

2006年 2月  
碩士學位論文

시멘트 및 Fly Ash 모르타르의  
해수·담수 습윤양생에 따른 물리적  
특성에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

金 潤 澤

시멘트 및 Fly Ash 모르타르의  
해수 · 담수 습윤양생에 따른 물리적  
특성에 관한 연구

- A Study on the Physical Characteristics follow in the Salt water ·  
Fresh water dampness hardening of Cement and Fly Ash Mortar -

2006年 2 月 日

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

金 潤 澤

시멘트 및 Fly Ash 모르타르의  
해수·담수 습윤양생에 따른 물리적  
특성에 관한 연구

指導教授 姜 秋 遠

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2005年 11 月 日

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

金 潤 澤

CHOSUN  
UNIVERSITY  
1946

金潤澤의 碩士學位 論文을 認准함.

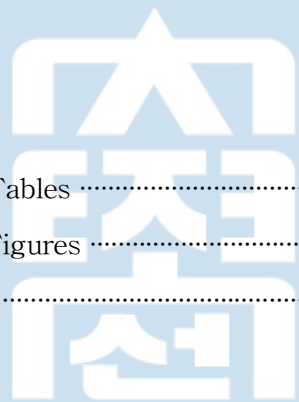
委員長 朝鮮大學校 教授 高 進 碩 印

委 員 朝鮮大學校 教授 朴 天 永 印

委 員 朝鮮大學校 教授 姜 秋 遠 印

2005年 11 月 日

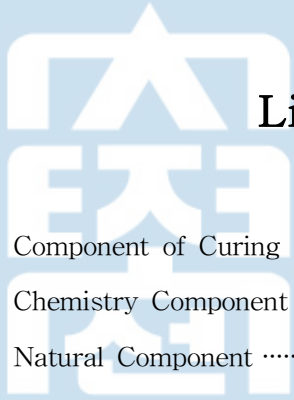
朝鮮大學校 大學院



# 목 차

List of Tables .....	i
List of Figures .....	ii
Abstract .....	iv
1. 서 론 .....	1
2. 해수의 특성 .....	2
2.1 해수의 기원 및 성분 .....	2
2.2 해수의 영향 .....	3
3. 시료의 준비 .....	4
3.1 시멘트(Cement) .....	4
3.2 Fly Ash Cement의 장·단점 .....	7
3.3 석탄회(Fly-Ash) .....	8
3.4 표준사(Standard Sand) .....	12
3.5 혼합수 .....	12
3.6 저장수(담수, 해수) .....	13
4. 시험편 제작 및 양생 .....	14
4.1 시험체 틀 .....	14
4.2 모르타르의 배합 .....	15
4.3 온도와 습도 .....	15

5. 실험방법 및 결과 .....	17
5.1 압축강도(Uniaxial Compressive Strength) .....	17
5.2 인장강도(Brazilian Test) .....	22
5.3 비 중, 흡수율, 공극률(Specific Gravity, Absorptance, Prosimy) .....	27
5.4 직접전단시험(Direct Shear Strength test) .....	32
5.5 쇼아경도(Shore Scleroscope Hardness Test) .....	37
5.6 슈미트 헤머(Schmidt hammer test) .....	42
5.7 점하중 강도(Point load test) .....	46
6. 결 론 .....	52
참 고 문 헌 .....	77



## List of Tables

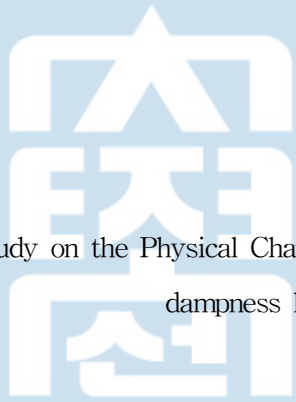
Table 2.1. Component of Curing Water .....	3
Table 3.1. Chemistry Component .....	5
Table 3.2. Natural Component .....	5
Table 3.3. Every kind expenditure of cement .....	6
Table 3.4. Waterworks except quality of water .....	12
Table 3.5. Component of sea water .....	13
Table 4.1. The mold .....	15
Table 4.2. Temperature .....	16
Table 5.1. Avg. Result of Uniaxial compressive test .....	19
Table 5.2. Avg. Brazilian teat results of the rock. ....	24
Table 5.3. Avg. Result of Specific gravity, Absorption and Porosity. ....	28
Table 5.4. Avg. Result of Direct Shear Test. ....	34
Table 5.5. Avg. Shore hardness results. ....	39
Table 5.6. Avg. Results of Schmidt hammer rebound value. ....	44
Table 5.7. Avg. Results of Point Load. ....	49

## List of Figures

Figure 3.1. Standard Sand .....	12
Figure 5.1. Photograph of system for compressive test. ....	18
Figure 5.2. Graph of Uniaxial compressive test result. ....	21
Figure 5.3. Loading direction and stress distribution of Brazilian test. ....	22
Figure 5.4. Apparatus for Brazilian test. ....	23
Figure 5.5. Graph of Brazilian test results. ....	26
Figure 5.6. Photograph of AG Balance .....	27
Figure 5.7. Graph of Specific gravity and Water content of ratio of dry weight results. ....	30
Figure 5.8. Graph of Water content of ratio of dry weight results. ....	30
Figure 5.9. Graph of Absorption results. ....	31
Figure 5.10. Graph of Porosity results. ....	31
Figure 5.11. Direct Shear Apparatus .....	33
Figure 5.12 Graph of PF and PS Friction Angle results .....	35
Figure 5.13 Graph of FF and FS Friction Angle results .....	36
Figure 5.14. Photograph of Shore Scleroscope Hardness tester. ....	37
Figure 5.15. Relationship between Shore hardness value and uniaxial compressive strength. ....	38
Figure 5.16. Graph of Avg. Shore hardness results. ....	40
Figure 5.17 Photograph of the Schmidt hammer test. ....	42
Figure 5.18. Relationship between Schmidt hammer rebound value and uniaxial compressive strength. ....	43



Figure 5.19. Graph of Avg. Schmidt hammer rebound value. ....	45
Figure 5.20. Point load Tester .....	46
Figure 5.21. Each tests require sample form .....	47
Figure 5.22. Size Correction Chart Point Load Strength Test. ....	48
Figure 5.23. Graph of Avg. Point Load results .....	50



## Abstract

- A Study on the Physical Characteristics follow in the Salt water · Fresh water dampness hardening of Cement Mortar -

By Kim, Yun Taek

Adv. Prof. : Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

The mortar and concrete made by cement are extensively used construction materials, the research and development of complex materials used cement have operated remarkable growth about durability and the quality of materials.

Accordingly, to compare with physical characteristics of chloride ion permeation on fly ash added mortar and concrete analyzed physical characteristics that ordinary portland cement mortar and fly ash cement mortar carry out wet curing each for one, three, seven, twenty-eight day on fresh water · sea water.

1. The Fly ash cement value of uniaxial compressive strength, brazilian strength, direct shear strength test, specific gravity, schmidt hammer test, point road test is initially about 5~20% lower than ordinary portland cement at the physical characteristics but an increase ratio of fly ash cement in the

long term is higher than ordinary portland cement.

2. The friction angle of direct shear strength test wholly approximate  $90^\circ$  and cohesion is 29.42~593.34 bigger than rocks because the cement mortar made wet curing is high water content in ratio of dry weight.

On this study, fly ash cement indicated an high increase ratio in sea water. Through the experiment and valuation of various view point, methods make up for data if so we will be advanced application probability of construction site.

## 1. 서론

시멘트를 원료로 하는 모르타르나 콘크리트는 건설산업용 재료로 가장 광범위하게 이용되고 있는 건설재료이며, 시멘트를 이용한 복합재료들에 대한 연구와 개발로 재질이 개선되고 내구성이 향상되는 등 괄목할 만한 발전이 이루어지고 있다.

그러나 이들 시멘트 모르타르 및 시멘트 콘크리트는 시멘트 수화물이라는 결합재로 구성된 취성재료로 경화의 지연, 낮은 인장강도, 큰 건조수축, 약한 내약품성, 중성화 및 염화물 이온의 침투에 의한 철근의 부식, 알칼리 골재반응 등에 의한 조기성능 저하 등과 같은 결점을 가지고 있다<sup>26,33)</sup>.

최근, 우리나라에서도 피로하중, 산성비, 염해, 동결융해작용 등 각종원인에 의해 시멘트 콘크리트 구조물의 성능저하가 건설산업분야에 커다란 문제점으로 대두되고 있다<sup>29)</sup>.

또한, 간척사업 등으로 간척지 지반보강(Grouting), 해저 구조물, 해안지역 지하 저장소 설치시 해수가 유입이 될 확률이 높으므로 염화물 이온이 모르타르 및 콘크리트에 어떠한 영향을 미치는지 관심을 갖을 필요가 있다.

이와 같은 콘크리트 및 모르타르의 문제점을 개선하기 위한 방법으로 혼화제를 첨가하여 콘크리트 및 모르타르의 성능을 개선하기 위한 연구가 국내·외적에서 활발히 진행되고 있다. 이러한 건설재료중의 하나가 석탄회(fly-ash)이다<sup>32)</sup>.

따라서, 본 연구는 모르타르 및 콘크리트에 첨가되는 혼화제의 종류는 다양하나, 그 중 Fly Ash를 첨가하여 염화물 이온의 침투에 의한 물리적 특성의 변화를 비교, 분석하기 위해 포틀랜드 시멘트 모르타르(Ordinary Portland Cement Mortar)와 플라이애시 시멘트 모르타르(Fly Ash Cement Mortar)를 담수(Fresh Water)·해수(Sea Water)에 각각 1일, 3일, 7일, 28일간 습윤양생(wet curing)하여 물성 특성을 비교 분석하기로 한다.

## 2. 해수의 특성

### 2.1 해수의 기원 및 성분

지구상에 존재하는 약 14억km<sup>3</sup>에 해당하는 해수의 기원은 지구 내부로부터의 가스 방출, 즉 화산 활동에 의한 것으로 해석된다. 지구를 구성하는 규산염 광물 속에는 산소와 수소가 화학적 결합 상태로 묶여 있었으며, 물은 지구의 내부에서 부분적인 용융 작용이 일어날 때 화산 활동을 통해서 용암과 같이 지구 표면으로 흘러 나왔을 것이다. 용암이 지표에 도달하면 상당량의 물은 뜨거운 증기와 구름의 상태로 외부로 달아나 버린다. 현재의 화산 활동의 비율을 근거로 계산하면 과거의 지질 시대 동안 지표에 분출하였던 용암의 전체 양은 현재의 대양을 채우기에 충분한 양의 수증기를 포함하였을 것으로 추정된다. 대기 중의 수증기는 응결하여 물이 되어 강우로 지표에 떨어지고 이 물이 지표의 낮은 곳으로 흘러 고임으로써 바다가 형성되었다.

해수 중에 염류를 공급하는 근원으로는 크게 강물, 대기, 해저 열수구에서 분출되는 물질 등으로 구분되는데, 이 중 해양에 유입되는 물질의 95% 이상이 강물을 통해 유입되는 것으로 알려져 있다. 전 세계적으로는 매년 200억 톤의 퇴적물이 강을 통해 바다로 흘러 들어가며, 이 중 80% 정도가 아시아 대륙으로부터 흘러 들어간다. 강을 통해 흘러 들어가는 원소 중 Mg, Ca, Cl, S은 녹아 있는 상태로 Si, Al, Fe 등은 부유 상태로, Na, K 등은 용존과 부유 상태로 흘러 들어가며 황화합물의 일부는 대기를 통해 공급된다. 한편 열수구로부터 Mn을 비롯한 미량의 금속 원소들이 공급되는 것으로 알려져 있다.

해수의 성분으로는 염소, 나트륨, 황, 마그네슘, 칼슘, 칼륨등이 있으며, 성분 특성은 다음과 같다.

- (1) 염소 : 염소는 전체 해수 성분의 절반 이상을 차지하고 소금의 구성 성분으로 염분의 측정에 가장 널리 이용된다.
- (2) 나트륨 : 나트륨은 지각을 이루고 있는 물질로부터 용해되어 바다에 유입된 성분으로 해수에 비교적 많이 녹아 있는 원소이다.
- (3) 황 : 황은 해수 중에 대부분 황산염의 형태로 존재하며, 해수에 녹아 있는 성분들 중에서 세 번째로 많은 원소이다.

