

碩士學位論文

大型 直接剪斷試驗機를 利用한 송이의  
強度特性에 關한 研究

指導教授 南 正 萬



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

徐 彰 敏

2001

# 大型 直接剪斷試驗機를 利用한 송이의 強度特性에 關한 研究

指導教授 南 正 萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2001年 12月 日

 濟州大學校 産業大學院  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY  
建設環境工學科  
土木工學專攻

徐 彰 敏

徐彰敏의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2001年 12月 日

委員長 印

委 員 印

委 員 印

# 목 차

목 차 .....	i
Table contents .....	iii
Figure contents .....	iv
Abstract .....	vi
I. 서 론 .....	1
II. 제주도의 지질개요 .....	2
II-1. 기반암 .....	4
II-2. 제 I 단계 화산활동의 화산암 .....	4
II-3. 제 II 단계 쇄설성 퇴적층 .....	5
(1) U층(U Formation) .....	5
(2) 서귀포층(Seogupo Formation) .....	5
II-4. 제 III 단계 화산활동의 화산암 .....	6
(1) 중문 조면현무암군 .....	6
(2) 표선리 현무암군 .....	7
(3) 한라산 조면현무암군 .....	7
(4) 백록담 조면암군 .....	8
III. 지질특성 .....	16
III-1. 용암의 분류 .....	16
(1) 파호이호이의 용암류 .....	16
(2) 아아 용암류 .....	17

Ⅲ-2. 특수성 지질의 종류 .....	19
(1) 꽃자왈 .....	19
(2) 용암동굴 .....	29
(3) 숨골 .....	29
(4) 함몰지 .....	30
(5) 용암류 접촉역 .....	30
(6) 클린커층 .....	30
(7) 스킨리아 .....	31
Ⅳ. 제주도내의 송이의 분포 및 물리 화학적 특성 .....	32
Ⅳ-1. 제주도내 송이의 분포 .....	32
Ⅳ-2. 송이의 물리 - 화학적 특성 .....	34
V. 직접전단시험 .....	38
V-1. 대형 직접전단시험기기 설명 .....	38
V-2. 공시체 제작 .....	41
V-3. 단면적보정 .....	42
Ⅵ. 시험결과 고찰 .....	44
Ⅵ-1. 강도특성 .....	44
Ⅵ-2. 종류에 따른 특성 .....	52
Ⅵ-3. 입자의 파쇄 특성 .....	55
Ⅵ-4. 밀도에 따른 강도특성 .....	58
Ⅵ-5. 함수비 변화에 따른 분석 .....	61
Ⅶ. 결    론 .....	66
참고 문헌 .....	68

## Table contents

Table 2.1 Correlation of volcano-stratigraphy of Jeju Islation .....	9
Table 2.2 Volcano-stratigraphy geologic events of Jeju Island(Yoon, 1997). Partly modified .....	11
Table 3.1 Classification of Gotchawal Lava Flow in Jeju Island .....	24
Table 4.1 Chemical composition of Scorias(윤정수, 1995) .....	36
Table 4.2 Physical characteristics of Scorias(윤정수,1995) .....	37
Table 5.1 각 시료에 대한 건조단위중량 및 초기 간극비 .....	41
Table 6.1 깊이에 따른 안전율 .....	50
Table 6.2 Comparison of failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria .....	53
Table 6.3 Comparison of failure Criteria For Black Scoria .....	60

## Figure contents

Fig. 2.1 Index map of Jeju Island .....	3
Fig. 2.2 Section on the Processes of formation of Jeju Island .....	10
Fig. 2.3 Geologic map of Jeju Island .....	12
Fig. 2.4 Map showing deep drilling sites and cross - section lines in Jeju Island .....	13
Fig. 2.5 The cross-section of A-A' line in Fig. 2.4 .....	14
Fig. 2.6 The cross-section of B-B' line in Fig. 2.4 .....	15
Fig. 3.1 Index map of Gotchawal terrains, Jeju Island .....	23
Fig. 3.2 Geologic map of Hangyeong-Andeog Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island .....	25
Fig. 3.3 Geologic map of Aeweol Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island .....	26
Fig. 3.4 Geologic map of Jocheon-Hamdeog Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island .....	27
Fig. 3.5 Geologic map of Gujwa-Sungsan Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island .....	28
Fig. 4.1 Colorific distributions of Scorias in Jeju Island .....	33
Fig. 5.1 Control Panel .....	39
Fig. 5.2 Horizontal Displacement control system .....	39
Fig. 5.3 Vertical loading system. ....	40
Fig. 5.4 Limit bar .....	40
Fig. 5.5 Shear Box .....	42
Fig. 6.1 Behavior of Shear Stress-Strain on Dark grey Scoria .....	45
Fig. 6.2 Comparison of Failure Criteria For Dark grey Scoria .....	46

Fig. 6.3 Fitting of Power to Describe Failure For Dark grey Scoria .....	48
Fig. 6.4 Example .....	49
Fig. 6.5 깊이에 따른 안전율 .....	51
Fig. 6.6 Comparison of Failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria .....	54
Fig. 6.7 Comparison of Failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria .....	54
Fig. 6.8 파쇄도의 영향 (Dry 상태) .....	56
Fig. 6.9 파쇄도의 영향 (Sat 상태) .....	56
Fig. 6.10 Comparison of Failure Strength Dark grey Scoria .....	59
Fig. 6.11 암회색 송이에 대한 건조시와 포화시의 전단변형에 따른 전단응력 .....	62
Fig. 6.12 암회색 송이의 건조시와 포화시의 전단강도 .....	62
Fig. 6.13 적갈색 송이에 대한 건조시와 포화시의 전단변형에 따른 전단응력 .....	63
Fig. 6.14 적갈색 송이의 건조시와 포화시의 전단강도 .....	64
Fig. 6.15 Redish brown Scoria of Compression Test .....	65

A study on the Strength Characteristics of Scoria  
by Large Direct Shear Apparatus

Chang-Min Suh

Supervised by Jung-Man Nam

2001

Department of Construction and Environmental  
Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

**Abstract**



Since Jeju Island has been formed by volcanic activities, soils in the Island are closely related to the activities. "The Song-I" called a local dialect of Scoria in Jeju Island refers to the materials produced by volcanic action, and it consists of cinder cones in parasitic volcanos.

In other to comprehend the characteristics of geology and the formation processes of the "Song-I", the formation processes of Jeju Island, the synopsis of geology and the chemical composition of Scorias were reviewed. The Scorias were classified into four kinds ; Redish-brown, Yellow-brown, Black and Dark-grey. In this study, a series of direct shear tests was performed for the Redish-brown and Dark-grey Scoria to find out a engineering properties of Song-I in Jeju Island. The particle size of Scoria distribute widely from fine-grained soils to gravels over 10cm diameter, and a material with the big

particle size as Song-I need to special equipment. So large direct shear apparatus with shear box  $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$  was made for experimental tests on the Scoria. The failure strength of Scoria was analyzed and compared with failure criterion of Mohr-Coulomb and Power Function.

From results of direct shear tests, the failure strength of loose Dark-grey Scoria was estimated that the cohesion and friction angle were each of  $1.26\text{kg}/\text{cm}^2$  and  $41.46^\circ$  and the failure strength of Redish-brown Scoria showed very lower than Dark-grey. By the sieve analysis after direct shear test, the particles of Redish-brown could observed much more crushable than Dark-grey and it found that the crushing characteristics of particle might have the influence on the shear strength of them. And the failure strength at saturated status in Redish-brown Scoria showed a little higher than dried one but it could not find a significant difference between dried and saturated specimen in Dark-grey Scoria.

# I. 서 론

제주도는 지리적으로 한반도의 최남단에 위치하고 있으며, 우리나라에서 가장 크고, 역사시대까지 화산활동이 일어났던 화산섬이다(동국여지승람 제38권).

섬 중앙의 한라산 백록담을 정점으로 쉼드 화산 체를 이루고 있는 제주도는 동서 장축 길이가 약 74km, 남북 단축 길이가 약 34km이며, 섬 전체 면적은 1,825km<sup>2</sup>인 타원형 모양을 하고 있다. 제주도의 중앙부에는 수 차례의 화산활동에 의해 형성된 약 1,950m 높이의 한라산 정상에는 지름이 약 575 × 400m, 깊이가 100m에 이르는 분화구가 있으며, 돛상의 조면 암이 분화구 주변에 관입 되어 있다. 또한 제주도 전역에는 소위 오름이라 불리 우는 360여 개의 분석구가 분포하고 있으며, 한반도의 다른 지역에서는 찾아 볼 수 없는 특색 있는 경관을 이루고 있는데, 이와 같은 화산활동에 의해 만들어진 제주도의 지질학적 특성은 육지의 화강토와 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있고 건설공사를 수행하기 위한 지반조사나 구조물 축조를 위한 하부 기초공사 시 많은 어려움을 겪게 하고 있다.

현재 제주도는 2002년 월드컵과 국제 자유도시 개발 등을 위해 공항, 항만, 도로 등에서 많은 건설공사가 수행되거나 수행될 예정으로 있으며 이들 공사는 과거보다는 대형화되는 경향이 있다. 그러나, 공사 현장에서는 제주도의 특수한 지질학적 특성에 의하여 공사 수행에 있어서 많은 시행 착오를 겪고 있으며, 이들 지반 특성에 대한 규정의 정리가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 제주도의 지질을 이해하기 위하여 제주도의 지질특성과 건설공사 시 많은 어려움을 주며 제주도에 널리 분포하고 있는 송이 층의 분포, 물리 - 화학적 특성 등에 대한 조사를 실시하고, 송이에 대한 역학적 특성을 고찰하여 직접전단시험을 실시 하고자 한다. 여기에 사용된 대형 직접전단시험기는 송이의 입자가 일반 흙 보다 큰 관계로 전단상자의 크기가 20×20×20cm의 대형 직접전단시험기를 사용하였으며, 이 시험기를 이용하여 송이의 강도특성, 종류에 따른 특성, 입자의 파쇄특성, 밀도에 따른 강도특성, 함수비 변화에 따른 분석 등에 대해 고찰하고자 한다.

## II. 제주도의 지질개요

제주도는 한반도와 일본 열도사이에 있는 대한해협 - 쓰시마해협 의 남서쪽에 위치하고 있다(Fig. 2.1). 제주도는 주로 제3기말 플라이오세로부터 제4기 플라이스토세에 걸쳐 일어난 화산활동에 의하여 분출된 알칼리 현무암인 현무암질 용암류로 구성되어 있으며, 소량의 화산성 쇄설암(volcaniclastic rock)으로 분포되어 있다(윤선 외 2인, 1995). 제주도의 지형지질 및 토성에 관한 제주도의 화산층서에 관해서는 일본 국무성(1906), 黃山又二郎(1923), 原口九萬(1928~1931)의해 제주도의 지질에 관한 비교적 구체적인 지질조사 보고서가 완성되었다. 한국학자와 기술자에 의한 본격적인 학술연구가 시작된 것은 1950년대 이후인 것 같으며, 이때부터 제주도의 형성과정과 지형 및 층서학적 연구는 김상호(1963), 손치무(1968), 김봉균(1969, 1972), 원종관(1975), 이문원(1982, 1994), 윤선 외 2인(1995) 및 Yoon(1997)등에 의해 제시되었다(Table 2.1, Fig. 2.2).

Yoon은 제주도의 형성과정을 제4단계로 구분하였는데, 제 I 단계를 전기 화산활동 시기, 제 II 단계를 화산활동 휴식기, 제 III 단계와 제 IV 단계를 후기 화산활동 시기라고 하였다. 여기서는 Yoon(1997)이 제시한 화산층서를 일부 수정하여 송시대(2000)의 화산층서를 간략히 기술했다(Table 2.2, Fig. 2.3 ~ 2.6).

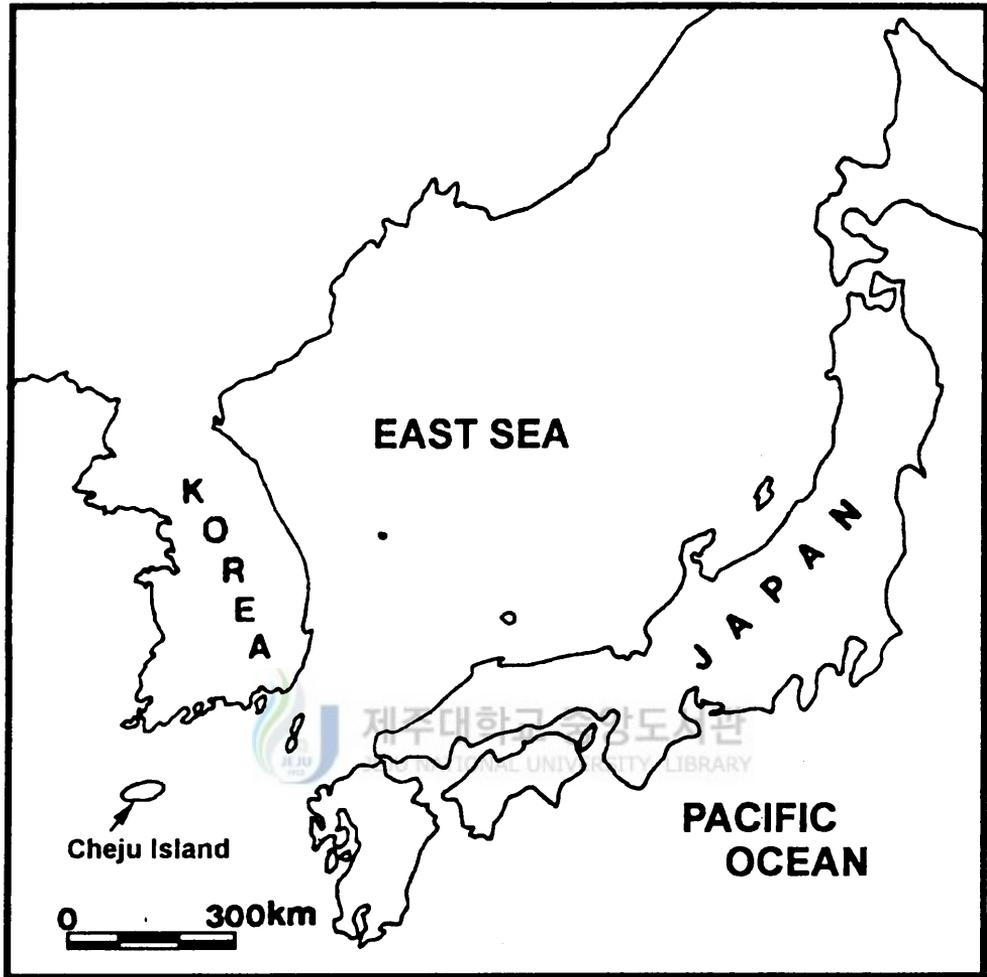


Fig. 2.1 Index map of Jeju Island

## II-1. 기반암

제주도의 기반암은 화산 쇄설암류와 화강암으로 구성되어 있으며, 화산 쇄설암류는 화산성 사암 및 이암, 석영조면암질 용결응회암과 화산력 응회암 등으로 이루어져 있다. 화산 쇄설암류의 방사성 동위원소 연령이 측정되지 않아 그 시대는 알 수 없으나, 암질만으로 볼 때는 백악기의 유천층군 혹은 에소세의 왕산 층에 대비되는 것으로 추정되며, 화강암의 연령은 581.4Ma(안건상 외 2인, 1995), 팔레오세 말기에 해당되며 화산 쇄설암류를 관입 한 것으로 추정된다.

기반암은 최대 해수면 하 312m, 최소 155m부터 분포하고 있다(고기원, 1991a). 지역별로 보면, 동부 지역은 해수면 하 221.9 ~ 312m, 평균 250m부터 시작되고 있으며, 남부지역은 기반암의 분포심도가 해수면 하 210 ~ 295m, 평균 259m로서 동부 지역과 비슷한 심도에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한 북부 지역의 경우는 2개소에 대한 자료밖에 없으나 해수면 하 155 ~ 206m부터 기반암이 포착되고 있어 동부와 남부 지역보다는 기반암이 얕은 심도에 위치하고 있다. 이와 같은 결과는 Kwon et al.(1995)이 실시한 중력 및 자력탐사 결과보다 훨씬 얕은 심도에 기반암이 분포하고 있음을 가르쳐 주고 있다.

## II-2. 제 I 단계 화산활동의 화산암

제주도에 분포하는 화산암류 중 현재까지 가장 오래된 화산암으로 알려진 현무암은 판포 현무암(Panpo Basalt, 윤선 외 2인, 1995), 돈내코 현무암(Donnaeco Basalt, 윤선 외 2인, 1995), 상호 조면암(Sanghyo Trachyte, 윤선 외 2인, 1995)과 같은 용암과 관입암으로 구성되어 있다(윤선 외 2인, 1995; Yoon, 1997).

이들 화산암들은 후기의 화산암에 의해 피복 되어 있어, 돈내코 현무암은 단지한 곳에서만 관찰되었고, 상호 조면암은 네 곳에서, 그리고 판포 현무암은 시추 코

아 에서만 관찰되어 진다. 이러한 전기 화산 활동의 화산암은 고제주 화산 체를 형성하였다. 판포 현무암의 K-Ar 연령은  $2.22 \pm 0.16\text{Ma}$ . 전기 화산활동시기에 관입한 것으로 추정된다.

### II-3. 제 II 단계 쇄설성 퇴적층

제 II 단계의 퇴적층은 제 I 단계 화산활동의 화산암을 부정 합으로 덮고 있으며, 하위의 U층(U Formation)과 상위의 서귀포 층(Seoguipo Formation)으로 구분된다.

#### (1) U층(U Formation)

U층(고기원, 1997; 미교결층, 윤선 외 2인, 1995; Uncemented Sediment Formation, Yoon, 1997)은 제주도 서귀포 층의 하부에 전반적으로 분포하고 있으며 지표에서는 확인할 수 없고, 단지 시추 코아에 의해서만 확인할 수 있다. 이 층은 석영과 장석을 포함한 세립질 사암과 실트질 사암으로 구성되어 있으며 교결 되어 있지 않다. 이 층에서는 아직 화석이 발견되지 않았다. U층은 제주도의 기반암을 직접 피복하고 있으며, 분포 심도가 해수면 하 15 - 205m이고, 층의 두께는 평균 150m 정도이다.

#### (2) 서귀포층(Seoguipo Formation)

서귀포층(原口九萬, 1931)은 지상에는 서귀포시 천지연폭포 남측 해안 절벽을 따라 높이 약 30m, 연장 1km 규모로 분포하고 있으나 지하에는 북촌-표선 선의 서쪽 지역의 해발표고 400m 이하의 지역에 광범위하게 수평적인 연속성을 갖고 분포하고 있음이 확인되고 있으며, 그 두께는 평균 100m 정도이다. 서귀포 층은 역질사암, 사암, 사질이암, 이암 및 유리질쇄설암(hyaloclastite)으로 이루어져 있고, 패류화석을

비롯하여 성계, 유공층, 완족류, 개형층 석회질 초미화석등의 화석이 다량 포함되어 있으며, 제주도의 화산층서에 있어 매우 중요한 지층이다(고기원, 1997). 제주도 남동부 남원읍 위미리에서 시추 코아로 채취된 서귀포 층의 역암에는 상호 조면암에서 유래된 역들이 다량으로 함유되어 있어 서귀포 층의 상호 조면암을 부정합으로 피복하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 서귀포 층은 제주도의 전기 화산활동과 후기 화산활동을 구분하는 중요한 지층이다. 서귀포 층은 초미화석대(1.88-0.46Ma)에 속하며 플라이오세 최후기에서 플라이스토세 중기에 걸치는 지층이다(이성숙 외 3인, 1995; Yi et al., 1998).

## II-4. 제III단계 화산활동의 화산암

제III단계의 화산암은 전기의 중문 조면현무암군(Jungmun Trachybasalt Group), 표선리 현무암군(Pyoseonlli Basalt Group), 후기의 한라산 조면현무암군(Hallasan Trachybasalt Group) 및 백록담 조면암군(Baegnogdam Trachyte Group)으로 되어 있다.

### (1) 중문 조면현무암군

중문 조면현무암군(윤선 외 2인, 1995)은 각수암 조면암(Gagsuam Trachyte, 角秀岩熔岩, 原田, 1931), 산방산 조면암(Sanbangsan Trachyte, 山房山熔岩, 原田, 1931; Sanbangsan Trachyte, Lee, 1982), 중문 조면현무암(Jungmun Trachybasalt, 윤선 외 2인, 1995; 중문 조면암, 원종관, 1976; Chungmun Hawaiiite, Lee, 1982) 및 서귀포 조면현무암(Seoguipo Trachybasalt, 윤선 외 2인, 1995; 西歸浦熔岩, 原田, 1931; 서귀포 조면암, 원종관, 1976; Seoguipo Haeaiite, Lee, 1982) 등으로 분류된다.

중문 조면현무암군은 제주도 남측의 서귀포에서 산방산에 이르는 해안과 북측의 귀일리에서 금덕리에 이르는 지대에 넓게 점점이 소규모로 분포한다. 중문 조면현

무암군을 구성하는 화산암은 치밀 견고하고 반정의 양이 적으며, 기공의 발달이 빈약한 것이 특징이다.

## (2) 표선리 현무암군

표선리 현무암 군은 표선리 현무암(Pyoseonlli Basalt, 서해길 외 2인, 1964; FOB, 이돈영 외 25인, 1970)과 시흥리 조면현무암(Siheungri Trachybasalt, 윤선 외 2인, 1995; 시흥리 현무암, 원종관, 1976; Shieungri Hawaiiite, Lee, 1982)으로 구분되며, 제주도의 동부와 서부의 해발고도 400m 내지 500m되는 중산간 지대에서 해안에 이르는 지대에 대칭적으로 분포하고 있다. 표선리 현무암군의 화산암은 파호이호이(Pahoehoe) 유형에 속하며 표면이 매끄럽고 새끼줄 구조(ropy structure)가 잘 발달되어 있고, 표선리 현무암은 다공 질이며 바늘 끝과 같은 직경 1 ~ 2mm의 침상의 장식 반정과 같은 반정이 뿌려져 있는 것 같이 들어있는 것이 특징이다. 시흥리 조면 현무암은 기공의 발달이 미약하며 치밀한 암석으로서 직경 1mm 정도의 휘석과 감람석의 반정을 갖고 있는 점이 표선리 현무암과 다른 점이다.

## (3) 한라산 조면현무암군

한라산 조면현무암군(Hallasan Trachybasalt Group, 윤선 외 2인, 1995)은 제주 조면 현무암(Cheju Trachybasalt, 윤선 외 2인, 1995; 제주 현무암, 원종관, 1976; Hallasan Trachyte, Lee, 1982), 성판악 조면현무암(Soengpanag Trachybasalt)과 한라산 조면현무암(Hallasan Trachybasalt, 윤선 외 2인, 1995; 한라산 현무암, 원종관, 1976; Hallasan Hawaiiite, Lee, 1982)으로 분류된다. 한라산 조면현무암군의 화산암은 아아(aa) 용암에 속하며 제주도의 중심부 해안에서 한라산 정상에 이르기까지 분포하고 있다. 한라산 조면현무암군은 다공질 조직이 잘 발달되어 있으며, 장식과 휘석의 반정을 다량으로 갖고 있는 것이 대부분이며, 용암의 상·하부가 각력화되어 거칠다.

