

碩士學位論文

제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한
Soil시멘트 개발에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

金 龍 泰

2009

碩士學位論文

제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한
Soil시멘트 개발에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

金 龍 泰

2 0 0 9

제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한
Soil시멘트 개발에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2009年 2月

濟州大學校 産業大學院
建設環境工學科 土木工學專攻

金 龍 泰

金龍泰의 工學 碩士學位論文을 認准함.

2009年 2月

委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

A Study on Development of Soil Cement
Using Basaltic Volcanic Ash in Pyoseon-ri of Jeju

Yong-Tae Kim

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

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

2009. 2.

This thesis has been examined and approved.

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

목 차

목 차	i
List of Table	iii
List of Figures	iv
Summary	v
I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구내용 및 범위	2
II. 기존이론	3
1. Soil cement 공법	3
1.1 Soil cement의 정의	3
1.2 Soil cement의 재료	5
2. 제주도에 분포하는 화산재	7
2.1 화산재의 지질학적 특성	7
2.1.1 화산분출물	7
2.1.2 화산쇄설물의 퇴적	9
2.2 화산재의 분포 형태 및 시료채취위치	11
2.2.1 제주도에 분포하는 화산재의 형태	11
2.2.2 시료채취위치	14
III. 실험재료 및 특성	16
1. 제주 표선리 현무암계 화산재의 화학적 특성	16
1.1 XRF 분석	16
1.2 SEM 분석	18
1.3 유해성분 분석(중금속용출 분석)	18

1.4 흡착특성	19
2. 제주 표선리 현무암계 화산재의 물리적 특성	19
2.1 입도분석 실험	21
2.2 액·소성한계실험	22
2.3 다짐실험	24
2.4 원적외선 방사율 및 탈취실험	26
2.4.1 원적외선 방사율실험	26
2.4.2 탈취율실험	27
2.5 입도분석 및 액·소성한계실험에 의한 흙의 분류	28
IV. 실험방법 및 결과	34
1. 압축강도 및 휨강도실험	34
1.1 압축강도실험	34
1.2 휨강도실험	35
1.3 압축강도 및 휨강도 실험결과	36
1.3.1 초기 배합비의 설정	36
1.3.2 초기 배합비에 따른 W/C의 범위 설정	39
2. 흡착실험	41
2.1 중금속이온의 농도별 흡착량실험	42
2.2 중금속 흡착실험	43
3. 원적외선 방사율 및 탈취율실험	45
3.1 원적외선 방사율실험	45
3.2 탈취율실험	45
VI. 결론	47
참고문헌	48

List of Table

Table. 2.1 Granulometric classification of pyroclasts (Sohn, 1988)	8
Table. 2.2 Section shape of Volcanic ash	13
Table. 3.1 Chemical composition of basaltic volcanic ash	16
Table. 3.2 The result according to leaching test of basaltic volcanic ash	18
Table. 3.3 The result of heavy metals adsorption of basaltic volcanic ash	19
Table. 3.4 Kind and application of physical characteristic tests for soils	20
Table. 3.5 Liquid and plastic limits test result of basaltic volcanic ash	24
Table. 3.6 Compaction property of basaltic volcanic ash	24
Table. 3.7 FT-IR Spectrometer results of basaltic volcanic ash	26
Table. 3.8 FT-IR Spectrometer results of samples	26
Table. 3.9 Deodorization results of basaltic volcanic ash	27
Table. 3.10 Deodorization results of samples	27
Table. 3.11 Particle-size classifications(Braja M. Das, 1998)	28
Table. 3.12 Unified Soil Classification System , U.S.C.S	30
Table. 3.13 USCS of basaltic volcanic ash	31
Table. 3.14 Classification of Highway Subgrade Materials	32
Table. 3.15 ASSHTO classification of volcanic ash	33
Table. 4.1 Mix proportion ratio of soil cement(1)	36
Table. 4.2 Mix proportion ratio of soil cement(2)	39
Table. 4.3 FT-IR Spectrometer results of basaltic volcanic ash	45
Table. 4.4 Deodorization results of basaltic volcanic ash	46

List of Figures

Fig. 2.1 Location of sampling in the study area	14
Fig. 2.2 Geologic map location of sampling in the study area	15
Fig. 3.1 Chemical component of basaltic volcanic ash	17
Fig. 3.2 SEM photogram of basaltic volcanic ash($\times 8,000$)	18
Fig. 3.3 Different types of particle -size distribution curves (Braja M. Das, 1998)	21
Fig. 3.4 Grin size distribution curve of basaltic volcanic ash	22
Fig. 3.5 Atterberg limits	23
Fig. 3.6 Compaction curve of basaltic volcanic ash	25
Fig. 4.1 Photograph of compression test	34
Fig. 4.2 The specimen for compressive strength with aggregate	34
Fig. 4.3 A diagram of flexural strength test	35
Fig. 4.4 Photograph of flexural strength test	36
Fig. 4.5 The specimen for flexural strength with aggregate	36
Fig. 4.6 The result of compressive strength and flexural strength	37
Fig. 4.7 The result of compressive strength	39
Fig. 4.8 The result of flexural strength	40
Fig. 4.9 Used agitator	41
Fig. 4.10 AAS(Atomic Absorption	41
Fig. 4.11 Adsorbed amount of basaltic volcanic ash	42
Fig. 4.12 The result of heavy metals adsorption of basaltic volcanic ash	44

summary

The study aims at not only providing physiochemical properties of volcanic ash obtained from basalt located in Pyoseon-ri, Jeju Island, Korea, applicable for soil cement as the main material, but also offering analysis on strength required for its mixing with cement including the analytical effect of adsorption against heavy metal ions and well-being characteristics.

The results in this study verified that the pozzolanic material was categorized into the bad soil showing coarse grain distribution through the particle size analysis together with poor mechanical compaction for soil stabilization with high in-situ moisture content(optimum) while showing the corresponding compaction curve distributed broadly. Namely, the grain size(sieve) analysis and the liquid limit and plastic limit test made the aforesaid ash divided into fine grained soil symbolized as CL-ML(silty and clayed soil) according to Unified Soil Classification System(USCS), which coincides A-4 featured by non- or moderately-plastic silty soil according to the AASHTO system.

Meanwhile, the compression and flexural(bending) strength test for test pieces by mix design demonstrated that the Pyoseon-ri ash be moderately applicable for constructional purposes, being more superior in compression property than decomposed granite and yellow earth. Furthermore, it was proven excellent at heavy metal adsorption and deodorization with strong emission of far infrared rays. In consequence, the basaltic-origin volcanic ash found in Pyoseon-ri, Jeju Island, when applicable to the soil-cement material, is likely to generate the natural tawny color due to its dyeing capability and no occurrence of rapid drop in strength, which renders good possibility for applications to environment-friendly soil cement if properly designed for composition.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

1920년대 Ohio 주립 도로국에서 도로 노반용 흙의 강도를 증진시키기 위하여 도로 주변의 흙과 시멘트를 혼합하여 사용한 이후 소일시멘트(soil cement)는 도로 포장뿐만 아니라 사면보호, 흙막이 벽체, 연약지반 개량 등 여러 분야에 활용되어 사용되고 있다.(ACI Committee230, 1994 ; PCA, 1998). 소일시멘트는 주로 미국을 중심으로 도로 포장용으로 많이 사용되어 왔으며, 현재 미국과 캐나다 등지에서 대단위 도로포장용 재료로 널리 사용되고 있다(HRB, 1961; Joint Departments of the Army and Force, 1994 ; PCA, 1978).

소일시멘트는 도로기층처리, 초연약 표층안정처리 등 사용범위가 광범위하고 오래된 재료이지만 내구성이 떨어지고, 품질의 균질성을 확보하기 힘들기 때문에 내구적인 목적으로 사용하기 어렵고, 또한 함수율, 토질의 종류, 고화제 종류 및 함량 등에 따라서 작업성과 강도발현 특성이 크게 영향을 받기 때문에 사용성이 떨어지는 문제점이 있다. 그러나 소일시멘트포장은 기존의 아스팔트나 콘크리트 포장이 가지고 있는 환경적인 문제점을 해결하기 위하여 안료를 사용하지 않고 천연 토양을 시멘트로 처리함으로써 표층의 색을 유지하면서 내구성을 확보하는 자연친화적인 신개념의 포장이라 할 수 있다. 따라서 조경이 강조되는 도심지 인도, 단지내 주차장, 자전거 도로, 하천 고수부지의 산책로 등에 적용될 경우 자연환경 개선에 크게 기여할 것으로 기대된다.(위성혁 2002)

소일시멘트란 흙, 시멘트 혼합수를 배합하여 일반포장용 콘크리트에 준하는 중·저 강도부터 구조물용도의 고강도까지 발현 가능한 특수 콘크리트로서 공법개선을 통하여 포장 다면상의 변화를 기할 수 있으므로 경제적인 동시에 자연상태의 흙을 주원료로 하는 만큼 자연친화적이며 주변 환경과 조화를 이룰 수 있는 신 재료 및 신공법의 포장이라 할 수 있다. 최근에는 소일시멘트의 강도개선을 위해 특수혼화재료를 섞어서 사용하는 경우도 많다.(김병일 2002)

본 연구에서는 최적의 성능을 발휘 할 수 있는 소일시멘트를 얻고자 제주 표선리 현무암계 화산재를 시멘트와 혼합하여 공시체를 만든 후 강도 증진 효과 및 최적의 배합비를 파악하고 환경친화적인 Soil시멘트의 개발을 목적으로 한다.

2. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 소일시멘트의 주재료로 제주 표선리 현무암계 화산재를 사용하여 공원의 산책로, 자전거 전용도로, 농로 등 하중이 적은 도로의 포장재로 활용하는 방안을 찾기 위해 제주 표선리 현무암계 화산재에 대한 기본물성분석과 XRF, SEM분석 및 함유되어 있는 유해성분(Cu,Pb,Cr,Cd 등)들의 용출 및 흡착 특성을 조사하고, 이후 시멘트와 혼합하였을 때의 배합비에 따른 압축강도 및 휨강도 특성 변화를 분석 하였다.

다음과 같은 범위의 연구를 수행 하였다.

(1) 기본물성 분석

- 제주 표선리 현무암계 화산재의 입도 분석실험
- 제주 표선리 현무암계 화산재의 액·소성한계실험
- 제주 표선리 현무암계 화산재의 다짐실험

(2) 화학적특성 분석

- 제주 표선리 현무암계 화산재의 XRF분석
- 제주 표선리 현무암계 화산재의 SEM분석

(3) 용출 및 흡착실험

- 제주 표선리 현무암계 화산재 및 Soil시멘트의 용출실험
- 제주 표선리 현무암계 화산재 및 Soil시멘트의 흡착실험

(4) 웰빙특성 분석

- 제주 표선리 현무암계 화산재 및 Soil시멘트의 원적외선 방사율실험
- 제주 표선리 현무암계 화산재 및 Soil시멘트의 탈취율실험

(5) 강도특성 분석

- 제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한 Soil시멘트의 일축압축강도실험
- 제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한 Soil시멘트의 휨강도실험

II. 기존이론

1. Soil cement 공법

1.1 Soil cement의 정의

소일시멘트는 단순히 흙과 물, 그리고 시멘트계 고화재(제)를 사용재료로 하고 중 다짐에 의하여 성형되는 구조용 재료로 정의하며 시멘트계의 수화 반응으로 혼합물이 경화되어 내구성을 갖는 포장 재료이다. 일반적으로 시멘트계 고화재(제)에 의해 흙을 안정처리(soil-stabilization) 하는 것을 소일시멘트라고 하며, 이것은 보통 5~15%범위의 고화재(제)를 흙과 혼합하여 다져 1주일 이상의 습윤 상태로 양생해서 도로의 기층 또는 표층으로 이용된다.

소일시멘트의 개발은 공사현장 주변의 흙을 활용함으로써 공사비를 절감하려는 목적에서 시작되었으며 소일시멘트의 아이디어는 1920년대 Iowa와 South Dakota의 도로국에서 실험 삼아 도로주변의 흙과 시멘트를 혼합 사용한 것과, Ohio 주립 도로국에서 도로 노반용 흙의 강도를 증진시키기 위하여 시멘트를 사용한 것에 기인한다. 또한 비슷한 시기에 California와 Texas에서도 짧은 구간의 도로포장에 흙과 시멘트를 혼합 사용하였다.

South Carolina 주립 도로국의 연구는 소일시멘트의 초기 성장에 지대한 공헌을 하였는데 1933년부터 소일시멘트로 5구간의 도로를 건설함으로써 소일시멘트의 연구개발에 박차를 가하였고 1935년에는 PCA, South Carolina 주립 도로국의 공동연구에 의해 1.5마일(mile)을 건설함으로써 도로포장용으로서 소일시멘트의 적용이 확대되는 계기가 되었다.

아울러 인근 도로국으로 그 성과가 파급되어 1936년 Michigan, Illinois, Wisconsin 그리고 Missouri에서도 연구과제가 수행되었다. 이런 연구들은 현재의 연구성과에 비하면 초기단계에 지나지 않았지만 여전히 도로로서의 기능을 충분히 수행하고 있으며 최근 들어 도로포장의 시공기술과 장비들이 발전됨에 따라서 소일시멘트는 현재 미국과 캐나다 등지에서 대단위 도로용, 포장용 재료로 널리 사용되고 있다.

