



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.

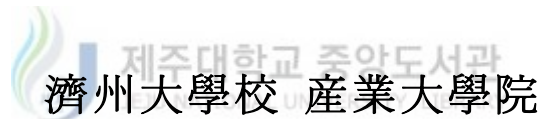
저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

토지이용변화에 따른 제주도  
도심하천의 홍수유출 변동 분석



建設環境工學科

土木工學 專攻

高 叟 孝

2015 年 2 月

# 토지이용변화에 따른 제주도 도심하천의 홍수유출 변동 분석

指導教授 楊 城 基

高 耿 孝

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.



高耿孝의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 産業大學院

2015 年 2 月

# Flood Discharge Analysis on Land Use Changes in Urban Stream of Jeju Island

Kwang-Hyo Ko

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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



This thesis has been examined and approved.

Department of Construction & Environmental Engineering  
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차 .....	i
표 목 차 .....	iii
그 립 목 차 .....	v
Summary .....	vii
I. 서론 .....	1
1. 연구의 배경 .....	1
2. 연구의 목적 .....	2
3. 연구의 동향 .....	2
II. 연구방법 및 이론적 배경 .....	4
1. 연구방법 .....	4
2. 이론적 배경 .....	6
2.1 HEC-HMS 모형 .....	6
2.2 유역평균강우량 .....	8
2.3 NRCS-CN 유효우량 .....	12
2.4 합성단위도법 .....	17
2.5 하도추적 .....	25
III. 연구대상유역 및 토지피복자료 구축 .....	32
1. 연구대상유역 .....	32
1.1 유역의 형상 및 지형적 특성 .....	33
1.2 유역의 표고 및 경사분석 .....	33
2. 적용 호우사상 및 유역평균강우량 .....	36

IV. 결과 및 고찰	41
1. 한천유역의 토지이용변화	41
1.1 토지이용변화 분석	41
1.2 토지이용에 따른 유출계수 산정	44
2. 토지이용변화에 따른 홍수유출량 변동	49
2.1 매개변수 최적화	49
2.2 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동 분석	53
V. 결론	59
참고문헌	64
감사의 글	67



## 표 목 차

Table II-1. Discharge calculation method in HEC-HMS model(HEC, 2000)····	7
Table II-2. Weather data calculation method of HEC-HMS model (HEC, 2000)····	8
Table II-3. Infiltration Rate Category by soil type(Lee, 2007)····	14
Table II-4. Runoff curve number(Lee, 2007)····	15
Table II-5. Classification of Antecedent Moisture Condition(AMC) for the NRCS method(Lee, 2007)····	16
Table II-6. Values of NRCS dimensionless hydrograph according to time (Yoon, 2007)····	21
Table II-7. Ratio of mean current speed and celerity of flood wave according to stream channel cross section type(Jung, 2007)····	30
Table III-1. Watershed characteristic factor····	33
Table III-2. Altitude analysis result of Han Stream watershed····	35
Table III-3. Slope analysis result of Han Stream watershed····	35
Table III-4. Rainfall Observatory Station····	36
Table III-5. Rainfall according in observed point ·····	37
Table III-6. Mean areal rainfall using Thiessen method····	38
Table III-7. Mean areal rainfall using isohyetal method····	38
Table IV-1. Land use change of Han stream watershed····	42
Table IV-2. Result of soilmap in Han stream watershed····	46
Table IV-3. CN(AMC-II) on land cover categorization items····	47
Table IV-4. CN of Han stream watershed····	48
Table IV-5. Calculation of Clark unit hydrograph method parameters····	51
Table IV-6. Analysis of soil change outflow by the change in soil cover (Muipa) ·····	54
Table IV-7. Analysis of soil change outflow by the change in soil cover	

(Heavy rainfall in November 2011)..... 56  
Table IV-8. Analysis of soil change outflow by the change in soil cover  
(Heavy rainfall in April 2012).....58





## 그림 목 차

Fig. II-1. Flow chart on the study	5
Fig. II-2. Arithmetic average method(Jung, 2013)	9
Fig. II-3. Thiessen polygon method(Jung, 2013)	10
Fig. II-4. Isohyetal method(Jung, 2013)	11
Fig. II-5. Concept map of Snyder synthetic unit hydrograph (Yoon, 2007)	18
Fig. II-6. Dimensionless hydrograph of NRCS(Yoon, 2007)	20
Fig. II-7. Concept map for Clark synthetic unit hydrograph(Jung, 2007)	23
Fig. II-8. Stream channel storage-discharge relation graph(Jung, 2007)	26
Fig. II-9 Changes on stream channel storage for rise and fall flood level (Jung,2007)	26
Fig. II-10 Prism storage and wedge storage of natural stream channel(Jung, 2007)	27
Fig. II-11. Relation of stream channel storage-inflow-discharge(Jung, 2007)	29
Fig. II-12. Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007)	29
Fig. III-1. Basins for the study	32
Fig. III-2. Altitude analysis of Han stream watershed	34
Fig. III-3. Slope analysis of Han stream watershed	34
Fig. III-4. AWS Thiessen polygon of Han stream watershed	37
Fig. III-5. Thiessen-isohyetal method transformation of Han Stream (Jung, 2013)	39
Fig. III-6. Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method	40
Fig. IV-1. Land use change of Han stream watershed	41
Fig. IV-2. Pi diagram showing land use change of Han stream watershed	44
Fig. IV-3. Soil-map of Han stream watershed	45

Fig. IV-4. AMC-II CN of Han stream watershed.....	48
Fig. IV-5. Flood discharge hydrograph of Han stream watershed.....	51
Fig. IV-6. Calculation of discharge to Clark unit hydrograph method.....	52
Fig. IV-7. Analysis discharge of Landuse change(Muipa).....	53
Fig. IV-8. Analysis discharge of Landuse change(Heavy rainfall in November 2011) .....	55
Fig. IV-9. Analysis discharge of Landuse change(Heavy rainfall in April 2012) .....	57



## Summary

For the Hancheon basin of Jeju island, flood soil outflow by change in land use and event of heavy rain were analyzed as 5-year cycle from 1980 to 2005, and the effects of the change in land use on flood outflow amount were examined.

From 1980 to 2005, the urban area and agriculture cultivation area of Hancheon basin in Jeju island have increased 5 times, and 28% forest area has decreased. As a result of analyzing the outflow coefficient by utilizing land cover data and soil statistical data, averagely 2.2% outflow coefficient has increased in every 5-year cycle, particularly 11.6% in 2005 to 1980. Results of flood outflow change analysis in each heavy rain event with regard to the change in land use indicated that peak flowrate has increased 9.9 to 33.67%, while outflow total amount is 12.53 to 30.21%, and the arrival time of peak flowrate has decreased by 10 minutes in each heavy rain event.

It was confirmed quantitatively that land use of Hancheon basin in Jeju Island switched from forest area to urban area and agriculture cultivation area, and the amount of flood outflow increased.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경

최근 인구의 도시 집중화와 개발사업의 증가에 따라 지역의 유출환경이 크게 변화하고 있다. 특히, 도시화에 따른 불투수층 토지가 크게 증가함에 따라 지표면의 이용과 형질이 변형됨으로써 지표수 흐름과 지하수 함양 및 오염 등의 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다(Han과 Yang, 2009).

이러한 도시화는 생활용수량을 비롯한 각종 소비수량을 증대시키고 불투수면적의 증대, 표면 조도계수의 감소, 자연 보유력 감소 등과 같은 수문현상의 변화를 초래하였다. 이에 따라 동일 강우에도 침투유량과 유출용적이 증가하게 되고, 유출속도가 증가하여 침투유량 발생시각이 앞당겨지는 등 유출수문곡선의 변화로 저지대 및 하류지역에서는 도시형 재해를 초래하기도 한다(Choi 등, 2009).

사면이 바다인 제주도는 우리나라로 상륙하는 태풍의 길목에 위치하여 집중호우로 인한 피해에 매우 많은 영향을 받는 지역이다. 최근 들어 제주도내 연강수량은 지속적으로 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며, 일강수량 극값이 200mm 이상인 해가 빈번히 발생하고 있다. 2012년에는 제 7호 태풍 “카눈”을 시작으로 제 16호 태풍 “산바” 까지 50년 만에 총 4개의 태풍이 상륙하였고, 기상 관측사상 최초로 3개 태풍(14호~16호)이 연달아 상륙하여 많은 재산 및 인명피해를 입었다(Ko 등, 2014).

제주도는 고도성장과 대형 관광단지의 개발에 따른 인구, 토지이용 등의 증가로 인하여 도시화가 지속적으로 증가하는 추세이다(Jung과 Yang, 2009). 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013)에 따르면 Landsat TM 영상을 이용하여 5년간격(1985년 ~ 2009년)의 토지피복 변화량을 분석한 결과 도로, 도심지 등 인공 토지피복은 증가하고 산림지는 감소하는 것으로 나타났다(Jeju special self-governing province, 2013).

최근 들어 제주지역에서는 관광객 증가로 인한 각종 개발사업이 지속적으로

추진되고 있으나, 사전재해영향성검토에서는 개발사업 소유역을 중심으로만 평가하고 있어 하천유역의 도시화에 따른 홍수재해 영향은 검토하지 못하고 있는 실정이다.

향후 지구 온난화에 따른 기상변화로 집중호우의 빈도 및 강우강도는 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있어 제주지역의 도시화 면적 확대가 도심 하천유역의 홍수유출량에 미치는 영향을 분석하는 연구가 필요하다.

## 2. 연구의 목적

본 연구에서는 제주도 도심하천인 한천 유역을 대상으로 국가 수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)과 환경부에서 제공하는 1975년부터 2005년까지 5년 주기의 토지피복도를 이용하여 유역 내 토지이용 변화를 분석하고 호우사상에 따른 홍수유출 변동을 분석하여 토지이용 변화가 홍수유출량 미치는 영향을 도출하고자 한다.

이러한 연구결과는 기후변화에 대응하여 홍수재해로부터 안전한 제주도를 구축하는데 기초적인 연구가 될 것으로 판단되며, 향후 제주 도심지역의 도시계획 수립, 유역종합치수계획 수립, 사전재해영향성검토 등에서 광범위하게 활용될 수 있을 것이다.

## 3. 연구의 동향

토지 피복변화에 따른 수문환경의 변화에 관한 연구는 주로 유역의 토지피복 상태로 유출량을 산정하는 NRCS-CN기법을 사용하는 연구가 대부분을 이루고 있다(Kim, 2008; Lee과 Bae, 2004; Park 등, 2011). NRCS-CN 기법은 토양의 종류와 토지이용, 식생피복의 종류, 토양의 수문학적 조건 등을 기준으로 직접유출량을 산정하는 방법이다(Lee, 2007).

진은진(2001)은 SCS 모형으로 탄천 유역의 토지이용변화를 파악하여 수문환경

의 변화를 분석하여 불투수층 도심지의 증가율이 클수록 침투유량은 증가하고 침투유출 도달시간은 단축되는 결과를 도출하였다. 정동국과 이범희 (2003)은 대전광역시 노은 유역을 대상으로 도시화에 따른 유출현상의 변화를 분석하여 도시개발 전·후의 침투유량은 약 20% 증가하였고 침투유량 발생시간은 25분 단축되는 결과를 제시하였다. 이승현과 배상근 (2004)은 기초수문자료 및 정밀토양도, 토지피복도 등을 이용하여 SCS-CN 방법을 이용하여 소유역의 지하수함양량을 산정하는 연구를 수행하였고, 최정화 등(2009)은 조경천 유역의 토지이용 변화를 4단계로 구분하고 SWMM 모형을 이용하여 유출변화추이를 분석하였다.

제주도의 토지이용변화에 따른 유출변화에 관한 연구로는 한용규와 양성기 (2009)가 SWAT 모형을 이용하여 제주도 외도천유역에서 1975년과 2000년의 토지이용변화에 따른 유출량 변동을 분석하여 직접유출율이 14%에서 22%로 증가하는 결과를 도출하였다. 그러나 SWAT 모형은 일단위 유출 결과를 도출하기 때문에 재해적인 측면에서 도시화가 홍수유출에 미치는 영향을 분석할 수는 없으므로 단위도법을 적용할 수 있는 모형이 필요하다.

하규철 등(2009)은 제주도의 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 토지피복자료를 이용하여 SCS 방법에 의한 직접유출량을 산정하였다. 유출곡선지수는 1975년에 65.3이었던 것이 2000년에는 69.6으로 증가하는 결과를 도출하였으며, 1995년도의 강우량을 적용 했을 때 연간 직접유출율은 15.1%에서 17.7%로 증가하는 결과를 제시하였다. 그러나 SCS 방법은 일단위로 직접유출량을 산정하기 때문에 침투유량의 증가 및 침투유량 도달시간 등의 영향을 검토할 수 없으며, 제주지역과 같이 투수성이 매우 좋은 지역의 경우에는 SCS 방법의 초기손실( $I_0$ )에 대한 면밀한 검토가 이루어진 이후에 적용하여야 한다.

## Ⅱ. 연구방법 및 이론적 배경

### 1. 연구방법

제주도 도심하천인 한천 유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 국가 수자원관리 종합정보시스템과 환경부에서 제공하는 1975년부터 2005년까지 5년 주기의 토지피복자료를 구축하였다. 구축된 자료를 이용하여 제주도와 연구대상유역의 5년 주기 토지이용변화에 대하여 분석하였으며, 농업과학기술원에서 제공하는 토양도를 이용하여 5년 단위의 유출곡선지수(CN)을 산정하였다.

주요 호우사상에 따른 홍수유출량을 산정하기 위해 HEC-HMS 모델을 적용하고 단위도법은 Clark 방법을 이용하였으며, 단위도법 매개변수는 정우열 등 (2014)의 연구에서 제시한 매개변수인 Kraven II, Sabol을 적용하였다. 5년 주기 홍수유출량 산정 결과를 이용하여 토지 이용변화에 따른 침투유량 및 침투유량 도달시간 변동 등에 대하여 분석하여 토지이용 변화가 홍수유출량 미치는 영향을 도출하였다(Fig II-1).

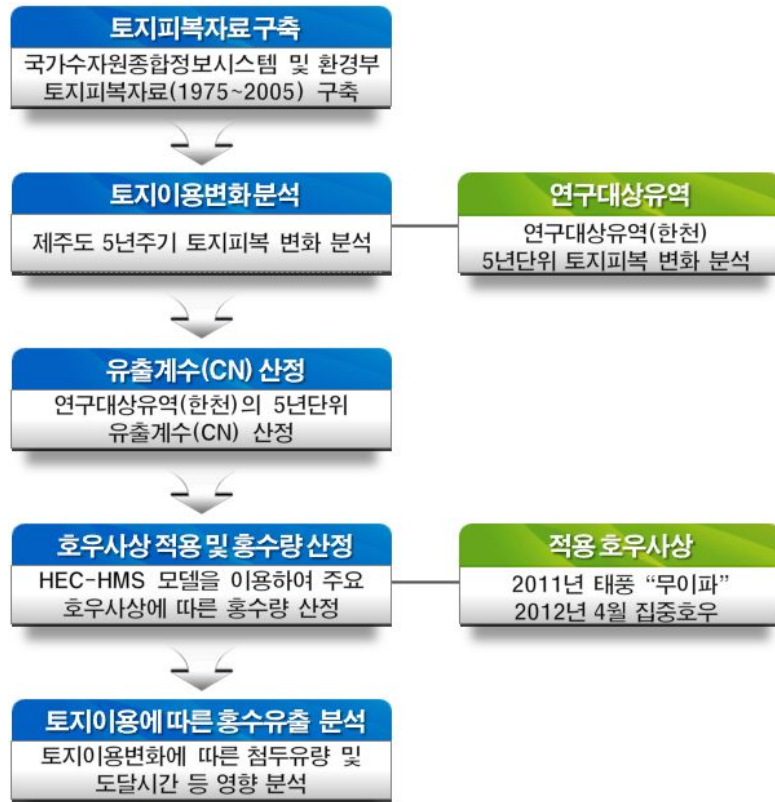


Fig. II-1. Flow chart on the study





## 2. 이론적 배경

### 2.1 HEC-HMS 모형

HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System)은 강우-유출모의를 하는데 있어 여러 가지의 기능을 제공하고 있다. HEC-HMS 모형은 한 유역을 수문학적·수리학적 구성요소로 이루어지는 복잡한 시스템으로 상호연관에 의해서 나타내어, 이를 통해서 그 유역에 강우로 인한 지표면 유출을 모의하는 단일 사상(Single Event) 유출모형이다. 1995년 미육군공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 기존의 모형인 HEC-1 모형을 윈도우화 하여 발전시킨 모델이며 기존 HEC-1 모형은 1967년 미육군공병단 수문공학연구소에 의해 개발된 모형으로 1984년에 처음으로 PC 버전이 개발되었으며, HEC-HMS 모형은 개인용 컴퓨터의 성능이 고도화됨에 따라 개발되었다.

HEC-1에서 발전한 프로그램인 HEC-HMS은 HEC-1과 유사한 단위도 방법과 하도추적법을 바탕으로 레이더자료 등의 격자망으로 구성된 강우량자료에 적용할 수 있는 선형분포형 및 장기유출모의에 사용할 수 있는 간단한 토양수분모형이 포함되어 있으며, 다양한 매개변수에 대한 기능 또한 포함되어 있다.

미육군공병단의 HEC-HMS 모형은 강우에 의한 유역의 지표면 유출을 모의하기 위한 기본적인 계산구조는 HEC-1과 비슷하지만, 수문요소는 나무구조 네트워크에 의해 배열되고, 계산은 상류에서 하류로 연속적으로 이루어진다. 강우-유출 현상의 수리, 수문학적 과정을 상호 연결하여 유역의 응답을 나타내도록 설계된 모형으로서 각 수리·수문학적 과정은 일반적으로 소유역이라 불리는 유역 일부분에서의 강우-유출과정을 모식화하며, 각 과정은 지표면 유출이나 하도유출, 저수지 유출 등을 모의하게 된다.