#### (4) 백록담 조면암군

백록담 조면암군(Baegnogdam Trachyte Group, 윤선 외 2인, 1995)은 한라산의 정상부 주위에 분포하고 있으며 백록담 조면암(Baegnogdam Trachyte, 윤선 외 2인, 1995)과 영실 조면암(Yeongsil trachyte, 윤선 외 2인, 1995)으로 구성되어 있다. 암석은 담회색 내지 회색을 띠며 기공이 거의 없고 장석의 반정을 갖고 있을 뿐만 아니라, 풍화가 되면 황갈색 내지 담백색을 띤다. 영실의 원형 계곡의 내측에 주상절리가 발달되어 있는 절벽에는 절벽을 덮고 있는 한라산 조면현무암의 암편들의 영실 조면암 중에 다량으로 포획되어 있는 것을 볼 수 있는바, 이는 영실 조면암 한라산 조면현무암 분출후에 원정구를 이루며 솟아 올라온 것을 의미한다. 영실의 원형계곡은 영실 조면암의 원정구 형성 후기의 폭발에 의하여 형성된 분화구이다. 백록담 조면암 한라산 체를 형성한 최후의 용암분출이다. 백록담 동측벽은 한라산 현무암군에 속하는 용암이 벽의 상부를 덮고 있고, 그 아래에는 화산성 역질사암, 사암 및 이질사암으로 된 퇴적층이 놓여 있다. 백록담의 서측벽은 백록담 조면암으로 이루어져 있다. 이러한 사실은 백록담 조면암 용암과 화산성 퇴적층으로 구성되어 있는 한라산 조면현무암군을 밀고 솟아 올라와 원정구를 이루며 분출한 것임을 의미한다.

이러한 해석은 Tamanyu(1990)에 의하여 방사성 동위원소 연령 측정결과에 의하여 서도 뒷받침된다. Tamanyu(1990)에 의하면, 동측벽의 한라산 조면현무암군의 연령은  $0.47 \pm 0.07\text{Ma}$ 이고, 서측벽의 백록담 조면암 연령은  $0.07 \pm 0.01\text{Ma}$ 이다. 백록담 분화구는 백록담 조면암 원정구 형성 후기의 폭발에 의한 것이며 이때 분출된 부석들이 한라산 정상 부에서 볼 수 있다.

Table 2.1 Correlation of volcano-stratigraphy of Jeju Islation

Age	Hanaguchi, K.(1931)	Won, C.K.(1975)	Lee, M.W.(1982)	Tamanyu, S.(1990)	Yoon, S. et al.(1995)
Ibo.	Flood Deposits	Shell-sand Formation	1007,1002 acivities	1002, 1007 activities	Sinyangri Formation(4780 ± 60y.B.P.)
	Shell-Sand Bed	Parasitic volcanic spores	Small basalt cones	Shellsand Formation	
P l e i s l o c e n e	Wacke Bed			Scoria vol. cones	
	Gunzan Basalt				
	Suibido Basalt	Baejeongdam Basalt	Sinyangri Formation	Packnokizam Hawaiiite(0.47 ± 0.07Ma)	
	Kannasan Basalt	Hallasan Trachy-andesite	Hallasan Trachyte	Hallasan Trachyte(0.07 ± 0.01Ma)	Baejeongdam Trachyte
	Ahanatic Basalt	Hallasan Basalt			Yeongsil Trachyte Group
	Aeglic Basalt	Seonjeonak Basalt	Hallasan hawaiiite		
	Feldspar Basalt	Sihungrri Basalt	Seonjeonak hawaiiite		
	Saishu Basalt	Beobjeonri Trachyte	Sihungrri hawaiiite		Hallasan Trachybasalt
	Alkali-Basalt	Hahyonri Basalt	Boobjeonri mugearite		Seonjeonak Trachybasalt
	Trachy-andesite	Jeju Basalt	Hahyonri hawaiiite		Cheju Trachybasalt
E r i y	Hornblende-bearing Trachy-andesite		Hornblende mugearite	Pyoseonri Alkali basalt(0.31 ± 0.04Ma)	
	Gyojeongak Lava			Hallasan Hawaiiite(0.52 ± 0.03Ma)	
	Kahushuzan Lava			Sogwip'o Hawaiiite(0.52 ± 0.04Ma)	
	Sanboasan Lava	Sinyangri Formation	Sanbangsan Trachyte		Pyoseonli Basalt
					Group
		Jeungmun Seonjeonpo Fm. Trachyte	Jeungmun hawaiiite		Sihungrri Trachybasalt
		Seogwipo Trachyte	Seonjeonpo Formation		Pyoseonli Basalt(0.63 ± 0.03Ma)
		Pyoseonri Basalt	Seogwipo hawaiiite		Seogwipo Trachybasalt
			Pyoseonri alkali basalt		Jeungmun Trachybasalt
					Group
Pliocene	Shindo Lava	Seogwipo Formation	Seogwipo Formation		Seogwipo Formation
	Johaneak Lava				Uncemented Sediment Formation
	Gyojeongak Lava				Geumdeog Formation
	Kannasan Lava	Basalt basalt	Basalt basalt		Tamna Conglomerate
	Granite Block-bearing Volcani Debris Bed				Sanahyo Trachyte
Cret(?)-Paleogene	Granite?		Granite?		Donnaekko Basalt
					Panjo Basalt(2.22 ± 0.16Ma)
					Granite(58.14 ± 1.4Ma)
					Volcanic sandstones and mudstones
					Wedded tuffs
					Lapilli tuffs

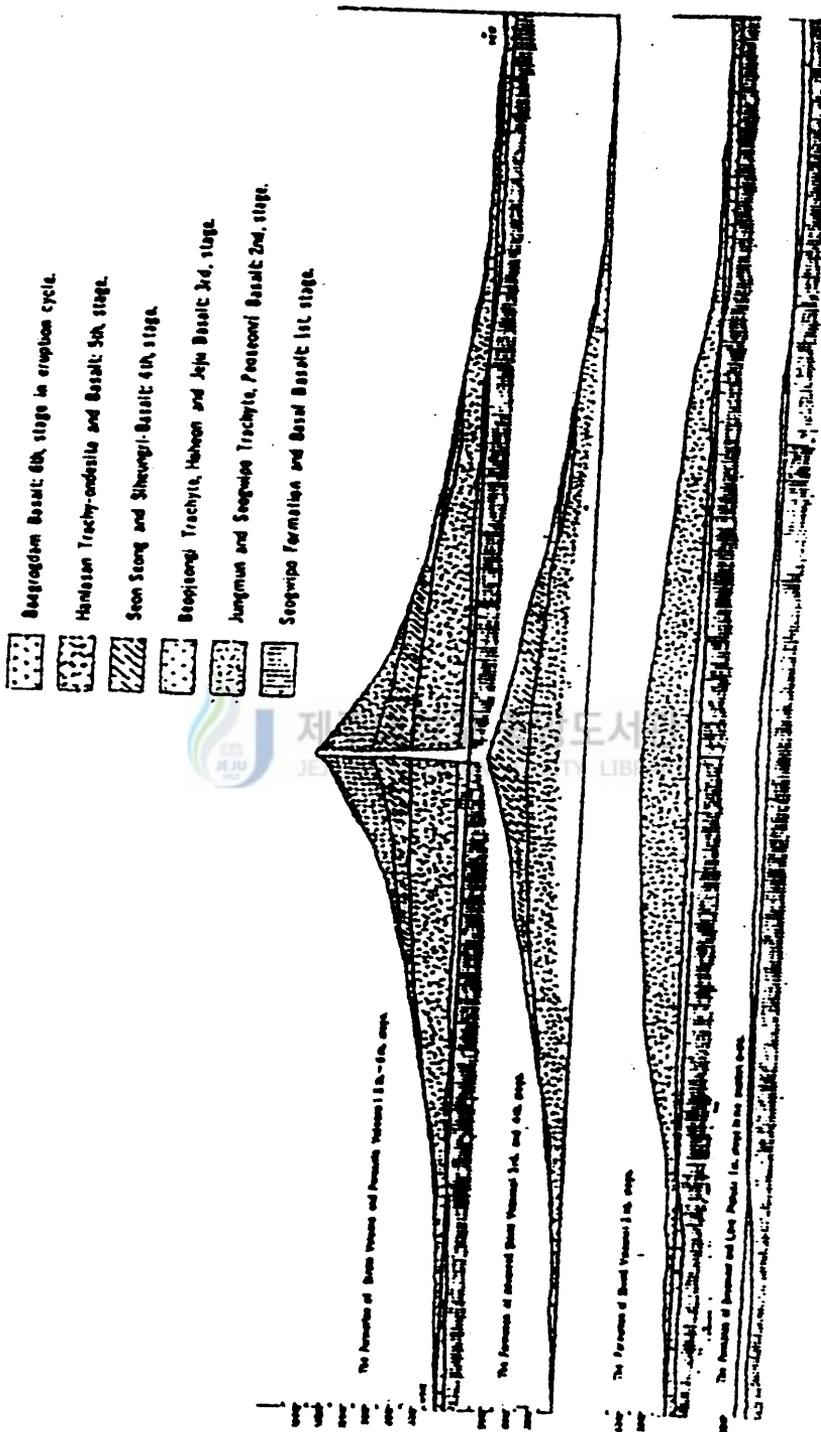


Fig. 2.2 Section on the Processes of formation of Jeju island.

Table 2.2 Volcano-stratigraphy geologic events of Jeju Island (Yoon, 1997). Partly modified.

Age	Stage	Volcano-stratigraphy	Event
	IV	Baegnogdam Trachyte Group 0.07Ma	marine transgression, formation of tuff-cones (Suweol-bong etc.), formation of summit of Halla-san
		Hallasan Trachybasalt 0.47~0.52Ma Seongpanag Trachybasalt Group Cheju Trachybasalt	formation of cinder-cones
Pliocene	III	Pyoseolli Siheungni Trachybasalt Basalt Group 0.63Ma	formation of cinder-cones
		Jungmun Seoguipo Trachybasalt Trachybasalt Group 0.55Ma	formation of cinder-cones
Pleistocene	II	Sanbansan Trachyte 0.74Ma Gaksuam Trachyte 0.89Ma	formation of cinder-cones
		Seoguipo Formation Uncemented Sediments	formation of cinder-cones (Dangsan-bong etc.)
Cret(?) - Paleog.	I	Sanghyo Trachyte Donnaeko Basalt Panpo Basalt 2.22Ma	
		granite 58.14Ma volcanic sandstones and mudstones welded tuffs lapilli tuffs	

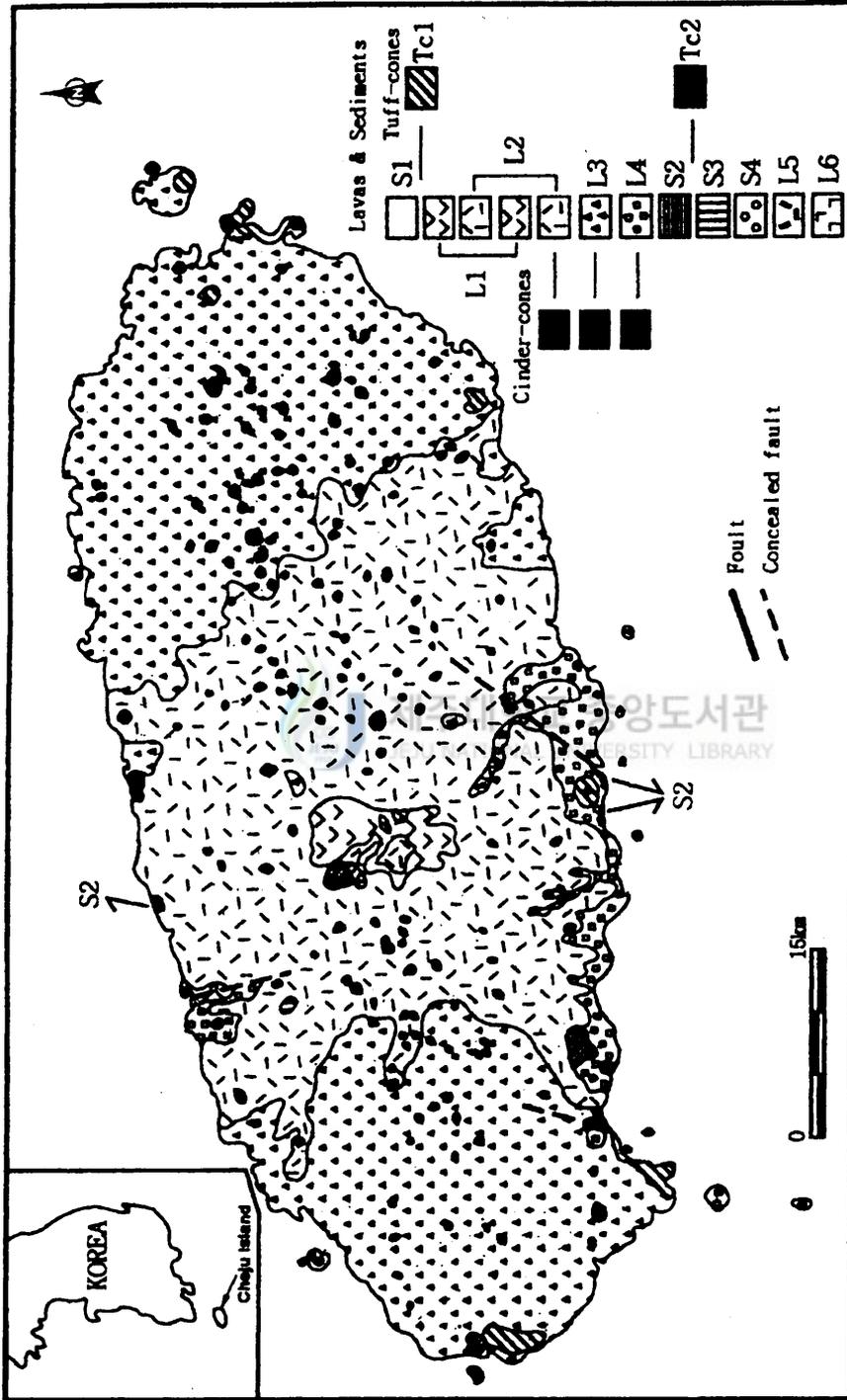


Fig. 2.3 Geologic map of Cheju Island. L1=Baegmopdam Trachyte Group; L2=Hallasan Trachybasalt Group; L3=Pyoseo111 Basalt Group; L4=Jungmun Trachybasalt Group; L5=Sanghyofrachyte; L6=Donnaeko Basalt; S1=Sinyangni Formation; S2=Seoguipo Formation; S3=Geumdeog Formation; S4=Tamna Conglomerate; Tc1=tuff cones(Suweol bong etc.); Tc2=tuff cones(Dangsan bong etc.)(Yoon, S., 1997).

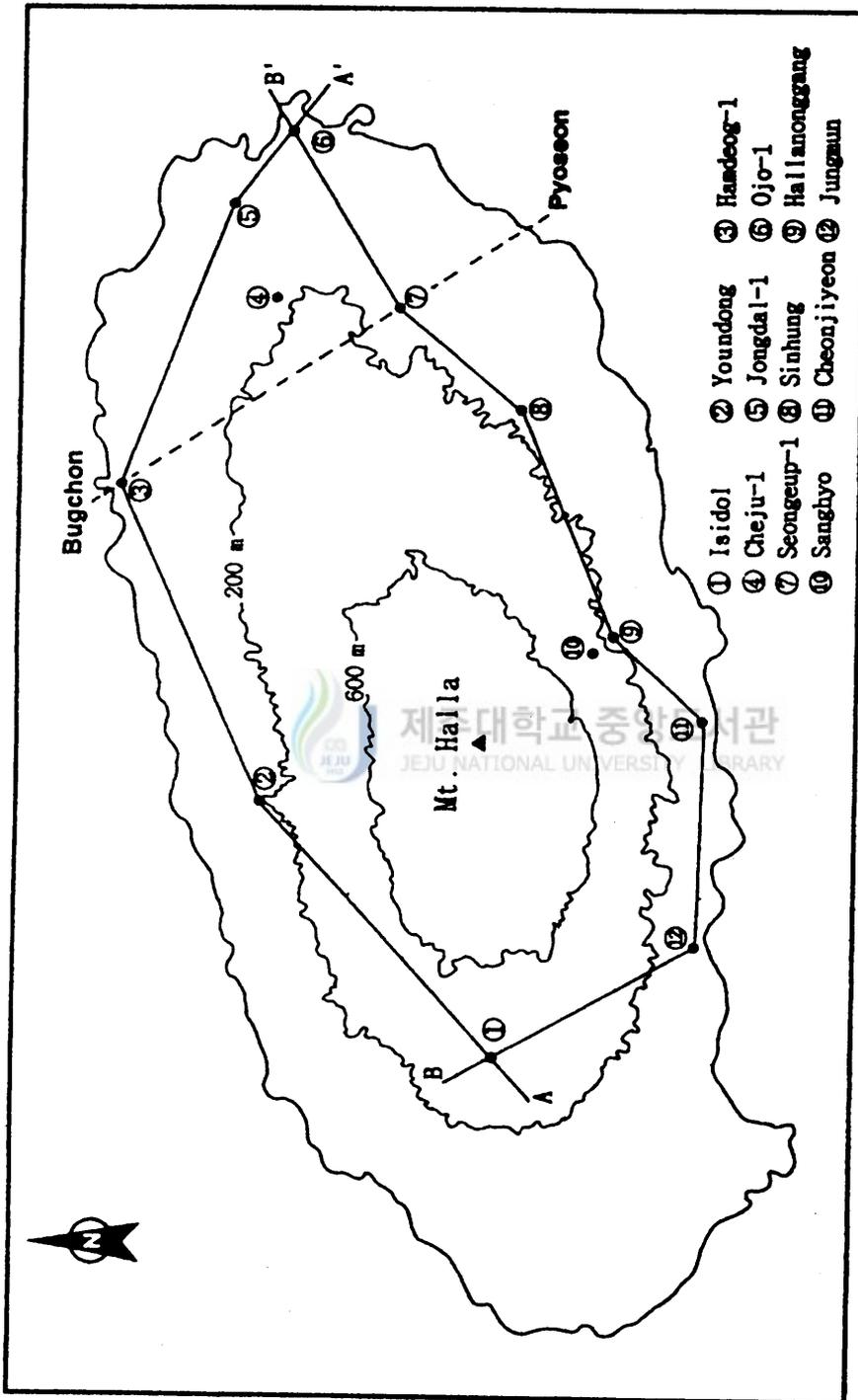


Fig. 2.4 Map showing deep drilling sites and cross-section lines in Jeju Island.