소일시멘트의 효과는 점착성이 있는 흙의 경우 점착력을 영구히 보존케 하고 점착력이 없는 사질토에 있어서는 점착력을 갖게 하여 물이나 동결작용 및 교통하중에 대한 안정성을 확보하는 것이다. 원래 소일시멘트는 독일에서는 콘크리트 공학적으로 고찰하여 빈배합의 콘크리트로, 미국에서는 토질 공학적으로 그 이론이 발달되어 왔다. 이것은 소일시멘트를 강성재료로 생각 할 것인가 유연(flexible)한 연성재료로 생각 할 것인가에 달려있다. 초기에는 소일시멘트를 강성기초로서 포장재료로 사용하였으나 최근에는 유연한 특성을 기초로 하는 것이 우세하게 되었으며, 시멘트 량이 높은 빈배합으로 사용되던 것도 최근에는 빈배합으로 사용되므로 강성은 실제로 낮아졌다고 할 수 있다. 소일시멘트는 미세균열이 많이 발생하는데 이 미세균열은 내구성에 큰 문제가 되지 않는 것으로 알려졌다. 또한, 소일시멘트의 강성 또는 연성에 관계없이 도로포장의 설계에 강성계수와 포아송비가 필요하다. 소일시멘트의 탄성계수는 밀도, 시멘트량, 수량 및 배합토량에 의해 영향을 받는데, 응력-변형률 곡선은 파괴강도의 1/3인 지점까지는 거의 직선이며 이 범위에서 소성변형은 그렇게 중요하지 않으므로 완전탄성의 재료로 생각 할 수 있다. 탄성계수는 시멘트량이 높을수록 크고, 포아송비는 배합토량이 많을수록 크며 시멘트량과는 일정한 관계를 나타내지 않는다. 소일시멘트의 탄성계수로서는 압축에 의한 것(E_{sc}), 휨에 의한 정적계수(E_{sf}), 그리고 동적 계수(E_d)의 세 종류의 것이 고찰되어 있으며, 이들 중 근사적으로 $E_{sf} \approx E_d$ 이지만, E_{sc} 는 E_{sf} 의 60%보다 약간 큰 값을 가지고 있다. 탄성계수는 압축강도에 대해서 직선적인 관계를 보인다. 한편 소일시멘트의 탄성계수 및 포아송비는 평균치로서 각각 $E=100,000\text{kg/cm}^2$ 및 $\nu=0.13$ 이다. 보통의 콘크리트의 휨 강도와 압축강도 비는 대략 다음과 같이 알려져 있다.

$$\text{콘크리트} = \frac{\text{휨강도}}{\text{압축강도}} \approx \frac{1}{5} \sim \frac{1}{8}$$

한편, 독일연구소(1957)의 실험에서는 소일시멘트의 휨 강도와 압축강도와의 비를 다음 과 같이 제시하고 있다.

$$\text{소일시멘트} = \frac{\text{휨강도}}{\text{압축강도}} \approx \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$$

이에 의하면, 소일시멘트는 보통의 콘크리트와 비교할 때 휨 강도가 상대적으로 높아 소일시멘트와 콘크리트의 압축강도가 같다면 휨 강도는 소일시멘트가 콘크리트의 약 2배까지 될 수 있음을 알 수 있는데 이 결과로 독일에서는 휨 응력을 주로 받는 포장의 노반 또는 기층에 휨 강도가 상대적으로 강한 소일시멘트를 이용하는 것이 유효하다고 하였다. 이 후 영국의 도로연구소에서도 도로포장의 노반 또는 기층에 소일시멘트의 유효성을 입증한 바 있다.

1.2 Soil Cement의 재료

소일시멘트에는 흙, 시멘트 그리고 물이 재료로 사용되며 지역적으로 손쉽게 확보 할 수 있는 재료를 사용함으로써 시공경비를 절감할 수 있다. 소일시멘트의 대부분을 차지하는 흙은 현지 흙을 사용하거나 또는 운송되어 오며, 단거리의 경우에는 일반적으로 혼합수도 운반하여 사용한다.

소일시멘트에 사용되는 흙은 대체적으로 골재, 모래, 실토 및 점토의 조합이고 아울러 채층적토, 예일 그리고 각종 옹이들도 포함될 수 있다. 거의 흙이 시멘트에 의해 경화되며 반드시 잘 다져진 기층만을 요하는 것은 아니다. 왜냐하면 소일시멘트 혼합물은 표층과 기층 노반간의 부착이나 재료 내부적인 마찰에 의한 것이 아니라 주로 시멘트의 수화에 의한 것이기 때문이다.

소일시멘트에 사용되는 흙은 다음과 같이 세 등급으로 나눌 수 있다.

(1) 모래 자갈질 흙(sandy and gravelly soils): 10~35% 범위의 실토와 점토 성분이 혼합된 화강토(일명 마사토)가 소일시멘트 제조에 가장 적합하며 이 경우가 소요 강도발현에 요구되는 시멘트량이 가장 낮다.

(2) 세립을 적게 포함한 모래질 흙(sandy soils deficient in fines): 주로 해안이나 풍송된 모래로서 위의 경우보다 약간 많은 양의 시멘트가 소요되지만 우수한 품질의 소일시멘트를 생산할 수 있다.

(3) 실토질 점토(silty and clayed soils): 점토질이 많으면 분쇄, 혼합이 힘들며 소요되는 시멘트량도 증가한다.

한편, 흙의 각 특색을 살펴보면 각각의 흙은 일반적으로 다른 입형, 구조 그리고 색깔을 지닌다. 흙의 색깔은 입자의 화학적 특성에 좌우되며 때때로 흙의 입형보다 더 중요한 의미를 지닌다. 예를 들면, 붉은색 계열의 흙은 철을 함유하고 있으며 이것은 시멘트와 잘 반응한다. 반면 검은색을 내는 농토의 경우에는 많은 양의 유기물을 함유하고 있기 때문에 반응이 어렵다. 기존에 있는 골재나 암석에서 풍화된 흙은 좋은 소일시멘트의 재료로서 사용될 수 있는데 그 이유는 쉽게 분쇄되고 혼합되며 시멘트의 양도 줄일 수 있기 때문이다.

한편, 현지의 흙 대신에 입도분포가 양호한 외부반입토를 사용할 경우 품질이 우수한 소일시멘트를 생산할 수 있으며, 또한 더욱이 점토성분이 많은 흙일 경우는 분쇄가 어렵고 상대적으로 강도가 저하되므로, 소정의 강도를 구현하기 위해서는 외부반입토를 사용하는 것이 더 좋다.



2. 제주도에 분포하는 화산재

2.1 화산재의 지질학적 특성

2.1.1 화산분출물

화산(火山; volcano)은 ‘지하에 있는 용융 물질의 저장소가 구멍이나 틈을 통하여 지표에 열려 녹은 돌·가스·화산재를 분출하는 곳’(정창희, 1993)이라 명하고, 화구(火口)를 통하여 분출되는 가스·용암·암편·화산재를 총칭하여 이들을 화산분출물(volcanic products)이라고 한다(정창희, 1993).

본 연구는 이들 화산분출물 중 화산재 퇴적층에 관한 것이며, 이에 따라 화산재를 포함한 화산쇄설물의 특징을 살펴보고자 한다.

① 가스

화구로 분출되는 수증기가 큰 구름기둥을 만드는 것을 보아 화산이 다량의 수분을 토하고 있음은 짐작되나 실측에 의해서도 화구에서 나오는 모든 기체의 60~95% 또는 그 이상이 수증기임이 밝혀졌다. 분출되는 가스 중에는 수소와 산소도 들어 있으며 그 중의 일부는 화합하여 물이 된다. 산소와 수소가 화도 안에서 급격하게 화합하면 폭발을 일으킨다. 수증기 다음으로 많은 가스는 이산화탄소이다. 어떤 화산은 승화된 유황과 그 화합물인 황화수소(H₂S)·아황산가스(SO₂)를 분출하고, 염소(Cl₂)와 염화수소(HCl)를 포함하는 화산가스도 방출한다.

② 용암

마그마가 지표에 분출될 때에는 그 중의 가스를 거의 전부 잃어버리고 용암으로 되어 버린다. 용암이 굳어진 것이 고체용암 또는 화산암(volcanic rock)이다. 용암은 SiO₂의 함유량에 따라 유문암, 안산암 및 현무암으로 크게 3분된다. 용암의 유동성은 그 온도와 SiO₂의 함량에 의하여 결정되어 고온이고 고철질일수록 유동성이 크고, 저온이고 규장질이 많으면 점성이 커서 유동성이 작다.

③ 화성쇄설물

화구로부터 분출되는 암편과 화산재를 총칭하여 화성쇄설물(pyroclastic materials, 또는 tephra)이라고 한다. 그 중 직경이 32mm 이상인 것이 화산암괴

(volcanic block)이고, 이에는 화산의 기반이 되어 있던 암석도 섞인다. 암괴에는 최대 60톤 이상에 달하는 것이 있다. 직경이 32mm 이상이면서 어느 정도 둥글거나 방추형으로 생긴 것은 화산탄(volcanic bomb)

이며, 이는 용암이 공중에서 회전하며 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4~32mm 사이에 있는 것은 화산력(lapilli) 또는 분석(cinder)이다. 4mm 이하의 세편을 화산재(volcanic ash), 1/4mm 이하의 가루를 화산진(volcanic dust)이라고 한다(정창희, 1993).

또한, 박 등(2000)은 화성쇄설물 중 2~64mm를 화산력, 1/16mm를 화산재, 1/16이하를 화산진이라 분류하기도 하였으며, 학자에 따라 화성쇄설물을 구분하는 입자크기는 다소 차이를 보이는데, 보다 세밀하게 나타내고 있는 Shon(1988)의 구분은 다음과 같다.

Table. 2.1 Granulometric classification of pyroclasts (Sohn, 1988)

Clast		Non-volcanic	Pyroclastic
mm	ϕ		
256	-8	Boulder	Coarse block
64	-6	Cobble	Fine block
16	-4	Pebble	Coarse lapillus
4	-2	Granule	Medium lapillus Fine lapillus
2	-1	Very coarse sand Coarse sand	Coarse ash
1/2	1	Medium sand Fine sand	Medium ash
1/16	4	Very Fine sand	
1/16이하	4이하	Silt Clay	Fine ash

<Table 2.1>은 화성쇄설물(Pyroclastic)의 입도 크기에 대한 구분을 일반적인 토사(Non-volcanic)의 구분과 비교하여 제시(Sohn, 1988)한 것을 나타내고 있으며 이에 따르면 화성분출물의 화산재는 입도에 따라 Very fine sand ~ Very coarse sand 정도에 해당되는 것임을 알 수 있다.

일반적으로 화산재(volcanic ash)라 불리는 것은, 1/16mm 이하의 크기에 대한 화산진을 세분하지 않고 2mm 이하 크기의 화성쇄설물을 통틀어서 말하기도 하며, 본 연구에서 또한, 화산재와 화산진을 세분하지 않고, 세립질의 화산재라 명하여 그 특성을 검토하였다.

2.1.2 화산쇄설물의 퇴적

화산폭발이나 분출의 양상은 마그마의 휘발성분(특히 물과 이산화탄소의 함량 정도)과 점성도에 따라 달라진다. 지하 깊은 곳에서는 이러한 휘발성분들이 마그마 내에 용해된 상태로 존재하지만 지표 가까이 마그마가 올라오면 가스 성분들이 마그마로부터 분리되어 팽창하게 된다. 이렇게 마그마가 다량의 기포를 포함하게 되어 거품 덩어리 같은 형태를 띠며 지표로 나와 식으면 부석을 형성하게 된다. 산성의 마그마는 염기성의 마그마에 비해 휘발 성분을 더 많이 포함하여 점성도가 낮으므로 보다 넓은 지역에 걸쳐 화산쇄설물을 분포시킬 수 있다(朴과 鄭, 1993).

주로 화산재로 구성된 화산쇄설성 퇴적물은 응회암(tuff)이라 하고, 화산력으로써 이루어진 화산쇄설성 퇴적물은 lapilli-stone, 화산탄이나 block으로 이루어진 퇴적물은 집괴암(agglomerate) 또는 화산각력암이라고 한다.

화산쇄설성 퇴적물은 형성 기원에 따라 분류하여 그 특성을 기술하는 것이 일반적이는데, 대표적 형태로는 화성쇄설성 낙하퇴적물(pyroclastic-fall deposits), 화산 쇄설류 퇴적물(volcaniclastic flow deposits), 그리고 hyaloclastites 등이 있다(朴과 鄭, 1993).

1) 화성쇄설성 낙하 퇴적물

이러한 형태의 퇴적물은 화산분출구를 통해 분출된 암석 파편들이 낙하하여 형성된 것으로, 대부분의 경우 공기 중에서 형성되어 air-fall 응회암을 이루나 때로는 물속으로 낙하하여 퇴적층을 형성하기도 한다. 육상에서 형성된 퇴적물

들은 대개 분출구에서 멀어질수록 층의 두께나 입자의 크기가 감소하는 것이 특징이다.

Block이나 화산탄 크기의 퇴적물은 주로 분출구 주변에 쌓이나, 화산재 같은 입자들은 분출구로부터 수십 km까지, 화산진은 수천km 이상 운반되기도 한다. 육상에서 형성된 화산쇄설성 낙하 퇴적층들은 특징적으로 점이층리를 보이나 어떤 경우에는 부석이나 암편조각들에 의해 역점이 층리를 보여주기도 한다(Self, 1976).