- (4) 마그네슘 : 해수에 비교적 많이 들어 있는 금속 원소이다. 해수에 녹아 있는 염소의 양에 대한 마그네슘의 양의 비는 일정하다.
- (5) 칼슘 : 칼슘은 조개껍질의 구성 성분이며 해수 속에서 침전하여 석회암을 형성 한다.
- (6) 칼륨 : 칼륨은 농도가 낮은 반면에 반응성이 강하기 때문에 해수에 녹아 있는 염소의 양과의 비를 이용하여 측정한다.

## 2.2 해수의 영향

해수는 콘크리트의 열화를 일으켜 직접 접촉하는 부분뿐 아니라 간접적으로 영향을 받는 구조물에서도 장기적으로 내구성을 저하시켜 구조물의 수명을 단축시킨다.

해양 콘크리트의 내구성은 시멘트의 종류에 따라 큰 차이를 나타내고 있기 때문에 수많은 국내외 연구조사에 의해 각종시멘트의 내구성에 대한 검토가 행해져 왔는데 각 연구조사 결과들 사이에는 일부 서로 상반된 결과가 있기는 하나 대략 다음과 같이 요약 될 수 있다<sup>19)</sup>.

첫째, 해수중의 각종 황산염(예 :  $MgSO_4$ ) 혹은 염화물(예 :  $MgCl_2$ )과 포틀랜드시멘트의 수화물생성물과의 화학반응에 의해 수화생성물이 분해되어 콘크리트의 열화를 촉진시킨다.

둘째, 시멘트 구성 광물중  $C_3A$  함량이 큰 시멘트일수록 황산염과 반응하여 체적팽창을 일으키는 물질을 만들어 결과적으로 콘크리트의 미세구조를 파괴시킨다.

셋째, 시멘트 수화과정으로 생성되는  $Ca(OH)_2$ 는 해수중의 황산염이나 염화물과 반응하여 용해되기 쉬운 물질로 변화되어 조직을 약화시키고 강도를 저하시킨다.

넷째, 황산염과 반응만을 고려하여  $C_3A$ 의 함량을 적게한 시멘트의 경우 염소이온( $Cl^-$ )의 침투를 억제하게 못하여 부식을 일으키기 쉽다.

Table 2.1. Component of Curing Water

Water	ph	Eh (mV)	Ec (ms/m)	TDS (mg/l)	DO (mg/l)	sal	cond (ms)	temperature (°C)
Fresh	7.05	217	8.57	36	23.5	0	83.1	18.5
Sea	6.46	249	-	12,200	15.98	12.8	21.6	19.1

### 3. 시료의 준비

#### 3.1 시멘트(Cement)

시멘트의 어원은 “마름돌 또는 깬돌”이란 뜻을 가진 그리스어의 caede가 cement로 변한 것으로서 ASTM에서는 넓은 의미로 “표면의 부착에 따라 물질과 물질을 결합할 수 있는 접착제(adhesive)”라 한다.

시멘트는 석회석과 점토를 가루로 만들어 섞어 굽고, 다시 석고를 섞어 가루로 만든 것으로 토목, 건축에 쓰이는 콘크리트의 재료가 된다. 원료에 따라 여러 가지가 있는데, 오늘날 가장 널리 쓰이는 것은 1824년에 영국에서 발명된 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)를 개량한 것이다. 일반적으로 말하는 시멘트는 물에 개면 굳어지는 수경성 시멘트이며, 포틀랜드 시멘트는 대표적인 수경성 시멘트이다<sup>34)</sup>.

포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)는 주성분인 석회, 실리카, 알루미나 및 산화철을 함유하는 원료를 적당한 비율로 충분히 혼합하여, 그 일부가 용융하여 소결된 클링커에 적당량의 석고를 가하여 분말로 한 것이다. 다만, KS L 5210(고로 슬래그 시멘트)에서 규정한 슬래그나, KS L 5401(포틀랜드 포졸란 시멘트)에서 규정한 포졸란, 또는 KS L 5405(플라이 애시)에서 규정한 플라이 애시 및 기타 첨가제 등을 시멘트의 5% 이내에서 혼합 분쇄 또는 단독 분쇄 후 혼합할 수 있다<sup>18,28)</sup>.

본 연구에서는 KS에 규정되어있으면서 오늘날 흔히 사용하는 비중 3.15인 1종 보통 포틀랜드 시멘트(KS L 5401)와 플라이애시(fly-ash)를 혼화재로 사용한 플라이애시시멘트(fly-ash cement)를 사용하였다<sup>17)</sup>.

포틀랜드 시멘트의 품질은 편의상 화학성분과 물리성분의 두 가지 항목으로 나누어 규정한다. 화학 성분으로는 [Table 3.1]에 표시한 화학성분 규정에 따라야 하며, 물리 성분은 [Table 3.2]에 표시한 물리성능 규정에 따라야 한다<sup>35)</sup>.

Table 3.1. Chemistry Component

항 목	1종	2종	3종	4종	5종
Silica(SiO <sub>2</sub> )		20.0 이상			
Aluminum Oxide(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		6.0 이하			
Iron Oxide II (Fe <sub>2</sub> O)		60 이하		6.5 이하	5.0 이하
Magnesium Oxide(Mg <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.0 이하	5.0 이하	50 이하	5.0 이하	
Sulfur Trioxide(SO <sub>3</sub> )					
C <sub>3</sub> S 8%이하일때	3.0 이하	3.0 이하	3.5 이하	2.3 이하	2.3 이하
C <sub>3</sub> A 8%이하일때	3.5 이하		4.5 이하		
강열 감량	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하	2.5 이하	3.0 이하
Alite(C <sub>3</sub> S)				35이하	
Belite(C <sub>2</sub> S)				40 이하	
Aluminate(C <sub>3</sub> A)		8 이하	15 이하	7 이하	5 이하
C <sub>3</sub> S +C <sub>3</sub> A		58 이하			
Ferrite(C <sub>4</sub> AF) + 2(C <sub>3</sub> A) or (C <sub>4</sub> AF + C <sub>2</sub> F) Solid Solution					25 이하

비고. 화학성분을 기호로 표시할 때, C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 한다.

Table 3.2. Natural Component

Item		1종	2종	3종	4종	5종	
Fineness	Blaine (cm/g)	2,800이상	2,800이상	3,300이상	2,800이상	2,800이상	
Stability	Autoclave Expantion(%)	0.8이하	0.8이하	0.8이하	0.8이하	0.8이하	
Congelation Time	Gilmore Test	early decision (minute)	60이상	60이상	60이상	60이상	60이상
		last decision (clock)	10이하	10이하	10이하	10이하	10이하
	Beaker Test	early decision (minute)	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하
Heat of hydration (kgf/cm <sup>2</sup> )	7일	-	70이상		60이상	-	
	28일		(80이하)		70이하		
Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	1일	-	-				
	3일	130이상	110이상	250이상	-	90이상	
	7일	200이상	180이상	280이상	75이상	160이상	
	28일	290이상	285이상	310이상	180이상	210이상	



현재 우리나라에서 주로 사용하는 시멘트들의 용도표인 [Table 3.3]을 보면, Fly Ash Cement의 경우 용도에 따라 최적인 사용 장소가 아직 정확히 명시되어 있지 않아 앞으로 더 많은 연구와 개발이 필요할 것으로 사료된다.

Table 3.3. Every kind expenditure of cement

종 류 용 도	보통포 틀랜드 시멘트	조강포 틀랜드 시멘트	중용열 포틀랜 드시멘 트	고로 시멘트	플라이 애쉬 시멘트	중용열 플라이 애쉬시 멘트	벨라이트 시멘트		GRC 시멘트	제올라 이트	백색 포틀랜 드 시멘트
							저열포 틀랜드 시멘트	하이플 로우 시멘트			
건축 공사 용	기초(基礎)	○			●	○					
	구체(構體)	●	○		○						○
	내외장	●	○						○		○
	초고층 RC*조	○	○				○	●			
	원자력 발전소 시설	○		●		○	○	○			
지반개량 오페물 고화제	○			○						●	
주입 공사용	○	○		○	○						
뿔침 콘크리트용	●			○							
포장공사용(항만, 고속도로, RCCP**)	●	○	○	○	○						
해양 항만 수리(水理)구조용	○		○	●	○		○	○			
고유동 콘크리트	○			○			○	●			
매스 콘크 리트 용	일반			○	○	○	●	○			
	대형교각 하부 구조물							○			
	RCD 댐					●	○				
	지하 연결벽, LNG 지하용기					○	○	○			
	고강도 지하 연결벽						●	○			
콘크 리트 제품	건축용	●	○						○		○
	토목용	●	○		○				○		○
	커튼월	○	○						●		

(● : 최적 ○: 적합)

### 3.2 Fly Ash Cement의 장·단점

Fly Ash Cement를 사용할 경우 첫째, Fly Ash 중의 가용성  $\text{SiO}_2$ 는 시멘트 수화시 생성되는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 화합하여 불용성의 안정된 규산칼슘을 생성시켜 장기적으로 콘크리트의 강도를 증진시킨다. Fly Ash를 사용할 때 초기강도는 떨어지나 28일 이후부터 강도는 계속 증가하여 교량건설에 적합하다.

둘째, 입자가 구형인 Fly Ash는 Ball-Bearing과 같은 작용에 따른 유동성 개선으로 펌프성, 표면처리 등 작업성을 좋게 한다.

셋째, Cement에 Fly Ash를 혼화하면 콘크리트의 수화열이 감소하여 온도상승은 대체율이 증가한 만큼 감소하기 때문에 댐공사 등에 적합하다.

넷째, 알카리 골재반응 억제 : 알카리골재반응이란 어떤 종류의 골재가 Cement와 알카리분이 장기간 반응하고 콘크리트가 팽창하여 균열이 생겨 붕괴되는 현상을 알카리골재반응이라하는데 Fly Ash를 사용하므로써 이 알카리골재 반응이 억제된다.

다섯째, Fly Ash를 혼화한 콘크리트모탈의 건조수축율은 Cement량과 물 의비에 의해 좌우되지만 Fly Ash 대체율이 증가한만큼 Cement량이 감소되고 수축율이 적어져 균열현상이 일어나지 않는 견고한 구조물이 된다.

여섯째, Cement 중의 유리석회와 Fly Ash의 규산과 알루미늄이 결합하여 불용성의 견고한 물질을 만들어 콘크리트의 조직을 치밀하게 하기 때문에 수밀성이 증가되고 시간이 경과할수록 현저한 효과를 발휘하므로 지중 공사에 유효하게 사용한다.

일곱째, 석탄회 사용으로 위 사항의 장점들을 활용할 수 있으며, 부수적으로 원재료비 절감에 따른 원가부담이 해소된다.

이러한 장점이 있는 반면, 숯크리트 타설재로 사용할 때, 숯크리트의 특성상 높은 초기강도를 요하나, Fly Ash Cement의 경우, 장기강도는 강하나, 초기강도가 낮기 때문에 보완연구가 필요하며, 콘크리트 혼화제로 재활용되는 Fly Ash는 미연탄소를 함유하고 있어 콘크리트에 혼화사용 시, 공기량을 감소시키기 때문에 Fly Ash

에 포함된 미연탄소를 제거하여야 하며, Cement와 비슷한 입도를 유지해야 한다. 또한, 기존 터널시공시에 비해, Fly Ash 배합과정이 추가되므로 부수적인 장비가 필요하다는 단점이 있다.

### 3.3 석탄회(Fly-Ash)

플라이애시(fly-ash)는 미분탄연소보일러의 탄진과 혼합된 폐기연소가스를 집진기로 채취한 구형의 세분말로서 양질의 것은 화력발전소의 집진기에서 채취한다.