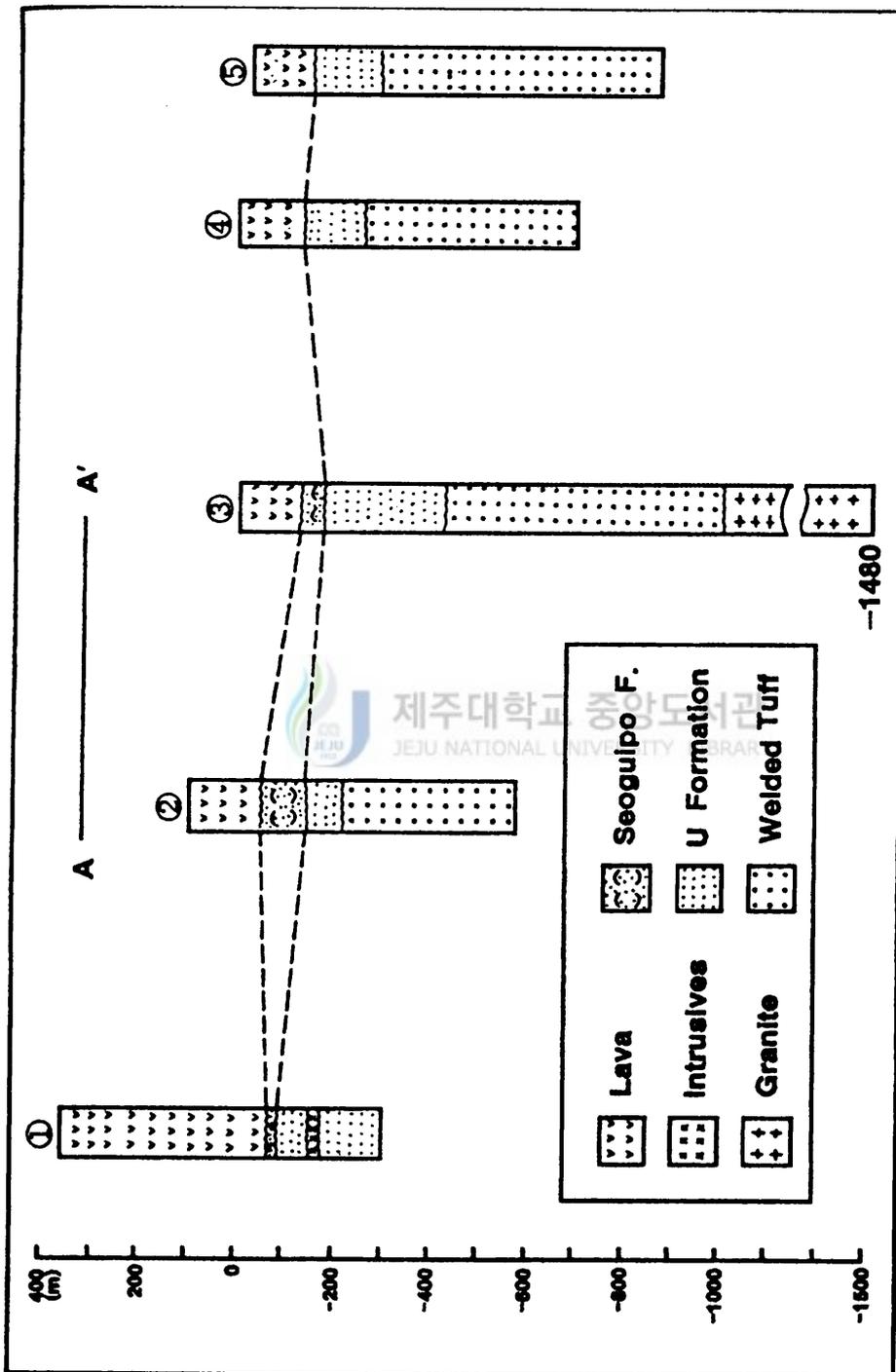


Fig. 2.5 The cross-section of A-A' line in Fig. 2.4

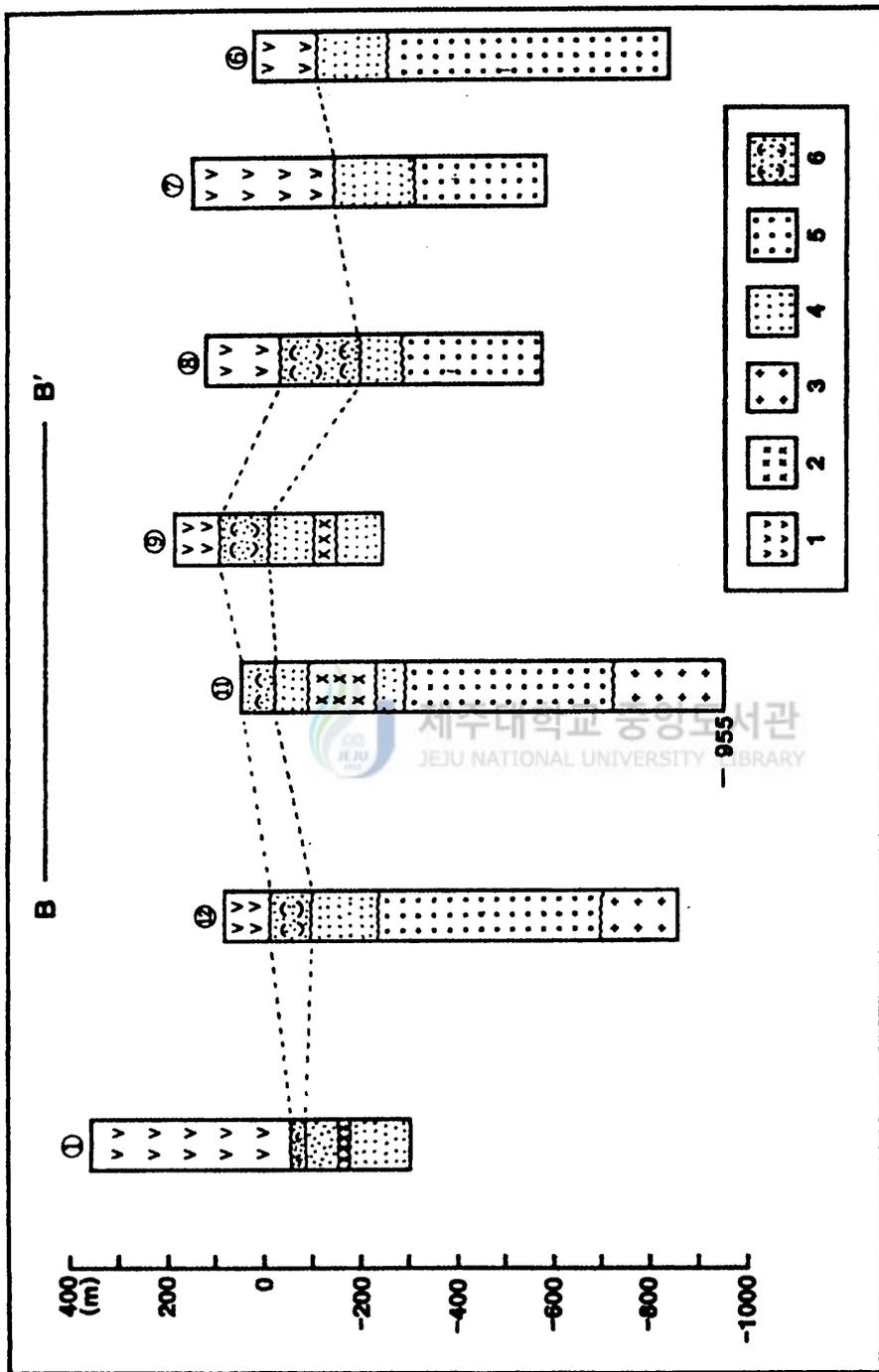


Fig.2.6 The cross-section of B-B' line in Fig.2.4  
 (1:Lava, 2:Intrusive, 3:Granite, 4:U-Formation, 5:Welded, 6:Seogwipo Formation)

### Ⅲ. 지질특성

#### Ⅲ-1. 용암의 분류

제주도는 알칼리 현무암에서부터 조면암류에 이르는 비교적 다양한 화산암류가 산출되는 지역으로서 제주도의 현무암질 용암류는 그 형질에 있어서 파호이호이(Pah' -ho-eh-ho-eh; Pahoehoe)와 아아(Ah Ah; Aa)로 구분할 수 있으며, 이들의 특징을 설명하면 다음과 같다.

##### (1) 파호이호이의 용암류

파호이호이라는 말은 하와이 원주민의 방언으로서 “매우 잔인한”이란 뜻을 지니고 있으나 Dutton이 1884년 처음으로 사용한 이후 지질학 및 화산학의 학술용어로 쓰이고 있다. 파호이호이의 용암류는 점성이 작아 유동성이 크며, 용암류의 표면이 편평하고 매끄러우며, 새끼줄 구조(ropy structure)등이 발달하는 것이 특징이다(Macdonald, 1953, P160 ; Scarth, 1994). 이 용암류는 표면의 두께가 단위 두께에 따라 S-type과 P-type으로 나눌 수 있는데 S-type은 표면이 소용돌이치는 형태 또는 새끼줄 구조가 발달하는 반면, P-type은 표면이 매우 매끄럽고 두께가 얇은 것이 특징이다(Wilmuth & Walker, 1993). 또한, 이 용암류에는 용암토우(lava toes)라 불리는 수많은 작은 유동 단위들이 발달하는데, 용암토우는 대개 두께가 30cm 이하이고 길이가 1 ~ 2m 정도이며, 폭은 30 ~ 50cm 정도이다. 특히, 이 용암류는 점성이 낮기 때문에 50km 이상까지 유동할 뿐만 아니라 크고 작은 용암관과 용암터널의 발달을 수반한다.

제주도에 있어서 파호이호이 용암류는 지형경사가 완만한 동·서부 지역의 해발 300m 이하 지역에 주로 분포하고 있는데 용암류 단위의 평균 두께는 2 ~ 3m 정도이고, 만장굴·협제굴 등의 크고 작은 용암 터널들이 발달한다. 제주도 동부 지역

의 시추 코아 에서는 용암류 단위가 대체로 1 ~ 3m 두께이고, 10 ~ 20매의 유동 단위를 관찰할 수 있다. 하부에는 클린커층이 아주 얇거나 없으며 용암류의 상·하부가 산화된 상태로 산출되는 경우도 있다. 제주도에 분포하는 파호이호이 용암류는 대부분 열극 분출과 분석구를 형성시킨 화산활동으로부터 비롯된 것으로 해석되고 있는데 (이돈영 외 25인, 1970), 항공사진 분석에 의하면 분석구에서 분출한 용암들은 대부분 수 km 미만의 짧은 거리를 유동한 것으로 나타나고 있다.

## (2) 아아 용암류

아아(Aa)라는 용어도 역시 하와이 원주민 방언에서 유래된 말이다. 이 용암류는 파호이호이 용암류와는 달리 점성이 커서 표면이 거칠고 상부와 하부에 1 ~ 2m 두께의 클린커층을 형성하며 중앙부는 비교적 치밀한 용암상태를 이루는 것이 특징이다(Macdonald, 1953; Macdonald et al., 1983). 또한 중앙부의 치밀한 용암으로부터 돌출한 용암판(lava slab)이 상부에 존재하기도 하며 하부에 흐름의 전면 부에서 상부의 클린커들이 떨어져 밑면으로 깔림으로서 비교적 두꺼운 클린커층을 형성한다. 아아 용암류의 단위 두께는 통상적으로 1 ~ 10m을 나타내며 50km 이하의 유동 거리를 나타내나 예외적으로 cascades에서는 80km 까지 이동한 사례도 보고된 바 있다(Waters, 1961).

Rowland and Walker(1987)는 하와이의 아아 용암류를 화구로부터의 흘러간 거리에 따라 근거리형(proximal type)과 원거리형(distal type)으로 구분한 바 있다. 근거리형은 분당 수 미터의 비교적 빠른 속도로 유동하며, 10 ~ 20cm 두께의 얇은 상부 클린커층과 비교적 다공질의 내부를 갖는다. 용암류의 두께는 대체로 1 ~ 3m 정도이다. 이와는 달리 원거리형의 아아 두께가 3 ~ 10m 정도이고 감지할 수 없을 만큼 매우 느리게 유동한다. 이 유형의 상부는 모래 및 먼지 크기의 세립질 물질과 치밀한 암괴가 뒤섞여 두꺼운 클린커층을 이루며 내부(중앙부)는 기공이 거의 없는 치밀한 상태를 이룬다.

한편, 아아 용암류는 파호이호이에서 전이를 통해서도 형성되는데, 전이를 일으키

는 요인으로서 용암이 분출할 당시의 기후, 휘발성분의 함량, 용암의 분출률과 지속시간, 채널의 형태, 용암의 기공과 결정도, 지면의 경사 등이다(Swanson et al., 1979 ; Peterson et al., 1976). Peterson and Tilling and Tilling(1980)은 파호이호이에서 아아로 전이가 일어난다고 하더라도, 두 형태간의 화학적인 성분상의 차이는 발생하지 않는다고 보고하였다. 또한 Emerson(1926)은 용암이 지속적으로 유동하는 동안 휘발성 성분의 손실로 인하여 파호이호이에서 아아로의 변화를 가져오는데, 이러한 경향은 경사가 급한 지역일 수록 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 보고하기도 하였다.

제주도에 있어서 아아 용암류는 주로 지형경사가 급한 남·북사면을 중심으로 분포하고 있다. 용암류의 단위 두께는 평균 5 ~ 10m이고 상부와 하부에 클린커층이 발달하고 있으며, 기공은 크기가 크고 길쭉하게 신장된 형태를 이룬다. 남·북사면이 지형경사가 급한 이유 중의 하나는 장식 현무암, 휘석 현무암, 장식 휘석 현무암, 조면암 등의 아아 용암류가 분포하기 때문이며, 이 지역에서 계곡은 협곡을 이루는 것이 특징이다. 제주도의 동부와 서부의 일부지역에는 파호이호이 용암류에서 아아 용암류로 전이한 형태의 것도 관찰된다.

Williams and McBirney(1979)는 아아 용암류 중에서도 주로 암괴로 이루어진 암괴상 아아 용암류(aa rubble flow)라 정의하였다. 즉, 「암괴상 아아 용암류란 용암류 내부의 용암판과 용암판 사이의 부분이 유동 중에 각력질 암괴 크기로 파쇄되어 표면이 암설류의 양상을 이루는 것」을 말한다. 제주도에서 속칭 곱자왈이라 부르는 지대는 암괴상 아아 용암류의 특징을 잘 보여주고 있다.

## Ⅲ-2. 특수성 지질의 종류

### (1) 꽃자왈

제주도에서 꽃자왈은 “나무와 넝쿨 따위가 마구 엉클어져 수풀같이 어수선하게 된곳”을 지칭하고 있다. 이 지역은 토양층이 매우 빈약하고 경작지로 이용하기가 곤란하며, 암석들은 대부분 자갈에서 암괴 크기에 이르는 스코리아, 화산탄 및 화산 자갈로 이루어져 있으나, 부분적으로는 소규모의 용암류도 포함되어 있다. 이는 아아 용암류 중에서도 암괴상 아아 용암류(aa rubble flow)의 특징을 잘 보여주고 있는 지역이다. 꽃자왈 용암류는 한라산 체의 남·북사면을 제외한 동·서부 지역에 비교적 넓게 분포하고 있다(Fig. 3.1).

Table 3.1은 송시열(2000)에 의해 제시된 꽃자왈 용암류를 지역별로 구분한 것으로 각 지역의 꽃자왈 용암류 분포지를 각각의 분포 지역명에 따라 서부지역의 한경 - 안덕 꽃자왈 지대와 애월 꽃자왈 지대, 동부지역의 조천 - 함덕 꽃자왈 지대와 구좌 - 성산 꽃자왈 지대로 명명하였다. 이들 각각의 꽃자왈 지대에서 모두 10개의 꽃자왈 용암류가 분포하고 있다.

#### ① 한경 - 안덕 꽃자왈 지대

이 꽃자왈 지대는 제주도 서부의 한경과 안덕 지역에 위치하고 있으며, 월림-신평 꽃자왈 용암류와 상창 - 화순 꽃자왈 용암류의 2개의 용암류가 분포하고 있다.

월림 - 신평 꽃자왈 용암류는 한림읍 금악리 지경의 해발 329.6m에 위치한 돌오름 주변지역에서부터 시작되어 한림읍 월령리와 대정읍 영락리의 해발 20m 지역까지 두갈래로 분포하고 있다(Fig. 3.2). 돌오름에서 영락리 방향으로 분기된 꽃자왈 용암류의 최대 연장거리는 약 12.5km로서 꽃자왈 용암류 중 연장거리가 최대이다. 돌오름에서 월령리 방향으로 분기된 꽃자왈 용암류도 연장거리가 약 11.5km에 이르고 있어 월림 - 신평 꽃자왈 용암류의 거리에 따른 분포 모습을 보면, 돌오름에서 해발 180m 사이 지역은 폭이 6.2km로 비교적 넓게 분포하고 있으나 거리가 멀어질

수록 폭이 점차적으로 좁아져 인향동 WS 13 지점에서는 폭이 0.5km에 불과하다.

상창 - 화순 꽃자왈은 해발 380m에 위치한 금악에서 시작되어 화순리 방향으로 총 9km에 걸쳐 분포하고 있다. 이 꽃자왈 용암류는 월림 - 신평 꽃자왈 용암류와는 달리 분기하지 않고 평균 1.5km의 폭으로 산방산 근처의 해안지역까지 이어지고 있다.

## ② 애월 꽃자왈 지대

애월 꽃자왈 지대는 납읍 - 원동 꽃자왈 용암류만이 분포하고 있다. 이 꽃자왈 용암류는 해발 599.8m에 위치한 큰 오름에서 시작되어 해발 90m의 애월읍 납읍리와 원동지역까지 총 9.0km에 걸쳐 분포하고 있는데(Fig. 3.3), 해발 200m까지는 2 ~ 3km의 폭으로 이어지다가 납읍리 동분석구(박기화 외 10인, 1998)를 기점으로 애월읍 납읍리와 하가리 방향으로 분기되고 있다. 이 꽃자왈은 지형의 경사가 비교적 급한 큰 오름 주변에서는 폭이 협소하지만, 해발 200 ~ 300m 사이의 완경사 지역에서는 폭이 3.2km로서 최대를 나타내고 있다.

## ③ 조천 - 함덕 꽃자왈 지대

조천 함덕 꽃자왈 지대는 제주도 북부의 조천과 함덕일대 지역에 분포하고 있는 꽃자왈 용암류로서 함덕 - 와산 꽃자왈 용암류, 조천 - 대흘 꽃자왈 용암류, 선흘 꽃자왈 용암류로 구분할 수 있으며(Table 3.1, Fig. 3.4), 이들 꽃자왈 용암류의 분포 상태를 서술하면 다음과 같다.

조천 - 대흘 꽃자왈 용암류는 해발 500m에 위치한 민오름 주변에서부터 시작되어 큰지그리오름, 작은지그리오름 그리고 바늘오름 주변을 거쳐 조천리 해발 20m 지점까지 총 11km에 걸쳐 분포하고 있다(Fig. 3.4). 이 꽃자왈 용암류가 시작되는 민오름 주변에는 5개의 분석구들이 집중적으로 분포하고 있으며, 거의 일정한 폭으로 분포하고 있다.

함덕 - 와산 꽃자왈 용암류는 돛배오름의 북측 해발 486m 지점에서부터 시작되어 함덕해수욕장 부근까지 평균 2 ~ 3km의 폭으로 총 연장 12km 지역에 걸쳐 분포

하고 있어, 월립 - 신평 꽃자왈 용암류 다음으로 연장거리가 길다. 이 꽃자왈 용암류는 해발 200 ~ 300m사이 지역이 가장 넓은 폭을 보이고 있으며, 말단부인 함덕리 부근으로 오면서 점차 좁아지는 분포상태를 보인다(Fig. 3.4).

선홍 꽃자왈 용암류는 해발 340m에 위치한 거문오름 북쪽에서부터 시작되어 알밤오름과 북오름 사이를 지나 해발 80 ~ 100m 지점에 있는 속칭 선홍곶까지 연속되고 있다. 이 꽃자왈 용암류의 총 연장거리는 7km이며, 폭은 1 ~ 2km 정도이다(Fig. 3.4).

#### ④ 구좌 - 성산 꽃자왈 지대

구좌 - 성산 꽃자왈 지대는 제주도 동부의 구좌와 성산 일대 지역에 분포하고 있는 꽃자왈 용암류로서 종달 - 한동 꽃자왈 용암류, 세화 꽃자왈 용암류, 상도 - 하도 꽃자왈 용암류 및 수산 꽃자왈 용암류로 구분할 수 있으며(Table 3.1, Fig. 3.5), 이들 꽃자왈 용암류의 분포상태를 서술하면 다음과 같다.

종달 - 한동 꽃자왈 용암류는 해발 225m에 위치한 동거문오름에서 시작되어 한동리 방향으로 높은오름, 손자봉, 돛오름 등의 분석구 주위를 거쳐 해발 30m의 해안 저지대까지 총 연장 11km 지역에 걸쳐 분포하고 있다. 이 꽃자왈 용암류는 돛오름과 둔지봉의 분석구에서 유래된 것으로 보이는 스킨리아 퇴적층에 의해 부분적으로 단절되거나 분포 폭이 좁아지는 현상을 보이고 있다. 또한, 이 꽃자왈 용암류는 높은오름과 월랑봉 사이 지역에서 최대의 분포 폭을 나타내지만 해안 쪽으로 내려오면서 분석구들의 영향에 의해 분포 폭의 변화가 비교적 심한 편이다.

세화 꽃자왈 용암류는 월랑봉 북측 해발 155.4m 지점에서부터 시작되어 세화리의 해발 20m 지점까지 4.7km의 지역에 걸쳐 분포하고 있는데, 말단부 쪽에서 폭이 급격히 좁아지는 모습을 보이고 있다.

상도 - 하도 꽃자왈 용암류는 해발 159.2m에 위치한 용눈이오름 북동쪽 2km 지점에서부터 시작되어 지미봉 근처까지 분포하고 있다. 이 꽃자왈 용암류의 총 연장거리는 용눈이오름을 중심으로 넓게 분포하고 있는 스킨리아 퇴적층에 의해 많은 부분이 피복 되어 있는 관계로 정확히 알 수는 없지만 야외에서 측정 가능한 거리

는 5.6km이다. 이 곳자왈 용암류는 해안 쪽으로 가면서 약간의 사행하는 형태를 보여주고 있다.

수산 곳자왈 용암류는 해발 184.8m에 위치한 궁대악 주위에서부터 수산리 마을 서쪽 해발 500m 지점까지 총 5.5km 지역에 걸쳐 분포하고 있다. 특히 이 곳자왈 용암류는 분포 폭이 1km 미만으로서 10개 곳자왈 용암류 중에서 가장 폭이 좁은 곳자왈 용암류에 해당한다.



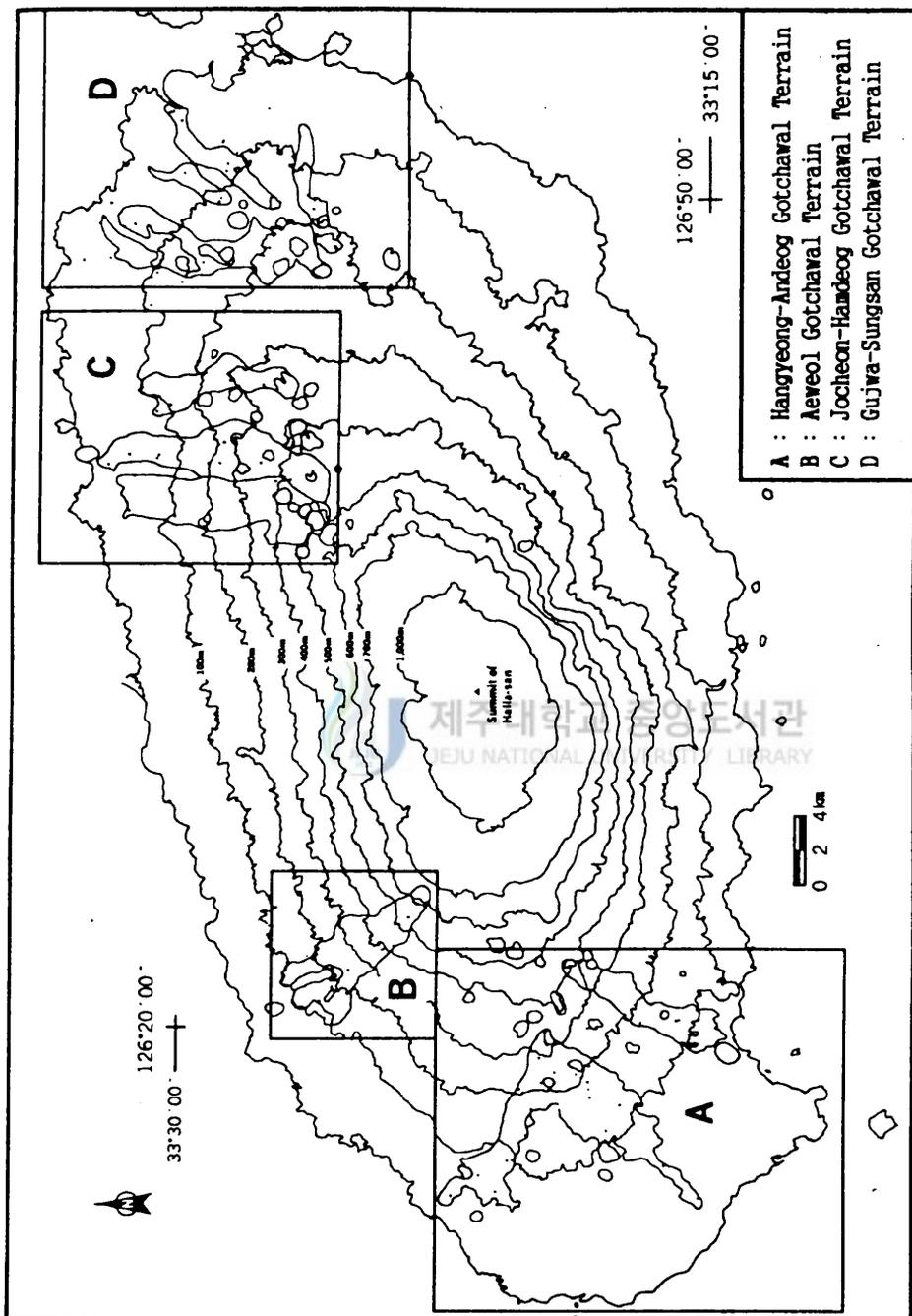


Fig. 3.1 Index map of Gotchawal terrains, Jeju Island.

Table 3.1 Classification of Gotchawal Lava Flow in Jeju Island.

