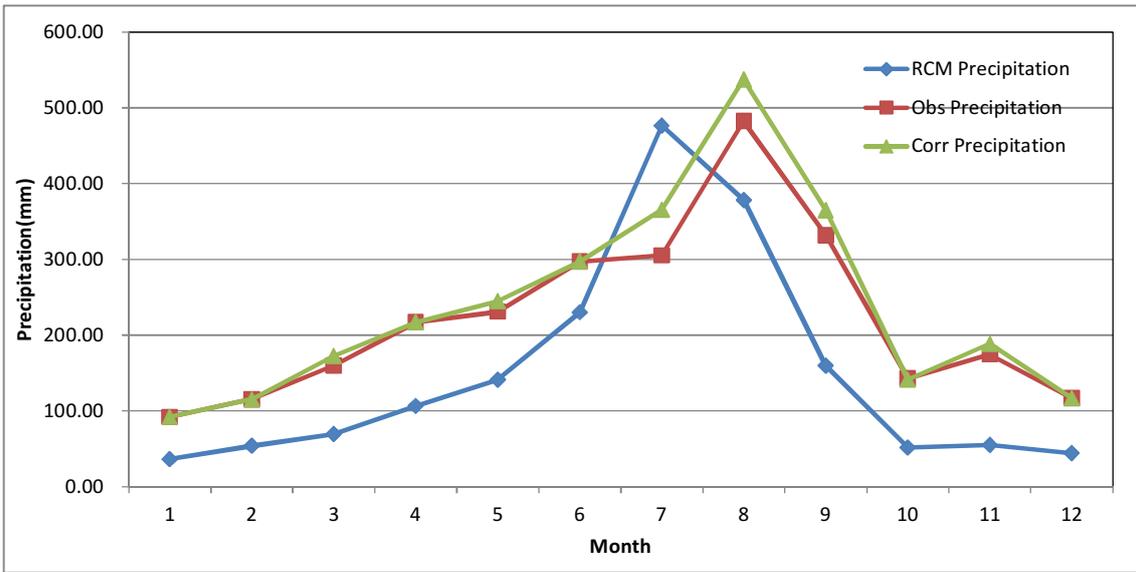
각 관측소마다 월별로 모의된 기후변화시나리오 및 관측치를 활용하여 기후변화 시나리오를 상세화 기법을 수행하였으며, 강수량의 확률분포형은 Gumbel 분포를 사용하고 매개변수 추정방법은 모멘트법을 이용하였다. 상세화 기법을 적용한 기후변화 시나리오가 크게 개선되었다(Fig. 4.3).



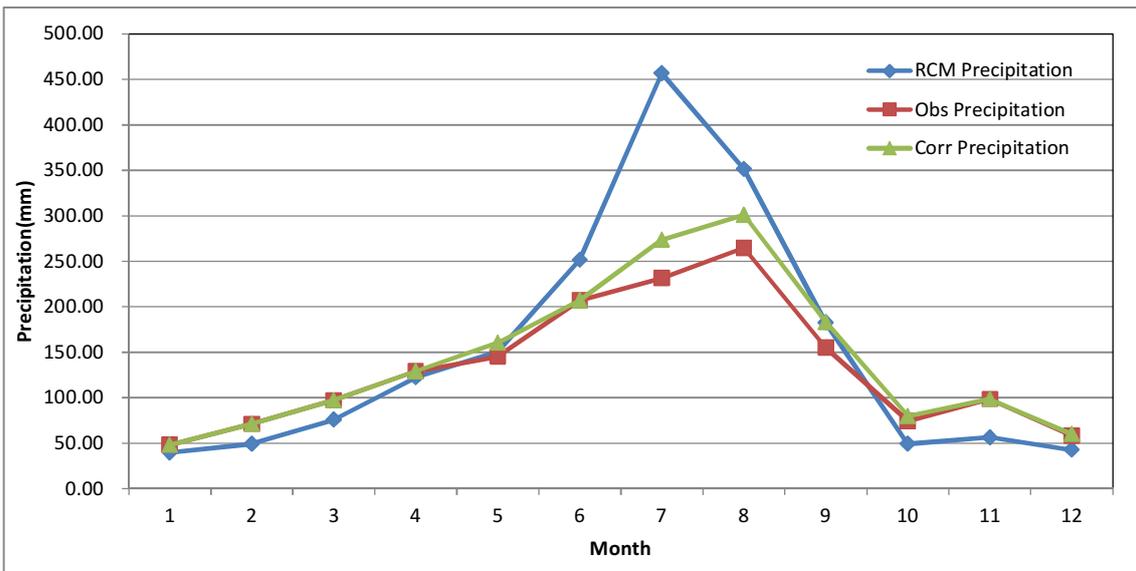
(a) Jeju weather station



(b) Seogwipo weather station



(c) Seongsan weather station



(d) Gosan weather station

Fig. 4.3 Monthly differences between precipitation observed and GCM

### 3. 기온자료 상세화

강수량과 동일한 방법으로 일 최고·저 기온도 상세화 기법을 적용하였다. 보정방법은 선형보정방법을 적용하였으며, 이 기법은 기준기간의 모의치에 적용하는 방법이다. 기온은 식 4.5과 같이 관측치와 모의치의 차를 고려하였다.

$$T_{fut} = T_{fut.s} + \left( \sum_{i=1}^{ref} T_{obs} - \sum_{i=1}^{ref} T_{ref.s} \right) \quad (4.5)$$

여기서,  $T_{obs}$  : 기온 관측치,  $T_{fut.s}$  : 보정된 미래 기온,  $T_{ref.s}$ 와  $T_{fut.s}$  : 모의된 과거기간 및 미래기간의 기온

변화량(CF)기법은 GCM에서 생산된 정보의 경우 불확실성이 많으며, 상세화를 많은 단계를 거치게 되면 그 불확실성이 증가하는 것을 전제하여 GCM 정보 중 과거 대비 미래의 변화만을 고려하는 방법이다.

기준기간과 미래기간의 월별 변화율 및 변화량을 산정하여 과거기간 관측 자료에 그 변화율만큼을 적용하여 시나리오를 생산하는 방법으로 모의된 기후시나리오 기준기간과 미래기간의 차이를 월별로 산정하여 다음 식 4.6과 같이 과거 관측 자료에 적용하는 방법을 사용하였다(Table 4.6 ~ 4.9).

$$T_{fut} = T_{obs} + \left( \sum_{i=1}^{fut} T_{fut.s} - \sum_{i=n}^{ref} T_{ref.s} \right) \quad (4.6)$$

여기서,  $T_{obs}$  : 기온 관측치,  $T_{ref.s}$ 과  $T_{fut.s}$  : 모의된 과거기간 및 미래기간의 기온

Table 4.6 Statistical analysis of monthly temperature of Jeju weather station

		Tmax			Tmin		
Jan	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	8.3891129	8.4592742	8.3891129	3.50625	3.534879	3.50625
	S.D temperature	3.6742569	3.6585964	3.6742569	2.7622018	2.8675286	2.7622018
		Tmax			Tmin		
Feb	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	9.8110619	9.7969027	9.8110619	3.9331858	3.665708	3.9331858
	S.D temperature	4.0436654	3.99691	4.0436654	2.925544	3.0054048	2.925544
		Tmax			Tmin		
mar	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	13.335081	13.380242	13.335081	6.372379	6.3227823	6.372379
	S.D temperature	4.1551403	4.1039883	4.1551403	2.8671781	3.1948862	2.8671781
		Tmax			Tmin		
Apr	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	17.915625	17.634792	17.915625	10.53125	10.4775	10.53125
	S.D temperature	3.5390729	3.3799634	3.5390729	2.728207	2.9585716	2.728207

		Tmax			Tmin		
May	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	21.879234	21.596573	21.879234	14.958468	14.540323	14.958468
S.D temperature	2.8179927	2.8488609	2.8179927	2.15479	2.4351191	2.15479	
		Tmax			Tmin		
Jun	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	24.861667	24.926875	24.861667	19.240625	18.960625	19.240625
S.D temperature	2.6567654	2.6320187	2.6567654	2.0716386	2.5707954	2.0716386	
		Tmax			Tmin		
Jul	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	29.309073	28.972379	28.972968	23.61875	23.377621	23.61875
S.D temperature	2.9251294	2.8690517	2.868614	2.1930725	2.2199379	2.1930725	
		Tmax			Tmin		
Aug	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	29.958669	30.288306	29.958669	24.676411	24.617944	24.676411
S.D temperature	2.6403331	2.3763873	2.6403331	1.770507	1.8389777	1.770507	
Sep	Parameter	Tmax			Tmin		

		GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	25.975417	25.815625	25.975417	20.89625	21.1075	20.89625
	S.D temperature	2.4367789	2.4484808	2.4367789	2.1220353	2.2130728	2.1220353
		Tmax			Tmin		
Oct	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	21.766935	21.55746	21.766935	15.835887	15.801008	15.835887
	S.D temperature	2.5599549	2.8056193	2.5599549	2.6263472	2.8634265	2.6263472
		Tmax			Tmin		
Nov	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	16.216667	16.022292	16.216667	10.434792	9.9197917	10.434792
	S.D temperature	3.5958183	3.5059125	3.5958183	3.3632823	3.2613259	3.3632823
		Tmax			Tmin		
Dec	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	10.640121	10.831452	10.640121	5.4691532	5.3852823	5.4691532
	S.D temperature	3.672995	3.9361442	3.672995	2.8210529	3.1500914	2.8210529

Table 4.7 Statistical analysis of monthly temperature of Seogwipo weather station

		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Jan	Mean temperature	10.848387	11.268145	10.848387	4.1110887	4.5649194	4.1110887
	S.D temperature	3.2709862	3.404672	3.2709862	3.2492949	3.2759453	3.2492949
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Feb	Mean temperature	12.034735	12.264823	12.034735	5.1553097	5.2471239	5.1553097
	S.D temperature	3.3467145	3.3961471	3.3467145	3.4349312	3.4998784	3.4349312
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
mar	Mean temperature	14.91875	15.18871	14.91875	7.5467742	7.9052419	7.5467742
	S.D temperature	3.2404874	3.453447	3.2404874	3.3467231	3.7972043	3.3467231
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Apr	Mean temperature	18.872083	18.905208	18.872083	11.676042	12.067292	11.676042
	S.D	2.451341	2.5326746	2.451341	2.6608483	3.1014767	2.6608483

temperature							
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
May	Mean temperature	22.705444	22.679637	22.705444	15.990524	15.983871	15.990524
	S.D temperature	2.3966287	2.5617483	2.3966287	2.1103427	2.4900168	2.1103427
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Jun	Mean temperature	25.025417	25.227917	25.025417	19.737708	19.915833	19.737708
	S.D temperature	2.0328564	1.978879	2.0328564	1.8365732	2.3160237	1.8365732
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Jul	Mean temperature	28.775	28.988306	28.987911	24.006855	24.233669	24.006855
	S.D temperature	2.4082308	2.4241263	2.4245658	2.0968937	2.1825699	2.0968937
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Aug	Mean temperature	30.454032	31.255242	30.454032	30.454032	31.255242	30.454032
	S.D temperature	2.073192	1.9331068	2.073192	2.073192	1.9331068	2.073192

		Tmax			Tmin		
Sep	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	27.753333	28.0175	27.753333	21.824792	22.087083	21.824792
	S.D temperature	2.0892581	2.0311628	2.0892581	2.1902493	2.3717984	2.1902493
		Tmax			Tmin		
Oct	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	23.920161	24.068145	23.920161	16.822177	17.126613	16.822177
	S.D temperature	2.3439578	2.5112421	2.3439578	2.7282199	3.1414044	2.7282199
		Tmax			Tmin		
Nov	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	18.426458	18.781042	18.426458	11.270208	11.365625	11.270208
	S.D temperature	3.2468176	3.1125504	3.2468176	3.5613982	3.6461158	3.5613982
		Tmax			Tmin		
Dec	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	12.872782	13.596371	12.872782	6.0042339	6.6179435	6.0042339
	S.D temperature	3.4226939	3.7364147	3.4226939	3.303809	3.6112256	3.303809

Table 4.8 Statistical analysis of monthly temperature of Seongsan weather station

		Tmax			Tmin		
Jan	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	8.7560484	9.0292339	8.7560484	2.0907258	3.1185484	2.0907258
	S.D temperature	3.6853688	3.5753325	3.6853688	3.0697867	3.0605833	3.0697867
		Tmax			Tmin		
Feb	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	10.164381	10.204867	10.164381	2.6938053	3.3442478	2.6938053
	S.D temperature	3.769829	3.5576747	3.769829	3.5317636	3.1442042	3.5317636
		Tmax			Tmin		
mar	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	13.555242	13.443952	13.555242	5.1104839	5.8794355	5.1104839
	S.D temperature	3.6497589	3.3503933	3.6497589	3.3848699	3.0528775	3.3848699
		Tmax			Tmin		
Apr	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	17.966458	17.699792	17.966458	9.3495833	10.0125	9.3495833

		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
S.D temperature	2.8617519	2.5108408	2.8617519	3.357595	2.6480721	3.357595	
<hr/>							
May	Mean temperature	21.947177	21.583065	21.947177	14.008468	14.008468	
	S.D temperature	2.6693986	2.3921917	2.6693986	2.6902384	2.6902384	
	<hr/>						
	<hr/>						
Jun	Mean temperature	24.129167	24.454167	24.129167	18.135625	18.135625	
	S.D temperature	2.2069787	2.0274688	2.2069787	2.2959531	2.2959531	
	<hr/>						
	<hr/>						
Jul	Mean temperature	28.163508	28.290927	28.290598	22.73629	22.553427	
	S.D temperature	2.4649255	2.4210229	2.4213057	1.9739141	2.1983162	
	<hr/>						
	<hr/>						
Aug	Mean temperature	29.681855	30.116935	29.681855	23.953427	23.926815	
	<hr/>						
	<hr/>						
	<hr/>						

		Tmax		Tmin			
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
S.D temperature	2.2003933	1.9025118	2.2003933	1.7014398	1.8103035	1.7014398	
Sep	Mean temperature	26.431875	26.324792	26.431875	20.556667	20.5725	20.556667
	S.D temperature	2.2937522	2.1534043	2.2937522	2.4703244	2.239248	2.4703244
Oct	Mean temperature	22.104032	22.089516	22.104032	14.839315	15.540927	14.839315
	S.D temperature	2.5763932	2.6364674	2.5763932	3.187578	2.8434789	3.187578
Nov	Mean temperature	16.504792	16.611458	16.504792	8.9104167	9.6822917	8.9104167
	S.D temperature	3.7023603	3.3597044	3.7023603	3.9383527	3.4080096	3.9383527
Dec	Mean temperature	12.872782	13.596371	12.872782	3.8149194	4.9905242	3.8149194
	S.D temperature	3.4226939	3.7364147	3.4226939	3.3695096	3.3263216	3.3695096

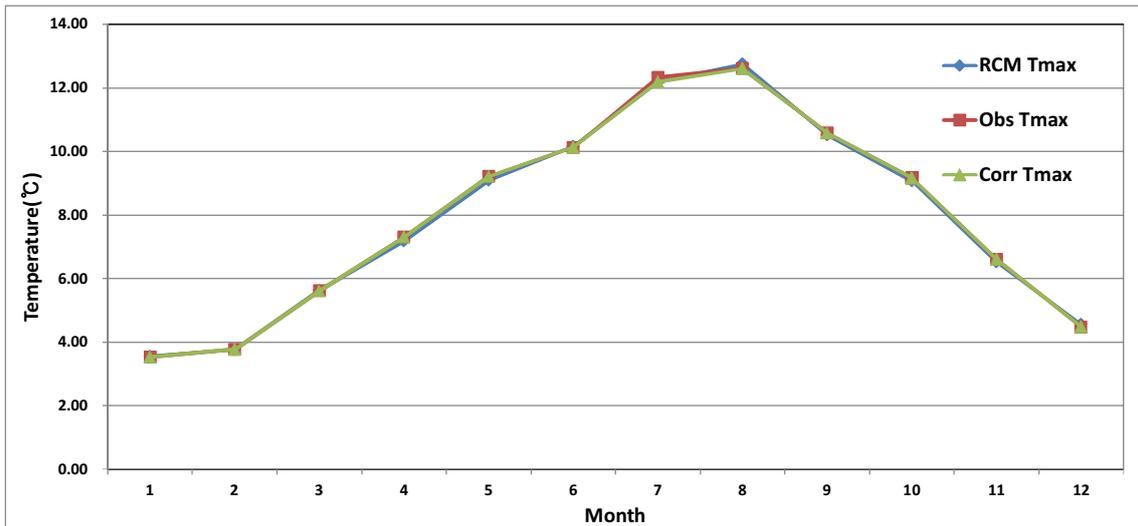
Table 4.9 Statistical analysis of monthly temperature of Gosan weather station

		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Jan	Mean temperature	8.2836694	8.7635081	8.2836694	3.5145161	4.1002016	3.5145161
	S.D temperature	3.6464727	3.4689472	3.6464727	2.8696656	2.8302943	2.8696656
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Feb	Mean temperature	9.4800885	9.794469	9.4800885	3.9362832	4.2997788	3.9362832
	S.D temperature	3.8700226	3.6857598	3.8700226	2.9399477	2.8712776	2.9399477
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
mar	Mean temperature	12.452419	12.841532	12.452419	6.2485887	6.7354839	6.2485887
	S.D temperature	3.6349085	3.4086771	3.6349085	2.8098237	2.9006497	2.8098237
		Tmax			Tmin		
Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM		
		raw	corrected		raw	corrected	
Apr	Mean temperature	16.655208	16.754792	16.655208	10.193125	10.63625	10.193125
	S.D temperature	2.8450693	2.585397	2.8450693	2.4750392	2.4552739	2.4750392

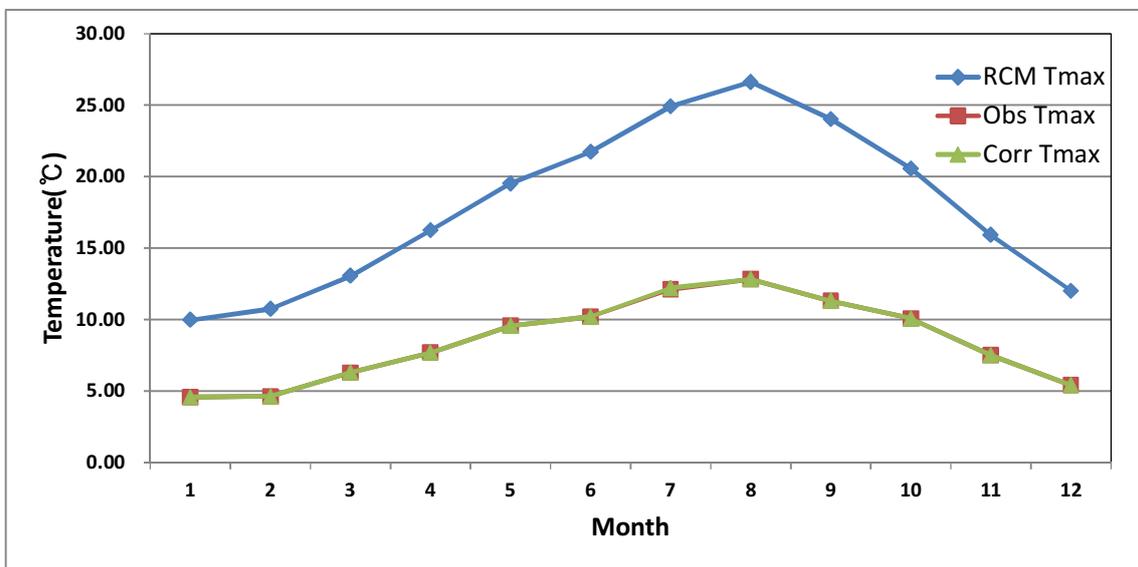
		Tmax			Tmin		
May	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	20.429435	20.337903	20.429435	14.274798	14.33004	14.274798
S.D temperature	2.4302015	2.2014263	2.4302015	2.1021273	2.0413911	2.1021273	
		Tmax			Tmin		
Jun	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	23.838958	24.033542	23.838958	18.416875	18.602083	18.416875
S.D temperature	1.9919889	2.0321579	1.9919889	1.9784504	2.2165528	1.9784504	
		Tmax			Tmin		
Jul	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	27.478024	27.585685	27.584955	22.772984	22.879234	22.772984
S.D temperature	2.3724983	2.1738242	2.1748227	2.123813	2.0967296	2.123813	
		Tmax			Tmin		
Aug	Parameter	Obs	GCM		Obs	GCM	
			raw	corrected		raw	corrected
	Mean temperature	29.357056	29.804435	29.357056	24.034476	24.40625	24.034476
S.D temperature	2.1114672	1.8429172	2.1114672	1.7064704	1.7211874	1.7064704	
Sep	Parameter	Tmax			Tmin		

		GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	26.178125	26.32875	26.178125	20.504792	20.877292	20.504792
	S.D temperature	2.3967446	2.2208648	2.3967446	2.1265196	2.0968425	2.1265196
		Tmax			Tmin		
Oct	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	21.66129	21.645766	21.66129	15.925605	16.268145	15.925605
	S.D temperature	3.0004164	2.9408894	3.0004164	2.3886367	2.4901895	2.3886367
		Tmax			Tmin		
Nov	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	16.334375	16.437083	16.334375	10.848958	10.956875	10.848958
	S.D temperature	3.6209731	3.4177359	3.6209731	3.3017486	3.0723758	3.3017486
		Tmax			Tmin		
Dec	Parameter	GCM		GCM			
		Obs	raw	corrected	Obs	raw	corrected
	Mean temperature	10.740323	11.401411	10.740323	5.6387097	6.2058468	5.6387097
	S.D temperature	3.6514598	3.7955074	3.6514598	2.9807926	3.1020791	2.9807926

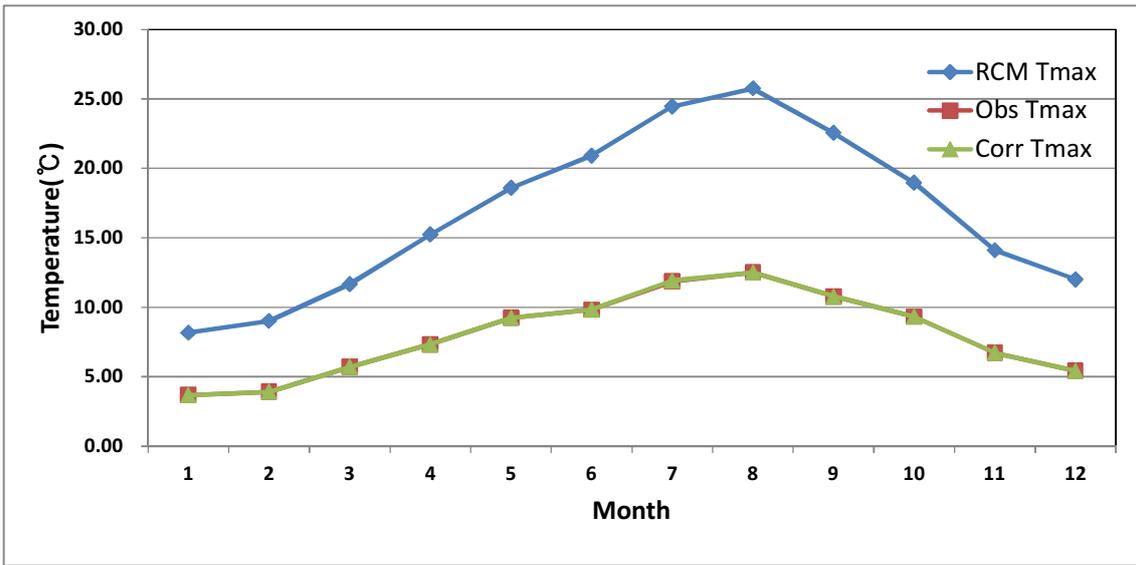
각 관측소마다 월별로 모의된 기후변화시나리오 및 관측치를 활용하여 기후변화 시나리오를 상세화 기법을 강우량과 동일한 방법으로 수행하였으며, 상세화 기법을 적용한 최고·저 기온 자료가 크게 개선하는 것을 볼 수 있었다(Fig. 4.4~5).