석탄회는 일반적으로 석탄회는 미분탄이 보일러의 노내에서 연소 후 생성되는 폐기물로서 석탄 종류와 보일러의 연소 조건에 따라 매우 다양하다. 석탄회 발생과정은 석탄 화력발전소에서 석탄을 미분쇄기(pulverizer)를 이용하여 200mesh 이하 입자가 70~80% 이상 되게 제조 한 다음 뜨거운 공기와 함께 고속으로 노내로 주입하면, 석탄에 함유된 대부분 광물질의 용융점 이상인  $1,500\pm 200^{\circ}\text{C}$  온도 범위에서 부유상태로 순간적으로 연소하게 된다. 이때 연소 후 물질과 배기가스에서 전기 집진 장치나 Bag House로 수집한 부산물을 석탄회(Ash)라고 하며, 무연탄의 경우는 26~50%, 역천탄은 8~15% 정도가 발생된다. 연소 후 모이는 장소에 따라 크게 Fly Ash와 Bottom Ash로 구분된다. 본 연구에서는 그 중 Fly Ash를 사용하였다.

우리나라의 경우 석탄회의 재활용율이 약 30%에도 달하지 못하고 있는데, 이는 그동안 용도개발이 시멘트 원료나 레미콘 혼화제에 거의 국한 되어 있었고 석탄회의 이용에 대한 국민 의식 부족과 지리적으로 우리나라가 석탄회를 대체할 수 있는 시멘트나 자갈, 모래 등이 다른 나라에 비해 비교적 풍부하고, 또한 지금까지는 발전소의 석탄회 처리장 부지 확보가 용이하지 못했기 때문에 석탄회로부터 미연탄소분을 제거하는 기술개발이 미흡했기 때문이다. 석탄회의 용도별 재활용율은 레미콘 혼화제와 시멘트 부원료가 각각 47%와 45%로 전체 재활용율의 92%를 차지하고 있어 대부분이 시멘트 관련 산업에 이용되고 있다. 시멘트 용도는 다양하지만 우리나라의 경우 시멘트 산업에만 국한되어 있어 충전제 등 보다 고부가가치 용도에는 기술개발이 미흡하여 활용을 못하고 있는 실정이다.

석탄 화력발전소로부터 폐기되고 있는 석탄회의 용도 개발은 환경문제와 자원 및

에너지 절약 그리고 관련분야 산업발전측면에서 중요한 관심사가 되고 있다. 이러한 석탄회의 용도 개발이 미흡한 이유는 석탄의 지질구조와 성상, 보일러의 연소조건에 따라 그 특성이 서로 다르게 나타나고, 특히 석탄회 중 미연탄소분의 함량과 불균일한 입도 때문이다. 따라서 석탄회를 특성에 맞는 용도로 이용하는데 있어서 입도조절과 미연탄소분 제거 기술 개발이 석탄회의 재활용율을 높이는 중요한 역할을 할 것이다.

시멘트 외에 석탄회의 주요 이용분야는 건축, 토목, 농수산, 충전제 등으로 분류할 수 있으며, 건축 및 토목 분야가 시멘트 다음을 차지하고 있다. 농수산 및 플라스틱 충전제의 경우 아직 재활용율이 높지 않으나, 충전제의 경우는 고순도 석탄회를 생산할 수 있는 기술만 개발한다면 석탄회의 우수한 물성 때문에 재활용율이 매우 클 것으로 기대하고 있다. 시멘트 분야의 경우 석탄회의 재활용율이 가장 높은 분야로 시멘트 제조, 시멘트 혼화제, 레미콘 혼화제 등이 사용되며, 특히 석탄회의 포졸란 특성 때문에 레미콘 혼화제의 경우 앞으로도 석탄회의 재활용율이 가장 크게 증가할 것으로 예측하고 있다. 따라서 석탄회의 품위를 향상시키고 레미콘 혼화제 및 특수 시멘트용 원료를 안정적으로 공급하고 이 분야의 산업 발전을 도모할 수 있는 미연탄소분 제거 기술개발이 필요하다.

#### 1) 비중 및 분말도

석탄회의 비중은 석탄내에 불순물로 존재하는 광물들에 따라 다소 다르지만 대체적으로 1.9~2.5 내외의 비중을 갖는다. 일반적으로 국내탄의 경우 회분 구성 광물 중 철분 함량이 적어 2.1정도의 비중을 갖고 있지만, 유연탄은 회분 구성 광물중 철분 함량이 다양해 2.0~2.9까지 되는 것도 있다. 비중이 석탄회의 특성에 미치는 영향은 불명확하지만 화학성분이 동일한 경우 비중이 가벼우면 분말도가 거칠고 시멘트 혼화 사용시 큰 강도를 기대하기 어렵다.

#### 2) 입자 형태와 크기

석탄회는 다공성 구형 입자와 단단한 구형입자로 이루어져 있으며, 입자의 크기는 발전보일러의 연소환경과 집진기의 종류에 따라 차이가 있는데, Fly Ash는 다공성 구형입자, 단단한 구형입자, 부정형입자의 혼합물이며, 입자크기는 탄종이나 분쇄도

에 따라 다르나 보통  $1.0\sim 150\mu\text{m}$  정도이며, 다공성 구형 입자와 단단한 구형 입자의 발생 비율은 집진장치, 석탄의 종류 그리고 연소효율에 따라 다소 차이가 있지만, 대체적으로 5 : 95% 정도로 단단한 구형입자의 발생비율이 크게 높다.

### 3) 성분

#### ㄱ) 실리카+알루미나+산화제이철

석탄회 중 가용성  $\text{SiO}_2$ 는 시멘트의 수화시 생성되는 수산화칼슘( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )을 생성하여 장기적으로 콘크리트의 압축강도를 증가시킨다. 클링커 반응은  $\text{Flux}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 가 없으면 고온에서 서서히 진행되므로 flux는 시멘트의 제조공정상 필수적이며,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 보다  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 flux로 더 필수적인 것으로 보고되고 있다. 그러므로 과거 ASTM에서는 석탄회에 대한  $\text{SiO}_2$  회초치를 40%로 규제 하였으나, 현재는 KS와 ASTM 모두  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함유량을 70% 이상으로 규제하고 있다.

#### ㄴ) 알칼리( $\text{NaO}, \text{K}_2\text{O}$ ) 및 황산염( $\text{SO}_4$ )

골재중의 반응성 규소(Si) 성분은 시멘트에 함유되어 있는 알칼리 성분과 반응하여 골재의 팽창을 일으키므로, 이를 방지하기 위하여 대부분의 규정에서는 알칼리( $\text{Na}_2\text{O}$  환산)의 최저 함량을 5% 이내로 제한하고 있다. 석탄회 중의 무수 황산은 콘크리트 내에서 황산염(Na의 중량이  $2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  혹은  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )의 형태로 존재하지만, 시멘트의 수화작용에 의해 알루미늄황산염( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ )을 형성한다. 따라서 석탄회내에 황산염이 다량 존재할 경우 생성물이 반응물보다 체적이 증대되어 콘크리트의 팽창과 균열의 원인이 되므로 황산염의 함량을 5% 이내로 규제하고 있다.

#### ㄷ) 산화마그네슘 및 강열감량

석탄회에 함유된 산화마그네슘은 콘크리트에서 수화반응하여 수산화마그네슘을 만들어 콘크리트의 팽창을 일으키므로, 이를 방지하기 위하여 산화마그네슘의 함량을 5% 이내로 제한하고 있다. 비록 산화마그네슘의 수화반응 속도가 느리게 진행된다 할지라도, 그 생성물인 수산화마그네슘은 산화마그네슘보다 체적이 크므로 콘크리트의 균열 원인이 된다. 석탄회를  $800^\circ\text{C}$  정도의 고온으로 감량이 될 때까지 가열시키면 결정수를 제외한 미연탄소분(C, CO)이나 황(S)과 같은 성분이 제거되어

중량의 강량이 생기는데, 이를 원시료에 대한 백분율로 나타낸 것을 강열감량이라 한다. 그러나 석탄회의 경우 강열감량의 대부분이 미연탄소분에 의한 것이므로, 강열감량과 미연탄소량을 거의 같은 뜻으로 사용한다.

석탄회 중 미연탄소분은 연소환경 특히, 공기공급량이 부족하면 많이 생성되는데, 이들 미연탄소분은 대체적으로 다공질이며 비결정의 활성탄과 같은 성질을 지니고 있어, 콘크리트 내에서 공기연행제(AE)를 흡착하여 이들의 사용량을 증가 시킨다. 따라서 우리나라의 경우 석탄회 중 강열감량을 6% 이하로 규제하고 있으나, 레미콘에 사용할 때에는 3% 이하에서는 문제가 없는 것으로 알려져 있다.

우리나라의 기술개발 동향 및 미연탄소분 제거기술은 석탄화력발전소로부터 발생된 석탄회의 재활용률은 선진국에 비해 매우 낮은 15%에 불과하며, 이 중 시멘트 및 레미콘용도로의 재활용이 92%를 차지하고 있어, 다른 분야의 활용이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이는 다른 활용분야에 대한 기술개발이 아직 미진한 상태로, 시멘트나 레미콘용보다 고부가가치용도로의 응용기술이 이루어지지 않았기 때문이다.

현재 우리나라에서 석탄회를 처리하여 재활용하고 있는 곳은 충남 보령에 위치한 한국 FLY ASH와 보령 FLY ASH 시멘트 공업(주)로, 건식 싸이클론을 이용하여 입도조절과 일부 미연탄소분을 제거하여 레미콘 용도로 판매하고 있다. 그러나 이 기술은 입도크기 및 비중에 의한 공기 분급기술이기 때문에 미연탄소분 제거에는 한계가 있어, 여름철과 같이 에너지를 많이 사용하는 계절에는 정제 석탄회 생산에 많은 어려움을 겪고 있다<sup>27)</sup>.

### 3.4 표준사(Standard Sand)

시험체 제작에 사용하는 모래는 주문진산 천연사로서, KS S 5100(시멘트 강도 시험용 표준사)기준에 적합한 모래를 사용하였다[Fig 3.1].



Figure 3.1. Standard Sand

### 3.5 혼합수

혼합수는 KS F 4009 부속서2(레디믹스트콘크리트의 혼합에 사용되는 물)에 대한 규정으로 일반콘크리트의 혼합에 사용하는 물도 이 규정을 적용하도록 하였다. 혼합수는 상수돗물과 상수돗물 이외의 물 및 회수수로 구분된다.

상수돗물은 시험하지 않아도 사용할 수 있으며, 상수돗물 이외의 물의 품질은 [Table 3.4]의 기준에 적합하여야 한다. 다만, 수도법의 수질기준에 따라 수돗물의 품질을 만족시키고 있을 경우에는 상수돗물에 준하여도 좋으며, 회수수의 경우 염화물이나 알칼리가 함유되어 있으므로 사용에 있어서는 이들을 고려할 필요가 있다.

Table 3.4. Waterworks except quality of water

항 목	품 질
현탁 물질의 양	2g/ℓ
용해성 증발잔유물 양	1g/ℓ
염소 이온량	150 ppm 이하
시멘트 응결시간의 차	초결은 30분 이내, 종결은 60분 이내
모르타르의 압축강도	재령 7일 및 재령 28일에서 90% 이상

공장하수 및 도시하수 등으로 오염된 하천수, 호소수, 저류수 등에는 황산염, 옥화물, 인산염, 붕산염, 탄산염이나 납, 아연, 동, 주석, 망간 등의 화합물이나 알칼리 등의 무기물 및 당류, 펄프폐액, 부식물질 등의 유기 불순물이 함유되어있는 경우가 있는데, 미량이라도 이와 같은 물질을 함유하는 물을 혼합수로 사용하면 응결경화, 강도의 발현, 체적변화 등에 나쁜 영향을 미칠 수가 있다.

그러므로 본 연구에 사용한 혼합수는 시멘트 모르타르의 품질에 영향을 미치지 않도록 유해물질이 함유되지 않은 상수돛물을 사용하였다.

### 3.6 저장수(담수, 해수)

본 연구에서 담수(Fresh Water)·해수(Sea Water)를 각각 저장수로 사용한 경우 어떠한 물리적 차이가 발생하는지 알아보기 위해 담수는 혼합수와 같은 상수돛물을 사용하였으며, 해수는 전남 무안군 현경면 오류리에 위치한 홀통유원지에서 채취한 시료를 사용하였다.