2) 화산쇄설류 퇴적물

지표에서 형성되는 두 가지 주요한 형태의 화산쇄설류 퇴적물은 마그마 내부의 가스에 의해 유동성을 가지고 분출되어 형성된 ignimbrite와 화산재의 매우 빠른 흐름에 의해 생성된 기저와류(base surge)층이며, 그 외의 형태로 lahar와 화산이류(volcanic mudflow)가 있다(朴과 鄭, 1993).

① ignimbrite

가스나 물이 상승하여 입자들의 운동을 유체와 비슷한 형태로 만드는 유동화 과정(fluidization)은 마그마 속에 녹아있던 가스가 팽창하거나 또는 분출물이 지상에서 이동하면서 흡수한 공기에 의해 이루어진다. 이러한 흐름은 100km까지 이동하기도 하며, 평탄한 대지 위를 흐를 수도 있다. 이러한 과정에 의해 형성된 퇴적물인 ignimbrite는 분급은 좋지 않으나 균질하게 보이는 특징이 있으며 세립의 화산재로 이루어져 있다. 암석편들이 섞여있는 경우에는 보통 암석편들이 점이층리를 보이며, 부석이 섞이는 경우에는 부석들이 역점이층리를 이룬다.

② 기저와류 퇴적물

기저와류는 마그마가 지표면 부근 지하수에서 물을 공급받으면서 또는 마그마가 지표면의 물과 접촉하면서 분출한 뒤 형성된 흐름이다. 기저와류는 지표면을 매우 빠르게 이동하는 화산쇄설물과 물, 가스(수증기)의 혼합체이다. 기저와류 퇴적물의 특징으로는 층리면의 발달을 들 수 있는데 평면층리와 사층리를 보인다. 층의 두께나 입자의 크기는 근원지로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보이고, 최대 층 후는 대개 1m 이내이다.

③ Lahar 퇴적물

Lahar, 즉 화산이류는 지표에서 분출된 화산의 사면에서 발달하는데, 미고화된 화산재 위로 폭우가 쏟아져 형성된 이류는 찬 lahar(cold lahar)라 하고, 화구호

내에서 화산재가 분출하여 만든 이류는 더운 lahar(hot lahar)라 한다. Lahar 퇴적물은 선상지에서 이류에 의해 생성되는 퇴적물과 유사한 구조의 퇴적층을 형성하는데, 분급이 불량하며 기질에 의해 지지되는 조직을 보인다.

3) Hyaloclastite

분출된 용암이 물과 만나서 급속히 냉각되면 잘게 부서진다. 용암류의 표면부가 냉각되면서 계속 이동하면 표피부근이 부서지면서 작은 입자로 떨어져 나가고, 보다 깊숙한 내부의 마그마가 차츰 냉각되며 쪼개지게 된다. 이러한 과정을 통해 생

성된 화산쇄설성 퇴적물을 통칭하여 hyaloclastite, 혹은 수성기원(aquagene) 응회암이라고 부른다. 이런 종류의 응회암은 용암이 직접 물속에서 분출되거나, 용암이 지표면에서 분출되어 물속으로 흘러 들어갈 때 형성된다. 이 때 생성된 암석이 다공질의 작은 용암 조각들로 구성된 hyaloclastite인데, 조각들 각각의 크기는 수 mm에서 수 cm 정도이다.

2.2 화산재의 분포 형태 및 시료채취위치

2.2.1 제주도에 분포하는 화산재의 형태

제주도에 분포되는 흙은 대부분 화산기원의 화산재 퇴적층이다. 화산재 퇴적층은 대·소규모 화산분출 시 생성된 화산재가 퇴적된 원지형일 수도 있으나, 1차적으로 퇴적된 화산재가 재이동되어 퇴적되기도 하며, 화산재 또는 그 외의 화산분출물이 물리·화학적 풍화를 받고 이들에게서 유래된 입자가 퇴적된 부분도 있을 것이나, 본 연구에서는 이들의 형성원리에 대해서는 구분하지 않았다.

육지부 고기층에서 형성되는 풍화산류토는 매우 두껍게 분포되는 경우가 많으나, 제주도는 토사층 발달이 미약하며, 화산재층 또한 그 두께는 1~5m 정도의 두께로 대부분 얇게 형성되고 있다. 표층부에 이들 화산재 퇴적층이 분포되지 않고 암반이 노출되거나 꽃자왈, 클링커 등의 파쇄암이 분포되는 부분이 많다. 심부에 분포되는 화산재층의 단면을 정확히 파악하기는 어려우나, 표층을 이루고 있는 흙, 즉 화산재 퇴적층에 대한 절취단면에서 육안관찰에 의해 파악되는 특성을 <Table. 2.2>에 나타내었다.

흙이 두껍게 분포되는 지역에 대한 절취 단면에서 확인된 바에 의하면, 일부 위치에서는 상부는 세립질, 하부로 갈수록 조립질을 이루는 정점이 형태를 나타내기도 하나, 일반적인 퇴적암에 비해 분급이 불량한 상태로 나타나는 것이 대부분인 것으로 확인된다. 화산재 퇴적층은 비교적 입도가 균등한 형태이고, 하부 또는 상부에 분포되는 스코리아 퇴적층 또는 클링커면과 접하면서 육안상 관찰에 의해서도 뚜렷한 구분이 가능할 정도로 입도분포에서 차이를 보이기도 한다. 또한, 풍화잔류토의 토양단면에서 확인되는 것처럼 상부는 잔류 암편이 거의 없으나, 하부에서는 암반과 접하면서 풍화가 덜 진행된 모암편이 남아있는 형태를 보이지 않으며 화산재가 암층과 접하여 형성될 경우는 뚜렷한 경계면을 이룬다. 화산재의 분급 및 입도분포 특성은 화산쇄설물 퇴적 형태에 따라 차이를 보이는데, 분급이 양호하여 점이층리를 보이고 세립질로 균등하게 나타나는 세립 화산재는 대부분 낙하 퇴적물에서 나타나는 특징이다.

본 연구에서는 <Table. 2.2>에서 A 형태의 중간층 및 B 형태에 나타나는 층 즉, 균질한 입도분포를 보이며, 비교적 풍화가 덜 진행된 세립 화산재에 대해서 실험되었으며, 육안관찰에 의해 부식되거나 풍화가 심하게 진행되고, 나무 및 풀 뿌리를 포함하거나 유기물이 포함되는 구간 즉, A 형태의 상부층 및 C 형태의 흙에 대해서는 실험되지 않았다.

Table. 2.2 Section shape of basaltic volcanic ash

구분	노출현상	특성
A		<ul style="list-style-type: none"> - 표층부는 부식되고 심하게 풍화됨 - 표층하부에는 세립질로 입도가 균등한 중간층 및 파쇄암편을 포함하고 비교적 조립질로 나타나는 하층으로 구분됨 - 점이적인 입도변화를 보이지는 않으나, 하부에는 모래, 자갈 크기의 조립질 포함
B		<ul style="list-style-type: none"> - 점토질의 화산재가 주를 이룸 - 암황색, 적갈색, 황갈색을 띰 - 점착력이 있어서 입자가 쉽게 떨어지지 않음 - 입도 균등
C		<ul style="list-style-type: none"> - 표층부를 이루는 것으로 세립의 실트 및 암편이 불규칙하게 혼재됨 - 빈입도 분포를 보임 - 화산분출 시 퇴적된 원지형이 아닌 재이동 퇴적된 것으로 추정 - 표면에 노출되어 부식되고, 풍화됨

2.2.2 시료채취위치

화산재의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 토층이 노출되는 지역에서 시료를 채취하였는데, 상부의 약간 부식된 암흑색토를 제거한 후 하부의 토층 즉, <Table. 2.2>의 A단면과 같은 중간층 정도에 해당되는 흙을 채취하였다.

또한, <Fig. 2.2>의 지표지질도를 참조하여, 지질학적으로 구분되는 화산암 종류에 따라 구분시켜 시료를 채취하였다. 제주도 지질도폭에 의하면 조면현무암류에 해당되는 암층이 가장 넓게 분포되고 있다.

본 연구에 적용된 시료 채취 위치는 <Fig. 2.1>에 나타내었고, 또한, 시료가 채취된 위치의 기반암 종류 즉, 지표지질을 동시에 확인하기 위하여 제주도 지질도폭(한국지질자원연구소, 2000) 상에 표시하여 <Fig. 2.2>에 나타내었다. 시료 채취 위치는 서귀포시 D 채석장의 제주 표선리 현무암계 화산재층에 대하여 이뤄졌고, 기반암의 형성기원이 동일할 것으로 예측되는 시료를 채취하기 위하여 동질의 기반암이 광범위하게 분포되는 지역의 중심부에서 채취하는 것을 원칙으로 하였다. 실험 항목은 물성실험을 실시하였고, 그 외 화학분석, 다짐실험, 웰빙 특성분석을 실시하였다.

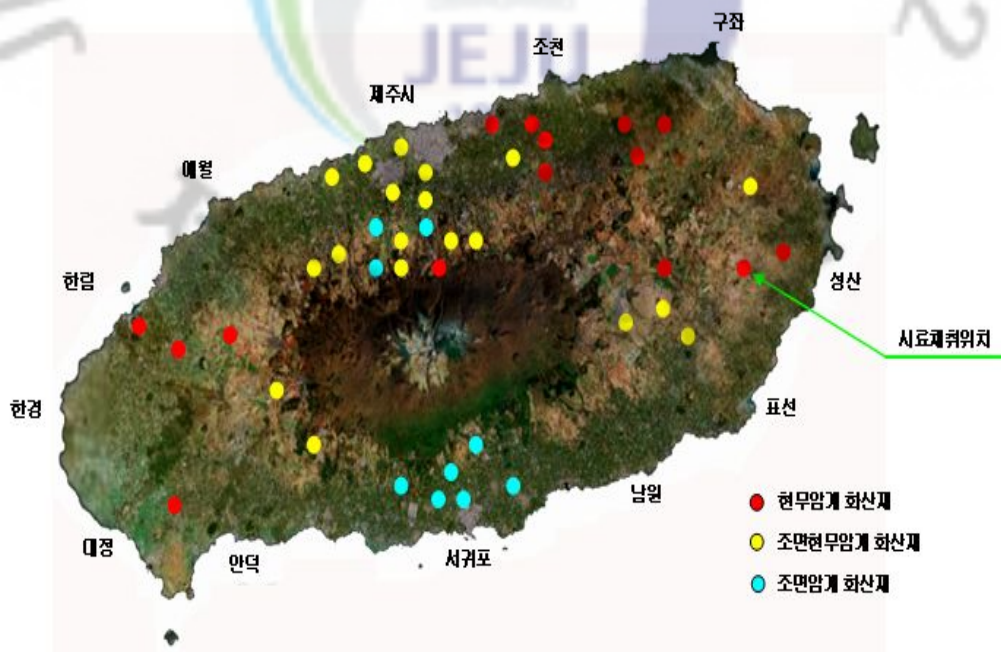
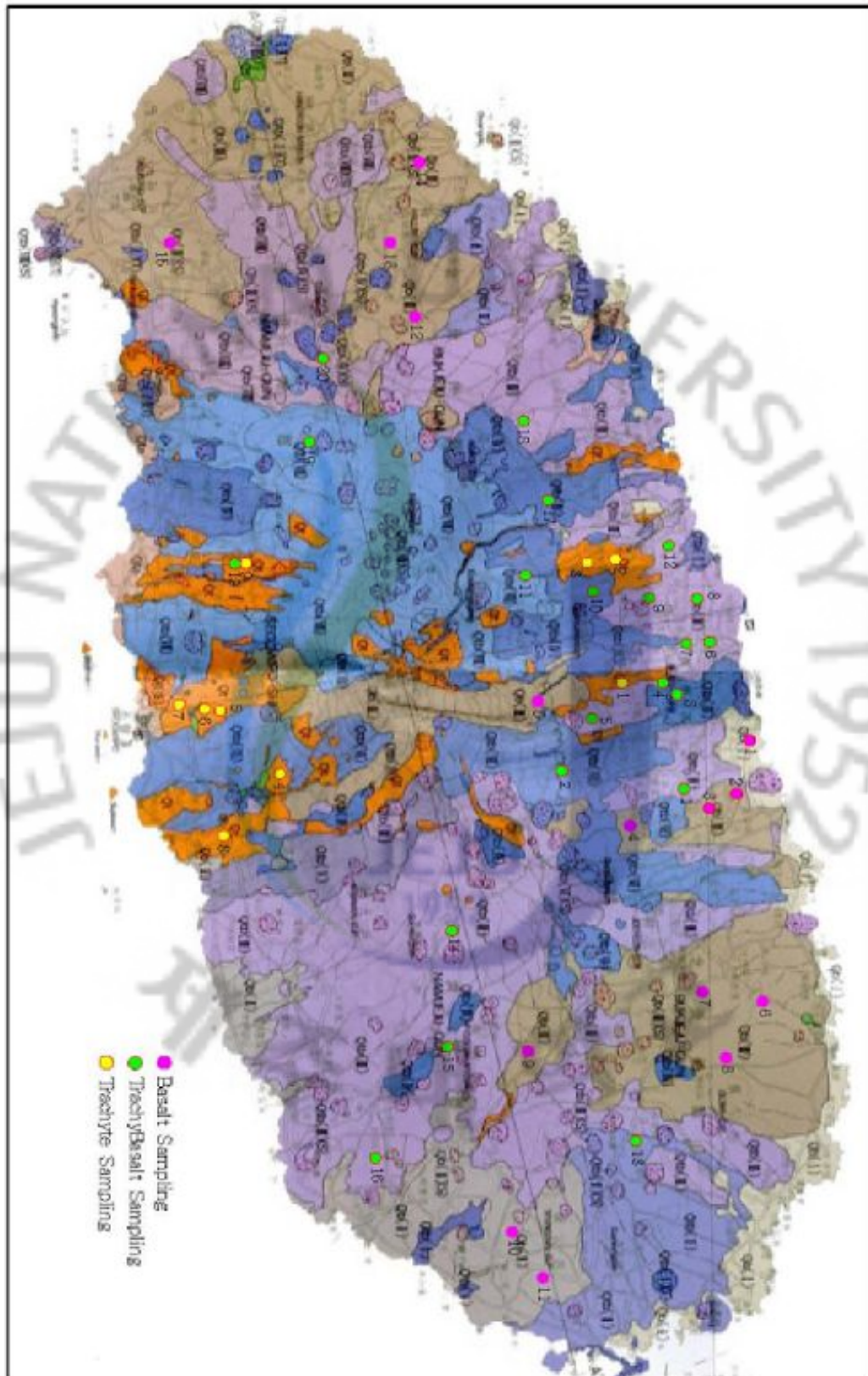