Western Area	Central Area	Eastern Area
<p>◎ Hangyeong-Andeog Gotchawal Terrain (Fig. 3, A)</p> <p>· Sangchang-Hwasun Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Weollim-Sinpyeong Gotchawal Lava Flow</p> <p>◎ Aeweol Gotchawal Terrain (Fig. 3, B)</p> <p>· Nabeub-Weondong Gotchawal Lava Flow</p>		<p>◎ Jocheon-Hamdeog Gotchawal Terrain (Fig. 3, C)</p> <p>· Seonheul Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Hamdeog-Wasan Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Jocheon-Daeheul Gotchawal Lava Flow</p> <p>◎ Gujwa-Sungsan Gotchawal Terrain (Fig. 3, D)</p> <p>· Jongdal-Handong Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Susan Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Sehwa Gotchawal Lava Flow</p> <p>· Sangdo-Hado Gotchawal Lava Flow</p>

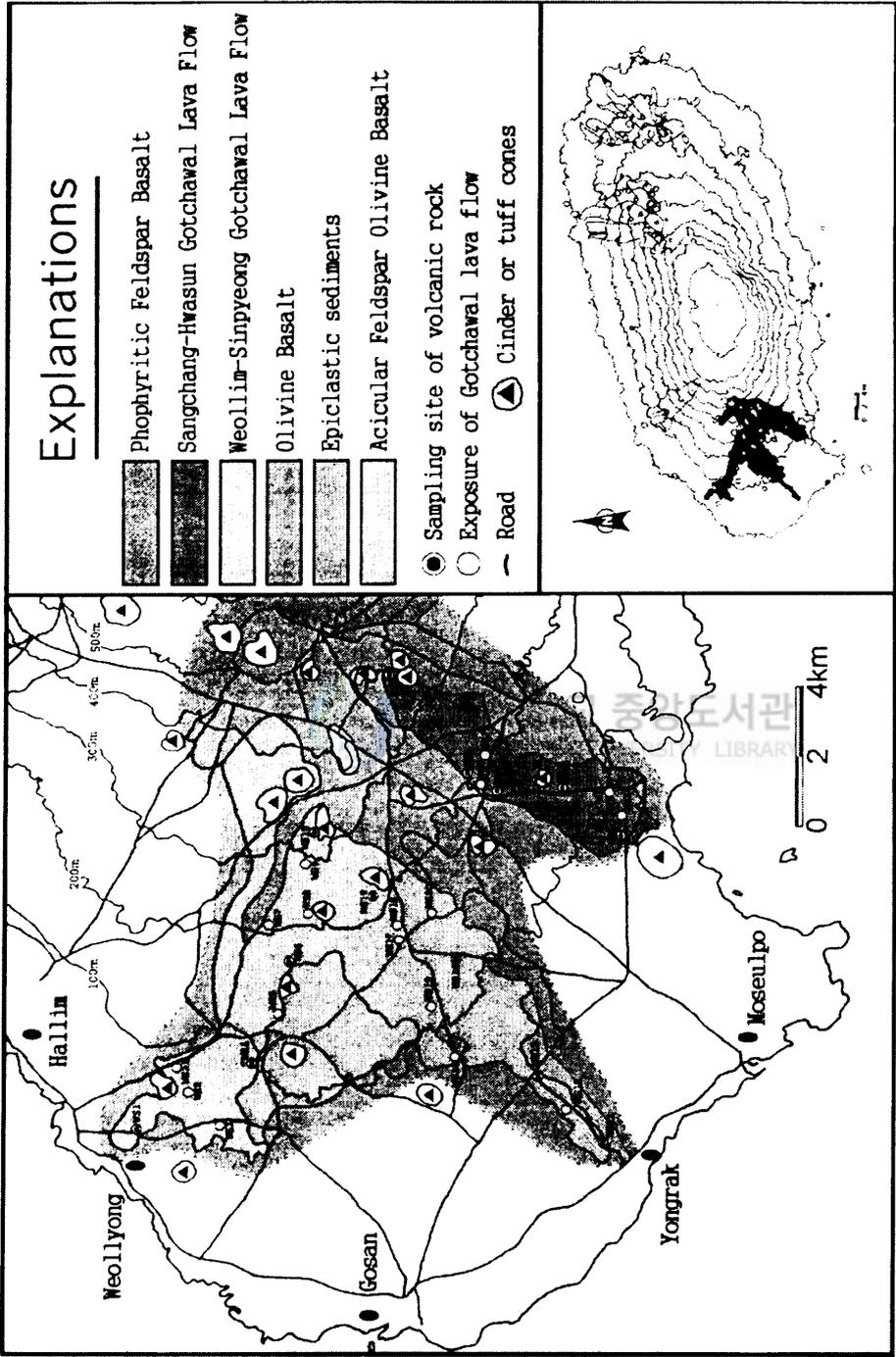


Fig. 3.2 Geologic map of Hangyeong-Andeog Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island.

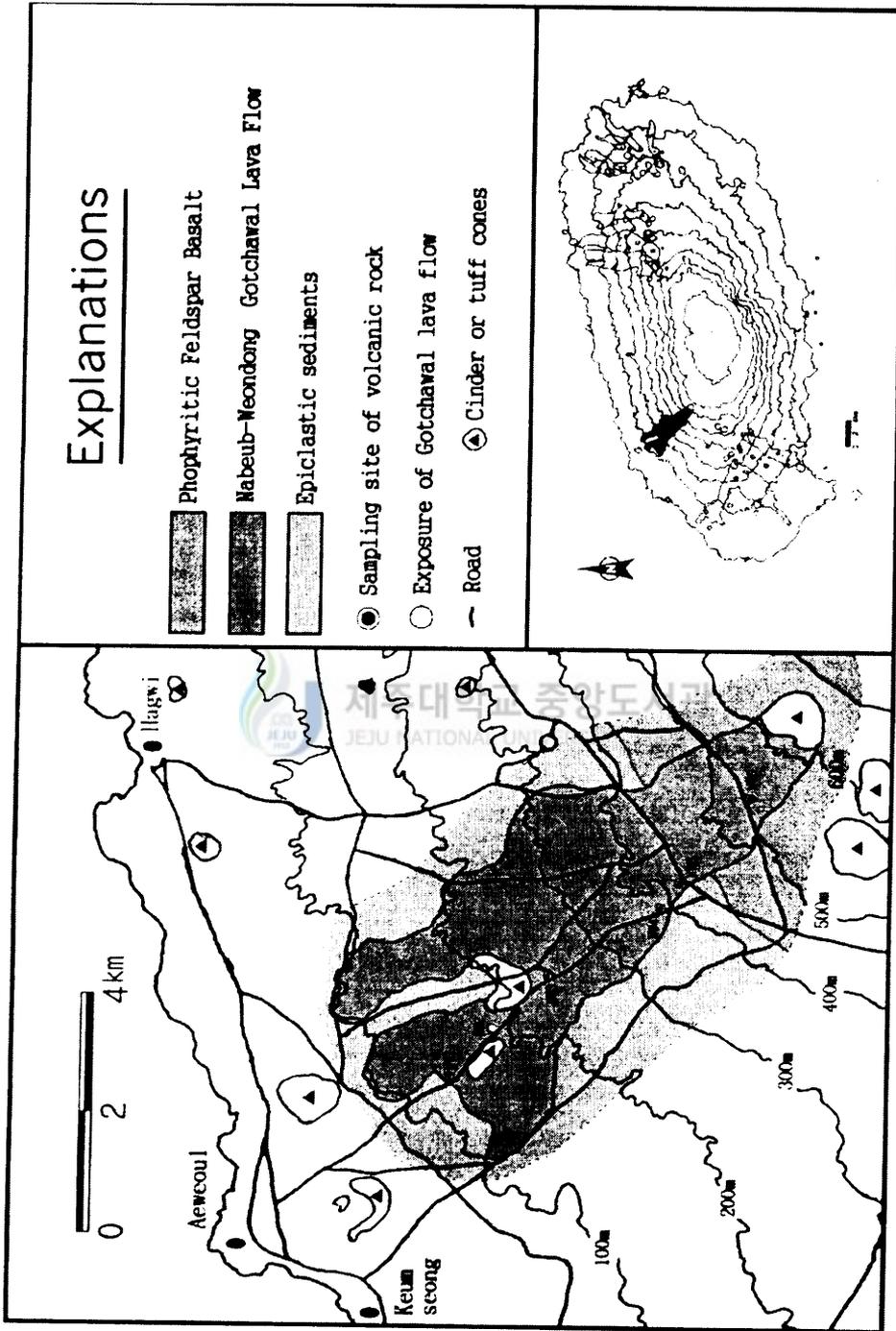


Fig. 3.3 Geologic map of Aewol Gotchawal Terrain in the western area, Jeju Island.

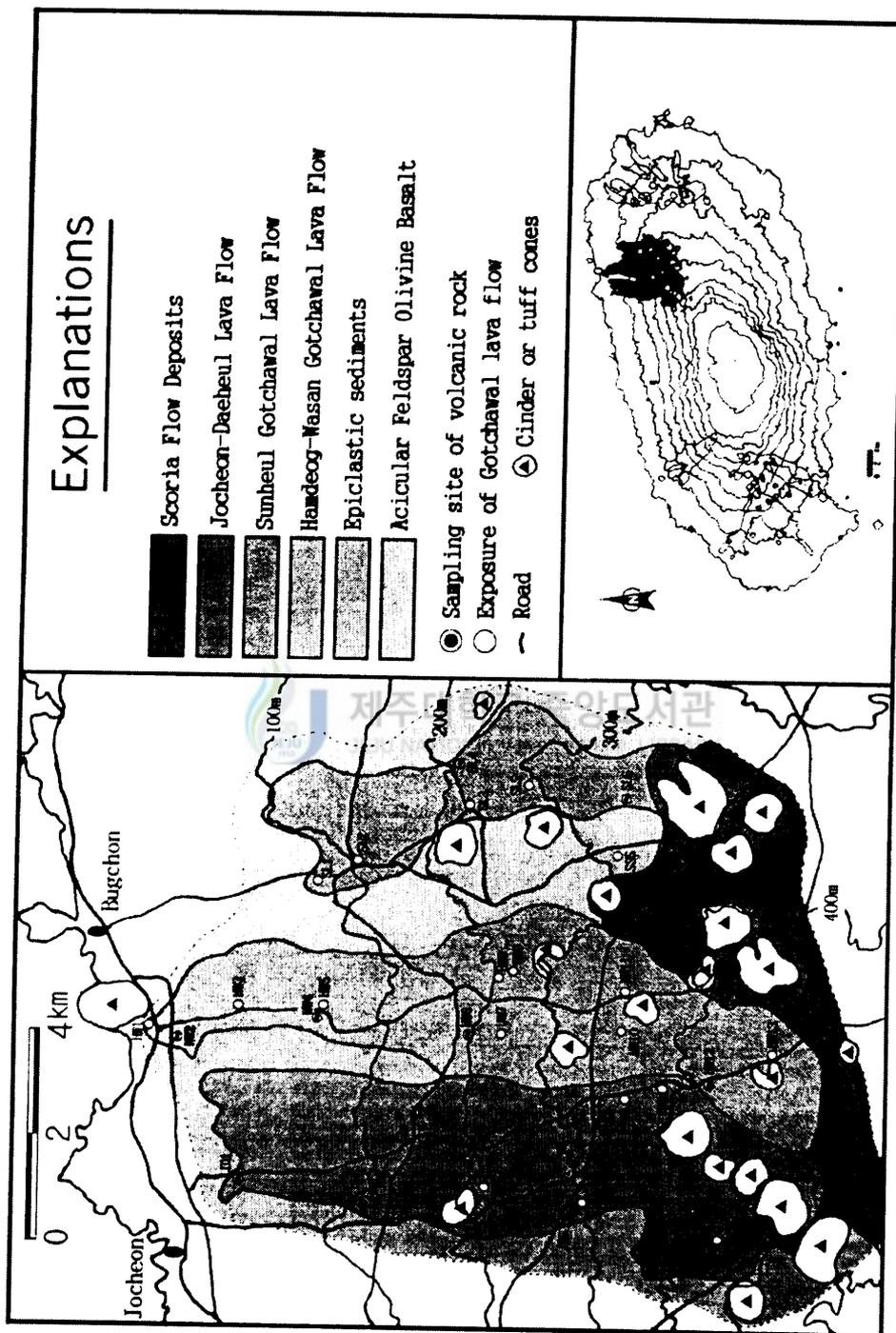


Fig. 3.4 Geologic map of Jocheon-Hamdeog Gotchawal Terrain in the eastern area, Jeju Island.

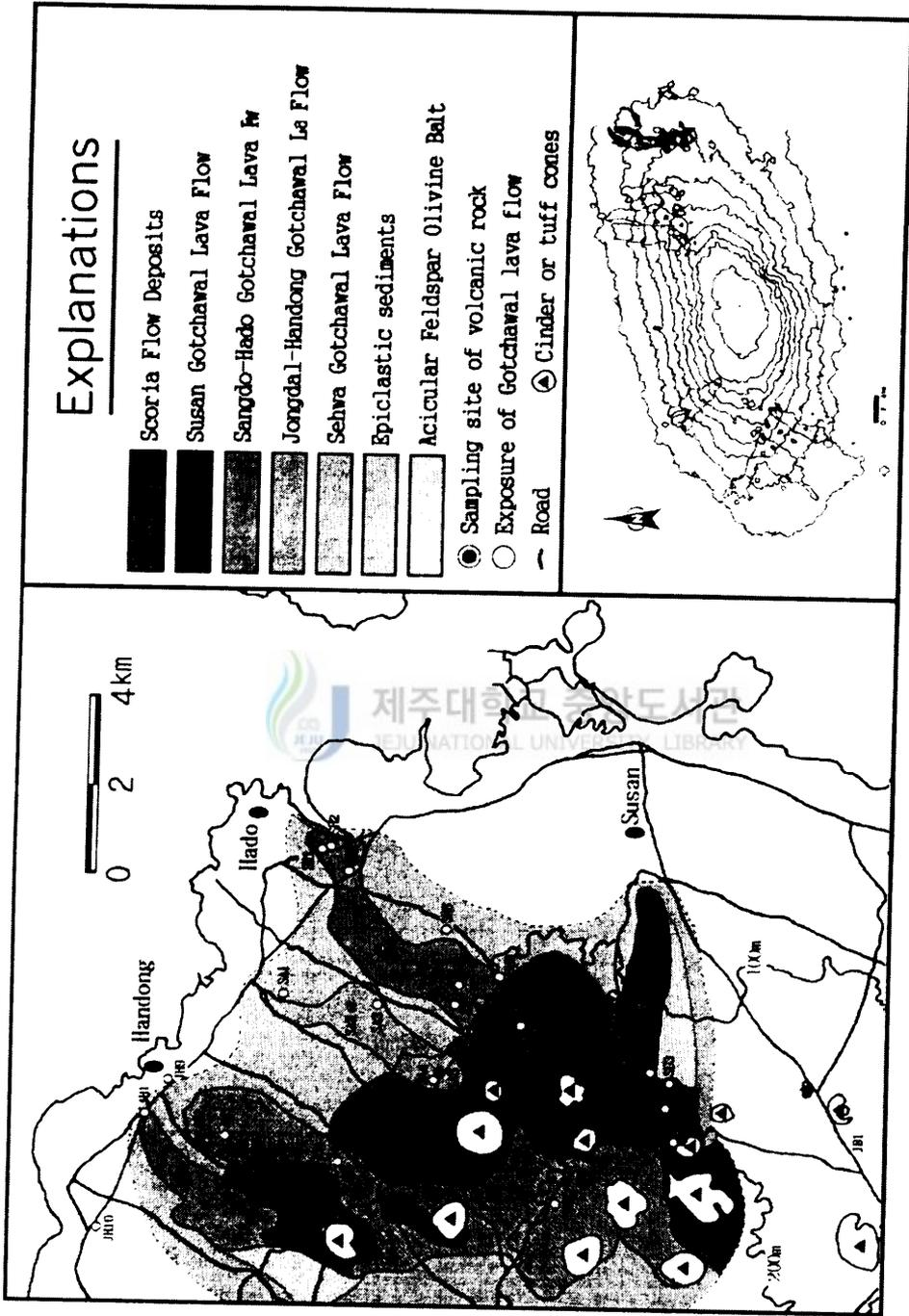


Fig. 3.5 Geologic map of Gujwa-Sungsan Gotchawal Terrain in the eastern area, Jeju Island

## (2) 용암동굴

용암동굴은 점성이 낮은 용암의 표면이 고결 되고, 내부는 미고결 상태에서 연속적인 흐름이 발생하여 굳은 표면과 내부 사이에 틈이 생겨 공동이 형성된다. 용암동굴의 규모는 수 m에서 수 km에 이르며, 용암동굴이 천정의 두께는 수십 cm에서 수m에 이른다. 용암동굴의 발달 방향은 용암의 흐름에 지배를 받는 관계로 지하 용암동굴의 발달방향 파악은 용이하지 않다. 이와 같은 용암동굴은 일반적으로 pahoehoe 용암에 흔히 형성되며, aa 용암에서는 높은 점성에 의해 규모가 작거나 생기지 않는다. 제주도폭 지역에서는 pahoehoe 용암에 해당되는 선흘리 현무암질 안산암과 오등동 현무암에는 용암동굴이 형성되어 있으며, 곳곳에 용암동굴의 붕락에 의한 함몰지가 분포한다. 오등동 현무암이 분포해 있는 관음사 등산로에서는 새끼줄 구조와 용암동굴(구린네 동굴)이 발달해 있고, 용암동굴의 붕락에 의해 계곡이 형성되어 있거나 절벽을 이루고 있다. 선흘리 현무암질 안산암이 분포한 지역에는 용암동굴이 형성되어 있으며, 성산도폭에 있는 만장굴도 이 현무암의 연장 분포지에 해당된다. 선흘리에서 구사산을 거쳐 동북리로 가는 지역에는 다수의 소규모의 용암동굴과 용암동굴 함몰지가 형성되어 있다. 용암동굴 함몰지는 소규모의 호소를 형성하기도 한다. 따라서 이들 현무암이 분포한 지역에는 용암동굴이 지하에 잠재해 있을 가능성이 있다. 서 김녕리와 선흘리 사이에 분포하는 선흘리 현무암질, 안산암 분포지역에서는 곳곳에 용암동굴의 붕락에 따른 숨굴(용암동굴의 붕락에 따른 구멍으로 강수가 쉽게 스며든다.)이 산재하는 것으로 보아 지하에 용암동굴이 분포하고 있을 것으로 추정된다.

## (3) 숨굴

숨굴은 용암동굴이 붕괴되거나 지표면 화산암류에 발달된 수직 절리계 및 균열군 등에 의하여 생성된다. 용암이 냉각·수축할 때 냉각면에 수직한 주상절리 및 구갑상 절리계 분포지에서 또한 융기·침강 작용시 생성된 균열대 분포지역에서도 발달

되어 있다. 숨골은 지하수의 함양에 크게 기여하고 있지만 지표의 오염물질이 여과 없이 지하로 쉽게 유입될 수 있는 단점을 동시에 지니고 있다.

#### (4) 함몰지

함몰지는 용암동굴이 붕괴되거나 화구형성 과정에서 가스 이외에는 다른 분출물이 다량 분출하지 않았거나, 화산분출 후 화구가 함몰되어 나타난다. 함몰지는 우수의 다량 유입으로 지하수 함양, 홍수 예방, 자연식생 성장에 중요한 역할을 하고 있지만 오염물질이 쉽게 유입된다.

#### (5) 용암류 접촉역

두 용암류가 접하는 면은 대개 화산쇄설물이나 클린커가 분포하고 있다. 스코리아 또는 고토양층이 협재한다. 상부층의 투수성 지질을 따라 침투된 지하수는 점토층이나 조면암류와 같이 치밀한 하부조직의 지질조건에 의하여 용암류 접촉지역을 따라 이동하게 되는데, 이러한 지질조건은 함수층, 즉 투수성 지질로 볼 수 있다.

#### (6) 클린커층

파호이호이 용암은 반원형의 호를 만들거나 동심원상의 주름이 많은 형상을 하고 있는 반면 점성이 높은 아아 용암은 표면이 아주 거칠어서 클린커(clinker)를 쌓아 올린 것과 같은 모양을 하고 있다. 이렇게 고결된 아아 용암은 계속된 화산작용에 의해 지중에서 다공질성의 지층으로 발견되기도 하는데 이러한 지층을 일명 클린커층이라고 한다. 클린커는 용암류의 표면부에 해당하는 암석이 부스러진 것으로 다량의 기공을 함유하고 있는 것이 특징이며, 클린커에 기공이 다량 함유되어 있는 경우 스코리아성 클린커 혹은 클린커성 스코리아라 표현한다. 클린커가 스코리아에 비해 기공의 함량이 적은 것이 일반적이고, 용암류에 비하여는 기공이 많다. 따라서

클린커층이 넓고 두껍게 발달한 지역에서는 강수가 쉽게 빠져나가는 곳자왈이 형성될 것으로 보인다. 저지대에 형성되어 있는 클린커층은 비교적 작은 크기의 클린커로 구성되어 있으며, 이들은 풍화가 진행되어 두꺼운 토사층을 형성하기도 한다.

## (7) 스킨리아

한라산 화산체의 국부적인 지형의 특징은 중심 화산의 활동이 정지된 후 그 주변의 틈을 이용하여 분출 생성된 360여개의 기생화산과 깊은 관련이 있다. 제주도에 는 기생화산이 널리 분포되어 있으며 특히 장축과 일치하는 방향으로 집중적으로 배열되어 있고 제주도에서는 이를 “오름” 이라 한다. 이러한 기생화산은 현무암추(Basalt cone)와 분석구(Cinder cone)의 두종류로 크게 분류할 수 있으며, 전자는 성산층 및 화순층 퇴적기에 형성된 화산구(Volcanic cone)로서 10여개에 불과하고 대부분은 후기 화산활동 후에 형성된 분석구이다.

