

# 제주도의 지질 및 송이의 공학적 성질

남정만  
제주대학교 토목환경공학전공 교수

## 1. 서론

제주도는 신생대 제 3기~4기에 형성된 화산섬으로서 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 형성되어 지리적으로 한반도의 최남단에 위치하고 있으며, 우리나라에서 가장 큰 섬이다.

섬 중앙의 한라산을 중심으로 쉘드 화산체를 이루고 있는 제주도는 동서의 길이가 약 74km, 남북의 길이가 약 34km 되며 섬 전체 면적이 1,825km<sup>2</sup>인 타원형의 모양을 하고 있다. 제주도의 중앙부에는 수차례의 화산활동에 의해 형성된 약 1,950m 높이의 한라산 정상에는 지름이 약 575 × 400m, 깊이가 100m에 이르는 분화구가 있으며, 돛상의 조면암이 분화구 주변에 관입 되어 있다. 또한 제주도 전역에는 소위 오름이라 불리는 360여 개의 분석구가 분포하고 있다. 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(남정만, 2000).

현재 제주도는 국제자유도시특별법(2002.4.1)의 시행이후 국제 자유도시 개발 등을 위해 공항, 항만, 도로 등에서 많은 건설공사가 수행되거나 수행될 예정으로 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.

본 자료에서는 제주도에 널리 분포하고 있는 송이 층의 분포, 물리화학적 특성 및 공학적 특성을 조사 분석하여 각종 설계와 시공에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 지질학적 특성

### 2.1 제주도의 지질개요

제주도는 한반도와 일본 열도사이에 있는 대한해협 - 쓰시마해협의 남서쪽에 위치하고 있다. 제주도는 주로 제3기말 플라이오세로부터 제4기 플라이스토세에 걸쳐 일어난 화산활동에 의하여 분출된 알칼리 현무암인 현무암질 용암류로 구성되어 있으며, 소량의 화산성 쇄설암(volcanoclastic rock)으로 분포되어 있다(윤선 외 2인, 1995).

### 2.1.1 기반암

제주도의 기반암은 화산 쇄설암류와 화강암으로 구성되어 있으며, 화산 쇄설암류는 화산성 사암 및 이암, 석영 조면암질 용결 응회암 등으로 이루어져 있다. 화산 쇄설암류의 방사성 동위원소 연령이 측정되지 않아 그 시대는 알 수 없으나, 암질만으로 볼 때는 백악기의 유천층군 혹은 에소세의 왕산층에 대비되는 것으로 추정되며, 화강암의 연령은 581.4Ma, 팔레오세 말기에 해당되며 화산 쇄설암류를 관입 한 것으로 추정된다.

### 2.1.2 제I단계 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 피복되어 있어, 돈내코 현무암은 단지 한 곳에서만 관찰되었고, 상호 조면암은 네 곳에서, 그리고 판포 현무암은 시추 코아 에서만 관찰되어 진다. 이러한 전기 화산 활동의 화산암은 고제주 화산체를 형성하였다. 판포 현무암의 K-Ar 연령은  $2.22 \pm 0.16\text{Ma}$ 로 전기 화산활동시기에 관입한 것으로 추정된다.

### 2.1.3 제II단계 쇄설성 퇴적층

제II단계의 퇴적층은 제I단계 화산활동의 화산암을 부정합으로 덮고 있으며, 하위의 U층(U Formation)과 상위의 서귀포층(Seoguiipo Formation)으로 구분된다.

### 2.1.4 제III단계 화산활동의 화산암

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

## 2.2 지질특성

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 있다.

### 2.2.1 파호이호이의 용암류

파호이호이의 용암류는 점성이 작아 유동성이 크며, 용암류의 표면이 편평하고 매끄러우며, 새끼줄 구조(ropy structure)등이 발달하는 것이 특징이다. 이 용암류는 표면의 두께가 단위 두께에 따라 S-type과 P-type으로 나눌 수 있는데 S-type은 표면이 소용돌이 치은 형태 또는 새끼줄 구조가 발달하는 반면, P-type은 표면이 매우 매끄럽고 두께가 얇은 것이 특징이다. 또한, 이 용암류에는 용암토우(lava toes)라 불리는 수많은 작은 유동 단위들이 발달하는데, 용암토우는 대개 두께가 30cm 이하

이고 길이가 1-2m 정도이며, 폭은 30-50cm 정도이다. 특히, 이 용암류는 점성이 낮기 때문에 50km 이상 까지 유동할 뿐만 아니라 크고 작은 용암판과 용암터널의 발달을 수반한다.

