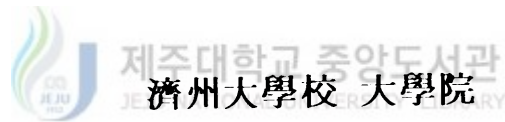


碩士學位論文

현무암 석분슬러지의 차수재 활용에  
관한 연구



土木海洋工學科

金 昇 範

2006年 6月

# 현무암 석분슬러지의 차수재 활용에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

金 昇 範

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 6月

金 昇 範의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2006年 6月

**A Study on Utilization of Powdered Basalt  
Sludge for Liner**

**Seung-Beom Kim**

**(Supervised by Professor Jung-Man Nam)**

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



**제주대학교 중앙도서관**  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

**2006. 6.**

**Department of Civil & Ocean Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

# < 목 차 >

목 차 .....	i
List of Table .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vii
I. 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 내용 및 범위 .....	2
II. 석재 및 차수재 현황 .....	3
2.1 석재의 정의 및 제주도 석재산업 .....	3
2.1.1 석재의 정의 .....	3
2.1.2 제주도 석재 산업 현황 .....	3
2.1.3 석재채석공정 및 가공공정 .....	4
2.2 차수재의 현황 .....	6
2.2.1 국내 차수재 설치기준 .....	6
2.2.2 차수재의 종류 .....	6
III. 기존연구 .....	10
3.1 연구동향 .....	10
3.2 현무암 석분슬러지의 특성 .....	12
3.2.1 물리·화학적 .....	12
3.2.2 압축강도 .....	15
3.2.3 투수 .....	16
3.2.4 포졸란 반응 관찰 .....	17

3.2.5 시멘트 및 혼화제 .....	18
3.3 시멘트의 특성 .....	19
3.3.1 시멘트의 수화열 .....	19
3.3.2 시멘트의 수화열에 의한 강도 관계 .....	20
3.3.3 포졸란 반응 .....	22
3.4 콘크리트의 건조수축 .....	22
<b>IV. 실험 .....</b>	<b>24</b>
4.1 실험방법 및 기구 .....	24
4.1.1 동결융해시험 .....	24
4.1.2 건조수축균열시험 .....	30
4.2 공시체 제작 .....	32
4.2.1 동결융해시험 .....	33
4.2.2 건조수축균열 및 중량변화시험 .....	36
<b>V. 결과 및 분석 .....</b>	<b>37</b>
5.1 동결융해시험 .....	37
5.1.1 압축강도시험 .....	37
5.1.2 투수시험 .....	42
5.1.3 중량변화시험 .....	46
5.1.4 포졸란 반응 관찰 .....	48
5.2 건조 수축에 의한 균열 및 길이변화시험 .....	51
5.2.1 균열 시험 .....	51
5.2.2 길이변화시험 .....	52
<b>VI. 결론 .....</b>	<b>54</b>
<b>VII. 참고문헌 .....</b>	<b>56</b>

## <List of Table>

Table 2.1 The type of various liner( Korea Geotechnical Society 1999) .....	7
Table 3.1 The physical of the Powdered basalt(Nam, 2005) .....	12
Table 3.2 Direct shear test result(Nam, 2005) .....	13
Table 3.3 Chemical composition of Powdered basalt(Nam, 2005)) .....	14
Table 3.4 Compressive strength of water curing specimen(Nam, 2005) .....	15
Table 3.5 Compressive strength of air curing specimen(Nam, 2005) .....	15
Table 3.6 Coefficient of permeability of Specimen(Nam, 2005) .....	16
Table 3.7 Chemical composition of cement .....	18
Table 3.8 Physical composition of cement .....	18
Table 3.9 Chemical composition of quick setting admixtures .....	19
Table 3.10 Heat of hydration for cement(Kwon, 2004) .....	20
Table 5.1 Freezing and thawing after Compressive strength .....	37
Table 5.2 Freezing and thawing after Coefficient of permeability .....	41
Table 5.3 Freezing and thawing before weight of Specimen .....	44



## <List of Figures>

Fig. 2.1	Condition of quarry and a stone processing plant in jeju .....	3
Fig. 2.2	The storage of stone processing system and sludge .....	5
Fig. 3.1	Grain-size distribution curve of Powdered basalt .....	12
Fig. 3.2	The shape/surface in relation to the Cement Content by scanning electron micrograph(Nam, 2005) .....	17
Fig. 3.3	heat of hydration speed curve(Kwon, 2004) .....	21
Fig. 4.1	freezing and thawing apparatus .....	24
Fig. 4.2	Temperature change of specimen .....	25
Fig. 4.3	The inside of freezing and thawing apparatus .....	26
Fig. 4.4	Electric Asphalt Core Drilling Machine .....	26
Fig. 4.5	Schematic diagram of Permeability test container .....	27
Fig. 4.6	Permeability Test Apparatus of concrete .....	28
Fig. 4.7	Schematic diagram of Permeability test setup .....	29
Fig. 4.8	Water curing of specimen .....	30
Fig. 4.9	Specimen for crack test .....	31
Fig. 4.10	length change test equipment .....	32
Fig. 4.11	Specimen mold for permeability test .....	33
Fig. 4.12	Specimen prepared for this study .....	34
Fig. 4.13	Schematic diagram for test setup .....	34
Fig. 4.14	The making process for specimen .....	35
Fig. 4.15	Three Gang Mortar Cylinder Mould .....	36
Fig. 4.16	Prism mould for this study .....	36
Fig. 5.1	The relation between compressive strength and Cement Content .....	39
Fig. 5.2	The relation between compressive strength and Curing time .....	39
Fig. 5.3	Comparison of before and after strength in freezing and thawing ( 7day curing) .....	39
Fig. 5.4	Comparison of before and after strength in freezing and thawing	

(14day curing) .....	40
Fig. 5.5 Comparison of before and after strength in freezing and thawing ( 28day curing) .....	40
Fig. 5.6 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content .....	40
Fig. 5.7 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content .....	41
Fig. 5.8 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content .....	41
Fig. 5.9 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content .....	41
Fig. 5.10 Relation of permeability coefficient and Curing time .....	43
Fig. 5.11 Relation of permeability coefficient and Cement Content .....	43
Fig. 5.12 comparison of before and after permeability in freezing and thawing ( 7day curing) .....	44
Fig. 5.13 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(14day curing) .....	44
Fig. 5.14 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(28day curing) .....	44
Fig. 5.15 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content .....	45
Fig. 5.16 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content .....	45
Fig. 5.17 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content .....	45
Fig. 5.18 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content .....	46
Fig. 5.19 Loss in weight rate (7day curing) .....	47
Fig. 5.20 Loss in weight rate (14day curing) .....	48



Fig. 5.21 Loss in weight rate (28day curing) .....	48
Fig. 5.22 The shape/surface in Cement 100% Content by scanning electron micrograph(1000:10000) .....	49
Fig. 5.23 The shape/surface in Cement 50% Content by scanning electron micrograph(1000:10000) .....	49
Fig. 5.24 The shape/surface in Cement 33% Content by scanning electron micrograph(1000:10000) .....	50
Fig. 5.25 The shape/surface in Cement 20% Content by scanning electron micrograph(1000:10000) .....	50
Fig. 5.26 The shape/surface in Cement 17% Content by scanning electron micrograph(1000:10000) .....	50
Fig. 5.27 Crack number in a day .....	51
Fig. 5.28 Shape of crack .....	52
Fig. 5.29 Length change in a day .....	53



## Abstract

The recent increase in demand of stone/aggregate material has brought about environmental pollution caused by dust, wastewater, stone dust, and sludge caused during the development and manufacturing of the material.

This research studies ways to solve the above problem and use stone dust to minimize environmental pollution. And since stone dust can be easily acquired, this research looks for ways to maximize its recycling into liner material. From this an analysis and comparison of solidity, compressive strength, permeability, weight, and Pozzolan reactions of powdered basalt sludge, cement and mixed waste forms, when freezing and thawing occurs. Also, the change in length and cracks caused by contraction of waste forms are analyzed, and the compressive strength and coefficient of permeability rate were compared based on a theory provided in the research, "A Study on Suitability of the Liner by Powder Basalt Sludge(Jung Man Nam, 2005)." Results of a decrease in the range between -13%~-31% was discovered when more powdered basalt sludge was included. In the weight change experiment, the weight decreased by more than 9% when powdered basalt sludge content increased. There were fewer cracks with more powdered basalt sludge, and contraction increased with more cement. The compression strength decreased and coefficient of permeability rate increased with more powdered basalt sludge, but this material can be used as liner material if the content is below 80%.

# I. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

과학기술의 발전함에 따라 각 산업의 발전의 급속히 이루어 졌다. 이로 인하여 물질적·경제적으로 풍요롭게 되었으나 자원의 고갈과 이와 더불어 발생하는 폐기물에 의해 환경파괴가 대두 되고 있다.

산업의 발달과 생활의 풍요로움 속에 배출되는 폐기물의 양은 증가하고 있으며 폐기물의 처리 문제는 환경적으로 커다란 문제점으로 부상하고 있다. 한정적인 자원의 감소와 폐기물에 의한 환경오염은 심각한 문제로 폐자원의 재활용은 환경오염 및 한정적인 자원 감소의 문제점들을 해결할 수 있는 최선의 방법이다.

국내의 기술 발전방향은 현존 자원을 이용하여 생산하는 기술을 발전하여 왔지만 이를 적절하게 처리하여 재자원화 하는 기술의 발전 속도는 낮은 실정이다. 대부분의 자원을 해외로부터 의존하고 있는 우리나라의 경우 자원을 효율적으로 활용함으로써 자원절약을 할 수 있는 길이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 폐기물의 재활용 방법들이 추진되고 있다.

여러 산업분야의 급속한 성장과 더불어 석·골재 산업은 꾸준히 발전하여 왔다. 그러나 최근 석·골재 자원의 수요가 점점 증가함에 따라 개발과 가공시 발생하는 분진과 폐수, 석분 및 슬러지등이 각종 환경오염 문제를 야기 시켜, 이와 관련된 업체의 존폐에 적지 않은 영향을 미치고 있다.

우리나라의 경우 석재자원은 전국토의 약 25%에 석재가 매장되어 있으며 추정매장량은 70억톤으로 가채년한은 약 160년이다. 현재 제주도내 현무암을 가공 생산하는 공장들이 수십개소가 있다. 이 채석장에서 원석을 채굴하여 건축용 석재 등으로 가공하는 과정에서 석재이 약 60% 정도가 폐석이나 석분 슬러지로 손실 되고 있다. 이중 폐석의 일부분만이 도로 포장용 쇄석골재로 재활용 되고 있을 뿐 대부분의 폐석 및 석분 슬러지는 방치, 노적되어 주위환경을 훼손 및 오염시켜 주된 민원대상이 되고 있다. 각 사업장에서는 이들을 자체적으로 처리하기 위하여 매립용 부지의 확보 및 처리시설의 설치에 막대한 비용이 소요되어 업체에 큰 부담이 되고 있는 실정이

다. 석분 슬러지는 국내 현행 폐기물 관리법에서는 사업장내에서 발생하는 산업폐기물로 분류되고 있어 별도의 처리방법이나 재활용 방법이 없다.

따라서 본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 개선하고 국내 석재산업에서 폐기물로 배출하고 있는 석분을 활용하므로 자원의 재활용 및 환경오염 최소화는 물론 원료의 확보가 용이하고 석분의 재활용을 극대화 및 차수용 재료로 재활용 하기위한 석분슬러지와 시멘트, 혼화제 교반혼합된 고화체에 대하여 급속 동결 융해에 대한 강도 및 투수, 중량, 포졸란반응 을 비교·분석하고자 하였다. 또한 고화체의 건조수축으로 인한 길이 변화량을 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였고, 수축균열을 변화에 관한 연구를 수행 하였고, 현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구(남정만 등, 2005)의 이론을 바탕으로 하여 일축압축강도 및 투수계수의 값을 비교·검토하였다.

## 1.2 연구내용 및 범위

매립장에서 차수시설은 침출수와 누출방지와 집수 및 배수, 지하수의 유입을 방지하는 기능을 한다. 매립지 차수시설은 일반적으로 투수성이 낮은 점토재료의 차수재를 사용한다.

본 연구에서는 현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구(남정만 등, 2005)에 사용된 현무암 석분슬러지를 이용하여 시멘트와 혼화제가 교반 혼합된 고화체의 동결융해에 대한 극한 상태에서의 거동과 건조수축으로 인한 고화체의 특성을 파악하고자 다음과 같은 연구를 실시하였다.

- (1) 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제와 혼합하여 배합비별로 극한 상태에서 일축압축강도 및 투수특성을 연구하기 위해 동결융해후 중량 감소율 및 동결융해전·후 강도특성, 투수계수를 분석한다.
- (2) 배합비별 건조수축에 의한 길이 변화 특성을 분석한다.
- (3) 건조수축 및 수화열에 의한 건조균열에 특성을 분석한다.
- (4) 동결융해로 인한 포졸란 반응을 관찰한다.

## II. 석재 및 차수재 현황

### 2.1 석재의 정의 및 제주도 석재산업

#### 2.1.1 석재의 정의

석재라 함은 토목, 건축 및 조각품의 재료로 사용할 수 있는 모든 종류의 암석으로 규정되어 있으며, 대한광업진흥공사 석재 산업자금융자 및 관리 규정에 지칭하는 것으로 한국공업규격(KS F 2530)에서는 주로 토목, 건축에 사용하는 천연의 석재로 규정한다. 이들은 화강암, 석록암, 반려암, 안산암, 현무암, 사암, 편마암 등의 암석 이외에도 석회석, 돌로마이트, 규석, 장석 등도 석재로 사용된다. 넓은 의미로는 석재 즉, 토목, 건축, 조각품 등의 재료 사용할 수 있는 모든 종류의 암석, 골재, 자갈, 암분 등을 이 있고 좁은 의미로는 건축, 조각 재료로서의 석재를 칭하여 구별한다.

#### 2.1.2 제주도 석재 산업 현황

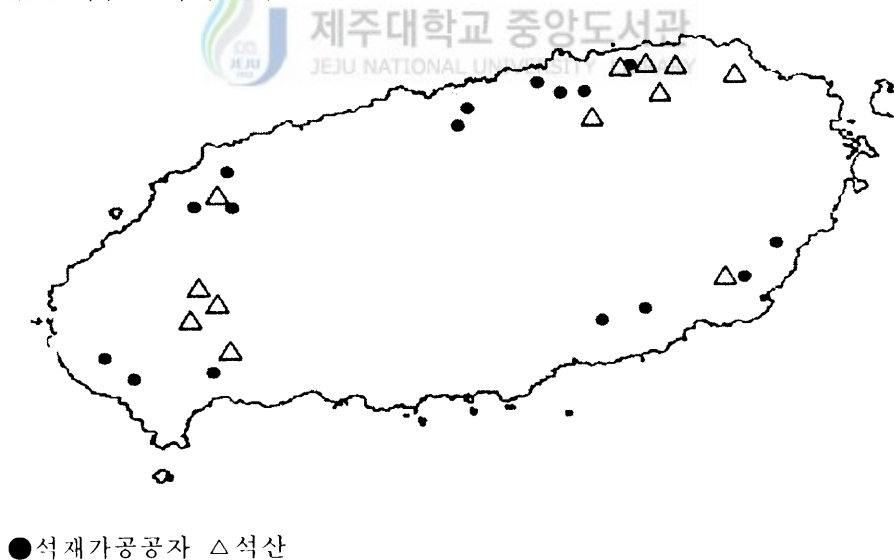


Fig. 2.1 Condition of quarry and a stone processing plant in jeju

제주도 석재 산업 및 석산을 Fig. 2.1에서와 같이 석재 가공공장이 약 16개, 석산이 약 12개 업체정도 정도 분포하고 있다.

도로 경계석 및 흑벽석, 보도판석, 보차도 경계석등으로 그 수요량은 약 30만개/년 소요량으로 예상되고 가공 시 현무암 석분 슬러지 발생량은 만 톤/년 정도로 석분슬러지만 그 발생량이 상당히 많은 것으로 나타나고 있다. 현재 석분슬러지는 건조 후 매립지 등 일부 복토재로 약 10% 정도만 활용되고 있는 실정이다. 석산별 한라산을 경계로 제주도를 동쪽과 서쪽으로 나누어 강도시험 결과 동쪽에서는 강도 : 306.0~888.5 kgf/cm<sup>2</sup> 서쪽에서는 강도 : 531.2~2,200kgf/cm<sup>2</sup> 강도에서 차이가 나고 있다. 서쪽(무결암) 현무암이 동쪽(다공질암)의 현무암 보다 강도가 더 좋음을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 현무암 석분 슬러지는 북제주군 한림읍 석재 가공공장에서 나온 현무암 석분 슬러지를 사용하였다.

### 2.1.3 석재채석공정 및 가공공정

주요 생산 활동 석산으로부터의 원석절단, 일정 규격의 block채취, 채취된 block의 전도 및 상품화를 위한 원석의 소할(小割)작업과 운반 및 적재 등으로 구분할 수 있으며, 채석작업에서 주로 사용되는 장비는 穿孔장비(착암기), 암반으로부터 원석 채취를 위한 채석장비( jut burner, slot drill), 전도, 운반 및 적재장비(loader, payloader, shovel 등), 그리고 압축공기를 공급하는 동력장치(압축기)등으로 대별 할 수 있다. Fig. 2.2에는 석산으로부터 채취된 원석을 가공하는 순서이다. ①은 석산으로부터 가지고온 공장의 한곳에 원석을 저장 하게 된다. 이때 이 원석을 공장안으로 운반하여 ②처럼 원석을 상품화하기 위한 원석을 크기별로 절단하는 모습이고 이때 석분슬러지가 발생하게 된다. ⑤는 원석으로부터 상품화한 도로 경계석이다. 이밖에도 흑벽석, 보도판석, 보차도 경계석등으로 가공이 된다. ②에서 발생된 석분슬러지는 물과 공장내부의 수로를 통해 ③번과 같이 밖으로 유출이 된다. 밖으로 유출된 석분슬러지는 ④번과 같이 한곳에서 모이게 되어 저장하고 있다.