HEC-HMS 모형의 실행을 위한 관리요소는 크게 3가지로 구분된다. 첫째, 유역의 특성인자와 매개변수를 설정하는 Basin Model Manager, 둘째, 강우와 같은 수문기상 요소를 설정하는 Meteorologic Model Manager, 그리고 모형의 시간에 관련되는 모든 정보를 취급하는 Control Specifications Manager로 구성된다. 본

연구에서는 국내에서 가장 일반적으로 사용되며 제주도 하천기본계획에서 사용된 HEC-HMS 모델을 이용하여 토지이용변화에 따른 홍수유출량을 산정하였다.

### 2.1.1 Basin Model

Basin Model은 GUI(Graphic User Interface)를 이용하여 자료의 입출력이 가능하며 GUI를 통하여 수문요소를 나타내는 구성, 자료편집, 관리, 모의 결과 검토 등의 작업을 할 수 있다. Sub basin은 소유역으로서 유역 출구로 홍수량을 유출시키는 요소이고, River reach은 하도로서 상류의 유입수문곡선을 받아서 하류로 유출수문곡선을 내보내는 선형 함수와 같은 요소이다. 또한, 저수지 추적을 통한 유출수문곡선이 만들어진다는 점에서 Reach와 비슷하나 수위-유량 고선이 작성된 수문조작이 없는 Reservoir만이 모이가 가능하다. HEC-HMS 모형의 유출계산방법의 구성을 Table II-2에 나타내었다

Table II-1. Discharge calculation method in HEC-HMS model(HEC, 2000)

Discharge calculation	Methods
Loss Method	Deficit and Constant, Green and Ampt Gridded Deficit Constant, Gridded Green and Ampt Gridded SCS Curve Number Initial and Constant, SCS Curve Number
Transform	Clark Unit Hydrograph, Kinematic Wave, ModClark SCS Unit Hydrograph ,Snyder Unit Hydrograph
Baseflow	Constant Monthly, Linear Reservoir Nonlinear Boussinesq
Channel Routing	Kinematic Wave, Lag, Modified Puls Muskingum, Muskingum-Cunge

### 2.1.2 Meteorological Model

Meteorologic Model은 HEC-HMS 내의 기상학적인 자료들을 분석한다. 기상 자료와 증발산자료를 포함하고 있으며, 주된 기능은 Basin Model에서 각각의 우량조상도를 작성하는 것이다. 기존의 Precipitation Model에서 증발산에 관한 부분을 추가하여 Meteorologic Model로 발전한 것이다. 강우자료는 유역별로 관리되며 DSS를 통하여 저장하게 된다. 증발산 자료의 분석은 현재 증발산의 월평균

값을 이용하는 한가지 방법으로만 분석이 가능하다. 기상자료 입력 시 사용하는 계산방법을 Table II-3에 나타내었다.

Table II-2. Weather data calculation method of HEC-HMS model(HEC, 2000)

Meteorological Data	Calculation Methods
Precipitation	Frequency Storm Gage Weights Gridded Precipitation Inverse Distance Specified Hyetograph Standard Project Storm
Evapotranspiration	Gridded Priestley-Taylor Monthly Average Priestley-Taylor
Melting of snow	Gridded Temperature Index Temperature Index

### 2.1.3 Control Specifications

Control Specifications은 HEC-HMS 모형의 시간에 관계된 자료를 입출력할 수 있으며, 자료분석의 시간간격 또한 제어가 가능하다. 강우 혹은 유출의 시작 시간과 끝나는 시간을 지정하며, 장기간에 걸친 연속적인 수문곡선 모의가 가능하다.

## 2.2 유역평균 강우량

### 2.2.1 산술평균법

면적 평균강우량을 산정하는 방법 중 가장 간단한 방법이 산술평균법이며 유역 내에 있는 강우량자료를 단순히 산술평균하는 방법으로 각 관측소마다 동일한 가중치  $1/n$ 을 부여하여 평균강우량을 산정하는 방법이다.

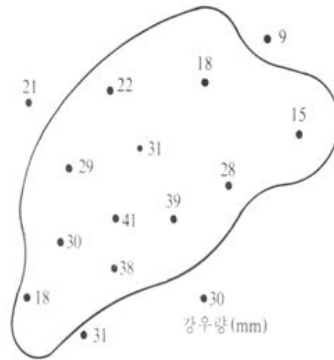


Fig. II-2. Arithmetic average method(Jung, 2013)

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.1)$$

$P_m$ : 면적평균 강우량,  $P_1, \dots, P_n$ : 유역 내  $n$ 개 관측소의 점 강우량

산술평균법은 평야지역에서 우량관측소가 균등하게 분포되어 있고 각 관측소의 관측치가 유역의 평균치와 크게 벗어나지 않을 때 비교적 정확한 결과를 산정한다. 강우에 대한 산악효과나 우량관측소의 분포상태, 밀도 등에 대한 고려 없이 모든 관측소의 점 강우량 값을 동일한 조건으로 고려하므로 비교적 평야지역이나 강우분포가 균일한 경우에 사용한다.

### 2.2.2 티센다각형법

티센다각형법은 각 관측소에서 관측된 강우량에 유역의 관측소 주위로 작도한 티센다각형의 면적 비를 가중치로 부여하여 평균 강우량을 산정하는 방법이다.

티센다각형을 작도하는 방법은 처음 Fig. II-3의 점선처럼 각 인접 관측소끼리 정삼각형에 가깝도록 직선으로 연결하고 그 다음 관측소 연결 직선을 수직이등분하여 서로 연결시키면 관측소 주위로 다각형이 형성된다. 각 관측소 별로 다각형의 면적 즉, 관측소의 관할 면적을 계산하여 사용한다.

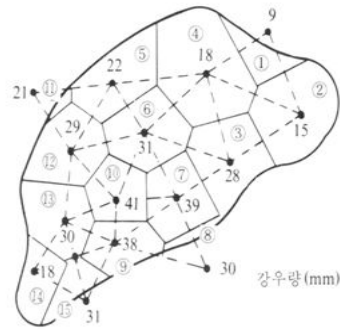


Fig. II-3. Thiessen polygon method(Jung, 2013)

$$P_m = \frac{A_1P_1 + A_2P_2 + \dots + A_nP_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.2)$$

$P_m$ : 면적평균 강우량,  $P_1, \dots, P_n$ : 유역 내  $n$ 개 관측소의 점 강우

$A_1, \dots, A_n$ : 각 관측점의 지배면적



티센다각형법은 각 관측소마다 지배면적을 가중치로 부여하여 평균강우량을 산정하게 된다. 이 방법은 유역 내 우량관측소의 상대적인 위치와 관측망의 상대적인 밀도 등을 고려하고 있어 산술평균법보다는 좋은 결과를 주지만 고도에 따른 강수의 변화, 즉 산악효과를 고려하지 못한다는 단점이 있다.

### 2.2.3 등우선법

등우선법은 각 우량관측소에서 관측된 점 강우량자료와 관측소 사이의 강우량을 보간하는데 필요한 정보를 이용하여 등우선을 작도한 후 등우선 간의 면적을 구하여 유역의 평균 강우량을 산정하는 방법으로 산악효과를 고려할 수 있다. 등우선을 작도할 때 강우는 고도와 밀접한 관계가 있으므로 등고선 자료는 중요한 정보가 된다. 등우선간의 면적을 구하고 이를 등우선 간의 평균 강우량에 가중치를 부여함으로써 전유역의 평균강우량을 산정한다.

이 방법은 면적을 가중인자로 한다는 것이 티센방법과 유사하나 관측된 강우

량에 직접 가중치를 부여하는 것이 아니라 등우선간의 평균 강우량에 면적 가중치를 주어 산정하는 것이 다르다.

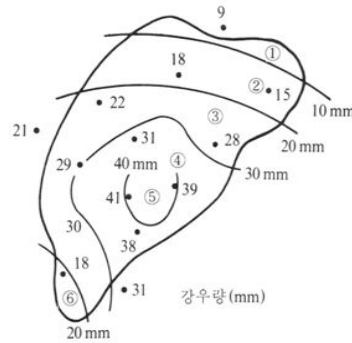


Fig. II-4. Isohyetal method(Jung, 2013)

$$P_m = \frac{A_1 P_{1m} + A_2 P_{2m} + \dots + A_n P_{nm}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_{im}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.3)$$

$P_m$ : 면적평균 강우량,  $P_{1m}, \dots, P_{nm}$ : 두 인접 등우선간 면적에 대한 평균 강우량  
 $n$ : 등우선에 구분되는 면적구간의 수  $A_1, \dots, A_n$ : 등우선에 의해 구분되는 면적

등우선법은 산악효과를 고려할 수 있는 방법으로 제주도와 같이 고도에 따른 강우의 변화가 많은 지역에서 적합한 방법이다. 그러나 강우-유출 해석 시 시간 강우량 자료를 이용하여 매 시간마다 등우선을 작도하는 일은 매우 많은 시간을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

## 2.3 NRCS-CN 유효우량

### 2.3.1 NRCS-CN 기법

NRCS(Natural Resources Conservation Service: 미자연자원보존국)에서 개발한 방법으로 유출량자료가 없는 경우는 유역 및 수문학적 조건 등을 이용하여 유효우량을 산정할 수 있도록 개발한 방법이다. NRCS-CN 모형은 침투 및 유출우량의 크기에 영향을 미치는 인자로 토양의 종류, 토지이용상태, 식생의 피복상태 및 선행토양함수조건 등을 고려하여 유효우량을 산정하고 있다. 또한 유역의 유출특성 조건에 따른 강우량과 유출량과의 관계를 미리 설정하여 사용하는 방법으로써 미계측유역의 유효우량 산정에 사용되고 있다.

총강우량  $P$  는 직접유출량(유효우량)  $Q$ , 초기손실(Initial Loss)  $I_a$ , 유출이 시작된 후에도 유출로 나타나지 않는 강우 부분인 실제보유수량  $F$  로 구성되고 실제보유수량  $F$  는 침투로 구성되는 총 손실이다. 유출이 시작된 후 총강우량  $P$  가 증가함에 따라  $Q$  와  $F$  는 증가하며  $F$  는 최대잠재보유수량  $S$  에 도달하여 총강우량  $P$  는 식 (2.4), 실제보유수량  $F$  는 식 (2.5)으로 산정된다.

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

$$F = (P - I_a) - Q \quad (2.5)$$

직접유출량  $Q$  를 산정하는 경우 실제보유수량  $F$  와 최대잠재보유수량  $S$  의 비는 직접유출량  $Q$  와 총 강우량  $P$  의 비와 같다는 비례가정을 도입하면 직접유출량  $Q$  는 식 (2.6)으로 산정된다

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P \geq I_a \quad (2.6)$$

$$Q = 0 \quad P < I_a$$

$P$ : 호우별 총 강우량(mm),  $I_a$ : 초기손실(mm)

$S$ : 유역의 최대잠재보유수량(mm),  $Q$ : 직접유출량에 해당하는 유효우량(mm)

유출이 시작되기 전 발생하는 차단, 지면저류, 침투 등에 대한 초기손실  $I_a$  가  $0.2S$  의 관계를 가진다고 가정하면 식 (2.6)은 NRCS 방법의 총우량-유효우량 산정하는 식 (2.7)가 된다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S \quad (2.7)$$

$$Q = 0 \quad P < 0.2S$$

수문학적 토양-피복형의 성질을 대변하는 유출곡선지수  $CN$ 을 고려한 최대잠재보유수량  $S$  는 식 (2.8)로 산정된다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2.8)$$

여기서,  $CN$  값은 1에서 100범위를 갖는다. 만일  $CN$ 이 100일 경우  $S=0$  이며,  $CN=1$ 일 경우  $S=25,146$ 이다. 즉,  $CN=100$ 일 때 손실은 불가능하고  $CN=1$ 일 때 모든 강우량은 손실로 나타나 유출은 0이 된다. 이 모형은 작은 농경구역에서는 비교적 만족할 만한 침투량을 제공하며, 토지이용변화의 영향을 평가하기 위하여 사용된다.

### 2.3.2 수문학적 토양군 및 토지피복도의 분류

수문학적 토양군은 Table II-5와 같이 A, B, C, D의 4개 형태로 분류되며 토양군별 침투능의 크기는 A, B, C, D 순이나 유출률은 D, C, B, A의 순이다. 우리나라의 경우 토양군 분류는 농촌진흥청의 개량토양도 또는 정밀토양도를 이용하고 있다. 토양도상에 토양군을 A, B, C, D로 구분한 후 이를 지형도상에 분포시켜 토양군별 면적으로 구분한다. 본 연구에서는 토양도를 이용하여 연구대상구역의 토양을 토양통별로 구분하여 수문학적 토양군을 구분하였다.

토양도상의 토양군별 면적 구분과 지형도상의 피복형별 면적 구분을 중첩시켜서 동일 토양군-피복형별 면적으로 구분한다. 동일 토양군-피복형별 면적에 대



하여 Table II-5와 같은 기준에 따라 *CN* 값을 부여한 다음, 면적 가중평균 하여 지역의 평균 유출곡선지수를 산정한다. Table II-5에서 산정한 유출곡선지수는 토양함수비가 중간정도인 *AMC-II*일 때의 값이며 토양이 건조한 *AMC-I* 혹은 습윤한 *AMC-III* 조건의 *CN* 값은 *CNII* 값을 일정한 양식에 따라 조정하여 산정하여야 한다(Table II-4).

Table II-3. Infiltration Rate Category by soil type(Lee, 2007)

Hydrologic Soil Group	Property of Soil	Infiltration Rate(mm/hr)
A	Outflow rate is very low, infiltration rate is large, and sand, gravel soil and drainage are very good.	7.62-11.43
B	Infiltration rate is large, and fine sand, gravel and excessively well drained.	3.81-7.62
C	Infiltration rate is small, and fine sand soil layer and drainage are very poor.	1.27-3.81
D	Infiltration rate is very small, and clay soil layer and drainage are very poor.	0-1.24

Table II-4. Runoff curve numbers(Lee, 2007)

Land use situation	Covering processing shape	Hydrological condition	Soil group CN			
			A	B	C	D
Rice field	Fresh water cultivation	-	79	79	79	79
early planting crop cultivation land	Linear ploughing cultivation	Poor	72	81	88	91
		Acceptable	67	78	85	89
	Equivalent segment cultivation	Poor	70	79	84	88
		Acceptable	65	75	82	86
	Mixed food and farming	Poor	66	74	80	82
		Acceptable	62	71	78	81
Wheat crop cultivation land	Linear ploughing cultivation	Poor	65	76	84	88
		Acceptable	63	75	83	87
	Equivalent segment cultivation	Poor	63	74	82	85
		Acceptable	61	73	81	84
	Mixed food and farming	Poor	61	72	79	82
		Acceptable	59	70	78	81
Dense sowing legumes crop cultivation land	Linear ploughing cultivation	Poor	66	77	85	89
		Acceptable	58	72	81	85
	Equivalent segment cultivation	Poor	64	75	83	85
		Acceptable	55	69	78	83
	Mixed food and farming	Poor	63	73	80	83
		Acceptable	51	67	76	80
Grazing land	Grassland for livestock grazing	Poor	68	79	86	89
		Marginal	49	69	79	84
		Acceptable	39	61	74	80
Meadowland.	Permanent grassland for hay production	-	30	58	71	78
Forest land	Fresh water cultivation	-	79	79	79	79
Urbanization area	Business and office area	-	89	92	94	95
	Industrial areas	-	81	88	91	93
Urban residential area	500m <sup>2</sup> or less	-	77	85	90	92
	500 to 990m <sup>2</sup>	-	61	75	83	87
	990 to 1,300m <sup>2</sup>	-	57	72	81	86
	1,300 to 1,983m <sup>2</sup>	-	54	70	80	85
Road	Paved road(Excluding road site)	-	98	98	98	98
	Paved road(Including road site)	-	83	89	92	93
	Graveled road(Including road site)	-	76	85	89	91
	Dirt road(Including road site)	-	72	82	87	89
Impermeable area	Paved parking lot, Roof	-	98	98	98	98
Being developing area	Residential land development etc.	-	77	86	91	94

### 2.3.3 선행토양함수조건

유역에 동일한 강우가 내릴 경우 그 전에 내린 선행강우가 많다면 토양이 함유하고 있는 수분이 많으므로 침투가 감소하여 유출율이 높아지게 된다. 반대로 선행강우가 적거나 없을 경우 토양은 건조한 상태가 되어 침투율이 높아 유출율은 감소하게 된다. 이와같이 총강우량과 휴효강우량의 분석에 있어 총강우량과 휴효우량의 관계에서 5일 또는 30일 선행강우량은 유역의 선행토양함수조건을 대변하는 지표로서 사용되고 있다. NRCS에서는 선행토양함수조건(Antecedent Moisture Condition, AMC)을 성수기(Growing Season)와 비성수기(Dormant Season)으로 구분하여 5일 선행강우량의 크기에 따라 3가지 조건을 부여하였다. Table II-6은 NRCS 방법에서 AMC 분류 기준을 나타낸 것이다.

Table II-5. Classification of Antecedent Moisture Condition(AMC) for the NRCS method(Lee, 2007)

AMC condition	Total 5-days antecedent rainfall(mm)	
	Dormant season	Growing season
I	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$
II	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$
III	$P_5 > 27.94$	$P_5 > 53.34$

AMC-II 조건으로 산정된  $CN_{II}$  값은 AMC 조건에 따라 조정이 필요하며 AMC-I 조건의  $CN_I$  이나 AMC-III 조건의  $CN_{III}$ 로의 변경하는 방법은 식 (2.9) 과 식 (2.10)을 사용한다.