### 2.2.2 아아 용암류

이 용암류는 파호이호이 용암류와는 달리 점성이 커서 표면이 거칠고 상부와 하부에 1-2m 두께의 클린커층을 형성하며 중앙부는 비교적 치밀한 용암상태를 이루는 것이 특징이다. 또한 중앙부의 치밀한 용암으로부터 돌출한 용암판(lava slab)이 상부에 존재하기도 하며 하부에 흐름의 전면부에서 상부의 클린커층이 떨어져 밑면으로 깔림으로써 비교적 두꺼운 클린커층을 형성한다. 아아 용암류의 단위 두께는 통상적으로 1~10m를 나타내며 50km 이하의 유동거리를 나타내나 예외적으로 cascades에서는 80km까지 이동한 사례도 보고된 바 있다.

제주도에 있어서 아아 용암류는 주로 지형경사가 급한 남·북사면을 중심으로 분포하고 있다. 용암류의 단위 두께는 평균 5-10m 이고 상부와 하부에 클린커층이 발달하고 있으며, 기공은 크기가 크고 길쭉하게 신장된 형태를 이룬다. 남·북사면이 지형경사가 급한 이유 중의 하나는 장석 현무암, 휘석 현무암, 장석 현무암, 장석 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 는 아아 용암류 중에서도 주로 암괴로 이루어진 암괴상 아아 용암류(aa rubble flow)란 용암류 내부의 용암판과 용암판 사이의 부분이 유동중에 각력질 암괴 크기로 파쇄되어 표면이 암설류의 양상을 이루는 것을 말한다. 제주도에서 속칭 꽃자왈이라 부르는 지대는 암괴상 아아 용암류의 특징을 잘 보여주고 있다

## 3. 특수성 지질의 종류

### 3.1 꽃자왈

이 지역은 토양층이 매우 빈약하고 경작지로 이용하기가 곤란하며, 잡석들은 대부분 자갈에서 암괴 크기에 이르는 스코리아, 화산탄 및 화산자갈로 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 한라산체의 남·북사면을 제외한 동·서부 지역에 비교적 넓게 분포하고 있다.

- ① 한경 - 안덕 꽃자왈 지대
- ② 애월 꽃자왈 지대
- ③ 조천 - 함덕 꽃자왈 지대
- ④ 구좌 - 성산 꽃자왈 지대

### 3.2 용암동굴

용암동굴은 점성이 낮은 용암의 표면이 고결되고, 내부는 미고결 상태에서 연속적인 흐름이 발생

하여 굳은 표면과 내부 사이에 틈이 생겨 공동이 형성된다. 용암 동굴의 규모는 수 m에서 수 km에 이르며, 용암동굴이 천정의 두께는 수십 cm에서 수 m에 이른다. 용암동굴의 발달 방향은 용암의 흐름에 지배를 받는 관계로 지하 용암동굴의 발달방향 파악은 용이하지 않다. 이와 같은 용암동굴은 일반적으로 파호이호이 용암에 흔히 형성되며, 아아 용암에서는 높은 점성에 의해 규모가 작거나 생기지 않는다. 제주도폭 지역에서는 파호이호이 용암에 해당되는 선흘리 현무암질 안산암과 오등동 현무암에는 용암동굴이 형성되어 있으며, 곳곳에 용암동굴의 붕락에 의한 함몰지가 분포한다.

### 3.3 솜굴

솜굴은 용암동굴이 붕괴되거나 지표면 화산암류에 발달된 수직 절리계 및 균열군 등에 의하여 생성된다. 용암이 냉각·수축할 때 냉각면에 수직인 주상절리 및 구갑상 절리계 분포지에서 또한 용기·침강 작용시 생성된 균열대 분포지역에서도 발달되어 있다. 솜굴은 지하수의 함양에 크게 기여하고 있지만 지표의 오염물질이 여과없이 지하로 쉽게 유입될 수 있는 단점을 동시에 지니고 있다.

### 3.4 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.

### 3.5 용암류 접촉역

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

### 3.6 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 클린커층 이라고 한다. 클린커는 용암류의 표면부에 해당하는 암석이 부서진 것으로 다량의 기공을 함유하고 있는 것이 특징이며, 클린커에 기공이 다량 함유되어 있는 경우 스코리아성 클린커 혹은 클린커성 스코리아라 표현하기도 한다.