Fig. 2.2 The storage of stone processing system and sludge

석재 가공공장에서 ④번과 같이 석분슬러지가 모이게 되는데 석재 가공공장 옆에는 이런 석분슬러지가 쌓여 있고 이것의 재활용 방법이 없어 폐기물로 처리하고 있는 실정이다.

## 2.2 차수재의 현황

### 2.2.1 국내 차수재 설치기준

토양 오염도가 우려기준 이상이고 대책 기준 이하일 때에는 차수조를 설치하여 그 속에 오염토양을 봉입한다. 차수공법을 실시할 때에는 지반의 투수성, 지하수의 특성 등을 고려하여 오염물질이 외부로 누출·유출 되지 않도록 시공해야 한다.(한국지하수토양환경학회,2001)

악성 오염 토양의 경우에는 최종매립처분을 하게 되는데, 건전한 매립지의 석계 시공, 운영 및 사후관리를 위하여 매립지의 구성 요소인 배수층·차수층·가스수집층·식생대층 등 모든 요소가 중요하지만, 환경적인 위해성을 줄이는 측면에서는 차수층이 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

모든 매립지는 침출수를 누출하고 있거나, 잠재적으로 침출수를 누출할 가능성을 지니고 있다. 이러한 침출수의 이동 및 화학 물질의 유출을 저지하여 환경적 영향이 무시될 수 있을 정도의 능력을 갖추게 하는 역할을 하는 층이 바로 차수층이다. 차수층의 재료로 점토 등의 천연 재료 및 토목합성수지등을 주로 이용하는데, 이물질들의 조건으로는 각국의 법적 기준에 따라 다르지만 투수계수  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  이하를 만족시키고, 매립지 운영에 가능한 강도를 발휘하며, 그 자체로서 환경에 유해하지 않아야 한다.

### 2.2.2 차수재의 종류

일반적으로 대표적인 차수재로는 다짐점토가 있으며, 차수층 자체는 물과 침출수에 대하여 “불투수층”일 뿐만 아니라 오염수, 이온교환 및 회석(화산 및 분산에 의함)을 통하여 거동을 방해하는 기능을 가지고 있다.

차수층 설계는 보통 점토의 투수계수 안에서 오염물질의 이동, 확산, 화학적 특성 및 동수경사 등에 대하여 층의 두께를 어떻게 결정하는가에 기준을 두고 있다. 그러나 실제적으로 차수층의 설계에 있어서 중요한 것은 설계기준에 맞는 투수계수(국내·외 기준  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하)를 가질 수 있는 적당한 차수물질을 선택하는 것이다. 차수층의 조



건으로는 이류와 확산으로 인한 오염물 이동의 최소화, 오염물에 대한 높은 흡착력과 지연효과, 화학물질과 침식에 대한 저항성, 자가 치유능력 등이 있으며, 차수물질과 라이너 사이에서 발생하는 반응을 파악하여야 한다.

Table 2.1 The type of various liner(Korea Geotechnical Society, 1999)

대분류	세분류
점토차수재 (clay liner)	가. 자연점토 차수재(natural clay liner) 나. 다짐점토 차수재(compactd clay liner)
지오멤브레인 (geomembrane)	가. 열가소성 ●PVC ●HDPE ●CPE ●EIA ●ECB 나. 열경화성 ●EVA ●EPDM ●IIR ●CR ●EPT 다. 혼합성 ●CSPE ●PVC-nitrile ruber ●PVC-ethyl vinyl acetate ●Cross-linged CPE
GEL차수재 (geosynthetic clay liner)	가. 지오텍스타일과 벤토나이트 결합재 나. 지오멤브레인과 벤토나이트 결합재
혼합차수재	가. 흙-벤토나이트 나. 흙시멘트 다. 흙회석 라. 콘크리트 ● 포틀란트 시멘트 콘크리트 ● 로라 다짐 콘크리트 마. 아스팔트 ● 아스팔트 콘크리트 ● 고무아스팔트 콘크리트 ● 흙/모래 아스팔트
스프레이차수 (spray on liner)	가. 아스팔트 코팅 나. 숯크리트
토질안정차수재	가. BEE Star 나. EM 다. Condor SS 라. Ion-X System
산업폐기물 재활용 차수재	가. 플라이 애쉬 나. 페타이어 다. 폐석고 라. 폐석회 마. 광산폐기물 바. 건설폐기물
흡착차수재 (absorptive liner)	가. 활성탄 나. 페타이어 다. 석탄회 라. 데오라이트 마. 석회석

Table 2.1에는 매립지에 사용되는 각종 차수재에 대하여 소개하였는데 점토 차수재, 지오멤브레인차수재, 혼합차수재, 스프레이 차수재 및 기타 등으로 분류되고 이들 차수재는 많은 종류로 세분되어 전체 종류로는 수십종에 이른다.

### 1) 점토

점토는 토양의 분류에서 점토함량의 정도에 따라 낮은 투수계수를 보장하기 때문에 차수층의 가장 중요한 구성 성분이다. 대체로 두 가지 토양분류 시스템이 사용되며, 그 중 하나인 American Society of Testing and Materials(ASTM, 美國材料試驗協會)에 의한 토양분류법이 우선적으로 사용되며, 또는 The U.S. Department of Agriculture's(USDA's, 美國農務部)과 American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO, 美國公立道路局) 혹은 Unified Soil Classification System(USCS, 統一分類法)등의 토양분류시스템은 주로 토양학자, 농업경제학자, 그리고 토양 물리학자들에 의해 사용된다.

점토는 일반적으로 소성과 낮은 투수계수( $K=10^{-6} \sim 10^{-7}$  cm/sec)를 갖고 있다. 자연 상태의 점토는 내륙 지역의 양질의 점토 또는 해안지역의 해성점토를 예로 들 수 있다. 차수재로 선정된 차수점토재료는 입도분포, 액·소성한계, 다짐, 투수성, 전단강도 등의 실험을 실시하여 차수재료로서의 적합성을 검사하여야 한다.

### 2) 혼합토

차수재 층을 형성함에 있어 투수계수가 낮은 점토가 충분하지 않은 실정이므로 현장 토에 소성이 높은 외부 점토 또는 벤토나이트와 같은 상업적 점토 등을 혼합함으로써 투수기준을 만족하고 있다. 투수기준을 만족하기 위해 토양-벤토나이트, 토양-시멘트, 일반시멘트 콘크리트, 황산염 콘크리트, 플라이애쉬-시멘트/석회/벤토나이트 등이 있다.

### 3) 지오멤브레인(Geomembrane)

최근 인공차수재인 지오멤브레인이 차수재로서 많이 사용되고 있는데 지오멤브레인은 화학성분에 대한 내화학성이 크고 투수계수가  $10^{-12} \sim 10^{-14}$  cm/sec로서 매우 낮은 장점을 가지고 있다.

지오멤브레인에는 합성수지류, 합성고무류 및 아스팔트가 있는데 이 중에서 주로 많이 사용되는 것은 HDPE(High Density poly Ethylene), EPDM(Ethylene propylene Diene)등이다.

#### 4) 토목합성수지라이너

Geosynthetic Clay Liner(GCL)은 지오멤브레인보다 점토의 장점을 고루 갖고 있는 차수재라고 할수 있는데 취급이 용이하며 점토보다 상대적으로 두께가 얇은 특성을 가지고 있다.

지오멤브레인은 천공이 되면 자체 복원 능력이 없으나 GCL차수재는 벤토나이트의 팽창 및 점성에 의하여 자체복원능력이 있기 때문에 천공에 의한 누수저감 효과가 크다.



### III. 기존연구

#### 3.1 연구동향

현재 국내에서 석분슬러지에 대해 연구 되어지고 있는 문헌 중 석분슬러지의 물리·화학적 특성 및 이에 대한 활용방안에 대한 연구로 진행되어 왔다.

이수철(1997)은 석분을 혼화재로 사용한 콘크리트의 강도 특성에 관한 연구를 석분과 물 양의 차이에 따라 강도시험을 실시하였다. 콘크리트의 배합은 물 함유량 40%와 50%에 대하여 석분의 양을 시멘트 함유량의 10, 20, 30% 변화시키고 잔골재와 굵은 골재를 혼합하여 배합을 하였다. 석분의 양이 많을수록, 물이 양이 적을수록 강도는 증가 하는 것으로 나타나고 있다.

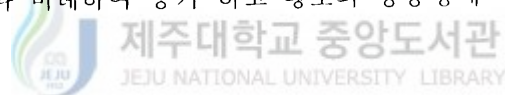
진호일(1999)은 석산 및 석가공업체로부터 발생하는 석폐기물의 입도분석과 비중, 비표면적, 입자분석, 화학적특성을 실험하였다. Malvern Mastersizer S 입도분석기로 분석한 점토( $2\mu\text{m}$ 이하)함유율이 13.2~23.2%정도 이고 실트( $2\sim 50\mu\text{m}$ )함유량은 59.3~74.5%정도이다. 비표면적은  $1.95\sim 13.97\text{m}^2/\text{g}$ 로 나타나 있다. 화학적 성분은  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 주를 이루고 있다. PH는 5.57~8.21로 약산성에서 약알칼리성으로 분포되어 있다. 석폐기물중 미량 원소중에 Cu, Cd, Pb, Co성분이 들어 있으나 이것은 분쇄과정에서 연마제 및 가공때 생겨난 것으로 보고 있다.

진호일(2000)은 석산과 석재가공공장에서 나오는 석분슬러지를 이용하여 중금속 흡착능력을 연구하였다. 석분의 물리·화학적 성분은 비중이 2.61, 점토( $2\mu\text{m}$ 이하) 함유율이 13.3 ~ 14.8%정도 이고 실트( $2\sim 50\mu\text{m}$ )함유량은 59.3~74.5%정도이다. 비표면적은  $1.95\sim 6.13\text{m}^2/\text{g}$ 로 나타나 있다. 화학적 성분은  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 주를 이루고 있다. PH는 6.32~8.21 약알칼리성을 띄고 있다. 석산에서 나온 석분슬러지는 Pb의 경우 15분, Cu의 경우 2시간, Zn의 48시간 흡착반응시간과 폐수의 초기 PH는 3이상, 흡착제와 폐수의 비가 0.02의 조건에서 흡착이 잘되었고, 석재가공공장에서 나오는 석분슬러지의 경우 Pb의 경우 12시간 흡착반응시간과 폐수의 초기 PH는 3이상, 흡착제와 폐수의 비가 0.02의 조건에서 흡착이 잘되었고 Cu와 Zn의 경우 탈착이 되었다. 석산에서 나온 석분슬러지가 중금속 흡착이 더 잘되는 것으로 나타나고 있다. 중금속 흡착

제로서 활용가능성을 나타내고 있다.

한국산업자원부(2000)에서는 석분슬러지 및 폐석을 이용하여 인조석제조에 대한 연구를 하였다. 석분의 원료는 화강암으로 하였고 인조석 판재를 제조하여 이에 대한 물성치는 흡수율이 0.31~0.45, 압축강도 730~790  $Kg/cm^3$ , 인장강도 60.0~61.9  $Kg/cm^3$ 로 나타났다. 이는 원재료인 화강암에 비해 다소 낮은 값을 보이나 사암이나 콘크리트 보다는 높은 값을 보였으며 천연석재에 비해 비중이 낮은 특성 등을 보였다. 이러한 인조석재 고유의 특성과 다양한 문양 및 색상 등 인조석재만이 갖는 장점을 활용한다면 내장재 및 바닥재 등 건축용 자재로서의 활용가능성이 매우 높다고 제시하였다.

성찬용(2003)은 석분과 황토를 이용하여 건자재 제품 개발에 대하여 연구를 하였다. 공시체를 석분, 황토, 시멘트, 모래를 배합비별 단위중량, 흡수율, 강도, 동탄성계수에 대하여 연구를 하였다. 단위중량은 2,050~2,135  $Kg/m^3$ 범위이고 황토와 석분을 첨가할수록 무게가 감소하였다. 흡수율은 8.25~18.16정도로 황토와 석분을 첨가할수록 흡수율이 증가 하였다. 재령 28일 압축강도는 107~451  $Kgf/cm^2$ , 휨강도는 23~81  $Kgf/cm^2$ 의 범위로 나타났고, 황토와 석분의 사용량이 증가할수록 감소하고, 황토 사용량을 40%까지 증가하여도 벽돌의강도 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 동탄성계수는 강도의 증가와 비례하여 증가 하고 황토의 상용량에 따라 영향이 더 크다.



### 3.2 현무암 석분슬러지의 특성

#### 3.2.1 물리·화학적

Table 3.1 The physical of the Powdered basalt(Nam ,2005)

Tests	Test Result	
	Contents	Powdered basalt
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.87~2.97
Water contents	Water contents(%)	34.5~35.5
Liquid & Plastic	Liquid limit (LL,%)	22.3~23.0
	Plastic limit (PL,%)	16.57~18.70
	plastic index (PI)	3.46~5.73
Shrinkage Limit	Shrinkage Limit (SL,%)	13.32~16.65
	Shrinkage Ratio (SR)	1.23~3.21
	Volume Change (Sv,%)	8.54~9.82
	Linear Shrinkage (Ls,%)	2.36~3.65
A compaction	Optimum moisture content(%)	21~25
	Maximum dry unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.62~1.675

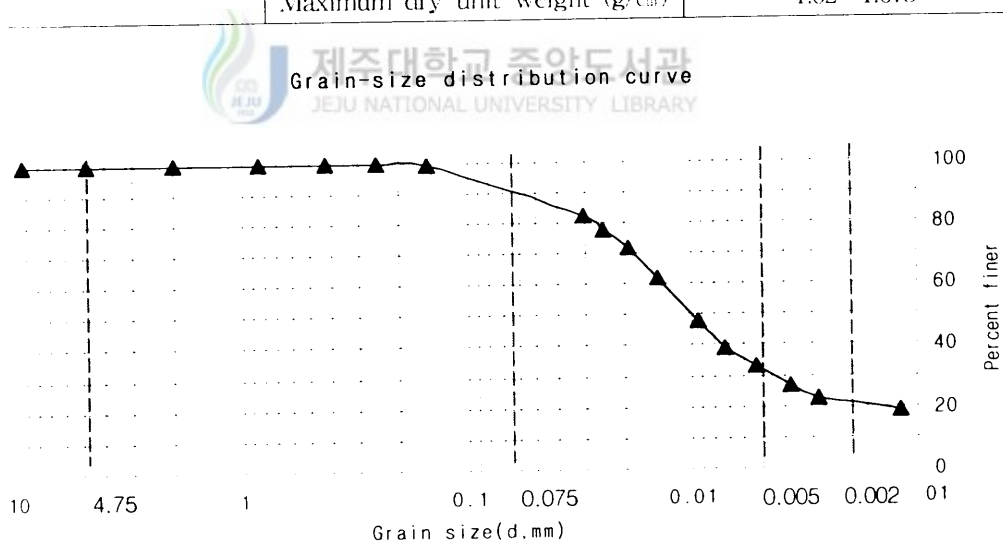


Fig. 3.1 Grain-size distribution curve of Powdered basalt

물리적 특성으로 현무암 석분슬러지의 입도는 미세입자의 함량이 비교적 크게 나타났다. 입자의 직경이 0.002mm 보다 작은 부분이 약 20%정도 나타났고 비중의 2.87~2.97로서 일반적인토사의 비중값에 비해 크다. 액성한계는 22.3~23.0%, 소성한계는 16.57~18.7%로 소성지수는 3.46~5.73%로 소성이 작다 최적함수비는 21~25%에 분포하며, 최대건조단위중량은 1.62~1.675g/cm<sup>3</sup>의 범위에 분포한다. 통일분류법에 의하여 분류하면 ML-CL과 유사한 것으로 나타났다.

Table 3.2 Direct shear test result(Nam, 2005)

Tests	Test Result		
	Contents	Powdered basalt	
direct shear	angle of shear resistance( $\phi$ )	relative density30%	29.16°
		relative density50%	31.49°
		relative density70%	33.74°
		compaction test result	37.34°
	cohesion(c)	relative density30%	0.096
		relative density50%	0.157
		relative density70%	0.014
		compaction test result	0.763

상대밀도가 증가할수록 전단 저항각은 증가하는 것으로 나타난다. 전단저항각( $\phi$ )은 29~34° 정도이고, 점착력(c)은 0.01~0.15kg/cm<sup>2</sup> 정도이고 느슨한 모래와 유사한 특성을 갖는다.

Table 3.3 Chemical composition of Powdered basalt(Nam, 2005)

Sample constituent	Contents (%)
$SiO_2$	52.66
$Al_2O_3$	14.67
$TiO_2$	1.93
$Fe_2O_3$	11.06
$MgO$	6.33
$CaO$	8.31
$Na_2O$	2.84
$K_2O$	0.98
$MnO$	0.14
$P_2O_5$	0.34
LOI	-
total	99.26

LOI : Loss of Ignition

화학적 특성으로는 PH는 약 8.67로 나타나 약알칼리성을 띠고 주성분은  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 가 78.39%로 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다.  $SiO_2$  및  $Al_2O_3$ 는 경화과정 중에 형성되는  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 터버모라이트(tobermorite :  $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ )를 형성할 수 있을 것으로 판단된다.(조재범 등, 2002)  $Al_2O_3$ 의 경우  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여  $3CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ 를 형성하며 석고와 반응하여 에트링가이트를 형성하는 포졸란반응을 일으킬 것으로 판단된다.(조재범 등, 2004).