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2.9)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (2.10)$$

NRCS-CN 모형은 국내에서 유효우량을 산정하기 위하여 가장 일반적으로 사용되며, 2014년 국토해양부 설계홍수량 산정지침(안)에서도 권장하고 있는 방법이다. 총우량과 유효우량간의 관계는 토양의 종류뿐만 아니라 유역의 토지이용상태 및 식생피복상태 그리고 토양의 수문학적조건에 따라 변하게 된다. 본 연구에서는 지표의 상황에 따른 NRCS-CN 모형을 이용하여 유역의 유출계수를 산정하였으며, 5년단위 유출계수를 산정하여 HEC-HMS 모델에 적용하였다.

## 2.4 합성단위도법

관측자료가 부족한 유역에서 수문곡선의 첨두유출량 및 시간에 따른 유역의 특성인자들과 관련 있는 이론 및 경험공식에 바탕을 둔 단위도의 유도방법들이 개발되었다. 강우-유출자료가 부족한 지역에서 유역 및 하천 특성인자들을 이용하여 유도한 단위도를 합성단위도(Synthetic unit hydrograph)라 한다.

HEC-HMS 모형에서는 Clark 방법, Snyder 방법 그리고 NRCS 방법을 사용하여 합성단위도를 유도한다. 합성단위도의 매개변수는 최적화 기법을 통한 측정자료로부터 결정하거나 경험적인 방법을 이용하여 결정한다.

### 2.4.1 Snyder 방법

미국 Appalachian 산맥지역에서 유역면적이 30~30,000km<sup>2</sup>인 유역에 대한 분석으로 개발되었으며, 단위도의 첨두유량의 크기 및 발생시각과 단위도의 기저시간의 길이를 유역의 지형특성인자와 상관시키는 경험공식을 사용한다. 기저폭 또는 기저시간  $T$ , 첨두유량  $Q_p$ , 지체시간  $t_p$ 의 3개 매개변수로 매끈하게 연결시켜 단위도를 작성하는 방법이다. 한편, 우리나라의 경우 Snyder 방법에 의한 결과는 다른 단위도 방법에 의한 결과와 많은 차이가 나타내며 이를 적절히 조정할 방안이 없는 이유로 실무에서는 거의 사용하지 않고 있다.

$$T_L = C_t(LL_{ca})^{0.3} \quad (2.11)$$

여기서,  $T_L$ 은지체시간(hr)이고,  $C_i$ 는 유역경사에 따른 유역특성 상수로서 낮은 수치일수록 급경사를 나타내며 광역적 범위는 0.3~6.0 이나 일반적인 범위는 1.35~1.65,  $L$  은 유역의 본류연장(km),  $L_{ca}$ 는 유역출구지점으로부터 유역중심에서 본류에 내린 수선의 교차점까지의 거리(km)이다.

$$Q_p = C_p \frac{A}{T_L} \quad (2.12)$$

여기서,  $Q_p$  는 첨두유량( $m^3/sec$ )이고  $C_i$ 값에 반비례하는  $C_p$ 는 유량의 저류용량에 따른 유역특성 상수로서 유효강우가 1cm인 경우 1.5~11.9의 범위이며,  $A$ 는 유역면적( $km^2$ ),  $T_L$ 은 지체시간(hr)이다.

$$t_r = \frac{T_L}{5.5} \quad (2.13)$$

이와 같은 식에서 계산된 강우지속기간( $t_r$ )과 실제 강우지속기간( $t_R$ )이 상이할 경우에는 유역 지체시간( $T_L$ )과 첨두유량( $Q_p$ )은 다음과 같이 조정하여야 한다.

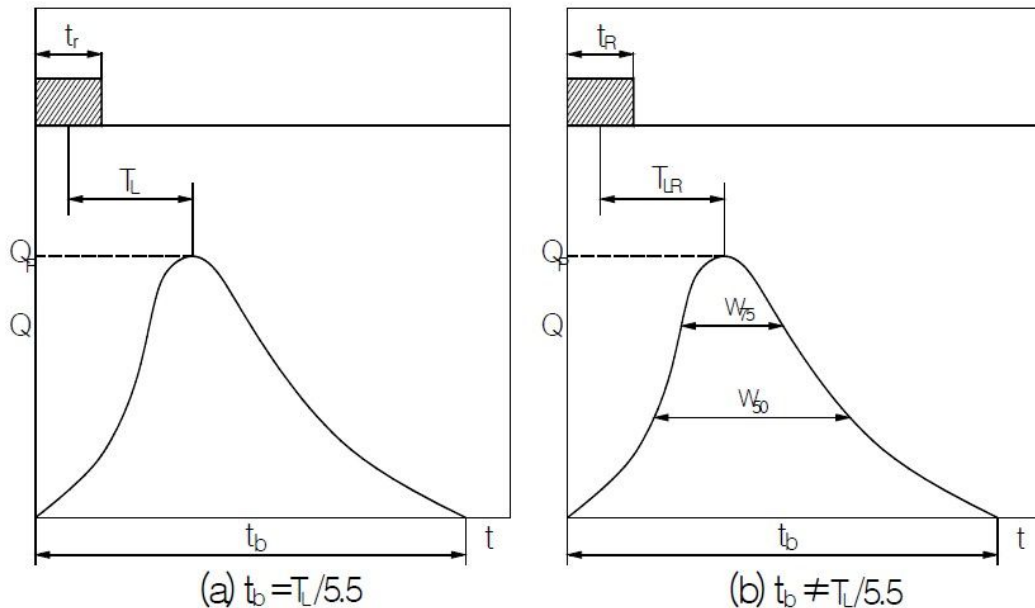


Fig. II-5. Concept map of Snyder synthetic unit hydrograph (Yoon, 2007)

$$T_{LR} = T_L + \frac{1}{4}(t_R - t_r) \quad (2.14)$$

$$Q_{PR} = Q_P \frac{T_L}{T_{LR}} \quad (2.15)$$

여기서,  $T_{LR}$ 은 조정된 지체시간(hr),  $T_L$ 은 계산된 지체시간(hr),  $t_R$ 은 실제 강우 지속시간(hr),  $t_r$ 은 계산된 강우지속시간(hr),  $Q_{PR}$ 은 조정된 침투유량( $m^3/sec$ ),  $Q_P$ 는 계산된 침투유량( $m^3/sec$ )이다. 기저시간 $t_b$ 는 다음 첫 번째 식으로 계산한 다음, 기저시간이 너무 클 경우에는 두 번째 식으로 계산한다.

$$t_b = 72 + 3T_{LR} \quad (2.16)$$

$$t_b = \frac{5.56A}{Q_{PR}} \quad (2.17)$$

여기서,  $t_b$ :단위도의기저시간(hr),  $T_{LR}$ :조정된 지체시간(hr)

이와 같이 결정된 3개 좌표점(0,0),( $T_{LR} + 0.5t_r$ ,  $Q_{PR}$ ) 및 ( $t_b, 0$ )을 매끈하게 연결 하되 스케치 된 단위도 아래의 면적이 1cm의 직접 유출고가 되도록 작도한다. 미국 육군공병단에서는 3개점을 사용하여 단위도를 스케치 할 때 발생하는 주관 적인 오차를 줄이기 위해 다음과 같은 경험식을 제안하였으며 이와 같이 4개점을 추가함으로써 보다 더 객관적인 스케치가 가능하게 된다.

$$W_{50} = 2.14 \left( \frac{Q_{PR}}{A} \right)^{-1.08} \quad (2.18)$$

$$W_{75} = 1.22 \left( \frac{Q_{PR}}{A} \right)^{-1.08} \quad (2.19)$$

여기서,  $W_{50}$  와  $W_{75}$  는 각각 침투유량의 50% 및 75% 되는 유량에 해당하는 단위도의 시간폭(hr)이며 해당 유량에 대하여 침투 발생시간 전에 1/3, 후에 2/3를 배분,  $Q_{PR}$ 은 조정된 침투유량( $m^3/sec$ ), A는 유역면적( $km^2$ )이다. 이와 같이

Snyder 방법은 유역특성에 따른 상수  $C_p$ 와 조정된 지체시간  $T_{LR}$ 을 입력인자로 하는 2 매개변수 합성단위도 방법이다.

### 2.4.2 NRCS 합성단위도법

NRCS 방법은 일본내 여러 유역에서 유도된 단위도를 이용하여 특성변수와 유역의 지형학적 인자간의관계를 분석하여 합성단위유량도를 작성하기 위한 고안된 방법으로서 무차원 단위도의 이용에 근거를 두고 있다(Fig. II-6).

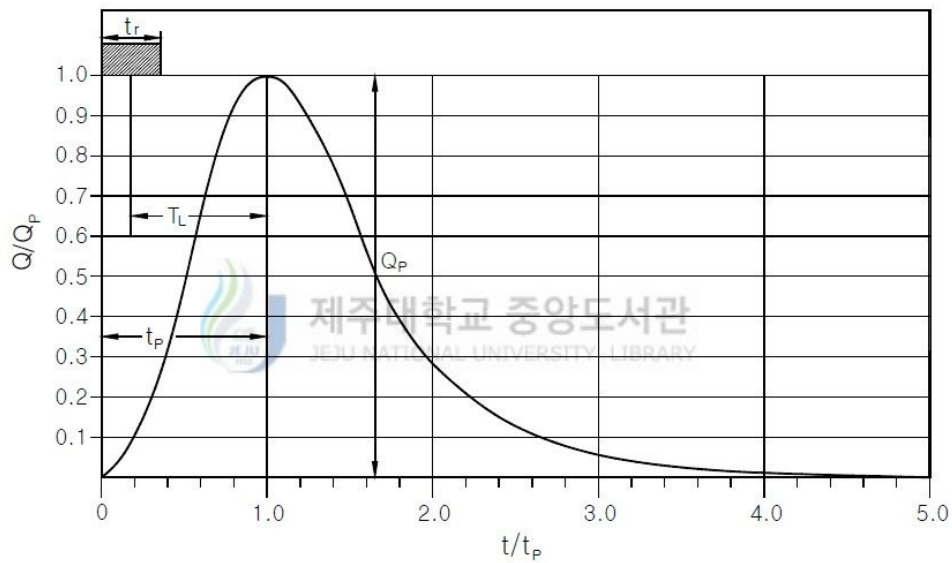


Fig. II-6. Dimensionless hydrograph of NRCS(Yoon, 2007)

Table II-6. Values of NRCS dimensionless hydrograph according to time (Yoon, 2007)

$t/t_p$	$Q/Q_p$	$t/t_p$	$Q/Q_p$	$t/t_p$	$Q/Q_p$
0	0.000	1.1	0.990	2.4	0.147
0.1	0.030	1.2	0.930	2.6	0.107
0.2	0.100	1.3	0.860	2.8	0.077
0.3	0.190	1.4	0.780	3.0	0.055
0.4	0.310	1.5	0.680	3.2	0.040
0.5	0.470	1.6	0.560	3.4	0.029
0.6	0.660	1.7	0.460	3.6	0.021
0.7	0.820	1.8	0.390	3.8	0.015
0.8	0.930	1.9	0.330	4.0	0.011
0.9	0.990	2.0	0.280	4.5	0.005
1.0	1.000	2.2	0.207	5.0	0.000

이 무차원 수문곡선은 미국 내 여러 지방의 대소유역으로부터 얻은 실제의 단위도를 해석하여 얻은 것이므로 유역의 특성에 별 관계없이 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법에 의한 단위도의 합성을 위해서는 단위도의 첨두유량  $Q_p$ 와 첨두유량의 발생시간  $t_p$ 를 결정하여야 하며  $Q_p$ 와  $t_p$ 가 결정되면 무차원 곡선을 사용하여 단위도를 합성 하게된다. NRCS는  $Q_p$ 와  $t_p$ 를 산정하기 위한 식으로 다음 식 (2.20)과 식 (2.21)을 추천하고 있다.

$$t_p = \frac{1}{2}t_r + T_L \quad (2.20)$$

$$Q_p = \frac{2.083A}{t_p} \quad (2.21)$$

여기서,  $t_p$ 는 강우시작부터 첨두유량까지 시간(hr),  $t_r$ 은 강우지속기간(hr),  $T_L$ 은 우량중심으로부터 첨두유량까지의 시간인 유역 지체시간(hr),  $Q_p$ 는 1cm유효우량시 첨두유량( $m^3/sec$ ), A는유역면적( $km^2$ )이다. 따라서 유역의 유출량( $Q_i$ )은



단위유량도  $j$ 시간의 값( $U_j$ )과  $i-j+1$ 시간에서의 유효우량( $X_{i-j+1}$ )에 의해서 식 (2.22)와 같은 기본식으로 결정된다.

$$Q_i = \sum_{j=1}^i U_j \cdot X_{i-j+1} \quad (2.22)$$

NRCS 모형의 경우 입력자료로는 유역의 면적, 유로연장, 유역경사, CN값, 강우지속시간 등이 있다. 이 값들을 이용하여 식 (2.20)과 식 (2.21)을 이용하여 단위도의 침투발생시간  $t_p$ , 단위도의 침투유량  $Q_p$ , 지체시간  $T_L$ , 즉, 우량의 질량 중심으로부터 침투유량점까지의 시간 등을 구한다.

### 2.4.3 Clark 단위도법

Clark의 합성단위도법은 단위도를 유도하는 과정이 두 단계로 나누어 이루어진다. 이방법의 첫 번째 단계는 유역특성을 고려하여 시간면적(TA)곡선을 작성하는 것으로, 시간곡선은 최종적인 단위도를 얻기 위해 선형 저수지 개념으로 추적(route)된다. 이 방법은 유역의 도달시간-누가면적 관계를 이용하여 유역 내에 내리는 순간단위 유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간 단위유량도를 유도하는 방법으로 강우로 인한 유수의 전이뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려하므로 자연하천에서의 적용에 적합한 방법이다(Fig. II-7).

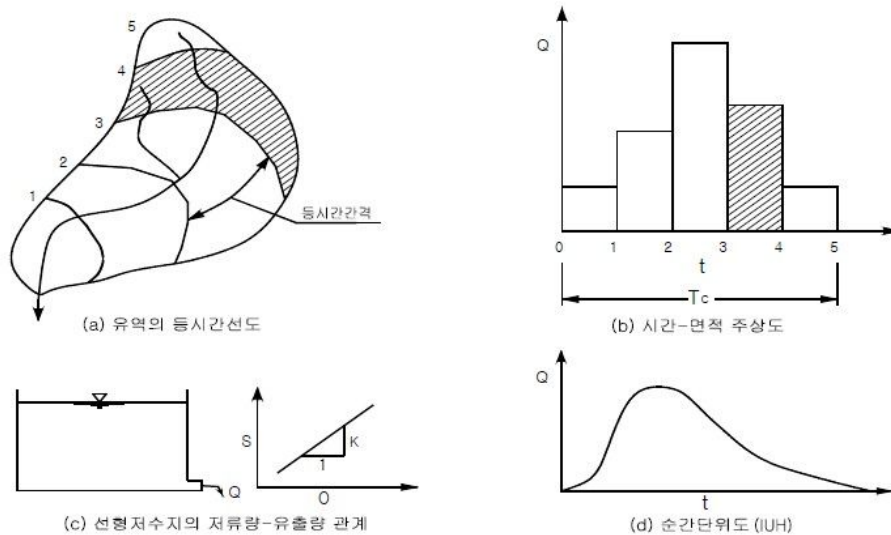


Fig. II-7. Concept map for Clark synthetic unit hydrograph(Jung, 2007)

선형수로에 의한 유출의 전이효과는 유역 전반에 순간적으로 내린 단위유효우량인 순간단위유효우량(instantaneous unit effective rainfall, 1 cm 또는 1 mm)으로 인한 유출을 시간-면적곡선을 이용한 단순전이에 의해 계산함으로써 고려한다. 이와 같이 계산된 선형수로의 유출수문곡선은 선형저수지의 유입수문곡선이 된다. 선형저수지에 의한 유역의 저류효과는 유입수문곡선에 대하여 유역과 동등한 저류특성을 갖는 선형저수지( $S=KO$ )의 홍수추적을 실시함으로써 고려하며, 이와 같이 계산된 선형저수지의 출력은 유역의 순간단위도(IUH)가 된다.

유역의 총 도달시간을 시간구간의 수로 구분하고 각 구간에 대하여 총 도달시간에 대한 비율을 다음 식 (2.23)으로 계산한다.

$$T_i = \frac{t_i}{t_c} \quad (2.23)$$

$T_i$ : 총 도달시간에 대한  $i$ 번째 시간구간의 비

$t_c$ : 유역의 총 도달시간,  $t_i$ : 고려하는 시간구간

만일 실제 유역에 대한 시간면적 곡선이 없다면 누가 TA 곡선은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$TA_i = 1.414T_i^{1.5} \quad (0 \leq T_i \leq 0.5) \quad (2.24)$$

$$1 - TA_i = 1.414(1 - T_i)^{1.5} \quad (0.5 \leq T_i \leq 1.0) \quad (2.25)$$

$TA_i$ : 시간면적곡선의 누가치

$T_i$ : 총 도달시간에 대한  $i$ 구간의 비

TA곡선이 준비되면 두 번째 단계로 저류상수  $K$ 와 함께 선형저수지 개념을 통해 TA를 추적함으로써 Clark 단위도를 얻게 된다. 추적계수(Routing coefficient)  $C$ 는 저류상수  $K$ 를 사용하여 다음 식과 같이 결정한다.