### 3.7 스코리아

스코리아로 구성된 분석구는 분출 퇴적 범위는 수 km이며, 분화구에서 3km 지점에는 1cm 크기의 스코리아가 10cm 두께로 층을 이룬다고 한다. 스코리아로 구성된 분석구 분포지역은 스코리아의 물성에 좌우

된다. 스코리아는 기공의 함량의 높고 각력상으로 산출된다. 이러한 조립질층 상위에는 미립질 스코리아가 협재되어 층리를 형성하고 있다. 분석구 가까이에 개설되어 있는 구조물(도로, 건물)은 지하에 분포해 있는 스코리아층의 물성으로 인하여 지반이 불안정하게 되기 쉬우며 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

## 4. 제주도내 송이의 분포 및 강도 특성

### 4.1 제주도내 송이의 분포

송이는 색상에 있어서 적갈색(Redish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 검정색(Black) 및 암회색(Dark-Grey)으로 크게 구별할 수 있다. 이들 송이의 분포의 경우 북제주군 지역에서 일반적으로 적갈색 송이가 20개 지역으로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 이들은 특히 중산간 지역에 많이 있는 것으로 나타났다. 그림 1에서 황갈색 송이가 9개 지역, 흑색 송이가 5개 지역 그리고 암회색 송이가 6개 지역에 분포하는 것으로 나타났으며 암회색 송이는 주로 해안 지역에서 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다.

본 자료에 사용된 시료는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 동쪽지역을 중심으로 조천읍 3개소, 구좌읍 3개소, 성산읍 1개소 남제주군 안덕면 동광리, 북제주군 구좌읍 한동리 둔지봉, 북제주군 구좌읍 송당리 모두 10개 지역에서 송이를 채취하였다. 대부분 오름에서 채취하였으며, 색상별 강도 특성을 알아보기

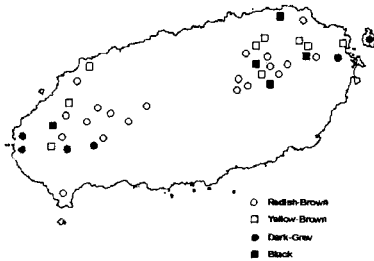


그림 1. 제주도 내 송이의 색상별 분포(윤정수, 1995)

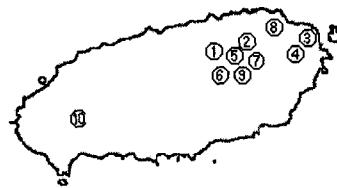


그림 2. 시료 채취지역

표 1. 채취된 대상시료 현황

시료번호	채취장소	색깔	위치
①	다호농장	적갈색	북제주군 조천읍 선흘리
②	북오름	적갈색	북제주군 구좌읍 덕천리
③	지미봉	암회색	북제주군 구좌읍 종달리
④	두산봉	암회색(30%) 황갈색(70%)	남제주군 성산읍 시흥리
⑤	거문오름	암회색(70%) 황갈색(30%)	북제주군 조천읍 선흘리
⑥	부대악	황갈색	북제주군 조천읍 선흘리
⑦	안돌오름	황갈색	북제주군 구좌읍 송당리
⑧	둔지봉	적갈색	북제주군 구좌읍 한동리
⑨	체오름	적갈색	북제주군 구좌읍 송당리
⑩	동광리	암회색	남제주군 안덕면 동광리

위해 서로 다른 색깔의 송이를 채취하였다. 표 1은 채취한 시료에 대한 소재지와 색상을 나타내었다.

## 4.2 송이의 물리- 화학적 특성

채취한 각 지역의 송이시료에 대해 기본적인 물성치를 알아내기 위해 체분석 시험과 비중시험, XRF 시험기를 이용해 화학분석을 실시하였다. 각 시료의 분석결과는 표 2~표 3과 같다.

입도분포의 경우 다호농장, 지미봉, 거문오름, 부대악에서 채취한 시료의 경우 입도분포가 좋은 것으로 나타났으며 비중은 2.54~2.92 사이의 값을 보이고 있다. 표 2에서 균등계수는 4~23, 곡률계수가 0.9~3.28로 나오고 있다. 부대악과 안돌오름, 체오름은 균등계수, 곡률계수가 아주 크게 나오고 지미봉과 두산봉, 동광리가 상대적으로 균등계수가 작은 값을 가졌다.

Table 4.4의 화학분석 결과를 보면  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함이 조금씩 차이는 있으나 전체 화학성분의 70%~77%로 대부분을 차지하고 있다. 황갈색인 안돌오름과 부대악은  $\text{SiO}_2$ 가 31%정도로 작게 나타났고  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 20%정도로 크게 나타나고 있다.