Table 3.5. Component of sea water

Salts	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgBr <sub>2</sub>	SUM
Percentage (g/kg)	27.21	3.81	1.66	1.26	0.86	0.12	0.08	35.00
Furtherance (%)	77.74	10.89	4.74	3.60	2.46	0.34	0.23	100.00

해수 1kg중에 용해되어 있는 염류의 양을 g으로 표시(g/kg=%)한 것을 염분이라 하며, 전세계 평균치는 35%(동해 34.5%, 남해 34%, 서해 33%미만, 홍해 40%, 사해 200%)이다. [Table 3.5]은 일정성분비의 법칙에 의해 구분되어진 염류의 성분을 나타낸 것이다.

참고로, 우리나라 근해의 염분은 평균 염분(35%)보다 낮으며, 겨울이 강수량이 많은 여름보다 높다. 또한 동해가 황해보다 하천수의 유입이 많기 때문에 높으며, 육지 근처에서 먼 바다로 갈수록 하천수의 영향에 의해 높게 나타난다.





## 4.0 시험편 제작 및 양생

배합 후 믹서(Mixer)된 모르타르를 2층으로 나누어 실린더 몰드나 큐브몰드에 가득 채우고 각 층을 다짐봉으로 25회 다진다. 다짐봉으로 다진 후 몰드를 가볍게 두드려 다짐 구멍이 없어지도록 한다. 그 후 4시간 이후 캡핑하고 24시간 이후에 꺼내어 압축 강도 시험을 할 때까지 양생한 후 각 실험을 실시하였다.

### 4.1 시험체 틀

시험체 성형용 틀은 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법(KS L 5105)에 의해 50mm 입방 시험체의 틀로서 물이 새지 않는 구조이어야 하며, 3개보다 많은 입방체의 칸을 갖지 않고, 2개보다 많은 부분으로 분리되어도 안된다. 틀의 각 부분을 조립하였을 때는 견고하게 되어 있어야 하며, 시멘트 모르타르에 침식되지 않는 경질 금속이어야 한다. 틀의 옆면은 넓어지든가 휘어지는 일이 없도록 견고하여야 한다. 틀 내면은 평면이어야 하고, 새 틀의 허용 범위는 0.025mm, 사용중인 틀은 0.05mm, 상대면 사이의 거리는 새 틀은  $50 \pm 0.13\text{mm}$ , 사용 중인 틀은  $50 \pm 0.50\text{mm}$ 이고, 틀의 높이는 각 입방체 칸을 따로 측정하여 새 틀은  $50^{+0.25}_{-0.13}\text{mm}$  이어야 한다. 서로 인접하는 내면 사이의 각 및 내면과 윗면 또는 밑면 사이의 각은, 그 면의 교선으로부터 사용중인 틀은  $50^{+0.25}_{-0.38}\text{mm}$ , 조금 떨어진 점에서 측정하였을 때  $90 \pm 0.5^\circ$  이어야 한다(A법-KS L 5105). 또는 지름 5cm, 높이 10cm의 실린더 공시체에 의한 방법(B법-KS L 4009) 중 어느 한 방법을 사용한다(B법). 이 조건에 만족하는 시험체 성형용 틀을 [Table 4.1]에 나타내었다.

Table 4.1. The mold

	Material	황동제
	Type	3연형
	Size	50×50×50mm
	Plate	황동판
	Material	황동제
	Type	3연형
	Size	규격 : Φ 50 x 100
	Plate	황동판

#### 4.2 모르타르의 배합

시멘트 모르타르의 배합은 시멘트 : 모래 : 혼합수 = 1 : 2.45 : 0.6의 비율로 배합하였다. 한국산업규격(KS L 5105)에 따라 6개의 시험체를 한 배치로 한 번에 반죽할 건조 재료의 양은 시멘트 510g에 표준사 1,250g이며, 9개의 시험체를 한 배치로 한 번에 반죽할 건조 재료의 양은 시멘트 760g에 표준사 1,862g이다. 혼합수의 양은 포틀랜드 시멘트는 사용 시멘트 무게의 60%로 하였으며, 석탄회(Fly-Ash)는 시멘트 무게의 15%로 혼화하였다.

#### 4.3 온도와 습도

반죽판, 건조 재료, 틀, 밀판 및 혼합 용기 부근의 공기 온도는 20~27.5℃로 유지하여야 하며 혼합수, 습기함, 습기실 및 저장 수조의 물 온도는 23±2℃이어야 한다. 시험실의 상대 습도는 50% 이상이어야 하며, 습기함이나 습기실은 95% 이상의 상대 습도에서 시험체가 저장되도록 제작되어야 한다<sup>16)</sup>.

본 연구에서는 시험편 제작 시 [Table 4.2]와 같이 실내 공기 온도는 22~25℃, 수중온도는 21~25℃로 유지 하였으며, 수중상태에서 양생을 했으므로 상대습도는 100%로 KS L 5105의 조건을 모두 만족하였다.

Table 4.2. Temperature

날 짜	양생일	실내온도(℃)	수중온도(℃)	
			담수	해수
05. 09. 08	1	24.0	24.0	24.5
9. 09	2	25.0	24.5	25.0
9. 10	3	25.0	25.0	25.5
9. 11	4	25.0	25.0	25.5
9. 12	5	24.0	24.5	25.0
9. 13	6	24.0	23.5	24.5
9. 14	7	24.0	23.5	24.5
9. 15	8	23.0	23.0	23.0
9. 16	9	25.0	22.5	23.0
9. 17	10	25.0	23.5	24.0
9. 18	11	24.0	23.5	24.0
9. 19	12	24.0	24.0	24.5
9. 20	13	24.0	24.0	24.5
9. 21	14	25.0	24.0	24.5
9. 22	15	24.0	24.0	24.5
9. 23	16	24.0	24.0	24.5
9. 24	17	24.0	24.0	24.0
9. 25	18	23.0	23.0	23.5
9. 26	19	23.0	22.5	23.0
9. 27	20	23.0	22.0	22.5
9. 28	21	23.0	23.0	21.5
9. 29	22	24.0	22.0	21.0
9. 30	23	23.0	23.5	23.5
05. 10. 01	24	22.0	23.5	23.5
10. 02	25	23.0	23.0	23.0
10. 03	26	23.0	23.0	23.5
10. 04	27	22.0	23.0	23.0
10. 05	28	21.0	22.0	22.0

## 5. 실험방법 및 결과

실험방법으로는 “수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법(KS L 5105)”에 따라 시험체는 저장수에서 꺼낸 직후에 시험을 한다. 모든 시험체는 주어진 시험기간내(24시간±1/2시간, 3일±1시간, 7일±3시간, 28일±12시간)에 시험을 하여야 하며, 만약 시험을 위해서 저장수에서 1개이상의 시험체를 끄집어냈을 때에는 이것을 23±2℃ 온도의 물이 있는 용기에 넣어 완전히 잠기도록 해 두어야하며, 각 시험체는 표면이 건조 상태가 되도록 물기를 닦고, 시험기의 지지 블록(Bearing Block)과 접촉할 면에 붙어 있는 모래알이나 다른 부착물을 없게 한다. 하중 부하의 속도는 나머지 하중을(예측하는 최대하중이 1,350kg보다 작을 때는 전하중) 끊임없이 가하여 시험체가 파괴되도록 하며, 최대하중이 20초 이상 80초 이내에 미치는 속도로 가한다. 압축 강도는 kg/cm<sup>2</sup>로 계산하며, 전 시험체 중에서 평균값보다 10% 이상의 강도차가 있는 시험체는 압축 강도의 계산에 넣지 않는다.

편의상 시료번호를 Fresh Water에 양생한 Ordinary Portland Cement는 PF, Fly-Ash Cement는 FF, Sea Water에 양생한 Ordinary Portland Cement는 PS, Fly-Ash Cement는 FS로 하기로 한다.

### 5.1 압축강도(Uniaxial Compressive Strength)

일축압축강도는 구성광물, 입자의 크기, 공극율, 풍화정도, 절리 빈도 등의 내부적인 요인과 시험편과의 마찰상황, 시험편의 모양, 시험편의 길이와 지름의 비, 크기, 가압속도, 시험편의 상태 등의 여러 요인에 의하여 변화하게 된다. 일축압축강도는 공학적 특성에 있어서 가장 기본적인 인자라 할 수 있다. 그러므로 거의 모든 공학적 암반 분류 및 표준품셈, 각 기관의 분류기준 등에 절리특성과 함께 중요인자로서 작용한다. 일축압축강도는 다른 재료에 비하여 외적인 요인에 의한 영향이 크므로 이에 따른 분산도 크다고 할 수 있다<sup>1,2,22)</sup>

시험편의 위·아래의 면은 평평하게 하며, 편심을 줄이기 위하여 아교 등으로 캡핑(capping)해주고 일축하중을 가해야 한다. 일축압축파괴시의 하중을 P라 하면, 일축압축강도는 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

여기서,  $\sigma_c$  : 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

P : 최대하중(kgf)

A : 공시체의 단면적(cm<sup>2</sup>)

국내의 경우에는 직경에 대한 높이의 비를 1.0으로 하고 있으나 일본의 규정(JIS M 0302)에서는 약 2.0, ASTM(D2938) 또는 ISRM에서는 2.0~3.0을 규정하고 있다. 시험편의 정밀도에 대한 ISRM의 규정은 가압면의 편평도는 0.02mm, 측면과 가압면의 직각도는 0.001rad (0.05mm / 50mm), 측면 길이의 직선형은 전체길이에 대해 0.3mm 이내로 규정되어 있다<sup>10)</sup>.

압축시험기는 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 Server controller system이 부착된 [Fig 5.1]의 국내산 Model No : HST-100T, 용량 100ton의 시험기를 이용하였고, 하중속도는 3kgf/cm<sup>2</sup>/sec로 가압하였다.

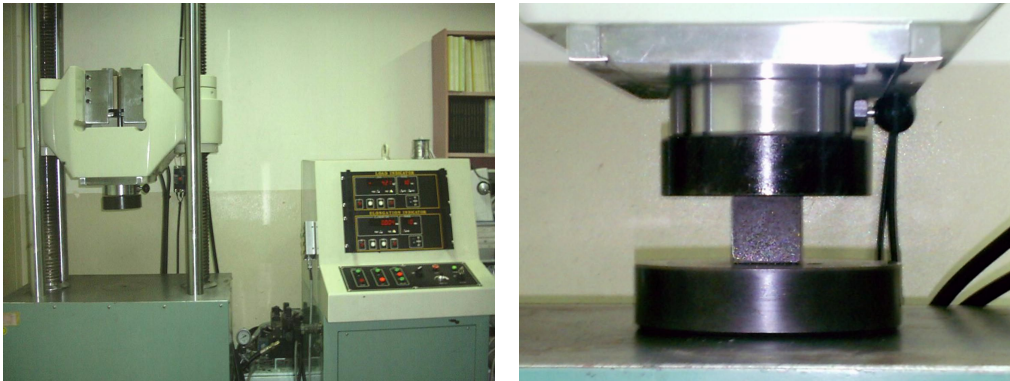


Figure 5.1. Photograph of system for compressive test.

경화 콘크리트의 제반 특성 중 “압축강도 시험은 콘크리트의 압축강도 시험방법 (KS F 2405-’01 : 재령 7일, 14일, 28일 양생)”과 양생 재령을 조금 다르게 1일, 3일, 7일, 28일로 하였으며 시험방법은 동일하게 실시하였다.

본 연구에서는 Fresh암석을 길이/직경의 비가 약 1.0의 비로 성형하였으며, 가압면의 편평

도가 0.02mm 이하가 되도록 연마하였다. 직각도, 측면 직선형 등도 ASTM 및 ISRM 기준을 준수하였다.

시료별로 5회 시험하여 그 값이 평균값과 10%이상 차이가 나는 값들은 제거하고 각 시료당 3개 시료만 평균값을 산출하여 [Table 5.1]과 같은 결과가 나왔으며, [Fig 5.2]와 같은 그래프 양상을 보이고 있다.