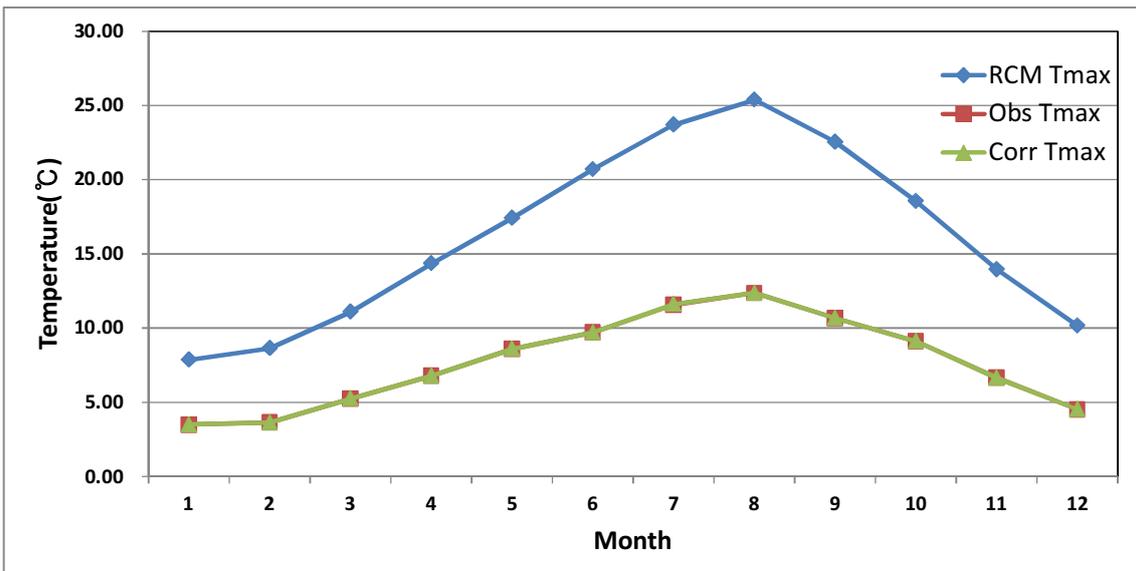
(a) Jeju weather station



(b) Seogwipo weather station

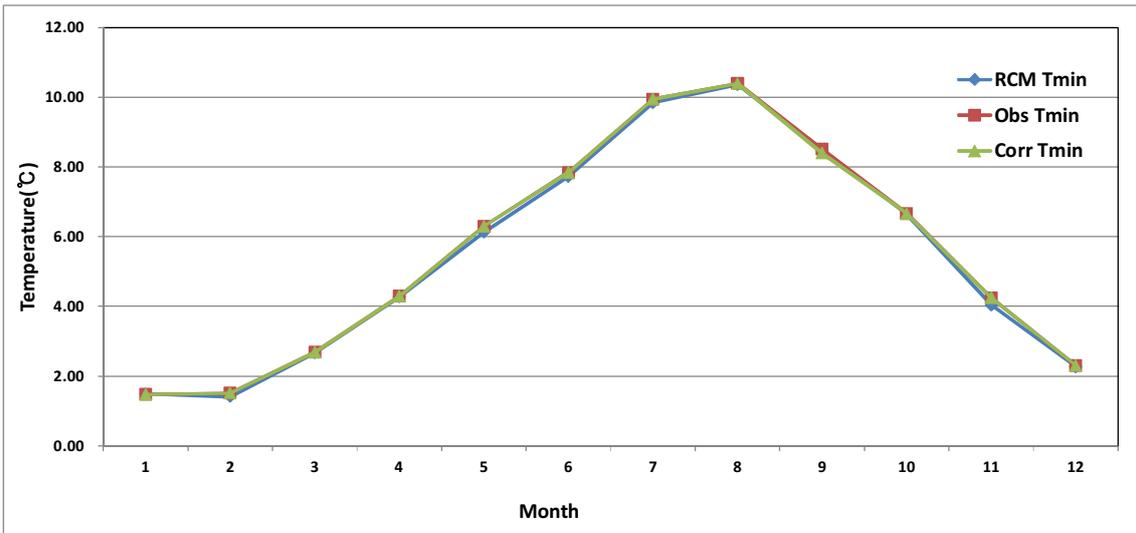


(c) Seongsan weather station

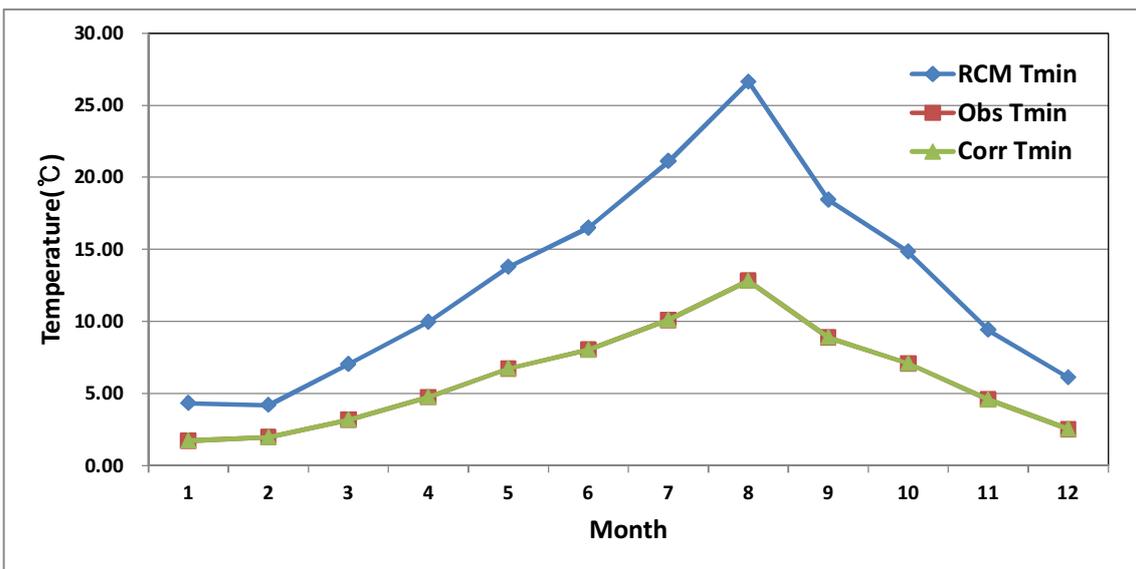


(d) Gosan weather station

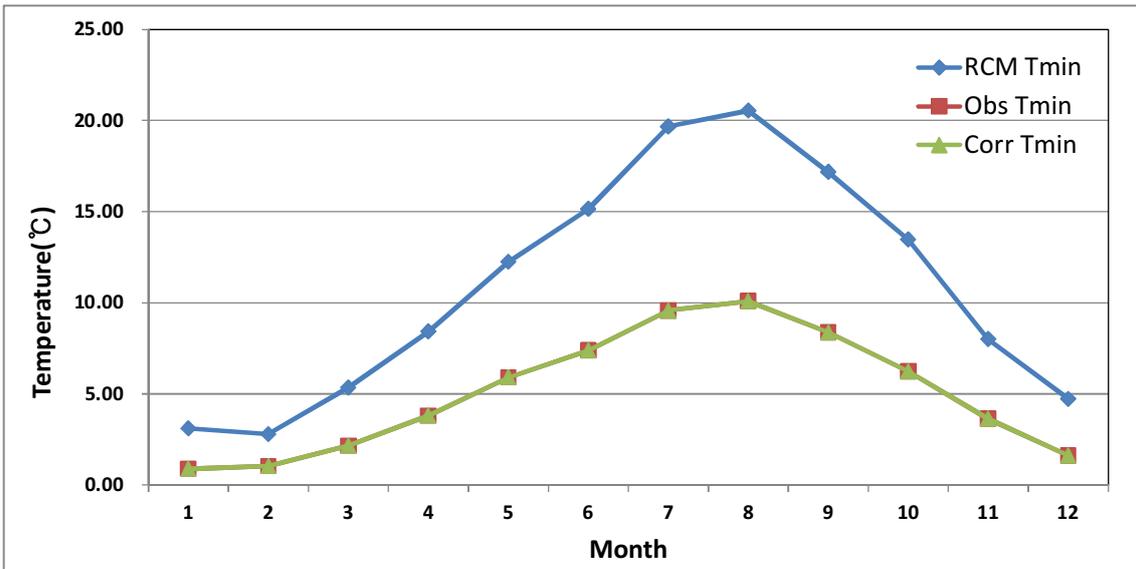
Fig. 4.4 Monthly differences between Maximum temperature observed and GCM



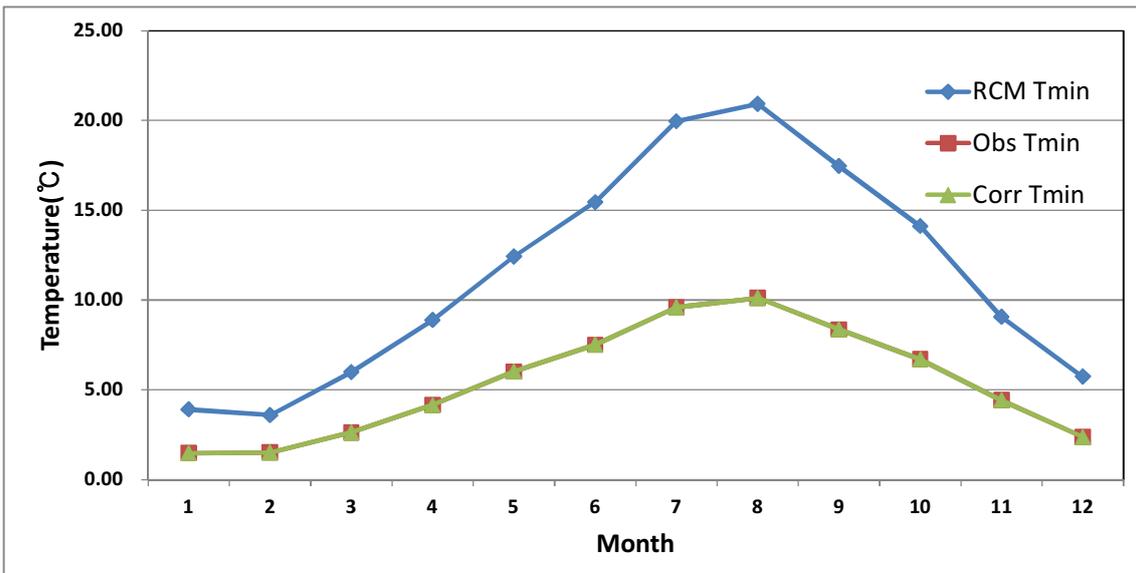
(a) Jeju weather station



(b) Seogwipo weather station



(c) Seongsan weather station



(d) Gosan weather station

Fig. 4.5 Monthly differences between Minimum temperature observed and GCM

## V. 미래 기후변화 시나리오의 적용

SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간 동안에 유역내의 장기 강우-유출, 유사이동, 농화학물질을 예측하는 준분포형 유역 모형이다(Neitsch et al., 2005). 또한 대규모의 유역은 복잡한 특성인 다양한 토양도와 토지피복도 그리고 토지피복에 따른 대규모의 복잡한 유역의 수문, 토양, 영양물질 등의 장기간에 걸친 거동에 측이 가능하다.

ArcGIS 소프트웨어 연계하여 수치고도 및 연구대상 하천망을 통해 전체 유역을 소유역으로 분할하여 토양도와 토지피복도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별로 수분량을 계산하고 이를 하도 추적하는 방식을 취하고 있다.

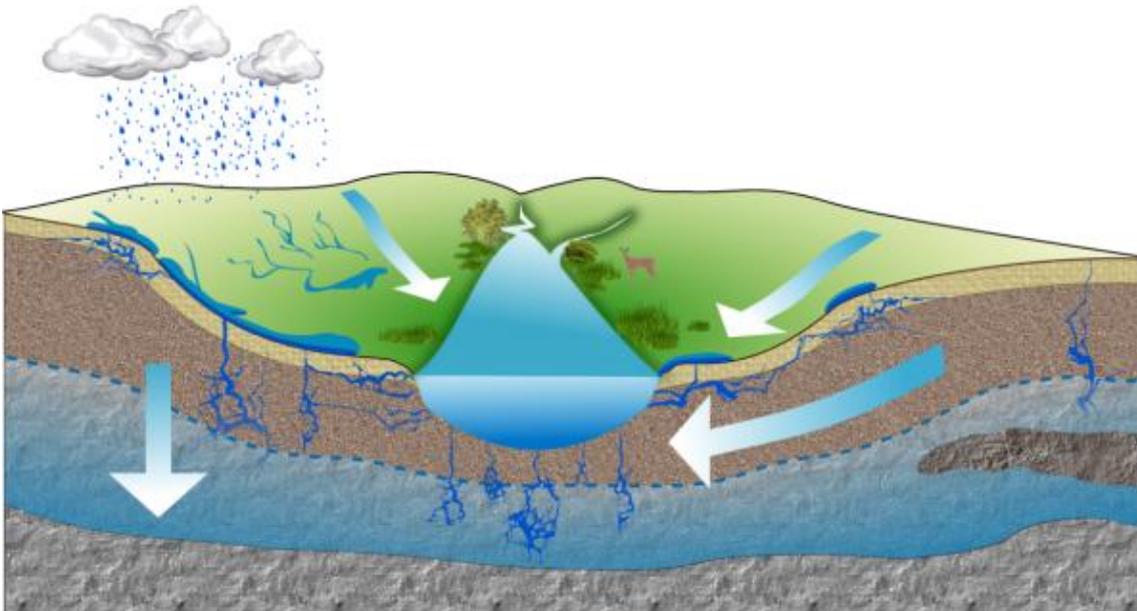


Fig. 5.1 An illustration of the soil and water assessment tool(UCROSS, 2016).

## 1. 대상구역의 수문·지형자료

SWAT모형에서 유출량 산정에 필요한 기본적인 기상자료는 강우, 최고·저 기온, 일사량, 풍속, 습도 등이 있다. 이외에도 기상관측소의 위치 및 관측 유출량 자료, 저수지관련 자료 등에 따라 선택적으로 입력이 가능하다. 또한, SWAT 모형은 각각 소유역에 대한 수문과 기상자료가 입력 자료로 사용되고 있으며, 소유역에 대한 각각의 입력 자료는 불필요하다. 각 구역의 출구지점에서 인접한 기상관측소의 기상 및 수문자료를 소유역별 수문·기상자료로 선정하게 된다.

### 1.1 기상관측소 선정

SWAT모형에서 필요한 기상 데이터는 일 강수량, 최고·저 기온, 풍속 및 상대습도가 필요로 한다. 연구대상 구역의 기상자료는 제주, 서귀포 기상관측소의 분위사상법을 적용한 기후변화 시나리오 자료를 사용하였으며, 관측소 현황은 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Specification of weather stations

Weather station	Latitude	Longitude	E.L. (m)
Jeju	33° 30' 51.0''	126° 31' 46.7''	20.5
Seogwipo	33° 14' 46.0''	126° 33' 55.2''	47.0

## 1.2 토지피복도

토지피복도(Landuse map)은 국가수자원관리 종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr>) 에서 제공하는 토지피복도 자료를 이용하였으며 이용된 토지피복자료는 2005년 Landsat 위성영상을 이용하여 피복 분류된 자료이다.

토지피복도는 SWAT 모형에서 요구되고 있는 토지이용분류 체계에 따라 산림, 농지, 시가화건조지역 등으로 분류하여 속성정보를 구성하고 wamis에서 제공한 지형공간 래스터 파일을 acinfo의 GRID파일을 shape 파일의 형태로 변환하였다. 본 연구에서는 토지피복도자료를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 구역별로 격자크기는 30 X 30 m 으로 설정하여 모형의 입력자료 사용하였다.

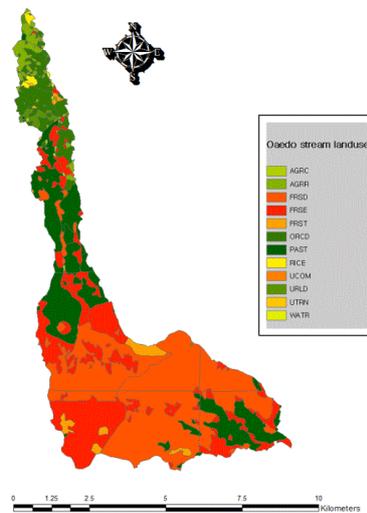


Fig. 5.2 Map of land use of Oaedo stream.

Table 5.2 Analysis result of land use of Oaedo Stream watershed

중분류	토지분류	토지이용구분	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
110		URLD	0.410	0.99
130		UCOM	0.004	0.01
140		URLD	0.010	0.03
150		UTRN	0.043	0.10
210		RICE	0.209	0.50
220		AGRR	1.037	2.51
230		AGRR	0.015	0.04
240		ORCD	2.816	6.81
310		FRSD	17.119	41.37
320		FRSE	10.181	24.61
330		FRST	0.932	2.25
410		PAST	1.679	4.06
430		PAST	6.790	16.41
620		AGRC	0.084	0.20
710		WATR	0.046	0.11

연구대상 유역인 외도천 유역의 토지피복도를 분석한 결과 산림이 65.98%, 초지 20.47%, 과수원이 6.81%, 밭 2.51%으로 분석되었다.

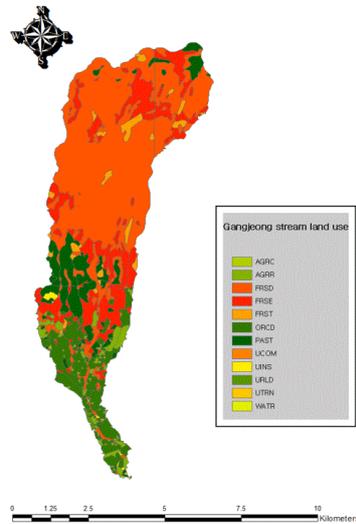


Fig. 5.3 Map of land use of Gangjeong stream.

Table 5.3 Analysis result of land use of Gangjeong Stream watershed

중분류	토지분류	토지이용구분	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
110		URLD	0.082	0.21
130		UCOM	0.003	0.01
140		URLD	0.003	0.01
150		UTRN	0.026	0.07
160		UINS	0.102	0.27
220		AGRR	0.685	1.79
230		AGRR	0.637	1.67
240		ORCD	4.313	11.29
250		AGRR	0.021	0.05
310		FRSD	20.186	52.84
320		FRSE	7.050	18.45
330		FRST	1.145	3.00
410		PAST	2.174	5.69
430		PAST	1.721	4.50
620		AGRC	0.030	0.08
710		WATR	0.024	0.06
720		WATR	0.002	0.01

연구대상 유역인 강정천 유역의 토지피복도를 분석한 결과 산림이 71.29%, 과수원이 11.29%, 초지 10.19%, 밭 1.79%으로 분석되었다.

### 1.3 토양도

토양도(Soiltype map)은 SWAT모형 분석과정 중 토양의 물리화학적 성질을 결정해주는 입력 자료이며, 농업과학기술원에서 제공하는 농촌진흥청에서 제공하고 있는 1:25,000 정밀 토양도를 토양통별로 구분하여 입력 자료로 구축하였다.

토양도는 토지피복자료와 동일한 shape 파일로 제공되고 있으며, 토지피복도와 같은 방법으로 연구대상구역의 토양도 자료를 arcGIS 프로그램을 이용하여 구축하였으며 구역별로 격자크기는 30 X 30 m으로 설정하여 모형의 입력 자료로 사용하였다.

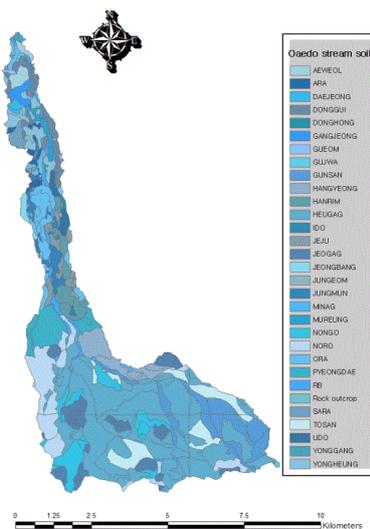


Fig. 5.4 Map of soil type of Oaedo stream.

Table 5.4 Analysis result of soil type of Oaedo Stream watershed

토양도	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)	토양도	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
HEUGAG	13.669	33.04	JUNGMUN	1.007	2.43
NORO	3.217	7.77	RB	0.967	2.34
GUNSAN	3.099	7.49	JEJU	0.782	1.89
JEONGAG	2.442	5.90	AEWEOL	0.447	1.08
NONGO	2.210	5.34	UDO	0.398	0.96
TOSAN	2.195	5.30	ARA	0.370	0.89
ORA	1.896	4.58	SARA	0.366	0.89
PYEONGD AE	1.763	4.26	MUREUNG	0.359	0.87
HANGYEO NG	1.598	3.86	GANGJEO NG	0.313	0.76
DONGGUI	1.262	3.05	JEONGBA NG	0.207	0.50
HANRIM	1.170	2.83	DAEJEON G	0.196	0.47
YONGHEU NG	1.083	2.62	GUEOM	0.132	0.32

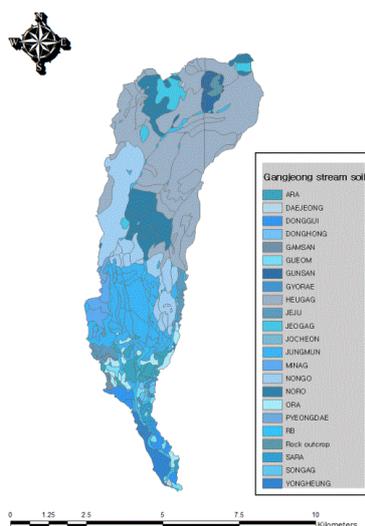


Fig. 5.5 Map of soil type of Gangjeong stream.

Table 5.5 Analysis result of soil type of Gangjeong Stream watershed

토양도	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)	토양도	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
HEUGAG	15.032	39.35	GUNSAN	0.589	1.54
NONGO	5.261	13.77	GUEOM	0.356	0.93
JUNGMUN	5.225	13.68	SARA	0.310	0.81
NORO	3.499	9.16	Rock outcrop	0.212	0.55
RB	1.291	3.38	SONGAG	0.154	0.40
JEOGAG	1.002	2.62	GAMSAN	0.139	0.36
ARA	0.938	2.45	PYEONGD AE	0.136	0.36
ORA	0.887	2.32	GYORAE	0.106	0.28
MINAG	0.789	2.07	DAEJEON G	0.038	0.10
YONGHEU NG	0.788	2.06	DONGHON G	0.034	0.09
JEJU	0.731	1.91	JOCHEON	0.012	0.03
DONGGUI	0.711	1.86			

## 2. SWAT모형의 보정

### 2.1 ADCP 관측기기

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)는 3차원의 유속 그리고 하천의 수심을 빠르게 효율적으로 측정하며, 측정의 공간자료 와 해상도는 기존의 측정방법과 비교하면 매우 세밀하다. ADCP를 활용한 유량측정은 유량측정에서 가장 신뢰도가 높은 방법이며, 미국 지리조사국(USGS)에서 약 57%의 유량측정을 통한 수위-유량 곡선 작성을 ADCP 관측기기를 활용하여 이루어지고 있다(Muste et. 2007). 기계식 프로펠러가 하천 횡단의 한 지점에서 유속 측정이 가능하지만 ADCP는 하천을 횡

단함으로써 하천 단면의 수천 혹은 수만 지점에서 3차원 유속을 신뢰도 높은 측정값을 제공한다(Fig. 5.6).

ADCP는 20 ~ 30° 정도 기울어진 3 ~ 12개의 빔을 약 200kHz ~ 3MHz 분포의 초음파를 발생하여 하천의 수심(2 ~ 100 cm) 단위로 하천 유량 측정 진행방향을 측정하여 1차원이 아닌 3차원 유속을 제공한다(RDI, 1996; SonTek, 2000). 본 연구에서는 SonTek 사의 RiverSurveyor M9을 사용하였으며 RiverSurveyor M9는 다양한 ADCP 기기들 중 모든 수심에 사용하도록 설계되었다.

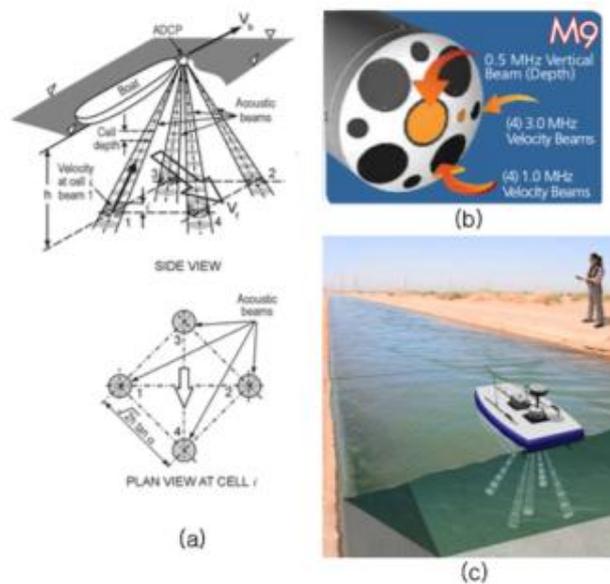


Fig. 5.6 Observation of discharge using ADCP: a) Principle of ADCP ; b) ADCP equipped with 9 beams (SonTek RiverSurveyor M9); c) Management of ADCP in scene

## 2.2 현장 유출량 관측 결과

장기유출 모델인 SWAT모형을 이용하여 외도천, 강정천 유역의 2100년까지 미래 유출량을 모의하기 위해 실측자료를 활용하여 매개변수 보정을 실시하였다.

북부지역의 외도천과 남부지역의 강정천의 유량자료는 ‘제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축(MLTMA and KICTEP, 2015)’ 연구결과 자료를 이용하여

2011년 7월부터 2014년 2월까지 최신 정밀 관측기기인 ADCP 및 SIV를 이용한 현장실측자료를 이용하였다(Table. 5.6).

Table 5.6 Comparison of stream baseflow discharge measurement method

DATE	Discharge(m <sup>3</sup> /sec)	
	Oaedo stream	Gangjeong stream
2011.07.08	1.047	0.919
2011.07.22	0.314	1.0253
2011.08.06	0.275	1.3043
2011.08.19	0.376	1.309
2011.09.02	0.332	1.1035
2011.09.16	0.249	1.115
2011.09.30	0.371	1.1875
2011.10.14	0.67	-
2011.10.28	0.464	0.864
.	.	.
.	.	.
.	.	.
2013-08-23	0.072	0.414
2013-09-06	0.238	0.528
2013-10-12	-	0.413
2013-11-01	-	0.329
2013-12-26	0.464	0.39
2014-01-03	0.054	0.185
2014-02-07	0.207	0.245
minimum	0.01	0.185
maximum	1.117	2.269

정밀한 유출량 산정을 위해 현장 정기관측을 62회 실시하였으며, ADCP로 관측한 외도천 유출량은 0.01 ~ 1.047 m<sup>3</sup>/s, 강정천은 0.185 ~ 2.269 m<sup>3</sup>/s으로 관측하였다.