표 2. 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_g$ )

채취장소	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	$C_u$	$C_g$
다호농장	0.37	1.30	3.25	8.78	1.41
북오름	0.54	1.66	5.40	10.0	0.94
지미봉	1.40	4.90	9.00	4.74	1.4
두산봉	0.53	1.05	2.30	4.34	0.9
거문오름	0.85	2.50	6.00	7.06	1.23
부대악	0.15	1.00	3.20	21.33	2.08
안돌오름	0.22	1.90	5.00	22.73	3.28
둔지봉	0.44	2.05	5.10	11.89	1.87
체오름	0.49	2.00	3.55	7.24	2.30
동광리	2.00	4.35	6.75	3.38	1.40

표 3. 송이의 비중

채취장소	Gs
다호농장	2.67
북오름	2.92
지미봉	2.70
두산봉	2.80
거문오름	2.83
부대악	2.54
안돌오름	2.89
둔지봉	2.54
체오름	2.76
동광리	2.88

표 4. 송이의 화학조성

채취장소	$\text{SiO}_2$ wt(%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ wt(%)	$\text{TiO}_2$ wt(%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ wt(%)	MgO wt(%)	CaO wt(%)	$\text{Na}_2\text{O}$ wt(%)	$\text{K}_2\text{O}$ wt(%)	MnO wt(%)	$\text{P}_2\text{O}_5$ wt(%)	LOI wt(%)	Total wt(%)
다호농장	48.20	16.15	2.54	11.18	4.05	7.08	2.61	1.48	0.16	0.48	5.14	99.06
북오름	38.34	19.89	2.93	13.53	4.61	7.31	2.44	0.96	0.22	0.70	9.30	100.22
지미봉	43.51	20.82	2.87	12.61	4.06	5.32	2.12	1.68	0.19	0.48	6.24	99.90
두산봉	44.68	15.93	2.63	13.63	7.84	7.38	2.30	0.93	0.20	0.50	4.07	100.08
거문오름	42.23	20.06	2.96	14.40	3.20	4.46	1.51	0.60	0.30	0.56	9.66	99.93
부대악	31.82	20.18	4.05	20.04	2.72	0.77	0.24	-	0.37	0.54	18.50	99.22
안돌오름	31.27	19.84	4.03	19.31	3.55	1.20	0.31	-	0.41	0.73	18.36	99.00
둔지봉	44.27	16.40	2.62	13.90	7.34	6.44	2.25	1.11	0.17	0.57	5.55	100.6
체오름	44.07	16.50	2.62	13.9	7.36	6.38	2.27	1.10	0.17	0.57	5.23	100.2
동광리	49.0	14.25	2.23	12.98	6.48	8.82	3.18	0.82	0.18	0.39	0.3	98.63

### 4.3 송이의 강도특성

#### 4.3.1 직접전단시험

시료에 대한 대형직접전단시험의 결과는 그림 3~그림 5와 같다.

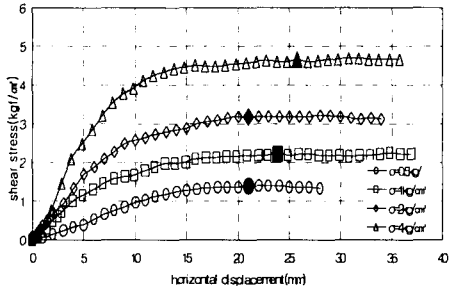


그림 3. 대형직접전단시험(다호농장)

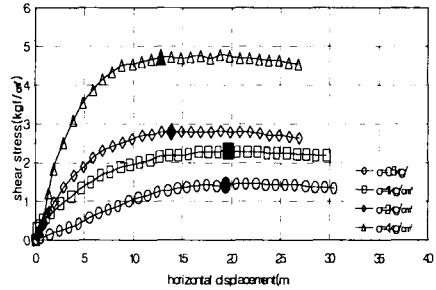


그림 4. 대형직접전단시험(두산농장)

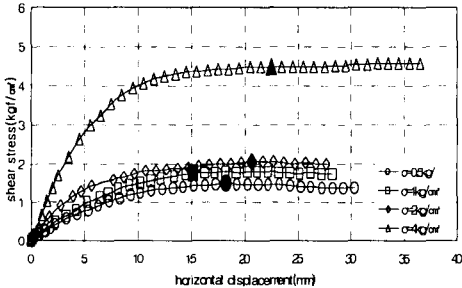


그림 5. 대형직접전단시험(안돌오름)

표 5. 강도정수

채취장소	대형직접전단시험	
	c	$\phi$
다호농장	1.20	41.5
두산봉	1.13	41.9
안돌오름	0.81	40.9

대형직접전단시험의 경우는 파괴점의 형상이 뚜렷이 나타나는 등 표준직접전단시험과는 전혀 다른 거동형상을 보이고 있으며, 일반적인 흙의 거동형상과 각 시험결과와 비교하여보면, 더욱 신뢰도 높은 결과값임을 알 수 있다. 즉 입자의 크기가 다소 크며, 파쇄성을 갖고 있는 송이의 경우 일정크기 이상의 전단상자가 필요함을 알 수 있다. 대형직접전단시험 결과로 전단저항각과 점착력을 구하면 표 5와 같다.