### 3.2.2 압축강도

Table 3.4 Compressive strength of water curing specimen(Nam, 2005)

Curing time (day)	7	14	28
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
Specimen			
100% (0:1)	222.18	321.91	370.80
50% (1:1)	166.97	227.77	243.41
20% (4:1)	66.99	94.46	140.32
17% (5:1)	50.57	83.96	106.93
13% (6:1)	51.86	73.69	103.14
10% (9:1)	51.73	57.77	83.15

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

Table 3.5 Compressive strength of air curing specimen(Nam, 2005)

Curing time (day)	7	14	28
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
Specimen			
100% (0:1)	191.54	186.30	227.23
50% (1:1)	114.75	143.16	173.65
20% (4:1)	64.57	61.63	53.01
17% (5:1)	57.26	55.92	49.80
13% (6:1)	55.23	51.36	38.25
10% (9:1)	25.68	14.63	14.23

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

Table 3.4~3.5는 수중 및 공기양생후 일축압축 강도를 나타낸 것이다. 시멘트 함량이 증가할수록 압축강도는 증가하는 것으로 보인다. 수중에서 양생된 고화체는 양생기간이 증가함에 따라 압축강도는 지속적으로 증가되는 것으로 나타나고 있고, 공기중에서 양생된 고화체는 석분슬러지 함유량이 80% 이상이 되면 압축강도는 양생기간이 길어짐에 따라 감소하고 있다.

### 3.2.3 투수

Table 3.6 Coefficient of permeability of Specimen(Nam, 2005)

Curing time (day)	7	14	28
	cm/sec	cm/sec	cm/sec
Specimen			
100% (0:1)	1.638E-08	1.180E-08	7.323E-09
50% (1:1)	5.294E-08	2.225E-08	1.110E-08
20% (4:1)	4.328E-06	9.481E-08	8.942E-08
17% (5:1)	6.271E-06	1.738E-07	9.836E-08
13% (6:1)	8.693E-06	2.438E-07	1.925E-07
10% (9:1)	1.493E-05	9.342E-07	8.38E-07

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

Table 3.6은 각 배합비별 투수특성을 나타내고 있다. 시멘트 함량과 양생일이 증가할수록 투수계수 값을 낮아지는 것을 볼 수가 있다. 시멘트 함량이 17%이상이고 28일 이상 양생 고화체는 차수재로서의 투수기준  $1 \times 10^{-7}$  기준에 만족하는 것으로 나타나 있다.

### 3.2.4 포졸란 반응 관찰

Fig. 3.2는 시멘트 함유량에 따른 공시체 표면을 장방출주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 이 그림에서 보듯이 석분슬러지의 함유량이 감소할수록 입자와 입자 사이의 결합이 더욱 견고하게 이루어지고 있으며, 입자의 표면이 더딴 현상이 나타나고 있다. 그리고 석분슬러지 함유량이 감소함에 따라 고화체 시료의 변화도 뚜렷하게 나타나고 있다.

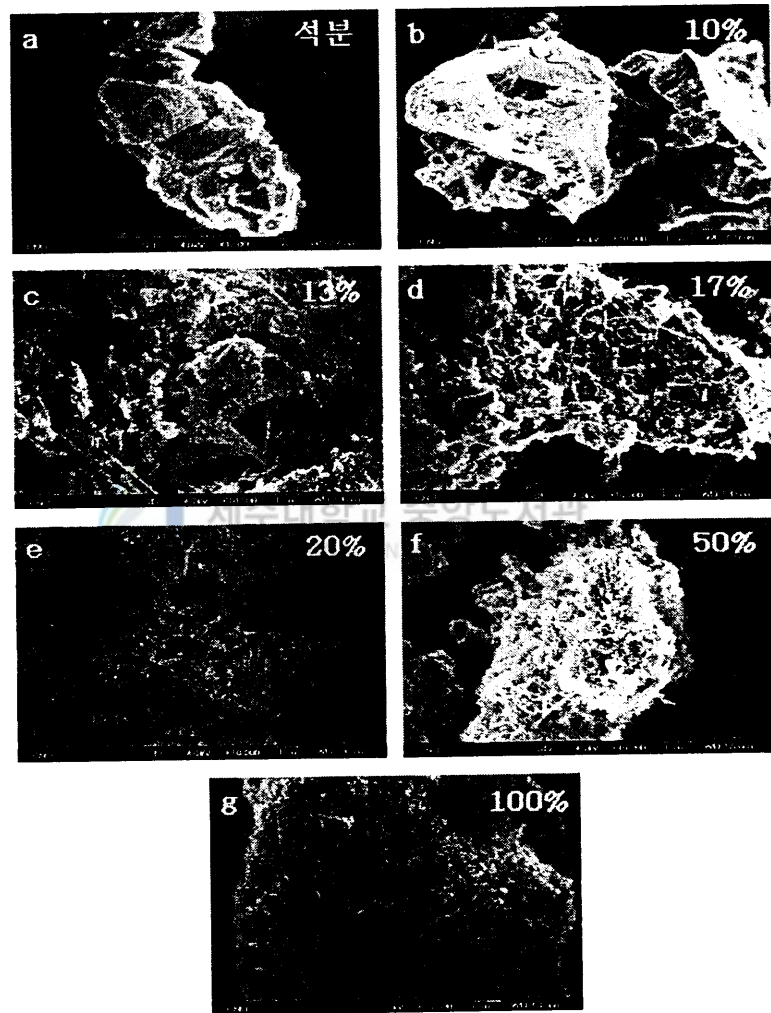


Fig. 3.2 The shape/surface in relation to the Cement Content by scanning electron micrograph(Nam, 2005)

### 3.2.5 시멘트 및 혼화제

시험에 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 D사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 혼화제는 D사 제품을 사용하였다. 사용된 시멘트 화학적·물리적 특성은 Table 3.7 ~ 3.8에 나타내었다. Table. 3.9는 혼화제의 화학적 특성을 나타내었다.

Table 3.7 Chemical composition of cement

constituent	chemical composition (%)
$SiO_2$	30~36
$Al_2O_3$	12~18
$Fe_2O_3$	0.25~0.35
$CaO$	38~45
$MgO$	10.0이하
$SO_3$	2.74
S(황분)	1.0

Table 3.8 Physical composition of cement

Contents	physical composition
강열감량 (%)	0.99
밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	2.9~2.95
잔분 (>45 $\mu$ m)	2.0 이하
평균입경( $\mu$ m)	10~13
비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	4,210
모르터의 공기함유량 (%)	3.46
비중	3.04

Table 3.9 Chemical composition of quick setting admixtures

constituent	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO$	$P_2O_5$	LOI	total
Contents (%)	-	6.59	-	-	36.41	-	-	-	37.87	80.86

LOI : Loss of Ignition

### 3.3 시멘트의 특성

#### 3.3.1 시멘트의 수화열

포틀랜드 시멘트 화합물은 고온 반응의 비평형 생성물로 그 결과 높은 에너지 상태로 된다. 시멘트가 수화하면 화합물은 물과 반응하여 에너지가 낮은 안정한 상태에 이르는 데 이 과정에서 열의 형태로 에너지를 방출한다. 바꿔 말하면 포틀랜드 시멘트의 수화 반응은 발열반응이다.

시멘트의 수화열은 몇 가지 의미에서 중요하다. 때로는 수화열이 장애가 되지만(예를 들면, 매스콘크리트), 때로는 도움도 준다(예를 들면, 한중 콘크리트에서 기온이 너무 낮아 수화 반응을 위한 활성화 에너지가 부족할 때). 개개 화합물의 전체 수화 열량과 발열 속도는 각각 반응성을 나타내는 지표로서 사용할 수가 있다.

콘크리트의 온도상승을 일으키는 인자로서는 시멘트의 종류, 골재, 부재단면의 특성, 의 기온도의 변동 및 시공방법 등이 있으며, 특히 단위시멘트량 및 시멘트의 종류 등에 따른 시멘트의 수화열이 주원인이 된다.

Table 3.10은 시멘트의 주요화합물의 수화열을 나타낸 것으로 화합물에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 3.10 Heat of hydration for cement(Kwon, 2004)

compound (Molecular formula)	heat of hydration for day(cal/g)						
	3일	7일	28일	90일	1년	6.5년	13년
$C_3S(3CaO \cdot SiO_2)$	58	53	30	104	117	117	122
$C_2S(2CaO \cdot SiO_2)$	12	10	25	42	54	53	59
$C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$	212	372	329	311	279	328	324
$C_4AF$ ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ )	69	118	118	98	90	111	102

포틀랜드시멘트 중의  $C_3A$ 와  $C_3S$ 는 반응속도가 빠르며, 수화열에 대한 기여가 크다.  $C_3S$ 가 6% 증가 및  $C_3A$ 가 5% 증가하면 각각의 수화열은 1일 5.5cal/g 및 4.1cal/g이 증가하며, 3일에 9.8cal/g 및 8.0cal/g, 7일에 9.9cal/g 및 18.9cal/g이 증가하며, cal/g는 3일 이전에 반응성이 크다고 보고되고 있다.(권오준, 2004)

### 3.3.2 시멘트의 수화열에 의한 강도 관계

시멘트의 종류에 따라 단연온도상승곡선은 다르게 나타난다. 온도분포상태가 초기에 변화한다면, 그 온도변화에 따라 콘크리트는 팽창 또는 수축한다. 이 팽창 또는 수축에 의해서 발생하는 응력보다 콘크리트의 인장강도가 작아지면 균열이 발생할 확률은 높아진다. 따라서, 온도균열에 강한 시멘트는 수화열이 작고 강도발현이 좋아야 한다.

시멘트의 수화는 온도가 클수록 촉진되므로 콘크리트의 강도는 양생온도가 클수록 초기강도발현도 크다. 양생방법으로 증기양생인 경우에 오토클레이브양생을 했을 때와 비슷한 고강도를 얻을 수 있으며, 이것은 고강도용 혼화제를 첨가하면 증기양생 중에 실리케이트 생성물의 수화가 진행되며, 공극에 에트린가이트를 생성함으로써 미세공극이 치밀화 되기 때문에 보다 고강도가 얻어진다. 일반적으로  $C_3S$ 는 수화가 빠르

며 초기강도 발현에 큰 반면,  $C_2S$ 는 수화속도가 느리기 때문에 초기강도에 비하여 장기강도 발현에 영향이 크다.  $C_3A$ 는 수화반응이 빠르며,  $C_4AF$ 는  $C_3A$ 다음으로 초기 반응성이 크지만 강도에서는 기여하지 않는다. 조강포틀랜드시멘트는 보통포틀랜드시멘트와 중용열포틀랜드시멘트에 비하여  $C_3S$ 가 많기 때문에 초기강도가 크다. 일반적으로 중용열포틀랜드시멘트는  $C_2S$ 가 많기 때문에 장기강도의 발현이 좋으며, 장기재령에는 보통포틀랜드시멘트에 비하여 우수한 점이 많다.(권오준, 2004)

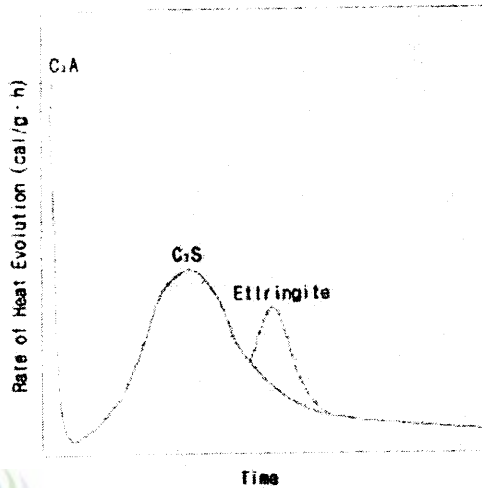


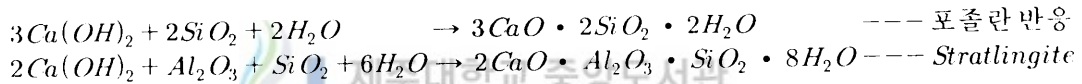
Fig. 3.3 heat of hydration speed curve(Kwon, 2004)

Fig. 3.3은 수화발열속도 곡선을 나타낸 것으로 다음과 같이 3개의 피크로 분류된다. 제 1피크는 물을 혼합한 직후 수분 간에 나타나는 발열피크이다. 이 발열피크는 주로 시멘트의 접촉습윤열과 시멘트 중의  $C_3A$  및 유리석회의 수화에 의한 것으로 발열시간이 짧기 때문에 적산발열량으로서는 4~5cal/g로 작게 나타난다. 그후 수화반응이 1~2시간 지나서 제2피크가 나타난다. 이것은 시멘트 중의  $C_2S$ 의 수화에 의한 것이며, 수화열 전체 중에서도 큰 부분을 차지하고 있다. 1일 수화발열은 보통포틀랜드시멘트에서 30~50cal/g에 달하며, 이후 수화발열속도는 서서히 작아지지만 발열은 수개월에 걸쳐 완료된다.(권오준, 2004)

### 3.3.3 포졸란 반응

포졸란이란 그 자체는 수경성이 없으나, 콘크리트 중에 존재하는 물이 상온에서 수산화 칼슘( $\text{Ca(OH)}_2$ )과 반응하여 불용성 화합물을 생성하는 실리카( $\text{SiO}_2$ )또는 알루미나( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )물질을 함유한 미분말 상태의 재료를 말하는 것으로, 이는 약 2,000년전 이탈리아의 화산재 산지인 포졸리(Pozzoli)에서 화산재와 석고로 만든 모르타가 발견된 것에서 유래되었다.

이러한 포졸란재는 콘크리트 중에서 시멘트의 수화과정 중에 발생하는 수산화 칼슘과 반응하여 불용성의 수화생성물을 생성하게 되며, 이러한 반응을 포졸란 반응이라 한다. 포졸란 반응은 엄격히 말해 시멘트 수화과정중 발생하는 수산화 칼슘과 포졸란재 중의 실리카가 화합하여 불용성 수산화 규산석회 화합물을 생성하는 반응만을 지칭하는 것이다. 그러나, 포졸란재중에 포함된 알루미나 역시 수산화 칼슘과 반응성을 발현하여 콘크리트중에서 수산화 알민산석회 화합물을 생성하게 된다. 이러한 반응을 포졸란 반응과 대별하여 Stratlingite반응이라 일컫고 있다. 포졸란반응 및 Stratlingite 반응의 화학식은 다음과 같다.



일반적으로 포졸란재를 포틀랜드 시멘트와 혼합한 경우 수산화칼슘과 황산염의 작용에 의해서 경화가 촉진되어, 수화발열 속도의 저감 및 콘크리트의 온도상승 억제 효과, 수밀성의 향상 및 장기강도의 향상, 황산염 등에 대한 화학 저항성 향상 및 알칼리 실리카 반응의 억제 효과 등의 콘크리트의 제반 성능을 향상시킨다.

### 3.4 콘크리트의 건조수축

콘크리트는 습기를 흡수하면 팽창하고 건조하면 수축한다. 이것은 경화한 시멘트풀이 팽창하고 수축하기 때문이다. 즉, 경화한 시멘트풀은 주위의 습도가 높을 때는 수분을 흡수하여 팽창하고 주위의 습도가 낮을 때는 수분을 방출하여 수축한다. 그러므로 콘크



리트 속에서 자유로이 이동할 수 있는 물이 적을수록, 또 경화한 시멘트풀 속의 공극이 적을수록 팽창과 수축은 적게 일어난다.

경화한 시멘트풀 속의 공극이 같다면, 시멘트풀의 양이 적을수록 팽창과 수축은 적게 일어난다. 결국, 콘크리트의 팽창과 수축을 적게 하려면 단위수량을 줄여야 하고 부배합을 피해야 한다. 단위 시멘트량이 적을수록 시멘트풀 경화체의 건조수축은 적어진다. 보통 모르타르는 콘크리트의 약 2배정도의 수축을 나타낸다.

콘크리트의 건조수축(drying shrinkage)은 단위 시멘트량과 단위수량의 영향을 크게 받지만, 그 밖에 골재의 종류와 최대치수, 시멘트의 종류와 품질, 다지기 방법과 양생상태, 부재의 단면치수 등의 영향도 받는다.



## IV. 실험

### 4.1 실험방법 및 시험기구

#### 4.1.1 동결융해시험

급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법(KS F 2456)중 수중 급속 동결 융해 시험 방법을 이용하였다. Fig. 4.1은 동결융해 시험 장치이다. 동결 융해 1Cycle은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하여 4℃에서 -18℃로 떨어지고, 다음에는-18℃에서 4℃로 상승된다. Fig. 4.2는 공시체의 온도 변화이다. 그림에서와 같이 동결융해 시험장치내에 공시체의 온도에 따라 변하게 되는데 시간은 약 3시간~4시간 정도이고 두 개의 선으로 나타내어져 있는데 온도 변화가 큰 선은 시험 장치내의 온도를 나타내는 것이고 다른 한 선은 공시체 중심부의 온도변화를 나타낸 것이다.