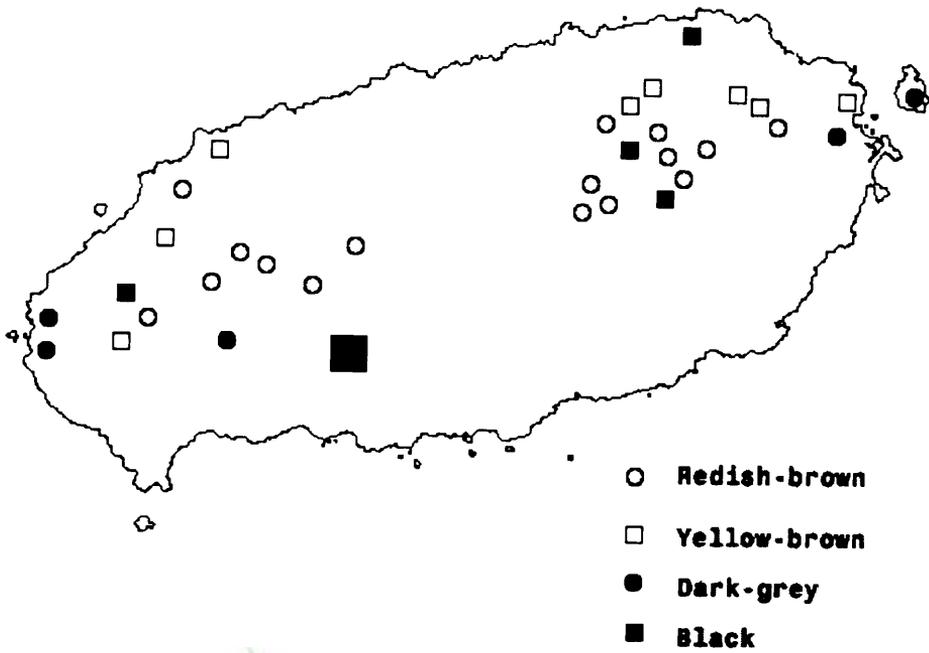
화산의 화구로부터 분출되는 암편과 화산회를 총칭하여 화산쇄설물이라고 하는데, 그 중 직경이 32mm 이상인 것이 화산암괴(Volcanic block)라 하며, 이 중 어느 정도 둥글거나 방추형으로 생긴 것을 화산탄(Volcanic bomb)이라고 하며 이는 용암이 공중에서 회전하면서 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4 ~ 32mm 사이에 있는 것을 화산력(lapilli) 또는 분석(cinder)이라고 하고, 4mm 이하의 세편을 화산회(Volcanic ash), 0.25mm 이하의 가루를 화산진(Volcanic dust)이라 하며 이러한 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 지층을 Scoria층 또는 제주 방언으로 송이층이라 한다. 스킨리아로 구성된 분석구는 분출 퇴적 범위는 수 km이며, 분화구에서 3km 지점에는 1cm 크기의 스킨리아가 10cm 두께로 층을 이룬다고 한다. 스킨리아로 구성된 분석구 분포지역은 스킨리아의 물성에 좌우된다. 스킨리아는 기공의 함량의 높고 각력상으로 산출된다. 이러한 조립질층 상위에는 미립질 스킨리아가 협재되어 층리를 형성하고 있다. 분석구 가까이에 개설되어 있는 구조물(도로, 건물)은 지하에 분포해 있는 스킨리아층의 물성으로 인하여 지반이 불안정하게 되기 쉬우며 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

## IV. 제주도내의 송이의 분포 및 물리 화학적 특성

### IV-1. 제주도내 송이의 분포

송이는 색상에 있어서 적갈색, 황갈색, 흑색 및 암회색으로 크게 구별할 수 있으며, 이 장에서는 우선 이러한 송이의 제주도내 분포를 지역별로 분류하여 화학적 성분과 물리적 특성 등을 검토하여 보고자 한다. 그리고 이들의 공학적 특성을 검토하기 위하여 제주도 가장 많이 분포하고 있는 적갈색 및 암회색 송이를 남제주군 안덕면 동광리 소재 서부산업도로 개설공사 4공구 현장에서 채취한 송이를 대상으로 실험을 실시하였다. 송이는 원 지반이 크고 많은 기공을 가지고 있는 연속체인 덩어리로 되어있어 채취 시 다양한 입도로 분해되므로 흙으로 분류되기에는 다소 문제를 내포하고 있으나, 흙으로 간주하여 이에 대한 물리 화학적 특성 등에 대한 조사를 실시하고, 대형 직접전단시험기를 이용하여 송이의 강도특성, 종류에 따른 특성, 입자의 파쇄특성, 밀도에 따른 강도 특성, 함수비 변화에 따른 분석 등에 대해 고찰 하고자 한다.

제주도내 송이의 분포를 조사하기 위하여 일부는 채취하였으며, 일부는 다른 문헌(윤정수, 1995)을 참고하여 37종의 송이에 대하여 검토하였다. 이들 자료는 북제주군 지역을 위주로 하였지만 Fig. 4.1에서 보는 바와 같이 일반적으로 적갈색 송이가 18개 지역으로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 이들은 특히 중산간 지역에 많이 있는 것으로 나타났다. 다음으로는 황갈색 송이가 9개 지역, 흑색 송이가 5개 지역 그리고 암회색 송이가 5개 지역에 분포하는 것으로 나타났으며 암회색 송이는 주로 해안 지역에서 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다.



제주대학교 중앙도서관  
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4.1 Colorific distributions of Scoris in Jeju Island

## IV-2. 송이의 물리 - 화학적 특성

색상별 송이의 화학적 성분은 Table 4.1과 같으며, 이들 표에서 보는 바와 같이 화산암재의 주성분은  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 의 함량이 약 75%에 달하며 유기불순물의 함량이 비교적 적게 나타나서 안정된 화학조성을 갖고 있다.

색상별  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 의 함량은 적갈색 화산암재가 76.8%, 황갈색이 75.8%, 암회색이 74.5%, 흑색 화산암재가 71.3%로 적갈색과 황갈색 화산암재가 다소 높은 함량치를 보인다. 각 성분별 특징을 색상별로 보면 적갈색 화산암재의  $SiO_2$  함량이 45.4%, 황갈색이 40.7%, 암회색이 46.22%, 흑색이 40.02%로 암회색 화산암재가 비교적 높은 함량치를 보인다.

색깔에 따른  $N_2O + K_2O$ 의 값은 적갈색 화산암재가 4.06%, 황갈색이 1.77%, 암회색이 4.28%, 흑색이 1.92%로 암회색과 적갈색 화산암재가 높은 함량을 보였다

색상별로 볼 때  $CaO$  함량은 흑색 화산암재가 8.16%로 가장 높은 함량을 보이고, 암회색이 8.09%, 적갈색 6.95%, 황갈색이 4.41%로서 황갈색 화산암재가 매우 낮은 함량을 나타내고 있다.

$MgO$ 의 색상별 함량을 비교하여 보면 암회색 화산암재가 7.91%로 비교적 높은 함량을 보이나, 적갈색은 6.13%, 황갈색은 6.64%, 흑색은 6.59%로 거의 유사한 함량을 보였다.

색상에 따른  $Al_2O_3$  함량 변화는 적갈색 화산암재가 16.87%, 황갈색이 19.87%, 암회색이 16.26%, 흑색이 19.15%로 황갈색과 흑색 화산암재가 높은 함량을 보였다.

색상에 따른  $Fe_2O_3$  함량 변화는 적갈색 화산암재가 14.92%, 황갈색이 15.22%, 암회색이 11.66%, 흑색이 12.27%로 황갈색과 적갈색 화산암재가 높은 함량을 보였다.

색상에 따른  $TiO_2$ 의 함량 변화는 적갈색 화산암재가 3.97%, 황갈색이 2.92%, 암회색이 2.35%, 흑색이 2.6%로 적갈색 화산암재가 높은 함량을 보였다.

한편, Table 4.2는 송이의 물리적 특성을 위한 내화도, 흡수율, 마모율, 단위무게,

겉보기 비중에 대한 자료를 검토하였다.

내화도는 한국산업규격 KS L 3113 기준에 따라 실시되었으며, Table 4.2에서 보는 바와 같이 전체 평균은 1,165℃인데 색상별로는 황갈색 화산암재가 1,210℃, 적갈색이 1,141℃, 암회색이 1,120℃, 흑색이 1,188℃로 황갈색 화산암재가 다소 높은 내화도를 보였다.

흡수율은 한국산업규격시험 KS F 2529 경량 잔골재의 흡수율 시험방법에 따라 2회 실험을 시행하여 그 평균값을 취하였다. 화산암재의 대부분이 기공이 많아 총 평균 23.1%로 높은 흡수율을 보이고 있는데 색상별로 보면 적갈색 송이가 21.4%이고, 황갈색이 32.5%, 암회색이 17.7%, 흑색이 20.78%로 황갈색 화산암재가 다소 높았다.

마모율은 조직이 치밀, 강약, 균질, 기공의 다과등 여러 가지 요인에 기인하는데, 이번 조사된 화산암재들은 최저 40%에서 최대 79%의 분포를 보이고 있으며 평균 58.5%를 나타내고 있다. 색상별로는 적갈색이 57.82%이고, 황갈색이 67.22%, 암회색이 47.25%, 흑색이 17%로 황갈색 화산암재가 마모율이 가장 높게 나타나고 있다. 이처럼 화산암재가 일반 자갈이나 모래보다 마모율이 높은 것은 기공이 과다에 기인한 것으로 생각된다.

단위용적당 중량은 최저 0.46g/cm<sup>3</sup>에서 최고 0.95g/cm<sup>3</sup> 사이의 분포를 보이며 평균 0.69g/cm<sup>3</sup>로서 매우 작은 편이다. 색상별로는 적갈색이 0.699g/cm<sup>3</sup>이고, 황갈색이 0.75g/cm<sup>3</sup>, 암회색이 0.68g/cm<sup>3</sup>, 흑색이 0.65g/cm<sup>3</sup>로 황갈색 화산암재가 다소 높은 경향을 보인다.

표면 건조비중은 평균 2.06으로서 절대 건조비중이 평균 1.68보다 크다. 이것은 화산암재의 기공에 수분함유량의 유무에 기인한 것이다. 색상별로는 표면 건조비중이 적갈색이 1.99이고, 황갈색이 1.85, 암회색이 2.08, 흑색이 2.42로 흑색 화산암재가 가장 크다. 이는 흑색 화산암재가 보다 다공질로서 수분함량이 크기 때문이라 추정된다.

또한 절대 건조비중은 적갈색이 1.70이고, 황갈색이 1.31, 암회색이 1.80, 흑색이 1.90으로 이도 흑색송이가 가장 크게 보였다.

Table 4.1 Chemical composition of scorias (윤정수, 1995)

Color	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fg. loss
Redish-brown	47.96	18.43	14.69	7.40	8.42	2.01	1.45	2.93	0.71
Redish-brown	46.45	18.24	16.47	6.49	6.47	2.23	1.24	2.48	0.88
Redish-brown	45.41	17.55	13.50	7.32	4.07	4.72	1.03	3.26	2.70
Redish-brown	44.42	17.47	16.77	7.36	5.84	4.04	1.08	2.84	0.87
Redish-brown	49.01	16.39	13.43	7.39	5.01	3.84	1.26	3.62	0.71
Redish-brown	45.68	16.72	16.27	7.04	5.22	3.44	1.34	2.74	0.72
Redish-brown	35.48	21.40	18.54	3.62	4.29	5.88	1.25	1.39	8.50
Redish-brown	47.02	16.44	14.24	6.42	7.02	4.76	1.08	3.12	1.60
Redish-brown	45.52	16.74	15.27	5.54	5.64	2.02	1.22	2.58	0.74
Redish-brown	39.41	17.95	15.72	4.08	4.72	4.01	1.63	1.44	7.22
Redish-brown	45.74	14.07	13.16	8.99	6.75	5.52	1.08	3.23	0.92
Redish-brown	46.21	15.25	16.63	7.08	5.26	5.56	1.53	3.60	1.42
Redish-brown	43.66	16.11	13.80	8.40	6.38	5.68	0.53	2.36	2.60
Redish-brown	45.26	15.54	3.94	7.89	6.28	3.54	1.28	3.01	0.82
Redish-brown	48.62	19.01	16.01	6.90	6.58	1.00	1.93	3.50	0.45
Redish-brown	46.10	14.77	14.57	8.12	9.17	3.56	1.52	3.00	0.70
Redish-brown	45.27	16.87	13.67	8.09	7.04	5.61	1.53	2.76	1.70
<b>Average</b>	<b>45.14</b>	<b>16.87</b>	<b>14.92</b>	<b>6.95</b>	<b>6.13</b>	<b>3.97</b>	<b>1.23</b>	<b>2.82</b>	<b>1.96</b>
Yellow-brown	37.20	24.18	15.32	4.11	4.54	2.78	0.43	0.14	10.60
Yellow-brown	41.22	18.64	14.27	5.80	9.78	2.28	0.20	1.33	6.41
Yellow-brown	40.04	23.52	15.22	3.82	6.00	0.82	0.45	1.41	8.71
Yellow-brown	39.75	20.01	14.72	6.44	6.21	2.09	1.32	1.24	7.62
Yellow-brown	35.73	22.90	16.44	0.93	6.99	3.03	0.11	0.20	13.40
Yellow-brown	45.02	19.49	14.33	4.04	7.34	1.72	0.64	1.27	6.15
Yellow-brown	43.01	16.34	14.82	5.85	4.18	5.83	1.10	1.98	4.30
Yellow-brown	36.70	16.06	17.93	1.19	8.19	6.12	0.15	0.29	12.70
Yellow-brown	47.63	17.73	13.97	7.52	6.51	1.57	1.52	2.15	10.87
<b>Average</b>	<b>40.70</b>	<b>19.87</b>	<b>15.22</b>	<b>4.47</b>	<b>6.64</b>	<b>2.92</b>	<b>0.66</b>	<b>1.11</b>	<b>8.97</b>
Dark-grey	45.26	16.48	12.24	7.92	8.85	2.37	1.43	2.44	1.82
Dark-grey	46.21	16.04	10.47	7.76	6.72	1.95	1.74	2.24	1.01
Dark-grey	46.34	16.11	12.02	8.42	8.52	2.58	1.27	2.72	1.08
Dark-grey	47.10	16.39	11.91	8.24	7.56	2.49	1.65	3.62	1.04
<b>Average</b>	<b>46.22</b>	<b>16.26</b>	<b>11.66</b>	<b>8.09</b>	<b>7.91</b>	<b>2.35</b>	<b>1.52</b>	<b>2.76</b>	<b>1.24</b>
Black	47.71	17.94	13.21	6.97	5.06	2.30	0.78	2.43	4.60
Black	48.16	18.86	12.14	8.74	8.77	2.41	0.22	0.74	0.68
Black	17.22	19.50	13.12	9.24	6.97	3.51	0.15	0.27	0.22
Black	40.01	22.50	11.46	6.30	3.26	2.50	0.12	2.21	0.66
Black	47.02	16.93	11.40	9.54	8.87	2.33	0.69	2.01	0.72
<b>Average</b>	<b>40.02</b>	<b>19.15</b>	<b>12.27</b>	<b>8.16</b>	<b>6.59</b>	<b>2.61</b>	<b>0.39</b>	<b>1.53</b>	<b>1.38</b>

Table 4.2 Physical characteristics of scorias(윤정수,1995)

Color	Sample No.	Degree of fireproof ( °C )	Ratio of abrasion (%)	Ratio of absorption (%)	Unit Weight ( g/cm <sup>3</sup> )	Specific gravity	
						surface drg	absolute drg
Redish-brown	41	1220	22.60	72	0.46	1.67	1.34
Redish-brown	44	1220	24.50	60	0.48	1.74	1.35
Redish-brown	49	1140	15.80	44	0.96	2.08	1.80
Redish-brown	50	1120	23.30	57	0.62	1.99	1.02
Redish-brown	47	1120	23.30	58	0.62	1.99	1.62
Redish-brown	60	1100	23.40	59	0.63	1.98	1.64
Redish-brown	3	1230	25.00	74	0.46	1.66	1.33
Redish-brown	9	1230	25.40	72	0.46	1.67	1.34
Redish-brown	15	1130	24.60	60	0.72	1.76	1.35
Redish-brown	24	1100	35.60	59	0.69	1.94	1.60
Redish-brown	135	1120	3.90	55	0.64	2.45	2.37
Redish-brown	84	1120	11.20	56	0.82	2.27	2.04
Redish-brown	108	1120	10.80	52	0.65	1.97	1.58
Redish-brown	95	1110	11.00	54	0.66	2.16	2.38
Redish-brown	136	1120	4.00	54	0.63	2.43	2.36
Redish-brown	134	1100	66.00	59	0.72	1.87	1.12
Redish-brown	116	1100	10.70	38	0.88	2.25	2.03
<b>Average</b>		<b>1141</b>	<b>27.40</b>	<b>57.82</b>	<b>0.65</b>	<b>1.99</b>	<b>1.70</b>
Yellow-brown	56	1230	46.20	76	0.57	1.59	1.11
Yellow-brown	57	1240	46.00	75	0.55	1.58	1.10
Yellow-brown	28	1210	26.70	63	0.76	1.91	0.47
Yellow-brown	36	1230	46.10	76	0.57	1.57	1.12
Yellow-brown	82	1230	24.30	69	0.82	2.05	1.66
Yellow-brown	85	1150	26.00	43	0.95	2.04	1.63
Yellow-brown	130	1120	26.40	60	0.93	1.92	1.52
Yellow-brown	117	1230	24.20	70	0.83	2.06	1.66
Yellow-brown	69	1250	26.40	73	0.78	1.90	1.51
<b>Average</b>		<b>1210</b>	<b>32.50</b>	<b>67.22</b>	<b>0.75</b>	<b>1.85</b>	<b>1.31</b>
Dark-grey	68	1120	16.40	40	0.74	1.86	1.60
Dark-grey	70	1100	35.40	67	0.47	1.67	1.23
Dark-grey	122	1140	8.20	40	0.71	2.47	2.28
Dark-grey	123	1120	10.80	42	0.81	2.31	2.03
<b>Average</b>		<b>1120</b>	<b>17.70</b>	<b>47.25</b>	<b>0.68</b>	<b>2.08</b>	<b>1.80</b>
Black	66	1300	27.30	72	0.67	2.52	1.40
Black	51	1200	13.70	42	0.94	2.03	1.77
Black	8	1120	20.20	77	0.49	2.60	2.17
Black	71	1200	22.50	65	0.69	2.38	1.96
Black	144	1120	20.20	79	0.48	2.59	2.18
<b>Average</b>		<b>1188</b>	<b>22.78</b>	<b>67</b>	<b>0.65</b>	<b>2.42</b>	<b>1.90</b>

## V. 직접전단시험

### V-1. 대형 직접전단시험기 설명

본 연구에 사용된 시료는 제주도에 널리 분포하는 송이(Scoria)로서 입자의 크기가 일반 흙과는 달리 풍화도에 따라 미세입자로부터 10cm이상 되는 것도 있다. 따라서, 일반적으로 사용되는 높이 2cm의 직접전단시험기로는 이들 재료를 실험할 수 없었다.

본 연구에 사용된 대형직접전단시험기는 이러한 시료를 시험하기 위하여 그림 (Fig. 5.1 - 5.4)에서 보는 바와 같이 전단상자의 크기가 20cm×20cm×20cm인 정육면체모양의 규격을 갖추었으며, 전단상자의 상부와 하부의 높이를 각각 10cm로 하여 입자 크기가 5cm정도의 시료도 직접전단시험이 가능하다.

대형 직접전단시험기는 크게 두 개의 하중장치로 구성되어 있다. 첫 번째는 상부 Shear Box에 가해지는 연직하중 장치가 있는데 연직하중을 가할 수 있는 하중 범위는 0 ~ 7.5kg이며, 전단시험시 연직하중 조절장치인 Regulator로 조절할 수 있고, Shear Box의 상부에 변형률 게이지를 장치하여 연직하중이 이루어지는 동안 연직하중판이 수직변위를 측정할 수 있게 하였다.

두 번째는 전단작용을 하는 수평하중 장치인데, 수평하중을 가할 수 있는 변위속도는 0.2mm/min ~ 3.5mm/min이며, 전단시험기의 변형률 제어방식으로 이루어져 있다. 일정한 속도로 전단 되는 동안의 하중은 Shear Box 측면에 위치한 proving ring에 의해 측정되며, 그 측정값은 calibration result에 의해 교정된 값을 시험결과에 이용하였다.

그리고, 수평변위는 Fig. 5.3 에서 보는 바와 같이 수평변위계를 측벽부에 설치하여 측정하였다. 또한 전단상자의 배면, 즉 전단하중이 작용하는 반대쪽에는 Fig. 5.4 에서와 같이 Limit Bar를 설치하여 상부전단상자의 수평변위와 전단시 시료에 의해 발생할 수 있는 상부전단상자의 틀림현상을 방지 및 구속하게 하였다. 그리고 전단시 수평하중은 전단상자의 하부에만 작용시킨다.

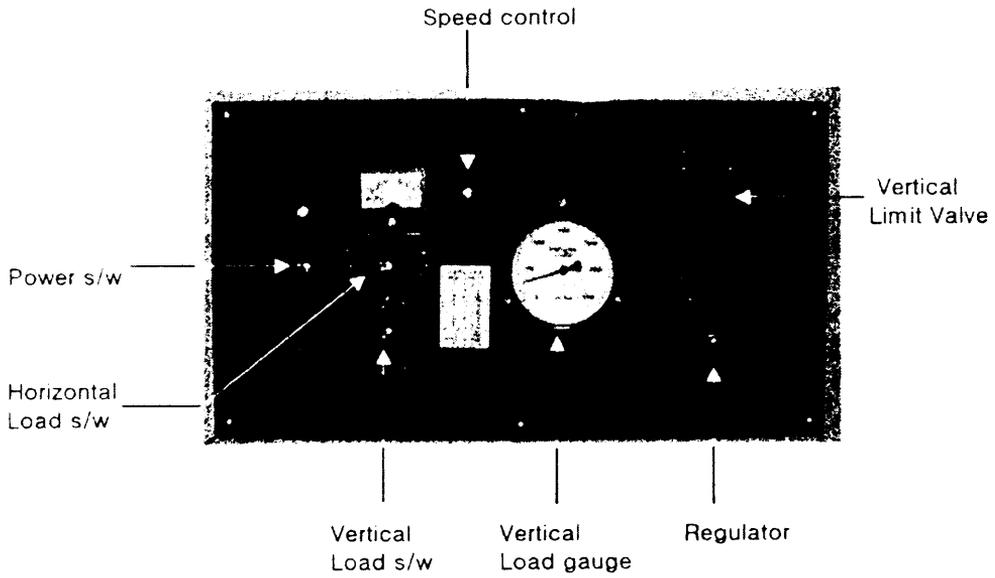


Fig. 5.1 Control Panel

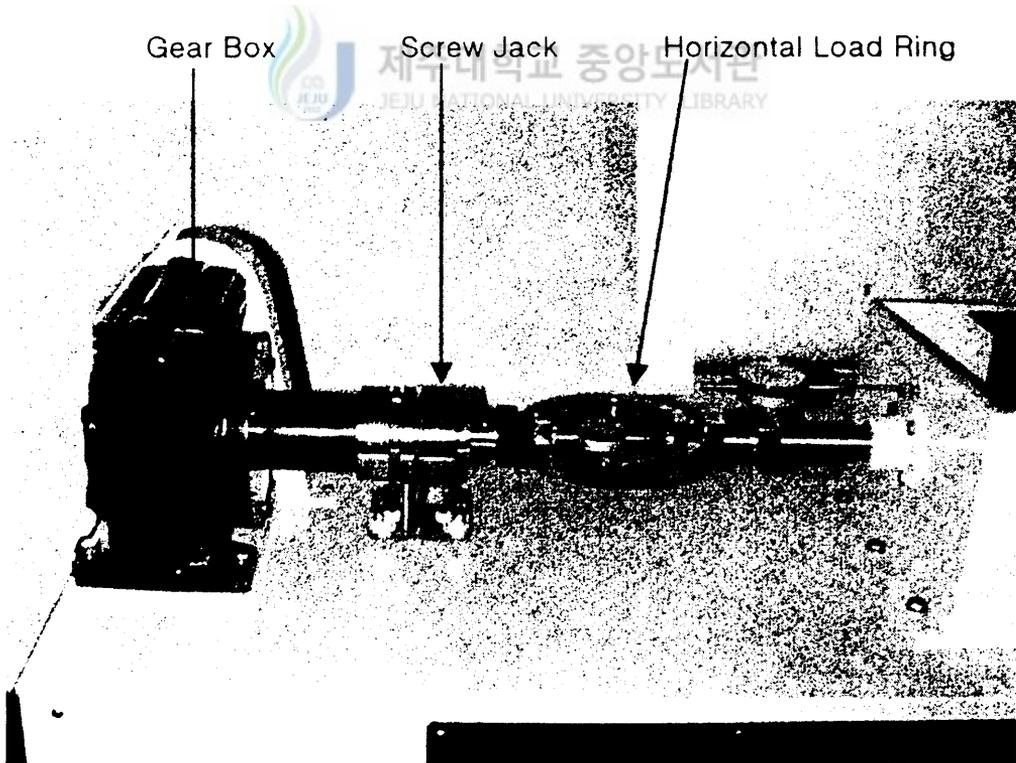


Fig. 5.2 Horizontal strain control system.