#### 4.3.2 삼축압축시험

각 시료에 대한 삼축압축시험결과 축변형률에 대한 축차응력의 관련그래프는 그림 6~그림 15와 같다. 그림 12는 medium 한 경우 즉 상대밀도( $D_r$ )70% 암회색송이(DongGwang)의 공시체를 구속응력  $0.51\text{kg/cm}^2(50\text{kPa})$ ,  $1.02\text{kg/cm}^2(100\text{kPa})$ ,  $2.04\text{kg/cm}^2(200\text{kPa})$ 으로 변화하여 시험을 실시하였다. 적갈색송이(DoonJibong)와 황갈색송이(DoonJibong)는 구속응력이  $2.04\text{kg/cm}^2(200\text{kPa})$ 일때에 하중전달봉과 공시체 상부 캡과의 이탈로 하여 구속압을  $0.25\text{kg/cm}^2(25\text{kPa})$ ,  $0.51\text{kg/cm}^2(50\text{kPa})$ ,  $1.02\text{kg/cm}^2(100\text{kPa})$ 로 낮추어 medium한 경우에 대해 시험을 실시하였다. 그림 13은 구속응력이  $0.25\text{kg/cm}^2$ 일 때 적갈색과 황갈색 송이의 축변형률에 대한 축차응력을 도시한 관련 그래프이다. 그림 14는 구속응력이  $0.51\text{kg/cm}^2$ 일 때 그리고 그림 15는 구속응력이  $1.02\text{kg/cm}^2$ 일 때의 암회색, 적갈색, 황갈색 송이

에 대한 축변형률에 대한 축차응력 관련그래프이다.

일반적으로 완전포화된 사질토의 경우 점착력의 값은 0이지만 송이의 경우 시료에 따라서 Mohr-Coulomb의 파괴기준으로 정리할 시 점착력이 일부시료에서 보는 것으로 나타났다(Lade, 1988). 이는 송이내의 입도분포에 따른 영향과 더불어 송이의 파쇄성으로 말미암아 높은 구속압 조건 하에서 시료가 일부 파쇄됨으로써 전단변형시 전단저항각이 감소되어 마치 큰 점착력이 발생한 것처럼 보이게 되는 현상으로 판단된다. 따라서, 삼축시험결과를 설계과정에 적용 시 송이의 전단시험결과

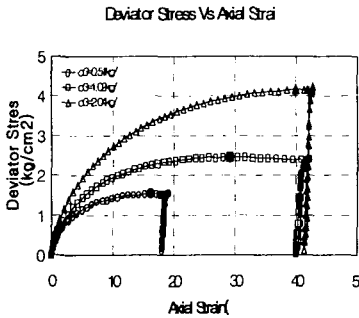


그림 6. 변형률과 축차응력 관계(다호농장)

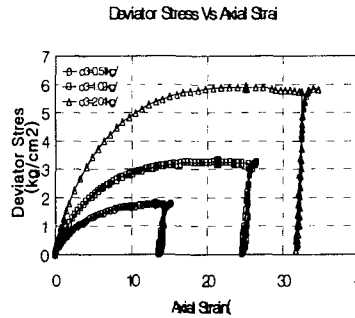


그림 7. 변형률과 축차응력 관계(북오름)

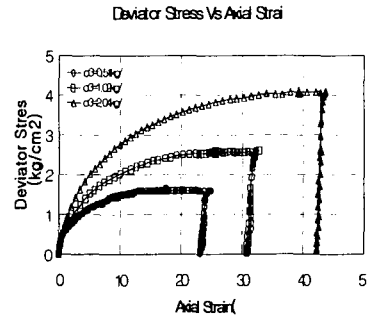


그림 8. 변형률과 축차응력 관계(지미봉)

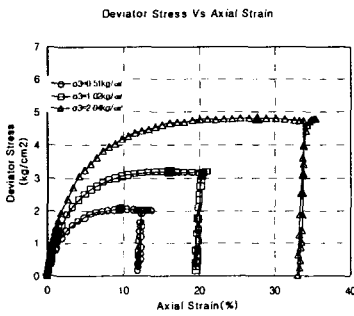


그림 9. 변형률과 축차응력 관계(두산봉)

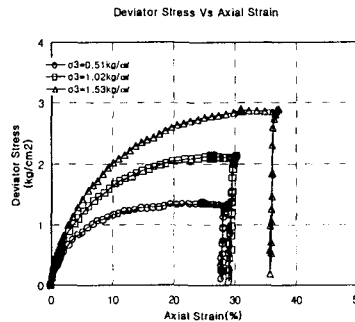


그림 10. 변형률과 축차응력 관계(거문오름)

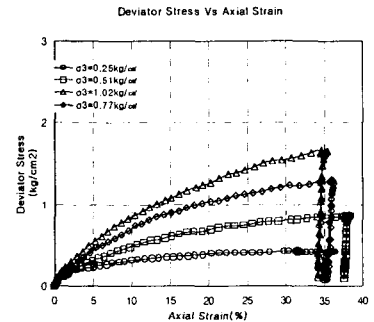


그림 11. 변형률과 축차응력 관계(부대악)