Fig. 2.1 Location of sampling in the study area

Fig. 2.2 Geologic map location of sampling in the study area



Ⅲ. 실험재료 및 특성

1. 제주 표선리 현무암계 화산재의 화학적 특성

1.1 XRF 분석

일반적인 점토광물은 암반의 풍화작용과 함께 생기는 2차적 생성물로 규산 사면체와 알루미늄 팔면체의 두 기본단위로 구성된 알루미늄 규산염 복합물이다. 이들 점토 광물은 원자 구조에 따라 카올리나이트(kaolinite), 일라이트(illite), 몬트몰로나이트(montmorillite) 등이 있으며, 제주도 내에 분포되는 화산암은 SiO_2 와 Na_2O+K_2O 의 화학성분에 따라 현무암, 조면현무암 및 조면암 등으로 구분되는데, 화산재 또한 화산암에 주를 이루는 화학성분인 SiO_2 , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 및 Fe_2O_3 등이 다량 포함되며, 분출기원이 되는 화산체의 특성에 따라 그 함량은 다소 차이를 보일 것이다. 일반적인 점토광물은 화학조성이 암석의 풍화과정에서 생성된 규산알루미늄의 결정구조를 주체로 하고 있는데, 본 연구는 화산암 구분의 기준이 되는 SiO_2 와 Na_2O+K_2O 의 화학성분분석을 실시하였다. 즉, XRF 방식에 의해 산화물 성분 분석을 중점으로 하였다. 본 연구에서 실시된 화산재 시료에 대한 화학성분분석 결과는 <Table. 3.1>과 같다.

Table. 3.1 Chemical composition of basaltic volcanic ash

constituent	Sample	Contents(%)
SiO_2		49.50
Al_2O_3		20.33
TiO_2		2.36
Fe_2O_3		16.44
MgO		1.37
CaO		0.79
Na_2O		0.43
K_2O		2.15
MnO		0.18
P_2O_5		0.39
LOI		6.02
total		99.96

※ LO.I : Loss of Ignition

분석한 결과 SiO_2 가 49.50%, Al_2O_3 20.33%, Fe_2O_3 16.44%로 대부분을 차지하고 있으며, 그 외에 TiO_2 2.36%, K_2O 2.15%, MgO 41.37%를 차지하고 있다. 이 외에도 CaO , Na_2O , MnO , P_2O_5 도 아주 낮지만 제주 표선리 현무암계 화산재의 구성성분으로 분석되었다.

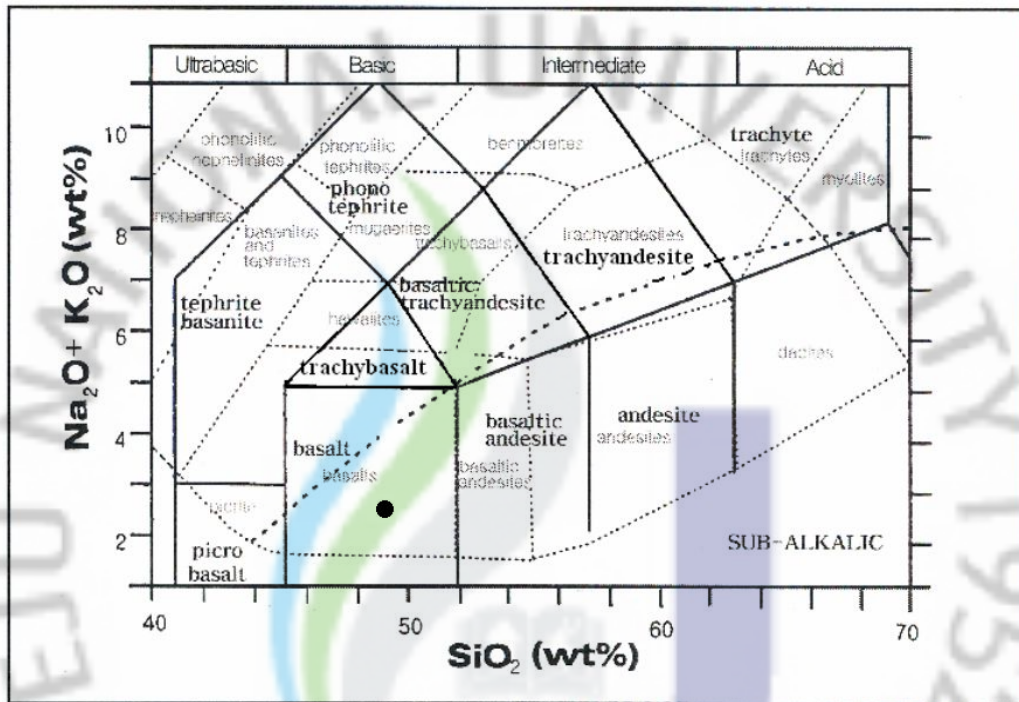


Fig. 3.1 Chemical component of basaltic volcanic ash

<Fig. 3.1>은 화학성분 분석 결과에서 SiO_2 와 Na_2O+K_2O 의 비를 이용한 화산암류 명명도(Cox et al., 1979; Le Bas et al., 1986)에 표시한 것으로 제주 표선리 현무암계 화산재는 basalt범위에 plot되고 있다.

화산분출 시 형성된 화산재의 화학성분은 용암류의 기반암과 동일하지 않을 수 있으며, 풍화정도 및 2차적인 혼합물, 분쇄물의 포함 정도에 따라 차이를 보일 수 있음을 감안해야 하며, 이에 따른 연구는 앞으로 추가 되어져야 필요할 것이다.

1.2 SEM 분석

제주 표선리 현무암계 화산재의 입자 모양과 상태를 살펴보기 위하여 장방출 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, SEM JSM-6700F JEOL Co.Ltd)사진을 통해 관찰한 결과는 <Fig. 3.2>와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 화산재의 표면은 매우 불규칙하며 또한 일부에서 기공이 분포하는 것으로 관찰되었다.

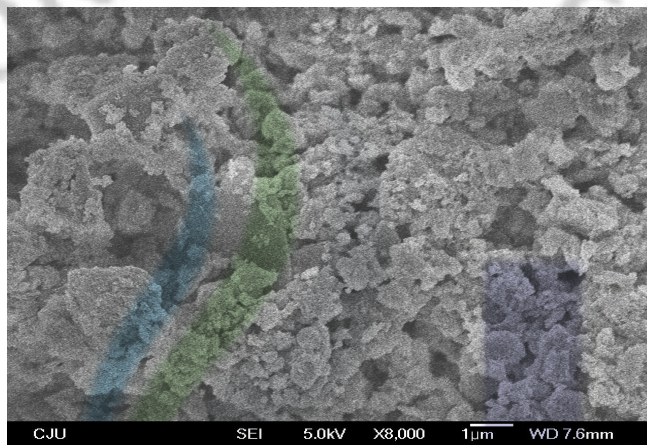


Fig. 3.2 SEM photogram of basaltic volcanic ash ($\times 8,000$)

1.3 유해성분 분석(중금속용출 분석)

제주 표선리 현무암계 화산재의 중금속 용출 실험을 위해 4mm이하의 화산재 분말 1g에 pH5~6인 증류수 25mL를 가하여 2시간 교반 후 중금속(Cu, Pb, Cd, Cr) 함유량을 분석(AAS: Atomic Absorption Spectrometer) 하였으며, 그 결과는 <Table. 3.2>과 같다.

Table. 3.2 The result according to leaching test of basaltic volcanic ash

원소	Cu	Pb	Cd	Cr
용출농도(mg/L)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

1.4 흡착특성

제주 표선리 현무암계 화산재를 채취하여 1g에 5mg/L의 중금속(Cu, Pb, Cd, Cr)용액 25mL를 가하여 2시간 교반 후 중금속 용액의 흡착률을 분석(AAS: Atomic Absorption Spectrometer) 하였으며, 그 결과는 <Table. 3.3>과 같다.

Table. 3.3 The result of heavy metals adsorption of basaltic volcanic ash

재 료	중금속 흡착률(%)			
	Cu	Pb	Cd	Cr
제주 표선리 현무암계 화산재	87	100	89	19

2. 제주 표선리 현무암계 화산재의 물리적 특성

흙의 물리적 특성이란 비중, 함수비, 입도, 간극비, 포화도, 단위중량, 및 Atterberg 한계 등으로 표현된다. 이들 특성치가 갖는 공학적 의미는 각종 해석에 직접 이용된다는 점과 이들 값이 다른 역학적 특성과 상관관계를 맺고 있다는 점에서 찾을 수 있다. 일반적인 흙의 물리적특성 실험의 종류 및 적용 사항은 <Table. 3.4>에 제시된바와 같고, 본 연구는 점토·실트질에 해당되는 세립 화산재의 특성에 중점을 두고 있으므로 입도분석 및 액·소성한계 실험에 대하여 중점적으로 실시하였다.

Table. 3.4 Kind and application of physical characteristic tests for soils
(Lee et al.,2001)

Division	test type	test method	test result	application	KS
Physical characte ri-stic test	specific gravity	.pycnometer	.specific gravity of soil particles	.calculate void ratio, degree of saturation, unit weight et. .hydrometer analysis	F 2308
	water content	.oven dried method (105°C±5°C)	.water content	.basic characteristics of soil .decision sensitivity of soil	F 2306
	particle-size	.sieve analysis .hydrometer analysis	.grain size distribution curve .uniformity coefficient .curvature coefficient .fine gained size content	.classification of soil .compression evaluation of cohesive soils .stability evaluation of cohesionless soils .estimate hydraulic conductivity .design filter	F 2302
	consistency	.liquid limit .plastic limits .shrinkage limits	.liquid limit, flow index .plastic limit .shrinkage limit .liquidity index .plasticity index	.stability appraisal of granular soil .decision of soils .evaluate suitability of highway subgrade material .estimate compression index .classification of soils .activity	F 2303 F 2304 F 2305
	field density test	.sand cone method .rubber ballon method .nuclear method	.moist density .dry density	.basic characteristics of soil .estimate earth pressure .decision degree of compaction	F 2311
	relative density	.mold method	.maximum density .minimum density	.decision degree of compaction .decision liquefaction	
	seepage	.constant head test .falling head test .consolidation test	.hydraulic conductivity of soil	.design of permeability soil .ground water matter	F 2322

2.1 입도분석 실험

흙의 입도분포는 흙을 분류하는 기준의 척도가 되며, 입도분포에 따라 지반강도가 좌우되기도 하므로 흙의 특성을 파악하는데 있어서 입도분석은 가장 기본적이고 필수적인 항목이라 할 수 있다. 본 연구에서 제주 표선리 현무암계 화산재의 입도분포특성을 검토하였다. 입자의 직경(mm)에 따른 중량통과 백분률(%)로 입도분포곡선을 작성하였다. 입도분포곡선은 흙 속에 함유되어 있는 입자크기의 분포뿐만 아니라 분포된 흙의 유형을 알려준다.