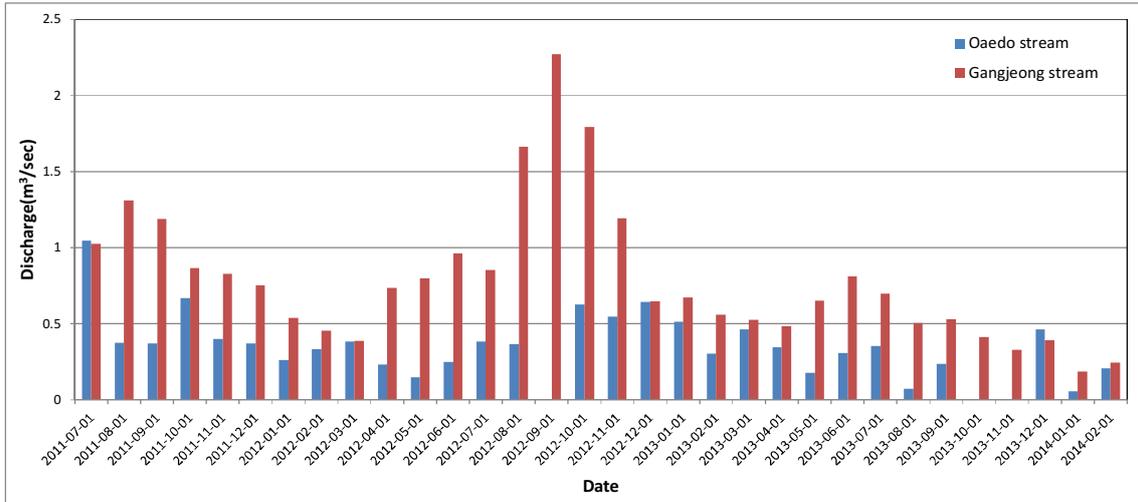


Fig. 5.7 Comparison of stream baseflow discharge.

연구대상의 기저유출량은 현저한 변화를 나타나고 있으며, 유출량 변화는 풍수기 (7 ~ 9월)에 증가하였으나, 갈수기(1 ~ 3월)의 유출량은 크게 줄어드는 것을 알 수 있었다(Fig. 5.7).

### 2.3 매개변수 최적화

SWAT 모형의 매개변수는 개별 소유역에 대한 매개변수 및 수문반응단위(HRU) 별 매개변수로 구성된다. 모형이 실제 유역에 적용할 경우 입력되는 매개변수에 따라 그 결과가 크게 다르게 나타나고 있어 모형의 매개변수의 산정이 매우 중요한 요소이다. 본 연구는 SWAT 모형의 지표유출에 영향을 크게 미치는 주요한 매개변수를 선정하였다. 지표 유출과 밀접한 매개변수는 유출곡선지수인 CN2, 수리전도도인 CH\_K(2), 토양 증발 보상 계수인 ESCO, 토양수분 이용 가능량인 SOL\_AWC을 이용하였다.

실제 상시유출은 ADCP를 사용하고 홍수유출은 SIV를 활용하였으며, ADCP와 SIV를 이용한 현장실측자료를 이용하여 SWAT모형 보정을 실시하였다. 연구대상 유역인 외도천, 강정천 SWAT 모형의 모의 기간은 2000 ~ 2014년(15년)으로 하고,

모형의 안정화 기간을 고려하여 2004 ~ 2014(10년)을 모형 보정(Calibration) 기간으로 하여 실측자료인 ADCP 관측 자료를 이용하여 비교하였다.

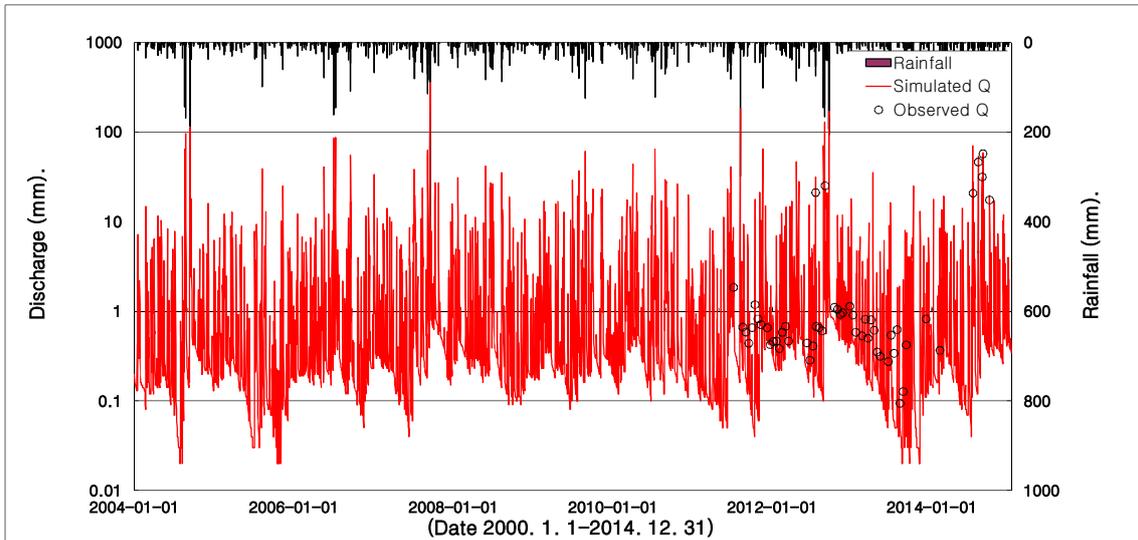


Fig. 5.8 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo stream.

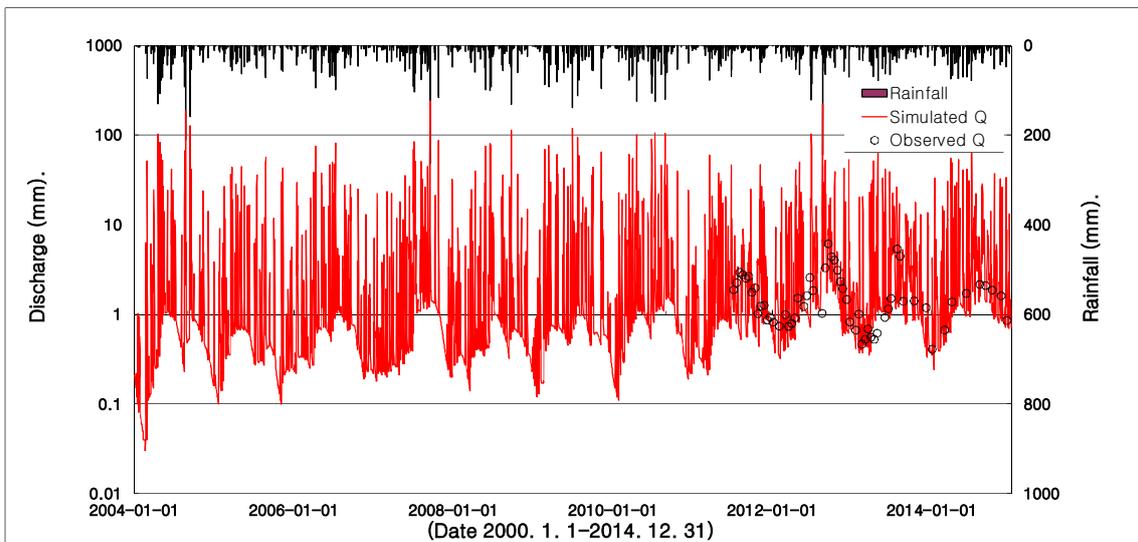


Fig. 5.9 Result of the present runoff simulation of the basin of Gangjeong stream.

SWAT모형의 검증을 위하여 모의결과와 실측치의 오차분석을 수행하였다. Table 5.7과 같은 검증 오차분석을 수행하여 각 검증의 결과를 정리하여 제시하였다.

Table 5.7 Hydrological model performance criteria

RMSE (Root Mean Square Error)	$SE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_i - Y_i]^2}$
R <sup>2</sup> (Coefficient of Determination)	$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$

ADCP 관측결과를 이용한 외도천 유역의 매개변수 적용은 CN<sub>2</sub>를 -2 하향 고정, ESCO +0.75, SOL<sub>AWSC</sub> +0.03 상향으로 하였으며, 강정천 유역의 매개변수 적용은 CN<sub>2</sub>를 -5 하향 고정, ESCO +0.55, SOL<sub>AWSC</sub> +0.03 상향하였다(Table 5.8).

모의결과 값을 보정한 결과, 외도천 유역의 결정계수 R<sup>2</sup> 값은 0.94, 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE) 값은 2.07, 강정천 유역의 R<sup>2</sup> 값은 0.83, RMSE 값은 0.51으로 나타났다(Fig. 5.10~11). 보정된 매개변수를 활용하여 실측치에 가까운 모사가 가능하였으며 15년간(2000~2014년)의 외도천 지표 유출율은 13~34%(평균 21%), 강정천 지표 유출율은 11~32%(평균 23%)으로 분석되었다.

Table 5.8. Calibrated parameters

Parameter	Definition	Min.	Max.	Calibrated value	
				Oaedo	Gang jeong
CN <sub>2</sub>	SCS runoff curve number	-8%	+8%	-2%	-5%
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.75	0.55
SOL <sub>AWC</sub>	Available water capacity of the soil layer	0	1	0.03	0.03

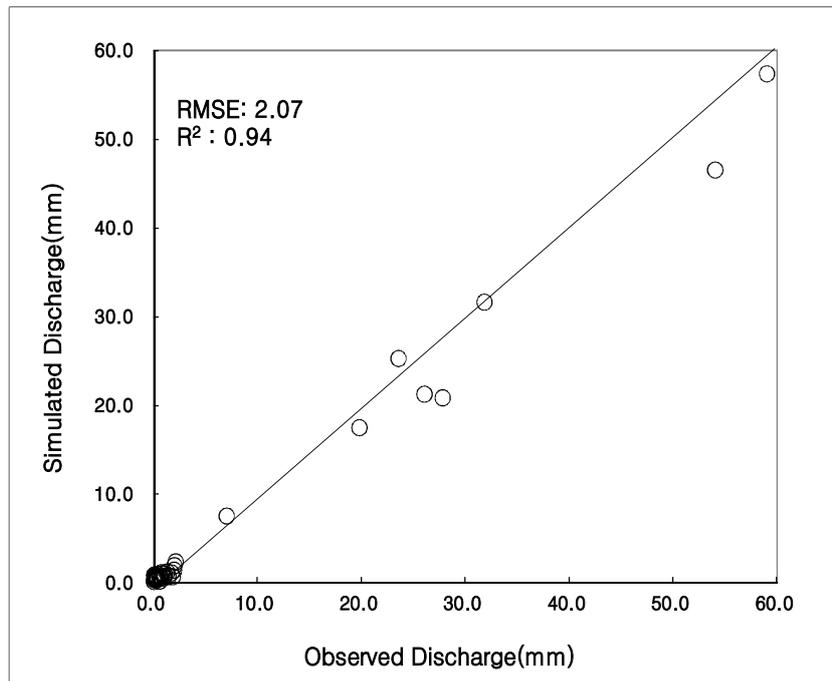


Fig. 5.10 Result of calibration of Oaedo stream.

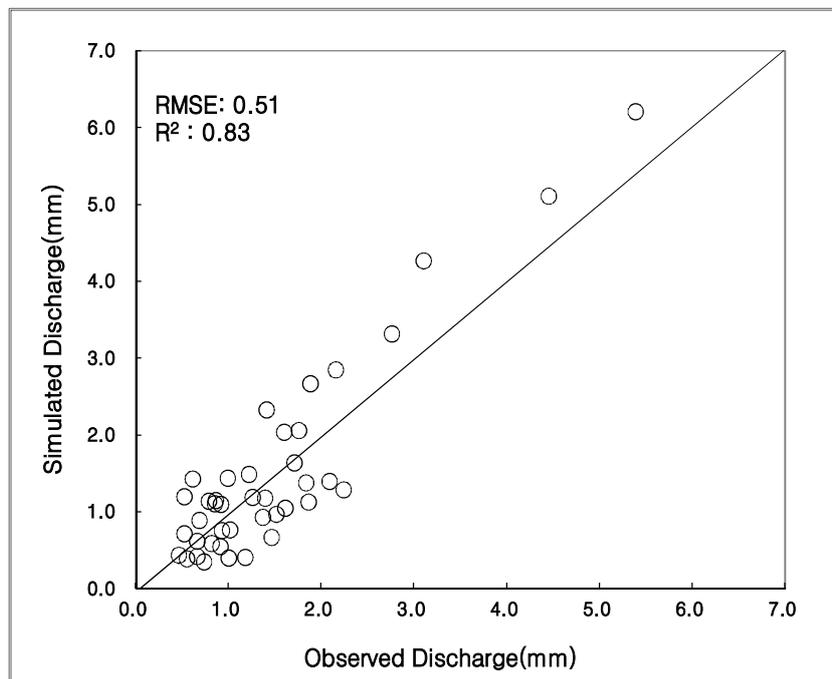


Fig. 5.11 Result of calibration of Gangjeong stream.

### 3. 기후변화에 따른 지표유출량 예측

#### 3.1 장기 지표유출량 분석

본 연구에서는 외도천, 강정천 유역에 각 지형자료를 SWAT모형에 적용하여 대상유역인 장기유출을 모의하였으며, 2100년까지 미래 유출량의 변화를 비교하기 위하여 현재의 유출량 보정에 적용되었던 매개변수를 그대로 적용하였다.

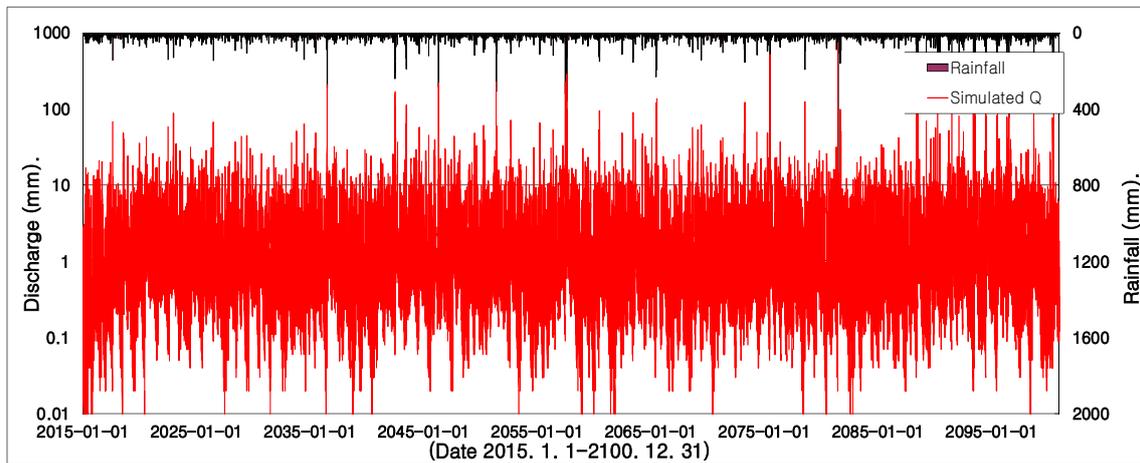


Fig. 5.12 Future present comparison of direct runoff of Oaedo stream.

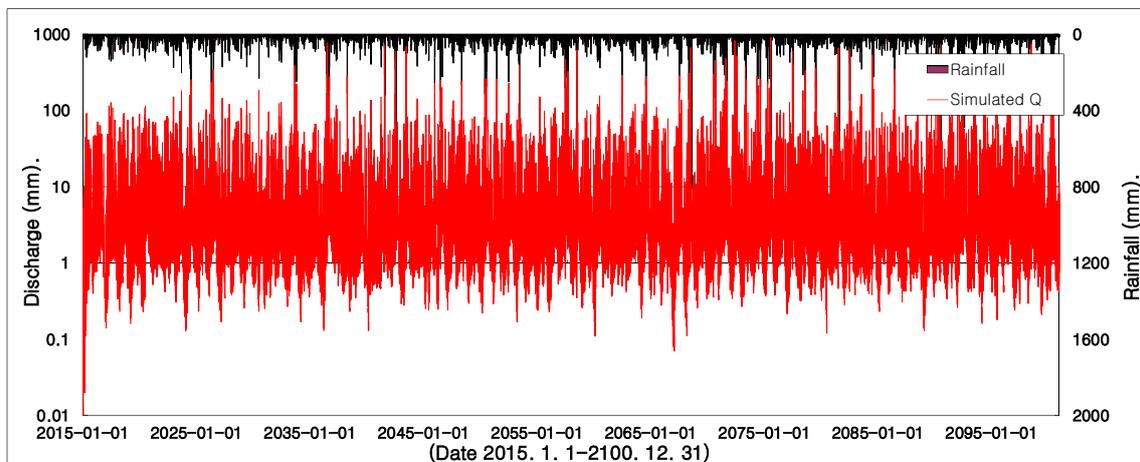


Fig. 5.13 Future present comparison of direct runoff of Gangjeong stream.

외도천유역의 미래(2015~2100) 86년간의 평균 지표 유출율은 18%으로 산정되었다. 현재의 평균 지표 유출율(21%)에 비해 약 14% 감소하는 것으로 나타났지만 미래로 갈수록 극치값이 증가 할 것으로 전망되었다. 강정천유역의 미래(2015~2100) 86년간의 평균 지표 유출율은 28%로 산정되었으며 현재의 평균 지표 유출율(23%)에 비해 약 22% 증가하는 것으로 나타났다. 지표 유출량 증가와 동시에 미래로 갈수록 최대 지표 유출량 발생이 현재보다 빈번하게 발생할 것으로 전망되었으며, 기존 연구의 Lee et al.(2015)의 연구결과에서도 제주도의 강수량은 과거에 비해 1.45배 이상 증가하고 있다고 제시하였다. 또한, 외도천과 강정천 유역 모두 10년 이동평균이 약 2075년부터 평균이 높게 산정됨을 알 수 있었다(Fig. 5. 14 ~ 5.15).

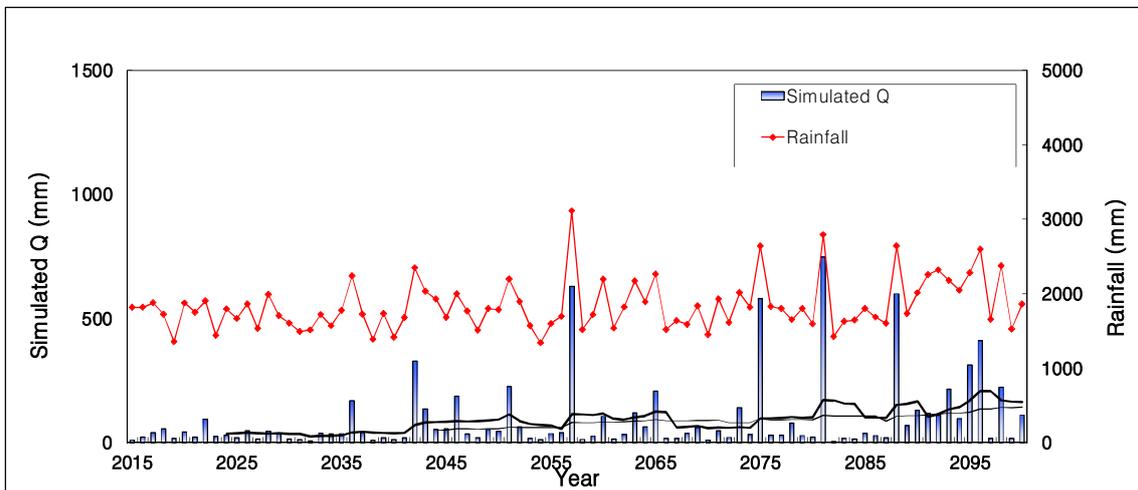


Fig. 5.14. Future present comparison of direct runoff of Oaedo stream.

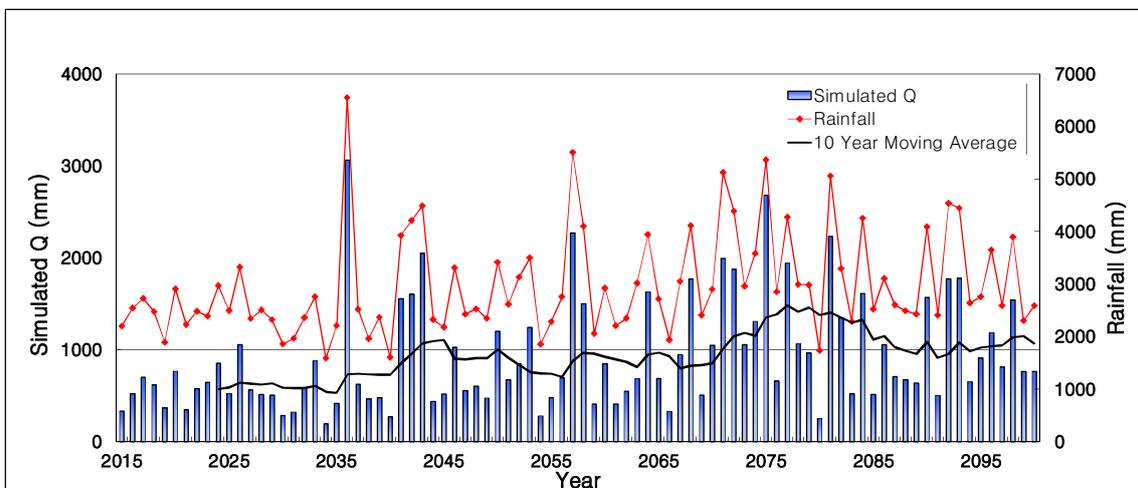
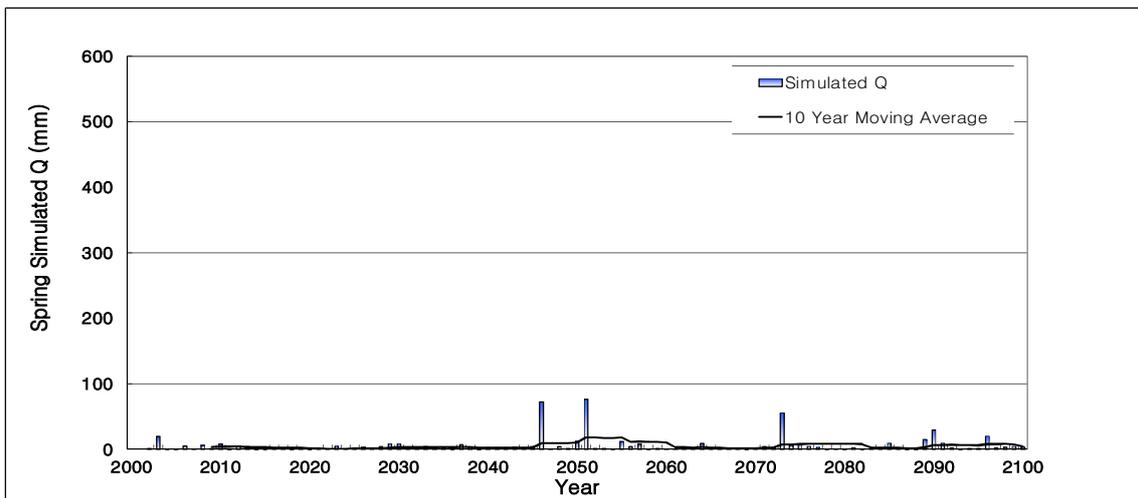


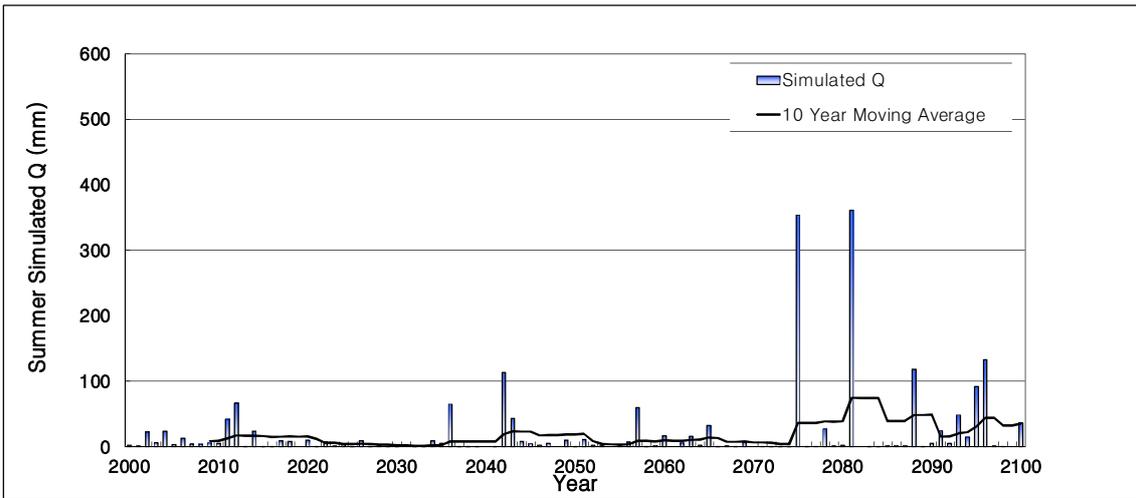
Fig. 5.15 Future present comparison of direct runoff of Gangjeong stream.