Table 5.1. Avg. Result of Uniaxial compressive test

Cement	Curing Water	No.	Width Length(cm)	Height Length (Height-cm)	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
1 Day	Fresh Water	PF-1-1	4.98	5.01	74.2
		PF-1-2	4.97	5.01	73.5
		PF-1-3	4.96	4.98	88.3
		<b>average</b>	<b>4.97</b>	<b>5.00</b>	<b>78.7</b>
		FF-1-1	4.98	4.99	56.1
		FF-1-2	4.96	4.98	57.2
		FF-1-3	4.96	4.98	56.2
		<b>average</b>	<b>4.97</b>	<b>4.98</b>	<b>56.5</b>
3 Day	Fresh Water	PF-1-1	5.12	5.08	181
		PF-1-2	5.06	5.05	174
		PF-1-3	5.09	5.06	173
		<b>average</b>	<b>5.09</b>	<b>5.06</b>	<b>176</b>
		FF-1-1	4.99	4.97	160
		FF-1-2	4.98	4.99	114
		FF-1-3	4.99	4.97	114
		<b>average</b>	<b>4.99</b>	<b>4.98</b>	<b>129.3</b>
	Sea Water	PS-1-1	5.15	5.06	184
		PS-1-2	5.13	5.07	186
		PS-1-3	5.08	5.04	170
		<b>average</b>	<b>5.12</b>	<b>5.06</b>	<b>180</b>
		FS-1-1	5.07	5.13	103.8
		FS-1-2	5.05	5.05	145.6
FS-1-3	5.09	5.09	112.8		
<b>average</b>	<b>5.07</b>	<b>5.09</b>	<b>120.73</b>		

Table 5.1. Continue

Cement	Curing Water	No.	Width Length(cm)	Heigth Length (Heigth-cm)	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
7 Day	Fresh Water	PF-1-1	5.05	5.11	217.01
		PF-1-2	5.01	5.01	212.35
		PF-1-3	5.01	5.02	218.55
		<b>average</b>	<b>5.02</b>	<b>5.05</b>	<b>215.97</b>
		FF-1-1	5.00	5.05	192.8
		FF-1-2	5.01	5.06	179.8
		FF-1-3	5.01	5.02	187.4
	<b>average</b>	<b>5.01</b>	<b>5.04</b>	<b>186.7</b>	
	Sea Water	PS-1-1	5.06	5.06	201.12
		PS-1-2	5.08	5.11	192.35
		PS-1-3	5.01	5.02	188.84
		<b>average</b>	<b>5.05</b>	<b>5.06</b>	<b>194.10</b>
		FS-1-1	5.00	5.01	190.1
		FS-1-2	5.01	5.04	178.3
FS-1-3		5.04	5.03	163.8	
<b>average</b>	<b>5.02</b>	<b>5.03</b>	<b>177.4</b>		
28 Day	Fresh Water	PF-1-1	4.87	4.96	309
		PF-1-2	4.92	4.95	312
		PF-1-3	4.94	4.98	322
		<b>average</b>	<b>4.91</b>	<b>4.96</b>	<b>314.33</b>
		FF-1-1	4.95	5.02	306
		FF-1-2	4.92	5.01	300
		FF-1-3	4.83	4.98	298
	<b>average</b>	<b>4.90</b>	<b>5.00</b>	<b>301.33</b>	
	Sea Water	PS-1-1	4.98	4.95	278
		PS-1-2	4.95	5.01	282
		PS-1-3	4.95	4.99	269
		<b>average</b>	<b>4.96</b>	<b>5.98</b>	<b>267.33</b>
		FS-1-1	5.01	5.08	222
		FS-1-2	5.00	5.01	218
FS-1-3		4.98	4.99	206	
<b>average</b>	<b>5.00</b>	<b>5.03</b>	<b>215.33</b>		

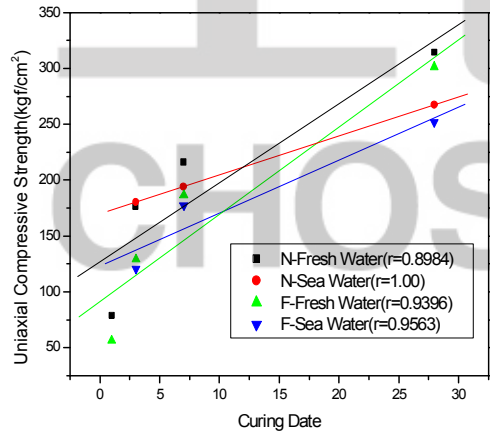
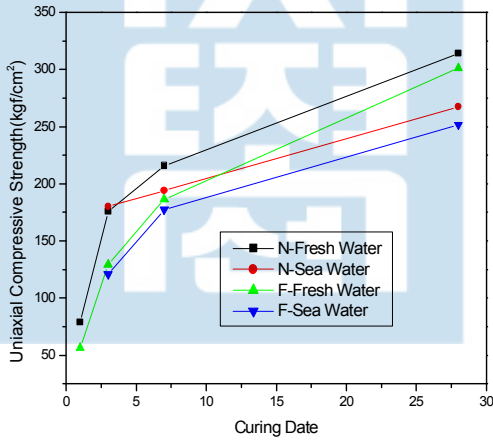


Figure 5.2. Graph of Uniaxial compressive test result.

실험 결과 Ordinary Portland Cement를 Fresh Water에 양생한 경우 [Table 3.2]에서 나타낸 KS L 5201의 재령별 일축압축강도 조건을 모두 충족하였으며, 장기재령으로 갈수록 전체적으로 압축강도의 증진률이 다소 둔화되는 경향을 보였다.

3일 양생까지는 전체적으로 큰 변화가 없었지만 PF를 기준으로 7일 양생에서 PS는 90%, FF는 90%, FS는 82%의 강도를 보였으며, 28일 양생에서는 PS는 85%, FF는 96%, FS는 67%의 강도를 보였다.

전체적으로, Ordinary Portland Cement가 Fly-Ash Cement보다 큰 물성치를 보였으나 강도 증진률은 Fly-Ash Cement가 Ordinary Portland Cement보다 높은 것을 확인할 수 있었다.



## 5.2 인장강도(Brazilian Test)

본 연구에서는 직접인장강도(direct tensile test)의 성형이 어렵고 균등한 하중을 가하기가 매우 어렵기 때문에 시료의 제작 및 하중의 재하 방법이 직접 인장에 비해 용이한 압열인장 시험(Brazilian test)으로 실시하였다.

시료내의 응력은 원판의 중심선에 직각 방향으로 인장 응력이 발생함과 동시에 중심선과 평행한 방향에는 인장 응력의 세배가 되는 압축응력이 발생한다. 일반적인 경우에는 압축강도가 인장강도의 10~20배 정도이고, 직교하여 작용하는 두 방향의 주응력 중에서 한 방향의 주응력에 의한 압축응력이 다른 한 방향의 주응력에 의한 인장응력에 세배를 초과하지 않는 경험적 실험결과에 의해 압열 인장 시험은 그 타당성을 인정받고 있다. 또한 많은 실험에서 얻어진 결과로는 압열인장시험에서 구해진 인장 강도와 직접인장시험에서 구한 인장강도는 거의 일치된다<sup>11,31)</sup>.

Brazilian test는 일축인장시험의 대응이며, 인장강도를 구하기 위한 시험법으로 시편을 옆으로 놓고 압축하중을 가하는 시험이다. 하중을 가할 때 [Fig 5.3]에서와 같이 시편속에서 연직방향의 응력은 당연히 압축응력으로 작용되나, 수평방향으로는 인장응력이 작용되어 이 인장응력을 이용하는 시험법이다.

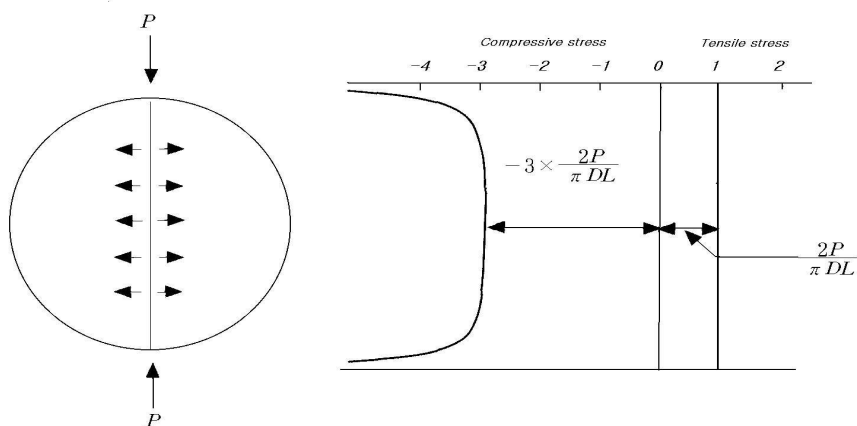


Figure 5.3. Loading direction and stress distribution of Brazilian test.

하중 재하 시 시편의 접촉점이 평탄해지는 것을 방지하기 위해 [Fig 5.4]와 같이 인장시험 전용 재하 장치를 사용하였다(ISRM, 1978b).

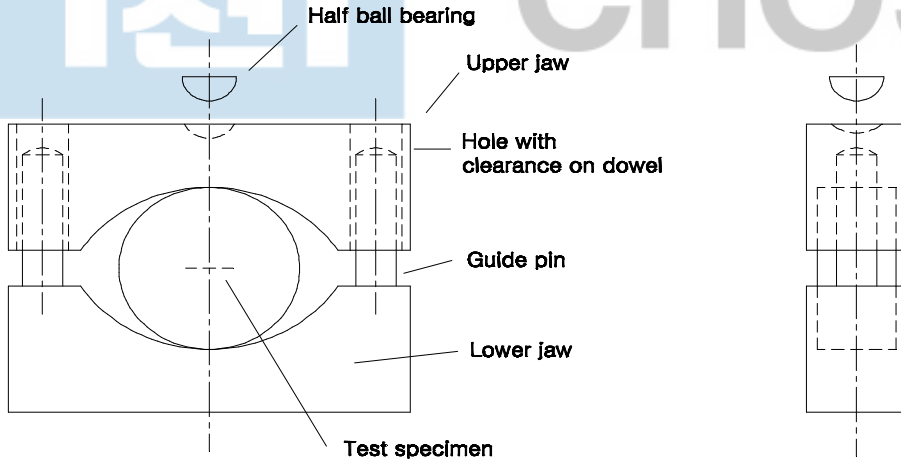


Figure 5.4. Apparatus for Brazilian test.

시료를 등방 균질한 탄성체라고 가정하고 원판(圓板:Disk)의 상하에서 [Fig 5.1]과 같이 집중하중 P를 가했을 때 원판내부의 응력은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi L} \left( \frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2P}{\pi DL} \dots \dots \dots (4-1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi L} \left( \frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2P}{\pi DL} \dots \dots \dots (4-2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2P}{\pi L} \left( \frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{r_2} \right) \dots \dots \dots (4-3)$$

여기서,  $\sigma_x$  : A점에서의 x축방향의 수직응력,

$\sigma_y$  : A점에서의 y축방향의 수직응력,

$\tau_{xy}$  : A점에서의 전단응력,

D : 직경,

L : 두께.

$\sigma_x$ 는 항상(+)로 인장응력이 작용하며,  $\sigma_y$ 는 항상(-)로 압축응력이 작용한다.

$\Theta_1 = \Theta_2 = 0$ 이면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi DL} = 0.636 \frac{P}{DL} \dots\dots\dots (4-4)$$

이 이론에 따라서 압열인장강도는  $S_t = \frac{2P}{\pi DL}$ 로 나타낸다<sup>12,13</sup>.

여기서, P : 하중, D : 직경, L : 두께이다.

본 연구에서는 길이/직경의 비가 0.5가 되도록 시료를 절단한 후, 상하 면을 표면 연삭기를 이용하여 편평도의 오차가 0.25mm 이하가 되도록 연마하여 사용하였으며, 각각의 시료에 대해 3개의 시료를 준비하여 원판형의 암석 시료에 압열인장응력을 가한 후 파괴강도를 측정하였다. 그 결과는 [Table 5.2]와 같으며, [Fig 5.5]와 같은 양상을 보였다.

Table 5.2. Avg. Brazilian test results of the rock.