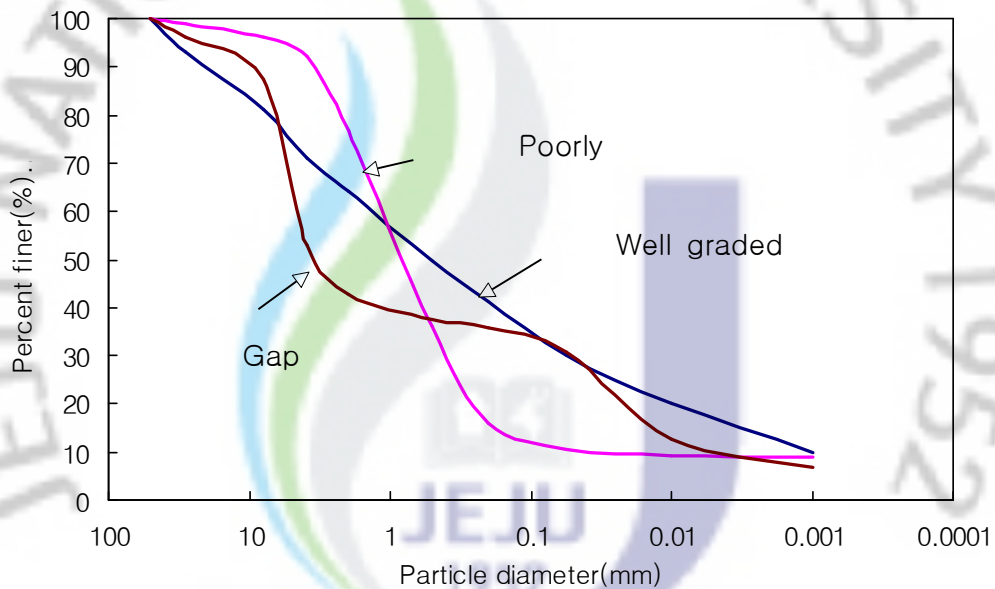


Fig. 3.3 Different types of particle -size distribution curves(Braja M. Das, 1998)

여러 형태의 입도분포곡선을 <Fig. 3.3>에 나타내었는데, 곡선 I에 나타나는 흙의 유형은 대부분의 흙입자가 같은 크기로 입도분포가 나쁜 흙(poorly graded soil)이라 부른다. 곡선 II가 나타내는 흙의 유형은 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있으며, 입도분포가 좋은 흙(well graded)이라고 부른다. 어떤 흙은 곡선 III에서와 같이 두 개 이상의 균일한 크기의 입도가 분포되어 있는 흙이 있다. 이런 형태의 흙들은 불균형 입도를 갖는 흙(gap graded)이라 부른다. 본 연구에서 입도분석실험 결과 얻은 값에 따라 입도분포곡선을 작성하였으며, 입자크기의 분포뿐만 아니라 분포 형태를 검토하였다.

입도분석실험을 실시한 결과, 평균적으로 No.200체 통과량이 70% 이상인 세립토로 나타나고 있으며, 점토 크기에 해당되는 0.002mm 이하는 최소 12%로 나타나고 있다.

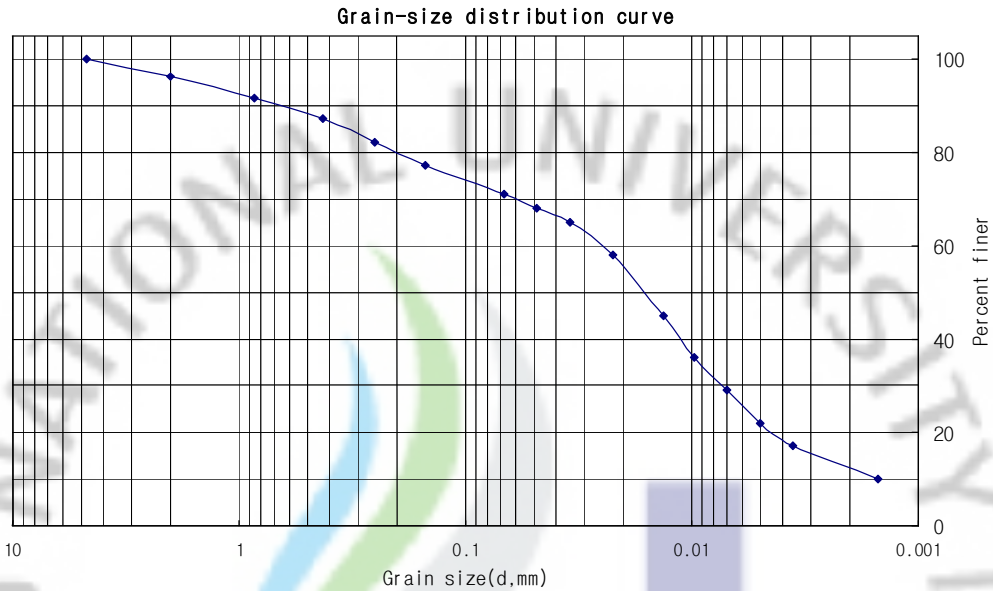


Fig. 3.4 Grain size distribution curve of basaltic volcanic ash

<Fig. 3.4>의 입도분포곡선은 세립토 및 점토 함량이 매우 높게 나타나면서 입도분포가 나쁜 흙의 형태를 보여주고 있고, 일부 모래질이 다소 함유되어 있으며, 이에 따라 입도분포곡선은 대부분 우측부에서 급격히 낮아지는 형태 또는 점차적으로 낮아지는 형태를 보인다.

2.2 액·소성한계 실험

점토가 다량 포함된 세립토의 경우 점토 입자 주위에 있는 흡착수 때문에 점착성을 갖게 되고, 어느 정도의 함수비를 유지하면 부서지지 않고 재성형할 수 있다. 1900년대 초에 스웨덴 과학자 아터버어그(Atterberg)가 함수비 변화에 따른 세립토의 연경도를 설명할 수 있는 방법을 개발하였다. 매우 낮은 함수비일 때 흙은 고체덩어리와 같이 거동하고, 함수비가 매우 높으면 흙과 물은 액체와 같이 흐른다. 함수비에 따라 흙은 고체·반고체·소성·액성의 네 가지 기본상태로

나뉜다. 고체상태에서 반고체 상태로 변하는 순간의 함수비를 수축한계 (shrinkage limit), 반고체 상태에서 소성상태로 변하는 순간의 함수비를 소성한계(plastic limit), 소성상태에서 액체상태로 변하는 순간의 함수비를 액성한계 (liquid limit)라 하며, 이모든 변수들을 모두 일컬어 아터버어그 한계(Atterberg limits)라 한다(Braja M.Das, 1999).

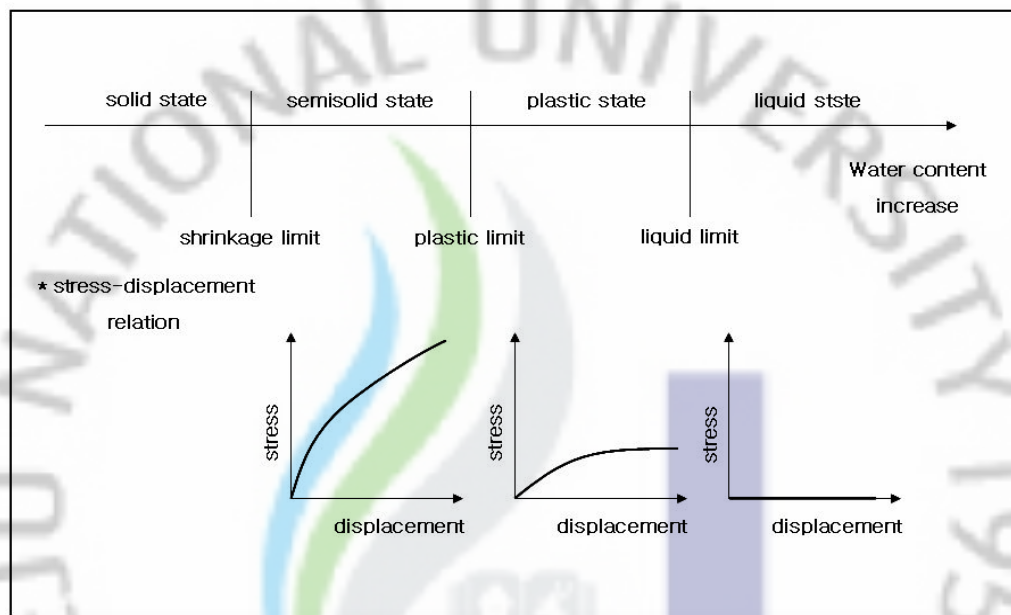


Fig. 3.5 Atterberg limits

흙의 거동은 함수비와 연관되며, 함수비가 적은 고체·반고체 상태에서는 안정적이거나 소성·액성 상태에서는 함수비가 높아지면서 불안정한 상태에 놓일 수 있다. <Table. 3.4>에 제시된 것처럼 흙의 안정성 평가, 도로지반의 적부판정, 압축지수 예측 및 흙의 분류, 활성도 등을 판단하는데, 흙의 소성한계 및 액성한계를 파악하는 것이 중요하며, 본 연구에서 또한 KS F 규정에 의거 실험을 실시하였다. 실험시료는 입도분석 체분석 실험 과정에서 No.40체 통과량 시료에 대하여 실시하였다. 실험 결과는 <Table. 3.5>에 나타내었다.

Table. 3.5 Liquid and plastic limits test result of basaltic volcanic ash

sample	#200 passing rate	LL	PL	PI
제주 표선리 현무암계 화산재	73	37.6	30.43	7.17

토목현장에서 이용되고 있는 흙의 통일분류(USCS)에서는 No.200체 통과량이 50% 이상과 이하에 따라 조립토와 세립토로 구분되고, 세립토의 경우 액성한계 및 소성지수에 따라 고소성-저소성 실트 및 점토 등으로 구분됨에 따라 실험결과는 흙의 분류에 쉽게 이용될 수 있도록 No.200체 통과량 및 액·소성한계, 소성지수에 관하여 정리하였다. 위의 실험결과 표에 보이는 것처럼 제주 표선리 현무암계 화산재의 액성한계가 37.6%로 약간 높은 값을 나타내고 있으며, 소성지수는 7.17로 확인 되었다.

2.3 다짐실험

제주 표선리 현무암계 화산재에 대하여 다짐특성을 검토하였다. 다짐실험 시 확인된 최적함수비(O.C.M) 및 최대건조밀도(rd_{max})는 <Table. 3.6>에 정리하여 나타내었고, 그래프는 <Fig. 3.6>에 나타내었다.

Table. 3.6 Compaction property of basaltic volcanic ash

Sample	O.M.C(%)	rd_{max} (t/m ³)
basaltic volcanic ash	30	1.423

다짐실험 결과 제주 표선리 현무암계 화산재의 최대건조밀도는 1.423t/m³, 최적함수비는 30% 범위를 나타내고 있다.

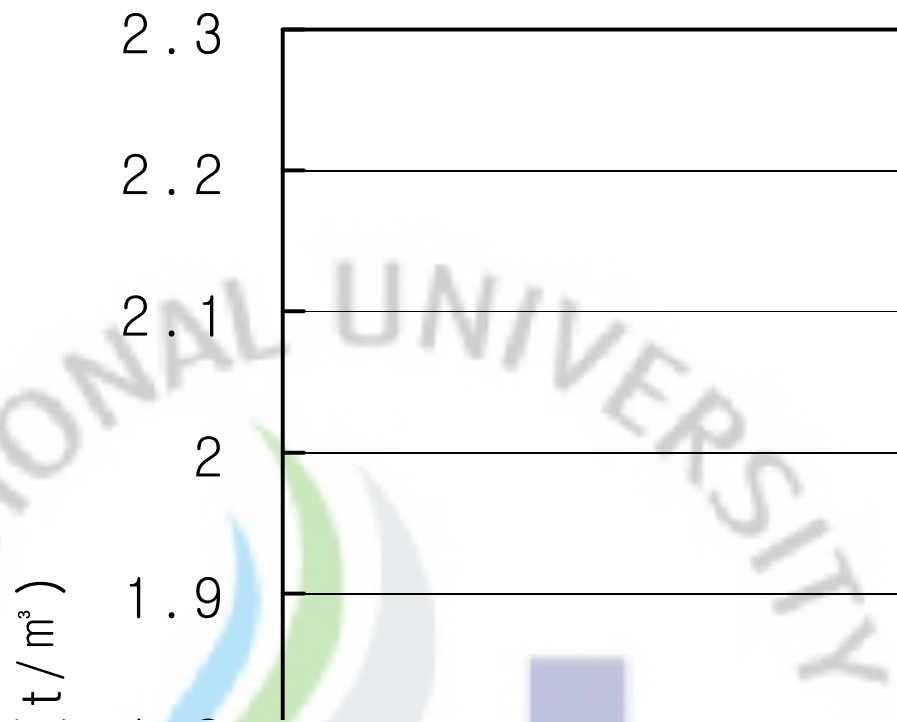


Fig. 3.6 Compaction curve of basaltic volcanic ash

2.4 원적외선 방사율 및 탈취 실험

2.4.1 원적외선 방사율 실험

원적외선 은 전자파의 과장영역중 3~1000 μm 범위으로써 가시광선보다 강한 열작용을 하는 방사에너지가 직접적이고 순간적으로 전달되는 열에너지를 나타내며, 제주 표선리 현무암계 화산재의 원적외선 방사율 평가 결과는 <Table. 3.7>에 나타내었다.

Table. 3.7 FT-IR Spectrometer results of basaltic volcanic ash

실험 항목		실험 결과	시험 방법
원적외선 방출량 (40℃)	방사율 (5~20 μm)	0.926	KICM-FIR-1005
	방사에너지 (W/m ²)	3.73 $\times 10^2$	

Table. 3.8 FT-IR Spectrometer results of samples

재료	단위	원적외선 방사율
화산재	%	92.6
황토	%	93
송이(스코리아)	%	92
옥	%	91
맥반석	%	91

원적외선 방사율 실험결과는 <Table. 3.7>과 같으며 제주 표선리 현무암계 화산재의 원적외선 방사율은 92.6%로 나타났다. 또한 원적외선 방사율이 우수한 것으로 알려진 황토, 송이, 옥, 맥반석을 <Table. 3.8>에 나타내어 제주 표선리 현무암계 화산재와 비교 하였을 때 화산재가 매우 우수한 것으로 확인되었다.

2.4.2 탈취 실험

방취가공대상 공업제품 및 원료의 유해가스, 악취가스물질의 흡착 및 제거능력을 측정 경과시간에 따르는 실험가스(암모니아)의 농도(ppm)변화 측정을 나타내며, 제주 표선리 현무암계 화산재의 탈취율 평가 결과를 <Table. 3.9>에 나타내었다.