### 3.2 계절 지표유출량 분석

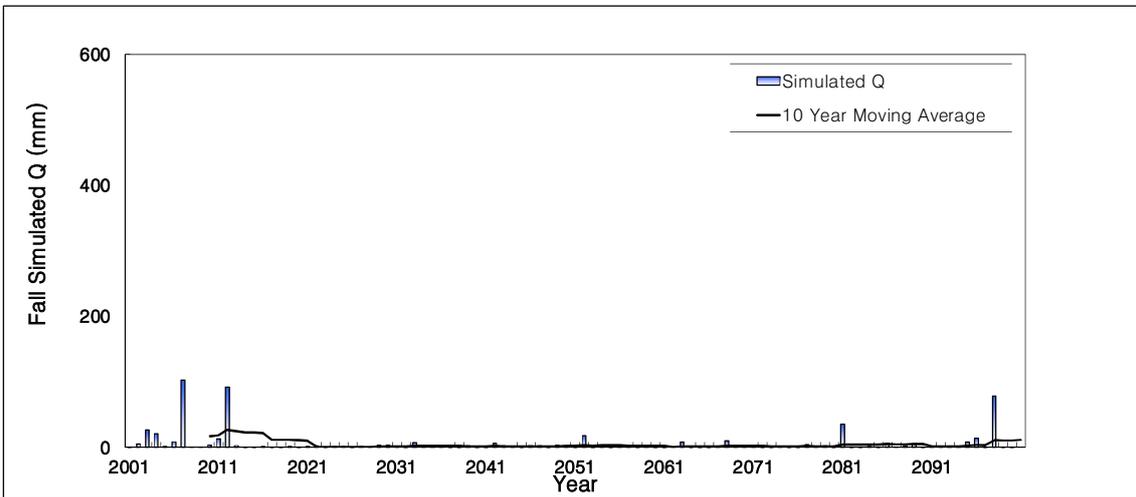
본 연구에서는 계절별 유출량 분석을 위하여 봄 3 ~ 5월, 여름은 6 ~ 8월, 가을 9 ~ 11월, 겨울 12 ~ 2월로 구분하여 지표유출의 변동성을 유역별로 분석을 실시하였다. 외도천 유역은 가을인 9 ~ 11월 제외하고는 전체적으로 증가하였으며, 봄에는 유출량이 59% 증가, 여름에는 11%, 겨울에는 99% 증가하였으나, 가을에는 84% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 2075년과 2081년에 유출량이 크게 증가할 것으로 예측하였다. 외도천 유역의 전 기간의 계절 유출량을 보면 봄에는 23.977 mm, 여름에는 84.777 mm, 가을 30.366 mm, 겨울에는 8.831 mm로 나타났다(Fig. 5.16).



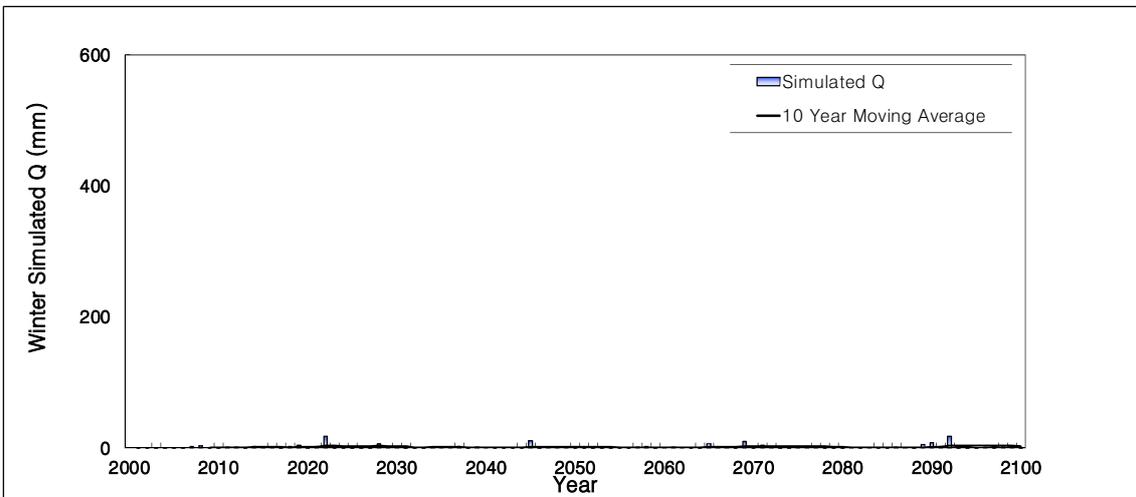
(a) Spring



(b) Summer



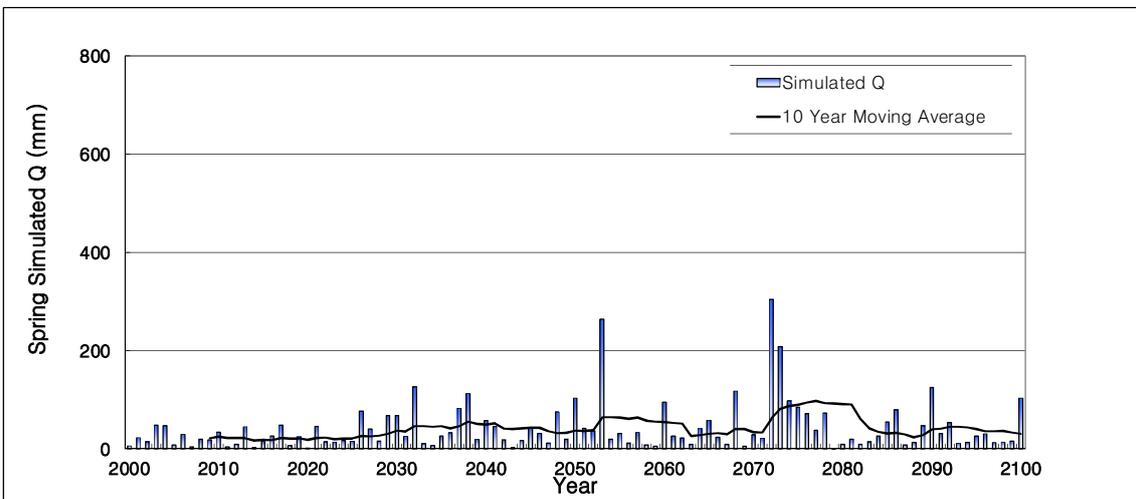
(c) Fall



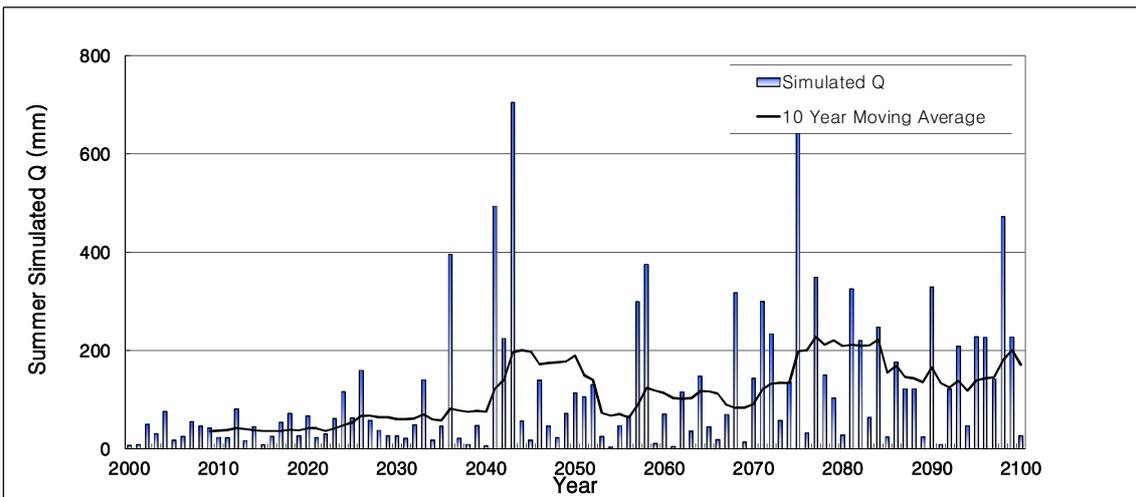
(d) Winter

Fig. 5.16 Climate change impacts on seasonal discharges at Oaedo stream.

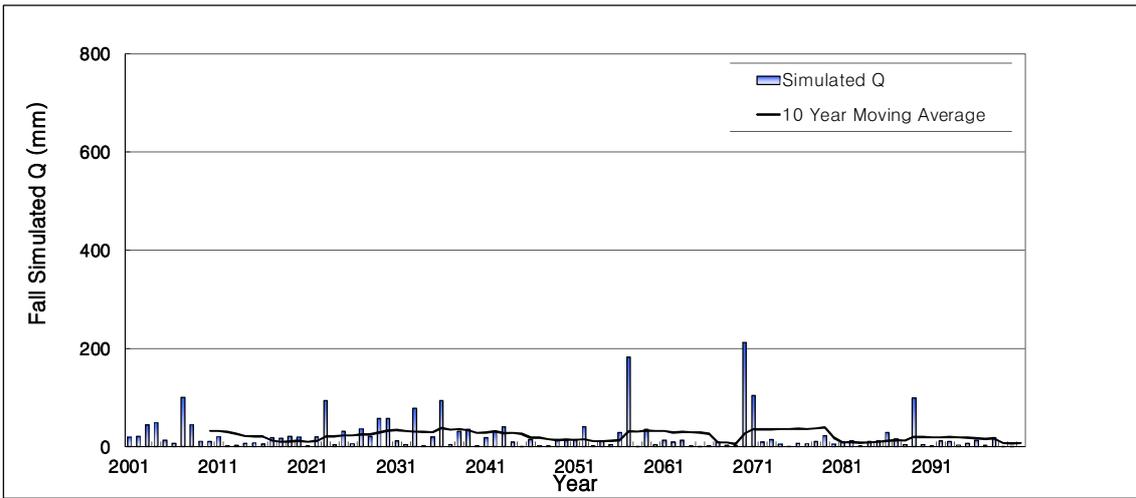
강정천 유역은 여름과 겨울에는 유출량 감소, 봄과 가을에는 유출량 증가로 나타났다. 봄에는 유출량이 24%, 가을에는 34% 증가하였으나, 여름에는 23%, 겨울에는 36%로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 2036년과 2075년에 유출량이 크게 증가할 것으로 예측하였다. 강정천 유역의 전 기간의 계절 유출량을 보면 봄에는 41.729 mm, 여름에는 114.268 mm, 가을 22.532 mm, 겨울에는 13.874 mm로 나타났다(Fig. 5.17).



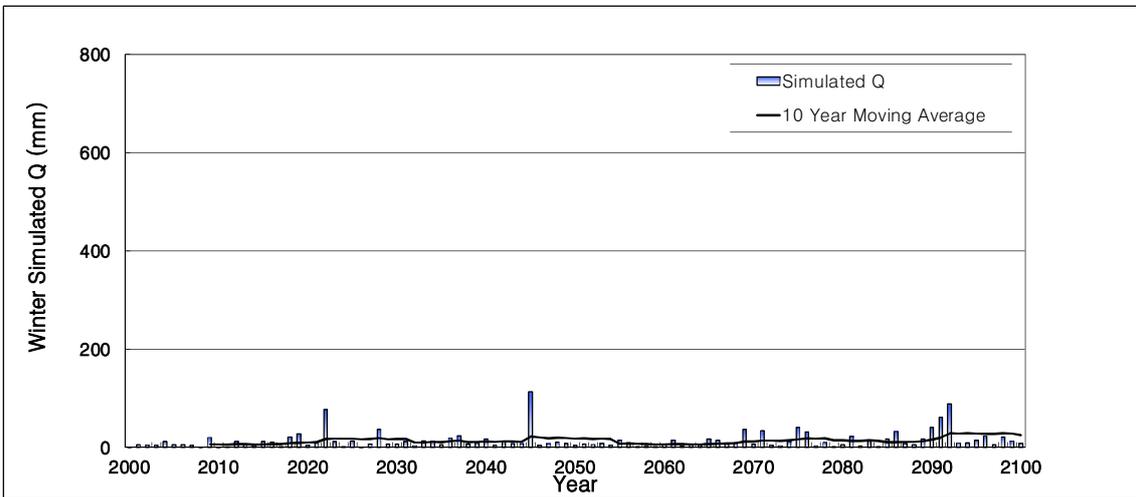
(a) Spring



(b) Summer



(c) Fall



(d) Winter

Fig. 5.17 Climate change impacts on seasonal discharges at Gangjeong stream.

## 4. 기후변화에 따른 가뭄지수 예측

### 4.1 기상관측소 선정

가뭄분석을 위해 과거로부터 관측자료의 신뢰성을 확보할 수 있는 기상청의 일강수량 자료를 사용 하였다. 따라서 Table 5.9와 같이 제주, 서귀포, 성산, 고산의 4개 관측소를 선정하여 30년 이상의 실측 강수량 자료를 이용하였다. 고산기상대는 관측년수가 최대 28년으로 30년 미만이지만 제주도의 지역적(북부, 남부, 서부, 동부) 기후변화에 따른 가뭄 특성을 분석하기 위하여 포함하였다.

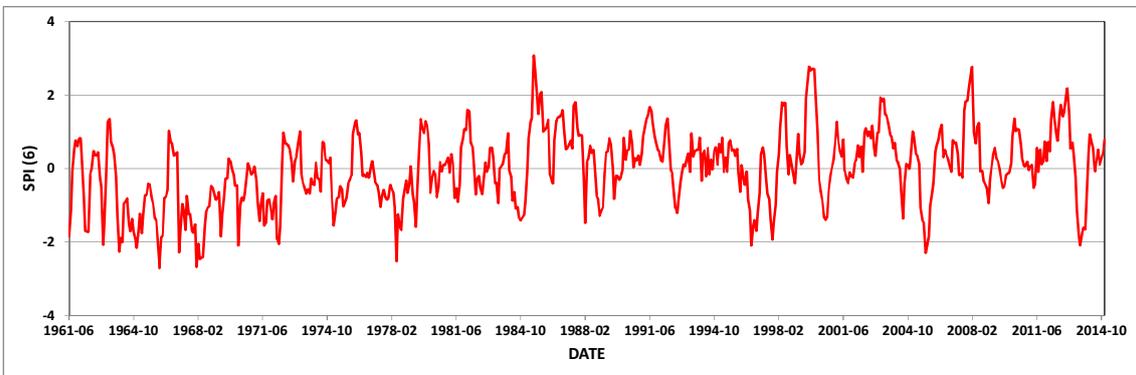
Table 5.9 Specification of weather stations

Weather station	Latitude	Longitude	E.L. (m)
Jeju	33° 30′ 51.0″	126° 31′ 46.7″	20.5
Seogwipo	33° 14′ 46.0″	126° 33′ 55.2″	47.0
Seongsan	33° 23′ 13.6″	126° 52′ 48.7″	17.8
Gosan	33° 17′ 37.7″	126° 09′ 61.1″	71.5

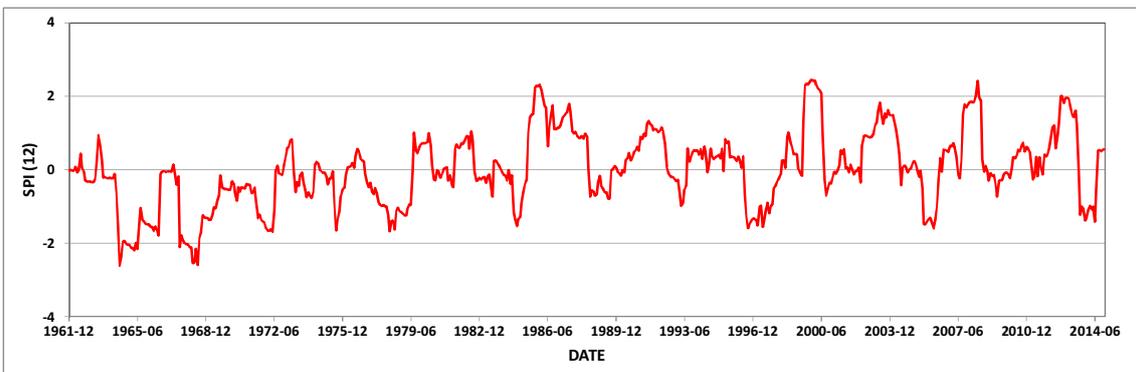
## 4.2 과거 가뭄지수 분석

기후변화에 따른 가뭄 현상 분석을 위하여 우선 제주도내 4개의 기상관측소의 과거 기상자료를 활용하여 가뭄지수 분류기준을 적용 및 검증하였다. 제주, 서귀포, 성산기상대는 최소 30년 이상의 강우자료를 대상으로 분석하였다(Fig. 5.18).

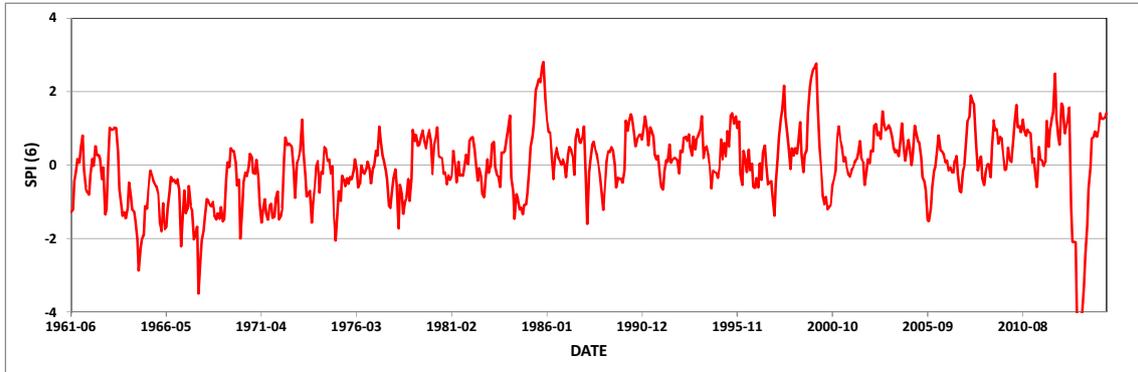
4개 기상대의 관측소별 표준강수지수를 살펴보면 SPI 12가 SPI 6에 비해 비교적 단순한 변동 경향을 가지고 있는 것으로 확인할 수 있었으며, SPI 12에서도 가뭄으로 나타나는 경우는 발생한 가뭄의 정도가 심함을 의미하고 있다. 특히, 2013년 기상 관측을 시작한 이래 90년 만에 최악의 가뭄이 발생하여 서귀포 기상관측소는 2013년 7월에 SPI 6가 -5.1 까지 극심한 가뭄으로 나타나고 있으며 성산 기상관측소를 제외한 3개의 관측소 모두 2013년은 SPI 6가 -2.0을 넘어 극심한 가뭄으로 나타났다. 또한, 제주기상청은 1964년에 -1.595을 기록하였으며, 고산은 1996년에 -1.199, 성산은 1978년 SPI가 -2.212기록하여 그해에 극심한 가뭄을 발생하였다.



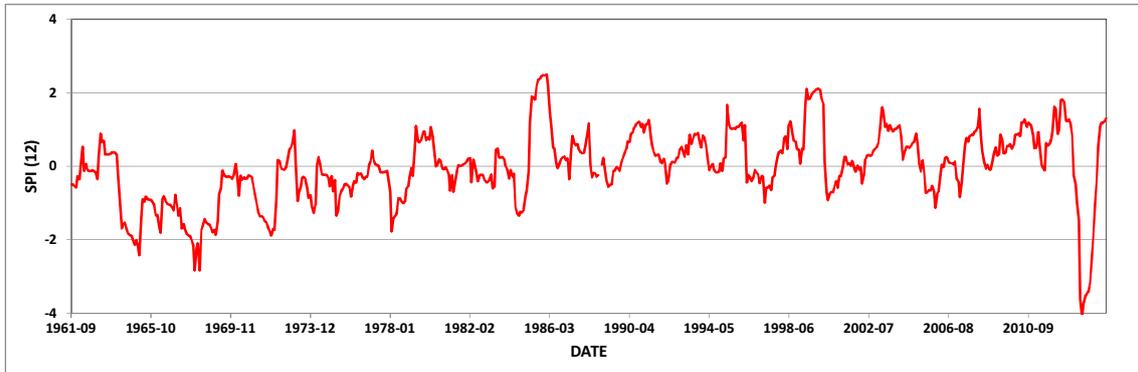
(a) Jeju weather station of SPI 6



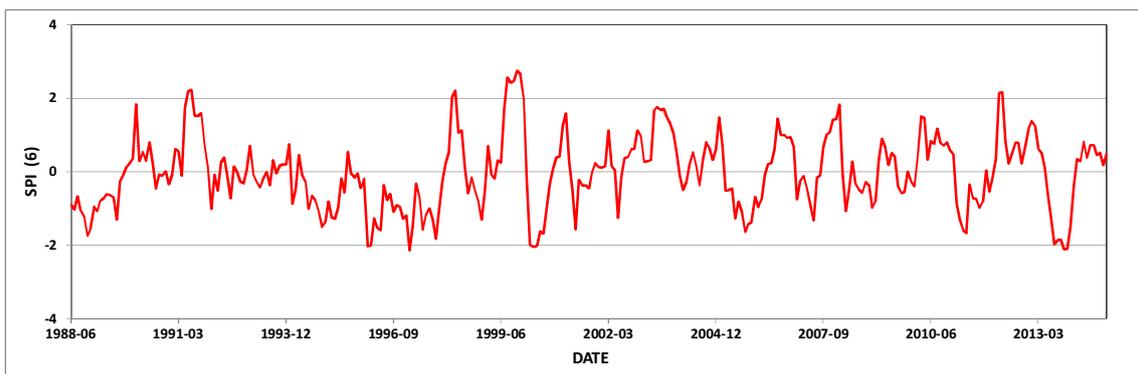
(b) Jeju weather station of SPI 12



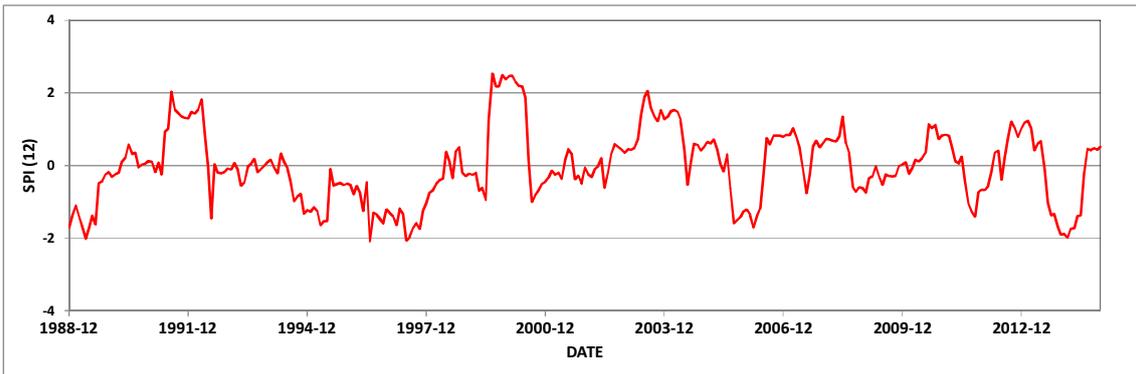
(c) Seogwipo weather station of SPI 6



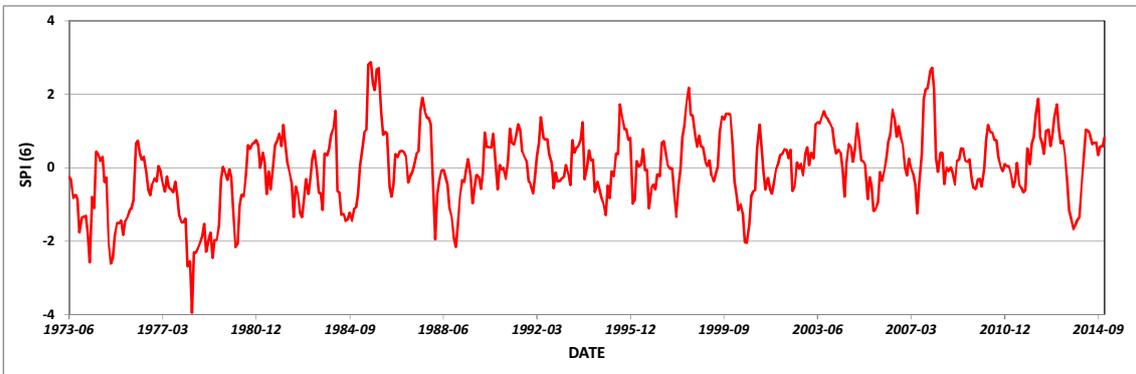
(d) Seogwipo weather station of SPI 12



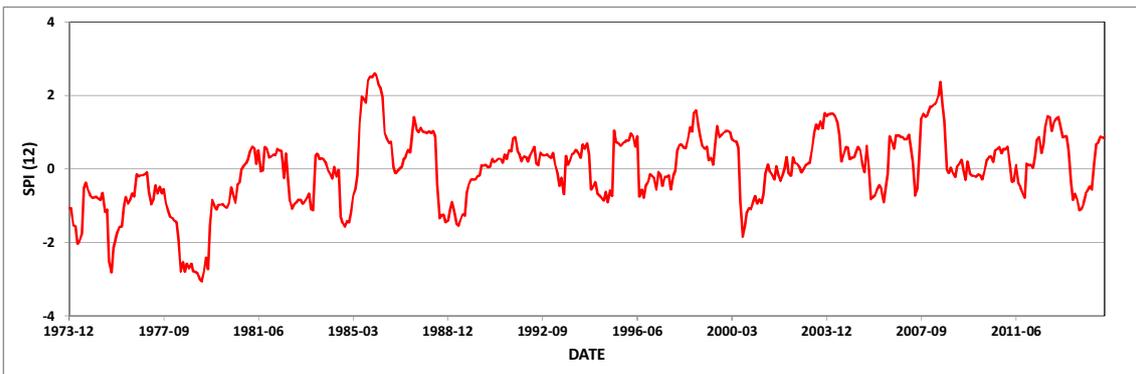
(e) Gosan weather station of SPI 6



(f) Gosan weather station of SPI 12



(g) Seongsan weather station of SPI 6



(h) Seongsan weather station of SPI 12

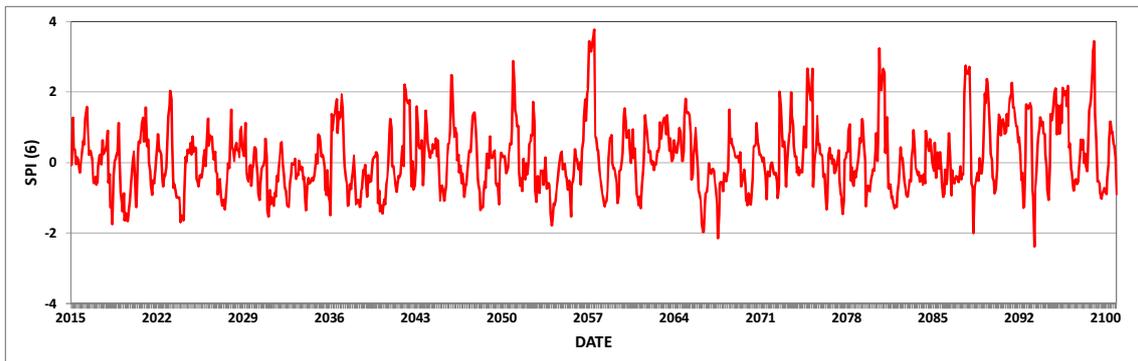
Fig. 5.18 Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 and SPI 12.