Cement	Curing Water	No.	Width Length(cm)	Heigth Length (Heigth-cm)	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
1 Day	Fresh Water	PF-2-1	5.60	3.01	46.5
		PF-2-2	5.61	2.85	45.2
		PF-2-3	5.61	2.78	44.7
		<b>average</b>	<b>5.61</b>	<b>2.88</b>	<b>45.47</b>
		FF-2-1	5.54	2.64	40.1
		FF-2-3	5.53	2.81	40.2
		FF-2-5	5.52	2.78	40.2
		<b>average</b>	<b>5.53</b>	<b>2.74</b>	<b>40.17</b>
3 Day	Fresh Water	PF-2-2	5.58	3.08	71
		PF-2-5	5.60	3.03	72
		PF-2-6	5.60	2.86	73
		<b>average</b>	<b>5.59</b>	<b>2.99</b>	<b>72.00</b>
		FF-2-1	5.56	2.83	64.6
		FF-2-2	5.56	2.67	65.6
		FF-2-4	5.56	2.68	67.0
		<b>average</b>	<b>5.56</b>	<b>2.73</b>	<b>71.67</b>

Table 5.2. Continue

Cement	Curing Water	No.	Width Length(cm)	Heigth Length (Heigth-cm)	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
3 Day	Sea Water	PS-2-1	5.59	3.05	72
		PS-2-2	5.64	3.16	71
		PS-2-3	5.60	3.06	72
		<b>average</b>	<b>5.61</b>	<b>3.09</b>	<b>65.73</b>
		FS-2-1	5.58	2.86	64.0
		FS-2-2	5.56	3.20	62.0
		FS-2-3	5.56	3.00	60.25
	<b>average</b>	<b>5.57</b>	<b>2.91</b>	<b>58.33</b>	
7 Day	Fresh Water	PF-2-1	5.59	3.10	84.86
		PF-2-2	5.58	3.04	82.19
		PF-2-3	5.59	3.13	84.32
		<b>average</b>	<b>5.59</b>	<b>3.09</b>	<b>83.79</b>
		FF-2-1	5.55	2.79	68.90
		FF-2-2	5.56	2.85	60.67
		FF-2-3	5.58	2.81	65.60
		<b>average</b>	<b>5.56</b>	<b>2.82</b>	<b>73.08</b>
	Sea Water	NS-2-1	5.59	3.00	70.29
		NS-2-2	5.62	2.78	71.72
		NS-2-3	5.60	3.05	79.39
		<b>average</b>	<b>5.60</b>	<b>2.93</b>	<b>65.06</b>
		FS-2-1	5.55	2.97	56.0
		FS-2-2	5.60	2.97	59.0
FS-2-3		5.61	2.70	60.5	
	<b>average</b>	<b>5.59</b>	<b>2.88</b>	<b>56.47</b>	
28 Day	Fresh Water	PF-2-1	5.59	3.09	89.00
		PF-2-2	5.60	3.00	88.00
		PF-2-3	5.60	3.01	86.00
		<b>average</b>	<b>5.60</b>	<b>3.03</b>	<b>87.67</b>
		FF-2-1	5.60	2.83	72.00
		FF-2-2	5.56	3.00	73.00
		FF-2-3	5.57	3.12	75.00
		<b>average</b>	<b>5.58</b>	<b>2.98</b>	<b>82.67</b>
	Sea Water	PS-2-1	5.63	3.13	79.00
		PS-2-2	5.62	3.02	78.00
		PS-2-3	5.60	3.05	76.00
		<b>average</b>	<b>5.62</b>	<b>3.07</b>	<b>73.33</b>
		FS-2-1	5.58	3.00	62.00
		FS-2-2	5.57	3.02	63.00
FS-2-3		5.58	3.06	63.00	
	<b>average</b>	<b>5.58</b>	<b>3.03</b>	<b>67.33</b>	

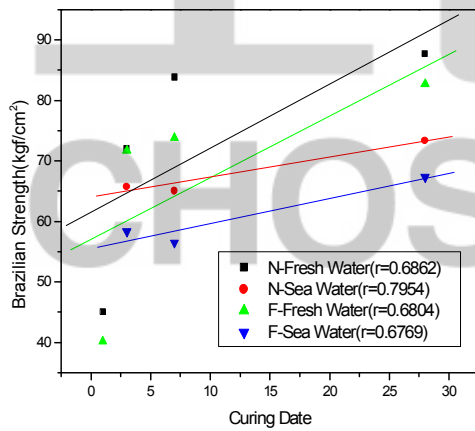
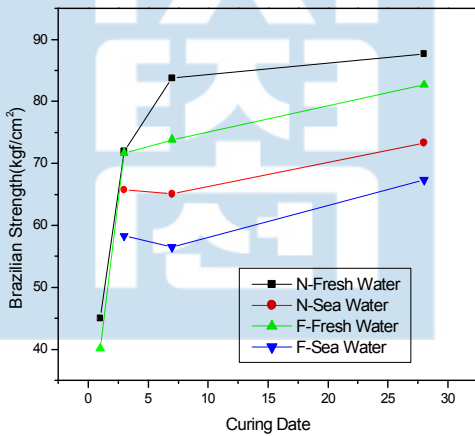


Figure 5.5. Graph of Brazilian test results.

실험 결과 Ordinary Portland Cement는 3일 양생까지는 큰 변화가 없었지만 PF를 기준으로 7일 양생의 PS는 78%, FF는 87%, FS는 67%, 28일 양생에서 PS는 84%, FF는 94%, FS는 77% 88%로 강도가 감소하였다.

Fly-Ash Cement의 7일 양생 물성치가 감소하는데 이는 Fly-Ash 혼화량이 Cement의 15%로 그 양이 많아 초기강도값에 영향을 미친 것으로 추정된다. 그 외에는 일축압축강도와 비슷한 결과를 보이고 있다.

### 5.3 비 중, 흡수율, 공극률(Specific Gravity, Absorptance, Prosimy)

비중은 겉보기 비중과 진비중으로 구분하는데, 일반적으로 시험편의 무게와 체적으로 구하는 겉보기 비중을 많이 이용하고 있다.

측정하는 순서는 먼저 버니어캘리퍼스를 사용하여 시료(일축압축 시험용)의 치수를 0.05mm 이내의 오차로 측정한 후 시료를 오븐(oven)에서 건조시킨다. 그 후 데시케이터 안에서 상온으로 건조시킨 후 전자저울을 사용하여 측정된 시료의 질량을 측정된 부피로 나누어 구한다. 진공오븐 사용시에는 800Pa보다 낮은 진공상태를 적어도 1시간 이상 유지해야 하며, 105℃ 온도로 적어도 24시간 동안 3℃ 내외의 오차로 유지해야 하며, 4시간 간격으로 측정하여 0.1% 이내의 변화를 보일 때 건조중량을 측정한다<sup>23)</sup>.

본 실험에서 비중을 측정하는데 사용된 오븐(oven)은 vaccum 과 heating을 동시에 할 수 있는 오븐(Figure oven)으로 압력계와 온도계가 부착되어 있는 oven을 사용하였으며, 저울은 METTLER TOLEDO 사의 AG Balance를 사용하였다[Fig 5.6].



Figure 5.6. Photograph of AG Balance

흡수율은 시료의 광물입자간의 공극, 광물의 벽개면, 광물 자체의 미세 균열 등에 의해 흡수되는 모든 수분 함량이 측정되므로, 동일한 시료에 대한 풍화도의 지표로서 널리 활용되며 시료의 역학적 성질에 미치는 특성 중 가장 고려되어야 할 기초 물성이다.

공극률은 시료 전체의 체적에 대한 공극의 비를 백분율로 표시한 것이며, 이는 화학적 풍화에 영향을 주는 매질에 대한 이동 통로의 다소를 나타내므로 풍화와 가장 밀접한 관계를

갖는 물리적 특성이다.

시험체의 절건상태를 유지하기 위해 100±5℃의 건조기에서 일정한 무게가 될 때까지 건조시킨 후 절건중량(B)를 측정 한 후 물 속에 다시 침수시켜 흡수량의 변화를 관찰하고 그 중량(A)를 측정하였다. 흡수율은 다음 식에 따라 계산하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = (A-B)/B \times 100$$

A : 물에 침수시킨 후 시험체 무게(g)

B : 건조기에서 건조시킨 후 시험체 무게(g)

비중, 공극률 시험횟수는 각 시료당 3~5회를 실시하여 평균처리 하였으며, 시험절차는 국제 암반역학회 표준시험규정(Suggested Methods of ISRM), 미국표준시험법(ASTM)에 준하였다. 시료의 비중 측정은 METTLER TOLEDO 사의 MANUAL을 참고하였으며, 흡수율 시험은 각 재령별로 석재의 흡수율 및 비중 시험방법(KS F 2518-'80)에 의해 실시하였다. 그 결과는 [Table 5.3]과 같으며, 그 양상은 [Fig 5.7~5.10]과 같다.

Table 5.3. Avg. Result of Specific gravity, Absorption and Porosity.

Curing Day	Indentiication	(W1)	(W2)	(W3)	(W4)	Specific Gravity (Gs)	water content(W) (W1-W2)/W2	Absorptance (W3-W2)/W2 ×100(%)	Prosioty(n) (W3-W2)/(W3-W4) ×100(%)
1 Day	PF-4-1	42.102	37.004	43.654	22.891	2.082	0.138	17.971	32.028
	PF-4-2	46.062	44.015	51.575	27.068	2.082	0.147	17.176	30.848
	PF-4-3	50.491	39.933	46.920	24.465	2.079	0.264	17.497	31.116
	<b>average</b>	<b>46.218</b>	<b>40.317</b>	<b>47.383</b>	<b>24.808</b>	<b>2.081</b>	<b>0.183</b>	<b>17.548</b>	<b>31.331</b>
	FF-4-1	47.570	44.862	47.958	25.131	2.080	0.150	15.817	31.086
	FF-4-2	56.462	48.195	56.575	29.639	2.090	0.182	17.388	31.111
	FF-4-3	48.617	44.304	49.559	26.153	2.090	0.142	15.924	30.402
	<b>average</b>	<b>47.550</b>	<b>45.787</b>	<b>51.364</b>	<b>26.974</b>	<b>2.087</b>	<b>0.158</b>	<b>16.376</b>	<b>30.866</b>
3 Day	PF-4-1	69.589	60.807	69.724	36.536	2.107	0.144	14.664	26.868
	PF-4-2	66.683	58.685	66.904	35.116	2.097	0.136	14.005	25.856
	PF-4-3	65.076	57.222	65.297	34.270	2.207	0.137	14.111	26.026
	<b>average</b>	<b>67.116</b>	<b>58.905</b>	<b>67.308</b>	<b>35.307</b>	<b>2.107</b>	<b>0.139</b>	<b>14.260</b>	<b>26.25</b>
	FF-4-1	48.935	42.972	48.885	26.015	2.112	0.139	13.760	25.850
	FF-4-2	46.910	41.324	47.018	25.040	2.130	0.135	13.780	25.910
	FF-4-3	42.553	37.782	42.926	22.884	2.119	0.126	11.160	22.070
	<b>average</b>	<b>46.133</b>	<b>40.683</b>	<b>46.276</b>	<b>24.646</b>	<b>2.120</b>	<b>0.133</b>	<b>12.900</b>	<b>24.610</b>