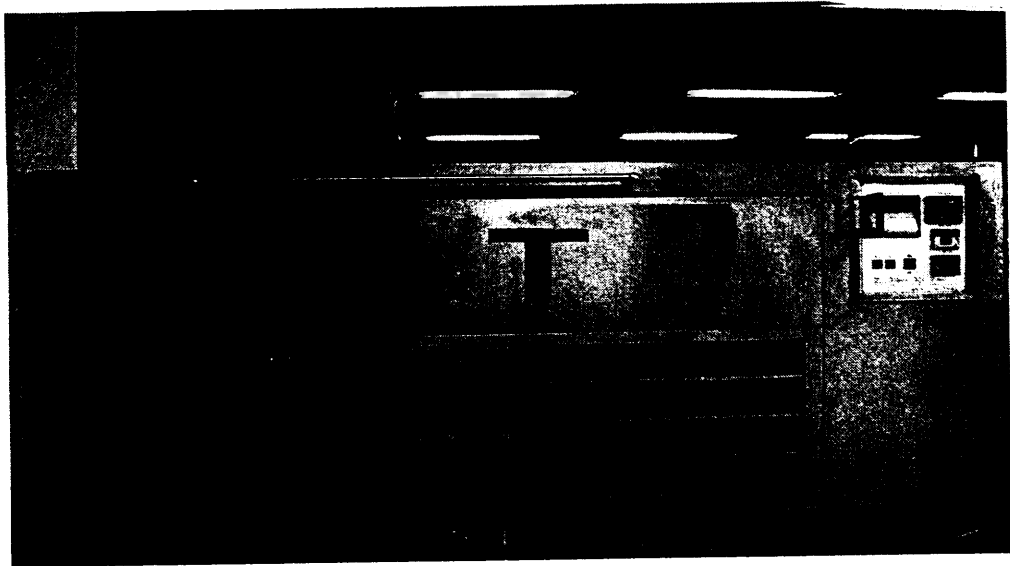


Fig. 4.1 freezing and thawing apparatus

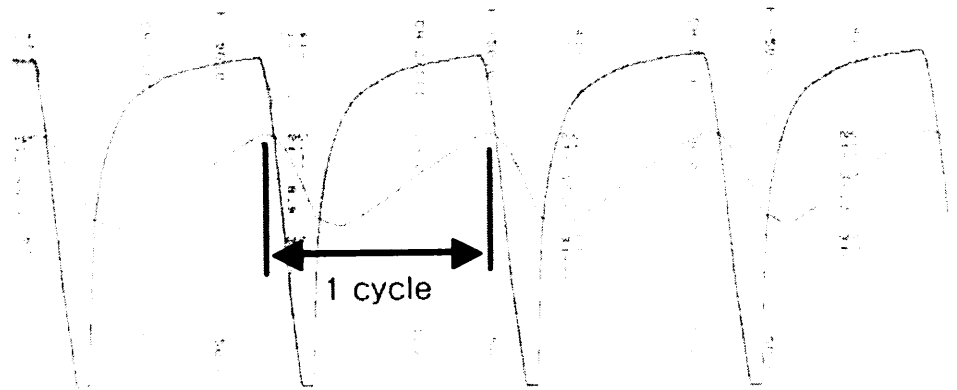


Fig. 4.2 Temperature change of specimen

200Cycle에 가까워질수록 공시체의 온도변화시간이 증가한다. 수중 급속 동결 융해시험 방법으로 동결융해를 하는 동안 언제나 약 3mm 정도의 물로 완전히 둘러싸여 있어야 한다. 또한 열교환 매개체의 용도가 용기의 바닥을 통하여 공시체 아래쪽 전면에 전달되어 공시체의 하부 상태가 다른 부분과 동일한 조건이 되도록 용기 바닥에서 공시체를 지지해야한다. 이 경우 용기 바닥에 10mm 철선으로 만든 평면형 나선철선을 둔다. 사이클 중 동결 상태의 초기에 용해수 내에 공시체를 넣고 동결 융해 시험을 시작 한다. Fig. 4.3는 동결융해장치 내부의 모습으로 A는 공시체의 온도를 재는 곳이고 B는 현재 동결융해 장치내부 온도를 재는 곳이다. C와 D는 동결융해 장치의 동결시키기 위해 찬 공기가 나오는 곳과 융해를 위해 온도를 높여주는 장치이다. 동결 융해 사이클이 50사이클에 융해 상태에서 장치로부터 공시체를 꺼내어 용기를 씻어 내고 깨끗한 물을 첨가한다. 동결융해는 30일 200cycle로 하여 동결융해 전후의 일축압축강도 및 투수계수, 중량감소비, 포졸란 반응을 관찰하였다.

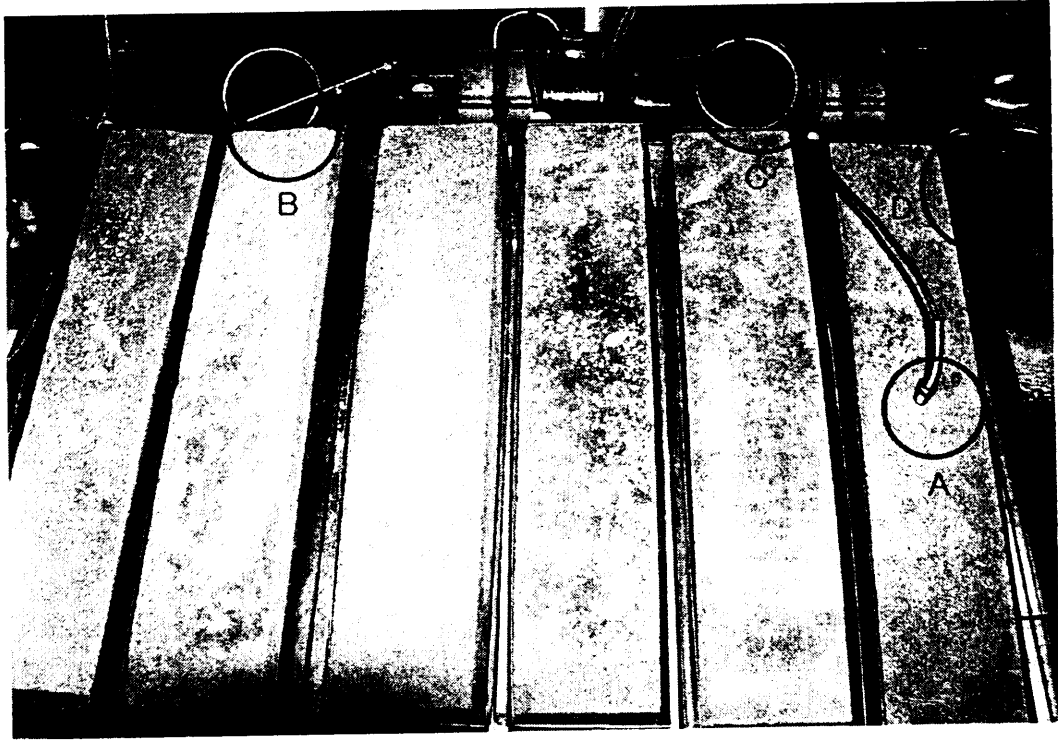


Fig. 4.3 The inside of freezing and thawing apparatus

(1) 압축강도시험

압축강도시험은 수중양생후 공시체에 대하여 각 배합비 시험체로 7일, 14일, 28일  
 새령한 것을 동결융해시험기로 30일 200Cycle을 하여 일축압축강도를 측정하여 공시  
 체의 강도 특성을 연구한다. Fig. 4.4는 일축압축강도 시험기를 나타낸 것이다.

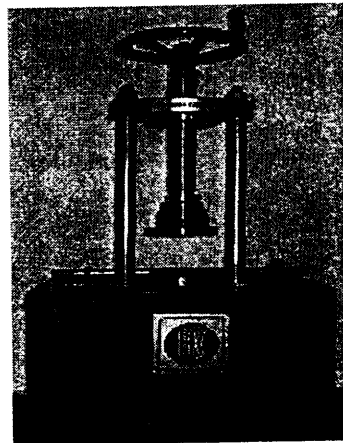


Fig. 4.4 Electric Asphalt Core Drilling Machine

## (2) 투수시험

압축강도시험은 수중양생후 공시체에 대하여 각 배합비 시험체로 7일, 14일, 28일 재령한 것을 동결융해시험기로 30일 200Cycle을 한 공시체의 투수특성을 연구한다. 현무암 석분과 시멘트 및 혼화제 혼합시료의 투수시험은 외압식 콘크리트 투수시험기를 이용하여 시험 하였다.

현무암 석분과 시멘트 및 혼화제의 투수시험은 아래와 같이 시행하였다. Fig. 4.5에서 제시된 것처럼 투수용기 내부에 있는 몰드 ②위에 올려놓고 ①처럼 공시체와 몰드접촉 부위의 간극을 실리콘으로 봉한다. 다음 캡(③)으로 공시체를 고정시킨다.

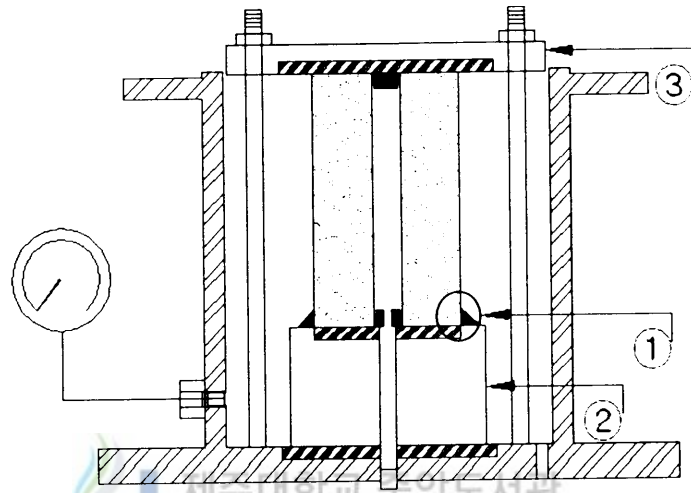


Fig. 4.5 Schematic diagram of Permeability test container

이렇게 고정시키고 투수시험 용기 덮개로 고정 시킨 후 시험 용기내에 물을 채운 후 1시간 정도 시험 시 가해지는 수압보다 큰 수압으로 유지한다. 이것은 시험편의 패킹여부를 확인하고 패킹 과정 중 시험편의 건조문제를 해결하여 다시 포화 상태로 만드는 역할을 한다.

실험 준비가 끝나면 1시간 정도 포화 시킨 후 시험을 시작한다. 액화 질소 가스통과 압축수조의 밸브와 레귤레이터를 통하여 수압을 조절한다. 이때 가스통, 압축수조, 시험 용기의 레귤레이터는 같은 수압을 나타낸다.

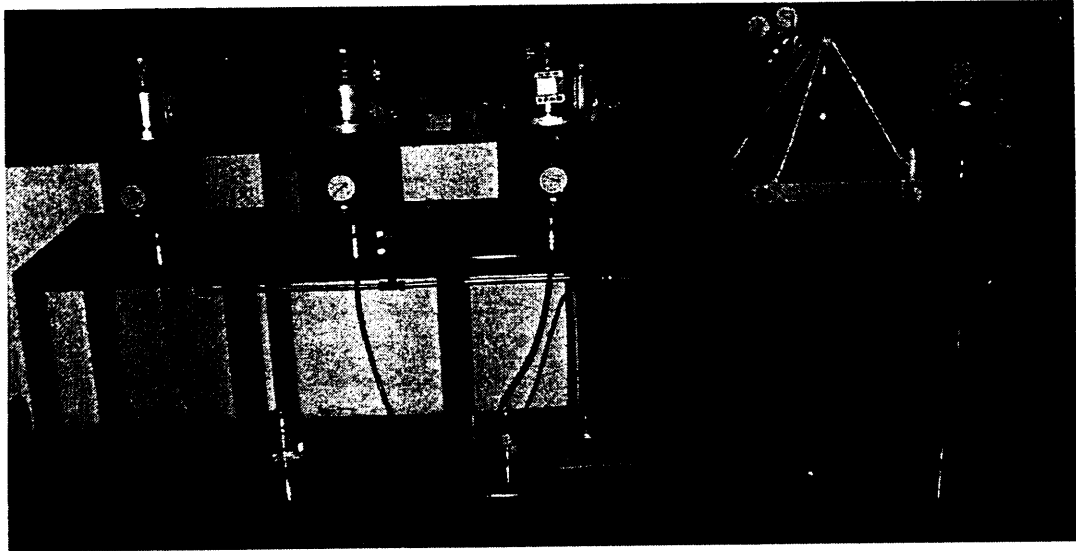


Fig. 4.6 Permeability Test Apparatus of concrete

Fig. 4.6은 투수시험기를 나타낸 그림이다. 시험기는 가압펌프, 투수시험용기, 측정부분 3개 주요 부위로 나눌 수 있다. Fig. 4.7은 투수시험기의 모식도를 나타낸다.

그림에 제시된 것과 같이 가압펌프는 축압수조와 액화질소 가스통으로 이루어져 일정한 수압을 가해주는 역할을 한다. 질소 가스는 레귤레이터와 밸브를 통하여 일정한 압력으로 축압수조 상단에 주입되고 이 압력을 이용하여 축압수조에 있는 물을 일정한 수압으로 밀어 준다. 수압을 시험편으로 그대로 전달시키기 위한 연결부분은 가해지는 수압을 충분히 견딜 수 있는 파이프로 연결되었다.

유량을 측정하기 위하여 같이 시험편 하단에 비커 혹은 메스실린더를 놓아 시험편을 통과하여 나오는 유출수를 모아 최소 눈금이 0.5ml인 메스실린더와 정밀도가 0.01g인 전자저울을 동시에 사용하여 유량을 측정하였다.

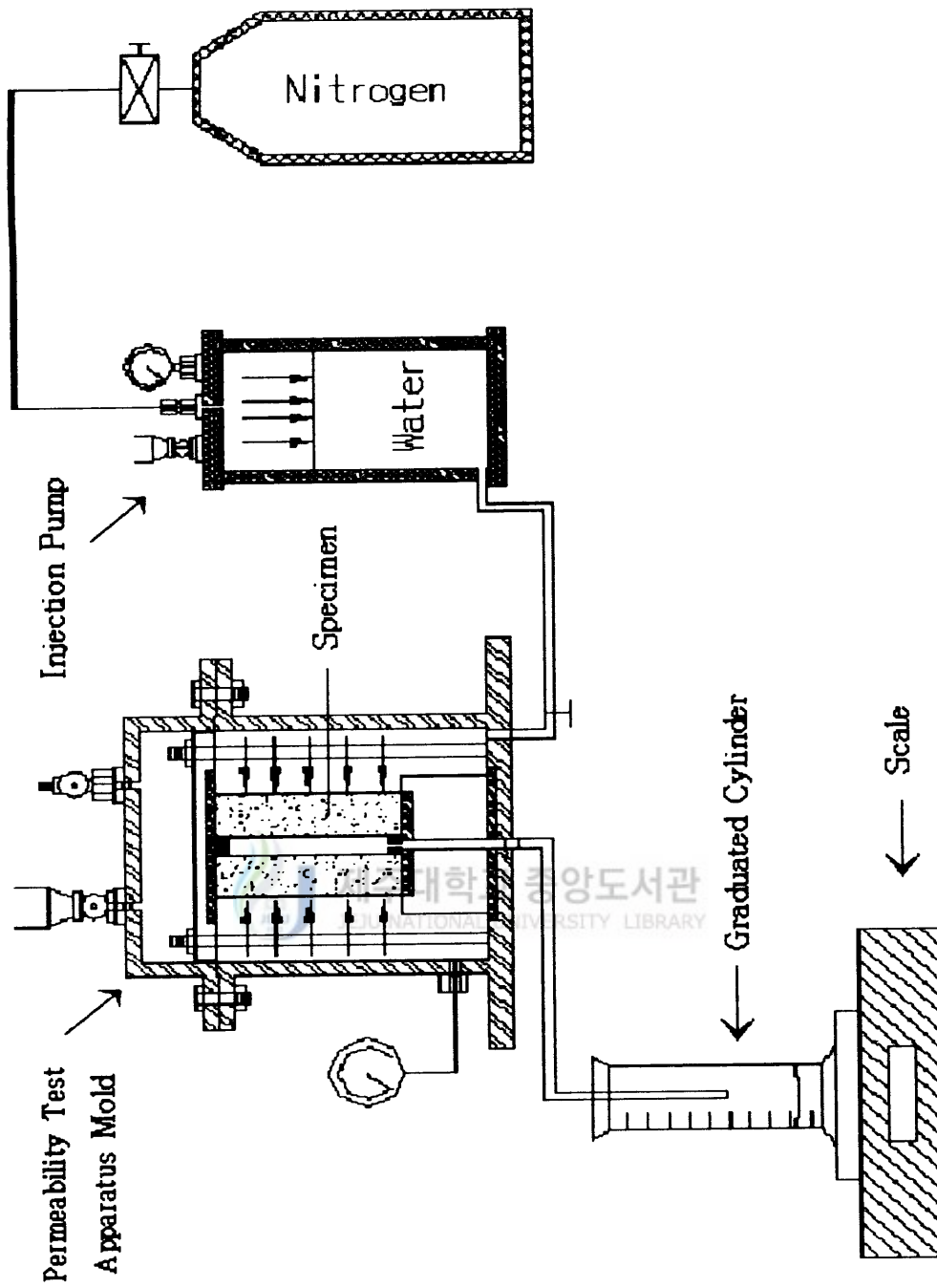


Fig. 4.7 Schematic diagram of Permeability test setup

### (3) 중량 측정

무게 측정은 각 고화체에 대하여 배합비별 7일, 14일, 28일 재령의 수중양생후 동결융해 전과 동결융해후 100, 200Cycle에 대하여 각각 측정한다. Fig.4.8는 공시체의 수중양생하는 모습이다.

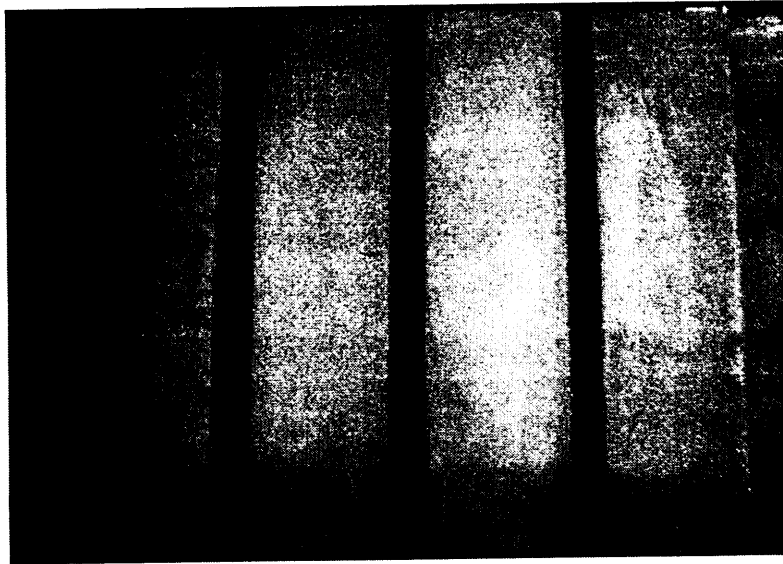


Fig. 4.8 Water curing of specimen

### (4) 포졸란 반응의 관찰

석분과 시멘트, 혼화재에 따른 혼합시료에 함유되어 있는 Silicate와 Aluminate 및 Ca성분과의 포졸란 반응을 관찰하기 위하여 SEM을 통해 석분의 입자의 표면을 관찰 분석 하였다.