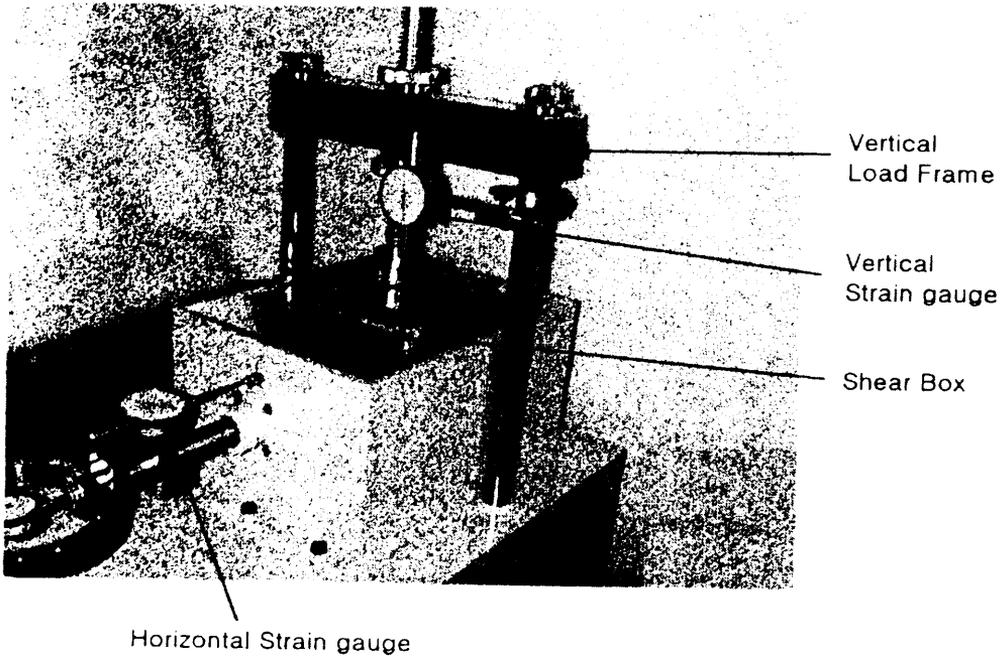


Fig. 5.3 Vertical loading system.

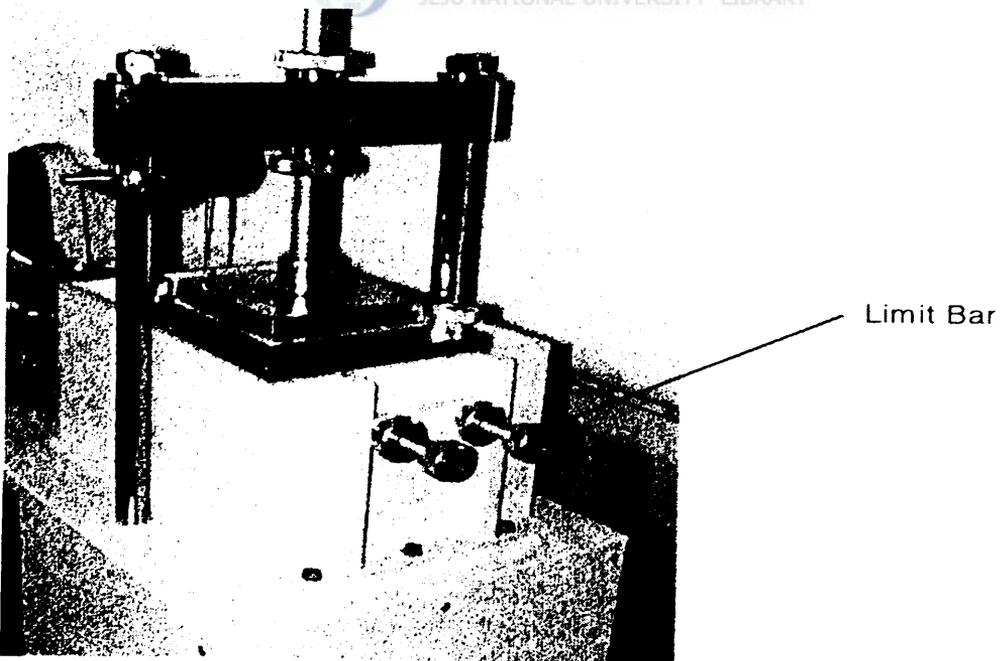


Fig. 5.4 Limit bar

## V-2. 공시체 제작

본 연구에 사용된 시료는 제주도 남제주군 안덕면 동광리 소재 서부산업도로 개설공사 4공구 현장에서 암회색 송이와 적갈색 송이를 채취하여 실험을 실시하였다.

현장에서 채취한 송이의 입자 크기는 직경 10cm에서 미세입자까지 관찰 할 수 있었으나 본 실험에서 사용된 시료는 입자의 크기가 4.75mm에서 9.52mm사이의 입경에 대해서만 사용하였다. 또한 실험에서 연직하중은 응력제어 방식으로, 전단력은 변위 속도 0.5mm/min의 변형률 제어 방식을 이용하였다. 그리고 각 실험에 적용된 연직하중은 유압에 의해 연직응력을 일정하게 유지되도록 하였다.

두 시료에 대한 비중시험은 진공펌프에 의한 배기에 의해 실시한 결과 암회색 송이는 2.88, 적갈색 송이는 2.71의 값을 보였다. 이들 시험은 Table 5.1에서 보는 바와 같이 암회색 송이 위주로 Loose한 경우와 Medium, Density 한 경우에 대한 직접전단시험을 실시하였으며, 송이의 종류별 강도특성을 비교하기 위하여 적갈색 송이는 다짐정도가 Loose한 상태일 때 초기 간극비가 평균 1.58이고, 암회색 송이는 다짐정도가 Loose한 상태일 때 초기 간극비가 평균 1.55이므로 초기 간극비를 동일하게 보아 적갈색 및 암회색 송이를 다짐정도가 Loose한 상태로 동일하게 공시체를 제작하여 실험을 실시하였다. Dry 상태 실험은 각 시료를 노건조 시켜 노건조한 상태에 대해서만 실시하였다.

Table 5.1 각 시료에 대한 건조단위중량 및 초기간극비

	다짐정도	건조단위중량 $\gamma_d(t/m^3)$	초기간극비 $e_0$
Redish brown Scoria	Loose	1.05	1.58
	Medium	1.13	1.55
Dark grey Scoria	Medium	1.18	1.44
	Density	1.28	1.25

### V-3. 단면적보정

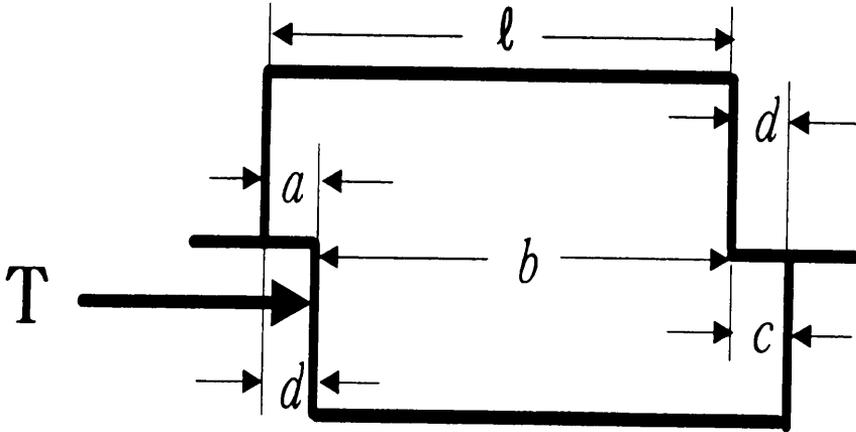


Fig. 5.5 Shear Box



Fig. 5.5는 직접전단시험에서 수평변위  $d$ 가 발생하였을 시의 단면을 나타내고 있다. 그림에서 파괴가 발생하는 파괴면을  $a, b, c$ 의 3가지로 분류할 수 있다. 여기서  $b$ 구간은 시료 상호간에 전단이 직접 실시되는 부분이며,  $a$ 와  $c$  구간은 시료와 전단 박스의 금속이 맞닿는 부분이 되겠다. 따라서 전단력  $T$ 가 작용할 경우 파괴면에서 저항하는 힘은  $a, b, c$  3부분을 모두 고려하여야만 한다. 그러므로 시료 전체의 길이는  $l+d$ 가 되며 시료와 금속 면의 닿는  $a$ 와  $c$  부분의 경우는 시료와 금속면 사이의 마찰력을 고려하여야만 한다.

흙과 금속의 마찰 면은 일반적으로 말뚝에서 많이 발생하고 있다. 사질토 지반 임의의 깊이에서 마찰말뚝의 단위 주변마찰 저항력은 다음과 같다.

$$f = K\sigma'_v \tan \delta \quad (5.1)$$

여기서,  $K$  : 토압계수

$\sigma_v'$  : 고려중인 깊이에서의 유효연직응력

$\delta$  : 흙 말뚝 사이의 마찰각

앞의 식에서 사용한  $\delta$ 값은  $0.5\phi \sim 0.8\phi$ 로 나타내고 있다(Braja.M.Das, 2000).

본 연구에서는 직접전단시험 시 시료와 Shear Box와의 마찰 저항계수를 0.6으로 가정하여 단면 보정을 실시하고 실험에 임하였다.

그리고, 전단응력 산정을 위한 단면적은 Shear Box의 폭을 일정하게 하였으며 전단변형이 발생한 부분의 단면 길이는  $l+d$ 로 하고, 단면적 산정은 보정계수를 이용하여 식(5.2)과 같이 하였다.

$$A = B \cdot \{(l-d) + 0.6 \times 2d\} = B \cdot (l + 0.2d) \quad (5.2)$$



## VI. 시험결과 고찰

### VI-1. 강도특성

일반적인 지반의 전단강도는 흙 속의 임의의 면을 따라 발생하는 파괴와 활동에 저항하는 흙의 단위면적 당 내부 저항이라 정의할 수 있다. 지반은 보통의 고체 재료와 같이 인장이나 전단에 의하여 파괴된다. 그런데 지반의 인장저항력은 무시할 수 있을 만큼 작으므로, 지반은 인장 저항력이 없다고 간주해도 무방하다. 따라서 지반에서는 대개 전단저항력만이 문제가 되며 흙이 최대로 발휘할 수 있는 전단저항력을 전단강도(Shear Strength)라고 한다. 흙의 전단파괴시의 응력상태를 나타내는 3개 이상의 Mohr 응력원을 그리면 그 외접선이 대개 완만한 곡선이 되는데 이를 Mohr - Coulomb 파괴 포락선(Mohr - Coulomb failure envelope)이라고 한다. 낮은 응력상태에서는 직선으로 가정할 수 있으며 그 직선의 절편을 점착력(Cohesion)  $c$ , 경사각을 내부마찰각(Internal friction angle)  $\phi$ 라고 정의하며, 임의의 응력상태에서 흙의 전단강도를 다음과 같이 직선식으로 표현할 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (6.1)$$

지반의 점착력  $c$ 와 내부마찰각  $\phi$ 는 지반의 고유한 값이며, 이들을 알고 있으면 임의의 응력상태에서 그 지반의 전단강도를 구할 수 있다. 따라서 이들을 강도정수로 하고 한다.

Fig. 6.1은 암회색 송이의 전단변형률에 대한 전단응력의 관계를 도시한 것으로 여기서 사용된 시료는 초기 건조단위중량이  $1.13 \text{ t/m}^3$ , 초기 간극비가 1.55인 시료에 대한 결과이며, 각 시험은  $1 \text{ kg/cm}^2$ ,  $2 \text{ kg/cm}^2$  및  $4 \text{ kg/cm}^2$ 의 연직응력을 작용시켰다. 그리고 연직하중은 유압에 의한 응력제어 방식으로 일정하게 작용시켰으며 전단력은

하중을 0.5mm/min의 속도로 하여 변형률 제어방식을 사용하였다. 그림에서 각 연직응력에 대한 최대전단응력은 변형률이 10 ~ 12% 사이에서 발생하고 있으며 이들 강도는 peak 강도 후 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다.

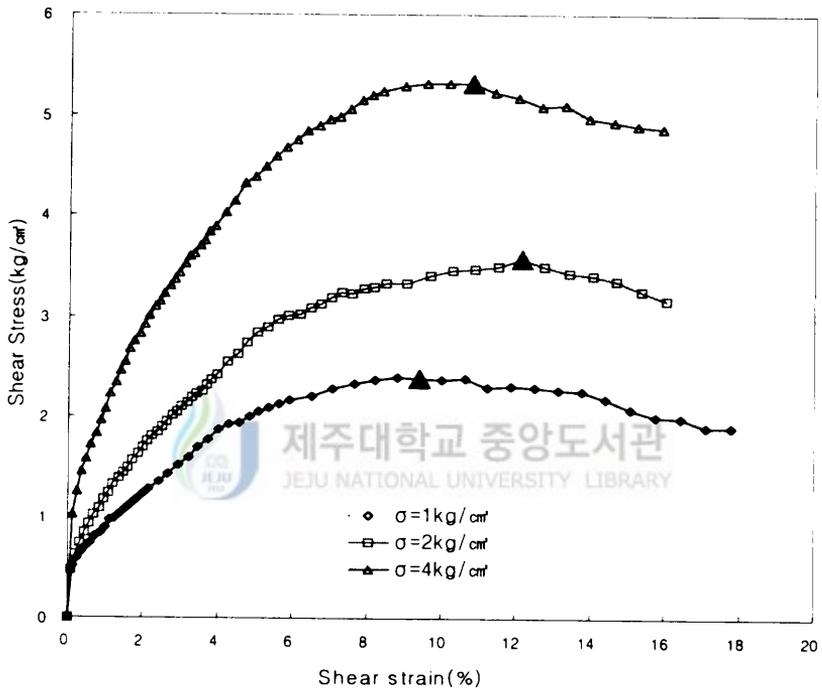


Fig. 6.1 Behavior of Shear Stress-Strain on Dark grey Scoria

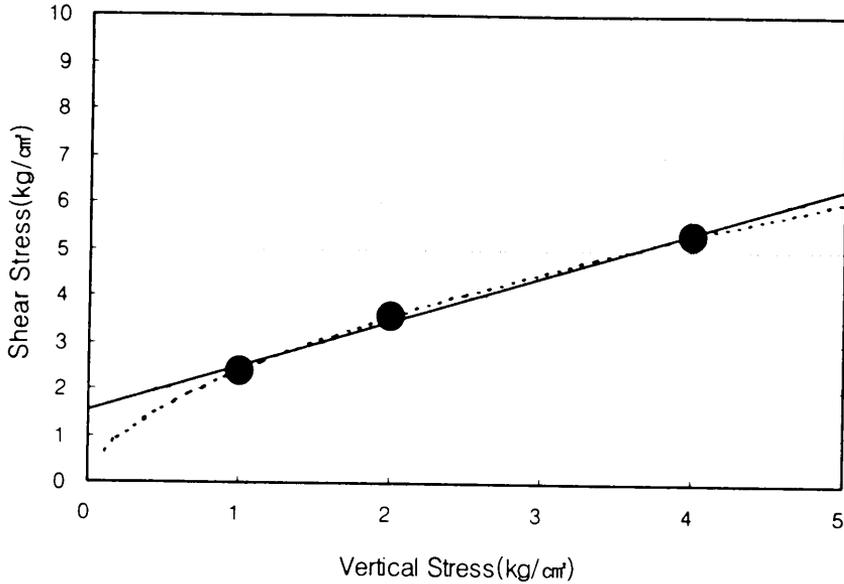


Fig. 6.2 Comparison of Failure Criteria

For Dark grey Scoria

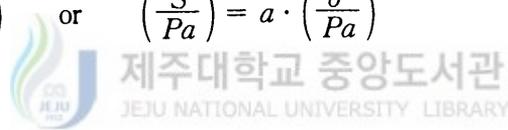


Fig. 6.2는 Loose한 암회색 송이의 전단강도를 점착력과 마찰력을 이용한 직선식인 식(6.1)의 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시하기 위하여 각 연직응력에 대한 파괴시 전단응력을 Fig. 6.1로부터 구하여 전단강도를 도시한 것이다. 그림에서 나타난 ● 표시는 각각의 연직응력에 대한 파괴시 최대전단응력이며 실선은 Mohr - Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로 그림에서 절편으로 나타난 점착력  $c$ 는  $1.26 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났으며, 내부마찰각  $\phi$ 가  $41.46^\circ$ 인 것으로 산정 되었다.

한편 Fig. 6.2의 결과는 앞에서 설명한 재료의 선형과 비선형 문제 외에도 입자의 파쇄 측면에서 해석이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 시료는 앞장에서도 설명한 바와 같이 직경  $4.75\text{mm}$ 에서  $9.52\text{mm}$  사이의 입경을 사용하였다. 그리고 송이의 특성은 입자 내에 많은 기공을 포함하고 있어 전단 시 마모나 파쇄가 많이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 송이는 입자 상호간의 점착력은 가지고 있지 않지만 큰 입자에서 발생하는 마모나 파쇄가 전단강도 산정 시 점착력으로 나타날 수도 있을 것으로 추정된다.

그러나, 실험에 사용된 암회색 송이는 입자들 상호간의 점착력은 실질적으로 찾아보기가 힘든 것이다. 그런데 그림에서 ●로 표시한 직접전단시험 결과는 그림에서 점선으로 표시한 곡선으로도 제시할 수 있다. 이렇게 할 경우 직선식에서 제시된 점착력 문제는 해소될 것으로 판단된다. 그리고 Lade(1984), Masuoka and Nakai,T.(1977)등에 의하면 흙과 같은 마찰 물질이 파괴포락선은 직선이 아니라 포물선의 형태로 제시되고 있다. 그러나 이러한 포물선으로 나타낸 흙의 파괴 포락선은 상당히 복잡한 수식으로 나타나 실질적으로 실무에서 사용하기는 많은 어려운 점이 있어 현재에도 Mohr - Coulomb의 식(6.1)이 많이 사용되고있는 실정이다. 그러나 Fig. 6.2에 도시된 점선을 비선형 형태로 근사화 할 경우 식(6.2)의 지수함수 (Power Function)로 접근함이 타당할 것으로 판단된다.

$$S = a \cdot Pa \cdot \left(\frac{\sigma'}{Pa}\right)^b \quad \text{or} \quad \left(\frac{S}{Pa}\right) = a \cdot \left(\frac{\sigma'}{Pa}\right)^b \quad (6.2)$$



여기서, Pa = 대기압(≈ 1.0 kg/cm<sup>2</sup>)으로서 전단강도 S 와 연직응력 σ'의 단위조절을 위하여 사용되었으며, 식에서 사용된 계수 a 와 b의 결정은 식(6.3)과 같이 식(6.2)의 양쪽 항에 log를 취함으로써 결정할 수 있다.

$$\log\left(\frac{S}{Pa}\right) = \log a + b \cdot \log\left(\frac{\sigma'}{Pa}\right) \quad (6.3)$$

Fig. 6.3은 식 (6.2)의 a와 b를 구하기 위하여 대수용지를 사용한 것이다. 그림에서 a는 log(σ/P<sub>a</sub>)가 1일 때의 y축 값 즉 절편이고, b는 직선의 기울기 값이다. 그림에서 a와 b는 2.08와 0.59인 것으로 나타났다. 이들 결과로부터 식(6.1)과 (6.2)를 비교하여 보면 1 kg/cm<sup>2</sup> 이하에서는 Power Function의 전단강도에 비해 Mohr - Coulomb의 전단강도가 과대 산정 되고 있고 그 부분을 지나 연직응력이 4 kg/cm<sup>2</sup>의 부분을 지나기 전까지는 미세한 차이이기는 하나 Power Function이 Mohr -

Coulomb 보다 약간 높게 나타나고 4 kg/cm<sup>2</sup>을 지나서는 다시 Mohr - Coulomb의 파괴규준의 Power Function에 비해 높은 것으로 나타나고 있다.

파괴 포락선이 현실적인 문제해결에 어떠한 문제를 발생하는가를 다음 예제에 제시하고자 한다.

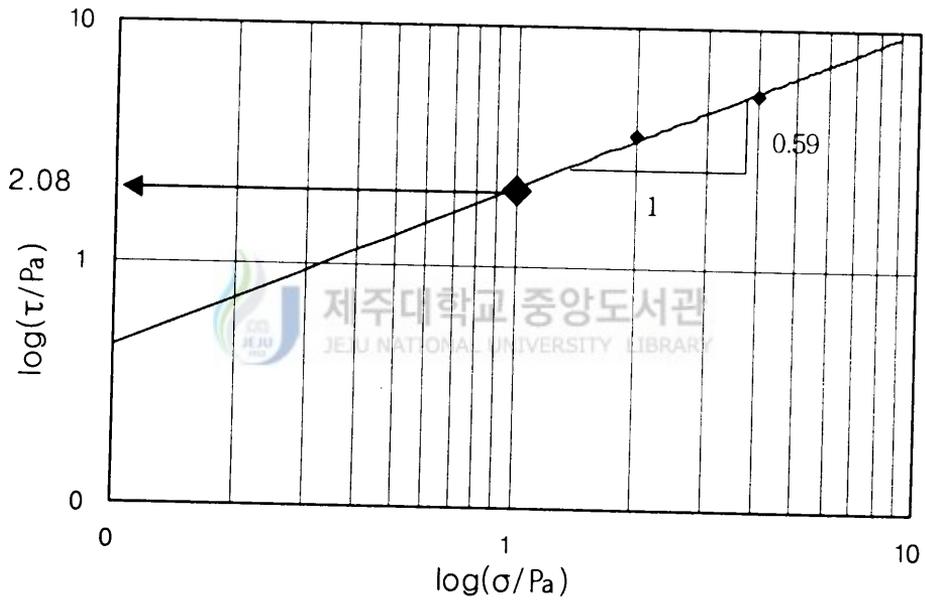


Fig. 6.3 Fitting of Power Function to Describe Failure For Dark grey Scoria

예제. 6-1

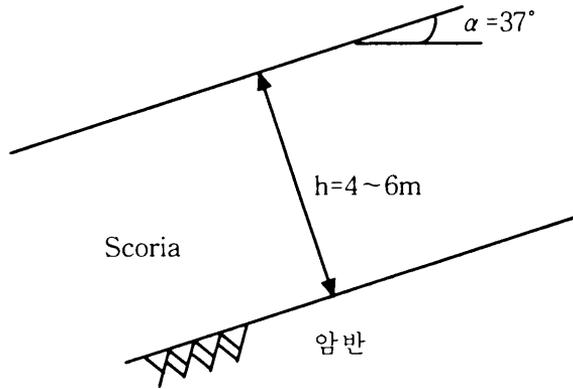


Fig. 6.4 Example

$h = 4 \sim 6\text{m}, \alpha = 37^\circ, \gamma_{sat} = 1.74 \text{ t/m}^3, c' = 1.26 \text{ t/m}^2, \phi' = 41.46^\circ, a = 2.08, b = 0.59$

일반적으로 산사태나 사막지대의 파괴는 얇은 표층에서 파괴가 일어나는데 이때의 안전율을 Mohr - Coulomb의 파괴기준과 Power Function의 파괴기준으로 비교하면 다음과 같다.