Table. 3.9 Deodorization results of basaltic volcanic ash

실험항목	탈취실험(NH ₃)			
	경과시간(분)	Blank농도(ppm)	시료농도(ppm)	탈취율(%)
실험결과	0	200	200	-
	30	194	23	88.1
	60	188	17	91.0
	90	183	13	92.9
	120	178	10	94.4
실험방법	KICMFIR-1085			

Table. 3.10 Deodorization results of samples

재료	단위	탈취율
화산재	%	94.4
황토	%	98
송이(스코리아)	%	96
옥	%	97
맥반석	%	97

탈취율 실험결과는 <Table. 3.9>와 같으며 제주 표선리 현무암계 화산재의 탈취율은 94.4%로 나타났다. 또한 탈취율이 우수한 것으로 알려진 황토, 송이, 옥, 맥반석을 <Table. 3.10>에 나타내어 제주 표선리 현무암계 화산재와 비교 하였을 때 탈취율이 송이와 비슷한 것으로 확인되었다.

2.5 입도분석 및 액·소성한계실험에 의한 흙의 분류

흙이 갖는 물리적 성질 중 입도분석 및 액·소성한계 특성은 가장 기본적인 것이며, <Table. 3.4>에 제시된 바에 의하면 이들 특성이 흙을 분류하는데 적용된다고 하였다. 본 연구에서 세립 화산재에 대한 입도분석 및 액·소성한계 실험을 중점적으로 실시하였고, 이들 결과에 따른 흙의 분류를 파악하였다.

1) 입자 크기에 따른 분류

흙은 입도에 따라 크게 조립토와 세립토로 나눈다. 조립토는 표력, 자갈 및 모래로 이루어진 흙을 말하며 일반적으로 점착력이 없는 비점성토이고, 세립토는 실트 및 점토로 이루어진 흙을 말하며 일반적으로 점착력이 커서 점성토라 불린다. 흙을 구성하는 흙입자 크기의 범위는 광범위하다. 일반적으로 흙은 흙 속에 주축을 이루는 입자의 크기에 따라 자갈, 모래 또는 점토로 불린다. 입자의 크기에 따라 흙을 구분하기 위하여 여러 기관들이 입도 분류법을 개발하였으며, <Table. 3.11>에는 매사추세츠 공과대학(MIT), 미국농림부(USDA), 미국도로협회(AASHTO) 및 통일분류법(USCS)을 제시하였다.

Table. 3.11 Particle-size classifications(Braja M. Das, 1998)

Name of organization	Diameter(mm)			
	gravel	sand	silt	clay
MIT	>2	2~0.06	0.06~0.002	<0.002
USDA	>2	2~0.05	0.05~0.002	<0.002
AASHTO	76.2~2	2~0.075	0.075~0.002	<0.002
USCS	76.2~4.75	4.75~0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

화산쇄설물 중 지질학에서 구분되는 화산재는 2mm 이하의 것을 말하며 <Table. 3.6>에 따르면 화산재는 점토·실트·모래에 해당되고 있음을 알 수 있다.

2) 입도 및 액·소성한계에 의한 분류

입자크기에 의한 흙 분류법은 소성을 고려하고 있지 않기 때문에 여러 가지 매우 중요한 흙의 성질을 전적으로 설명할 수 없다. 따라서, 이 방법은 대부분의 공학적 목적으로 사용되기에는 부적합하다. 현재 더 진보된 두 가지의 흙 분류법이 토질 공학자들에 의해 빈번히 사용되고 있다. 두 가지 방법 모두 입도분포와 아터버그 한계(Atterberg limit)를 고려하였다. 이들 방법은 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)분류법과 통일분류법(USCS, Unified Soil Classification System)이다. 세계 도처에서는 통일분류법이 널리 사용되고 있는데, AASHTO 분류법은 주정부 도로국에서 사용되며, 일반적으로 지반공학자들은 통일분류법을 선호한다(Braja M. Das, 1998). AASHTO 분류법은 1929년에 미국 공립 도로국 분류법(Public Road Administration Classification System)으로 개발되었다. 이 분류법은 여러 차례 수정을 거쳐 1945년 연방 도로 연구위원회의 노상토 및 기층 형태 도로용 재료 분류위원회에 의하여 현재의 분류법이 제시되었다. 흙이 대부분 도로공사 시의 포장 및 성토재료로 주로 이용되고 있으며, 본 연구의 목적은 흙이 건설토목현장에 적합하게 이용되기 위한 지표를 제시하는데 있음에 따라, AASHTO 분류법 및 USCS 분류법에 의한 화산재의 분류 특성을 분석하였다.

① 통일분류법(USCS)

흙의 분류는 이들 입자 크기에 의한 1차적인 구분 이외에, 소성도 및 각 입도의 분포 중량에 따라 세분되어지며, 화산재가 이들 분류기준 중 어떤 항목에 주로 해당되는지를 검토하였다.

통일분류법의 구분 기준은 No.200체 통과량 50%를 기준으로 하여 이상이면 조립토, 이하이면 세립토로 나뉘며 <Table. 3.12>에서 통일분류법에 의하여 흙이 구분되어진다.

Table. 3.12 Unified Soil Classification System , U.S.C.S

Classification		Criteria		Group symbol
Coarse grained soils F < 50%	Gravelly soil	passing No.200 sieve < 5% passing No.200 sieve < 5% passing No.200 sieve > 12% passing No.200 sieve > 12% passing No.200 sieve > 12% $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12%	$Cu \geq 4$ and $1 < Cg < 3$ not meeting both criteria for GW $PI < 4$ or plot below A-line $PI > 7$ and plot above A-line fall in "CL-ML" marked area meets the criteria for GW and GM meets the criteria for GW and GC meets the criteria for GP and GM meets the criteria for GP and GC	GW GP GM GC GC-GC GW-GM GW-GC GP-GM GP-GC
	Sandy soil	passing No.200 sieve < 5% passing No.200 sieve < 5% passing No.200 sieve > 12% passing No.200 sieve > 12% passing No.200 sieve > 12% $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% plot below A-line $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% plot below A-line $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% plot below A-line $5 \leq$ passing No.200 sieve \leq 12% plot below A-line	$Cu \geq 6$ and $1 < Cg < 3$ not meeting both criteria for SW $PI < 4$ or plot below A-line $PI > 7$ and plot above A-line fall in "CL-ML" marked area meets the criteria for SW and SM meets the criteria for SW and SC meets the criteria for SP and SM meets the criteria for SP and SC	SW SP SM SC SC-SM SW-SM SW-SC SP-SM SP-SC
Inorganic Fine grained soils F \geq 50%	LL < 50%	$PI < 4$ or plot below A-line $PI > 7$ and plot below A-line $4 \leq PI \leq 7$, fall in "CL-ML" marked area of plasticity chart		ML CL CL-ML
	LL \geq 50%	plot below A-line of plasticity chart plot above A-line of plasticity chart		MH CH
Organic Fine grained soils F \geq	LL < 50%	$\frac{LL - oven\ dried}{LL - ot\ dried} < 0.75$		OL
	LL \geq 50%		OH	

※F: passing though the No. 200 sieve(%)

Table. 3.13 USCS of basaltic volcanic ash

Sample	#200 passing and classification of soil		USCS
basaltic volcanic ash	73%	F.S	CL-ML

<Table. 3.13>에 보여지는 바와 같이 제주 표선리 현무암계 화산재의 통일분류법에 의한 구분으로는 점토가 61%에 해당되고 점토 및 실트질을 나타내는 세립토는 73%나 된다. 또한, 모래질의 조립토는 27%로 적지 않은 비중을 차지하고 있으며 점토함량이 많은 모래질 실트질 점토(CL-ML)의 형태를 나타내고 있다.

② AASHTO분류법

현재 사용되고 있는 AASHTO 분류법은 <Table. 3.14>에 나타내었다. 이 방법에 의하면, A-1부터 A-7까지 7개의 주요 그룹으로 세분되는데, A-1, A-2, A-3 그룹하의 흙은 No.200체 통과량이 35% 이하인 사질토이고, No.200체 통과량이 35% 이상인 흙은 대부분이 실트와 점토 형태의 흙으로 A-4, A-5, A-6, A-7 그룹에 속한다. 입자 크기에 따른 구분 기준은 75mm체를 통과하고 2mm체에 남는 흙을 자갈이라 하고, 2mm체를 통과하고 0.075mm(No.200체)체에 남는 흙을 모래라 하며, 0.075mm체를 통과하는 흙은 실트와 점토로 구분한다. 또한, 세립토의 경우 소성지수가 10 이하일 때 실트란 용어를 사용하며, 소성지수가 11이상인 세립토에 대해서는 점토란 용어를 사용한다.

Table. 3.14 Classification of Highway Subgrade Materials

General classification	General materials						
Group classification	A-1-a		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis							
percent passing							
No.10	50max						
No.40	30max	50max	51min				
No.200	15max	25max	10max	35max	35max	35max	35max
Characteristics of Fraction passing No.4							
Liquid limit				40max	41max	40max	41min
Plasticity index	6max		NP	10max	10max	11min	11min
Usual type of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General subgrade rating	Excellent to good						
General classification	Silt-clay materials (more than 35% of total sample passing No.200)						
Group classification	A-4	a-5	A-6	A-7			
				A-7-5 ^b			
				A-7-6 ^b			
Sieve analysis							
percent passing							
No.10							
No.40	36min	36min	36min				36min
No.200							
Characteristics of Fraction passing No.4							
Liquid limit	40max	41min	40max	41min			
Plasticity index	10max	10max	11min	11min			
Usual type of significant constituent materials	silty soils			Clayey soils			
General subgrade rating	Fair to poor						
^a For A-7-5, $PI \leq LL-30$, ^b For A-7-6, $PI > LL-30$, NP : Non-Plastic							

Table. 3.15 ASSHTO classification of volcanic ash

Sample	#200passing rate	LL	PI	AASHTO
basaltic volcanic ash	73%	37.6%	7.17	A-4

통일분류법과 유사한 형태로 No.200체 통과량·액성한계·소성지수를 이용하여 ASSHTO 분류법에 의해 제주도 현무암계 화산재를 분류한 결과는 <Table. 3.15>와 같이 No.200체 통과량이 73%, 액성한계가 37.6%, 소성지수가 7.17로 점토질(A-4)흙의 형태를 나타내었다. 또한, 제주 표선리 현무암계 화산재의 경우 노상토 등급이 “양호~불량”한 정도에 해당되고 있다.



IV. 실험방법 및 결과

1. 압축강도 및 휨강도실험

1.1 압축강도실험

압축강도 실험은 KS F 2328(흙시멘트의 압축강도 실험방법)의 실험방법에 따라 공시체를 제작하여 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 양생하였으며 만능재료실험기를 이용하여 압축강도를 측정하였고, 3개의 공시체 평균값을 실험결과로 채택하였으며 압축강도 산정식은 <식 4.1>과 같다. <Fig. 4.1>은 압축강도 실험기이며 <Fig. 4.2>는 제작된 공시체이다.

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (4.1)$$

f_c = 콘크리트 압축강도(Mpa)

P = 최대하중(N)

A = 공시체의 단면적(mm^2)

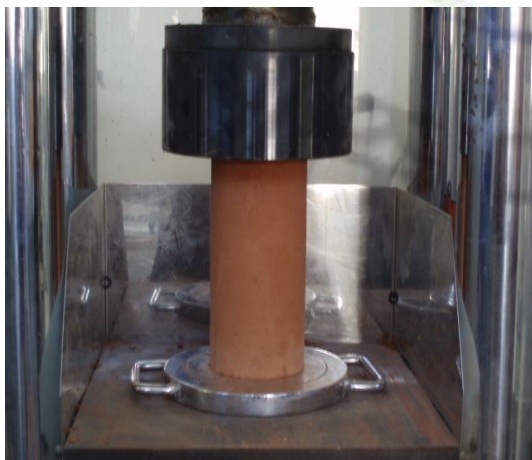


Fig. 4.1 Photograph of compression test



Fig. 4.2 The specimen for compressive strength with aggregate

1.2 휨강도실험

휨 강도실험은 KS F 2325(흙시멘트의 휨 강도 실험방법)의 실험방법에 따라 <Fig. 4.3>의 3등분점 재하실험방법을 이용하여 B×H×L=10×10×40cm 공시체를 제작하여 20±2℃에서 양생하였으며 만능재료시험기를 이용하여 휨 강도를 측정하였다. 3개의 공시체 평균값을 실험결과로 채택하였으며 휨 강도 산정식은 <식 4.2>와 같다.