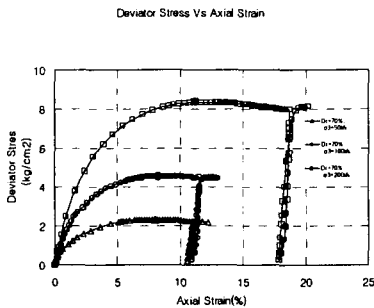


그림 12. 변형률과 축차응력 관계(동광리)

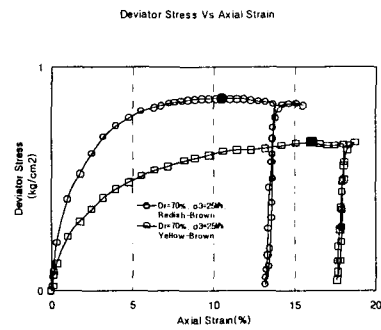


그림 13. 변형률과 축차응력 관계(동광리, 동지봉, 체오름)



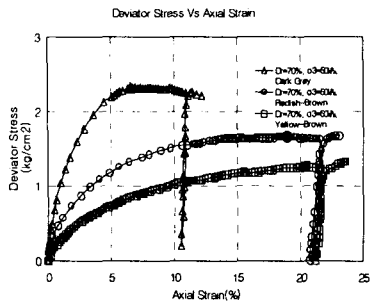


그림 14. 변형률과 축치응력 관계(동광리, 둔지봉, 체오름)

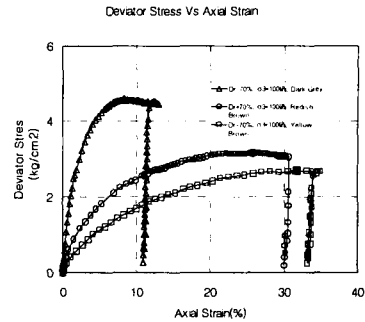


그림 15. 변형률과 축치응력 관계(동광리, 둔지봉, 체오름)

로 구한 점착력의 값의 직접적인 적용은 다소 불합리한 것으로 판단된다. 그리고 다호농장, 북오름, 지미봉, 거문오름, 부대악은 파괴시 축변형률이 30%~40% 사이로 상당히 큰 값을 보이고 있다.

삼축시험결과 내부마찰각은 건조단위중량, 간극률, 비중과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 건조단위 중량이 0.756인 DongGwang이 43.32로 제일 크게 나타났고, 건조단위중량이 0.55인 부대악이 26.8°로 제일 작은 값을 가졌다. 표 6~표 7은 내부마찰각과 건조단위중량 간극비 사이의 관계를 나타내고 있다.

표 6. 송이의 단위중량과 간극비(삼축압축시험)

채취장소	상대밀도 D <sub>r</sub> (%)	단위중량 γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	간극비 e <sub>0</sub>
다호농장	70	0.78	2.42
북오름	70	1.04	1.81
지미봉	70	0.79	2.42
두산봉	70	0.98	1.86
거문오름	70	0.72	2.93
부대악	70	0.55	3.62
둔지봉	70	1.152	0.898
체오름	70	1.391	0.749
동광리	70	0.756	1.363

표 7. 강도정수

채취장소	삼축압축시험
	φ (°)
다호농장	33.5
북오름	37.8
지미봉	33.8
두산봉	37.4
거문오름	31.4
부대악	26.8
둔지봉	38.19
체오름	34.02
동광리	43.32

#### 4.4 송이의 파쇄성

구속압의 조건에 따른 송이의 파쇄정도를 구하기 위하여 자연상태의 송이의 입도분포곡선과 각 전단시험중 비교적 자연상태와 유사한 대형전단시험 후의 시료의 입도분포곡선을 비교하였다. 그림 16~그림 19는 대형직접전단 시험전과 시험후의 입도분포곡선이다. 그림에서와 같이 구속압 증가에 따른 입도의 파쇄정도가 명확히 드러나고 있다.

색상에 따른 파쇄정도를 보면 황갈색송이의 파쇄가 현저히 나타나고, 황갈색 70%, 암회색 30%가 그 다음이고 적갈색송이와 암회색송이가 비슷한 파쇄정도를 나타내었다. 황갈색이 많을수록 파쇄가 많이 일어나고 적갈색, 암회색순으로 파쇄가 많이 일어났다.