Table 5.10 Computation of standardized precipitation index of weather stations

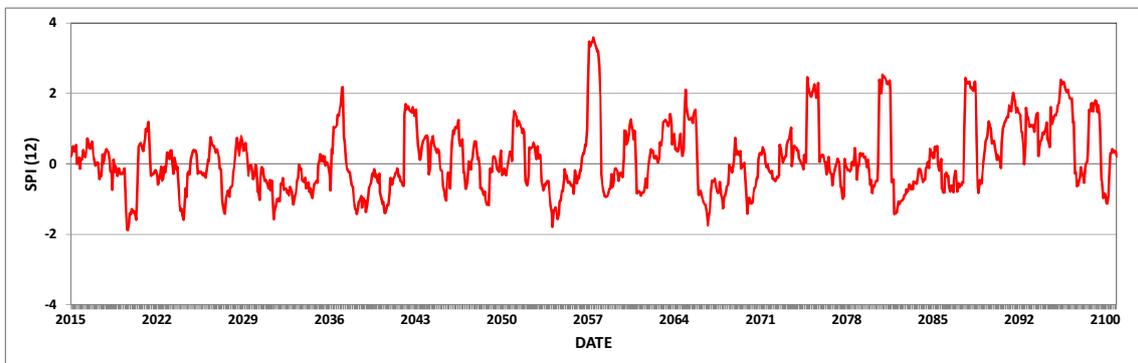
Year	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san	Year	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san
1961	-0.051	-0.339	-	-	1988	-0.315	-0.216	-1.171	-0.886
1962	-0.285	-0.031	-	-	1989	-0.053	-0.088	-0.563	-0.468
1963	-0.106	0.162	-	-	1990	0.396	0.853	0.278	0.237
1964	-1.595	-1.383	-	-	1991	1.023	0.536	1.055	0.484
1965	-1.057	-0.978	-	-	1992	0.042	0.072	-0.187	0.305
1966	-0.620	-0.981	-	-	1993	0.254	0.653	0.014	0.103
1967	-1.286	-1.345	-	-	1994	0.251	0.091	-0.576	-0.233
1968	-1.543	-1.605	-	-	1995	0.453	0.882	-0.450	0.493
1969	-0.531	-0.500	-	-	1996	-0.848	-0.195	-1.199	-0.323
1970	-0.557	-0.425	-	-	1997	-0.672	-0.280	-1.163	-0.089
1971	-0.956	-1.063	-	-	1998	0.598	0.813	0.328	1.037
1972	-0.293	-0.226	-	-	1999	1.454	1.374	1.258	0.638
1973	-0.113	-0.318	-	-0.873	2000	-0.272	-0.432	-0.670	-0.956
1974	0.038	-0.065	-	-0.688	2001	0.251	0.211	-0.003	0.002
1975	-0.800	-0.768	-	-1.692	2002	0.650	0.228	0.275	0.113
1976	0.388	-0.191	-	-0.097	2003	1.202	0.948	1.082	0.980
1977	-0.511	-0.009	-	-0.586	2004	-0.014	0.438	0.194	0.354
1978	-1.014	-0.774	-	-2.212	2005	-0.708	-0.236	-0.627	-0.215
1979	0.192	0.643	-	-1.059	2006	0.377	0.165	0.434	0.648
1980	-0.107	0.179	-	-0.405	2007	0.779	0.289	0.008	0.573
1981	0.129	-0.093	-	0.222	2008	0.583	0.229	-0.094	0.393
1982	0.169	-0.003	-	-0.406	2009	-0.038	0.528	0.028	0.006
1983	0.023	0.128	-	-0.059	2010	0.559	0.945	0.746	0.432
1984	-0.656	-0.646	-	-0.743	2011	0.118	0.223	-0.760	-0.204
1985	1.413	1.467	-	1.580	2012	1.291	1.273	0.800	0.968
1986	0.883	0.335	-	0.282	2013	-0.414	-2.636	-0.661	-0.361
1987	0.955	0.468	-	0.753	2014	0.331	0.842	0.252	0.602
minimum						1.454	1.467	1.258	1.580
maximum						-1.595	-2.636	-1.199	-2.212

### 4.3 기후변화에 따른 가뭄지수 분석

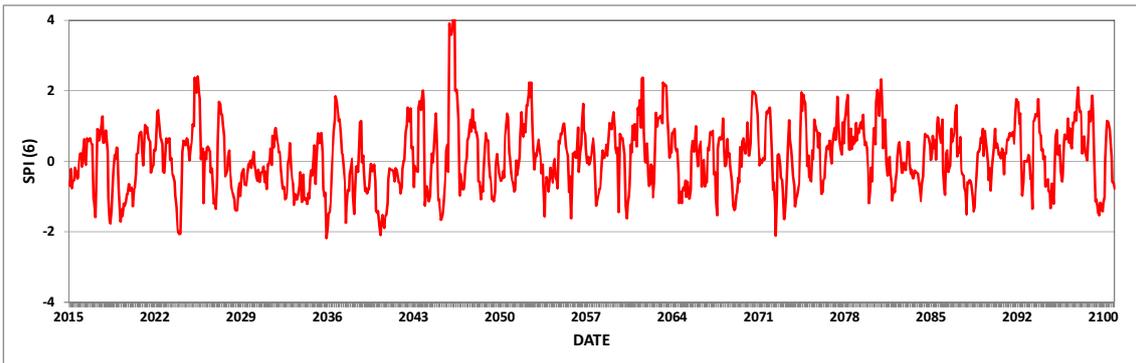
본 연구에서는 기후변화에 따른 가뭄 현상 분석을 위하여 분위사상법으로 보정한 기후변화 시나리오를 사용하였으며, 2100년까지 미래 가뭄지수 분류기준을 산정하였다. 제주, 서귀포, 성산, 고산기상대의 미래 가뭄지수는 다음 Fig 5.19과 같다.



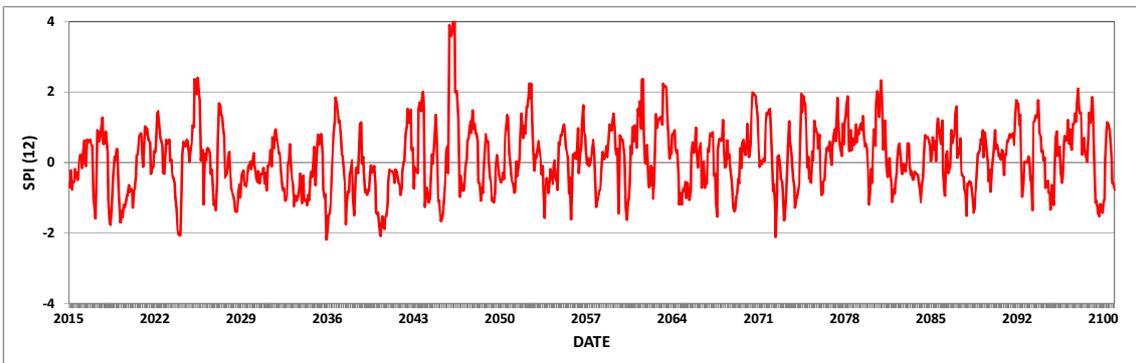
(a) Jeju weather station of SPI 6



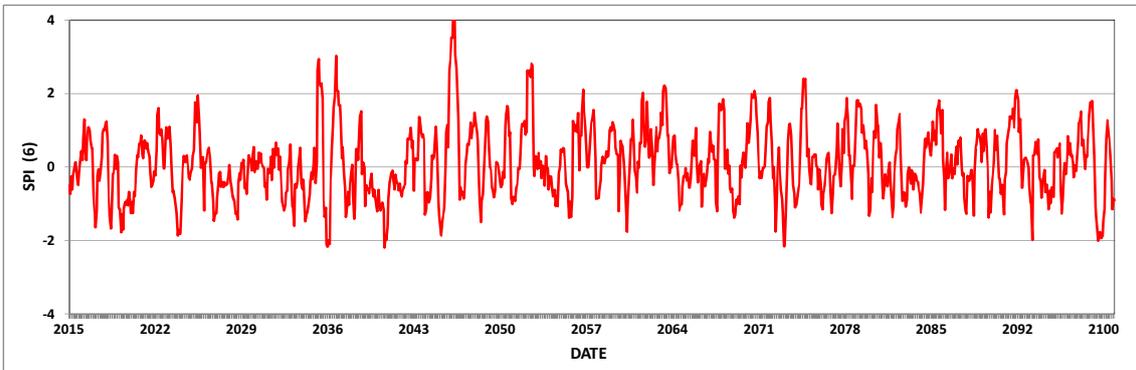
(b) Jeju weather station of SPI 12



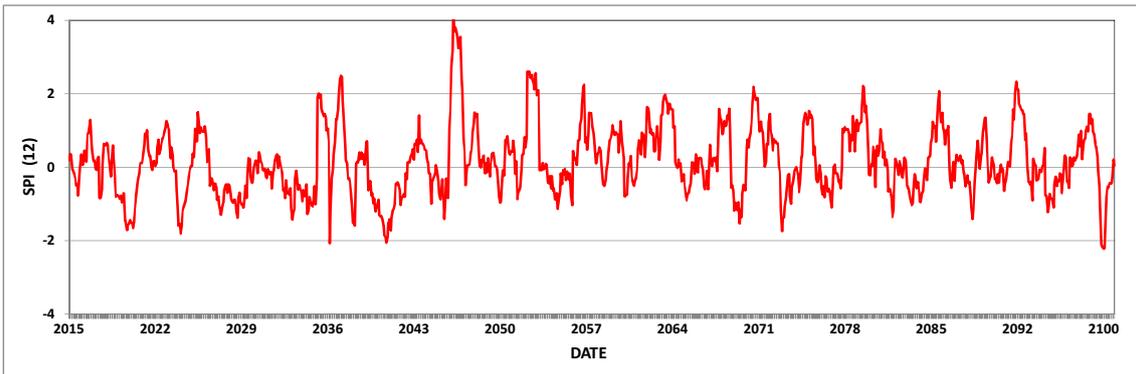
(c) Seogwipo weather station of SPI 6



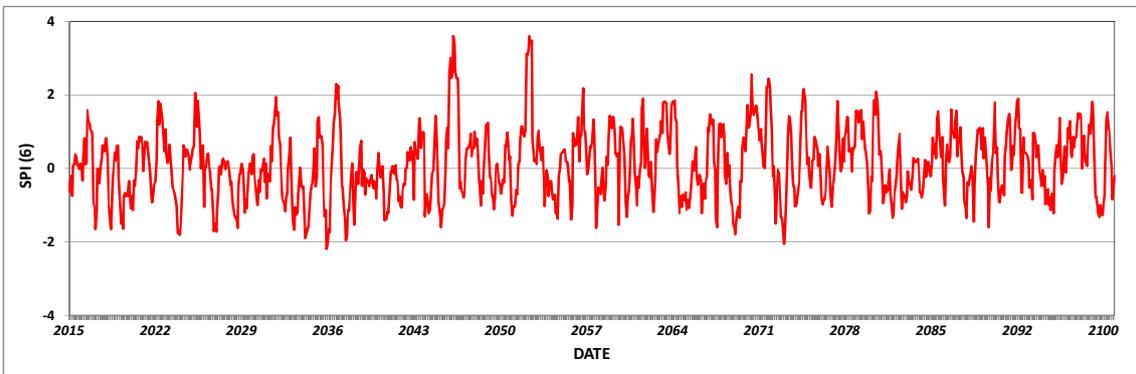
(d) Seogwipo weather station of SPI 12



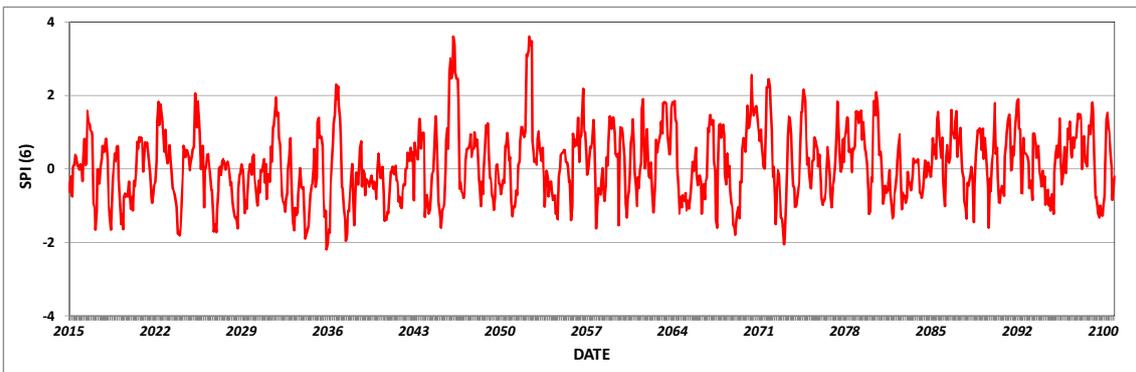
(e) Gosan weather station of SPI 6



(f) Gosan weather station of SPI 12



(g) Seongsan weather station of SPI 6



(h) Seongsan weather station of SPI 12

Fig. 5.19 Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 and SPI 12 with simulated weather data.

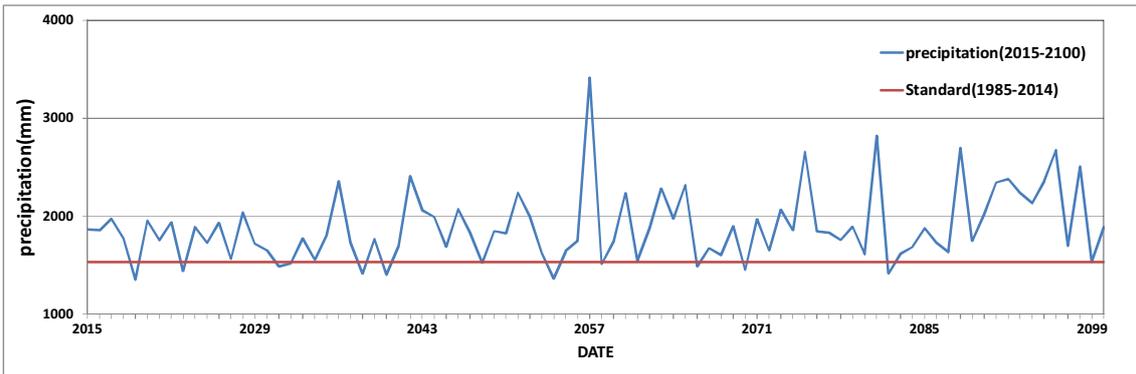
## VI. 기후변화에 따른 제주도 수자원의 영향 분석

기후 및 유출, 가뭄 시나리오가 생산되면 이를 이용하여 수자원에 미치는 변동을 분석하고자 한다. 기후변화에 대한 평가를 위해 장기간의 평균의 의미를 나타내고 있어 평균적인 30년 이상의 관측의 평균값을 고려하고 있다. 따라서 기후변화에 따른 영향평가를 위해서는 기준기간과 미래기간의 평균의 변화율이 고려하고 있다 (Arenell and Reynard, 1996). 본 연구에서는 동일한 방법으로 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. 전체 분석기간인 중 30년(1985~2014) 동안을 기준으로 하여 미래 86년 동안을 3개의 분석기간 Future 1(2015 ~ 2044년), Future 2(2045 ~ 2074년), Future 3(2075 ~ 2100)으로 설정하여 각 기간별 변화량을 평가하였다.

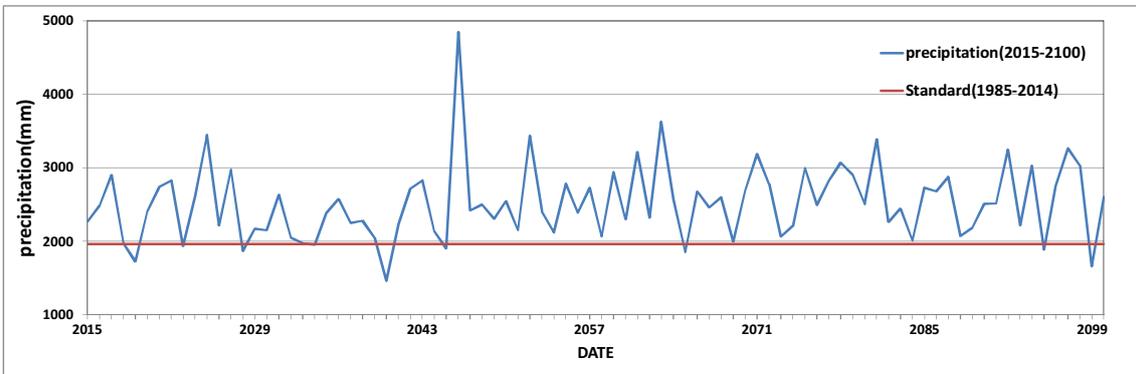
### 1. 강수량의 장기변동과 발생빈도

기후변화에 따른 기상관측소별 연평균 강수량의 시간적 변화를 분석하기 위해 기준기간에 대한 변화율을 산정하였다(Fig. 5.20). 우선 제주도 북부에 위치한 제주기상대 경우 Future 1 기간에서 16%, Future 2 기간에는 22%, Future 3 기간은 31% 전 기간 동안 강수량 증가하였으며(Fig. 5.20(a)), 남부의 서귀포기상대는 Future 1 기간에서 19%, Future 2 기간에는 33%, Future 3 기간은 33% 증가하였다(Fig. 5.20(b)).

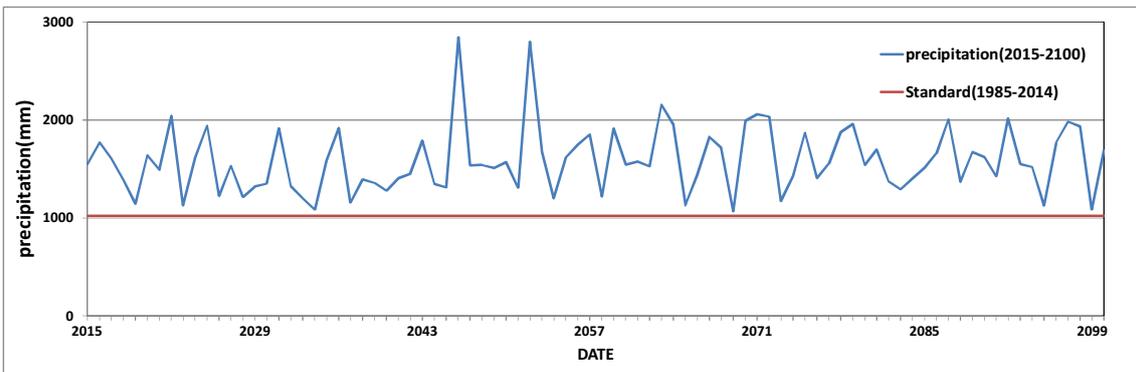
서부의 고산기상대는 Future 1 기간에서 44%, Future 2 기간에는 64%, Future 3 기간은 59% 증가하였으며(Fig. 5.20(c)), 마지막으로 동부의 성산기상대 경우 Future 1 기간에서 22%, Future 2 기간에는 36%, Future 3 기간은 30% 강수량이 증가하였다(Fig. 5.20(a)). 또한, 4개의 기상대 모두 Future 2 기간이 Future 1, 3보다 강수량 증가율이 가장 높게 산정되었다.



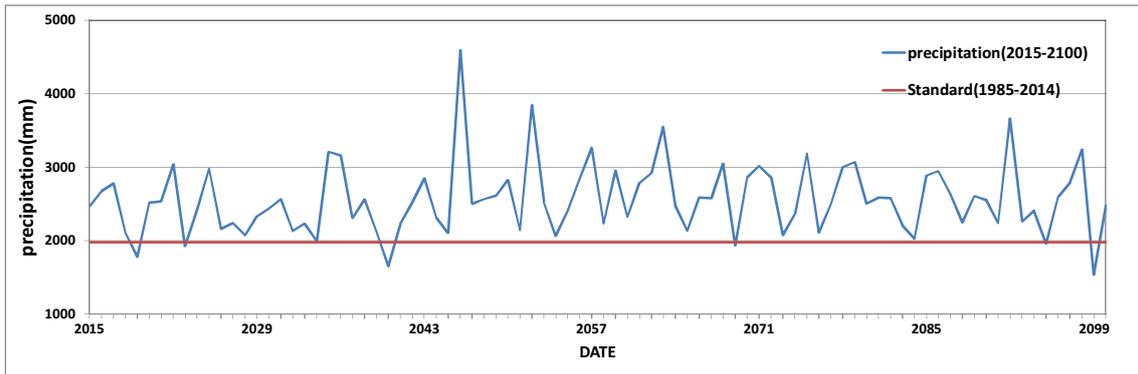
(a) Jeju weather station of precipitation



(b) Seogwipo weather station of precipitation



(c) Gosan weather station of precipitation



(d) Seongsan weather station of precipitation

Fig. 5.20 Variation of simulated year precipitation of weather station.

다음 Table 5.11은 기후변화에 따른 기상관측소별 월별 강수량 변화율을 나타냈다. 제주기상대에서는 전기간 평균적으로 1월, 5월 12월의 강수량이 최대 60%까지 크게 증가하여 큰 변화를 보였으며, 10월에 감소를 제외하고는 모두 증가하였다. 서귀포 기상대는 3월과 10 ~ 12월의 강수량 최대 89%까지 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 6 ~ 7월과 9월에 감소를 나타내고 있다. 성산기상대는 서귀포 기상대와 매우 비슷한 변화율을 나타내고 있으며, 3월과 10 ~ 12월의 강수량 90%까지 증가하는 것으로 나타났다. 고산기상대에서는 다른 기상대와 다르게 모든 월에 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 특히 10월과 12월 최대 132, 130% 까지 증가하는 것으로 나타나고 있다.