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \dots\dots\dots (4.2)$$

f_c = 휨강도(MPa)

P = 최대하중(N)

l = 지간(mm)

b = 파괴 단면의 폭(mm)

h = 파괴 단면의 높이(mm)

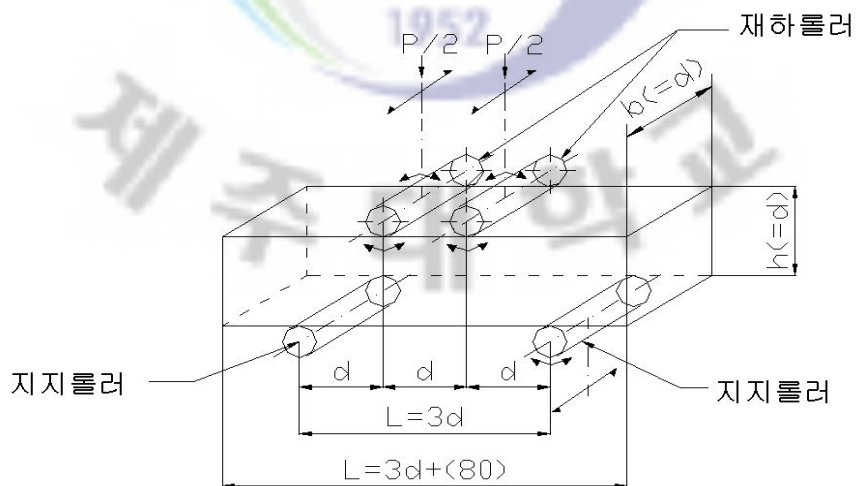


Fig. 4.3 Diagram of flexural strength test

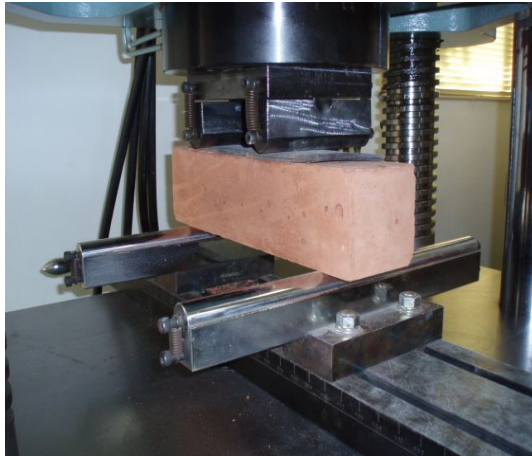


Fig. 4.4 Photograph of flexural strength test



Fig. 4.5 The specimen for flexural strength with aggregate

1.3 압축강도 및 휨강도 실험결과

1.3.1 초기 배합비의 설정

Soil시멘트가 인도 및 자전거도로 포장에 적용되는 경우 일반적인 압축강도는 12MPa이상 그리고 휨강도는 2.5MPa이상을 발휘하는 것이 바람직하다. Soil시멘트의 초기 W/C비를 설정하기 위하여 여러번의 반복 실험을 수행하였으며 배합비를 <Table. 4.1>와 같이 나타내었다.

Table. 4.1 Mix proportion ratio of soil cement(1)

Sample No.	W/C	S/C
A-1	1.12	2.00

초기 W/C비 1.12에 대한 압축강도는 <Fig. 4.6>과 같은 결과를 나타내었으며 공시체의 채령 28일 압축강도는 16MPa로 소요압축강도 12MPa보다 약 4MPa 정도 더 크게 나타났다.

초기 W/C비 1.12에 대한 휨강도는 <Fig. 4.6>과 같은 결과를 나타내었으며 공시체의 재령 28일 휨강도는 2.7MPa로 소요휨강도 2.5MPa을 약간 상회 하는 것으로 나타났다. 이때 초기 W/C비 1.12는 압축강도기준과 휨 강도기준을 모두 만족하는 배합비이며 시멘트 혼합량이 가장 작을 때의 S/C비 2.00을 Soil시멘트의 초기 배합비로 설정 하였다.



Fig. 4.6 The result of compressive strength and flexural strength

1.3.2 초기 배합비에 따른 W/C의 범위 설정

Soil시멘트를 현장 시공할 경우 W/C비의 범위를 설정하는 것은 시공성의 편리
를 위해 반드시 필요하다. W/C비 1.12를 기준으로 W/C비의 범위를 설정하기위
하여 여러번의 반복 실험을 수행하였으며 <Table. 4.2>와 같이 나타내었다. 배
합비별 압축강도 및 휨강도를 산정하여 소요강도를 만족하는지 실험을 통하여
알아보았다.

Table. 4.2 Mix proportion ratio of soil cement(2)

Sample No.	W/C	S/C
b-1	1.00	2.00
b-2	1.04	2.00
b-3	1.08	2.00
b-4	1.12	2.00
b-5	1.16	2.00
b-6	1.20	2.00
b-7	1.24	2.00

초기 W/C비 1.12를 기준으로 W/C비의 범위를 1.00~1.24까지 증가시켜 W/C
비에 따른 압축강도실험결과는 <Fig. 4.7>과 같이 나타내었다. W/C비가 1.00일
때의 Soil시멘트는 건비빔 상태와 비슷하였으며, W/C비가 1.12일 때의 Soil시멘
트는 물량이 조금 더 증가 하여 약간 질퍽한 상태였으며, W/C비가 1.24일 때의
Soil시멘트는 물량이 많아져 양생시 물과 Soil시멘트가 분리되는 형상이 나타났
다. 이때 W/C비 1.08~1.24까지의 공시체가 소요압축강도 12MPa이상을 만족하
였으며 W/C비 1.12를 기준으로 물량을 증가 시켰을 때 압축강도는 감소하는 경
향을 보였다. 이는 세립토인 화산재가 어느 범위 이상으로 물량을 증가 시키게
되면 액성상태로 변하여 양생시 물과 Soil시멘트가 분리되기 때문인 것으로 사료
된다. 또한 W/C비 1.12를 기준으로 물량을 감소 시켰을 때 압축강도가 감소하
는 것은 Soil시멘트가 건비빔 상태로 되어 시멘트의 반응이 저조하여 강도가 저
하된 것으로 사료 된다.

초기 W/C비 1.12를 기준으로 W/C비의 범위를 1.00~1.24까지 증가시켜 W/C비에 따른 휨강도실험결과는 <Fig. 4.8>과 같이 나타내었다. W/C비 1.08~1.20까지의 공시체가 소요휨강도 2.5MPa이상을 만족하였다. 이때 압축강도기준과 휨 강도기준을 모두 만족하는 W/C비의 범위는 1.08~1.20으로 제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한 Soil시멘트의 배합비로 설정하였다.



Fig. 4.7 The result of compressive strength



Fig. 4.8 The result of flexural strength

2. 흡착실험

단일 중금속이온의 흡착실험은 중금속 용액별로 시료를 각각 만들어 250mL 삼각 플라스크에 취하고 각 중금속용액 25mL를 가해 200rpm에서 120분 교반하여 회분식 실험을 행하였다. 시료는 교반 후 10mL를 취하여 이를 5B 여과지를 사용하여 흡착제 입자를 여과 시킨 후 중금속의 잔류농도를 AAS : 원자흡광분광계(Shimadzu AA-6701)를 사용해 측정하였다. 흡착률의 계산은 <식 4.3>을 사용하였다. <Fig. 4.9>은 실험에 사용한 교반기이고, <Fig. 4.10>은 AAS기기이다.

$$Removal(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \dots\dots\dots (4.3)$$

C_i = 중금속 초기농도(mg/L)
 C_f = 잔류중금속농도(mg/L)



Fig. 4.9 Used agitator



Fig. 4.10 AAS(Atomic Absorption Spectrometer)

2.1 중금속이온의 농도별 흡착량 실험

초기중금속이온 농도에 따른 영향을 살펴보기 위해서 제주 표선리 현무암계 화산재를 혼합한 Soil시멘트를 0.15mm이하로 분쇄하여 분쇄된 시료의 양을 1g으로 고정시키고 중금속이온의 농도를 5, 10, 20, 30mg/L로 증가시켜 보았으며, 중금속혼합용액(Cu, Pb, Cr, Cd)의 초기농도가 높을수록 첨가제의 단위 무게당 흡착량은 증가함을 알 수 있었다. 중금속 농도에 따른 흡착량은 <Fig. 4.11>에 나타내었다.

이 때 Pb는 99%이상의 중금속 이온이 흡착되었으며, $Pb > Cd > Cu > Cr$ 의 순으로 흡착 하는 경향을 보이고 있다. 이는 수화 이온의 반경이 작아지는 순서와 대체로 잘 일치하였으며, 일반적으로 수화 이온 반경이 작아짐에 따라 이온 흡착량이 커지며 수화 이온의 반경이 커짐에 따라 3차원 구조 내로 들어가지 못하고 표면에서만 흡착이 일어남으로써 제거율이 낮아지는 것으로 사료된다.(Volesky,1990)

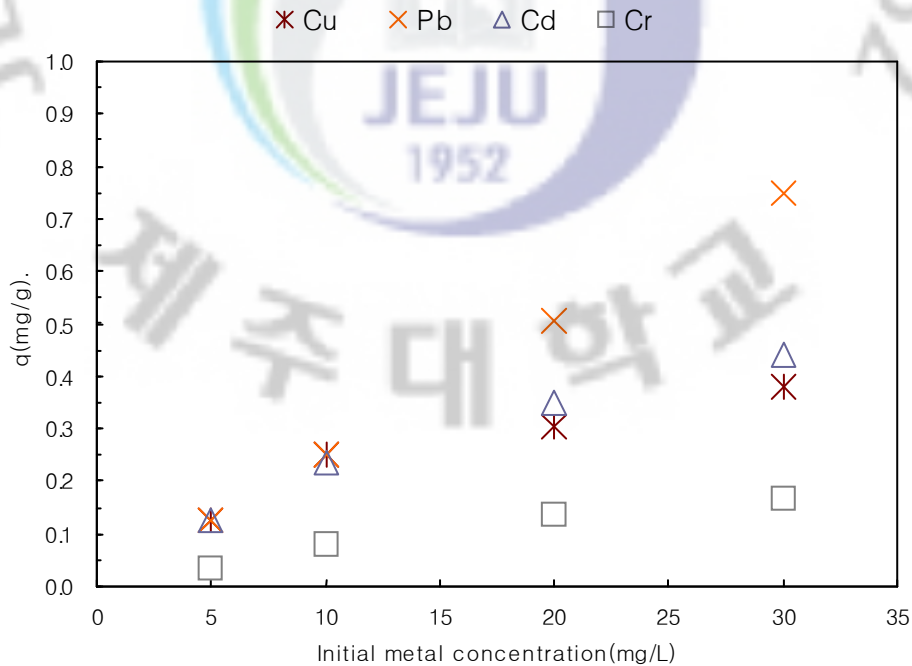


Fig. 4.11 Adsorbed amount of basaltic volcanic ash

2.2 중금속 흡착실험

제주 표선리 현무암계 화산재의 혼합량에 따른 Soil시멘트의 흡착영향을 살펴 보기 위해서 전체투입량 1g중 화산재를 wt%(weight percent)별로 0, 2, 5, 10, 20, 30%까지 단계적으로 변화시키면서 혼합 성형한 Soil시멘트를 분쇄기를 이용하여 0.3mm이하로 분쇄된 시료를 5mg/L농도의 중금속용액 25mL에 투입하여 흡착률을 구하였으며, <Fig. 4.12>에 나타내었다. 실험결과 모든 첨가제의 혼합량이 증가할수록 흡착률도 증가하였다. 이는 Gadd와 de Rome(1988)이 흡착제의 양이 많아질수록 정전기적 인력이 높아져서 중금속 이온이 더 많이 흡착된다고 한 가설과 같은 결과를 보이고 있다.

흡착률이 혼합량의 초기 0~10wt%까지는 일정하게 증가하다 10~20wt%사이에서 기울기가 줄어들어 변곡점을 형성하고 있다. Cu, Pb, Cd, Cr의 흡착실험결과에서 흡착률은 혼합량 10wt%에서부터 Cr을 제외한 모든 중금속이온의 흡착이 70%이상 흡착 되고 있다. 이것은 XRF분석결과 응집제로 작용하는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO 의 함량과 조밀한 기공이 상대적으로 많이 분포되어 있기 때문에 응집작용과 비표면적의 영향으로 흡착이 잘되는 것으로 사료된다.

<Fig. 4.12>에서와 같이 각 중금속 이온의 제거율은 Pb의 경우가 가장 높은 것으로 나타났으며, 흡착률은 $Pb > Cd > Cu > Cr$ 의 순으로 나타났다. Pb의 경우 혼합량 5wt%에서 70%이상의 흡착률을 보였으며, 이외에 Cd, Cu은 혼합량 5wt%에서 40%이상의 흡착률을 Cr은 10%미만의 흡착률을 보이고 있다. 이것은 수화 이온의 반경이 작아지는 순서와 대체로 일치하는 것이며, 이온반경이 작을수록 흡착이 잘되는 것으로 사료된다.

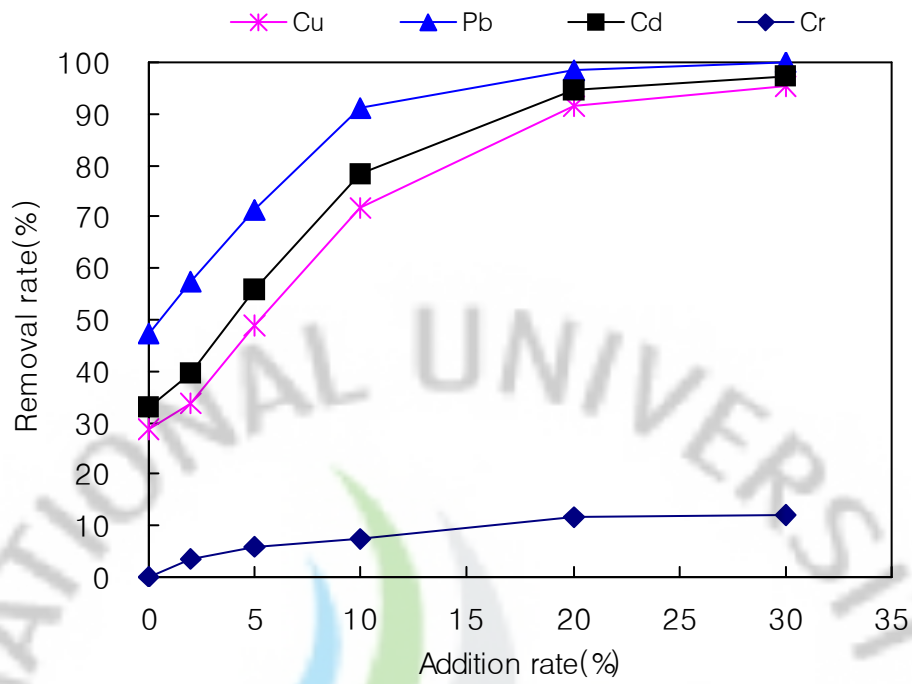


Fig. 4.12 The result of heavy metals adsorption of basaltic volcanic ash

3. 원적외선 방사율 및 탈취 실험

3.1 원적외선 방사율 실험

원적외선 은 전자파의 과장영역중 3~1000 μm 범위로써 가시광선보다 강한 열작용을 하는 방사에너지가 직접적이고 순간적으로 전달되는 열에너지를 나타내며, 제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한 Soil시멘트의 원적외선 방사율 평가 결과는 <Table. 4.3>에 나타내었다.