### 4.1.2 건조수축균열시험

콘크리트의 건조 수축 균열 시험 방법은 공시체의 보존은 공시체의 주변온도를  $20 \pm 1$  °C 습도를  $80 \pm 5\%$ 로 유지하였으나 온도와 습도를 맞추어 보존한 결과 건조 균열의 경우 3달이 지나도 아무런 변화가 일어나지 않아 시험의 온도( $10^{\circ}\text{C}$ ) 및 습도( $40 \pm 5\%$ )를 정하여 측정하였다. 건조수축에 의한 균열시험과 길이변화시험의 관계를 알아보기



위하여 온도와 습도를 함께 정하여 시험중의 공시체의 보존을 하였다.

#### (1) 균열 시험

콘크리트의 건조 수축 균열 시험방법(KS F 2595)을 이용하여 균열시험을 실행하였다. 공시체의 제작 및 양생 중의 온도는  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 한다. 공시체는 거푸집 탈형 까지 습윤 상태에서 양생하여야 한다. 공시체의 몰드 탈형은 재령 7일로 한다. 공시체는 거푸집을 탈형한 후 곧 건조를 개시한다. 공시체의 균열 측정은 탈형 직후에 하고 이후 공시체에 균열이 발생할 때까지 원칙적으로 1일에 1회 측정한다. 균열 발생 시의 확인은 균열 발생 형태는 적용 범위에서와 같이 일반 콘크리트의 경우 타설면으로부터 저면에 이르는 관통 균열이 확인되었기 때문에 균열 발생 시기를 “육안으로 균열을 확인 할 수 있는 시점”이라고 한다. Fig. 4.9는 균열 측정을 하기위하여 그림과 같이 5개중 3개를 평균으로 하여 측정하였다.

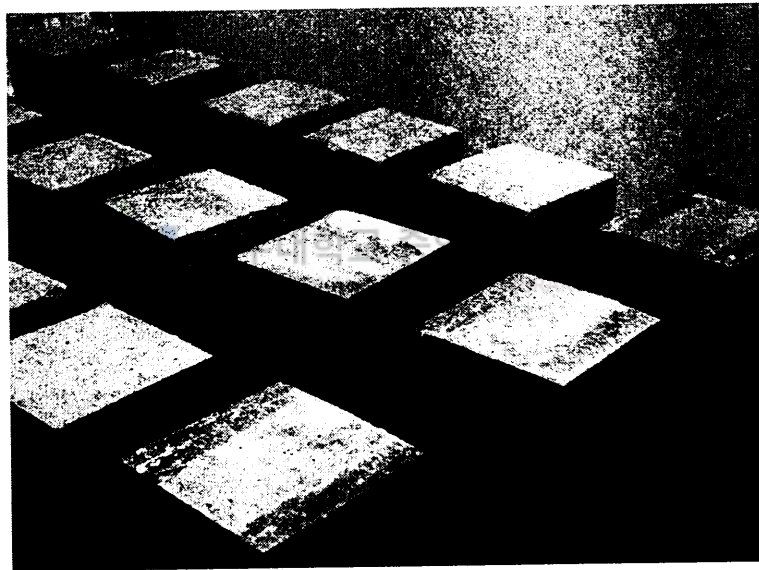


Fig. 4.9 Specimen for crack test

#### (2) 길이 변화 시험

모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법(KS F 2424)중 공시체의 중심축의 길이 변화를 측정하는 방법으로 다이얼, 게이지를 부착한 측정기를 이용하는 방법을 이

용 하였다. 성형 후 몰드와 함께  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 실내에서 습윤상태를 유지하고 성형 24시간 후에 탈형한다. 몰드를 탈형한후 Fig. 4.8에서와 같이 시험체를 향한 양생 수조의 물에 수침시켜 양생시킨다. 공시체를  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 수중에서 양생하고, 재령이 7일 되었을때 측정 시점을 기준으로 한다.

측정기는 다이얼 게이지를 사용하며 0.001mm 까지 측정 할 수 있는 것을 사용 한다. 길이 측정용 틀은 공시체를 측정할 때와 같은(연직 또는 연직에 대해 일정한 경사가 되는) 상태로 장치한다. Fig 4.10은 길이변화시험 장치이다.

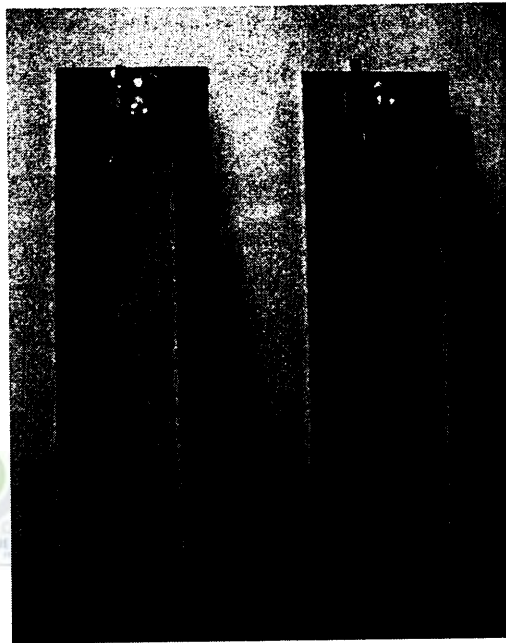


Fig. 4.10 length change test equipment

#### 4.2 공시체 제작

시험에 사용된 현무암 석분 슬러지는  $100^{\circ}\text{C}$ 이상으로 24시간 이상 완전히 건조하여 NO.4체를 통과한 시료를 사용하였다. 시멘트 와 현무암 석분슬러지 배합비는 0:1, 1:1, 1:2, 1:4, 1:5로 하였으며 혼화제 첨가량은 시멘트 중량의 1%로 하였으며, W/(C+SG)(C : 시멘트, SG: 석분)비는 37.5%로 정하였다. 이때 슬럼프의 값은 7.5~12.5로 나타났다.

## 4.2.1 동결융해시험

### (1) 투수시험

중공 원통(hollow cylinder)형 공시체 제작 방법은 모르타 혼합기를 사용하여 혼합시료를 혼합한 다음 HD-215( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )몰드를 사용하여 공시체를 성형한다. 다음 몰드에 넣은 상태에서 20~24시간이상 습윤 양생한다. Fig. 4.11 에서 보는 것과 같이 HD-215( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )몰드 가운데 원형 막대를 만들어 공시체의 중앙을 천공하였다. 천공을 한 다음 몰드를 해체 하여 시험체를 항온 양생수조의 깨끗한 물에 담그어  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 수침 양생을 하였다. 시험체는 수중에서 7일, 14일, 28일 동안 양생하여 투수시험에 사용하였다.

다음 소정의 시간을 양생한 다음 투수시험 시험체를 만들기 위하여 시험체를 수조에서 꺼낸 다음 인차 표면의 물기를 제거한다. Fig. 4.13은 투수시험을 위한 공시체의 모식도를 나타낸다. Fig. 4.14a에서와 같이 상부 구멍을 실리콘으로 봉한 다음 고무판을 긴밀히 접착 시킨다. 하부 구멍은 Fig. 4.14b에서와 같이 실리콘으로 봉하되 중심이 뚫리여 고무호스가 들어갈 수 있도록 한다. 다음 중심을 뚫은 원형 고무판을 긴밀히 접착 시킨다. Fig. 4.14c는 시험체의 밑 부분을 나타낸다. Fig. 4.14d 는 성형된 투수시험 공시체를 나타낸다. 고무판으로 시험체 내부와 외부를 연결시키는 유출 경로를 만들어 줌으로서 시험체와 투수시험기 몰드사이의 불충분한 접촉으로 인한 누수와는 상관없이 공시체만을 통과한 물의 양으로 투수계수를 측정함으로써 시험기와 시험체의 결합으로 인한 오차를 줄일 수 있다.

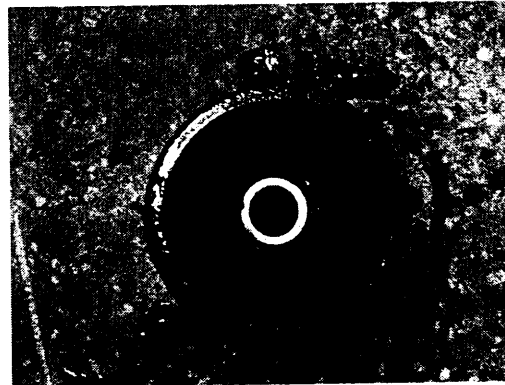


Fig. 4.11 Specimen mold for permeability test

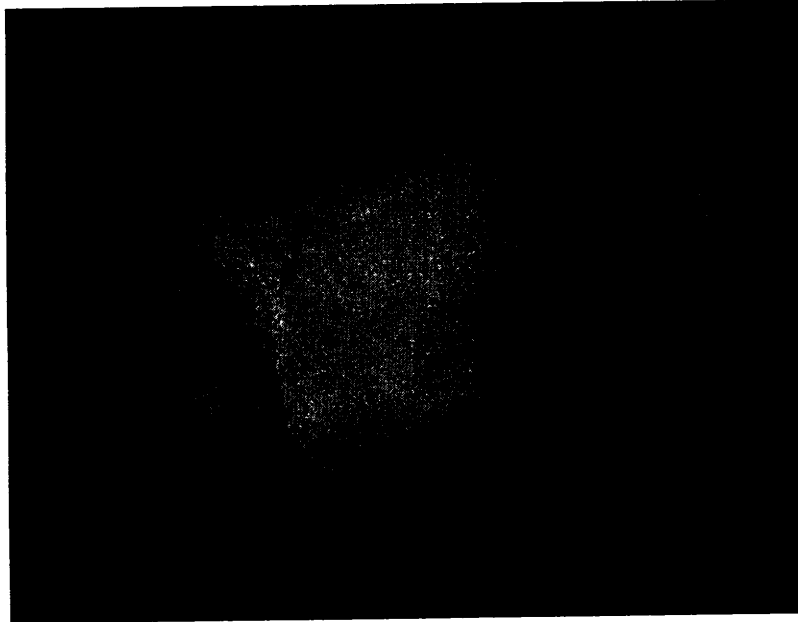


Fig. 4.12 Specimen prepared for this study

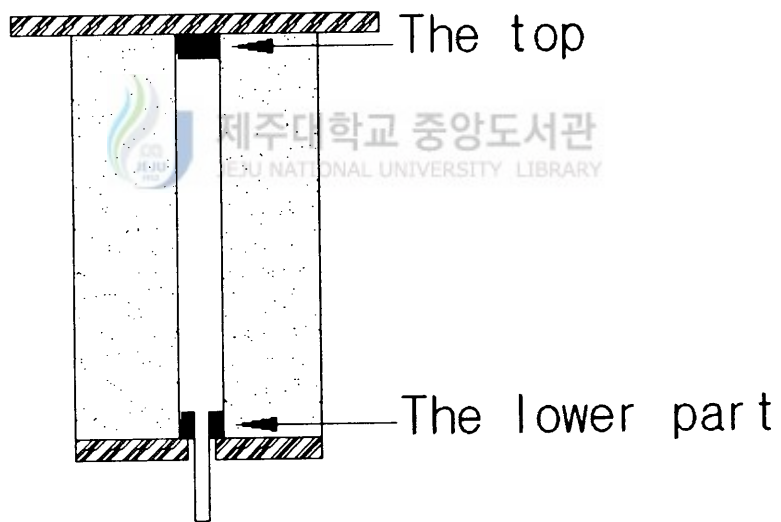


Fig. 4.13 Schematic diagram for test setup

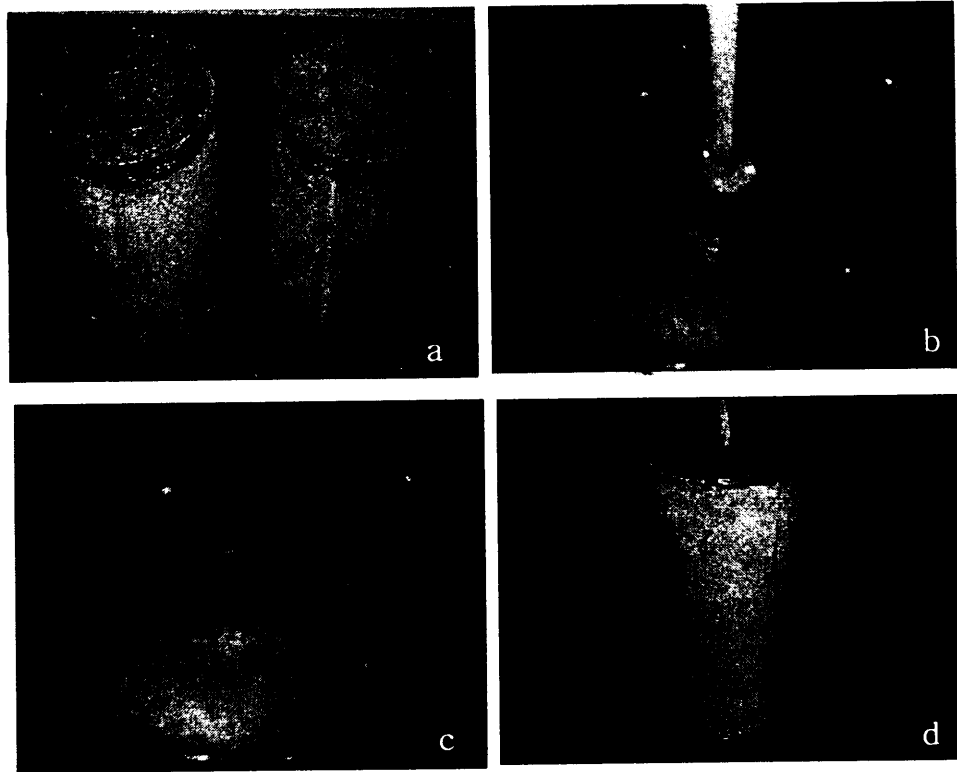


Fig. 4.14 The making process for specimen

(2) 압축강도시험

압축강도용 공시체는 Fig. 4.15와 같이  $\Phi 5 \times 10 \text{cm}$ 인 삼연형 실린더 몰드(Three Gang Mortar Cylinder Mold)로 현문암 석분슬러지와 시멘트혼합시료의 압축강도용 공시체를 제작 하였다.

혼합시료는 몰탈 혼합기를 이용하여 혼합한 다음 몰드에 넣어 다진다. 다음 성형이 끝나면 몰드에 넣은 상태에서 24시간 이상 습윤 양생한다. 몰드를 해체 하고 시험체를 몰드에서 빼내고 항온양생수조의 깨끗한 물에 담그어 놓는다. 양생수조의 온도는  $20 \pm 2 \text{C}^\circ$ 로 유지한다.

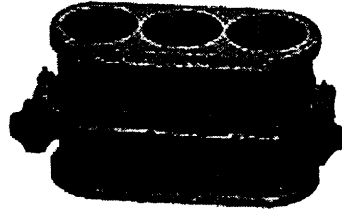


Fig. 4.15 Three Gang Mortar Cylinder Mould

#### 4.2.2 건조수축균열 및 중량변화시험

사각형 시험편의 성형 방법은 모르타 혼합기를 사용하여 혼합시료를 혼합한 다음 76×101×412mm, 10×10×40cm몰드를 사용하여 시험체를 성형한다. Fig.4.16은 수축균열, 길이변화 및 중량변화시험에 사용된 몰드이다 .

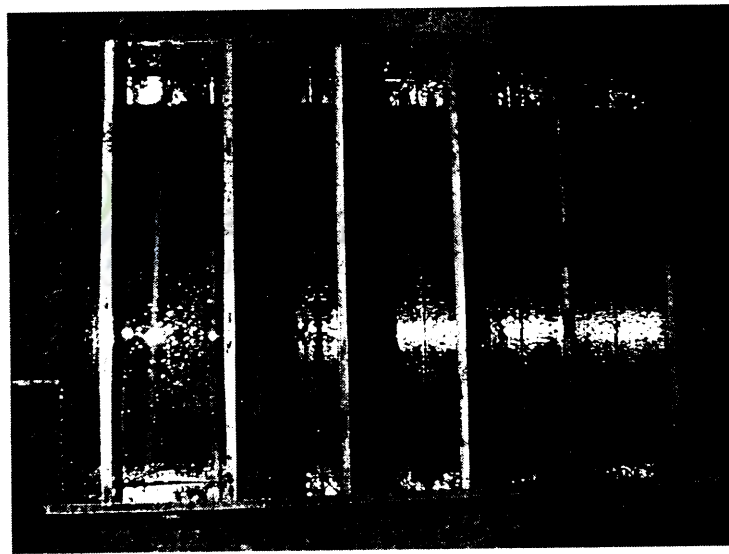


Fig. 4.16 Prism mould for this study

## V. 결과 및 분석

### 5.1 동결융해후시험

#### 5.1.1 압축강도시험

각 배합비별 압축강도를 조사하기 위하여 공시체를 제작 후 수중양생 공시체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 동결융해후 압축강도를 측정하였다. Table 5.1은 동결융해후 압축강도시험후 결과 값이다.

Table 5.1 Freezing and thawing after Compressive strength

Curing time (day)	7	14	28
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
Specimen			
100% (0:1)	273.4508	341.6784	450.2824
50% (1:1)	160.9399	232.2202	344.9196
33% (2:1)	86.20477	115.8149	199.3313
20% (4:1)	68.35327	84.32037	136.7317
17% (5:1)	48.61738	53.0143	95.96593

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

시멘트의 함량이 많을수록 압축강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 7일 양생한것이 273~48 kg/cm<sup>2</sup>, 14일이 341~53kg/cm<sup>2</sup>, 28일이 450~95kg/cm<sup>2</sup>정도로 나타나고 있다. Fig. 5.1~5.2는 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화재의 배합비와 양생일에 따른 강도를 나타내고 있다.