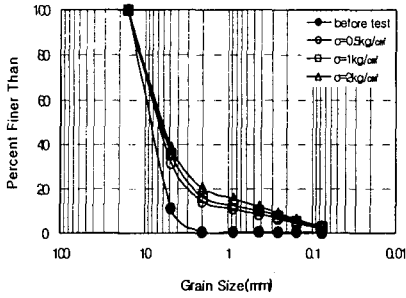


그림 16. 입도분포곡선  
(대형직접전단시험, 다호농장)

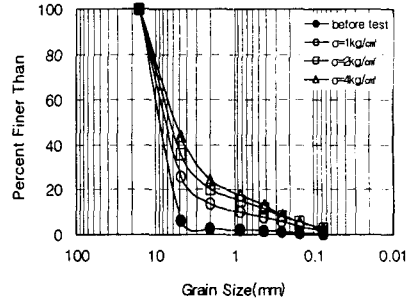


그림 17. 입도분포곡선  
(대형직접전단시험, 지미종)

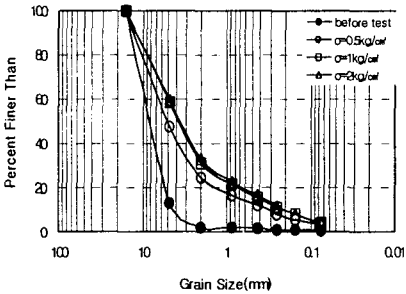


그림 18. 입도분포곡선  
(대형직접전단시험, 두산종)

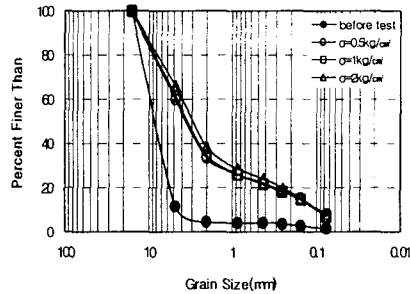


그림 19. 입도분포곡선  
(대형직접전단시험, 안돌오름)

송이는 입자가 파쇄되어짐에 따라 각 입자의 거친정도가 감소될 것이다. 즉 입자파쇄로 인한 전단 저항각의 감소가 예측되어진다. 따라서 송이의 파괴기준은 응력-변형을 곡선에서 파쇄성의 크기에 따라 포물선형상을 이룰 것으로 판단된다.

실험전과 실험후의 입도분포를 살펴보면 송이 입자 파쇄가 초기의 작은 구속압에서 많이 발생하는 것을 볼수 있다.

#### 4.5 송이의 화학적성분 및 건조단위중량에 따른 강도 특성

표 8로부터 송이의 주요 구성 성분을 알 수 있다. 송이의 구성 성분 가운데서  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 주요한 구성 성분이다.  $\text{SiO}_2$ 는 팔면체구조를 갖는다. 일반적으로 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정된 결합구조를 하고 있다고 볼 수 있으며 이들 결합구조에 팔면체구조가 많이 함유될수록 불안정한 결합을 하게된다(Lambe & Whitman, 1993).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 알루미늄원자 주위에 6개의 수산기로 구성된 팔면체구조를 이루고 있다. 실험에 사용된 시료중  $\text{SiO}_2$ 함량이 암회색 송이의 경우 약 49%, 적갈색, 황갈색송이 경우는 약 44%를 차지하는 것으로 송이의 다른 화학적성분에 비해 가장 많은 양을 차지하는 것으로 나타났다. 다음으로  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 많은 것으로 나타났다.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  함량은 송이의 종류에 따라 함량이 조금씩 차이는 있으나 약 75%를 차지하는 주성분을 이루고 있다. 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정한 결합구조를 하고 있다고 볼 수 있다. 팔면체구조가 많이 함유될수록 그 구조가 불안정한 결합을 하고 있다

표 8. 송이의 주요 화학성분과 내부마찰각

채취장소	SiO <sub>2</sub> wt(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wt(%)	Dry unit weight γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Triaxial test φ
다호농장	48.20	16.15	11.18	0.78	33.5
북오름	38.34	19.89	13.53	1.04	37.8
지미봉	43.51	20.82	12.61	0.79	33.8
두산봉	44.68	15.93	13.63	0.98	37.4
거문오름	42.23	20.06	14.40	0.72	31.4
부대악	31.82	20.18	20.04	0.55	26.8
둔지봉	44.27	16.40	13.90	1.152	38.19
체오름	44.07	16.50	13.9	1.391	34.02
동광리	49.0	14.25	12.98	0.756	43.32

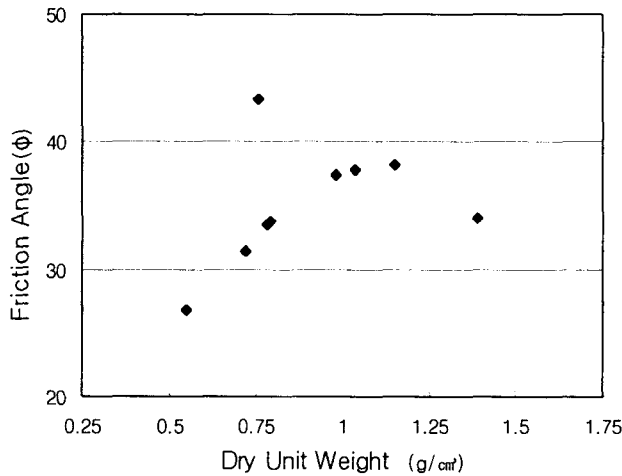


그림 20. 건조단위중량과 내부마찰각의 관계

고 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 송이의 구성성분은 강도에 미치는 영향이 클 것으로 사료된다.