Table 5.3. Continue

Curing Day	Indentiication	(W1)	(W2)	(W3)	(W4)	Specific Gravity (Gs)	water content(W) (W1-W2)/W2	Absorptance (W3-W2)/W2 ×100(%)	Prosiy(n) (W3-W2)/(W3-W4) ×100(%)
3 Day	PS-4-1	51.459	44.868	51.843	27.384	2.105	0.147	15.546	28.517
	PS-4-2	60.425	53.104	61.135	32.509	2.109	0.138	15.123	28.055
	PS-4-3	62.125	53.926	62.221	32.944	2.170	0.152	15.382	28.333
	<b>average</b>	<b>58.003</b>	<b>50.633</b>	<b>58.400</b>	<b>30.946</b>	<b>2.128</b>	<b>0.147</b>	<b>15.350</b>	<b>28.302</b>
	FS-4-1	58.409	51.312	58.812	31.130	2.132	0.138	14.62	27.09
	FS-4-2	49.251	43.671	49.765	26.453	2.139	0.128	13.95	26.14
	FS-4-3	48.815	42.989	48.832	26.052	2.134	0.136	13.59	25.65
<b>average</b>	<b>52.158</b>	<b>45.990</b>	<b>52.470</b>	<b>27.878</b>	<b>2.135</b>	<b>0.134</b>	<b>14.053</b>	<b>26.293</b>	
7 Day	PF-4-1	53.378	47.206	54.171	28.511	2.131	0.131	14.754	27.143
	PF-4-2	53.733	47.179	53.758	28.480	2.132	0.139	13.945	26.027
	PF-4-3	63.188	55.896	63.414	33.815	2.135	0.130	13.450	25.400
	PF-4-4	48.287	43.070	48.621	25.782	2.121	0.121	12.888	24.305
	<b>average</b>	<b>54.647</b>	<b>48.329</b>	<b>54.991</b>	<b>29.147</b>	<b>2.130</b>	<b>0.130</b>	<b>13.759</b>	<b>25.720</b>
	FF-4-1	53.361	47.735	53.284	28.585	2.130	0.118	11.625	22.466
	FF-4-2	51.823	46.472	51.877	27.673	2.129	0.115	11.631	22.331
	FF-4-3	50.286	44.757	50.300	26.745	2.131	0.124	12.385	23.532
	FF-4-4	46.604	41.474	46.667	24.628	2.125	0.124	12.521	23.563
	<b>average</b>	<b>50.520</b>	<b>45.113</b>	<b>50.532</b>	<b>26.908</b>	<b>2.128</b>	<b>0.120</b>	<b>12.041</b>	<b>22.973</b>
	PS-4-1	46.461	41.769	46.569	25.063	2.165	0.112	11.492	22.319
	PS-4-2	48.986	43.742	49.070	26.001	2.125	0.120	12.181	23.096
	PS-4-3	51.079	45.931	51.191	27.218	2.133	0.112	11.452	21.941
	PS-4-4	44.513	39.522	44.583	23.388	2.101	0.126	12.806	23.878
	<b>average</b>	<b>47.76</b>	<b>42.741</b>	<b>47.853</b>	<b>25.418</b>	<b>2.131</b>	<b>0.117</b>	<b>11.960</b>	<b>22.786</b>
	FS-4-1	53.865	48.016	54.673	29.200	2.128	0.122	13.864	26.134
	FS-4-2	54.382	48.042	54.852	28.998	2.119	0.132	14.175	26.340
FS-4-3	48.538	43.206	49.028	26.277	2.123	0.123	13.475	25.590	
FS-4-4	63.606	56.198	63.098	34.108	2.137	0.132	12.278	23.801	
<b>average</b>	<b>55.098</b>	<b>48.866</b>	<b>55.413</b>	<b>29.646</b>	<b>2.127</b>	<b>0.127</b>	<b>13.448</b>	<b>25.466</b>	
28 Day	PF-4-1	47.270	41.936	47.287	24.835	2.152	0.127	12.760	23.833
	PF-4-2	54.413	48.648	54.505	28.847	2.139	0.119	12.040	22.827
	PF-4-3	50.400	45.052	50.825	25.154	2.118	0.119	12.814	22.488
	<b>average</b>	<b>50.694</b>	<b>45.212</b>	<b>49.206</b>	<b>26.279</b>	<b>2.136</b>	<b>0.122</b>	<b>12.538</b>	<b>23.049</b>
	FF-4-1	56.603	50.367	56.627	29.958	2.121	0.124	12.429	23.473
	FF-4-2	54.406	48.524	54.418	29.029	2.139	0.121	12.147	23.215
	FF-4-3	52.408	46.522	52.416	27.002	2.129	0.127	12.670	23.192
<b>average</b>	<b>54.472</b>	<b>48.471</b>	<b>54.487</b>	<b>28.663</b>	<b>2.130</b>	<b>0.124</b>	<b>12.392</b>	<b>23.293</b>	



Table 5.3. Continue

28 Day	PS-4-1	60.190	53.694	60.207	30.698	2.142	0.121	12.130	22.071
	PS-4-2	58.802	52.260	58.813	31.594	2.139	0.125	12.540	24.075
	PS-4-3	54.801	48.259	54.812	27.605	2.127	0.160	15.982	27.761
	<b>average</b>	<b>57.931</b>	<b>51.155</b>	<b>57.944</b>	<b>29.966</b>	<b>2.136</b>	<b>0.135</b>	<b>13.551</b>	<b>24.636</b>
	FS-4-1	47.711	42.541	47.673	25.511	2.146	0.122	12.064	23.157
	FS-4-2	58.371	51.951	58.348	31.071	2.130	0.124	12.314	23.452
	FS-4-3	50.381	43.921	50.391	23.064	2.151	0.147	14.731	23.676
<b>average</b>	<b>52.154</b>	<b>46.138</b>	<b>52.137</b>	<b>26.549</b>	<b>2.142</b>	<b>0.131</b>	<b>13.036</b>	<b>23.428</b>	

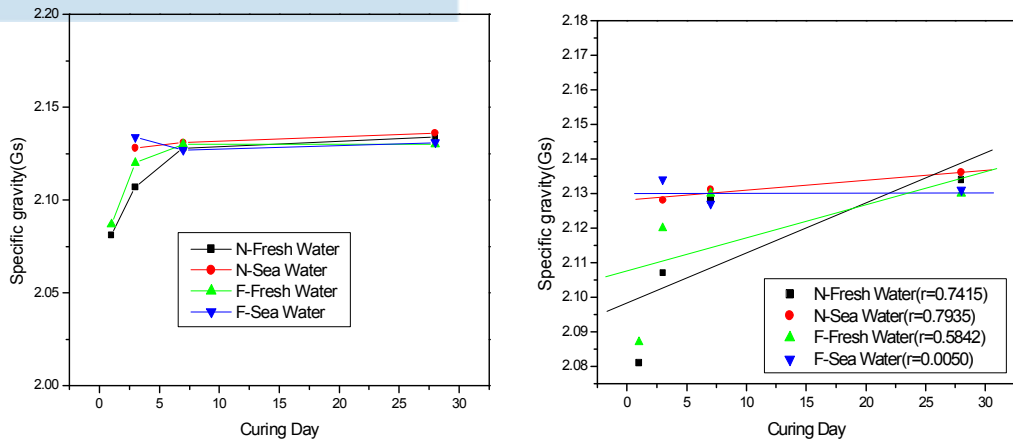


Figure 5.7. Graph of Specific gravity results.

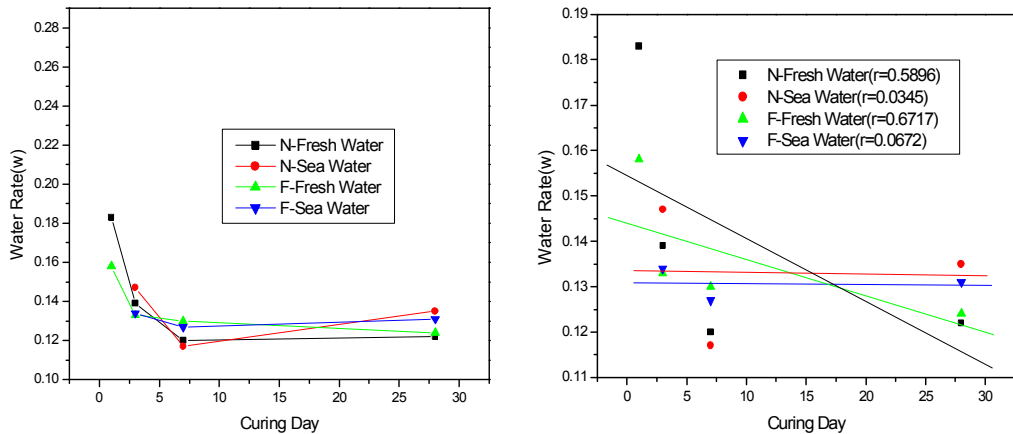


Figure 5.8. Graph of Water content of ratio of dry weight results.

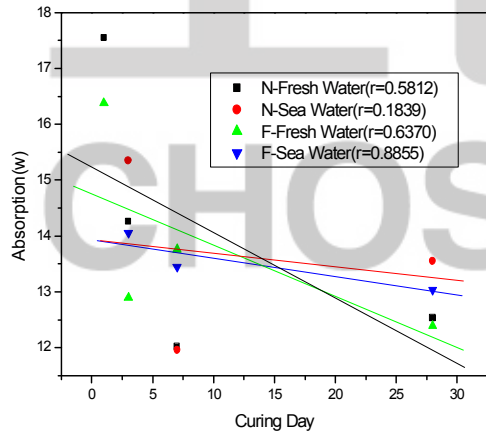
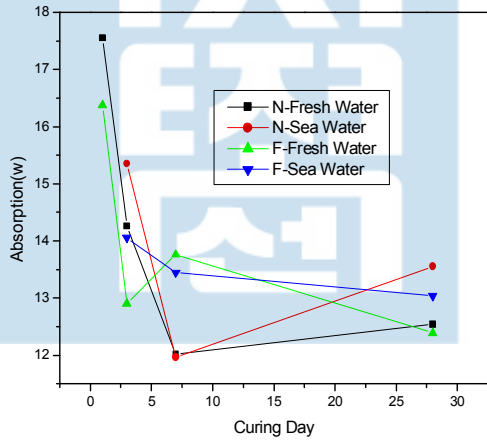


Figure 5.9. Graph of Absorption results.

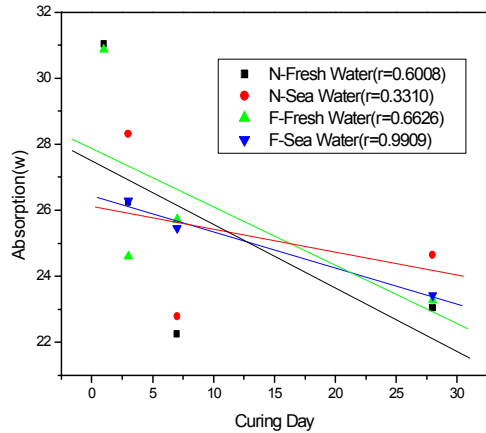
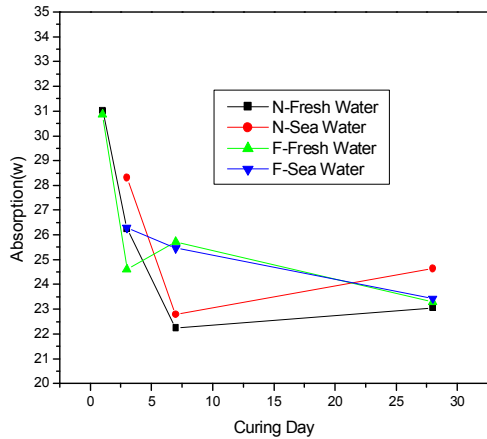


Figure 5.10. Graph of Porosity results.

실험 결과 비중, 흡수율, 공극률, 흡수율 모두 큰 차이를 보이진 않았으나 PS는 다른 시료보다 급격한 변화양상을 보였다. 이는 Ordinary Portland Cement가 다른 조건에 비해 해수의 황화물 및 염화물에 영향을 많이 받은 것으로 사료된다. 초기재령에는 함수비, 흡수율, 공극률이 Fresh Water에서 Ordinary Portland Cement가 더 양호한 변화양상을 보이나 장기재령으로 갈수록 Fly-Ash Cement가 더 양호한 변화양상을 보이고 있다. 이는

Fly-Ash Cement의 장점 중 수밀성 및 유동성 때문에 함수비, 흡수율, 공극률을 작게 만들기 때문인 것으로 사료된다.

#### 5.4 직접전단시험(Direct Shear Strength test)

직접전단시험은 불연속면의 전단특성을 이해하기 위한 시험이며, 최대전단강도(Peak Shear Strength)와 잔류전단강도(Residual Shear Strength)를 구하여 점착력(Cohesion)과 마찰각(Friction Angle) 등의 절리특성 값들을 구하는 것이 목적이다. 전단강도와 함께 측정된 전단변위, 수직변위값을 이용하여 전단응력-전단변위, 수직변위-전단변위, 전단응력-수직응력의 그래프들을 그릴 수 있다. 여기서 전단응력-전단변위와 수직변위-전단변위는 매 시험마다 구할 수 있으며, 전단응력-수직응력은 현장마다 각각의 수직응력에 대해 구하여 한 개의 그래프를 그릴 수 있다. 여기에서 구한 그래프로부터 겉보기 점착강도, 최대마찰각, 잔류마찰각 등을 구할 수 있고 이밖에 전단 강성  $K_s$ 도 계산할 수 있다.