Table 5.11 Variation of simulated monthly precipitation of weather station

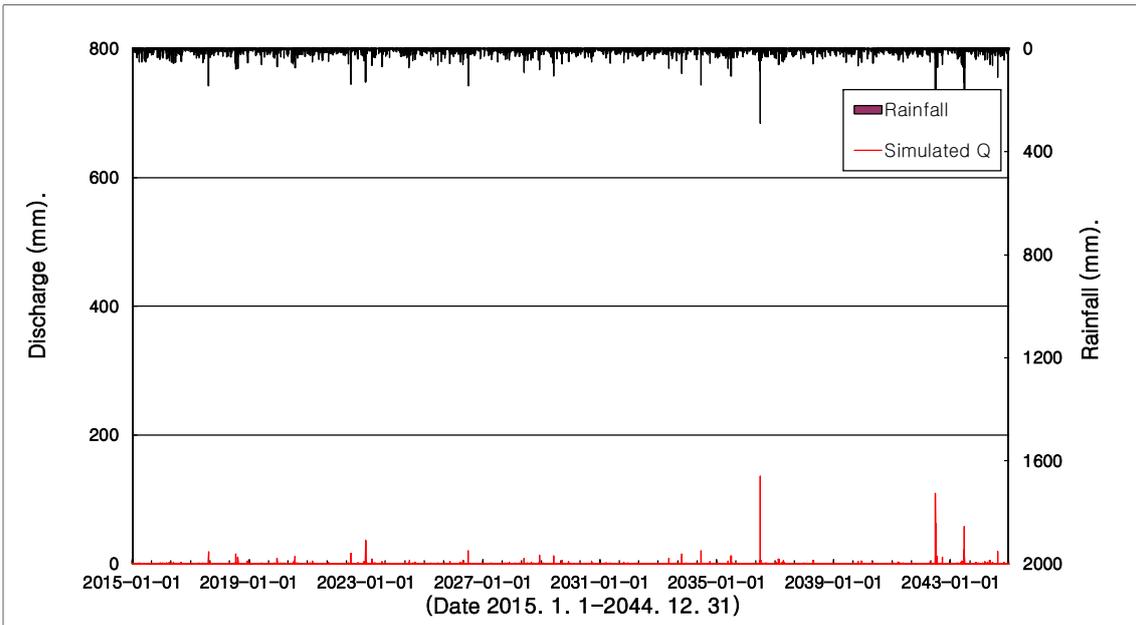
Period	Future 1(2015 ~ 2044)				Future 2(2045 ~ 2074)			
	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san
Jan	51%	19%	6%	6%	62%	40%	44%	59%
Feb	-10%	8%	33%	13%	27%	66%	99%	70%
Mar	26%	46%	39%	34%	43%	116%	84%	82%
Apr	31%	42%	40%	32%	66%	79%	82%	57%
May	23%	43%	64%	31%	26%	23%	54%	23%
Jun	7%	-16%	19%	-7%	9%	-5%	43%	13%
Jul	-1%	-17%	44%	-6%	-3%	-2%	70%	-5%
Aug	8%	8%	26%	13%	24%	12%	38%	11%
Sep	6%	-13%	-5%	-8%	16%	19%	42%	43%
Oct	16%	132%	213%	98%	-7%	85%	118%	42%
Nov	62%	111%	81%	110%	17%	85%	72%	98%
Dec	88%	77%	156%	99%	63%	82%	177%	130%
Period	Future 3(2075 ~ 2100)				Average			
	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san	Jeju	Seo gwipo	Go san	Seong san
Jan	15%	21%	19%	22%	43%	27%	23%	29%
Feb	16%	42%	55%	45%	11%	39%	62%	42%
Mar	12%	33%	29%	24%	27%	65%	51%	47%
Apr	26%	33%	37%	28%	41%	51%	53%	39%
May	8%	18%	24%	13%	19%	28%	47%	22%
Jun	13%	-24%	9%	-39%	10%	-15%	23%	-11%
Jul	21%	-22%	17%	-26%	6%	-13%	44%	-13%
Aug	-1%	-7%	1%	-14%	11%	4%	22%	4%
Sep	13%	-10%	4%	-8%	12%	-2%	14%	9%
Oct	-12%	51%	65%	46%	-1%	89%	132%	62%
Nov	17%	48%	41%	46%	32%	81%	65%	84%
Dec	29%	39%	57%	42%	60%	66%	130%	90%

## 2. 지표유출량의 발생빈도와 계절적 변화

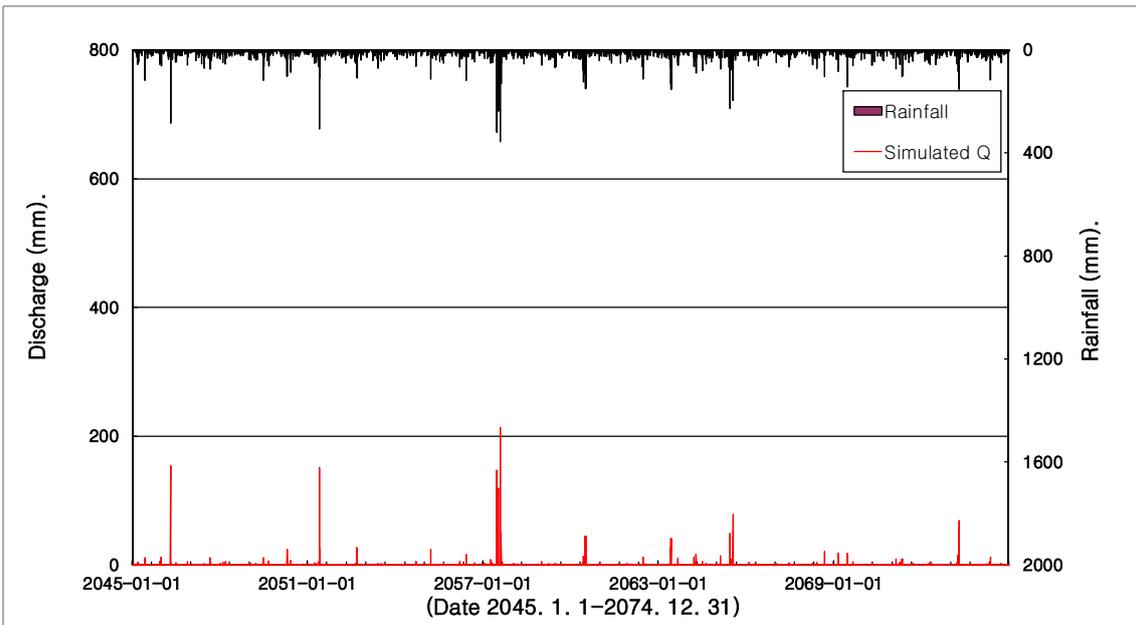
### 2.1 지표유출량 크기에 따른 발생빈도 변화

기후변화에 따른 지표유출량의 시간적 변화를 분석을 실시하였다. 기상자료 동일한 방법으로 전체 분석기간인 중 30년(1985~2014) 동안을 기준으로 하여 연구대상 유역인 외도천 유역과 강정천 유역의 미래 86년 동안을 3개의 분석기간 Future 1(2015 ~ 2044년), Future 2(2045 ~ 2074년), Future 3(2075 ~ 2100)으로 설정하여 지표 유출량을 산정하였다(Fig. 5.21 ~ 22).

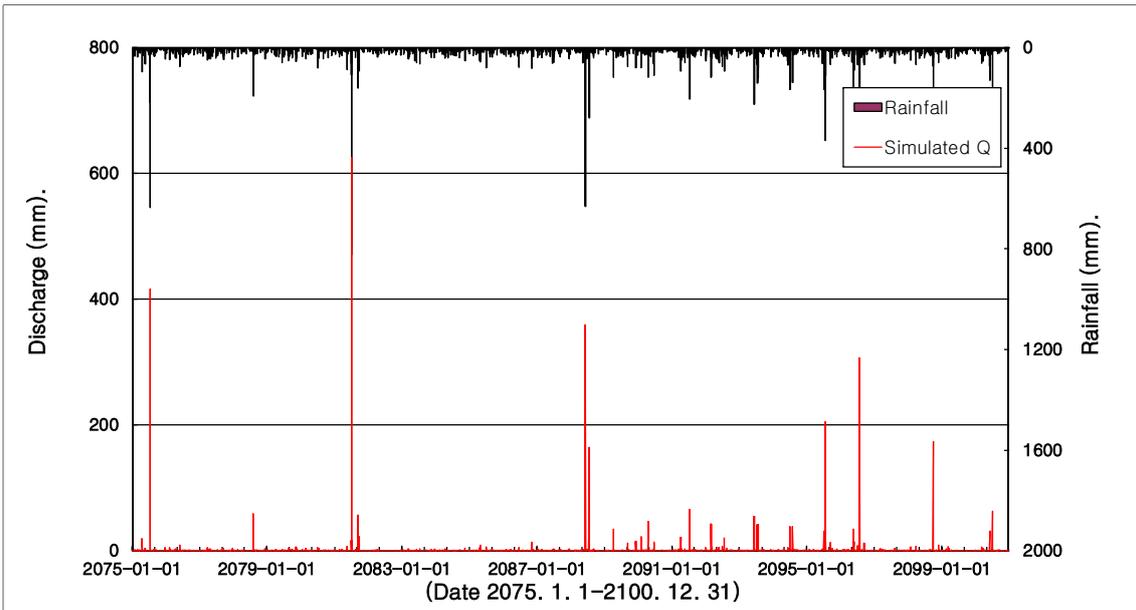
제주도 북부에 위치한 외도천 유역의 과거 기간의 평균 지표유출은 480.983 mm으로 강우량 대비 21%으로 지표유출로 나타났으며, Future 1 기간에서는 지표유출이 178.989 mm, Future 2 기간에는 292.073 mm, Future 3 기간은 574.203 mm로 Future 1, Future 2은 과거 기간보다 낮은 지표유출을 나타냈으나, Future 3 은 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 제주도 남부에 위치한 강정천 유역의 과거 기간의 평균 지표유출은 444.567 mm으로 강우량 대비 약 23%으로 지표유출로 나타났으며, Future 1 기간에서는 지표유출이 713.769 mm, Future 2 기간에는 884.623 mm, Future 3 기간은 1,063.063 mm로 미래로 갈수록 지표유출량이 증가하였다.



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)

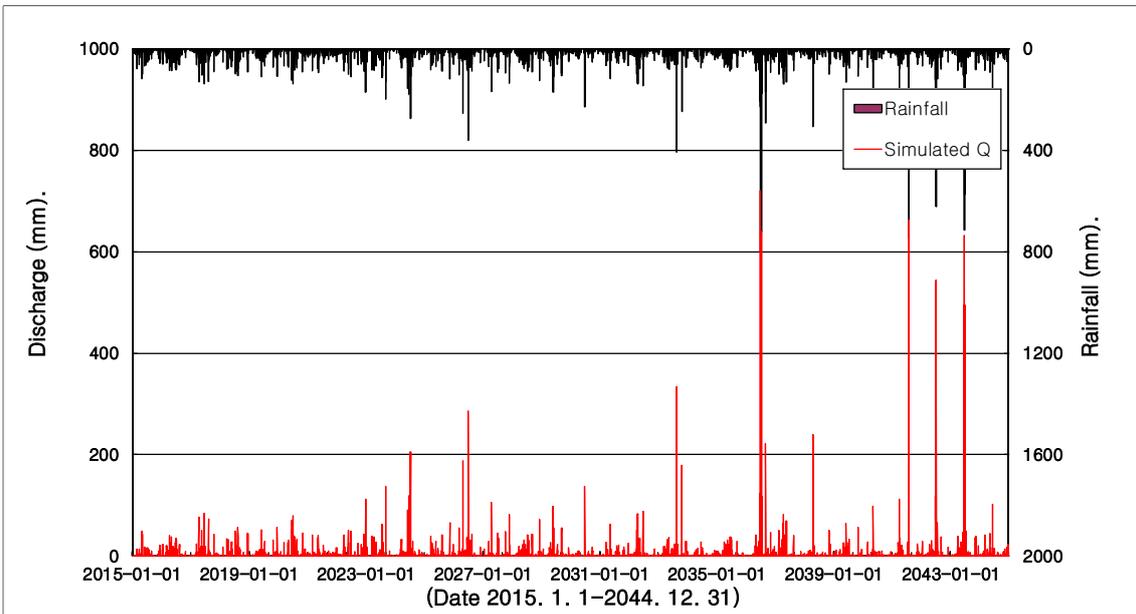


(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)

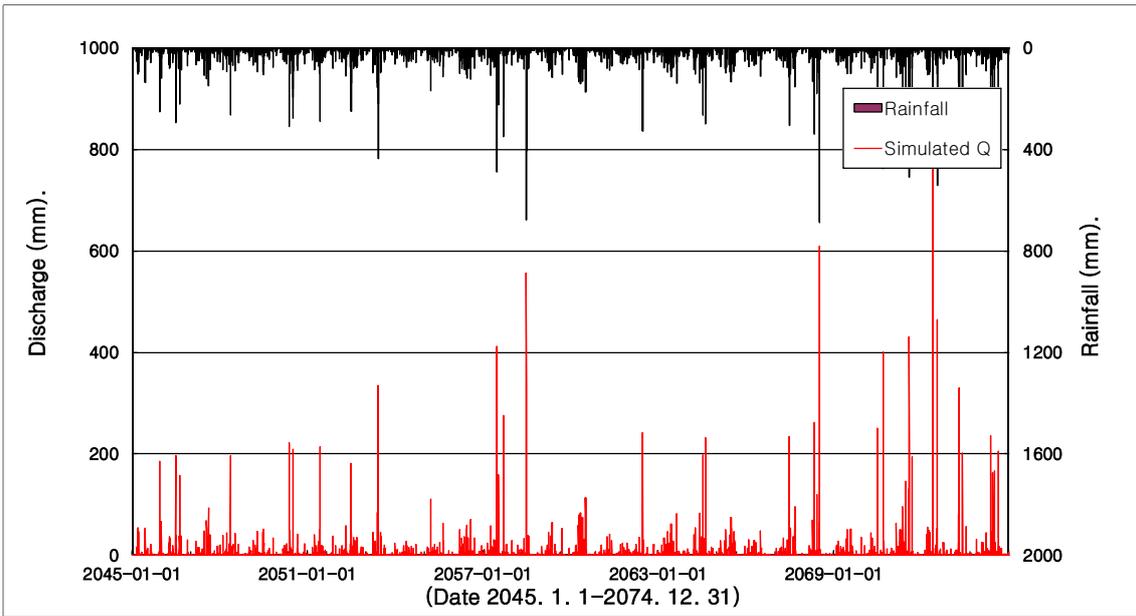


(c) Future 1(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

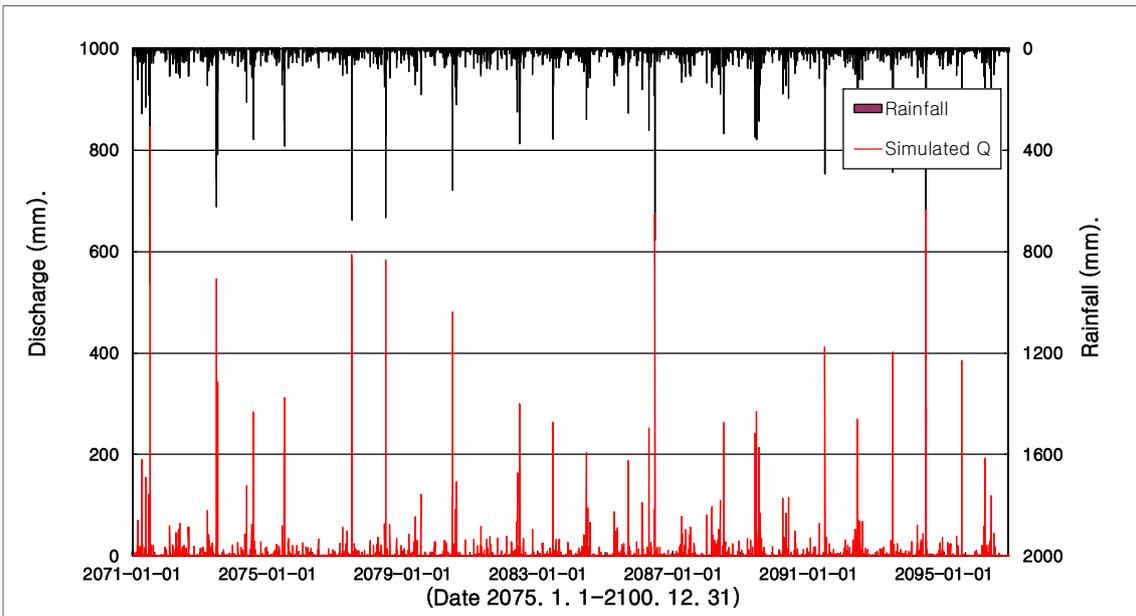
Fig. 5.21 Future present comparison of Discharge of Oaedo stream.



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)

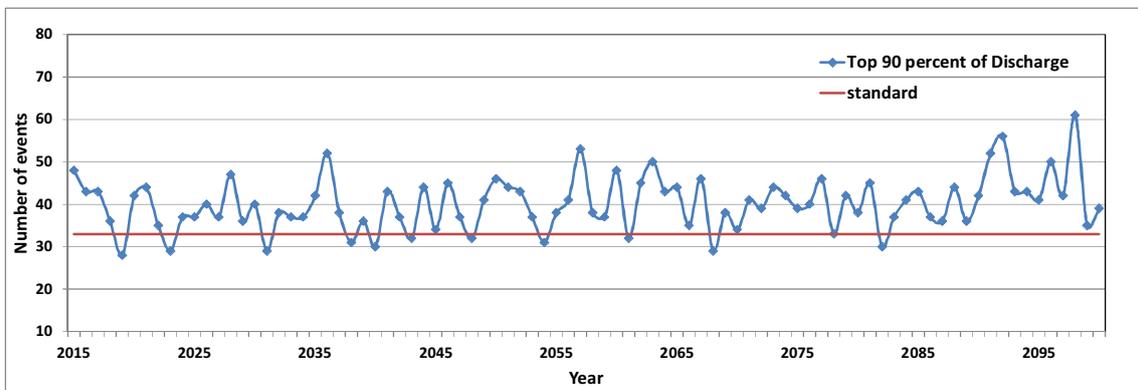


(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

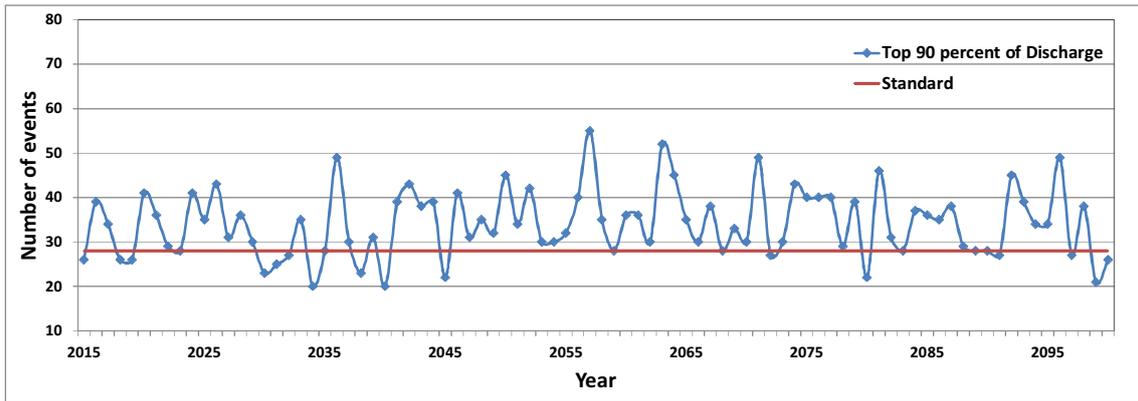
Fig. 5.22 Future present comparison of Discharge of Gangjeong stream.

다음 Fig. 5.23은 기후변화에 따른 지표유출량 크기에 따른 발생빈도를 나타내었다. 외도천 유역에서는 과거 기간의 90% 크기를 가지는 지표유출량 발생 빈도가 33회 발생하는 것으로 확인하였다. 미래기간인 Future 1 기간에서는 16% 증가, Future 2 기간에는 22% 증가, Future 3 기간은 27% 증가하였다. 외도천 유역인 경우 지표유출량 증가는 Future 1, Future 2은 과거 기간보다 낮은 지표유출을 나타냈으나, 상위 90% 크기를 가지고 있는 유출량은 지속적으로 증가하는 것으로 확인할 수 있었다.

강정천 유역의 과거 기간의 90% 크기를 가지는 지표유출량 발생 빈도는 평균 28회 발생 하였으며, 미래기간인 Future 1 기간에서는 32% 증가, Future 2 기간에는 36% 증가, Future 3 기간은 35% 증가하였다. 남부지역인 강정천 유역의 북부지역의 외도천 보다 발생빈도가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 남부지역에 위치한 서귀포기상대 강수량 증가율이 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 지표유출량 증가율은 미래로 갈수록 지표유출량이 증가하였으나, 상위 90% 크기를 가지는 지표유출량 발생빈도는 Future 2 기간이 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.



(a) Oaedo stream

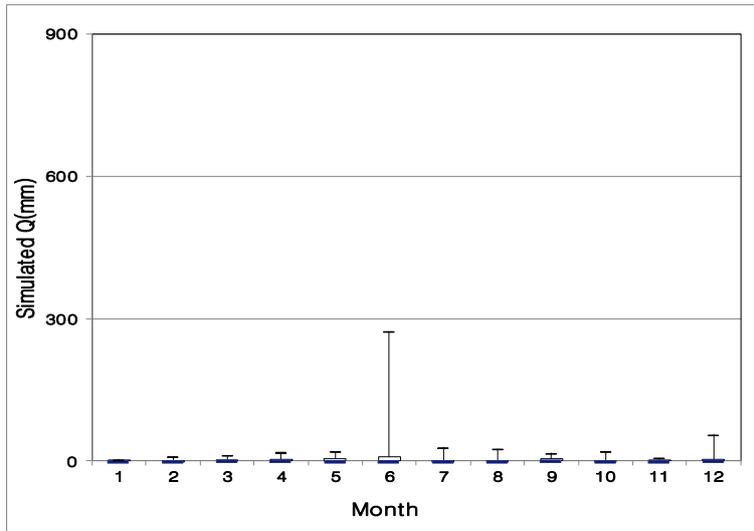


(b) Gangjeong stream

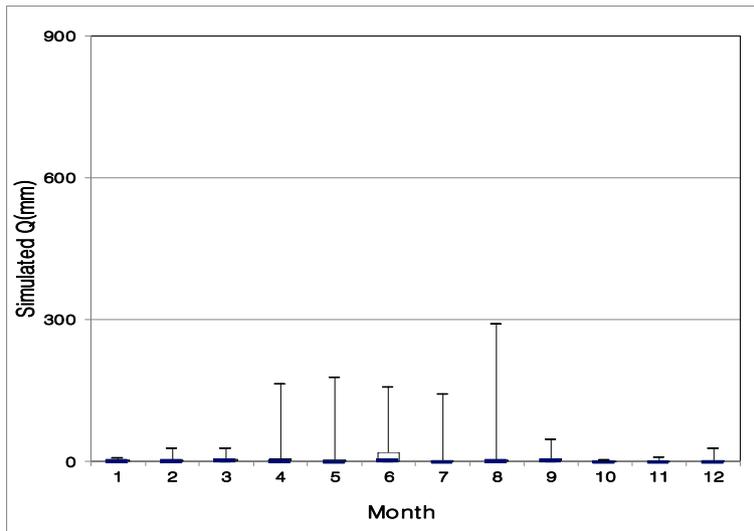
Fig. 5.23 Trends of event discharge at streams.

## 2.2 지표유출량의 계절적 변화

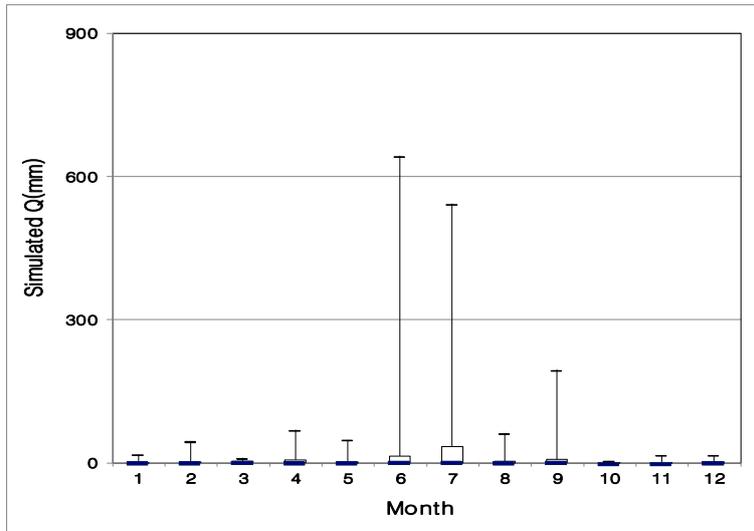
기후변화에 따른 지표유출량의 계절적 변화를 분석을 위하여 월별 유출량 분석을 실시하기 위해 외도천 유역의 월별 지표유출량의 분포를 분석하였다. 연구대상 유역인 외도천과 강정천 모두 분석기간 마다 최대 유출량 발생 양상이 크게 상이한 것으로 나타났으며 외도천 유역인 경우에는 Future 1에서는 6월에 지표유출량이 크게 증가하고 Future 2는 4 ~ 8월, Future 3은 6월, 7월 그리고 9월에서 지표유출량이 크게 발생하는 것으로 확인하였다(Fig. 5.24). 강정천 유역에는 Future 1에서는 6월과 7월, Future 2에서는 4 ~ 9월과 12월, Future 3은 전반적으로 지표유출량이 최대값이 크게 증가하는 것으로 확인 하였다(Fig. 5.25). 지표유출량 최대값은 제주, 서귀포 기상대의 강수량 월별 증가율과는 상이한 증가율을 보이고 있으며, 강수와 기온의 변화가 복잡적으로 적용하여 월별 지표유출량 변화율과 같은 결과를 보인 것으로 판단된다.