Fig. 5.3~5.5에서 볼 때, 동결융해 전·후의 양생일별 강도비교를 보면 시멘트 함량

이 많을수록 동결융해에 영향이 적은 것을 볼 수 있다. 시멘트만 있을 경우 21%~23%정도 강도가 증가한다. 그러나 현무암 석분슬러지의 함유량이 많을수록 강도는 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다. 현무암 석분슬러지의 함유량이 83%인 경우 강도는 -13~-31%정도 강도가 감소한다. Fig. 5.6~5.9에서 시멘트 함유에 따른 일별로 나타낸 그림으로 동결융해전 28일(수중양생) 동결융해후 37일(7일 수중양생과 동결융해 30일 200Cycle)에서 동결융해동안 습윤양생은 되나 동결융해전 28일 수중양생보다 일축압축강도는 작아지는 것을 볼 수 있고 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해에 대한 저항력이 떨어지는 것으로 나타나 있다. 이와 같이 시멘트 함량이 많을수록 동결융해 과정 중에도 강도가 증가함을 알 수 있으며 이는 수화반응 과정에서 발생하는  $Ca(OH)_2$ 가 동결융해 기간 동안 현무암 석분슬러지내에 존재하는 가용성  $SiO_2$  및  $Al_2O_3$ 와 수화반응을 일으켜 CSH계열의 수화물이나 Ettringite와 같은 수화반응 생성물을 형성하기 때문이다. 즉 시멘트량이 현무암 석분슬러지에 비해 상대적으로 적은 경우에는 가용성  $Ca(OH)_2$ 가 부족하기 때문에 포졸란 반응(토양내의 Alumino Silicate 물질이 시멘트나 기타물질이  $Ca(OH)_2$ 와 작용하여 경화되는 반응)이 활발하지 못하여 장기적 강도의 증가가 어려운 것으로 해석된다.(나진성, 2001)

압축강도와 공극률 관계에서 보면 강도와 공극률 사이에는 반비례 관계가 있다.(나중득, 2002) 이것으로 볼 때 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해 과정에서 온도가 하강하면 공시체 내에 있는 공극속의 물이 동결하게 되고 이것은 공시체의 팽창하게 만들며, 이후 용해를 하고 또다시 동결 되면 팽창이 더욱 증가하게 된다. 동결융해 현상이 반복됨에 따라 마치 콘크리트의 피로 파괴와 비슷하게 팽창현상이 더욱 증가 하게 되기 때문에 동결융해 현상이 진행되면서 강도가 감소한 것으로 판단된다.(박호식, 2004)



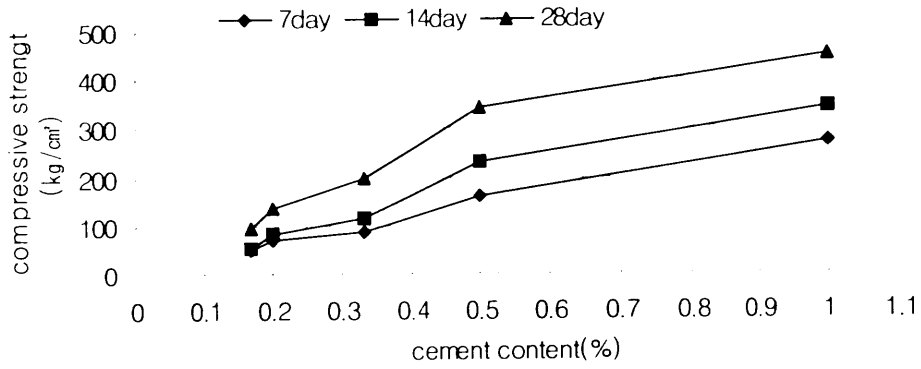


Fig. 5.1 The relation between compressive strength and Cement Content

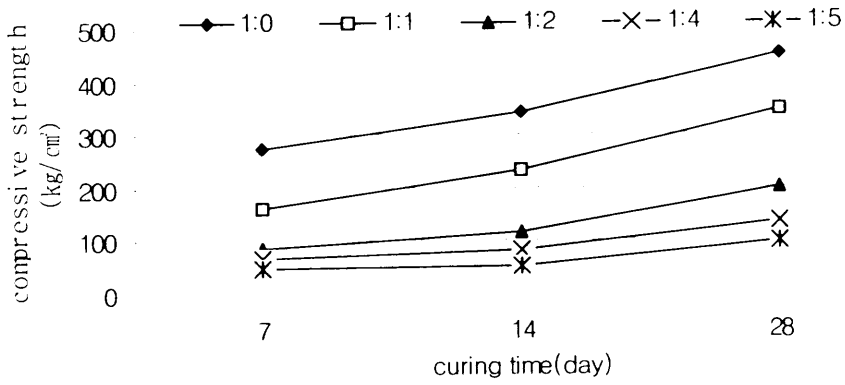


Fig. 5.2 The relation between compressive strength and Curing time

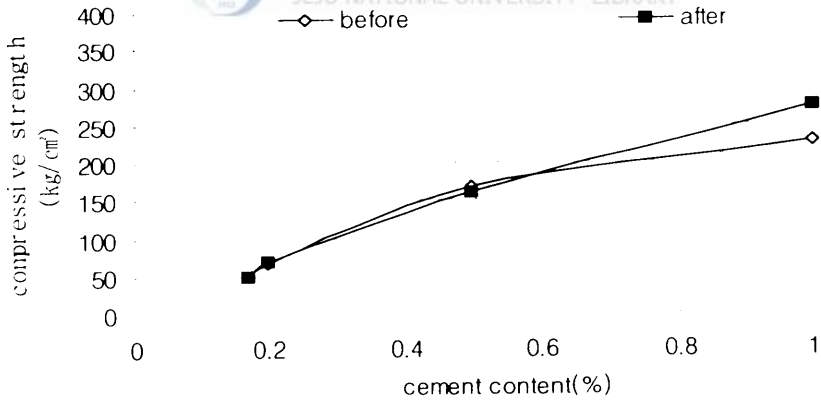


Fig. 5.3 Comparison of before and after strength in freezing and thawing( 7day curing)

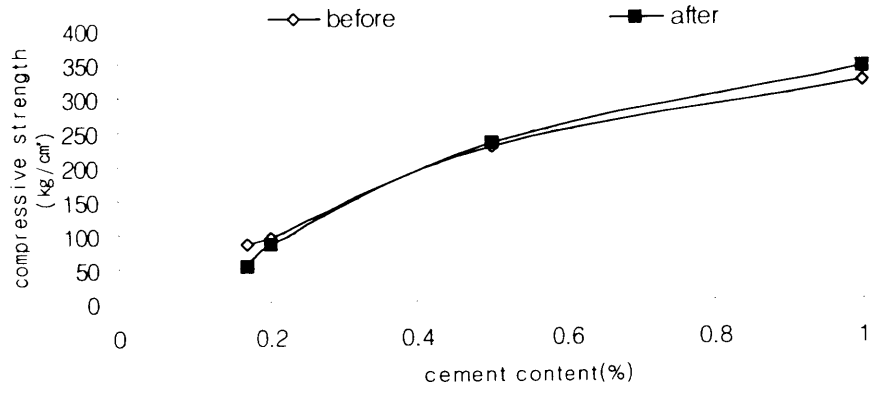


Fig. 5.4 Comparison of before and after strength in freezing and thawing(14day curing)

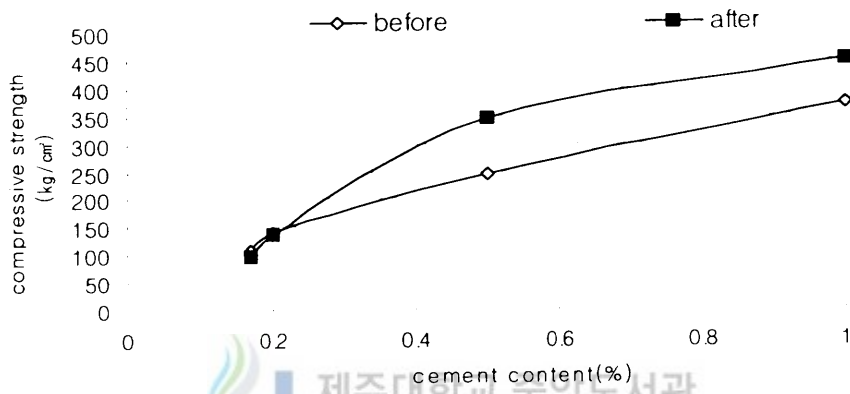


Fig. 5.5 Comparison of before and after strength in freezing and thawing( 28day curing)

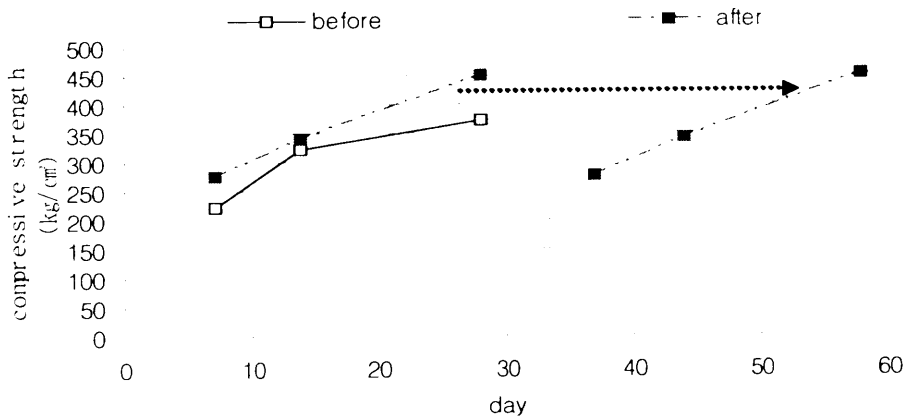


Fig. 5.6 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content

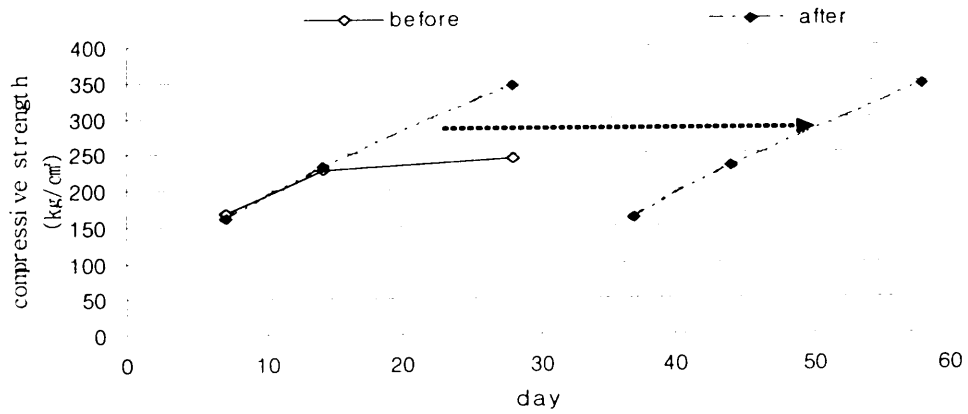


Fig. 5.7 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content

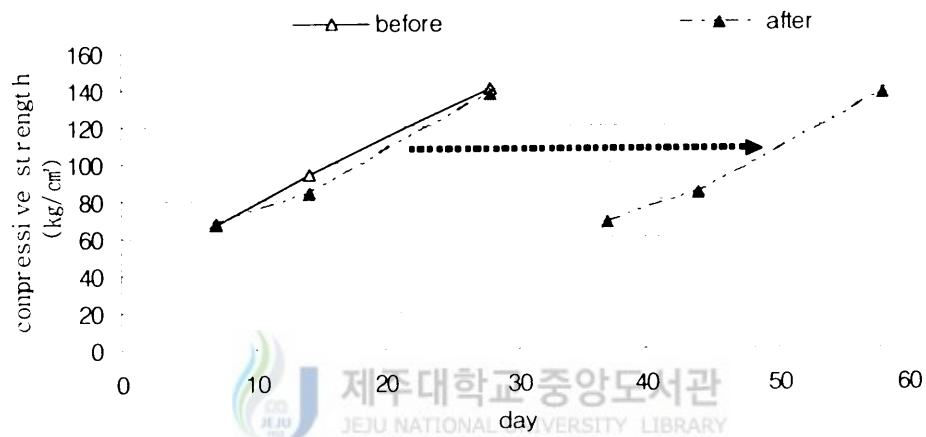


Fig. 5.8 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content

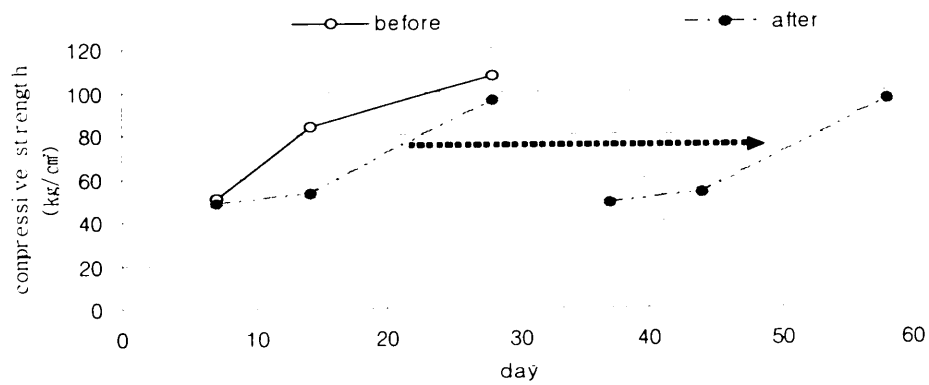


Fig. 5.9 strength Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 17% Content

### 5.1.2 투수시험

석분슬러지와 시멘트, 혼화제의 동결융해후 투수시험결과는 Table 5.2에 나타나있다. 시멘트량이 많을수록 투수계수 값은 낮은 것으로 나와 있다. Fig 5.10에서 동결융해 후 양생기간에 상관없이 일정하게 투수계수 값이 나오는 것을 볼 수 있다. Fig 5.11에 현무암 석분슬러지와 시멘트 혼합체의 투수계수는 석분슬러지의 함량이 많을수록 투수계수 값은 높아지는 것을 볼 수 있다.

Table 5.2 Freezing and thawing after Coefficient of permeability

Curing time (day)	7	14	28
	cm/sec	cm/sec	cm/sec
100% (0:1)	1.239E-08	1.105E-08	9.844E-09
50% (1:1)	8.942E-08	5.552E-08	4.944E-08
33% (2:1)	3.442E-07	9.409E-08	6.562E-08
20% (4:1)	3.908E-06	8.323E-07	6.705E-07
17% (5:1)	1.430E-05	8.957E-06	8.667E-06

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

Fig. 5.12~5.14에서 볼 때 시멘트만으로 만든 공시체의 경우 동결융해후의 투수계수는 변함이 적다. 석분 함유량이 많아질수록 투수계수는 많이 높아지는 것을 볼 수 있다. 차수재의 투수기준은  $1 \times 10^{-7}$ 이하를 만족하는 배합비는 석분슬러지의 함유량이 80%이하인 경우 만족 하는 것으로 나타나 있다. 80%인 경우에도 7일 양생 공시체는 만족하지 않은 것으로 나타났다. Fig. 5.15~5.18에서 시멘트 함유에 따른 일별로 나타낸 그림으로 동결융해전 28일(수중양생) 동결융해후 37일(7일 수중양생과 동결융해 30일 200Cycle)에서 동결융해동안 습윤양생은 되나 동결융해전 28일 수중양생보다 투수는 높아지는 것을 볼 수 있고 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해에 대한 저항력이 떨어지는 것으로 나타나 있다. 이와 같이 동결융해 현상에 의해서 투수계수

의 감소가 보이지 않고 증가하거나 동결융해전과 비슷하게 나타나는 이유는 일반적으로 Cementing 성분을 가진 물질들이 수화반응에 의해 형성하는 Tobermorite겔이나  $C_3A$ 클링커가 석고와 반응하여 형성하는 Ettringite나 Monosulgate등의 수화물들이 공시체 내부의 공극을 채우므로 해서 수분이 차지하던 공극을 감소시켜 공시체 자체의 팽창 또는 수분에 의한 팽창력에 저항력이 증가하는 것으로 사료된다.(나진성,2001)