Table. 4.3 FT-IR Spectrometer results of basaltic volcanic ash

실험 항목		실험 결과	시험 방법
원적외선 방출량 (40℃)	방사율 (5~20 μm)	0.901	KICM-FIR-1005
	방사에너지 (W/m ²)	3.63×10^2	

원적외선 방사율 실험결과는 <Table. 4.3>과 같으며 III. 실험재료 및 특성에 서 제주 표선리 현무암계 화산재의 원적외선 방사율이 92.6%에서 Soil시멘트 제조 후 90.1%로 1.5%감소하여 매우 우수한 결과를 보였다.

3.2 탈취 실험

방취가공대상 공업제품 및 원료의 유해가스, 악취가스물질의 흡착 및 제거능력을 측정 경과시간에 따르는 실험가스(암모니아)의 농도(ppm)변화 측정을 나타내며, 제주 표선리 현무암계 화산재를 이용한 Soil시멘트의 탈취율 평가 결과를 <Table. 4.4>에 나타내었다.

Table. 4.4 Deodorization results of basaltic volcanic ash

실험항목	탈취실험(NH_3)			
	경과시간(분)	Blank농도(ppm)	시료농도(ppm)	탈취율(%)
실험결과	0	200	200	-
	30	194	23	65.3
	60	188	17	68.8
	90	183	13	70.2
	120	178	10	71.8
실험방법	KICMFIR-1085			

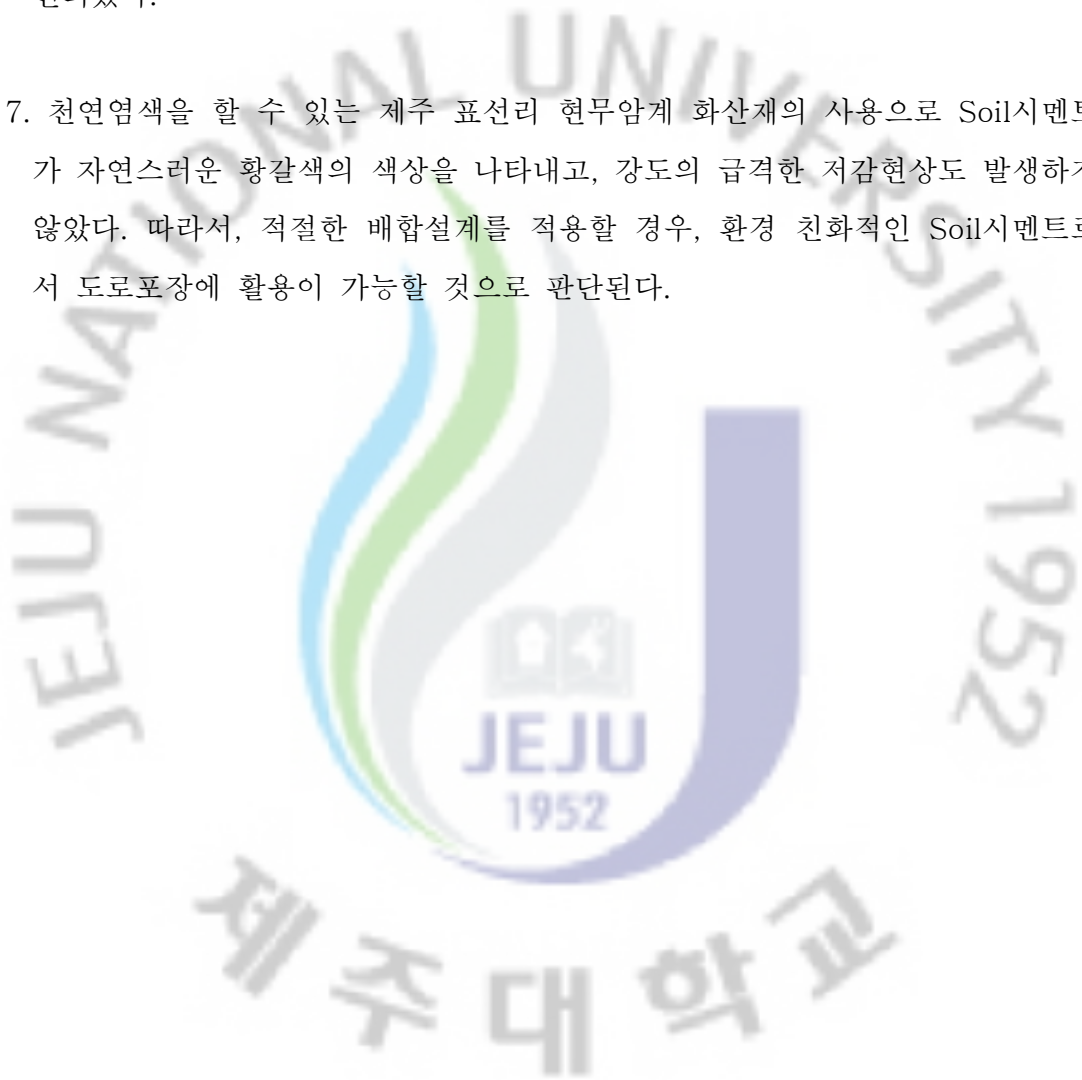
탈취율 실험결과는 <Table. 4.4>와 같으며 Ⅲ. 실험재료 및 특성에서 제주 표 선리 현무암계 화산재의 탈취율이 94.4%에서 Soil시멘트 제조 후 71.8%로 22.6%감소하여 비교적 저조한 결과를 보였다.

VI. 결론

본 연구에서는 Soil시멘트에 대하여 첫째 Soil시멘트의 주재료로 사용된 제주 표선리 현무암계 화산재에 대한 물리적·화학적 특성분석을 실내실험을 통하여 확인하였고, 두 번째 Soil시멘트의 구성 재료로 제주 표선리 현무암계 화산재를 사용하였을 때의 구조체로서 요구되는 소요강도에 대한 분석을 실내실험을 통하여 확인하였으며, 세 번째 제주 표선리 현무암계 화산재를 사용한 Soil시멘트의 원적외선 방사율과 유해성분석 및 중금속흡착효과를 분석기관에 의뢰하여 확인하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 화산재의 화학성분은 SiO_2 가 49.50%, Na_2O+K_2O 는 2.58%의 범위를 나타내어 화산암류 명명도와 제주도 지질도폭에 의한 분류에서 제주 표선리 현무암계 화산재인 것으로 분석되었다.
2. 제주 표선리 현무암계 화산재의 입도분석 결과 세립토가 주를 이루는 입도분포가 나쁜 흙의 형태를 보여주고 있으며 No.200체 통과량이 73%로 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 다짐 실험결과 최적함수비는 30%, 최대건조단위중량은 $1.423t/m^3$ 으로 나타났으며, 화산재의 다짐 곡선은 반경이 넓은 형태를 보이며 최적함수비가 높아 비교적 다짐성이 불량한 흙으로 판단된다.
3. 제주 표선리 현무암계 화산재의 입도분석 및 액·소성한계 실험결과에 따라 흙을 분류하면, 통일분류법에서는 화산재는 세립토로 CL-ML(모래질 실트질 점토)의 형태를 보이고 있으며, AASHTO분류법에 따르면 화산재는 A-4(실트질)로 노상토 등급의 불량한 흙에 해당되고 있는 것으로 분류되었다.
4. 제주 표선리 현무암계 화산재의 Soil시멘트 재료로서의 가능성을 보기 위하여 배합비별 공시체들의 압축강도 및 휨강도실험을 통하여 구조체로서 사용에 무리가 없음을 확인하였다.

5. 제주 표선리 현무암계 화산재의 압축강도와 산토, 화강풍화토, 황토 등의 압축강도를 비교 하여 보았을 때 비교적 우수한 것으로 확인 되었다.
6. 흡착재료 역할을 하는 제주 표선리 현무암계 화산재를 Soil시멘트 제조에 사용하였을 때 중금속 흡착 효과와 원적외선 및 탈취 효과가 우수한 것으로 확인되었다.
7. 천연염색을 할 수 있는 제주 표선리 현무암계 화산재의 사용으로 Soil시멘트가 자연스러운 황갈색의 색상을 나타내고, 강도의 급격한 저감현상도 발생하지 않았다. 따라서, 적절한 배합설계를 적용할 경우, 환경 친화적인 Soil시멘트로서 도로포장에 활용이 가능할 것으로 판단된다.



참고문헌

- 고득영, 2007, 페타이어 표면에 형성되는 Functional group을 이용한 중금속 (Cu,Cd, Pb)제거에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.
- 고영실, 2004, 제주도에 분포하는 세립 화산재의 공학적 특성, 제주대학교 석사 학위 논문,pp
- 김덕수, 2005, 전처리에 의한 제올라이트의 중금속 이온 제거능 개선, 제주대학교 기초 과학연구소, Vol. 18, No. 2, pp.129~143
- 김병일, 김영옥, 이승현, 2002, NSC를 첨가한 소일시멘트의 일축압축강도, 한국 지반공학회논문집, pp.159~165
- 김승현, 2008, 투수성 탄성 포장재의 투수성 향상 및 친환경적 개발에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.36~37
- 성은, 김동수, 2001, 미역을 생물흡착제로 이용한 카드뮴 흡착 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, Vol, 23, No. 12, pp.2065~2075
- 이민규, 서근학, 1996, 제주(송이)를 이용한 중금속 흡착에 관한 연구, 한국환경 학회지, Vol, 5, No. 2, pp.195~201
- 이민규, 서정호, 감상규, 이동환, 오영희, 1997, 해양 갈조류를 생물흡착제로 이용한 납 흡착 특성 연구, 한국환경공학회지, Vol,6, No.5, pp.531~539
- 윤정수, 1991, 북제주군 지역 기생화산(오름)에 관한 보고서, 북제주군, pp.
- 정동영, 최경락, 홍종현, 김문호, 2007, 레드머드와 광촉매를 사용한 칼라콘크리트의 생태 도로포장 구성에 관한 실험적 연구, 지역개발연구, pp.
- 현성수, 2000, 제주 스코리아로부터 합성된 제올라이트를 이용한 폐수 중 중금속제거에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.
- 고려 하이믹스(주), 2007, 고강도-경량콘크리트의 배합설계 방안 및 역학적 특성에 관한 연구, pp.
- Miklas Scholz, Jing Xu, 2002, Comparison of constructed reed beds with different filter media and macrophytes treating urban stream contaminated with lead and copper, Ecological Engineering 18, pp.385~390

감사의 글

인생의 기나 긴 여정을 좌 우 뒤도 돌아보지 않고 오로지 앞만 보고, 때로는 포기 하려고 했었지만 한번 더 한번만 더 한 것이 여기까지 오게 되었습니다. 8년간 야간 강의를 마치고 운전을 하며 숙소를 가다가 죽을 고비를 당한 것도 한두번이 아니었지만 이렇게 아무 탈없이 건강하게 마치게 해 준 주님께 감사드립니다.

이 논문이 완성 할 수 있게 많은 가르침을 주신 남정만 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 심사과정에서 세심한 배려와 조언을 아끼시지 않으셨던 박상렬 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사드립니다. 아울러 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 이병걸 교수님, 김남형 교수님께 진심으로 감사드립니다. 이 논문이 완성되기까지 바쁜 저를 대신하여 도와준 지반공학 연구실의 강영민 학생에게도 감사드립니다.

여기까지 배움의 길을 포기하지 않고 배려 해주신 그린랜드 최돈열 회장님, 사모님, 성지건설의 안정학 사장님께 감사드립니다.

지금까지 연구와 실험을 계속 할 수 있도록 배려 해 준 제주산업의 현창헌 사장님, 우남진 고문님, 이광석 부장님, 우남도 소장님, 직원 여러분에게도 진심으로 감사를 드립니다.

단 한분뿐인 형님, 형수님, 이렇게 되게 해준 것에 대해 감사드립니다. 지금까지 아무 말없이 지켜봐 준 사랑하는 아내, 큰딸 소연이, 둘째 현지, 자랑스런 막내아들 준형이, 며느리 그리고 사위들에게도 너무나도 부족함이 많은 아빠에게 힘이 되어준 것에 대해 고맙게 생각 한다. 그리고 사랑한다.

2008년 12월

金 龍 泰