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (2.26)$$

$C$ : 선형추적계수,  $K$ : Clark의 저류상수(time),  $\Delta t$ : 시간구간(time)

Clark 저류상수  $K$ 는 관측된 수문곡선의 감수부 변곡점의 평균유량을 변곡점의 기울기로 나눈 값과 같으며, 유량관측 자료가 없을 경우에는 다양한 경험공식을 이용하여 계산한다. 앞에서 산정한 추적계수  $C$ 와 TA 곡선을 이용한 순간단위도(IUH)를 다음과 같이 유도한다.

$$IUH_i = \overline{CTA_i} + (1 - C)IUH_{i-1} \quad (2.27)$$

$IUH_i$ : 순간단위도의 종거,  $C$ : 추적계수

$\overline{TA_i}$ : 시간구간  $i$ 에서의 평균 시간면적 종거(=  $0.5(TA_i + TA_{i-1})$ )

최종적인 합성단위도는 시간구간  $\Delta t$  차이가 나는 두 개의 순간단위도를 평균함으로써 얻어지게 된다.

$$UH_i = \frac{1}{2}(IUH_i + IUH_{i-1}) \quad (2.28)$$

$IUH_i$ : 순간단위도의 시간구간  $i$ 에서의 종거

$UH_i$ : 합성단위도의 시간구간  $i$ 에서의 종거

## 2.5 하도추적

하도추적(channel routing)은 어떤 하도구간으로 들어오는 유입수문곡선을 하도구간에서 나가는 유출수문곡선으로 전환하는 절차이다. 수문에 의해 조절되지 않는 하도추적을 위하여 수집하여야 하는 자료는 표고별 저류량곡선 및 표고별 유출량 곡선이며, 표고별 저류량 곡선은 평균단면적법으로 산정하고 표고별 유출량 곡선은 우에 또는 오리피스 공식을 사용하여 산정한다. 하지만, 하도구간의 저류량과 유출량간의 관계는 저수지와 같이 단일 관계가 성립되지 않고 Fig. II-8과 같이 환형(loop type) 관계로 나타나므로 복잡하다. 또한, 동일 유출량의 경우에도 홍수위 상승시 저류량은 홍수위 하강시 저류량보다 크게 된다. 홍수위 상승 및 하강시의 하도구간 저류량의 형태 변화는 Fig. II-8과 같이 나타나며, 하상에 평행한 선 아래에 있는 저류량을 대형저류량(prism storage)이라 하고 위에 있는 저류량을 썸기저류량(wedge storage)이라 한다.

썸기저류에 대해 살펴보면 Fig. II-9와 같이 홍수위 상승시에는 구간 출구점의 유출량이 증가되기 이전에 많은 양의 썸기저류가 생기므로 썸기저류가 (+)가 되고 홍수위 하강시에는 구간 출구점의 유출량보다 유입량이 적으므로 썸기저류는 (-)가 된다. 따라서 동일 유출량에 대한 저류량과 수면경사는 홍수위 상승시가 홍수위 하강시보다 크게 되는 것이다. 이와 같은 썸기저류량이 유출량에 미치는 영향을 저류량-유출량 관계에 포함시킴으로써 하도구간의 홍수를 해석적으로 추적할 수 있게 된다.

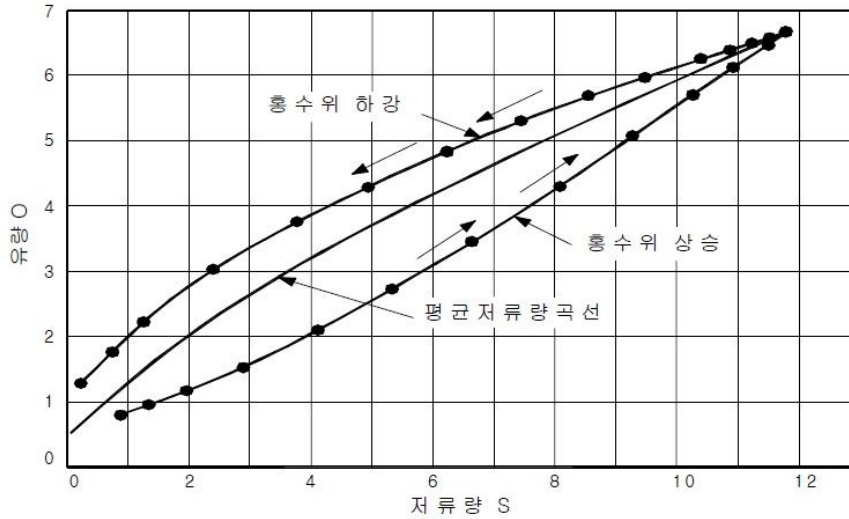


Fig. II-8. Stream channel storage-discharge relation graph(Jung, 2007)

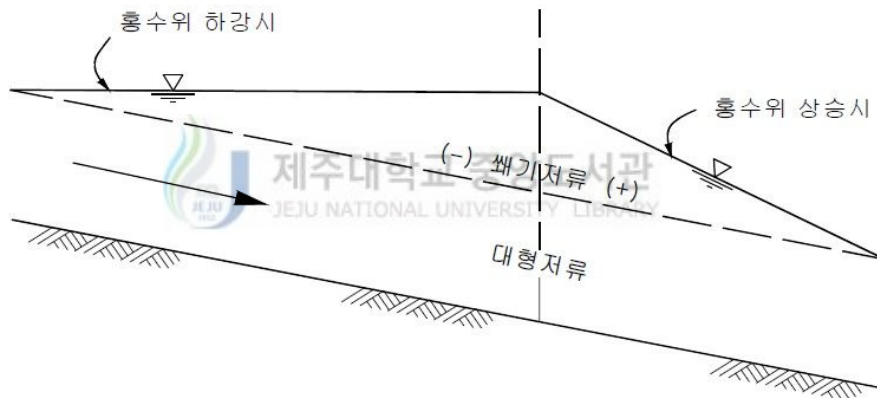


Fig. II-9 Changes on stream channel storage for rise and fall flood level(Jung,2007)

### 2.5.1 Muskingum 방법

#### (1) 기본방정식

Muskingum 방법은 McCarthy(1938)가 미국 육군공병단 산하의 Muskingum Conservancy District의 홍수통제를 위한 개발된 방법으로 저류량이 유입량 및 유출량과 관계가 있으며 연속방정식을 이용하고 있다. 하천의 추적구간내 저류량에 미치는 홍수유입량의 영향을 고려하기 위하여 구간내의 총저류량을 Fig. II-10과 같이 대형저류량과 빠기저류량으로 구분하고, 대형저류량은 유출량에만 비례하나 빠기저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정하면, 총저류량은

대형저류량과 썰기저류량의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$S = KO + Kx(I - O) \quad (2.29)$$

$$= K[xI + (1-x)O]$$

여기서,  $K$ :구간 내 저류량의 유출량에 대한 비를 나타내는 저류상수(hr)

$x$ :추적구간의 총저류량에 기여하는 유입량과 유출량의 상대적 중요성을 표현하는 무차원 가중계수

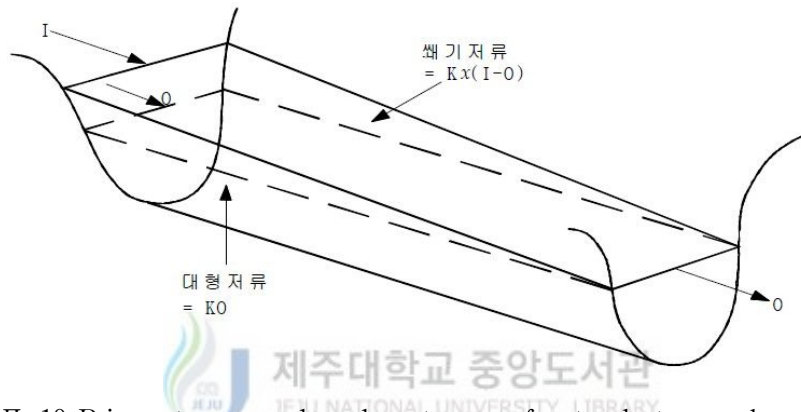


Fig. II-10 Prism storage and wedge storage of natural stream channel(Jung, 2007)

이와 같은 관계를 저류방정식에 대입하여 추적구간 상류단의 유입수문곡선으로부터 하류단의 유출수문곡선을 축차적으로 계산하는 것이 Muskingum 방법이다. 이와 같은 식을 임의 추적기간에 대해 정리하고 이를 저류방정식(2.30)의 우변에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (2.30)$$

$$S_2 - S_1 = K[x(I_2 - I_1) + (1-x)(O_2 - O_1)]$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = K[x(I_2 - I_1) + (1-x)(O_2 - O_1)] \quad (2.31)$$

여기서,  $I$ :유입량,  $O$ :유출량,  $S$ :저류량,  $K$ :저류상수,  $x$ :가중 계수

$\Delta t$ :계산 시간간격, 첨자 1, 2: 한 추적기간의 시점과 종점

이와 같은 식을 에 관하여 풀면 다음과 같이 정리되며, Muskingum 방법에 의한 홍수추적은  $\Delta t, K, x$  등을 먼저 결정하고 다음 식을 축차적으로 풀어 나가는 방법을 채택하고 있다.

$$O_2 = C_o I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1$$

$$C_o = \frac{-(Kx - 0.5\Delta t)}{K - Kx + 0.5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (2.32)$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}, \quad C_o + C_1 + C_2 = 1$$

이론적으로 계산 시간간격  $\Delta t$ 는 추적기간으로서 저류상수  $K$  와 같다고 볼 수 있으나, 이러한 저류상수  $K$  를 결정하기 어려운 경우에는 통상 추적구간의 평균 유속에 의한 도달시간인  $T_c$ 의 약 1/2~2/3를  $K$  로 간주할 수 있다. 운동파 이론(kinematic wave theory)에 의하면 계수  $C_o, C_1, C_2$ 는 모두 양(+)의 값을 가지도  $\Delta t$ 를 선정하여야 한다. 그러나  $C_1, C_2$ 는 음의 유출량이 계산될 정도로 정확도에 영향을 미치지 않는 경우라면 음(-)인 것도 가능하나  $C_o$ 는 반드시 양(+)이 되어야 한다. 이에 따라 하도 홍수추적의 시간간격  $\Delta t$ 는 다음과 같은 조건을 만족시키는 것이 필요하다.

$$2Kx < \Delta t \leq K \left( \approx \frac{2}{3} T_c \right) \quad (2.33)$$

## (2) 계측구역의 매개변수( $K, x$ ) 결정

상수  $K$  및  $x$ 를 산정하는 방법으로 먼저 관측된 유입 및 유출수문곡선이 없는 경우에는 일반적으로  $K$ 는 홍수파의 이동시간,  $x$ 는 0.2를 택한다. 유입 및 유출수문곡선을 사용하여 저류량의 증감변화와 저류량의 누가곡선을 Fig. II-11과 같이 작성한다. 무차원 가중계수  $x$ 를 가정하여 Fig. II-12와 같이  $[xI + (1-x)O]$ 와 저류량의 누가곡선이 가장 직선에 가까워지는  $x$ 를 채택하고 그 직선의 기울기를  $K$  값으로 결정한다.

한편 이와 같은 그래프와 작도에 의한 방법은 다소 주관적인 요소가 있으므로 통계학적인 방법(statistical method)을 사용하기도 한다.

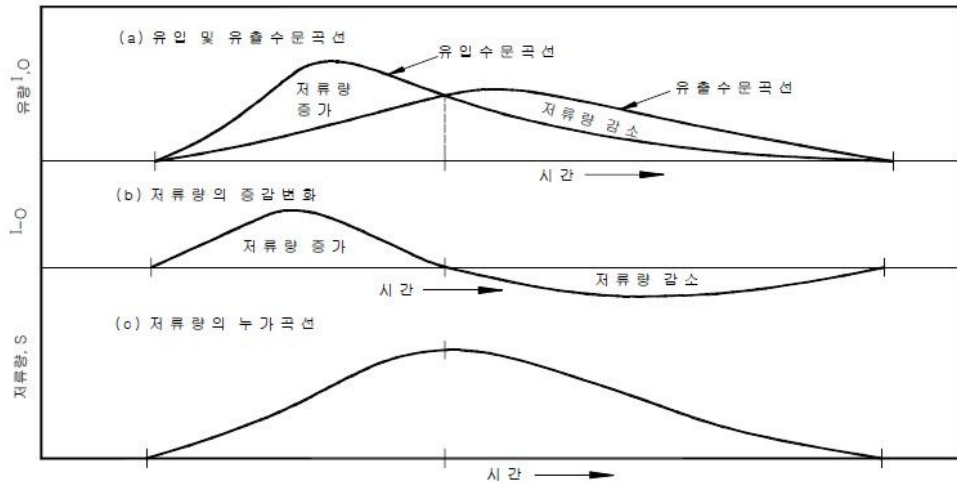


Fig. II-11. Relation of stream channel storage-inflow-discharge(Jung, 2007)



Fig. II-12. Decision of stream channel storage constant( $K$ )(Jung, 2007)

### (3) 미계측유역의 매개변수( $K, x$ ) 결정

일반적으로 저류상수  $K$ 값으로 추적구간의 홍수파(flood wave) 통과시간을 주로 사용하며, 홍수파 통과시간은 홍수파의 질량중심(mass center)이 구간의 상류단으로부터 하류단까지 통과하는데 소요되는 시간으로 정의되며, 간혹 첨두홍수량의 구간 통과시간을 근사값으로 사용하기도 한다. Seddon은 추적구간내 대표 지점의 수위-유량관계곡선(rating curve)의 경사를 이용하여 홍수파의 전파속도



(flood wave velocity)를 계산하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_w = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dy} \quad (2.34)$$

여기서,  $V_w$ :홍수파의 전파속도,  $B$ :흐름단면의 수면 폭  
 $dQ/dy$ :수위-유량관계곡선의 경사

하도 단면형별 평균유속과 홍수파의 전파속도의 비는 경험적으로 Table II-8 과 같고 자연하천의 경우 평균적으로 1.5가 추천하고 있다. 여기서 평균유속은 도달시간을 산정하는 경험공식을 이용하거나 수면곡선계산 결과 등의 유속을 참고하여 결정할 수 있다.

Table II-7. Ratio of mean current speed and celerity of flood wave according to stream channel cross section type(Jung, 2007)

River channel cross-section shape	Propagation speed of flood wave ( $V_w$ )/Mean current velocity ( $V$ )	Note
Double wide old channel	1.67	Generally recommend 1.5 in the natural river case
Double wide parabolic channel	1.44	
Triangular channel	1.33	

이와 같이 저류상수는 추적구간의 홍수파 통과시간이므로 추적구간의 거리를 평균유속이 아닌 홍수파의 전파속도로 나누어 산출하여야 한다.

$$K = \frac{L}{V_w} \quad (2.35)$$

여기서,  $K$ :저류상수,  $L$ :구간거리,  $V_w$ :홍수파의 전파속도

홍수의 저류효과(attenuation) 정도를 결정하는 무차원 가중계수  $x$ 값은 0~0.5의 범위를 가지며,  $x$ 값이 0이면 최대 저류효과가 나타나고  $x$ 값이 0.5이면 저류효과는 전혀 나타나지 않고 단지 지체효과만이 나타나게 된다. 한편, 저수지의 경우 저류량에 대한 유입량의 영향을 무시할 수 있으므로  $x$ 값이 0이며 저류량은 유출량과 선형( $S=KO$ ) 관계이다. 대부분의 무차원 가중계수 하천에서  $x$ 값은 0.0~0.3의 범위를 나타내며,  $x$ 값은 민감도가 아주 낮으므로 평균값인 0.2를 채택하면 무난하다.



### Ⅲ. 연구대상유역 및 토지피복자료 구축

#### 1. 연구대상유역

제주도는 한반도의 남서해상 약 90km지점에 위치하며 본도를 기준으로 경도의 극점은 극서지점인 제주시 한경면 고산리(한장동)의  $126^{\circ} 56' 57''$ 에 놓여 있으며, 위도의 극점은 극남지점인 서귀포시 대정읍 하모리  $33^{\circ} 11' 27''$ 에서 극북지점인 제주시 구좌읍 김녕리  $33^{\circ} 33' 50''$ 에 위치하고 있는 우리나라 최대의 도서이다. 지형은  $N70^{\circ} E$ 의 장축을 가지며 동남 약 73km인 타원형으로서 섬 중앙에 해발1,950m의 한라산을 중심으로 한 원추형의 순상화산을 이루고 있다. 장축인 동서 방향은 매우 완만한 사면인  $3\sim 5^{\circ}$ 를 이루고 단축인 남북방향은 급경사로  $5\sim 7^{\circ}$ 를 갖는 순상화산에서 나타나는 Aspite 화산형태를 보이고 있다.

본 연구에서는 2007년 태풍 “나리” 내습 시 가장 많은 피해가 발생하고 제주도심하천 중에서 유출이 가장 많이 발생하는 한천을 연구대상유역으로 선정하였다(Fig. Ⅲ-1).