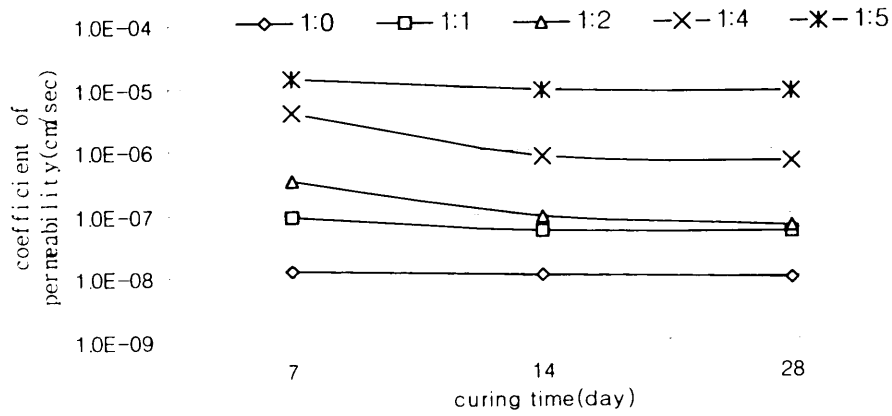


Fig 5.10 Relation of permeability coefficient and Curing time

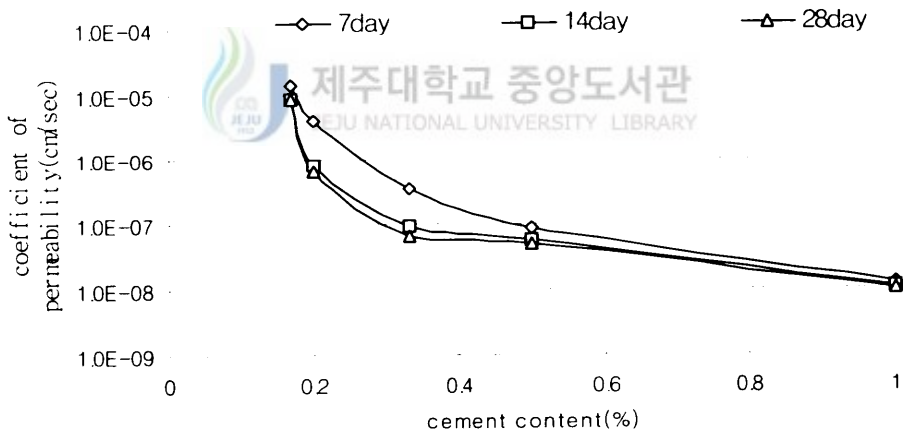


Fig. 5.11 Relation of permeability coefficient and Cement Content

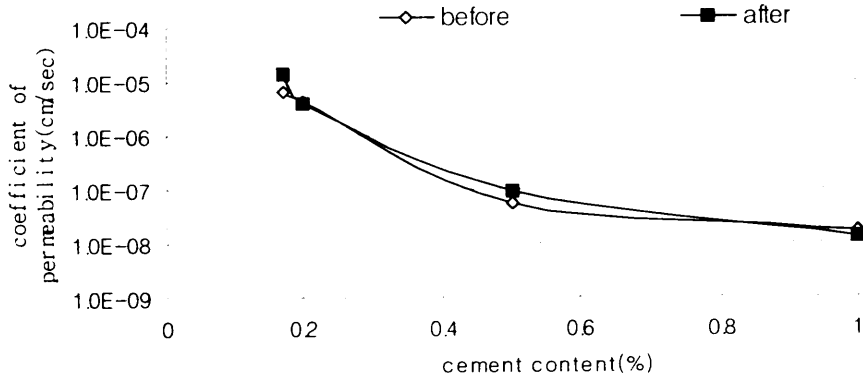


Fig. 5.12 comparison of before and after permeability in freezing and thawing( 7day curing)

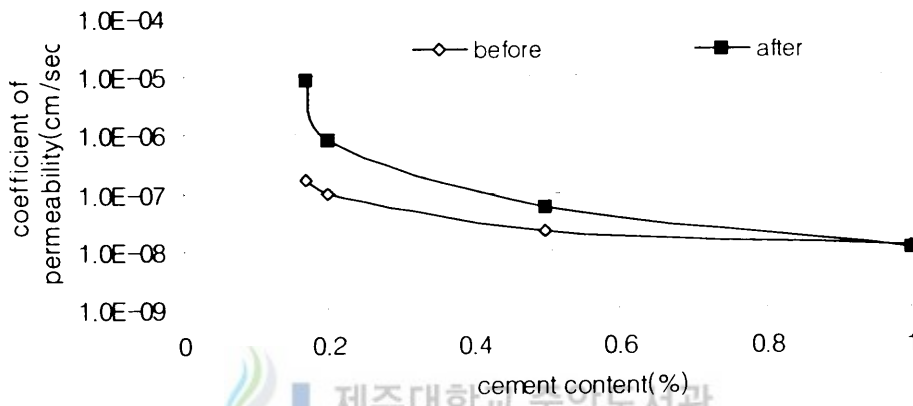


Fig. 5.13 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(14day curing)

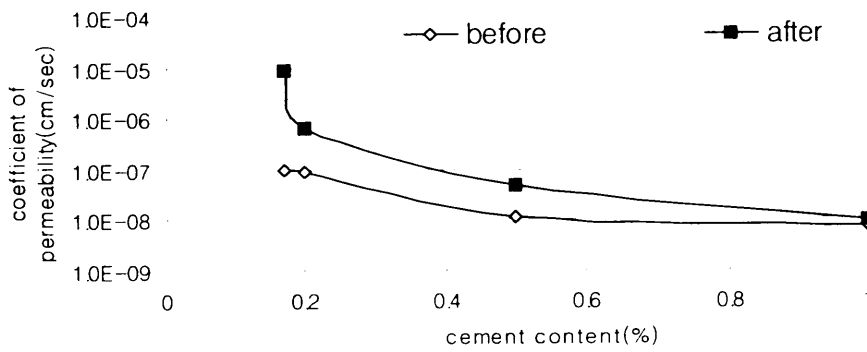


Fig. 5.14 Comparison of before and after permeability in freezing and thawing(28day curing)

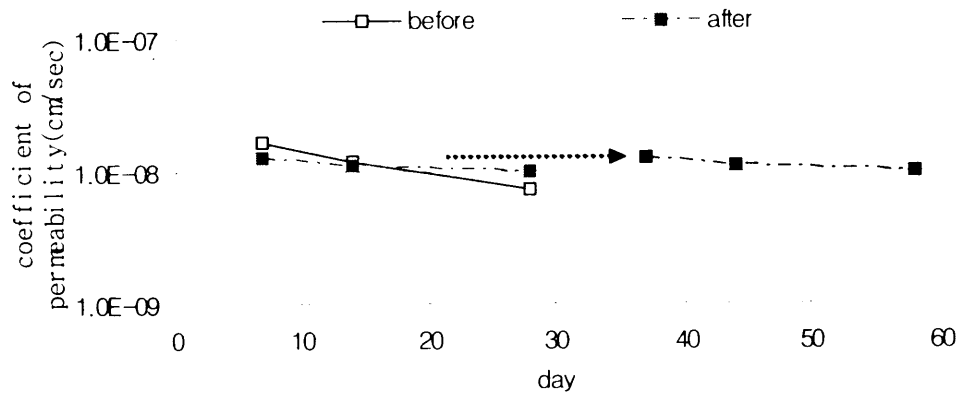


Fig. 5.15 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 100% Content

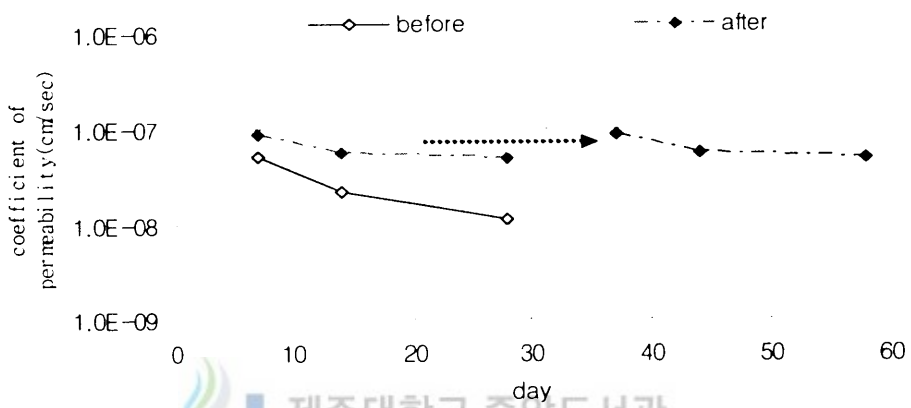


Fig. 5.16 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 50% Content

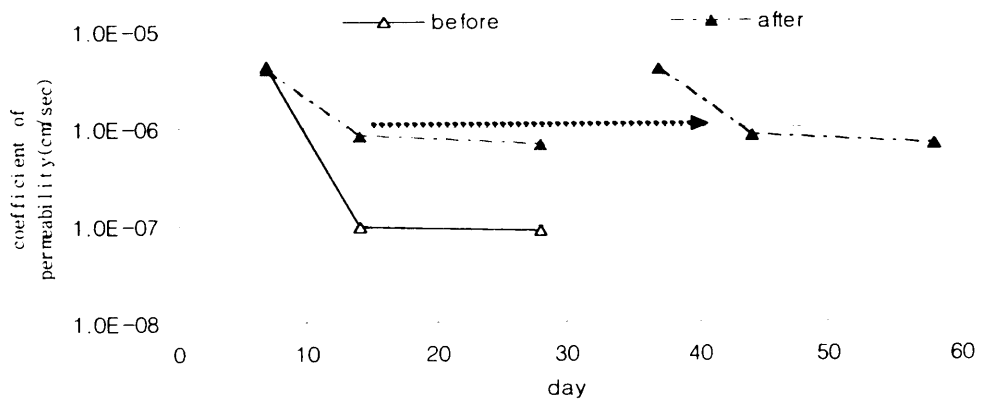


Fig. 5.17 permeability Comparison in a day of before and after in freezing and thawing by Cement 20% Content

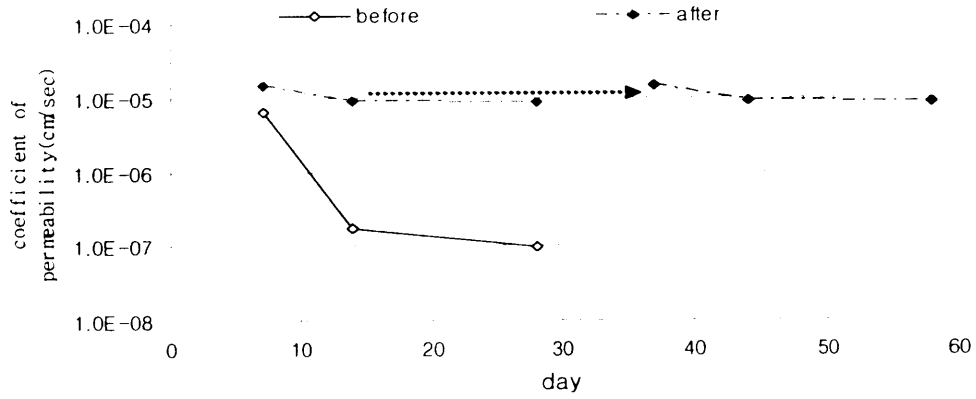


Fig. 5.18 permeability Comparison in a day of before and after  
in freezing and thawing by Cement 17% Content

### 5.1.3 중량변화시험

Table 5.3은 양생일별 수중양생후의 공시체의 중량을 나타낸 것이다. 석분슬러지의 혼합량이 많을수록 공시체의 중량은 작아지는 것을 볼 수가 있다. 또한 재령일이 길어질수록 공시체의 중량이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것을 공시체 내에 수분 함유량이 증가한 것으로 판단이 된다. 동결융해중 양생일별 무게 감소율을 Fig. 5.19~5.21에 나타나 있다. 7일 양생한 것과 14, 28일 양생한 것의 중량 감소는 비슷하게 나타나고 있다. 시멘트의 경우 경화가 빠르게 일어나면서 공극에 수분함량이 적어 동결융해중 수분의 증발 발생량이 적은 것으로 판단된다. 석분슬러지의 함유량이 높아지면서 공시체 안의 공극이 넓어 그 안의 수분양이 많은 것으로 판단된다. 석분슬러지의 함유량이 많을수록 경화가 늦어지는 것으로 판단된다.



Table 5.3 Freezing and thawing before weight of Specimen

Curing time (day) Specimen	7	14	28
	kg	kg	kg
100% (0:1)	6438	6504	6634
50% (1:1)	6355	6470	6492
33% (2:1)	6325	6410	6442
20% (4:1)	6205	6271	6305
17% (5:1)	6199	6233	6291

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

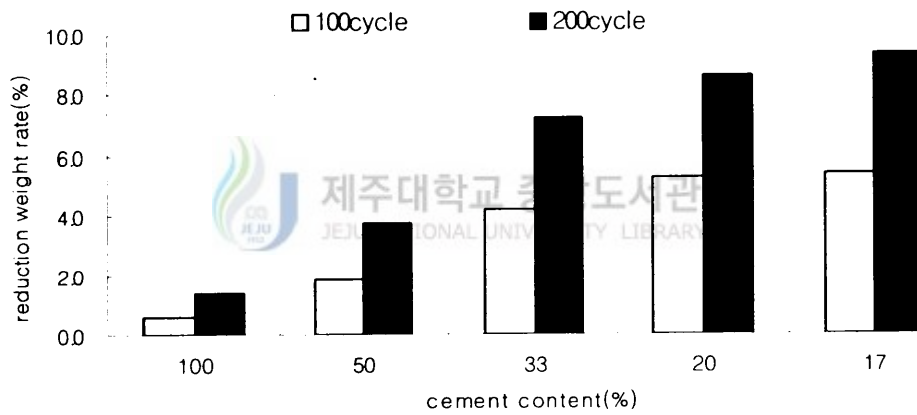


Fig. 5.19 Loss in weight rate (7day curing)

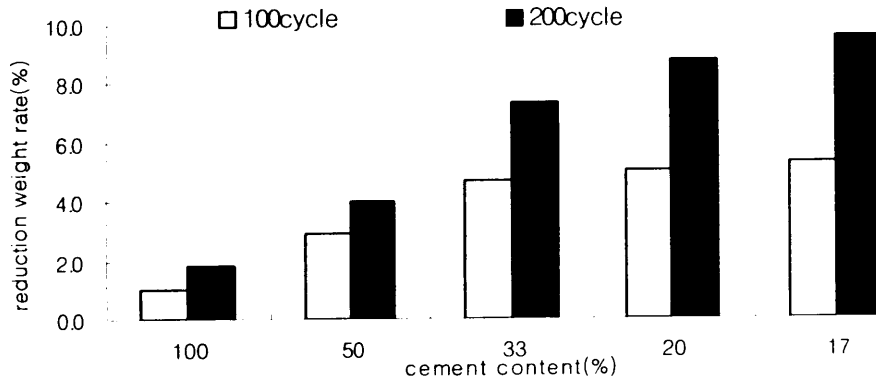


Fig. 5.20 Loss in weight rate (14day curing)

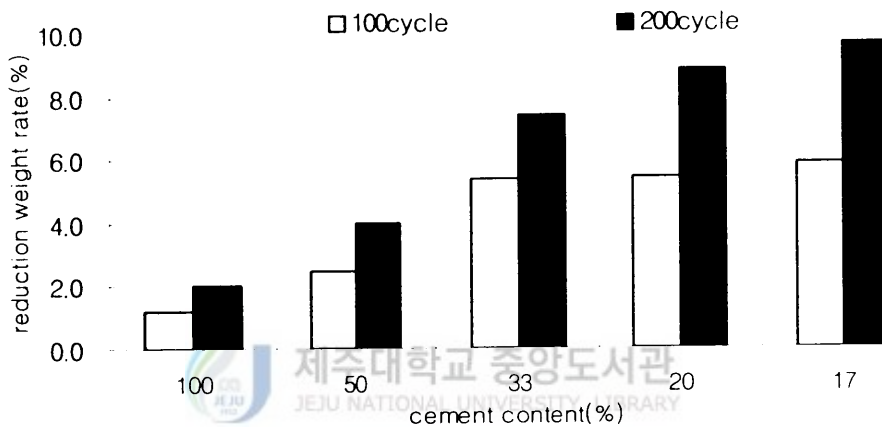


Fig. 5.21 Loss in weight rate (28day curing)

#### 5.1.4 포졸란 반응 관찰

현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제의 동결융해후 포졸란 반응을 관찰하기 위해 혼합공시체를 성형하여 14일 양생한후 동결융해 200Cycle을 한 후 각 배합비별 입상을 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하였다. Fig. 5.22~5.26은 시멘트 함량의 변화에 따른 입자의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 시멘트의 함량이 증가할수록 입자의 결합이 좋은 것을 볼 수 있으며, 석분함량이 증가할수록 입자와 입자사이의 간격이 넓어지고 결합력이 떨어

어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 3.2와 동결융해후 입자의 형상을 비교해 볼 때 시멘트 함유량이 많을수록 더욱 견고해져 있는 것을 볼 수 있다. 포졸란 반응이 활발히 이루어지면 포졸란 반응 중 생성되는 Calcium Silica 및 Calcium Aluminate가 입자간의 결합을 더욱 견고하게 하고, 시험체 내의 공극을 메워주기 때문에 투수계수는 감소하고 압축강도는 증가하는 것으로 사료된다.(Ingles,1972; Horzog, 1964).