이 때 지반사면의 안전율은 다음과 같다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \tag{6.4}$$

임이의 깊이 h에서 발생한 전단응력  $\tau_m$ 은  $\tau_m = h \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin \alpha$ .

Mohr-Coulomb

$$F = \frac{c' + h \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'}{h \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin \alpha} \tag{6.5}$$

Power Function

$$F = \frac{a \cdot P_a \cdot (h \cdot \gamma_b \cdot \frac{\cos \alpha}{P_a})^b}{h \cdot \gamma_{sat} \cdot \sin \alpha} \quad (6.6)$$

깊이에 따른 Mohr - Coulomb과 Power Function의 안전율은 다음과 같다.

Table. 6.1 깊이에 따른 안전율

Depth(m)	Mohr - Coulomb	Power Function
0.5	2.91	1.93
1	1.70	1.46
1.5	1.30	1.23
2	1.10	1.10
2.5	0.98	1.00
3	0.90	0.93
3.5	0.84	0.87
4	0.80	0.83
4.5	0.77	0.79
5	0.74	0.76
5.5	0.72	0.73
6	0.70	0.70
7	0.67	0.66
8	0.65	0.62
9	0.63	0.59
10	0.62	0.57

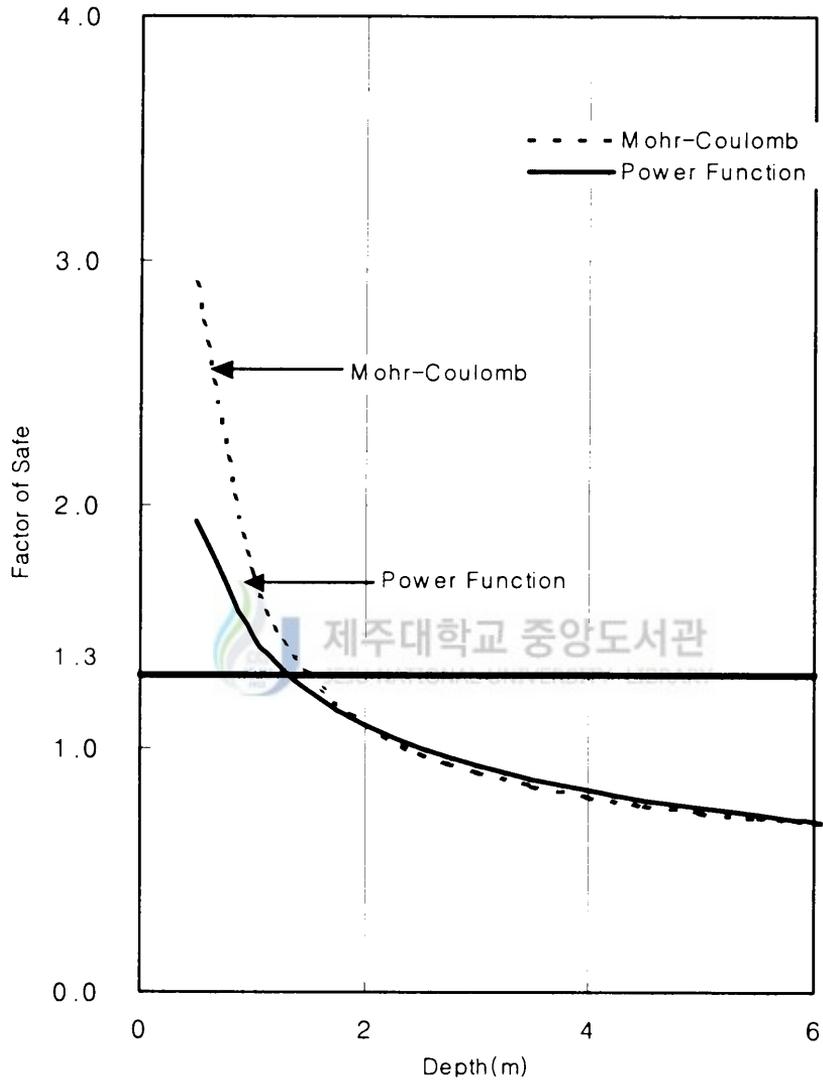


Fig. 6-5 깊이에 따른 안전율

위의 그림들로 보아 낮은 깊이에서는 Mohr - Coulomb의 안전율이 과대 산정 되고 있으며, 깊이가 깊어질수록 사면 안전율은 작아짐을 알 수 있다.

## VI-2. 종류에 따른 특성

송이는 색상에 있어서 적갈색, 황갈색, 흑색 및 암회색으로 크게 구별할 수 있다. 이 장에서는 우선 이러한 송이들 중 암회색과 적갈색 송이에 대한 강도 특성을 비교해 보고자 한다. 제주도에서 가장 많이 볼 수 있는 적갈색 송이는 주로 중산간 지역에 많이 분포하고 있으며 암회색 송이는 해안지역에서 분포하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6.6은 암회색 송이와 적갈색 송이에 대한 직접전단시험에서 초기간극비를 각각 평균 1.55와 1.58로 하여 두 결과를 비교하였다. 그림에서 점선은 Mohr - Coulomb의 파괴기준에 의한 파괴 포락선이고 실선은 Power Function에 의한 파괴 포락선을 나타내고 있으며, ■는 암회색 송이의 결과를 ▲는 적갈색 송이의 결과를 도시한 것이다. 그리고 점선에 대한 y축의 교점이 Mohr - Coulomb의 점착력  $c$  값이고 기울기는 내부마찰각  $\phi$  값을 나타낸다. 그림에서 ■로 표시한 암회색 송이의 전단강도가 ▲로 표시한 적갈색 송이의 전단강도 보다 훨씬 큰 것으로 나타나고 있다. 또한 이를 Mohr - Coulomb의 규정을 이용하여 비교하여 보면 암회색송이는 앞에서 검토한 바와 같이 점착력  $c$ 는  $1.26\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각  $\phi$ 는  $41.46^\circ$ 인 반면에 적갈색 송이의 점착력과 내부마찰각은 각각  $0.58\text{kg/cm}^2$ ,  $29.44^\circ$ 인 것으로 나타나, 적갈색 송이의 전단강도가 암회색 송이에서 보다 점착력은  $0.68\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각은 약  $12^\circ$  적은 것으로 나타나고 있다. 한편 Power Function을 이용하였을 경우도 이 식을 지배하는 지수  $b$ 의 값이 암회색 송이에서 크게 발생하고 있다. 이들의 결과는 Table 6.2에 정리된 바와 같다.

한편, 적갈색송이에 대한 Mohr - Coulomb식과 Power Function을 비교하여 보면 약  $2\text{kg/cm}^2$ 까지는 Mohr-Coulomb식이 과대산정 되는 것으로 나타났으며 그 이후는 Power Function이 조금 높은 것으로 나타나고 있다.

Fig. 6.7은 함수비가 강도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 전단상자에 시료를 넣고 물을 담아 2시간 동안 완전 수침 시킨 후, 이 상태를 유지하면서 연직응력과

전단응력을 작용시켰다. 이때 초기간극비는 Fig. 6.6에서와 동일하며 시료가 완전 포화되었다고 가정한다면 포화단위중량은 암회색 송이와 적갈색 송이가 각각  $1.74\text{t/m}^3$ 과  $1.66\text{t/m}^3$ 으로 산정 된다. 그리고 이때 발생 가능한 간극수압은 입자의 직경이 크고 간극이 넓어 무시하였다. 그림에서 전단강도는 Fig. 6.6에서와 같이 암회색 송이에서 훨씬 큰 것으로 나타나고 있으며 이들에 대한 결과는 Table 6.2에 정리되어 있다. 그러나 내부마찰각의 차이는 건조한 경우에서 보다 감소하여 약  $5.5^\circ$ 의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 함수비에 따른 각 입자별 전단강도의 변화는 차후 논의 하고자 한다.

Table 6.2 Comparison of Failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria

	Mohr-Coulomb		Power Function	
	c	$\phi$	a	b
Redish Brown Scoria(Dry)	0.58	29.44	0.9826	0.8032
Dark Grey Scoria(Dry)	1.26	41.46	2.0810	0.5918
Redish Brown Scoria(Sat)	0.71	34.75	1.3361	0.6909
Dark Grey Scoria(Sat)	1.38	41.12	2.1635	0.5823

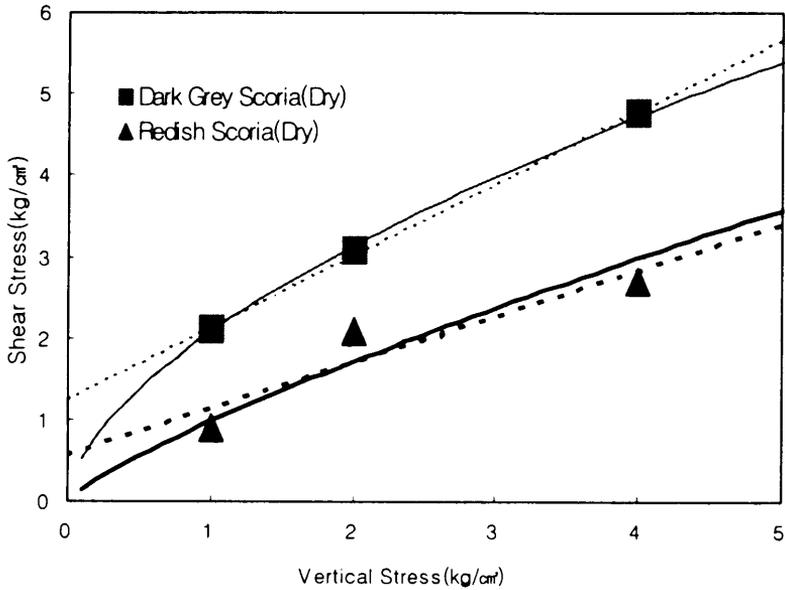


Fig. 6.6 Comparison of Failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria

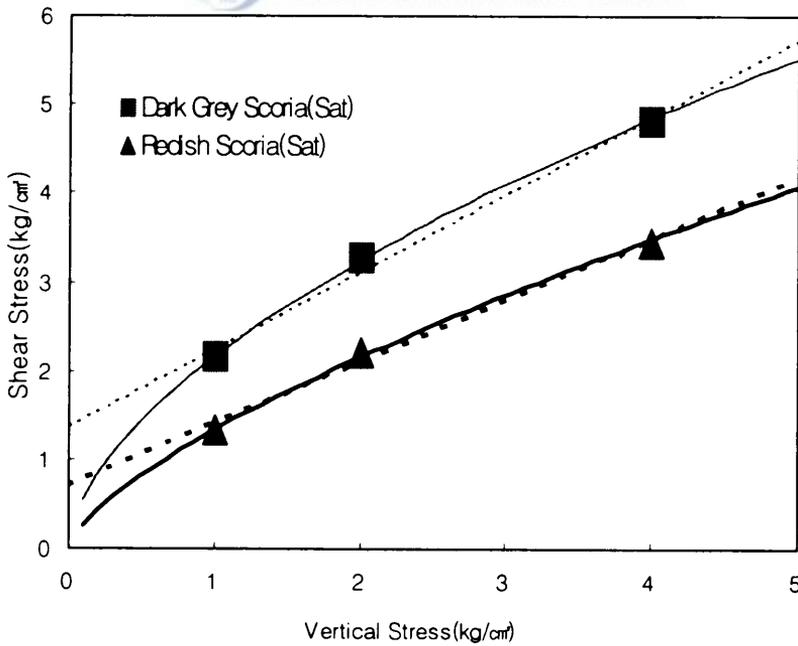


Fig. 6.7 Comparison of Failure Strength Between Dark grey Scoria and Redish brown Scoria

### VI-3. 입자의 파쇄 특성

송이는 입자가 암석과 같이 매우 커다란 입자부터 No. 200체를 통과하는 아주 미세한 입자까지 매우 다양한 입도를 갖고 있다. 그리고 암회색 송이와 적갈색 송이의 비중이 2.88과 2.71인데 반해 밀도가 느슨한 경우의 포화단위중량은 각각  $1.74\text{t/m}^3$ 과  $1.66\text{t/m}^3$ , 건조단위중량은  $1.13\text{t/m}^3$ 과  $1.05\text{t/m}^3$ 로서 특히 적갈색 송이의 경우 다른 흙에 비해 아주 낮은 포화단위중량 값과 건조단위중량 값을 보이고 있다. 이는 적갈색 송이가 입자 속에 특히 많은 기공을 내포하고 있는 것으로 설명될 수 있으며 전단에 의한 마모와 파쇄도가 훨씬 높을 것으로 추측할 수 있다.

이 절에서는 앞에서 비교한 밀도가 느슨한 경우 즉 초기간극비가 높은 경우의 암회색 송이와 적갈색 송이에 대한 파쇄 특성을 비교하여 설명하고자 한다. 본 실험에 사용된 시료는 모두 4.75mm이상 9.52mm이하의 입자에 대해서만 실험을 실시하였다.

Fig. 6.8은 건조상태의 두 시료에 대한 직접전단시험을 실시한 후의 시료에 대해 입도분석시험을 실시한 결과이다. 그림에서 암회색 송이의 경우는 마모나 파쇄에 의해 No. 4체(4.75mm)를 통과하는 것이 약 5%에서 7% 사이로 나타나고 있고, 적갈색 송이는 No. 4체를 통과하는 것이 약 20%에서 30% 사이를 보이는 것으로 나타나고 있어 파쇄도가 적갈색 송이의 경우, 암회색 송이에 비해 훨씬 높게 나타나고 있다.

한편 Fig. 6.9는 포화된 시료에 대한 파쇄도를 알기 위해 입도분석시험을 실시한 것으로, 여기서는 입도분석을 위해 직접전단시험 후 배수를 실시하고, 잔류 시료를 수거하여 노건조시킨 후 체분석을 실시하였다. 그리고 배수시 일부 미세입자가 물과 함께 배출될 수도 있으나 그 양은 미세할 것으로 판단하여 잔류시료에 대해서만 분석하였다. 그림에서 암회색 송이의 No. 4체(4.75mm)를 통과율은 약 4% 전후로 건조한 경우 보다 파쇄도가 약간 낮게 나타나고 있다. 적갈색 송이의 경우에서도 7% 내지 15%로 건조한 것에 비해 훨씬 적게 나타나고 있다.

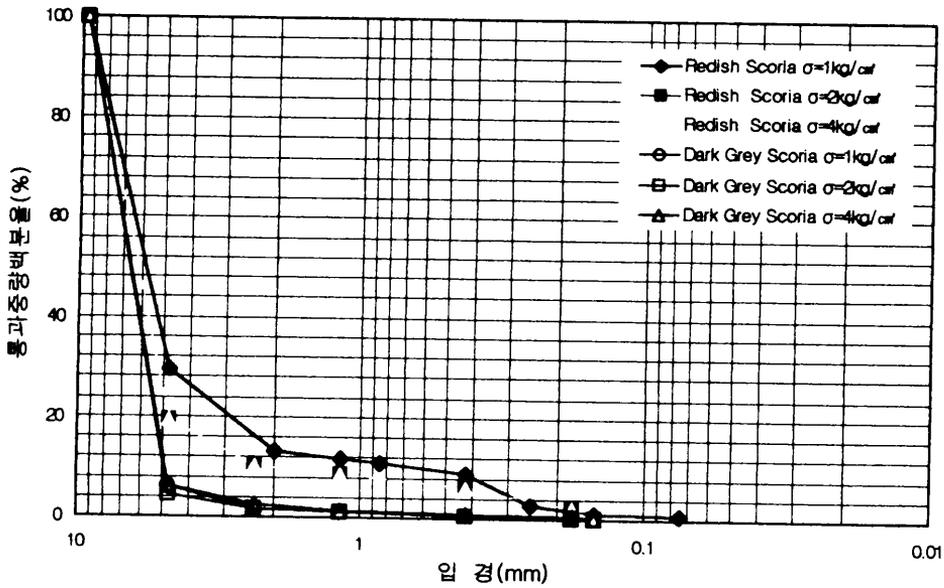


Fig. 6.8 파쇄도의 영향 (Dry 상태)

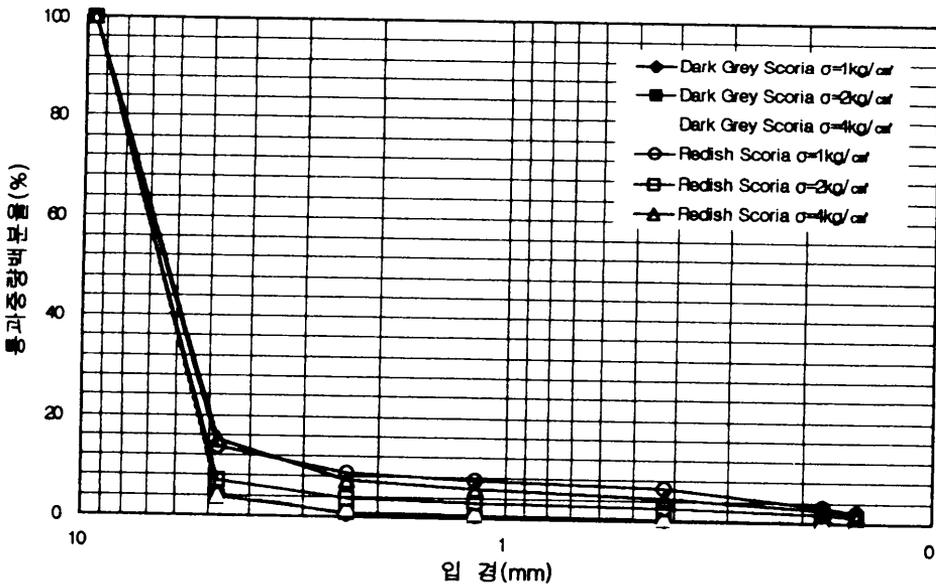


Fig. 6.9 파쇄도의 영향 (Sat 상태)

Fig. 6.8과 Fig. 6.9로부터 송이의 파쇄도는 포화된 경우 보다 건조시 높은 것으로 나타나고 있다. 이는 포화시료의 경우 간극사이에 내포되어 있는 물이 전단시 강도에 많은 영향을 미치는 입자들 상호간의 맞물림 현상을 보다 부드럽게 하여 입자사이의 마모를 미끄러짐으로 유도하는 것으로 추측되며, 이는 전단강도에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그러므로, 적갈색 송이는 암회색 송이에 비해 파쇄도가 훨씬 높은 것을 알 수 있다.

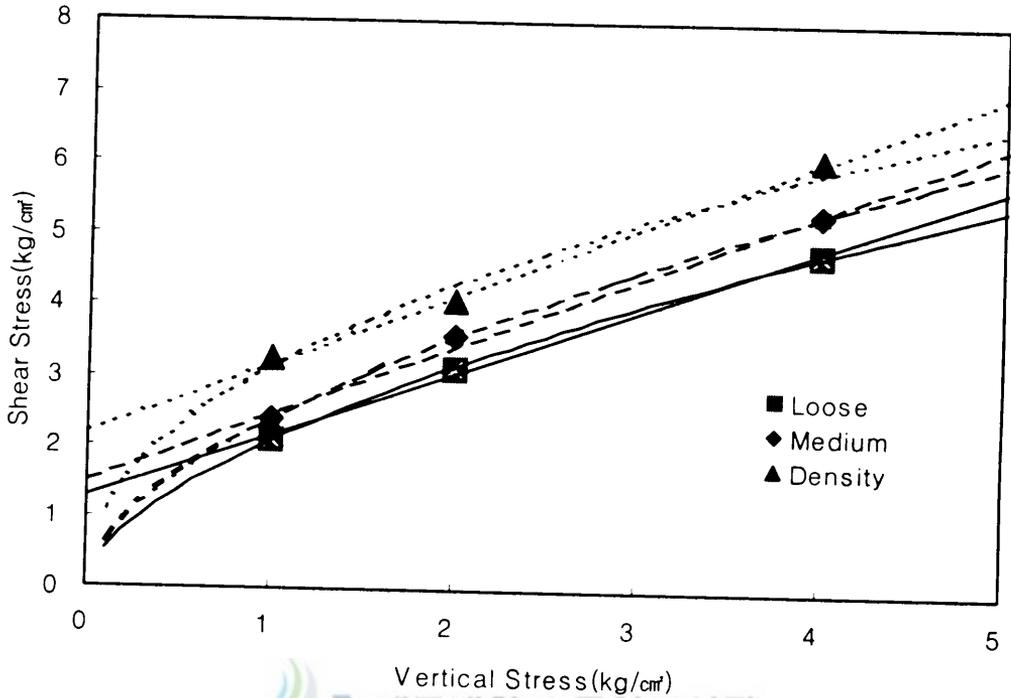
한편 암회색 송이는 파괴강도가 높고 파쇄도가 낮는데 반해 적갈색 송이는 파괴강도가 낮고 파쇄도가 훨씬 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 제주도에 가장 많이 분포하고 있는 적갈색 송이를 본 시험에서 사용한 적갈색 송이가 대표할 수는 없으나 건설공사 현장에서 항상 이러한 부분에 고려를 하여야 할 것으로 사료된다. 또한 본 실험에 사용된 적갈색 송이의 상부에 구조물이 설치되는 경우, 건조시는 상부하중에 의해 많은 파쇄가 발생할 수 있으며, 우천시는 넓은 간극사이로 파쇄된 미세입자가 유실될 수 있으며 이러한 경우 점진적인 침하형태를 보일 수도 있다.