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)

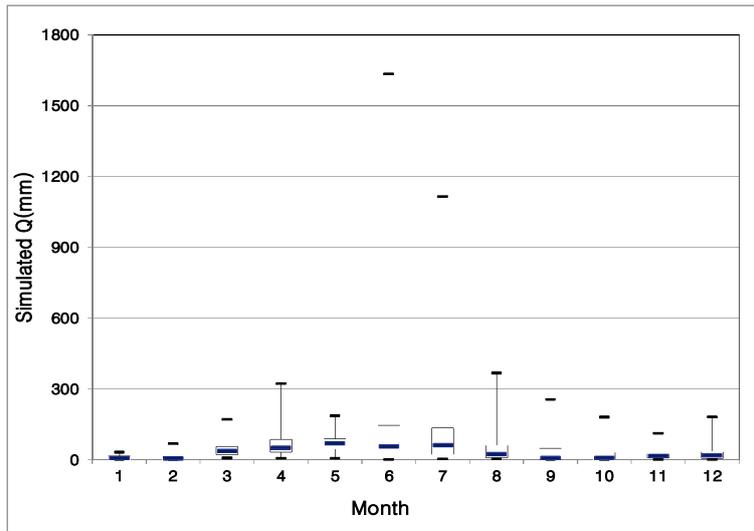


(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)

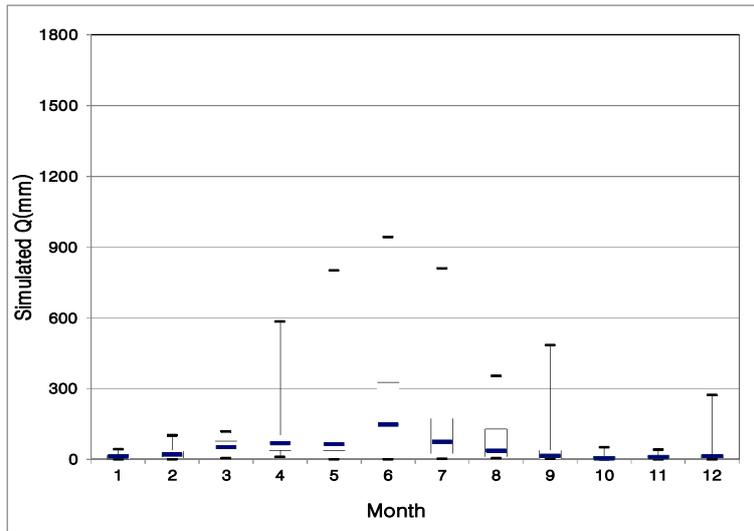


(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

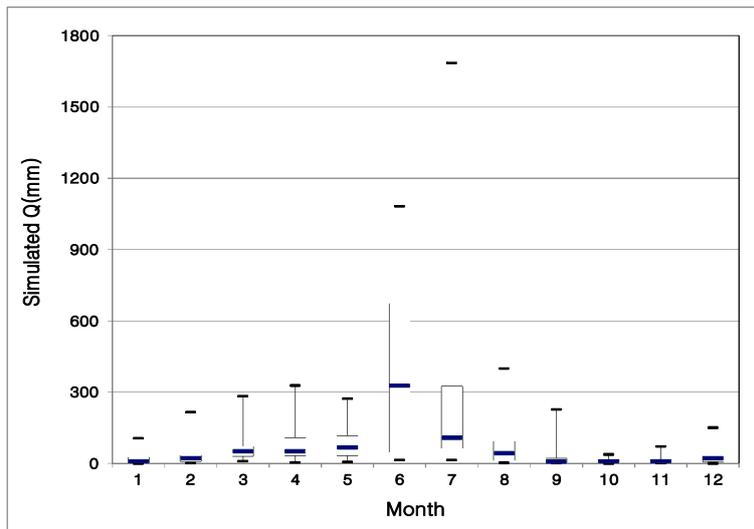
Fig. 5.24 Future simulated discharge of Oeado stream of Box-plot.



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)



(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

Fig. 5.25 Future simulated discharge of Gangjeong stream of Box-plot.

다음 Table 5.12은 분석기간에 따른 계절별 지표유출량 변화율을 제시하였다. 봄 3 ~ 5월, 여름은 6 ~ 8월, 가을 9 ~ 11월, 겨울 12 ~ 2월로 구분하여 기준기간에 대한 지표 유출량 변동성을 유역별로 분석을 실시하였다. 우선 외도천 유역은 지표유출량이 계절별로 변동성 나타났으며 특히, Future 2 기간 봄에는 172% 까지 증가할 것으로 나타났다. 여름에는 Future 1, 2에는 -37 ~ -55% 까지 감소하는 경향을 보이고 있으나 Future 3에는 145%까지 증가하였으며, 겨울은 전 계절이 지표

유출량이 기존 과거보다 증가할 것으로 나타났다.

우선 강정천 유역은 기존 과거 사상대비 가을에는 지표유출량이 감소할 것으로 나타났다. 특히, Future 3 기간 가을에는 -54% 까지 감소할 것으로 나타났다. 여름에는 Future 1, 2에는 -32 ~ -34% 까지 감소하는 경향을 보이고 있으나, Future 3에는 17%로 증가하였으며, 외도천과 동일하게 겨울은 지표유출량이 증가할 것으로 나타났다.

Table 5.12 Variation of simulated discharge of study streams

Period		Spring	Summer	Fall	Winter
Oaedo stream	Future 1	-33%	-37%	92%	100%
	Future 2	172%	-55%	-88%	90%
	Future 3	36%	145%	-70%	108%
Gangjeong stream	Future 1	-13%	-34%	-2%	20%
	Future 2	45%	-32%	-5%	14%
	Future 3	-8%	17%	-54%	73%

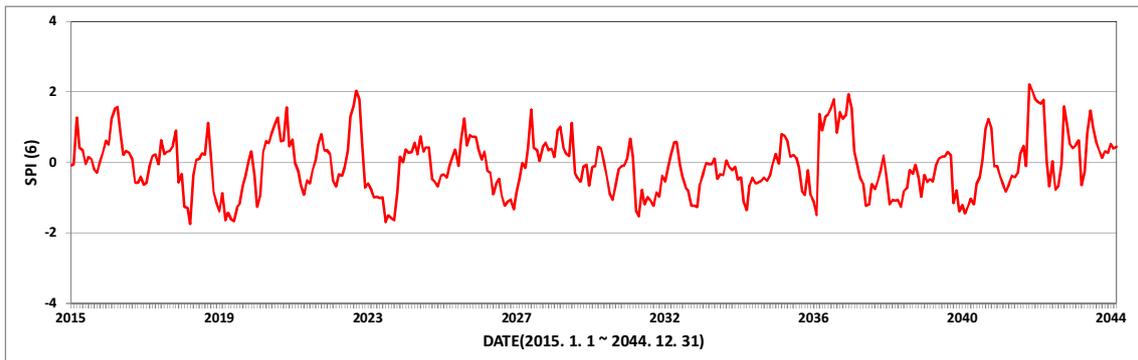
### 3. 가뭄지수의 발생빈도와 가뭄심도

#### 3.1 기후변화에 따른 가뭄 발생빈도 변화

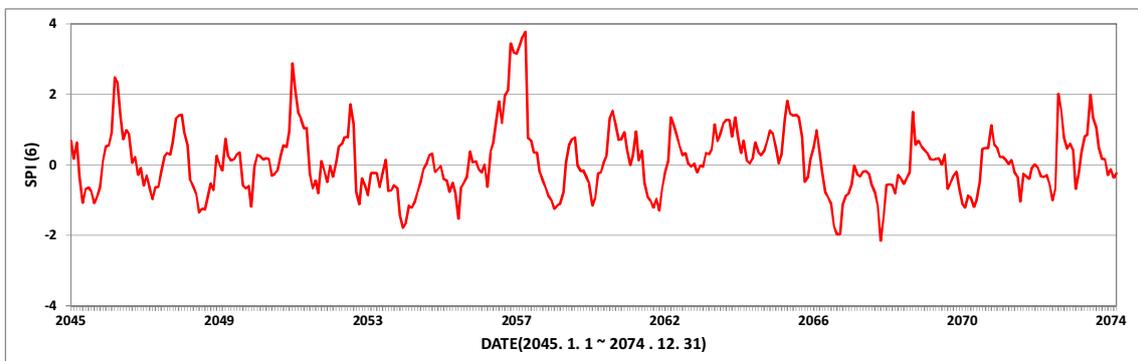
기후변화에 따른 가뭄의 시간적 변화를 분석을 실시하였다. 기상자료 동일한 방법으로 전체 분석기간인 중 30년(1985~2014) 동안을 기준으로 하여 4개 기상대인 제주, 서귀포, 고산, 성산 기상관측소의 미래 86년 동안을 3개의 분석기간 Future

1(2015 ~ 2044년), Future 2(2045 ~ 2074년), Future 3(2075 ~ 2100)으로 설정하여 가뭄지수를 분류하였다(Fig. 5.26 ~ 29). 미래의 가뭄 현상을 분석하기 위하여 가뭄지속기간인 6개월의 SPI 6을 이용하여 극심한 가뭄을 나타내는 -1.5 이하가 발생한 경우를 기준으로 분석을 실시하였다. 북부지역에 위치한 제주기상대의 경우에는 Future 1 기간에서 2019년 6월 ~ 10월까지 평균적으로 -1.65 으로 나타났으며, 2024년 1월 ~ 4월까지 Future 1 기간에서 평균 -1.7으로 가장 극심한 가뭄 지수를 나타내고 있다.

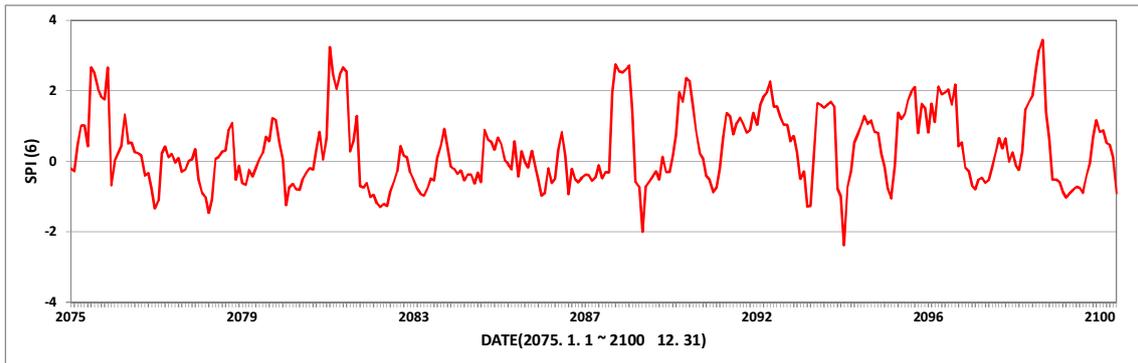
Future 2 기간에서는 가장 극심한 가뭄으로 2066년 11월에서 2067년 1월까지 평균 -1.97, 2068년 3월에는 최대 -2.16까지 나타났다. Future 3 기간은 2089년 3월에 -2.0, 2094년 3월에는 -2.39으로 제주기상대의 최저 가뭄지수를 나타내고 있다. 전체적으로 먼 미래로 갈수록 가뭄지수 변동성이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2.26).



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)

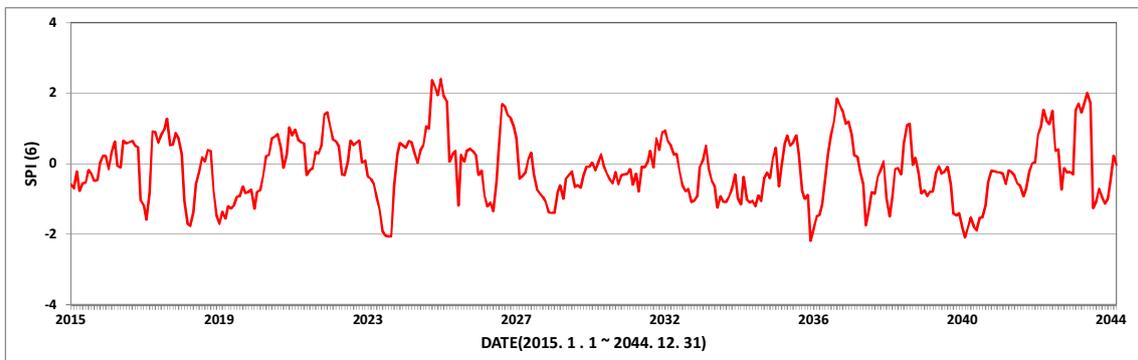


(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

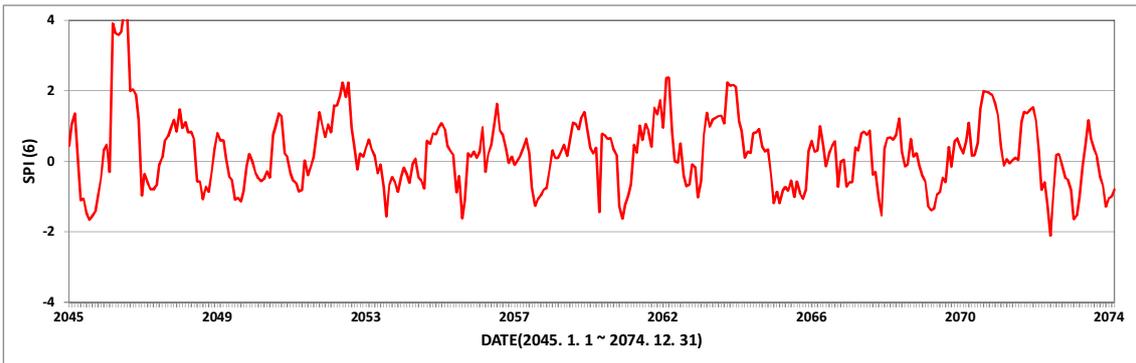
Fig. 5.26 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Jeju weather station.

남부지역에 위치한 서귀포기상대의 경우에는 북부에 위치한 제주기상대보다 가뭄에 영향을 많이 받을 것으로 나타났다. Future 1 기간에서 2019년 3월 ~ 6월까지 평균적으로 - 1.71 으로 나타났고 2023년 12월에서 2024년 3월까지 -2.04, 2036년 6월에는 -2.13 가장 극심한 가뭄을 나타나고 있으며, 2040년 4월부터 2045년 2월까지 평균 -1.81으로 가장 긴 가뭄기간을 나타내고 있다.

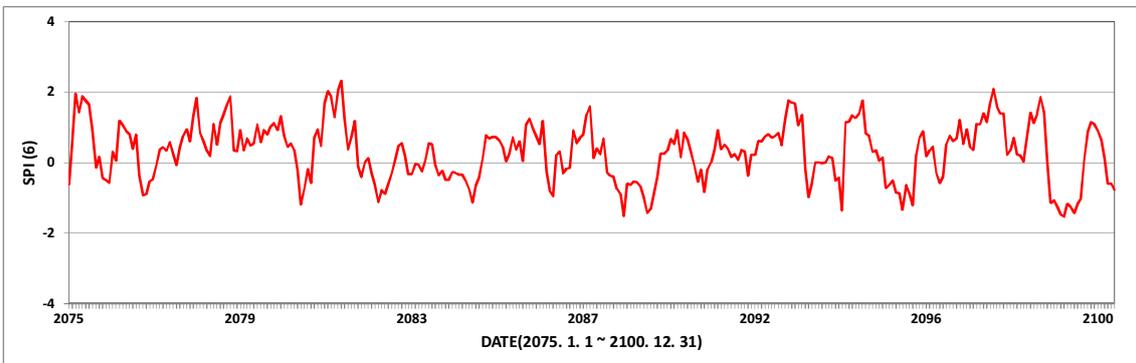
Future 2 기간에서는 극심한 가뭄으로 2045년 8월 ~ 9월에 -1.57, 2054년 2월에는 -1.57, 2056년에는 -1.62, 2073년에는 -2.12으로 서귀포기상대의 최저 가뭄지수를 나타나고 있다. Future 3 기간은 2088년 10월에 -1.52, 2099년 8월 ~ 9월에는 -1.51으로 전체적으로 Future 2기간이 가뭄지수 변동성이 크게 증가하였다(Fig. 2.27).



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



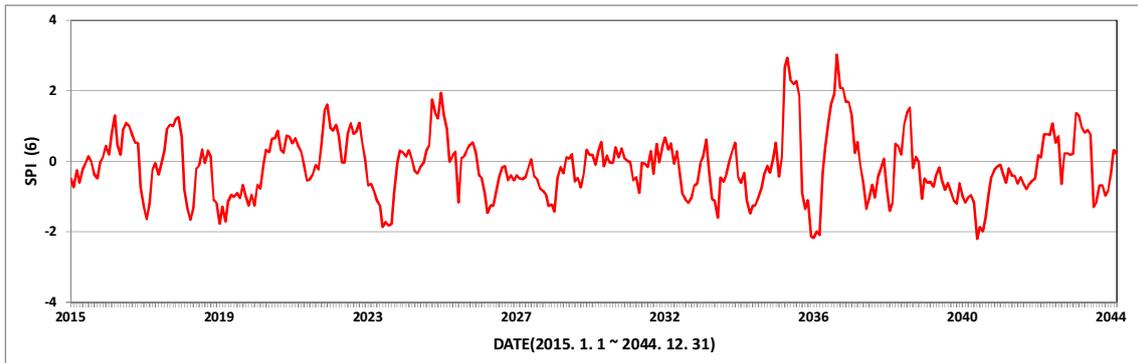
(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)



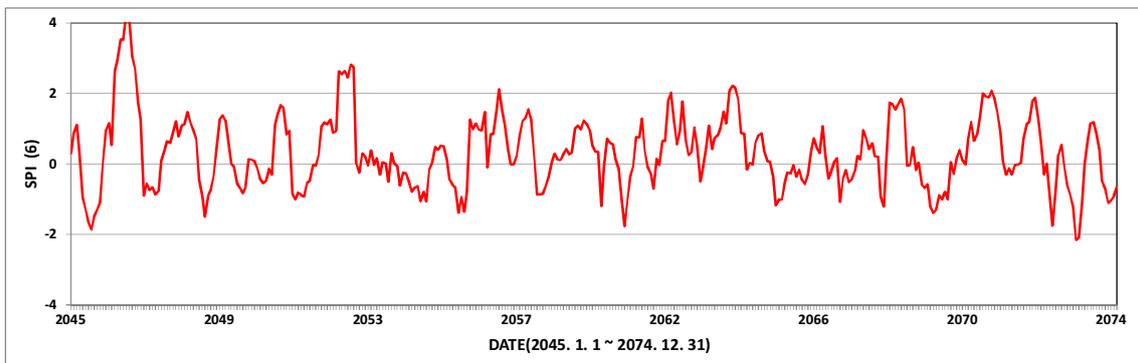
(c) Future 1(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

Fig. 5.27 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Seogwipo weather station.

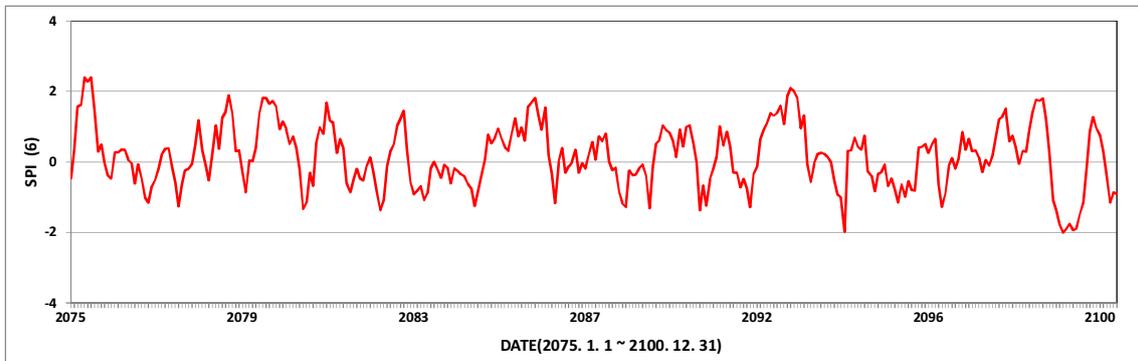
서부지역에 위치한 고산기상대의 경우에는 Future 1 기간에서 2017년 3월, 2018년 6월, 2019년 7월에는 평균적으로  $-1.69$ 으로 나타났으며, 2036년 3월 ~ 4월 그리고 2040년 12월에는 Future 1 기간에서  $-2.17$ ,  $-2.2$ 으로 가장 극심한 가뭄 지수를 나타내고 있다. Future 2 기간에서는 가장 극심한 가뭄으로 2073년 10월 ~ 11월에  $-2.16$ 까지 나타났다. Future 3 기간은 2094년 3월에  $-1.98$ , 2099년 8월에는  $-2.01$ 으로 가뭄지수를 나타내고 있다. 전체적으로 먼 미래로 갈수록 가뭄지수 변동성이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2.28).



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)

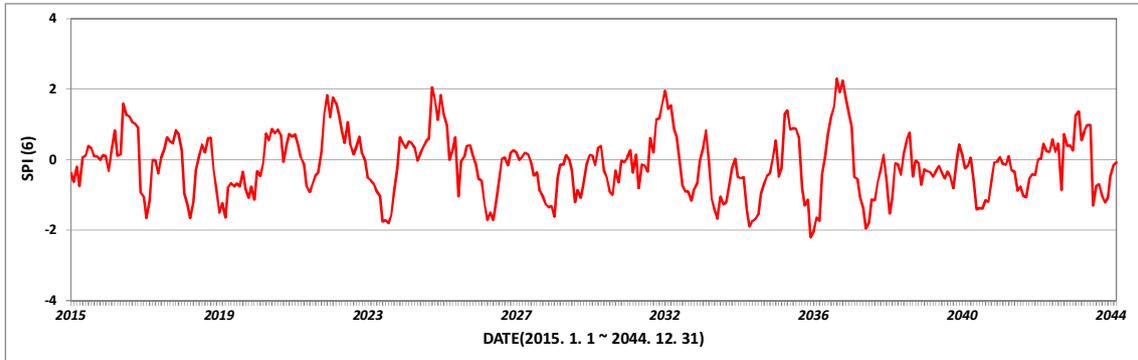


(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

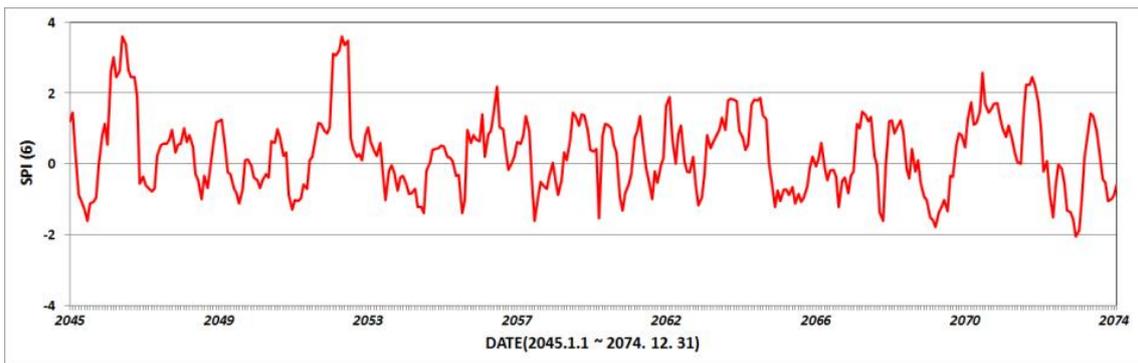
Fig. 5.28 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Gosan weather station.

동부지역에 위치한 성산기상대의 경우에는 Future 1 기간에서 2017년 3월과 2018년 6월에 가뭄지수가 -1.66 으로 나타났으며, 2036년 3월에 Future 1 기간에서 -2.2으로 가장 극심한 가뭄 지수를 나타고 있다. Future 2 기간에서는 극심한 가뭄

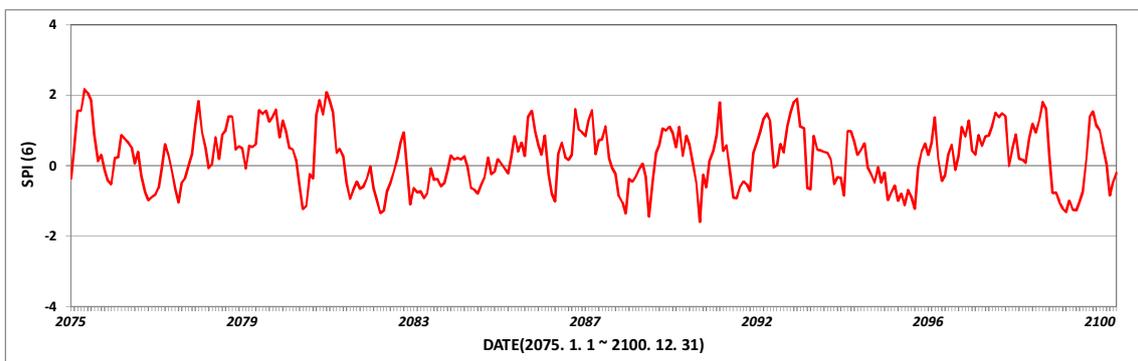
으로 2058년 5월과 2069년 10월에  $-1.62$ ,  $-1.79$ 으로 나타났으며, 2073년 10월에서  $-2.05$ 으로 가장 극심한 가뭄 지수를 나타고 있다. Future 3 기간은 2090년 8월에  $-1.60$ 으로 가뭄지수를 나타내고 있다. 전체적으로 성산기상대는 먼 미래로 갈수록 가뭄으로부터 해소할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 2.29).



(a) Future 1(2015. 1. 1 ~ 2044. 12. 31)



(b) Future 2(2045. 1. 1 ~ 2074. 12. 31)



(c) Future 3(2075. 1. 1 ~ 2100. 12. 31)

Fig. 5.29 Future Monthly standardized precipitation index showing SPI 6 at Seongsan weather station.

### 3.2 기후변화에 따른 가뭄심도 변화

다음 Table 5.9는 기후변화에 따른 가뭄지수의 크기에 따른 과거 기간의 90% 크기를 가지는 극심한 가뭄 발생빈도를 나타내었다. 제주 기상대에서는 미래기간인 Future 1 기간에서는 47% 증가, Future 2 기간에는 6% 증가, Future 3 기간은 -41% 감소하였다. 서귀포 기상대는 전기간이 가뭄발생 빈도가 크게 상승하는 것으로 나타났으며 특히, Future 1에서는 418% 증가하는 것으로 나타났다.

고산 기상대에서는 Future 1 기간에서는 46% 증가, Future 2 기간에는 -38% 감소, Future 3 기간은 -13% 감소하였으며, 성산 기상대에서는 전기간이 가뭄발생 빈도가 크게 상승하는 것으로 나타났다. 특히, Future 1에서는 193% 증가하는 것으로 나타났다. 4대 기상대 모두 미래로 갈수록 점차 가뭄이 해소되는 것으로 보일 수 있으나 이는 SPI 산정에 필요한 자료가 강수량 자료만 활용함으로 미래 가뭄 시나리오가 강수량 증가에 따른 감소영향으로 판단된다.