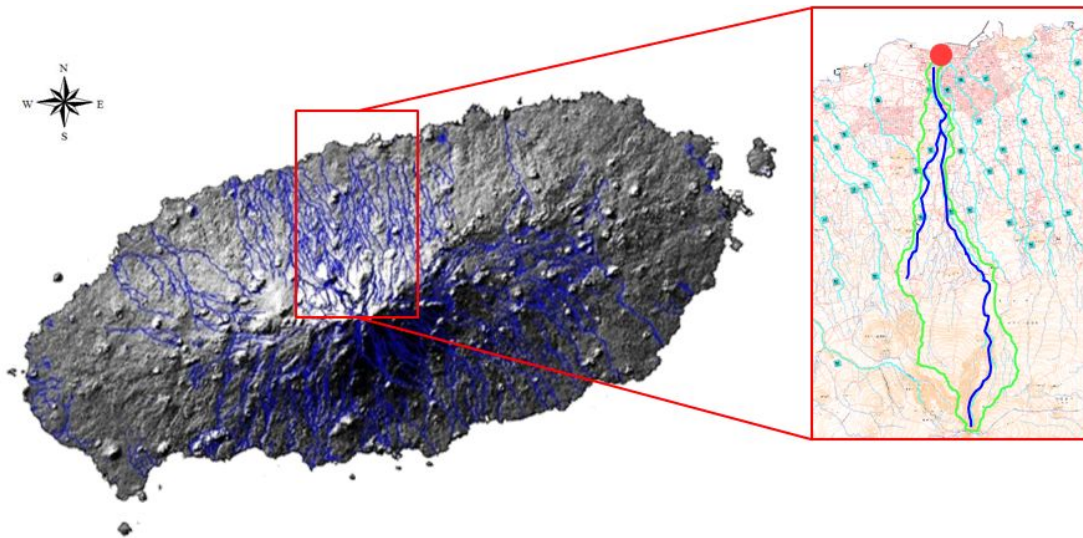


Fig. Ⅲ-1. Basins for the study

### 1.1 유역의 형상 및 지형적 특성

제주도 북측에 위치한 한천은 한라산 EL.1,950m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유출되며, 유로연장은 11.5km, 유역면적은 37.39km<sup>2</sup>, 유역의 형상은 좌안으로 토천이 유입되는 것을 제외하고는, 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천 형태를 보이고 있다. 하천 인근으로는 하류부에서는 도심지가 위치하고 있으며 그 외 지역에서는 과수원이 주를 이루며 일부 상류에서는 임야가 분포하고 있다. 하천의 제방은 자연제방의 형태를 띠고 있으나 하류의 주거지와 인접된 구간에서는 옹벽의 형태가 나타나기도 한다. 하류는 일부는 복개가 약 341m 정도로 되어 도로 및 주차장으로 이용되고 있다. 또한, 하천의 유출은 수백mm 이상의 호우 시에만 짧게 발생하며, 나머지 기간은 건천의 상태를 유지하고 있다.

Table III-1. Watershed characteristic factor

Watershed	Watershed Area (km <sup>2</sup> )	Stream Length (km)	Average width (A/L)	Form factor (A/L <sup>2</sup> )
Han stream	37.19	19.01	1.96	0.103

### 1.2 유역의 표고 및 경사분석

유역의 표고는 강수량 및 증발산량에 영향을 미치며, 경사는 강우의 침투량과 유출량 결정 및 지표면 유출속도에 영향을 주는 유역의 기울기로 지표류의 유속, 유역의 침식능 및 지역적인 바람 등에 영향을 받는다(Jung, 2013). 한천유역을 대상으로 표고 및 경사 분석을 수행하였으며, 분석 결과는 Fig. III-2, III-3과 같다.

한천 유역의 표고분석 결과, 해발 200m 이하지역은 유역 전체의 13.87%(5.16 km<sup>2</sup>)를 차지하고 있고, 200m~600m 지역은 35.95%(13.37km<sup>2</sup>), 600m~1,000m 지역은 22.82%(8.49km<sup>2</sup>), 1,000m 이상인 지역은 27.36%(10.17km<sup>2</sup>)으로 분석되었다 (Table III-2).

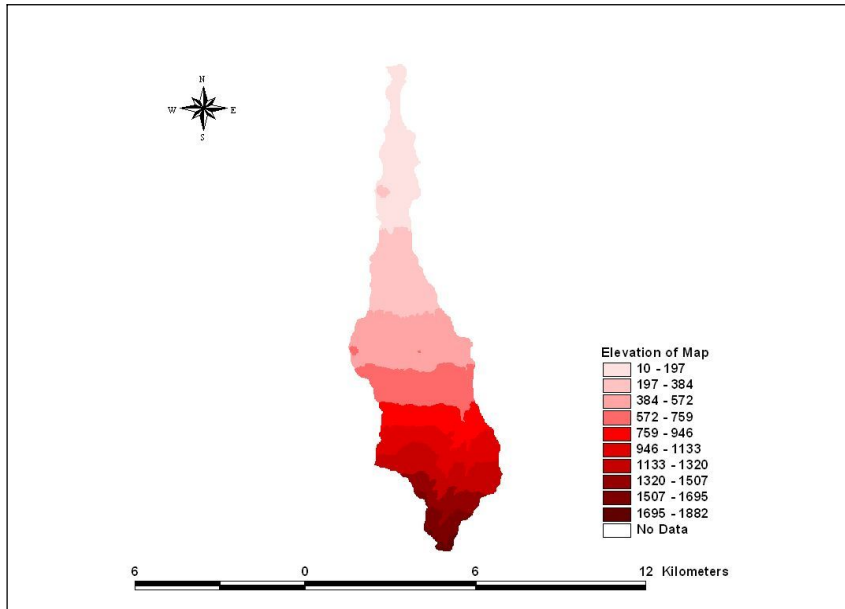


Fig. III-2. Altitude analysis of Han stream watershed

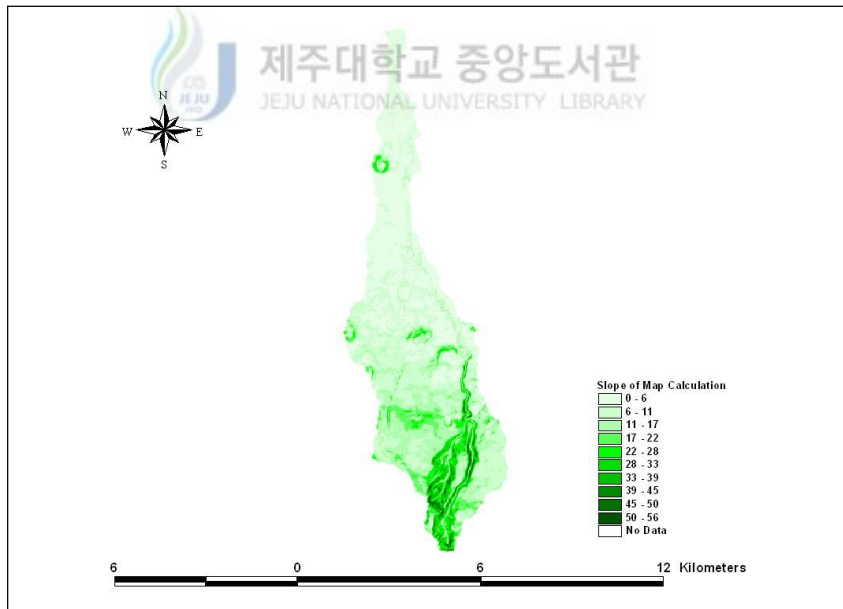


Fig. III-3. Slope analysis of Han stream watershed

Table III-2. Altitude analysis result of Han Stream watershed

Altitude range (m)	Basin area ( $km^2$ )	Rate (%)	Accumulative basin area ( $km^2$ )	Accumulative rate (%)
< 200	5.16	13.87	5.16	13.87
200 ~ 600	13.37	35.95	18.53	49.83
600 ~ 1000	8.49	22.82	27.02	72.62
1000 <	10.17	27.36	37.19	100
Total	37.19	100	37.19	100

Table III-3. Slope analysis result of Han Stream watershed

Slope range (°)	Basin area ( $km^2$ )	Rate (%)	Accumulative basin area ( $km^2$ )	Accumulative rate (%)
< 5	9.67	25.99	9.67	25.99
5 ~ 10	11.82	31.77	21.48	57.76
10 ~ 15	7.37	19.83	28.85	77.59
15 ~ 20	3.65	9.81	32.50	87.40
20 <	4.69	12.60	37.19	100
Total	37.19	100	37.19	100

한천 유역의 경사 분석 결과를 보면, 5°이하의 평탄지역은 전체면적의 25.99%(9.67 $km^2$ ), 5~10° 지역은 31.77%(11.82 $km^2$ ), 10~15° 지역은 19.83%(7.37  $km^2$ ), 15~20° 지역은 9.81%(3.65 $km^2$ ), 20° 이상인 지역은 12.60%(4.69 $km^2$ )로 분석되었다(Table III-3).

## 2. 적용 호우사상 및 유역평균강우량

일반적으로 유역평균강우량은 유역 내 강우량 관측지점의 점 강우량 자료를 이용하여 Thiessen 다각형을 도출하고 유역평균 강우량을 산정한다. 그러나 Thiessen 다각형법은 각 관측소마다 지배면적에 가중치를 부여하여 평균 강우량을 산정하는 방법으로 제주지역과 같은 고도에 따른 강우의 영향을 많이 받는 지역에서는 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 제주지역과 같이 고도에 따라 강우량이 증가하는 지역에서는 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정하여야 한다.

본 연구에서는 Jung(2013)이 제시한 티센다각형법의 유역평균 강우량을 등우선법으로 환산하는 식을 이용하여 한천유역의 유역평균 강우량을 산정하였으며, 사용된 강우량 관측소는 Table III-4와 같다.

Table III-4. Rainfall Observatory Station

The name of a observatory	AWS spot	Altitude(m)	Longitude	Latitude
Jeju	184	20	33.514	126.530
Ara	329	375	33.456	126.562
Urimok	753	965	33.393	126.495
Jindallae field	870	1,489	33.370	126.556
Witseohreum	871	1,673	33.362	126.518

제주도 도심하천인 한천 유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 2011년 8월 7일 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우, 2012년 4월 21일 집중호우 사상을 적용하였으며, 각 호우사상별 지점 강우량은 Table III-5와 같다.

Table III-5. Rainfall according in observed point

(unit: mm)

Rainfall events	Jeju	Ara	Urimok	Jindalae field	Witseor uem	Note
2011.08.01 - 08.10	323.5	465.0	714.5	682.0	929.0	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	125.5	128.0	181.0	419.5	346.5	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	98.5	312.5	267.5	456.0	642.5	Heavy rain period

제주지방 기상청 관할 20개소의 AWS 관측지점 중 한천 유역 내에는 제주, 아라, 어리목, 진달래밭, 윗세오름 관측소가 포함되어 있으며, 각 호우 사상별 지점의 시간강우량 자료를 취득하여 Thiessen 다각형을 도출하였다(Fig. III-4). Thiessen 다각형법으로 도출된 유역평균 강우량은 Table III-6과 같다.

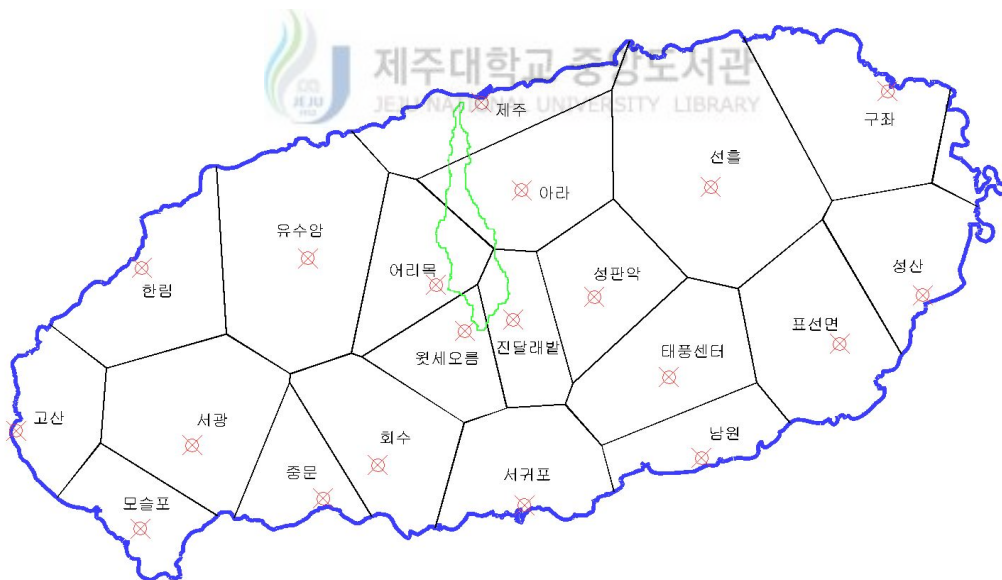


Fig. III-4. AWS Thiessen polygon of Han stream watershed



Table III-6. Mean areal rainfall using Thiessen method

Rainfall events	Han stream basin(mm)	Note
2011.08.01 - 08.10	629.59	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	220.07	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	328.48	Heavy rain period

Thiessen 다각형법으로 산정된 유역평균 강우량을 Jung(2013)이 제시한 Fig. III-5의 티센-등우선 변환식을 이용하여 등우선법으로 산정하였다(Table III-7).

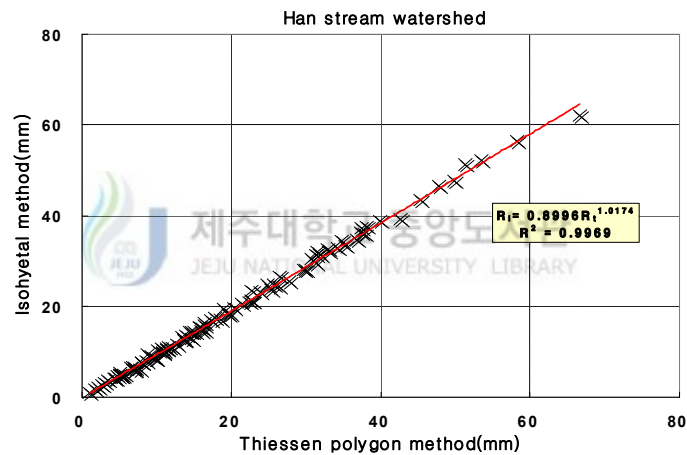
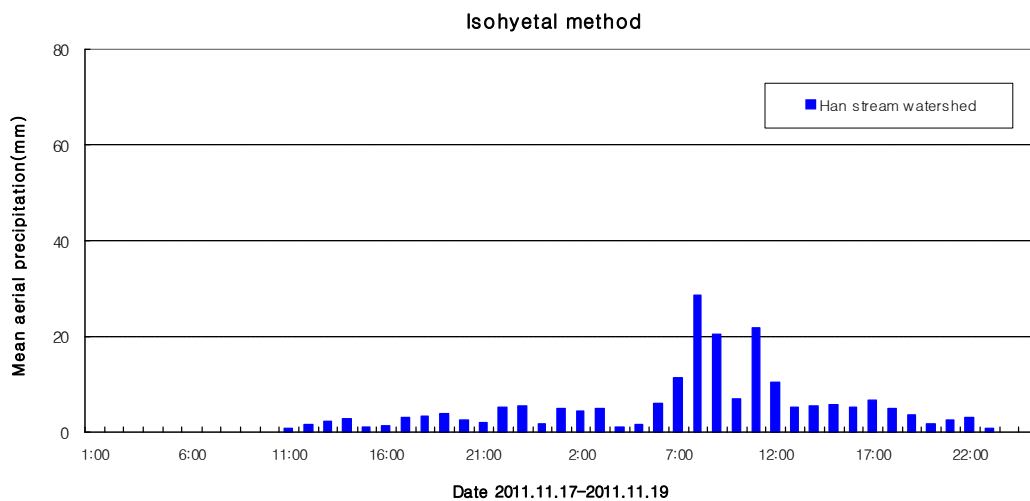
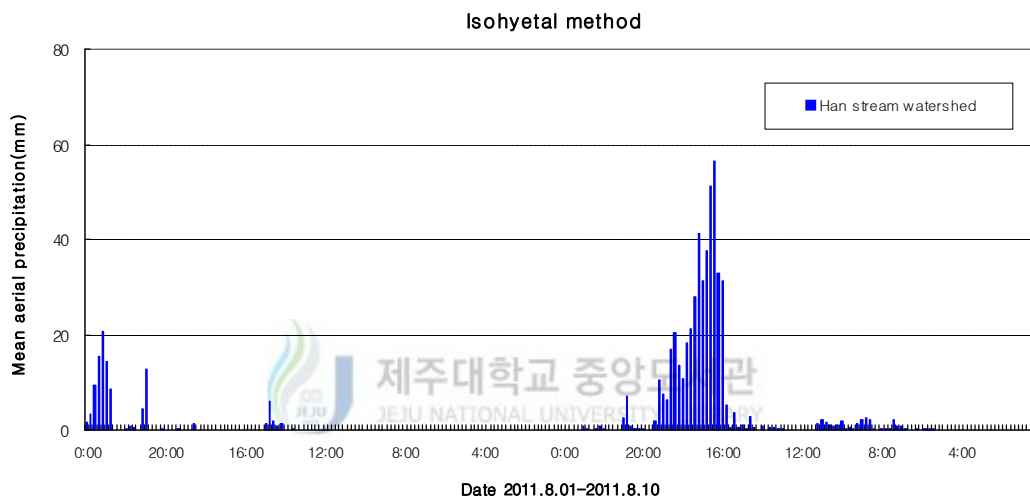


Fig. III-5. Thiessen-isohyetal method transformation of Han Stream (Jung, 2013)

Table III-7. Mean areal rainfall using isohyetal method

Rainfall events	Han stream basin(mm)	Note
2011.08.01 - 08.10	599.29	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	205.62	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	307.03	Heavy rain period

2011년 9호 태풍 “무이파”의 영향으로 한천유역에 599.29mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 56.43mm/hr (8월 7일 14시)로 나타났습니다. 2011년 11월 17일 집중호우로 인하여 205.62mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 28.56mm/hr(11월18일 오전 8시)로 나타났습니다. 2012년 4월 21일 집중호우로 인하여 307.03mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 33.28mm/hr(4월21일 오전 9시)로 나타났습니다(Fig. III-5).