#### VI-4. 밀도에 따른 강도특성

송이의 밀도에 따른 강도변화를 고찰하기 위하여 암회색 송이에 대해 송이의 건조단위 중량을 변화시켜 실험을 실시하였다. 입도가 느슨한 경우에는 전단상자 위에서 시료를 약 1kg 정도를 골고루 분포되게 부어 건조단위중량  $\gamma_d$ 값이 약 1.13 kg/cm<sup>3</sup>이고 초기 간극비  $e_0$ 값이 1.55가 되게 시료를 제작하였으며, 중간정도 느슨한 경우에는 시료를 약 0.6kg씩 약 10회 정도를 부어 1회 부을 때마다 다짐봉만의 무게를 사용하여 골고루 퍼지도록 하여  $\gamma_d$ 값이 약 1.18kg/cm<sup>3</sup>이고  $e_0$ 값은 1.44로 되게 하였고, 조밀한 경우에는 중간정도 밀도를 만들 때와 동일한 방법을 사용하되 다짐봉으로 시료를 도포 할 때마다 골고루 두드려서 만들었다.  $\gamma_d$ 값이 약 1.28 kg/cm<sup>3</sup>이고  $e_0$ 값은 1.25로 만들었다. 이 때 입자들이 부서지지 않도록 주의하여야 한다. 일반적으로는 우레탄망치를 박스 주위로 잘 두드려야 하나 박스가 대형이고 중량의 철로 제작되어 있으므로 특수 제작된 다짐봉을 사용하였다.





제주대학교 중앙도서관  
 Fig. 6.10 Comparison of Failure Strength  
 Dark grey Scoria

Fig. 6.10은 1 kg/cm<sup>2</sup>, 2 kg/cm<sup>2</sup> 및 4 kg/cm<sup>2</sup>의 연직응력을 각각 작용시키고 상대밀도를 느슨한 경우, 중간 그리고 조밀한 경우에 대하여 전단응력과 연직응력에 대한 그래프로 나타내었다. 실험은 초기간극비에 따라 각각 3회씩, 총 9회를 실시하였으며, 이들 결과를 느슨함, 중간, 조밀함의 순으로 그림에서 각각 ■, ◆, ▲로 도시하였으며 이들은 모두 연직응력에 파괴전단응력값을 나타낸 것이다. 그림에서 파괴강도는 초기간극비가 1.25의 경우에 가장 크게 나타났으며 초기 간극비가 증가함에 따라 흙의 내부마찰각은 감소하고 있다.

Table 6.3 Comparison of Failure Criteria For Dark grey Scoria

	Mohr-Coulomb		Power Function	
	c	$\phi$	a	b
Loose	1.26	41.46	2.0810	0.5918
Medium	1.52	43.79	1.3361	0.6909
Density	2.21	43.92	2.1635	0.5823

Table 6.3은 그림에 도시한 Mohr-Coulomb식과 Power Function에 대한 각각의 계수를 정리한 것이다. 표에서 점착력 c는 조밀할수록 커지고, 내부마찰각  $\phi$ 의 값도 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 지수함수에서는 기울기 a의 값은 줄고 지수 b의 값은 증가하고 있음을 보여주고 있다.

## VI - 5. 함수비 변화에 따른 분석

송이의 함수비 변화에 따른 강도 변화를 고찰하기 위하여 이미 앞에서 설명한 바와 같이 대형직접전단시험기의 전단상자에 물을 가득 채운 상태로 직접전단시험을 실시하였다. 우선 공시체 제작은 암회색 송이와 적갈색 송이 모두에 있어서 건조 시 느슨한 상태와 동일하게 초기 간극비를 1.55에서 1.58사이에 유지되게끔 하여 건조한 상태에서 제작하였다. 그리고 공시체 제작후 전단상자에 물을 상부 다공질 판 이상 차도록 주입하고, 공시체를 2시간 동안 물 속에 수침을 시킨 후, 연직하중을 작용시켜 전단을 실시하였다. 이때 공시체가 물에 완전 포화되었다고 가정한다면 암회색 송이와 적갈색 송이의 포화단위중량은 각각  $1.74\text{t/m}^3$ 과  $1.66\text{t/m}^3$ 이다. 또한 연직하중과 전단력 작용시 공시체내에서 간극수압은 발생하지 않는 것으로 간주하였다.

Fig. 6.11은 암회색 송이에 대한 건조 시와 포화시의 전단변형에 대한 전단응력을 도시한 것으로 실선은 건조 시를 나타내고 있으며 점선은 포화 시에 대한 것이다.

그림에서 파괴강도는 연직응력이  $2\text{ kg/cm}^2$ 인 경우는 포화시가 건조한 상태보다 약간 높은 것으로 나타나고 있으며,  $1\text{ kg/cm}^2$ 과  $4\text{ kg/cm}^2$ 에서는 미세하게 포화시가 크게 나타나고 있으나 큰 차이는 보이지 않고 있다. 그리고 파괴시 전단변형률은 연직응력이  $2\text{ kg/cm}^2$ 인 경우에는 별 차이가 없으나  $1\text{ kg/cm}^2$ 과  $4\text{ kg/cm}^2$ 인 경우에는 건조한 경우가 포화시 보다 조금 많이 발생하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 6.12는 앞의 그림의 결과를 연직응력에 대한 전단강도의 형태로 도시한 것이다. 여기에서는 암회색 송이의 전단강도는 건조 시와 포화시 거의 비슷한 것으로 나타나고 있다.

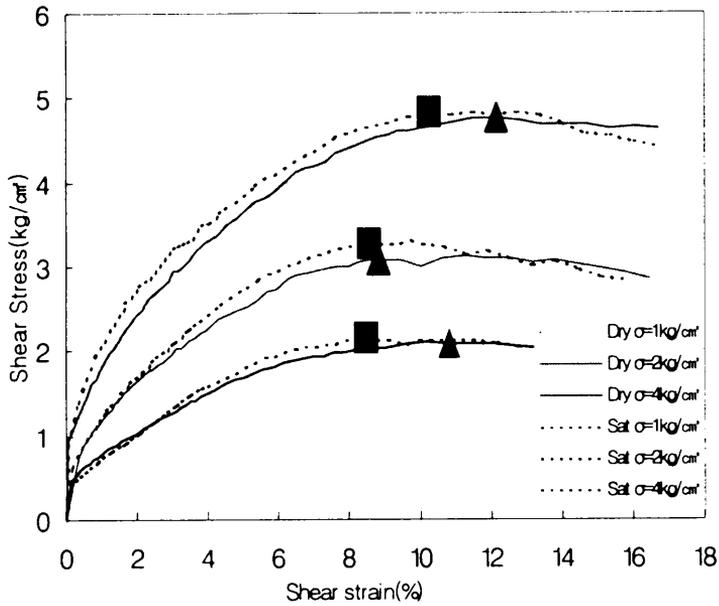


Fig. 6.11 암회색 송이에 대한 건조시와 포화시의 전단변형에 대한 전단응력

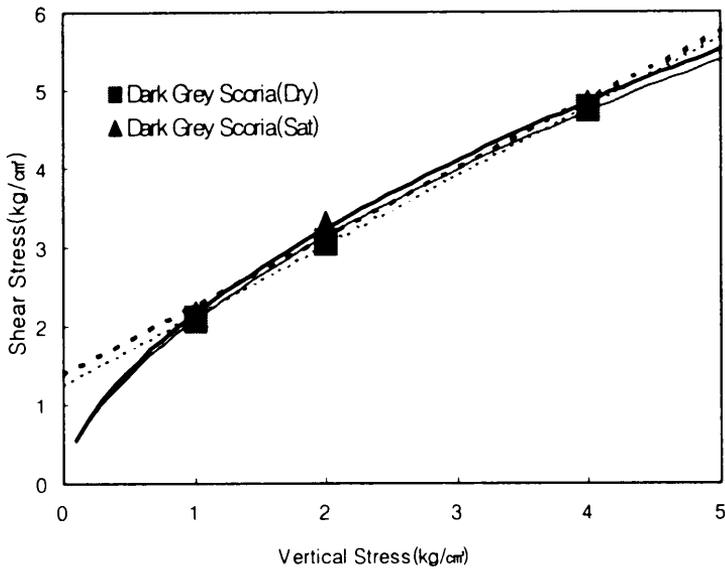


Fig. 6.12 암회색 송이의 건조시와 포화시의 전단강도

Fig 6.13은 적갈색 송이에 대한 건조 시와 포화시의 전단변형에 대한 전단응력을 도시한 것으로 실선은 건조 시를 나타내고 있으며, 점선은 포화 시에 대한 것이다. 그림에서 파괴강도는 연직응력이 2 kg/cm<sup>2</sup>인 경우에는 포화시가 건조시 보다 조금 큰 것으로 나타나고 있으나, 1 kg/cm<sup>2</sup>과 4 kg/cm<sup>2</sup>인 경우에는 포화시가 건조 시 보다 높은 것으로 나타나고 있다.

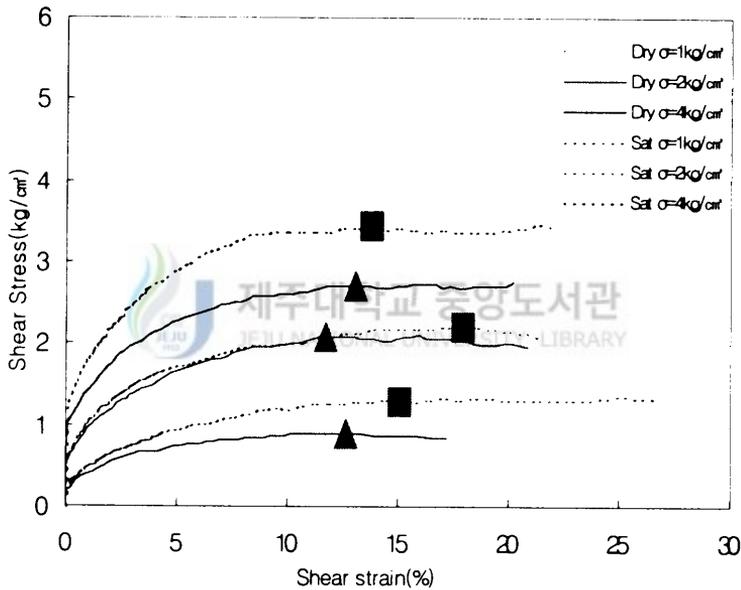


Fig. 6.13 적갈색 송이에 대한 건조시와 포화시의 전단변형에 대한 전단응력

Fig. 6.14는 앞의 그림의 결과를 연직응력에 대한 전단강도의 형태로 도시한 것이다. 여기에서는 적갈색 송이의 전단강도는 건조 시와 포화 시 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 여기서 포화시의 내부마찰각은 약 34.75°로 나타나고 있는 반면 건조 시는 단지 29.44°로서 내부마찰각에서 5°이상의 차이를 보이고 있다.

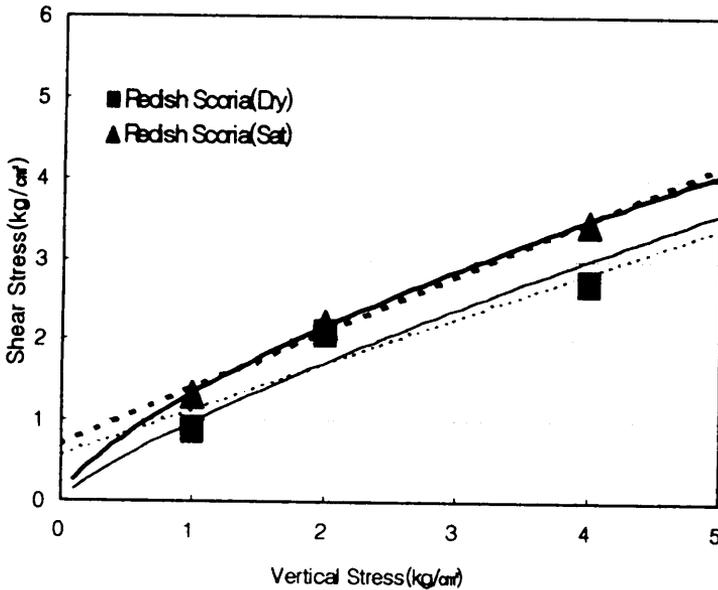


Fig. 6.14 적갈색 송이의 건조시와 포화시의 전단강도

적갈색 송이에 대해서 포화시의 전단강도가 건조시 보다 훨씬 크게 나타나는 것을 검토하기 위해 적갈색 송이에 대해 연직하중을  $1 \text{ kg/cm}^2$  작용 후 연직변위를 24시간 동안 측정하는 압축시험(Compression Test)을 실시하였다.

Fig. 6.15는 적갈색 송이에 대한 압축시험의 결과를 도시한 것으로 건조한 시료는 하중작용 초기와 24시간 후 변형에 있어서 큰 차이를 보이고 있지 않은 반면에, 포화 시는 하중작용 초기에도 건조 시에 비해 약 2배의 침하량을 보이고 있으며 시간에 따라 변형량도 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 직접전단시험과 관련시키면 전단력을 작용하기 전 연직하중이 건조시료와 포화시료에 다르게 작용하게 된다. 공시체 제작에 있어서 연직하중을 작용하기 전, 초기간극비는 동일하게 하였으나 전단력이 작용하는 시점에서는 연직변위의 차이에 의해 건조 시와 포화시의 간극비가 많은 차이를 보이게 되며 연직변위가 많이 발생하는 포화시료에서 간극은 건조시 보다 작아지게 될 것이다. 따라서 이와 같은 간극비의 차이에 의해 포화시료의 전단강도가 건조시 보다 크게 발생할 것으로 판단한다. 그리고 이러한 강도의 차이는 파쇄도에 의한 영향도 발생할 수 있을 것으로 생각된다.

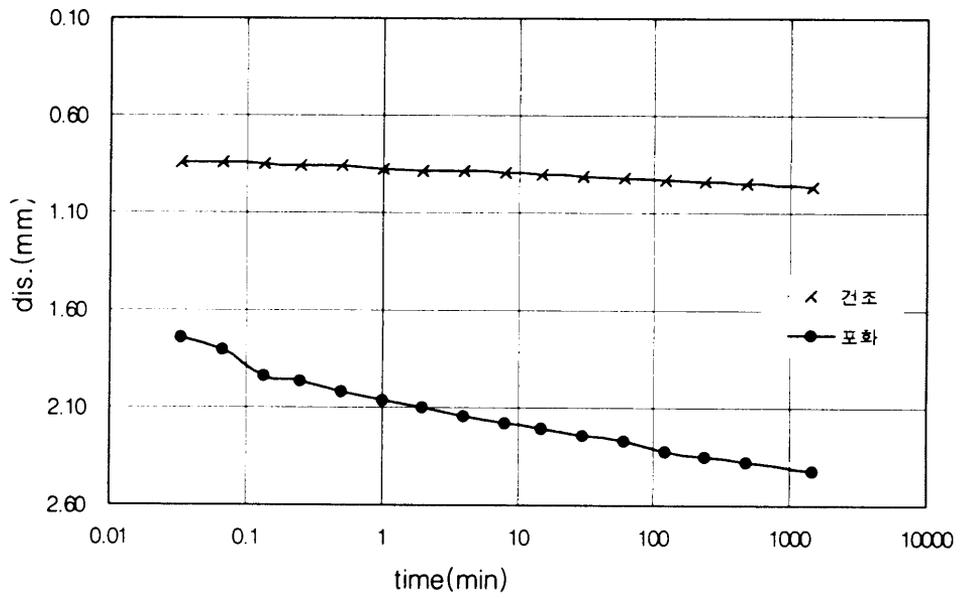


Fig. 6.15. Redish Brown Scoria of Compression Test



## VI. 결 론

제주도내 송이의 강도특성을 규명하기 위하여 우선 제주도의 지질구조와 특성 및 본 연구에서 수행하고자 하는 송이(Scoria)의 특성을 위해 이미 보고된 자료들로부터 제주도의 지질과 송이의 물리-화학적 특성을 검토하였다. 또한 송이의 공학적 특성을 규명하기 위한 실내시험이 수행되었으며, 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제주도는 알칼리 현무암에서 조면암류에 이르는 비교적 다양한 화산암 류가 산출되는 지역으로 그 형질에 있어서 Pathogene와 Aa 용암류로 구분할 수 있으며, 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 송이는 색상에 따라 적갈색, 황갈색, 암회색 및 흑색 송이의 4종으로 크게 분류할 수 있고, 송이의 분포를 보면 적갈색 및 황갈색, 흑색, 암회색 순으로 분포하고 있다고 검토되었다.
2. 본 연구에 사용된 대형직접전단시험기는 제주도에 널리 분포하고 있는 다양한 입자크기의 송이들 중 직경 5cm정도의 시료에 대해서도 시험이 가능하게 하였으며, 본 연구에서는 단면마찰계수를 0.6으로 결정하였다.
3. 송이에 대한 강도시험결과로부터 송이의 강도는 Moor-Coulomb의 파괴규준을 적용시켰을 경우 암회색의 경우 느슨한 밀도에서 점착력이  $1.26 \text{ kg/cm}^2$ , 내부마찰각은  $41.46^\circ$ 인 것으로 나타나, 일반적으로 흙과 같은 마찰물질의 파괴포락선은 Mohr-Coulomb 규준의 직선이 아니라 포물선의 형태로 제시되고 있다. 따라서 송이의 파괴강도를 위해서는 Mohr-Coulomb 직선형태의 규준보다는 비선형 형태로 근사화 할 경우 Power Function으로 접근함이 타당할 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서 사용한 암회색 송이와 적갈색 송이에 대해 같은 건조밀도에 대한 파괴강도를 비교한 결과, 암회색의 경우 점착력이  $1.26 \text{ kg/cm}^2$ , 내부마찰각은  $41.46^\circ$ 인 것에 반해 적갈색송이는 점착력이  $0.58 \text{ kg/cm}^2$ , 내부마찰각은  $29.44^\circ$ 로 나타나, 적갈색 송이의 강도가 암회색 송이에서 보다 점착력은  $0.68 \text{ kg/cm}^2$ , 내부마찰각은 약  $12^\circ$  적은 것으로 보아 암회색 송이의 전단강도가 적갈색 송이의 전단강도보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다.
5. 송이의 입자의 파쇄특성을 비교하기 위하여 암회색 송이와 적갈색 송이를 건조상태와 포화상태의 두 시료에 대한 직접전단시험을 실시한 후의 시료에 대해 입도 분석을 실시한 결과 파쇄특성을 살펴보면 적갈색 송이가 암회색 송이에 비해 훨씬 높게 파쇄 됨을 알 수 있었다.
6. 송이의 밀도에 따른 강도변화를 고찰하기 위해 암회색 송이에 대해 건조단위중량을 변화시켜 실험을 실시한 결과 파괴강도는 초기 간극비가 1.25, 건조단위중량  $1.28 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에 가장 크게 나타났으며, 초기 간극비가 증가함에 따라 흙의 내부마찰각은 감소하고 있고, 건조단위중량의 클수록 점착력은 커지고, 내부마찰각의 값도 증가하고 있음을 알 수 있었다.
7. 함수비에 따른 강도변화를 고찰하기 위하여 암회색 송이와 적갈색 송이에 대한 건조 시와 포화시의 전단변형에 대한 전단응력을 도시한 결과 암회색 송이는 파괴강도가 포화시가 미세하게 크게 나타나고 있고, 전단강도는 건조 시와 포화시 거의 비슷하게 나타나고 있었다. 적갈색 송이의 파괴강도는 포화시가 높은 것으로 나타나고 있고, 전단강도는 건조 시와 포화시 많은 차이를 보였음을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양연구소 연구보고 제19권, pp. 25 - 38.
2. 김상호, 1963, 제주도의 자연지리, 대한지리학회지 제1권.
3. 손치무, 1968, 한라산 학술조사보고서, 문화공보부.
4. 원종관, 1975, 제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교, 이학논총 제1집.
5. 김봉균, 1972, 서귀포층의 층서 및 고생물학적 연구, 손치무 박사 송수 기념 논문집, pp. 169 - 187.
6. 이문원, 1994. 제주도 형성사와 지질구조, 대한지하수환경학회, 전략광물자원연구센터 공동 학술심포지엄 논문집, 제주도 지하수원의 환경학적 보전과 개발이용, pp. 54 - 74.
7. 윤선, 고기원, 김인탁, 1995. 제주도 형성사, 제주도지 제98호, pp. 148 - 164.
8. 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존 특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문 pp. 39 - 47
9. 송시대, 2000, 제주도 암괴상 아아 용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문 pp. 6 - 31
10. 황한석, 1990, 제주도산 송이의 토질특성에 관한 실험적연구, 중앙대학교 석사학위논문.
11. 건설부 국립건설연구소, 1979, 제주도산 송이의 공학적 특성 연구보고서, 건설연구소자료 No.395.
12. 건설부 국립건설연구소, 1981, 제주도산 송이의 건설재료로서 이용 가능성 검토, 건설연구소자료 No.421.
13. 오재화, 조중제, 김상규, 1979, 제주도산 송이의 공학적 특성, 대한토목학회 논문집 제27권 제6호.

14. 原口九萬, 1928, 濟州道 地質, 朝鮮地質調查要報, 第10卷 1號.
15. Braja.M.Das, 2000, Principles of Foundation Engineering, 구미서관 pp. 572 - 573.
16. Matuoka, H and Nakai, T. 1977, Stress-Strain Relation of Soil based on SMP, Characteristic under Three Different Principal Stress, Proc. of Special Session 9, 9th ICSMFE, pp. 153 - 162
17. Lade, P. V. 1988, Failure Criterion for Friction Materials, Mechanics of engineering materials, C. S. Desai and R. H. Gallagher, eds., John Wiley and Sons. Inc., New York, N. Y., pp. 385 - 402
18. Yoon, Sun, 1997. Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. Tectonophysics 281, pp. 53 - 70.



## 감사의 글

이 논문이 완성되기까지 여러 차례 검토하고 학문에 대한 많은 지도와 격려를 해주신 남정만 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러, 세심하게 검토하고 지적해주신 박상렬 교수님, 김상진 교수님, 학기동안 많은 가르침을 주신 양성기 학장님, 김남형 교수님, 지금은 교환교수로 도미 중이신 이병걸 교수님께도 감사드립니다.

제주산업정보대학에 계시면서도 본 논문에 아낌없는 조언과 격려와 용기를 북돋아 주신 강수웅 교수님, 강용식 교수님께도 감사드립니다.

또한, 본 논문 완성에 많은 시간과 노력을 기울여준 지반공학 연구실의 조영웅, 오동일, 소재관, 김홍민 군에게도 고마움을 전합니다.

대학원 과정을 보람있고 활기차게 보낼 수 있도록 서로 도움을 주며 지내온 동기들과 선·후배들에게도 감사드립니다.

본 논문 막바지 완성단계에 들어설 때 묵묵히 시간을 할애 해준 이왕석 부장님, 양영남 차장님 이하 직원들에게도 감사드립니다.

힘겨워 할 때 항상 따뜻한 정으로 힘과 용기를 주신 부모님, 형제들 내외분, 조카들, 여러 해 동안 찾아보이지 못함을 이 글을 통해서 사과 드리면서 지금은 노환으로 누워 계신 처 조모님, 장인 장모님, 처가 형제들 내외분, 조카들에게도 감사드립니다.

마지막으로 때늦은 나이에 학문의 길을 갈 수 있도록 항상 따뜻하게 한결같이 뒷바라지에 여념이 없는 아내 정애, 내게 항상 기쁨을 안겨주는 소중한 나의 꿈돌이 건호, 귀염둥이 유현이와 함께 이 자그마한 결실의 기쁨을 나누고자 합니다.