Table 5.13 Variation of standardized precipitation index of weather stations

Period	Event	Measuring efficiency
Jeju weather station	Future 1	47%
	Future 2	6%
	Future 3	-41%
Seogwipo weather station	Future 1	418%
	Future 2	173%
	Future 3	141%
Gosan weather station	Future 1	46%
	Future 2	-38%
	Future 3	-13%
Seongsan weather station	Future 1	193%
	Future 2	103%
	Future 3	54%

#### 4. 기후변화에 따른 지표유출량의 민감도 분석

강수량과 기온의 변화에 따른 지표유출량의 변화를 정량화하기 위하여 기후변화에 따른 지표유출량의 민감도를 분석하였으나, 가뭄분석을 위한 SPI 산정에 필요한 자료는 강수량 자료만 활용함에 따라 민감도 분석에서는 제외하였다. Fig. 5.30은 각 요소별 상관성을 확인하기 위해 산점도를 작성하였으며, 기온 변화량과 실제증발산량 변화량 그리고 강수량 변화량과 지표유출 변화량이 상관성이 나타나고 있었으나 실제증발산량과 지표유출량은 뚜렷한 상관성을 나타나지 않았다.

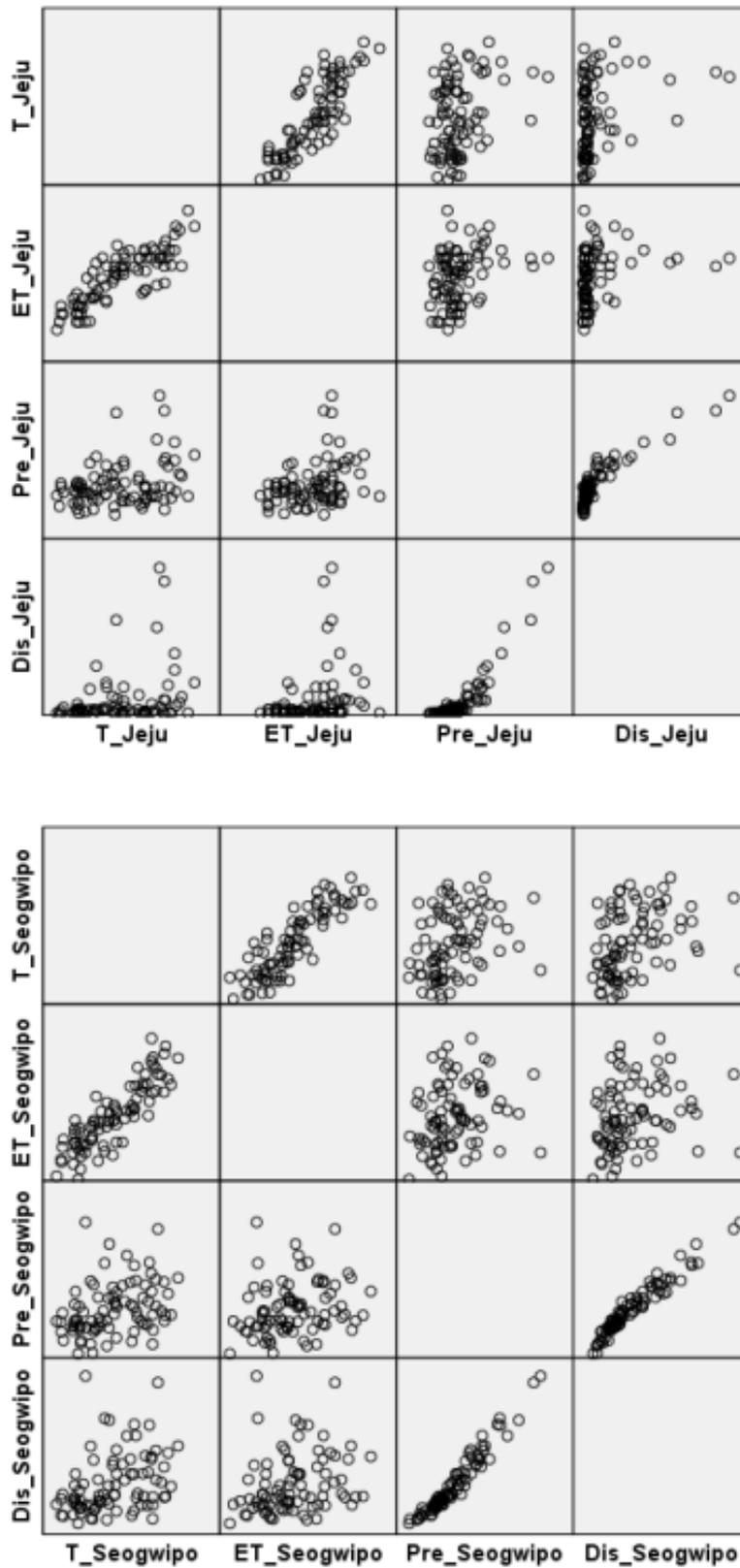
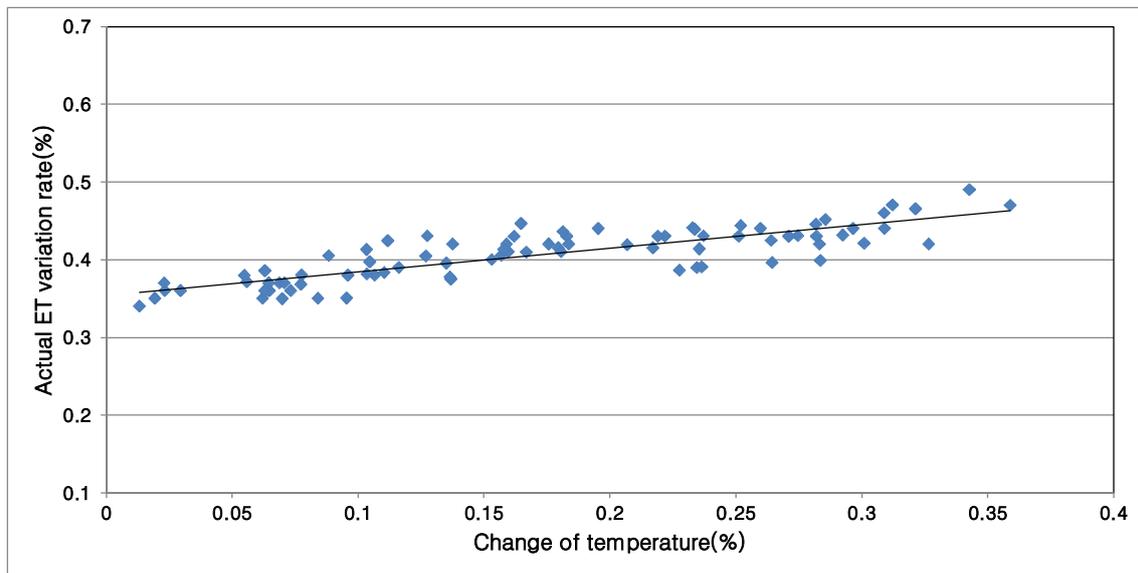


Fig. 5.30 Relationship between  $\Delta T$ ,  $\Delta ET$ ,  $\Delta Q$  and  $\Delta P$  at each basin.

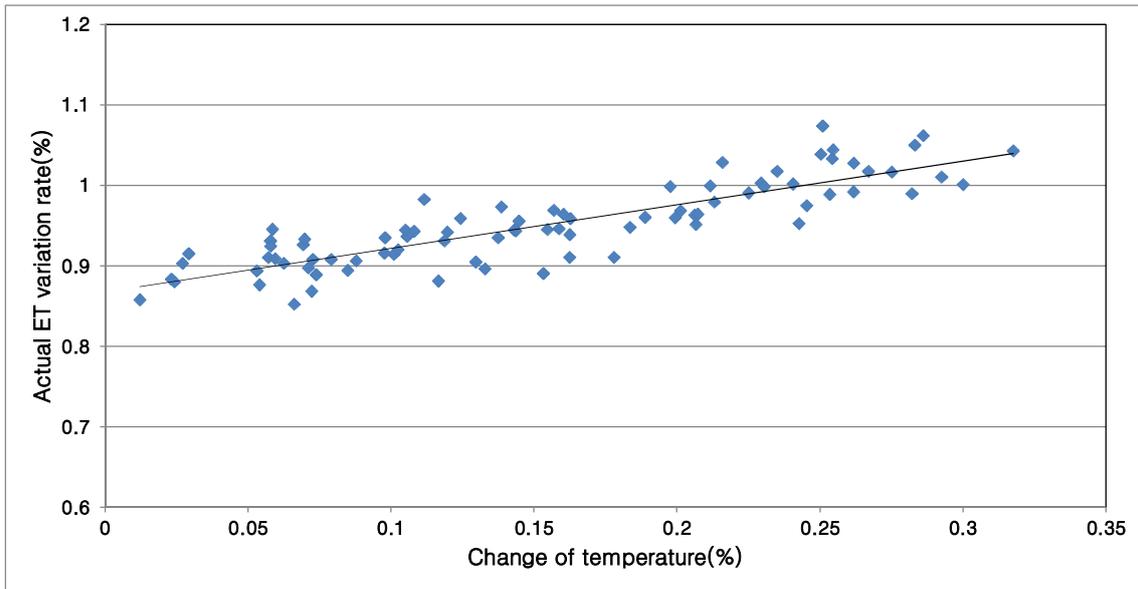
우선 Table 5.14는 북부와 남부지역의 연평균 기온변화량( $\Delta T$ )과 실제증발산량 변화량( $\Delta ET$ )에 대한 회귀식을 추정하였다. 실제증발산량은 SWAT모형에서 Penman-Monteith 공식을 활용한 잠재증발산량을 산정하고 토양의 수분을 고려하여 실제증발산량을 산정하였다. 회귀식의 결정계수가 0.70% 이상의 값을 나타내고 있어 자료에 대한 높은 적합도를 나타냈다(Fig. 5.31).

Table 5.14 Regression equations between  $\Delta ET$  and  $\Delta T$  variation

Basin	Regression Eq.	R <sup>2</sup>	R*
Oado Stream	$\Delta ET = 0.354 + 0.303\Delta T$	0.695%	0.691%
Gangjeong Stream	$\Delta ET = 0.867 + 0.543\Delta T$	0.744%	0.741%



(a) Oaedo stream



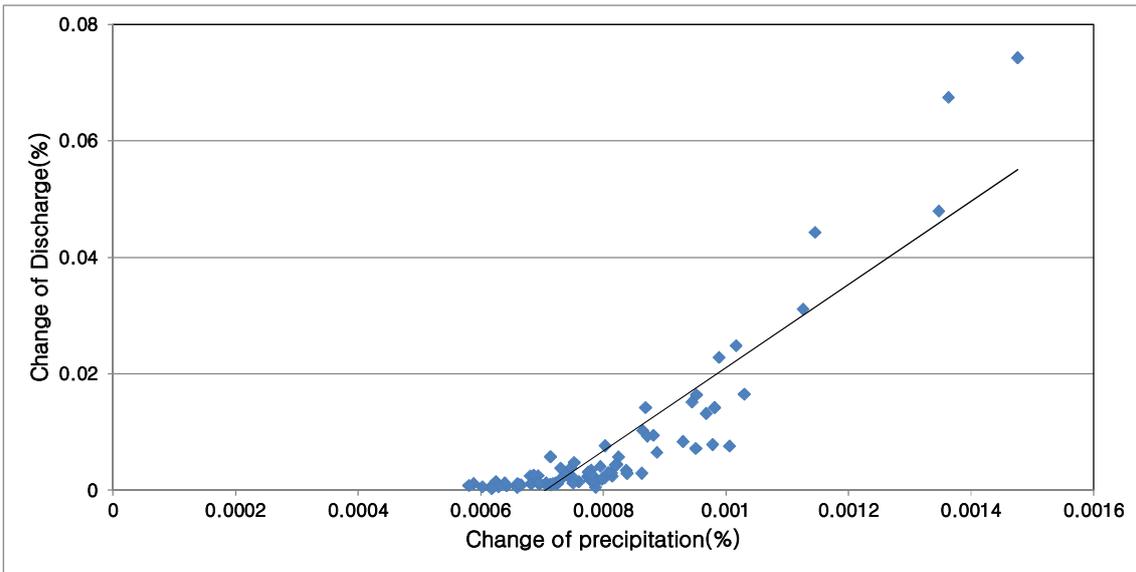
(b) Gangjeong stream

Fig. 5.31 Relationship of between change rate in Temperature and Actual ET.

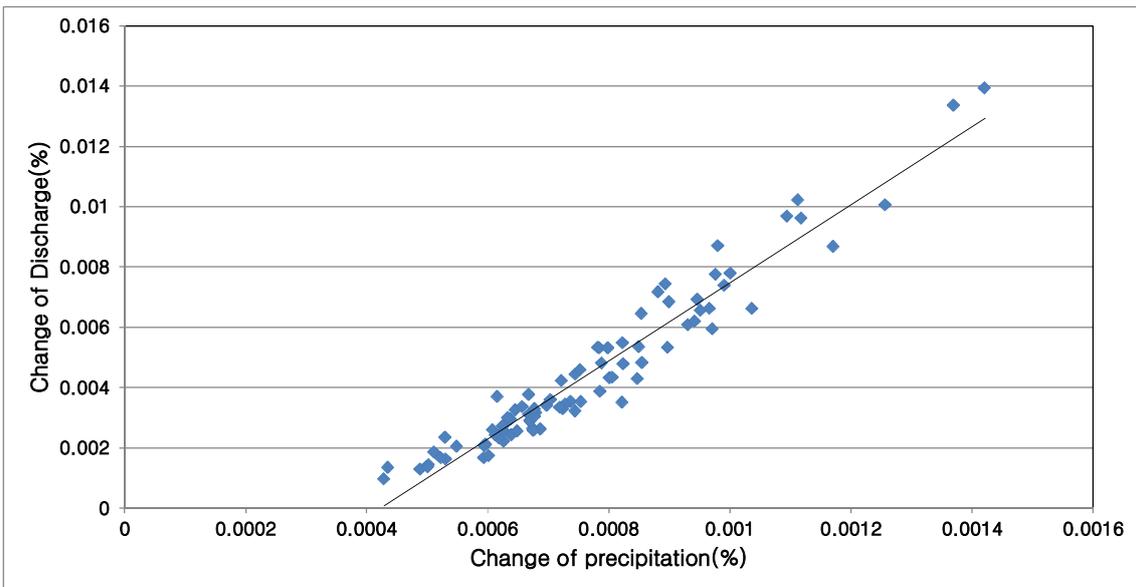
Table 5.15는 북부와 남부지역의 연평균 강수량 변화량( $\Delta P$ )과 지표유출 변화량( $\Delta Q$ )에 대한 회귀식을 추정하였다. 회귀식의 결정계수가 0.81% 이상의 값을 보이고 있으며, 이는 강수의 변화가 지표 유출량 변화에 미치는 영향이 상당히 큰 것으로 나타났다(Fig. 5.32).

Table 5.15 Regression equations between  $\Delta Q$  and  $\Delta P$  variation

Basin	Regression Eq.	$R^2$	$R^*$
Oado Stream	$\Delta Q = -0.50 + 71.377\Delta P$	0.809%	0.806%
Gangjeong Stream	$\Delta Q = -0.05 + 12.954\Delta P$	0.935%	0.934%



(a) Oaedo stream



(b) Gangjeong stream

Fig. 5.32 Relationship of between change rate in mean precipitation and discharge.

강수량의 변화( $\Delta P$ )와 실제증발산량의 변화( $\Delta ET$ )가 지표유출량의 변화( $\Delta Q$ )에 미치는 영향을 평가하기 위해 Table 5.16과 같이 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 이용하였다. 적용결과 다중회귀식은 결정계수가 R 0.81%, 수정결정계수 R 0.81%이상으로 나타나고 있어 회귀식에 대한 자료의 적합성이 매우 높게 나

타났다. Tabele 5.15에서 제시한 다중회귀식은 유출량, 강우량, 증발산량자료의 각각의 변동성을 신뢰성을 증명할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5.16 Regression equations among variation rates of  $\Delta Q$ ,  $\Delta P$  and  $\Delta ET$

Basin	Regression Eq.	$R^2$	$R^*$
Oado Stream	$\Delta Q = -0.51 + 71.636\Delta P - 0.38\Delta ET$	0.809%	0.807%
Gangjeong Stream	$\Delta Q = -0.06 + 13.028\Delta P - 0.10\Delta ET$	0.938%	0.937%

## V. 결 론

기후변화로 인한 강수량의 극한사상 발생횟수가 증가함에 따라 홍수피해도 꾸준히 증가 될 것으로 보이며, 가뭄 발생주기도 점차 짧아져 가뭄피해도 증가될 것으로 예측하고 있다. 기후변화에 의한 제주도 하천유출과 가뭄의 영향을 분석하기 위하여 분위사상법에 의한 기후변화시나리오를 구축하고, 통합수문모형인 SWAT모형으로 미래 유출 시나리오와 표준가뭄지수로 미래 가뭄 시나리오를 활용하여 기후변화영향 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 기후변화에 따른 기상 변동성을 분석하기 위해 과거의 강수량의 경향성 분석을 실시하였다. 최근 10년간(2005 ~ 2014년) 동안 제주, 서귀포, 고산기상대는 강수량이 크게 증가하고 성산기상대는 강수량이 감소하였다. 따라서 4개 기상대의 강수량, 강수강도 변동성이 서로 상이하여 지역별 수자원 영향 평가가 필요한 것으로 확인되었다.

2) 혼합 상세화 기법의 분위사상법은 지역기후모델의 결과에서 나타나는 편차를 효과적으로 제거하여 제주도의 수자원 영향 평가에 활용성이 높은 지역별 미래 강수량 시나리오를 생산할 수 있는 것으로 분석되었다. 미래 강수량 시나리오는 4개 기상대 모두 지속적으로 강수량이 증가하였으며, 계절별로는 가을과 겨울철 강수량이 크게 증가하였다.

3) 미래 유출 시나리오는 SWAT모형을 활용하여 제주도 북부지역의 외도천과 남부지역의 강정천 유역에 적용하였다. 연평균 유출량은 북쪽은 다소 감소, 남쪽은 증가할 것으로 나타났으나 최대 지표유출량 발생 빈도는 모두 증가하였다. 특히 여름철, 가을철의 최대 지표유출량 빈도 증가는 수자원 확보 및 관리를 어렵게 하여 홍수피해가 증가할 것으로 예측되었다.

4) 미래 가뭄 시나리오는 SPI 가뭄지수를 이용하여 제주도 4개 기상대에 적용하

였다. 관측소별 표준강수지수를 살펴보면 SPI 12가 SPI 6에 비해 비교적 단순한 변동 경향을 가지며, 미래 가뭄 시나리오는 4개 기상대 모두 변동성이 크게 증가하였다. 계절별로는 봄철의 극심한 가뭄(PSI -1.5 이하)이 주로 발생할 것으로 보였다.

5) 기후변화에 의한 제주도 수자원 변화는 지표유출량의 증가와 극심한 가뭄 발생으로 피해가 지속적으로 발생할 것으로 나타났으며, 수자원 확보 및 홍수기 하천관리를 어렵게 할 수 있다. 또한 기후변화에 따른 지역별, 기간별로 서로 상이한 결과를 보이고 있어 장기적으로 보다 적극적인 수자원 대응방안 수립이 필요하다.

기후변화는 전 세계와 제주도 수자원에 지속적인 영향을 미칠 것으로 전망되어 수자원정책 평가 및 관리에 매우 신중한 대비책을 요구하고 있다. 향후 기후변화가 미래 수자원에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 우선적으로 장기간의 신뢰도 높은 하천유출량 및 수문관측 자료의 구축이 필요하며, 인구 증가와 토지개발 등으로 인한 토지이용도 변화도 고려하여야만 한다. 또한, 기후변화에 따른 홍수량 특성을 분석하기 위해서는 현재 일단위 강수량자료를 시간단위로의 변환방법과 다양한 입력 자료를 활용한 가뭄지수 산정 등 많은 후속 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 강보성, 양성기, 정우열, 2015, 강우량 증가에 따른 홍수량 변동 및 홍수범람 분석, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, Vol. 24, No. 24, pp. 415-424.
- 건설교통부, 2008, 기후변화 대비 국가 물 안보 확보 방안(1차년도), 건설교통부.
- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 유역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 555-562.
- 정우열, 2008, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 제주대학교 대학원 공학석사학위논문, pp. 63-64.
- 윤용남, 김웅태, 유철상, 2004, 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 315-328.
- 신사철, 2000, 기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 623-634.
- 안재현, 윤용남, 이재수, 2001a, 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 347-356.
- 안재현, 윤용남, 이재수, 2001b, 지구온난화에 따른 수문환경에 변화와 관련하여 : 2. 물수지모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 511-519.
- 정일원, 배덕효, 임은순, 2007, “기후변화 수자원 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(Ⅱ); 유역별 유출시나리오 구축”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 205-214.
- 배덕효, 정일원, 2005, 기후변화에 따른 바람직한 유역관리, ‘세계물의 날’ 기념심포지엄, pp. 31-47.
- 김영오, 1998, 기후변화를 고려한 수자원 관리 기법, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제4호, pp. 407-413.
- 이준호, 양성기, 정우열, 양원석, 2015, 기후변화 시나리오를 고려한 제주도 확률강우량 산정, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, Vol. 24, No. 4, pp. 383-391.
- 송성호, 유승환, 배승중, 2013, 기후변화를 고려한 제주지역의 권역별 가뭄 평가 및

- 농업용수에의 영향 고찰, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, Vol. 22, No. 5, pp. 625-638.
- 양해근, 2007, 기후변화에 따른 유역의 물수지 변화, 대한지리학회지, 대한지리학회, 제42권, 제3호, pp. 405-420.
- 방재연구소, 2008, 21세기 기후 및 사회구조변화 예측과 재해가중요인 분석연구: 기후변화를 중심으로, 방재연구소.
- CWDR(California Department of Water Resources), 2006, Progress on incorporating climate change into management of California's water resources, Technical Memorandum Report, available at <http://baydeltaoffice.water.ca.gov/climatechange/report.cfm>
- choi Y., 2002, "Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea", Korea Soc, Environmental Impact Assessment 11:189-203
- IPCC, 2007, Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M., 2002, A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies : User Manual.
- John M. Pilgrim, Xing Fang, and Heinz G. Stefan, 1999, Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota : Implications for climate warming, Journal of the American water resources association, Vol. 34. No. 5.
- Takaya Miyano, Hiroshi Morita, Akira Shiani, Tadashi Kanda, and Masataka Hourai, 1994, Characterization of complexities in Czoehralski, crystal growth by nonlinear forecasting, Vol. 76, No. 5, pp. 2681-2693.
- Von Storch, H., Langenberg, H., Feser, F, 2000, A spectral nudging technique for dynamical downscaling purpose, Monthly Weather Review, Vol. 128, pp. 3664-3679.
- Cocke, S.D., LaRow, T.E., 2000, Seasonal prediction using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model, Monthly

- Weather Review, Vol. 128, pp. 689-708.
- Hong Tian, Biwen Wu, Yinlong Xu, Jun Lu, Jun Lu, Shuangwu Jiang, and Winli Wnag, 2006, Detection and projection climate changes in Jian ghuai Valley in China. Proc. of SPIE, Vol. 6298.
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L, 1997, Downscaling general circulation model output, A review methods and limitations, Progress in Physic al Geography, Vol. 21, pp. 530-548.
- Manabe, Sykuro, and Bryan, K., 1969, Climate Calculations with a combined ocean-atmosphere model, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 26, No. 4, pp. 786-789.
- Climate Impacts Group, M. McGuire Elsner, J. Littell and L. Whitely Binder, 2009, The Washington Climate Change Impacts As sessment, Center for Science in the Earth System, Joint Institute for the study of the Atmosphere and Oceans, University of Washington, Seattle, Washington.
- Arnold and Fohre, 2005, SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling, Hydrological Processes, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Bordi, I., Frigio, S., Parenti, P., Speranza, A. and sutera, A., 2001, "The analysis of the standardized precipitation index in the Mditerranean area : regional patterns.", Annali Di Geofisica, Vol. 44, No. 5, pp. 979-993.
- Bhuiyan, C., Singh, R.P. and Kogan, F.N, 2006, "Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data", Internation Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8, No. 4, pp. 289-302.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleiest, J., 1993, "The relationship of drought fequency and duration to time scales.", 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, Vol. 17, No. 22, pp. 179-184.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleiest, J., 1995, "Drought monitoring with multiple time scales.", proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, pp. 233-236.

- Guttman, N.B., 1998, "Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index.", Journal of the American Water Resources Association., Vol. 34, No. 1, pp. 113-121.
- Guttman, N.B., 1999, "Accepting the standardized precipitation index : a calculation algorithm," Journal of the American Water Resources Association., Vol. 35 No. 2 pp. 311-322.
- RDI, 1996, Acoustic Doppler Current Profilers - Principle of operation a practical primer, San diego, CA, RDInstruments.
- Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R. and Oberg, K., 2007, Acoustic velocimetry for riverine environments, Journal of Hydraulic Engineering, 115, pp. 925-936.
- SonTek, 2000, Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications, SonTek.
- Yang, H. K., 2006, Impact of climate change on hydrological disasters, Journal of the Korean Geomorphological Association, 13(3), 45-54
- Ahn, J. H., Yoon, Y. N., Yoo, C. S., 2001, On the change of hydrologic conditions due to global warming : 2. An analysis of hydrologic changes in daechung dam basin using water balance model, Journal of Korea water Resources Association, 34(5), 511-519.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju island with climate change( I ), Koran Society of Soil and Groundwater Environment, 17(2), 62-70.