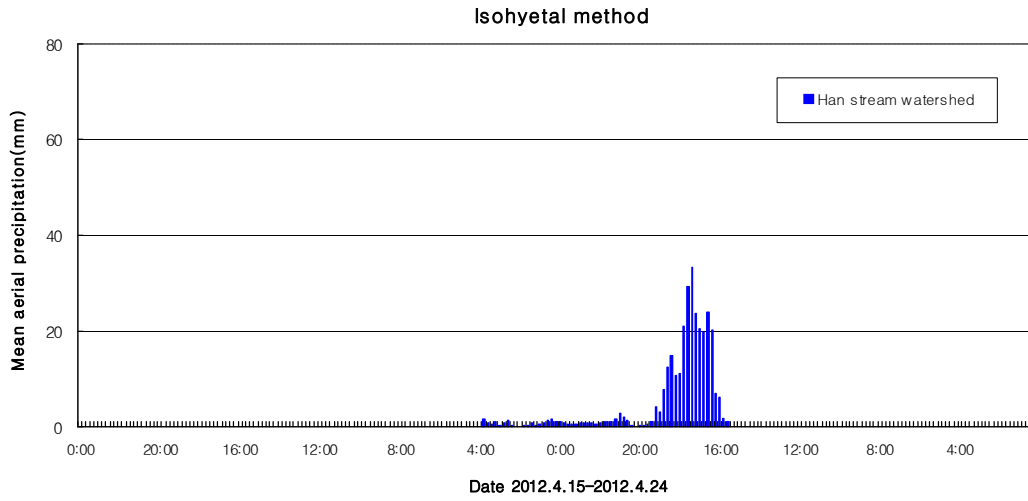


Fig. III-6. Mean areal rainfall by heavy rain concept using isohyetal method



## IV. 결과 및 고찰

### 1. 한천유역의 토지이용변화

#### 1.1 토지이용변화 분석

한천 유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 국가 수자원관리 종합정보시스템과 환경부에서 제공하는 1975년부터 2005년까지 5년 주기의 토지피복자료를 구축하였다(Fig. IV-1). 1975년 토지피복자료는 초지와 산림의 구분이 명확하지 않아서 분석에서 제외하였다.

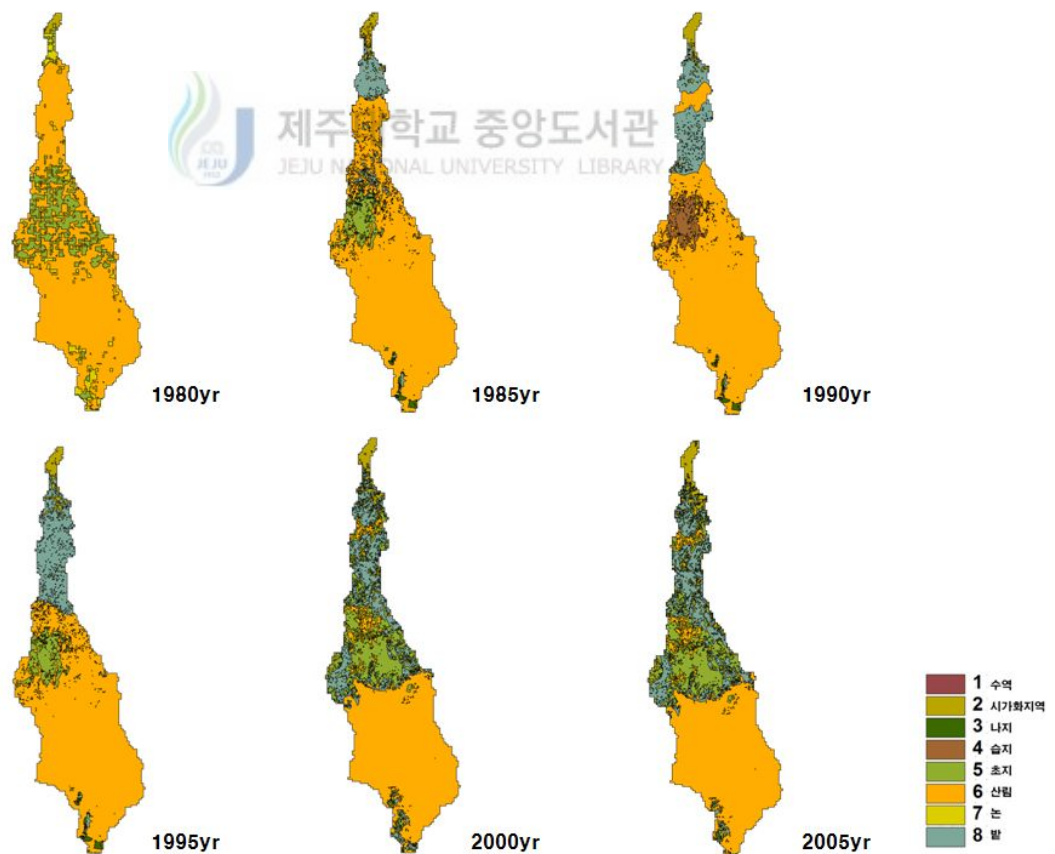


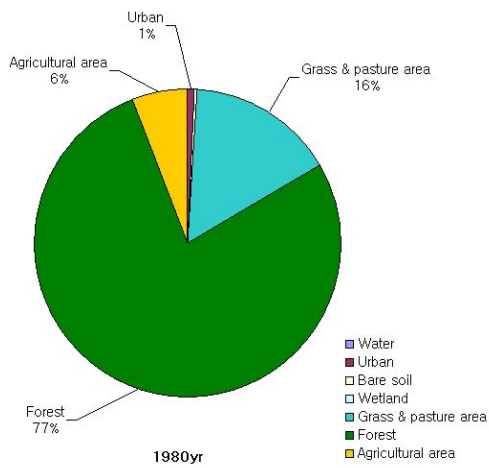
Fig. IV-1. Land use change of Han stream watershed

한천유역의 1980년부터 2005년까지 토지이용변화는 도시화 및 지역 개발 등에 의하여 산림지역의 감소, 시가화 지역 및 농경지역 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 분석기간동안 한천유역의 시가화 면적은 359,192  $m^2$ 에서 1,907,288  $m^2$ 으로 약 5배 증가하였으며, 농경지 면적은 2,158,035  $m^2$ 에서 7,173,355  $m^2$ 으로 약 5배 증가하였다. 산림지역의 경우 28,791,886  $m^2$ 에서 21,001,243  $m^2$ 으로 약 28% 감소하는 것으로 분석되었다(Table IV-1).

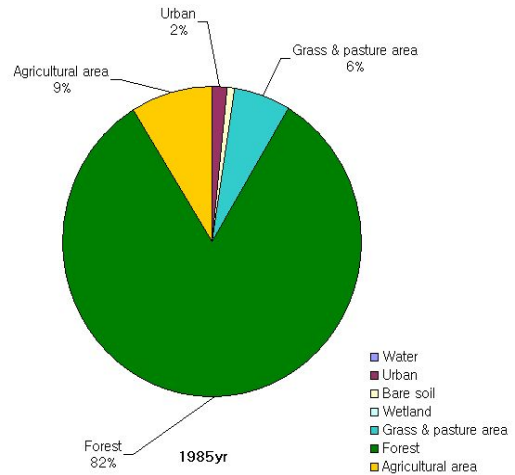
Table IV-1. Land use change of Han stream watershed (unit:  $m^2$ )

Division	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Water	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430
Urban	359,192	589,213	789,151	827,827	1,578,864	1,907,288
Bare soil	3,600	343,772	323,146	338,980	43,328	49,878
Wetland	19,731	367	-	-	-	-
Grass & pasture area	5,861,361	2,280,619	2,233,380	2,243,245	6,961,010	7,060,422
Forest	28,791,886	30,669,364	28,918,126	27,809,474	21,625,194	21,000,863
Agricultural area	2,158,035	3,310,470	4,930,002	5,974,280	6,985,409	7,175,355
Total	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236

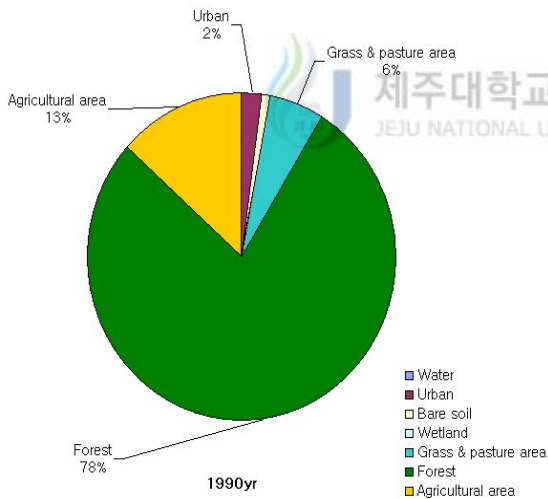
Fig. IV-2는 1980년부터 2005년까지 토지이용분포를 나타내고 있다. 도시화지역은 1980년 1%에서 지속적으로 증가하여 2005년에는 유역 내 5%를 차지하고 있으며, 농경지역은 1980년 6%에서 2005년에는 19%로 증가하였다. 산림지역은 1980년 77%에서 2005년에는 57%로 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.



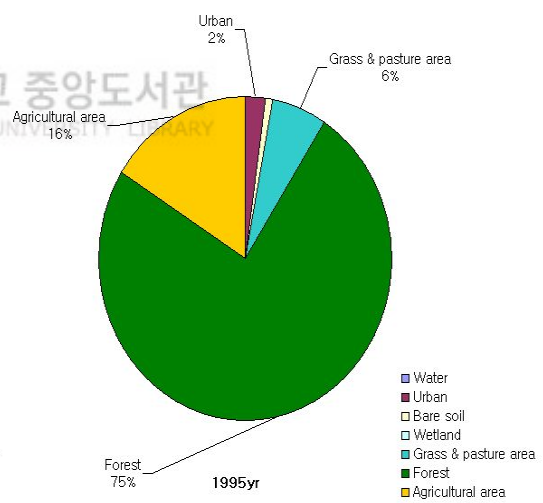
(a) 1980yr



(b) 1985yr



(c) 1990yr



(d) 1995yr

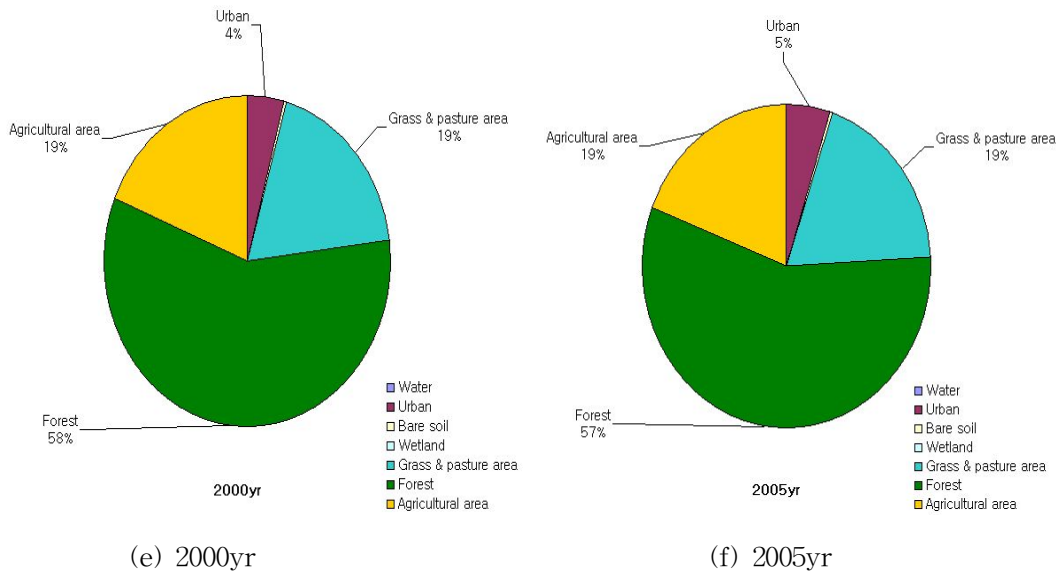


Fig. IV-2. Pi diagram showing land use change of Han stream watershed

## 1.2 토지이용에 따른 유출계수 산정

NRCS-CN 방법에서는 총유량 중에서 유효유량에 영향을 미치는 토양의 종류 및 지표의 이용상태를 고려하여 유출곡선지수 CN을 결정한 후 직접유출량을 산정하고 있다. HEC-HMS 모델의 단위도법에서도 CN은 유역의 손실을 산정하기 위한 중요한 매개변수이다. 유출곡선지수 CN을 산정하기 위하여 토지이용현황은 각 연도별 피복자료를 이용하여 분석하였으며, 토양도는 농업과학기술원의 토양통 분류자료를 이용하여 분석하였다(Fig. IV-3).

한천유역의 연도별 토지피복분석은 앞장에서 제시한 결과를 이용하였으며, 토양통 분석 결과는 Table IV-2와 같다.

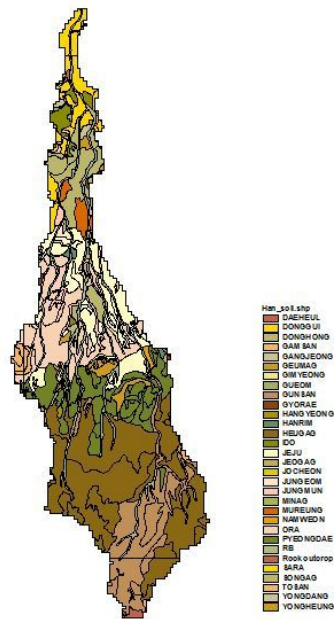


Fig. IV-3. Soil-map of Han stream watershed

한천유역의 토양자료를 분석한 결과 흑악토이 28.99%로 가장 많이 분포하고 있으며, 군산토, 평대토, 오라토 순으로 분포하는 것으로 나타났다. 수문학적 토양군을 분석한 결과 한천유역은 침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층이며 배수가 대체로 불량한 C 그룹의 토양이 51.25%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, A 그룹의 토양이 32.47%, B 그룹의 토양이 14.74%, D 그룹의 토양이 1.54%로 분석되었다.



Table IV-2. Result of soilmap in Han stream watershed

soilmap	Area	Rate(%)	Hydrologic soil group
HEUGAG	10,782,797	28.99	A
GUNSAN	4,531,801	12.18	B
PYEONGDAE	4,011,071	10.78	C
ORA	3,791,482	10.19	C
JEJU	3,478,189	9.35	C
RB	2,363,623	6.35	C
DONGHONG	1,957,829	5.26	C
DONGGUI	1,518,898	4.08	C
JUNGMUN	788,477	2.12	C
GEUMAG	672,543	1.81	A
IDO	568,464	1.53	C
MUREUNG	442,934	1.19	D
SARA	428,456	1.15	B
GAMSAN	385,017	1.04	A
SONGAG	340,188	0.91	C
HANRIM	144,194	0.39	A
Etc.	990,273	2.68	-
Total	37,196,236	100	-

농업과학기술원에서 우리나라 토양에 대한 객관적이고 실질적인 수문학적 토양유형 분류를 위해서 토양의 침투 및 투수속도 측정자료에 기반하여 정정화 등 (1995)에 의한 토양도의 투수성을 보완하였다. 본 연구에서는 농업과학기술원의 자료를 이용하였으며, 한국지질자원연구원(2011)의 “제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴 보고서”의 중분류 토지피복분류항목에 대한 AMC II 조건에서의 유출곡선지수 값(Table IV-3)을 각 년도별 토지피복자료에 적용하였다.

Table IV-3. CN(AMC-II) on land cover categorization items

Land cover code	Land cover	A	B	C	D
110	Residential area	58	73	82	86
130	Business area	95	96	97	97
140	Entertainment area	95	96	97	97
150	Traffic area	89	91	93	94
160	Public area	81	88	91	93
210	Rice field	78	78	78	78
220	Field	64	75	82	86
230	House plantation	98	98	98	98
240	Orchard	44	66	77	83
250	Other lands	59	74	82	86
310	Broad leaved forest	47	67	78	85
320	Coniferous forest	46	68	79	86
330	mixed stand forest	47	68	79	86
410	Natural pasture	30	58	71	78
420	Golf link	52	70	80	85
430	Other grasslands	52	70	80	85
510	Inland Wetlands	98	98	98	98
620	Other bare lands	77	86	91	94
710	Inland number	100	100	100	100

한국지질자원연구원, 2011, 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴 보고서

한천유역의 토지피복자료(1980~2005)과 토양통자료를 이용하여 연도별 유출계

수를 산정한 결과는 Table IV-4와 같다. 1980년부터 2005년까지 5년단위로 CN을 산정한 결과 5년간 평균적으로 2.2%씩 증가하는 것으로 나타났으며, 1980년대비 2005년에는 CN이 7.04 증가(11.6%)하는 것으로 분석되었다. 산정된 선행토양함수조건(AMC-II)의 CN값을 이용하여 AMC-I, AMC-III 조건의 변환식에 적용하여 각 선행토양함수조건에 따른 유출곡선지수를 계산하였다.