시멘트함량의 증가에 따라 혼합시료의 변화가 선명히 나타나는 것은 시멘트가 수화 반응 일으킬 때 생성되는  $Ca(OH)_2$  양의 제한을 받는 것으로 사료된다. \

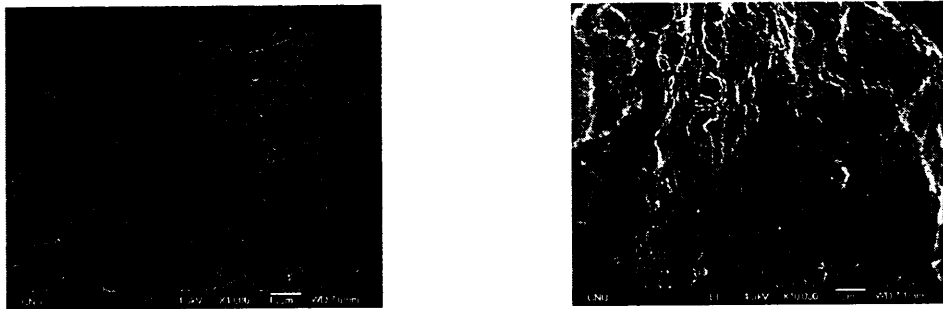


Fig. 5.22 The shape/surface in Cement 100% Content  
by scanning electron micrograph(1000:10000)



Fig. 5.23 The shape/surface in Cement 50% Content  
by scanning electron micrograph(1000:10000)

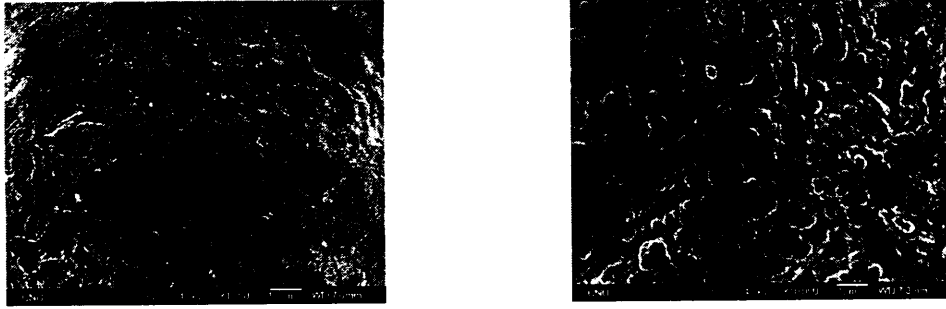


Fig. 5.24 The shape/surface in Cement 33% Content  
by scanning electron micrograph(1000:10000)

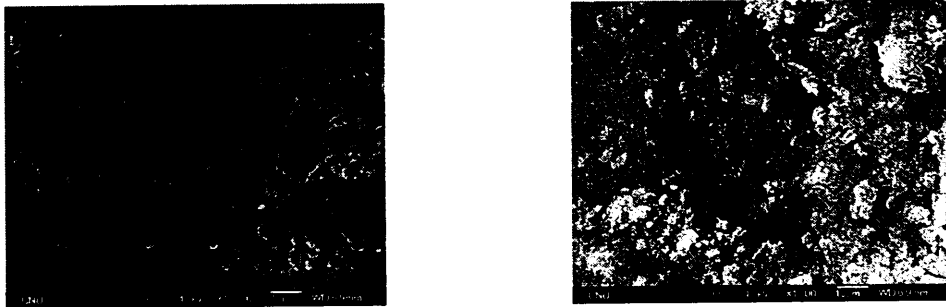


Fig. 5.25 The shape/surface in Cement 20% Content  
by scanning electron micrograph(1000:10000)



Fig. 5.26 The shape/surface in Cement 17% Content  
by scanning electron micrograph(1000:10000)

## 5.2 건조수축에 의한 균열 및 길이변화시험

### 5.2.1 균열 시험

Fig. 5.27은 건조수축에 의한 균열을 나타낸 것이다. 시멘트의 함유량이 많을수록 균열의 수가 많아지는 것을 나타내고 있다. 시멘트의 함유량이 많을수록 많은 수화열이 발생하여 초기 강도는 좋아지나 수화열로 인한 콘크리트에 균열이 발생하게 된다. 7~18일 사이에 균열이 많이 발생하는 것을 나타내고 있다. Fig. 5.28에는 각 배합비별 공시체의 균열의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 균열을 빨간색 선으로 나타내었는데, 왼쪽그림에서 균열이 많은 것이 시멘트와 혼화체의 공시체이고 균열의 수가 적을수록 석분의 함유량이 많은 것이다. 오른쪽 그림은 시멘트와 혼화체의 공시체 균열을 나타낸 것인데, 그림에서 보는 것과 같이 전체적으로 균열이 많이 생기나 먼저 표면의 끝부분에 균열이 먼저 생기게 되고 그다음으로 중간에서 균열이 발생하여 수직 균열이 발생한다. 현무암 석분슬러지의 함유량이 높을수록 공극에 수분이 있어 경화가 늦어지는 반면 수화열을 낮춰주는 역할을 하여 현무암 석분슬러지의 함유량이 높을수록 균열의 수가 적게 나타나는 것으로 판단된다.

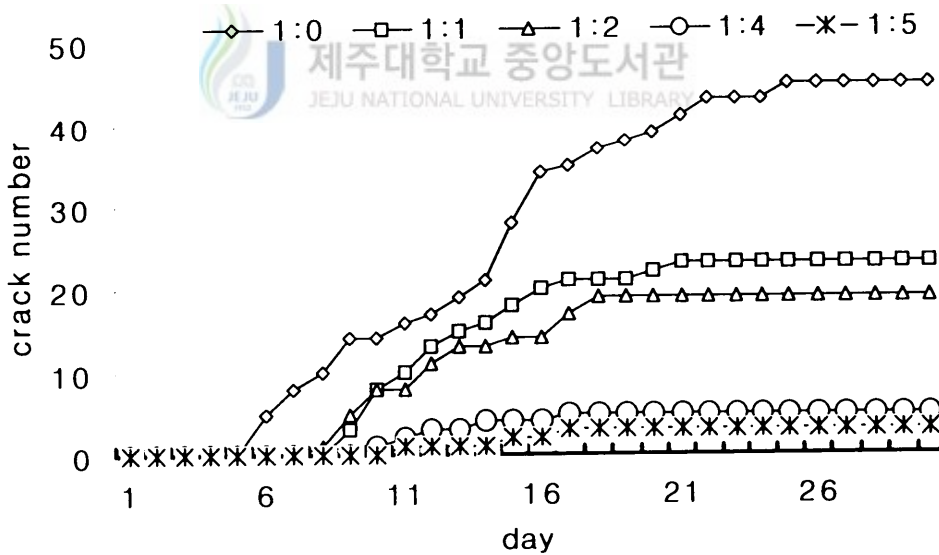


Fig. 5.27 Crack number in a day



Fig. 5.28 Shape of crack

### 5.2.2 길이변화시험

Fig. 5.29는 습윤양생후 건조에 노출됐을 경우 각주형 공시체의 길이 변화를 나타낸 것이다. 초기 12일 까지가 수축 속도가 급속히 일어나며 수축은 서서히 감소하는 것으로 나타나있다. 이는 습윤상태에 있다가 노출됐을 경우 표면에서 수분이 증발되어 수축한 것으로 판단된다. 시멘트의 함량이 적을수록 수축이 증가하는 것을 볼 수 있으나 시멘트양이 17~20%인 경우에는 비슷한 수축을 보여주고 있다. 시멘트 양이 많을수록 수화반응 속도가 빨라 초기에 수화물이 형성되어 조직이 치밀해졌기 때문으로 판단된다. Fig. 5.29에서와 같이 석분슬러지의 함유량이 많을수록 공극안의 흡수한 수분의 양이 많아서 수분이 증발하면서 수축이 시멘트보다 수축양이 큰 것으로 판단된다. 이것으로 보아 석분슬러지의 함유량이 많을수록 경화가 늦어지는 것으로 볼 수가 있다.

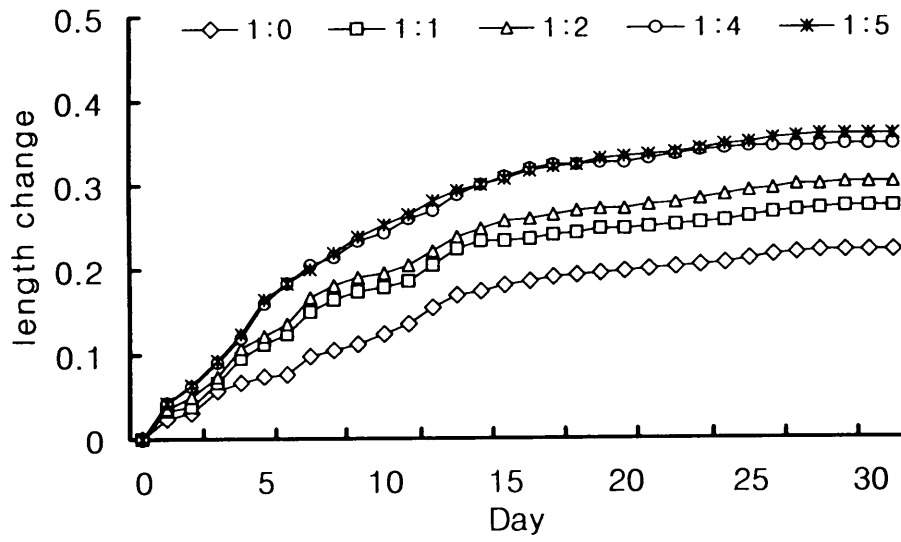


Fig. 5.29 Length change in a day

## VI. 결론

도내 석산이나 석재가공공장에서 발생하는 현무암 석분슬러지의 양이 많다. 현무암 석분슬러지는 현재 폐기물로서 이것을 처리하는 과정에서 비용이 많이 소모하고, 석분슬러지를 재활용하는 방법이 극히 저조하다. 이러한 폐석분의 재활용을 위해 차수재로서의 기능을 연구하고자 하였다.

본 연구에서는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하는데 있어서 일련의 실내시험과 현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구의 연구결과와 비교·검토하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 소성이 적은 재료로서 느슨함 모래와 유사한 특성을 가진 현무암 석분슬러지를 시멘트와 혼화제를 혼합한 시험체는 동결융해후 석분슬러지의 함유량이 증가 할수록 압축강도는 낮아지고 투수계수는 높아지나 함유량이 80%이하인 경우에는 차수재로 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제가 혼합된 시료를 동결융해시험기에 200Cycle을 동안 한 공시체의 압축강도는 시멘트의 함유량이 많을수록 강도는 더욱 높아지는 것을 알 수 있다. 시멘트만 존재할 경우 21%~23%정도 강도는 증가하나 석분슬러지의 함유량이 많은 경우 -13%~-31%까지 내려가는 것을 볼 수 있다.

3. 현무암 석분슬러지와 시멘트, 혼화제가 혼합된 공시체의 투수계수는 시멘트의 함유량이 많을수록 동결융해전과 후의 값이 변화가 적은 반면 석분슬러지의 함유량이 많을수록 투수계수 값은 높아지는 것을 볼 수가 있다. 석분슬러지의 함유량이 많을수록 동결융해중 경화과정에서 자체 및 수분으로 인한 팽창력에 의한 공극의 증가로 인하여 투수계수 값이 높아지는 것으로 사료된다. 석분슬러지의 함유량이 80%이하인 경우에는 차수재의 기준치( $10^{-7}cm/s$ )를 만족한다.

4. 중량변화시험에서 석분슬러지의 함유량이 많을수록 9%이상의 중량이 감소하는 것



을 볼 수가 있다. 포졸란 반응을 관찰한 결과 시멘트의 함유량이 많을수록 결합이 좋고 공극이 크기가 크지 않으나, 석분슬러지가 함유량이 많을수록 공극의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다.

5. 건조수축에 의한 균열 및 길이변화시험에서 석분슬러지의 함유량이 많을수록 균열의 수가 적고, 수축량이 조금 높은 것으로 나타나 있다. 시멘트의 함유량이 많을수록 수화반응에 의한 발열반응이 일어나게 되어 균열이 잘 일어나는 것으로 판단이 되고, 석분의 함유량이 많을수록 공극안의 수분으로 인한 수화반응에 의한 발열반응이 적게 일어나게 되어 균열의 수는 적게 나타나지만 경화반응이 늦게 일어나게 되어 수축되는 양은 많은 것으로 판단이 된다.

6. 향후 연구 과제로서 현부암 석분슬러지의 환경오염성분 함유량을 살펴보고, 중금속 흡착능력에 대하여 연구하는 것이 바람직하다.



## VII. 참고문헌

- 남정만, 윤중만, 김기영, 김광일, 2005, 현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 제22권 5호, pp464-471
- 박호식, 현재혁, 조재범, 서경아, 황윤섭, 2003, 동결융해 현상이 매립지 차수층의 강도 및 차수특성에 미치는 영향, 한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집, pp577-580.
- 나종득, 2002, 콘크리트 공학, 일광사, p
- 권오준, 2004, 매스콘크리트의 온도 균열 제어를 위한 실험적 연구, 경기대학교 석사학위논문, p
- 조성택, 2002, 동결융해, 건조수축 작용을 받은 매립지 차수층의 물리적 특성 변화, 충남대학교 석사학위 논문, p.
- 김영수, 허노영, 서인식, 최정호, 2000, 대구지역 퇴적암 쇄석골재를 사용한 콘크리트 공시체의 일축압축강도와 동결융해특성에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 제20권, 7호, pp.325-328
- 나진성, 현재혁, 조재범, 김진춘, 이호용, 2002, MCG 고화재가 첨가된 화강풍화토의 동결융해 과정에 따른 강도 및 투수계수 변화, 한국폐기물학회지, 제19권, 3호, p.
- 진호일, 민경원, 한상목, 신대용, 1999, 석산 및 석가공업체로부터 발생하는 석폐기물의 물리적 화학적 특성, 한국자원공학회, 제36권, 4호, pp290-298.
- 이수철, 1997, 혼합 콘크리트의 강도특성에 관한 연구, 경원전문대학논문집, 제19권,1호, pp45-55
- 성찬용, 류능환, 윤준노, 김영익, 임상혁, 2003, 석분과 황토를 사용한 건자재 제품 개발 연구, 석재연 논문집, 제8권, pp141-151
- 백신원, 2001, 석분의 효과적인 이용에 관한 연구, 산업안전학회지, 제16권, 1호, pp65-72.
- 진호일, 2000, 석분 슬러지를 이용한 중금속 흡착제 개발에 관한 연구, 석재연논문집, 제5권, pp195-201.
- 마상준, 2004, 석분토를 혼화재료로서 재활용하는데 있어서 소성조건에 따른 포졸란성

- 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제23권, 2호, pp351-354.
- 조재범, 현재혁, 황윤섭, 2004, 건조수축시 수분공급이 차수층에 미치는 영향, 한국폐기물학회지, 제21권, 2호, pp127-134.
- 김광일, 2005, 현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, p
- 양성철, 안남식, 최동욱, 강승민, 2004, 형상비 및 골재의 종류에 따른 콘크리트 시편의 건조수축특성 연구, 한국도로학회 논문집, 제6권, 4호, pp109-121.
- 박제선, 윤경구, 이주형, 김태환, 정원경, 2000, 시멘트 콘크리트의 건조수축균열 특성, 석재연논문집, 제5권, pp89-101.
- 민경원, 진호일, 최성범, 박진범, 2002, 현무암 석분 활용에 대한 연구, 석재연 논문집, 제7권, pp 217-224
- 김정인, 1999, 역학적하중이 암석의 투수계수 변화에 미치는 영향, 서울대학교 석사학위 논문, pp.4-6
- 박범준, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 하산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적특징, 지질학회지, 29권, pp.39-60
- 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 대한 연구, 자원환경지질, 28권, pp.513-518.
- 윤용균, 1992, 荷重條件가 節理의 거칠기가 岩石의 透水性에 미치는 影響 서울대학교 박사학위논문, pp.7-8.
- 정종암, 2002, 폐석분을 이용한 폐기물 매립지 차수재층 기능 평가에 관한연구, 서울시립대학교 석사학위논문, p.
- 조재범, 현재혁, 조성택, 최경훈, 2002, 매립지 차수재로서의 준설편토 활용에 관한 연구, 대한환경공학회지, 제24권, 5호, P.380
- 조재범, 현재혁, 황윤섭, 2004, 현장토내의 유기물질이 고화 차수층에 미치는 영향(II), 균열보완을 중심으로, 한국폐기물학회지, 제 21권, 5호, pp.870-871
- 한국자원연구소, 한국산업자원부, 2000, 석분 슬러지 활용기술 개발에 관한 연구: 최종 보고서, pp.3-32
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Jeju Island, Geological Survey of Korea, 10-1, pp.1-34

- Horzog,A., 1964, "The structure of clay-cement, colloquium on mechanisms soil stabilization ." Div. of Soil Mechanics, CSIRO, Melbourne, April
- Ingles, O. G and Metcalf. JB., 1972, Soil Stabilization, Butterworths. Sydney, pp.119-120
- Kenneth. J. et al., 1995, "Zeolite encapsulated metal complexes." J. Inclusion Phenom. Mol. Recognit. Chem., 21. pp.159-184
- Lee, J. S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoics Volcanics of South Korea: geodynamics implications on the East-Eurasian margin. Thesis of Doctor Degree, Univ. DOR-LEANS.
- Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea., Sci. Rep. Tohoku Univ., Series 3, 15, pp.177-256.



## 감사의 글

지난 2년간 학문적인 지식뿐만이 아닌 매사에 인격적으로 가르침을 주시고, 부족한 저를 노력과 인내로 지도해 주신 남정만 교수님께 다시 한 번 고개 숙여 감사하다는 말을 전해드립니다. 그리고 학부에서부터 대학원까지 많은 가르침을 주셨고, 조교생활 동안 잘 못한 저를 많이 이해해 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님께도 감사드립니다. 1년간 저에게 가르침과 조언을 해주신 할아버님 같은신 홍원표 교수님께도 감사드립니다. 또한 제 형과 같은신 이재호 박사님께도 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 도움을 준 우리 지반공학연구실 기영이형, 영웅이영, 재관이형, 동일이형께 감사드립니다. 연구실 후배인 준호, 성환, 승현, 도형, 태건, 창세, 승용, 영민에게도 고마운 마음을 전합니다.

학부 때부터 대학원까지 많은 도움을 준 민수형에게도 감사드립니다. 우리 연구실이 아닌 다른 연구실이지만 저에게 많은 도움을 준 지훈이형, 건이형, 순보형 모두 감사드립니다. 또한 경보, 철영, 태혁, 강일, 행식, 성룡, 우열, 상봉, 경남, 향혜에게도 고마운 마음을 전합니다.

대학원 생활동안 옆에서 도움을 준 내 벗들인 영민, 창협, 기안, 재원, 승필, 성건, 민성, 희석, 마로, 신석, 병철, 기준, 효진, 민정, 석봉, 대훈, 은철, 보규, ...등등 모두에게 고마운 마음을 전합니다. 이름이 없다고 기분 나빠하지 않았으면 합니다.

2년간 뒤에서 이끌어 주시고, 믿어주신 부모님과 형, 누나에게도 감사한 마음을 전합니다.

마지막으로 힘들때나 즐거울때 언제나 함께해주고 못해 준 것이 너무 많은 선홍이에게 이 면을 빌어 사랑하고 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

이 외에도 이 논문이 완성하는데 도움을 주신 고마운 분들께 감사드립니다.

2006년 6월