표 8과 그림 20에서 나타난 바와 같이 건조단위중량이 클수록 내부 마찰각은 커진다 표 5~표 7에서 보면 건조단위중량이 클수록 점착력은 커지고 내부마찰각도 증가하고 있음을 알 수 있다. 송이의 이런 성질은 강도에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다.

#### 4.6 송이의 변형계수

송이는 파쇄성 등의 입자의 특징으로 말미암아 일반적인 흙에 비하여 응력에 따른 변형량이 상대적으로 큰 편으로 알려져 있다. 송이의 축대칭 삼축시험결과에서 탄성계수를 구하였다. 탄성계수를 결정하는 방법으로는 여러 가지 법이 있으나 본 자료에서는 파괴전단응력의 1/2 지점의 변형률값을 기준으로  $E = \frac{q \text{ (축차응력)}_{\max}}{2 \times \epsilon \text{ (1/2 } q_{\max} \text{ 에서의 변형률)}}$  의 방법으로 구하였다 (토목공법연구회, 1984). 각 시료에 따른 탄성계수의 값은 표 9와 같다. 표 9에서 보면 아주 연약한 부대악 시료를 제외한 나머지 송이시료

표 9. 송이의 탄성계수

채취장소	다호농장	북오름	지미종	두산봉	거문오름	부대악
탄성계수	3.26 kg/cm <sup>2</sup>	5.41 kg/cm <sup>2</sup>	3.65 kg/cm <sup>2</sup>	8.12 kg/cm <sup>2</sup>	2.47 kg/cm <sup>2</sup>	0.08 kg/cm <sup>2</sup>

의 경우 탄성계수가 약 2~9kg/cm<sup>2</sup>이다. 이는 일반적인 사질토에 비하여 아주 작은 값이며, 거의 점성토의 탄성계수와 유사함을 알 수 있다.

## 5. 결론

제주도내 송이의 강도특성을 규명하기 위하여 우선 제주도의 지질구조와 특성 및 본 자료에서 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. 삼축시험결과 송이의 내부마찰각은 건조단위중량이 클수록 크게 나타났고, 간극율이 클수록 작게 나타났다.
2. 송이는 파괴시 변위가 많이 발생하는데 도로나 기타 구조물 설계시 강도보다는 변위에 대한 고려가 필요할것으로 사료된다.
3. 송이의 주성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이며, SiO<sub>2</sub>가 함량이 많을수록 내부마찰각이 커지고 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 많을수록 내부마찰각이 작아지는 경향을 보이고 있다.
4. 송이는 다른 흙에 비해 파쇄가 많이 발생하였으며, 색상별로 구분하였을 시 황갈색 성분을 많이 함유할수록 파쇄도가 높은 것으로 나타났다.
5. 부대악 시료를 제외한 나머지 송이시료의 경우 탄성계수가 약 2~9 kg/cm<sup>2</sup> 값을 보였다. 이는 일반적인 사질토에 비하여 아주 작은 값이며, 거의 점성토의 탄성계수와 유사한 경향을 보인다.

## 참고문헌

1. 남정만 (2000), "제주도 지반의 공학적 특성", 한국지반공학회 암반역학위원회 논문집, pp. 171-182.
2. 서창민 (2001), "대형직접전단시험기를 이용한 송이의 강도특성에 관한 연구", 제주대학교 석사학위논문, pp. 38-60
3. 소재관 (2002), "송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구", 제주대학교 석사학위논문, pp. 43-66.
4. 윤정수 (1995), "제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구", 제주대학교 해양연구보고 제19권, pp. 25-38.
5. 윤선, 고기원, 김인탁 (1995), "제주도 형성사", 제주도지 제98호, pp. 148-164.
6. 토목공법연구회 (1984), 기초설계자료집성, 창우출판, pp. 50-55.
7. 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.
8. T. William Lambe & Robert V. Whitman (1993), Soil Mechanics SI Version, John Wiley & Sons, pp. 97-136, 201-281.
9. Yoon, Sun (1997), Miocene- Pleisocene volcanism and Japan Sea. Tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan sea. Tectonophysics 281, pp. 53-70.