Table IV-4. CN of Han stream watershed

Division	Han stream					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
AMC-I	39.27	40.85	41.89	42.73	44.87	46.77
AMC-II	60.62	62.18	63.19	63.98	65.96	67.66
AMC-III	77.98	79.09	79.79	80.34	81.67	82.79

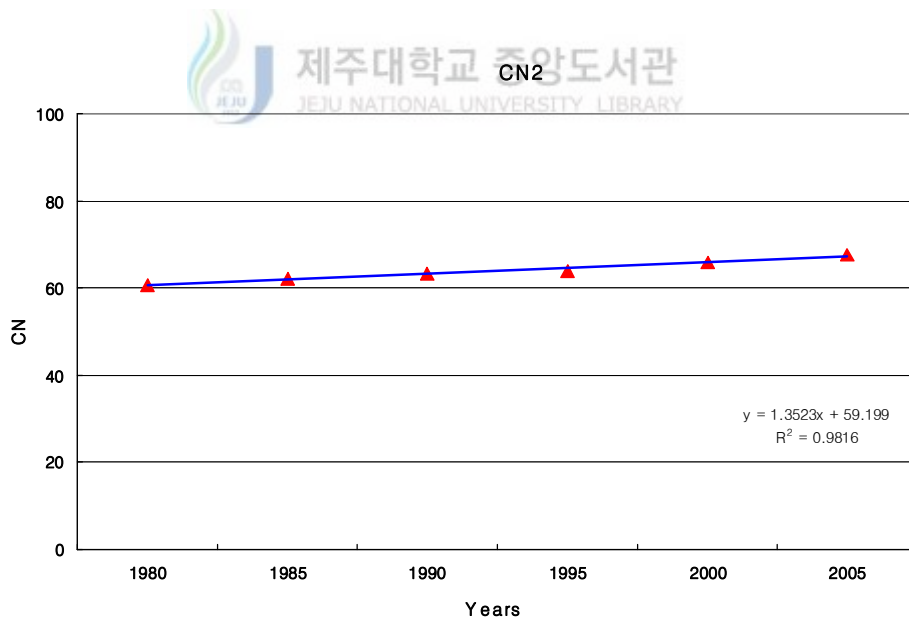


Fig. IV-4. AMC-II CN of Han stream watershed

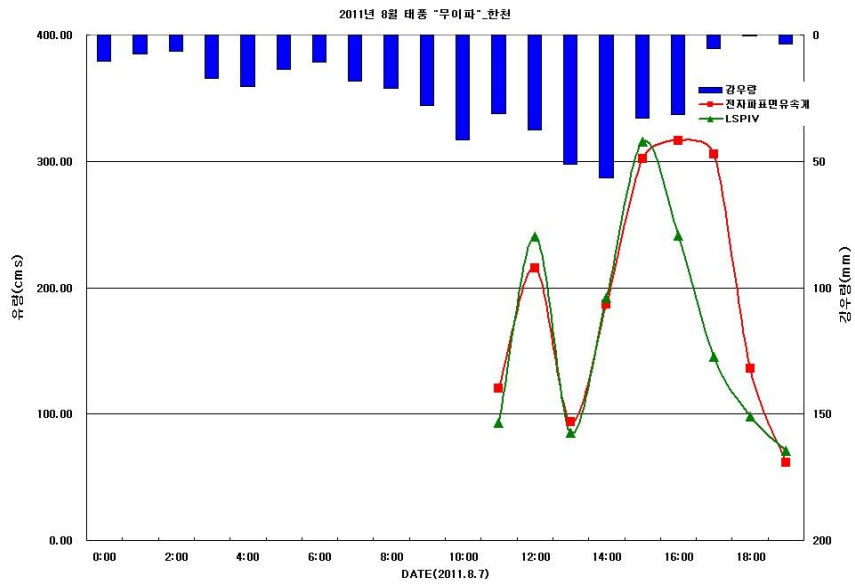
## 2. 토지이용변화에 따른 홍수유출량 변동

### 2.1 매개변수 최적화

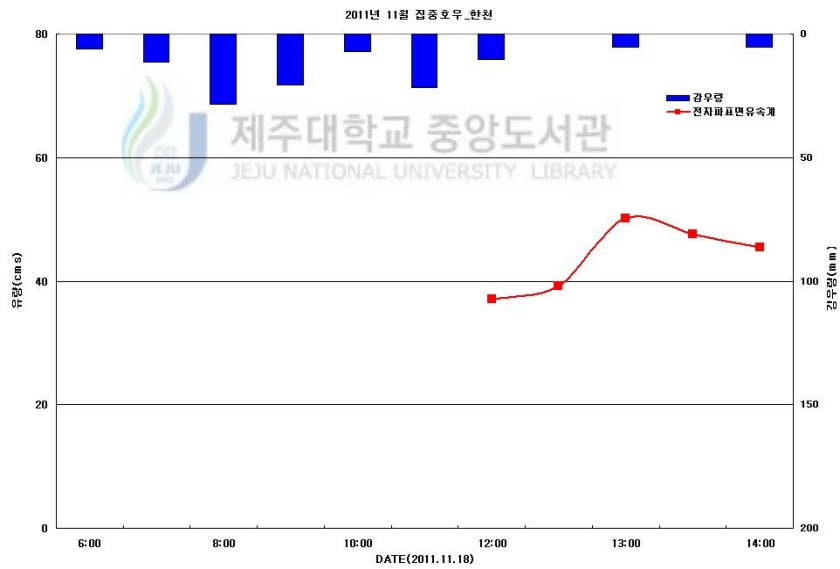
Clark 단위도법의 매개변수인 도달시간과 저류상수는 경험공식을 이용하여 산정한다. 홍수유출량 산정 시 도달시간에 대한 경험 공식은 Kirpich 공식, Rziga 공식, kraven I 공식, kraven II 공식, SCS 공식 등을 주로 사용하고 있으며, 저류시간에 대한 경험 공식은 Clark 공식, Linsley 공식, Russel 공식, Sabol 공식 등을 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 Jung 등(2014)이 제시한 한천 유역의 최적 매개변수 조합으로 유속을 도입한 도달시간 산정방법인 kravenII, 유역형상 및 도달시간을 고려한 저류상수 산정방법 Sabol 방법을 매개변수 경험식으로 채택하였으며, 하도추적은 Muskingum 방법( $K:1.5 \times 0.2$ )을 이용하였다.

한천 유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 2011년 8월 7일 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우, 2012년 4월 21일 집중호우 사상을 적용하였으며, 각 호우사상별 유량관측자료를 이용하여 현재 상태에서의 최적 결과를 도출하였다.

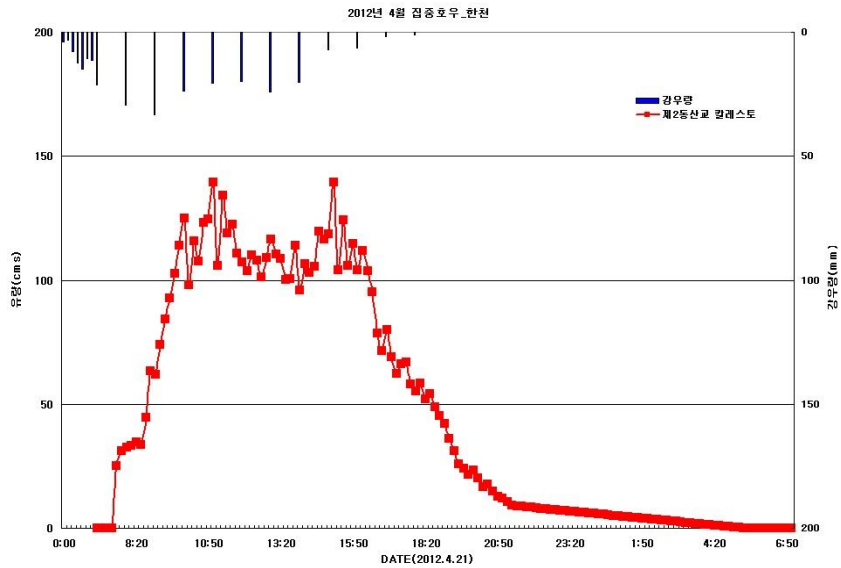
각 호우사상별 유량관측자료는 제주수자원연구단의 유량관측자료(2011년 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우), 제주특별자치도 수자원본부의 유량관측자료(2012년 4월 21일 집중호우)를 이용하였다. 유량관측자료는 Fig. IV-5와 같으며, 각 호우사상별 유속자료를 이용하여 kravenII, Sabol 방법의 매개변수를 산정한 결과는 Table IV-5와 같다.



(a) 태풍 "무이파"



(b) 2011년 11월 집중호우



(c) 2012년 4월 집중호우

Fig. IV-5. Flood discharge hydrograph of Han stream watershed

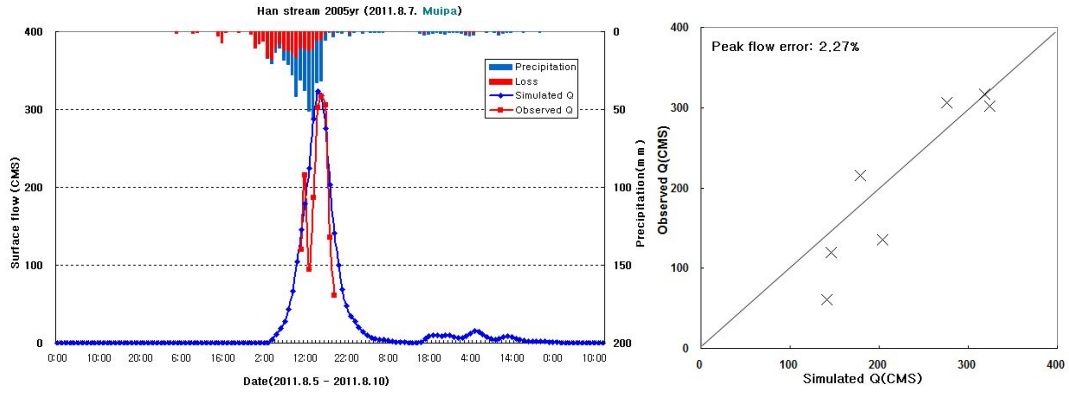
Table IV-5. Calculation of Clark unit hydrograph method parameters

Rainfall events	Han stream			
	Basin area ( $km^2$ )	Reaching time (hr)	Storage constant (hr)	Note
2011.08.01 - 08.10	37.19	1.51	2.44	Typhoon "Muifa"
2011.11.17 - 11.19	37.19	2.10	3.60	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	37.19	1.53	2.48	Heavy rain period

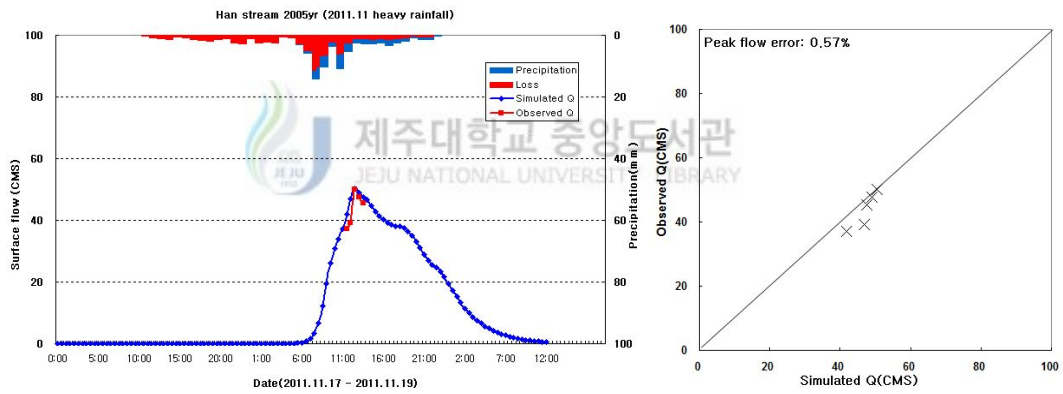
현재 상태에서의 Clark 단위도법을 이용하여 홍수유출량을 산정한 결과와 유량 관측결과를 비교·검토하였으며, 그 결과를 이용하여 과거 토지이용상태에 대한 홍수유출량을 산정하였다.

홍수유출량 산정결과와 각 호우사상에 대한 유량관측결과를 분석한 결과 2011년 태풍 "무이파" 사상에 대한 첨두유량 오차는 2.27%, 2011년 11월 집중호우 사상에 대한 첨두유량 오차는 0.57%, 2012년 4월 집중호우 사상에 대한 첨두유량

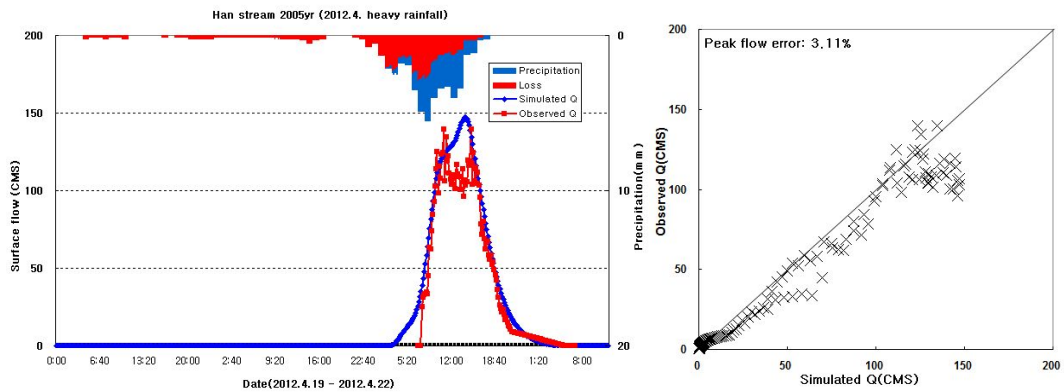
오차는 3.11%로 각각 도출되었다(Fig. IV-6). 2011년 태풍 “무이과” 사상의 관측 자료는 수위 상승 시점에 상류부에 있는 저류지가 개방되어 유출수문곡선의 하강현상에 발생하였다.



(a) 태풍 “무이과”



(b) 2011년 11월 집중호우



(c) 2012년 4월 집중호우

Fig. IV-6. Calculation of discharge to Clark unit hydrograph method

## 2.2 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동 분석

Clark 단위도법을 이용하여 각 호우사상에 따른 홍수유출량을 산정하는데 적용된 도달시간 및 저류상수를 이용하여 1980년부터 2005년까지의 홍수유출량을 산정하였다(Fig. IV-7~Fig. IV-9).

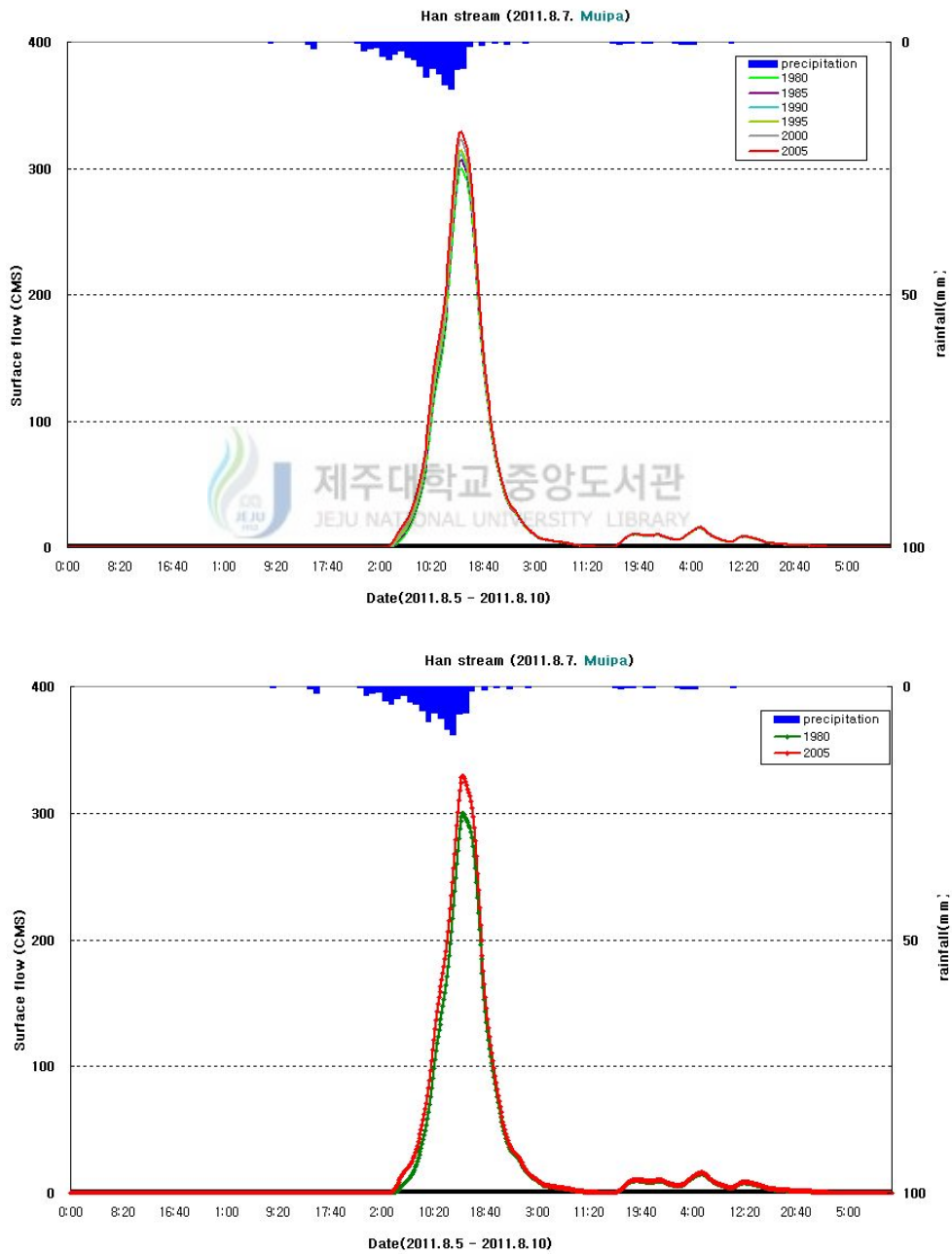


Fig. IV-7. Analysis discharge of Landuse change(Muipa)



2011년 태풍 “무이파” 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 Table IV-6과 같다. 침투유량은 5년 평균  $5.93m^3/s$ (1.91%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균  $236,992m^3$ (2.39%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 침투유량이  $29.67m^3/s$ (9.90%) 증가하였으며, 유출총량은  $1,184,958m^3$ (12.53%), 침투유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다.

Table IV-6. Analysis of soil change outflow by the change in soil cover(Muifa)

구분	Han stream					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Peak discharge ( $m^3/sec$ )	299.72	306.63	310.94	314.31	322.55	329.39
Peak discharge rate of growth(%)	-	2.31	1.41	1.08	2.62	2.12
Total discharge amount ( $m^3$ )	9,454,224	9,724,824	9,895,866	10,031,292	10,360,392	10,639,182
Total discharge amount rate of growth(%)	-	2.86	1.76	1.37	3.28	2.69
Peak discharge reaching time	15:10	15:10	15:10	15:00	15:00	15:00

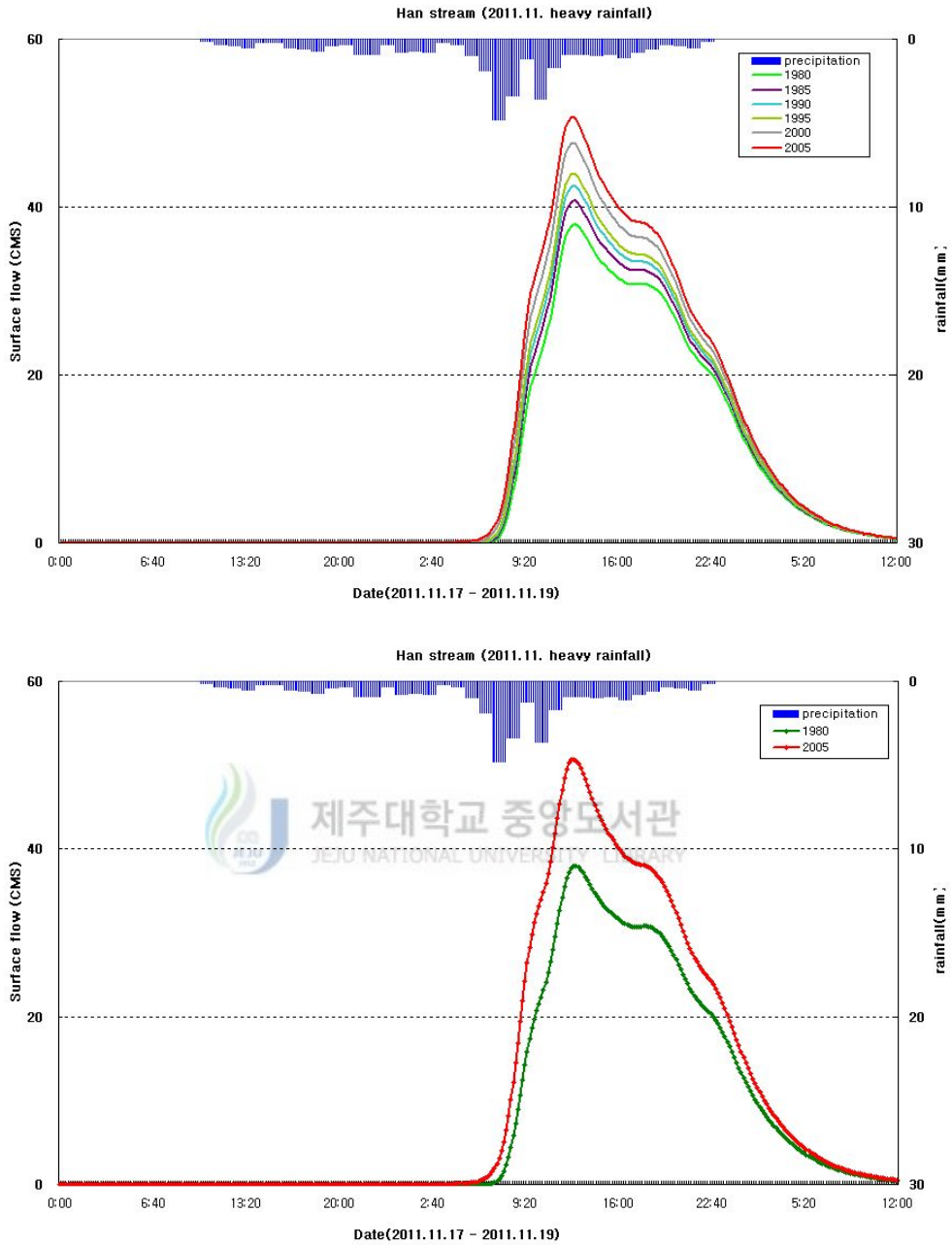


Fig. IV-8. Analysis discharge on Landuse change(Heavy rainfall in November 2011)

2011년 11월 집중호우 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 Table IV-7과 같다. 첨두유량은 5년 평균  $2.56m^3/s$ (5.99%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균  $104,498m^3$ (5.43%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 첨두유량이  $12.78m^3/s$ (33.67%) 증가하였으며, 유출총량

은 522,490(30.21%), 침투유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다.

Table IV-7. Analysis of soil change outflow by the change in soil cover(Heavy rainfall in November 2011)

구분	Han stream					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Peak discharge ( $m^3/sec$ )	37.95	40.76	42.57	44.02	47.62	50.73
Peak discharge rate of growth(%)	-	7.4	4.45	3.41	8.17	6.53
Total discharge amount ( $m^3$ )	1,729,490	1,843,219	1,916,787	1,975,982	2,123,262	2,251,980
Total discharge amount rate of growth(%)	-	6.58	3.99	3.09	7.45	6.06
Peak discharge reaching time	13:00	12:50	12:50	12:50	12:50	12:50

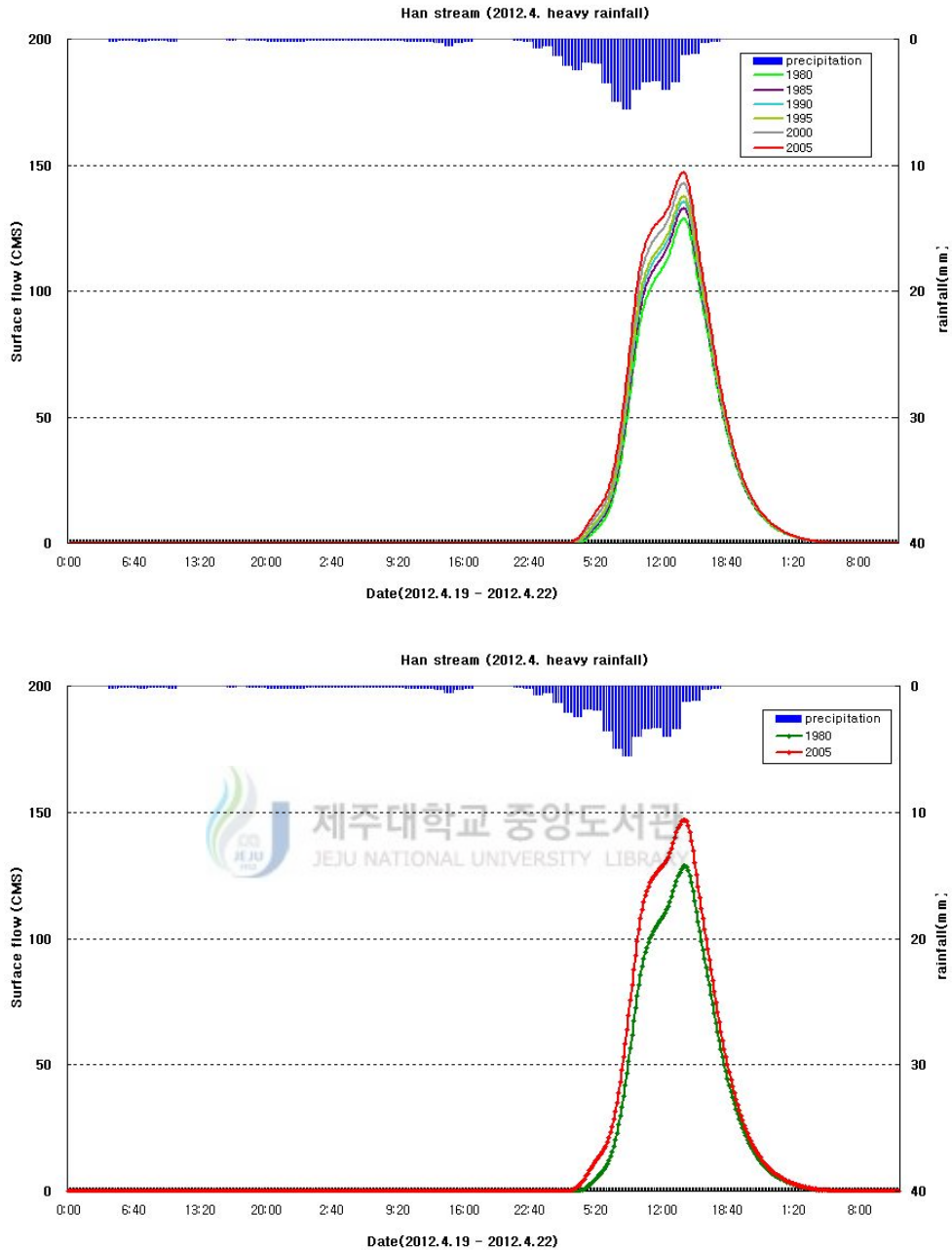


Fig. IV-9. Analysis discharge of Landuse change(Heavy rainfall in April 2012)

2012년 4월 집중호우 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 Table IV-8과 같다. 첨두유량은 5년 평균  $3.65m^3/s$ (2.69%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균  $161,802m^3$ (3.68%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 첨두유량이  $18.26m^3/s$ (14.18%) 증가하였으며, 유출총량은  $809,010$ (19.78%), 첨두유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다.

Table IV-8. Analysis of soil change outflow by the change of soil cover(Heavy rainfall in April 2011)

구분	Han stream					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Peak discharge ( $m^3/sec$ )	128.81	133.03	135.68	137.77	142.83	147.07
Peak discharge rate of growth(%)	-	3.28	1.99	1.54	3.67	2.97
Total discharge amount ( $m^3$ )	4,089,198	4,269,804	4,385,196	4,477,272	4,703,574	4,898,208
Total discharge amount rate of growth(%)	-	4.42	2.7	2.1	5.05	4.14
Peak discharge reaching time	14:20	14:20	14:20	14:10	14:10	14:10

2011년 8월 7일 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우, 2012년 4월 21일 집중호우 사상을 적용하여 한천 유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과 5년단위 침투유량 증가율은 1.91~5.99%, 유출총량 증가율은 2.39~5.43%로 분석되었으며, 1980년 대비 2005년의 침투유량 증가율은 9.9~33.67%, 유출총량 증가율은 12.53~30.21%로 나타났다. 또한 침투유량 도달시간은 각 호우사상마다 10분 감소하는 것으로 분석되었다.

## V. 결론

제주도는 고도성장과 대형 관광단지의 개발에 따른 인구, 토지이용 등의 증가로 인하여 지속적으로 도시화가 증가하고 있는 추세이고, 지구 온난화에 따른 기상변화로 집중호우 및 강우강도는 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있어 제주지역의 도시화 면적 확대가 홍수유출량 변동에 미치는 영향을 검토할 필요성이 증가하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 제주도 도심하천인 한천 유역을 대상으로 1980년부터 2005년까지 5년 주기 토지피복도를 이용하여 유역 내 토지이용 변화를 분석하고 호우사상에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 한천유역의 1980년부터 2005년까지 토지이용변화는 도시화 및 지역 개발 등에 의하여 산림지역의 감소, 시가화 지역 및 농경지역의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 분석기간 동안 시가화면적과 농경지역의 면적은 약 5배 증가하였으며, 산림지역은 약 28% 감소하는 것으로 나타났다.

2) 한천유역의 토지피복자료와 토양통자료를 이용하여 유출계수를 산정하였다. 1980년부터 2005년까지 5년 주기 유출계수를 산정한 결과 평균 2.2% 씩 증가하는 것으로 나타났으며, 1980년 대비 2005년에는 11.6% 증가하는 것으로 분석되었다.

3) 2011년 태풍 “무이파”, 2011년 11월 집중호우, 2012년 4월 집중호우 사상의 홍수유출량 관측자료를 이용하여 매개변수 최적화를 수행한 결과 각 사상의 첨두유량 오차는 0.57~3.11%로 도출되었다.

4) 각 호우사상에 따른 한천 유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과 5년 주기 첨두유량 증가율은 1.91~5.99%, 유출총량 증가율은 2.39~5.43%로 나타났으며, 1980년 대비 2005년의 첨두유량 증가율은 9.9~33.67%, 유출총량 증가율은 12.53~30.21%로 나타났다. 또한 첨두유량 도달시간은 각 호우사상마다 10분 감소하는 것으로 분석되었다.

한천 유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 토지이용상태가 산림지에서 시가화 및 농경지로 변화하는 것은 홍수유출량의 증가로 이어진다는 것을 정량적으로 도출하였으며, 이와 같은 연구결과는 도시계획 수립 및 개발사업 시행 등에 적용 및 활용이 가능할 것이다. 향후 기후변화 및 도시개발에 따른 홍수재해 예방을 위해서는 장기간 기초자료의 확보 및 구축, 제주지역에 적합한 홍수유출량 산정방법의 개발 및 적용 등의 연구가 필요할 것이다.



## 참고문헌

- 고재욱, 양성기, 정우열, 양세창, 2014, 제주도의 고도를 고려한 확률강우량 산정, 한국환경과학회지, 23(4), pp. 595-604.
- 국가수자원관리 종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr>.
- 김순호, 2008, 남강수계 나불천 유역의 토지이용변화에 따른 홍수량의 변동 분석, 경상대학교 대학원 석사학위논문.
- 박기범, 박은영, 박두순, 이효진, 2011, 토지이용변화에 따른 유출특성 변화에 관한 연구, 한국수자원학회 2011년 학술발표회
- 윤용남, 2007, 수문학, 청문각
- 이재수, 2007, 수문학
- 이승현, 배상근, 2004, SCS-CN 방법을 이용한 평창강 유역의 강수 함양량 산정, 한국환경과학회지, 13(12), pp. 39-44.
- 정중호, 윤용남, 2007, 수자원설계실무, 구미서관
- 정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지, 18(9), pp. 1045-1055.
- 진은진, 2001, 도시화에 따른 수문환경의 변화 분석에 관한 연구:SCS 유출모형을 활용한 저류용량산정에 관하여, 서울대학교 대학원 석사학위논문
- 정동국, 이범희, 2003, 도시유출 모형을 이용한 도시화 유역의 유출 해석, 한국수자원학회지, 36(1), pp. 75-85.
- 제주특별자치도, 2013, 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022), pp. 33.
- 정우열, 양성기, 김동수, 2014, 한천유역의 홍수량 산정을 위한 HEC-HMS 모형의 민감도 분석, 한국환경과학회지, 23(4), pp. 533-542.
- 정우열, 2013, 제주도 하천 관측자료 기반 유출특성 매개변수 도출 및 홍수유출량 산정, 제주대학교 대학원 박사학위논문.
- 최정화, 이정주, 권현한, 2009, 조경천 유역의 도시화에 따른 유출 변화 추이 분석, 한국습지학회, 11(3), pp. 161-169.
- 하규철, 박원배, 문덕철, 2009, 제주도 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추



정, 자원환경지질 42(4), pp. 343-356.

- 한국지질자원연구원, 2011, 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴 보고서
- 한웅규, 양성기, 2009, SWAT 모형에 의한 제주도 외도유역의 토지이용변화에 따른 유출량 산정, 한국환경과학회지, 18(9), pp. 1057-1063.
- Abbott, M., J. C. Bathurst, et al., 1986, "An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE"; 1. History and philosophy of a physically based distributed modelling system", Journal of Hydrology Vol. 87, pp. 45-59.
- Bedient, P. B. and W. C. Huber, 2002, Hydrology and Floodplain Analysis. New York, Addison Wesley.
- Colosimo, C. and G. Mendicino, 1996, GIS for Distributed Rainfall-Runoff Modeling. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Dunn, S. M. and Lilly, 2001, "Investigating the Relationship Between Soils Classification and the Spatial Parameters of a Conceptual Catchment-Scale Hydrological Model", Journal of Hydrology 252, pp. 157-173.
- Grayson, R. B., I. D. Moore, et al., 1992, "Physically based Hydrologic Modeling. 2. Is the Concept Relistic?", Water Resources Reserach 26(10), pp. 2659-2666.
- Molnar, D. K. and P. Y. Julien, 2000, "Grid-Size Effects on Surface Runoff Modeling", Journal of Hydrologic Engineering 5(1), pp. 8-16.
- Muzik, I., 1996, Lumped Modeling and GIS in Flood Prediction. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Olivera, F. and Maidment, 1999, "Geographic Information systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing", Water Resources Research 35(4), pp. 1155-1164.

- Vieux, B. E., 2001, Distributed Hydrological Modeling Using GIS, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D. A., 1996, “Search for Physically Based Runoff Model - A Hydrologic El Dorado”, Journal of Hydraulic Engineering 123(3), pp. 122-129.



## 감사의 글