직접 전단 시험의 일반적 성질은 다음과 같다<sup>20,30</sup>.

- 수직응력이 커질수록 전단강도는 증가한다.
- 절리면의 거칠기가 커지면 전단강도는 증가한다.
- 수직응력이 커지면 전단 강성은 증가한다.
- 절리면의 거칠기가 커지면 전단 강성은 증가한다.

마찰각은 어느 고체면에 놓인 물체에 수직력  $N$ 이 작용하고 있을 때 전단력  $T$ 를 서서히 증가시키면 어느 값에서 마찰력에 의해 움직이기 시작하는데 이때의 합력  $F$ 와  $N$ 과의 이루는 각을 의미한다. 점착력은 Coulomb의 파괴기준에 대한  $c$ , 연직응력에 관계없는 전단강도 성분이다. 점착력  $c$ 는 내부마찰각  $\phi$ 와 마찬가지로 동일 시료라도 전단시험 방법, 특히 배수조건에 따라 달라진다. 잔류 전단강도는 점성토에 대한 전단시험에서 초기에 최대전단강도  $S_f$ 에 도달한 후 변형 연화에 의하여 큰 변형 후 보다 낮은 잔류치  $S_r$ 에 도달한다. 후자의 값은 전단면상의 활동에 대한 저항에 해당한다. 즉 최대저항력을 나타낸 후에도 변형이 진행되면서 거의 일정한 저항력을 나타내는 저항응력이며, 전단변형은 변형 전에 직사각형이 있었던 미소한

영역은 변형한 후 일반적으로 평행사변형으로 되는데. 이때 각 정점의 각도의 변화를 전단변형이라고 한다.

본 논문에서는 시멘트 모르타르가 전단응력을 받았을 경우 어떠한 물리적 특성이 나타나는지 알아보기 위해 암석의 절리면 전단시험의 시험 항목 중 일부(내부마찰각, 점착력)만을 수행하였으며, 직접전단시험으로 파괴 후에 발생될 잔류전단강도는 고려하지 않고 최대전단강도만을 적용하였다. 측정장비는 실제 작용하중과 유사하며, Load Cell은 연직, 수평이 각각 10ton, 전단시 상부 Block의 회전이나 기울어짐이 없이 수평으로만 이동하는 M&T사의 Direct Shear Apparatus(Fig 5.11)를 사용하였다.

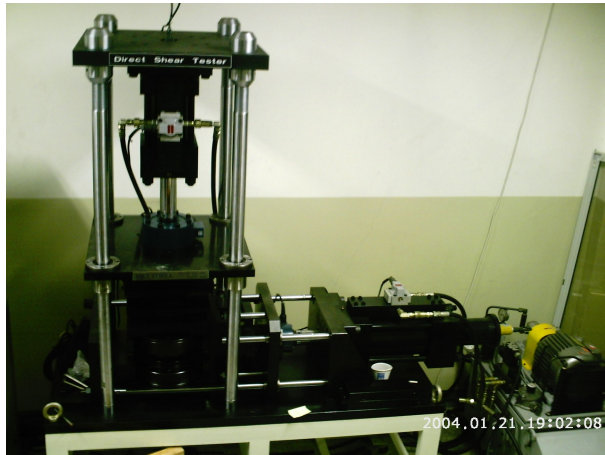


Figure 5.11. Direct Shear Apparatus

직접전단시험은 각 시료당 수직응력( $\sigma = 3\text{kgf/cm}^2, 6\text{kgf/cm}^2, 9\text{kgf/cm}^2$ )을 일정하게 달리하여 3개씩 실험하였으며 [Table 5.4]와 같은 결과를 보였다.

Table 5.4. Avg. Result of Direct Shear Test.

Curing	No.	Width Length(cm)	Height (Height-cm)	Peak Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Friction Angle(%)	Cohesion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Remarks
1 Day	PF-3-1	5.57	9.00	477.47	88	384.20	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-2	5.57	9.00	521.89			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-3	5.57	9.00	639.59			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-1	5.57	9.00	490.87	86	453.33	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-2	5.57	9.00	570.08			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-3	5.57	9.00	586.78			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
3 Day	PF-3-1	5.59	8.87	317.29	88	189.43	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-2	5.57	8.69	354.48			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-3	5.61	8.73	527.67			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-1	5.57	8.90	279.452	88	174.62	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-2	5.57	8.92	378.525			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-3	5.57	8.94	486.243			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-1	5.61	8.54	185.19	86	142.18	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-2	5.64	8.55	216.05			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-3	5.60	8.86	265.14			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	FS-3-1	5.57	9.0	102.362	88	29.42	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FS-3-2	5.57	8.5	182.071			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FS-3-3	5.57	8.7	251.629			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
7 Day	PF-3-1	5.57	9.00	632.92	85	593.34	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-2	5.57	9.00	652.83			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-3	5.57	9.00	702.24			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-1	5.57	9.00	362.830	88	298.63	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-2	5.57	9.00	463.874			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-3	5.57	9.00	509.650			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-1	5.57	9.00	353.89	89	225.77	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-2	5.57	9.00	683.13			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-3	5.57	9.00	710.69			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$

Table 5.4. Continue

Curing	No.	Width Length(cm)	Height length (Height-cm)	Peak Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Friction Angle(%)	Cohesion (kgf/cm <sup>2</sup> )	Remarks
7 Day	FS-3-1	5.57	9.00	324.476	88	259.12	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FS-3-2	5.57	9.00	484.083			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FS-3-3	5.57	9.00	502.318			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
28 Day	PF-3-1	5.57	9.2	626.89	87	584.06	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-2	5.58	9.3	740.37			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PF-3-3	5.57	9.2	747.88			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-1	5.57	9.1	293.97	89	103.44	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-2	5.58	9.0	586.43			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	FF-3-3	5.56	9.0	726.00			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-1	5.57	9.0	679.70	85	643.45	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-2	5.55	9.2	714.84			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$
	PS-3-3	5.57	9.5	751.64			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$
FS-3-1	5.57	9.1	671.99	87	602.68	$\sigma=3\text{kgf/cm}^2$	
FS-3-2	5.58	9.3	710.88			$\sigma=6\text{kgf/cm}^2$	
FS-3-3	5.57	9.3	795.40			$\sigma=9\text{kgf/cm}^2$	

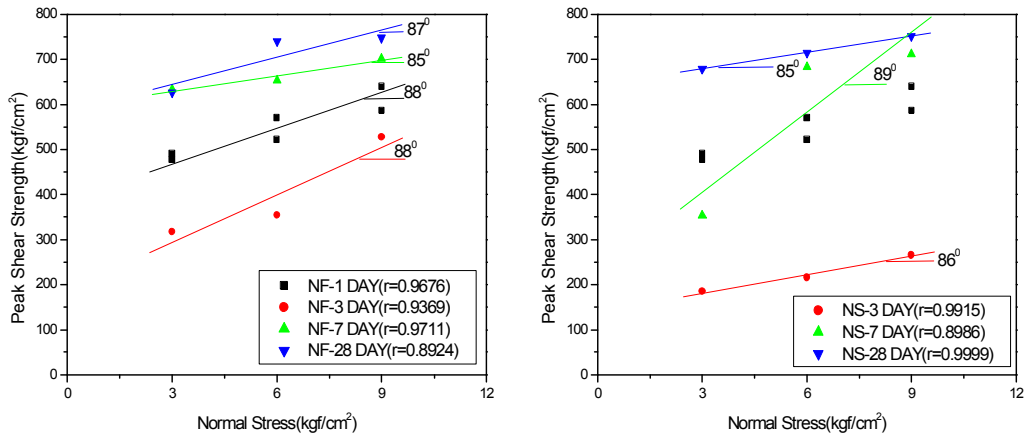


Figure 5.12. Graph of NF and NS Sample Friction Angle results

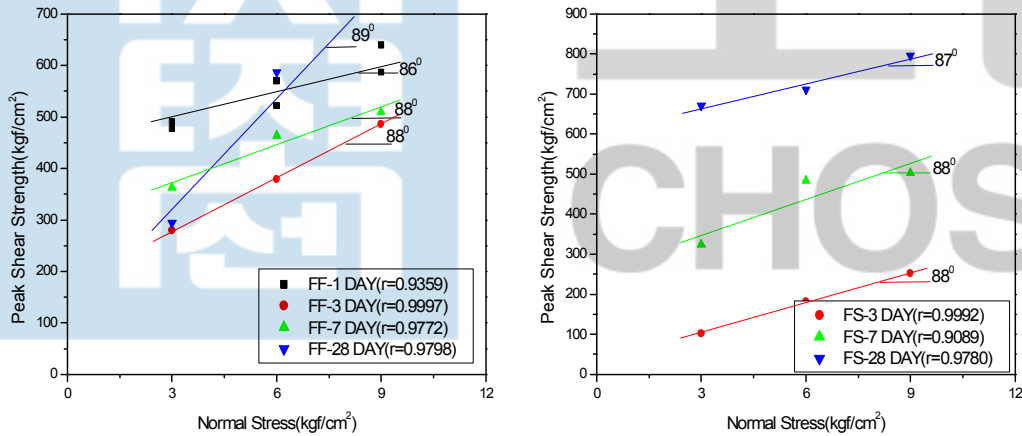


Figure 5.13. Graph of FF and FS Sample Friction Angle results

내부마찰각(Friction Angle)은 직접전단시 회전식 직접전단과 달리 직각 방향에서 전단력을 가했기 때문에 [Fig 5.12~5.13]과 같이 전체적으로 90°에 가까운 양상을 보였으며, 점착력(Cohesion)은 암석에 비해 29.42~593.34까지 아주 큰 값을 보였다. 이는 Cement mortar가 수중양생을 하여 함수비가 높기 때문일 것으로 사료된다.

실험결과 PF는 대체적으로 일정한 변화양상을 보이며, PS는 7일 양생시 급격한 변화를 보이다가 28일 양생시에는 다시 일정한 변화양상을 보이고 있다. FF는 대체적으로 일정하던 변화가 28일 양생시에는 급격한 변화양상을 보이고 있으며, FS는 매우 일정한 변화양상을 보이고 있어 Fly-Ash Cement가 전체 시료 중 Sea Water에 적용시 가장 안정되고 균일한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 5.5 쇼어경도(Shore Scleroscope Hardness Test)

압입경도 측정은 다이아몬드 각추를 재료에 압입하여, 재료에 영구변형을 일으켜 하중과 압입 깊이로부터 재료의 굳기를 구하는 것으로서 암석과 같은 굳고 변형이 어려운 재료에 적당한 시험법이다. 압입경도의 일종으로서 쇼어 경도(Shore Scleroscope Hardness Test)는 광물의 경도측정에 이용하는 것으로서 경도는 광물 입자에서 얻은 임의의 값의 평균값으로 얻어진다<sup>25)</sup>. 본 연구에서는 해수, 담수의 염화물로 인한 변질 진행 상황과 이로 인한 경도의 변화 상황을 연구하기 위하여 시행하였다. 실험장비는 Model Dtype으로 시험기나 그 시험방법 등이 JIS규격에 준거하고 있는 [Fig 5.14]의 Shore Hardness Tester를 사용하였다.



Figure 5.14. Photograph of Shore Scleroscope Hardness tester.

본 연구에서는 양생일별로 쇼어 경도를 측정하였으며, 각 시료에서 간접인장 시험편과 같은 방법으로 가공하여 측정하였다.

각 시료별로 3개의 시료를 측정하였고, 시료 당 20점을 측정하였으며, 이들을 평균 처리하여 전체 시료별 경도를 구한 후 평균값을 취합하여 [Table 5.5]에 나타내었으며, 이렇게 취합된 쇼어 경도 측정치는 쇼어 경도와 압축강도와의 상관관계표인 [Fig 5.15]를 통하여 일축압축강도를 추정 할 수 있으며, 그 양상은 [Fig 5.16]과 같다.



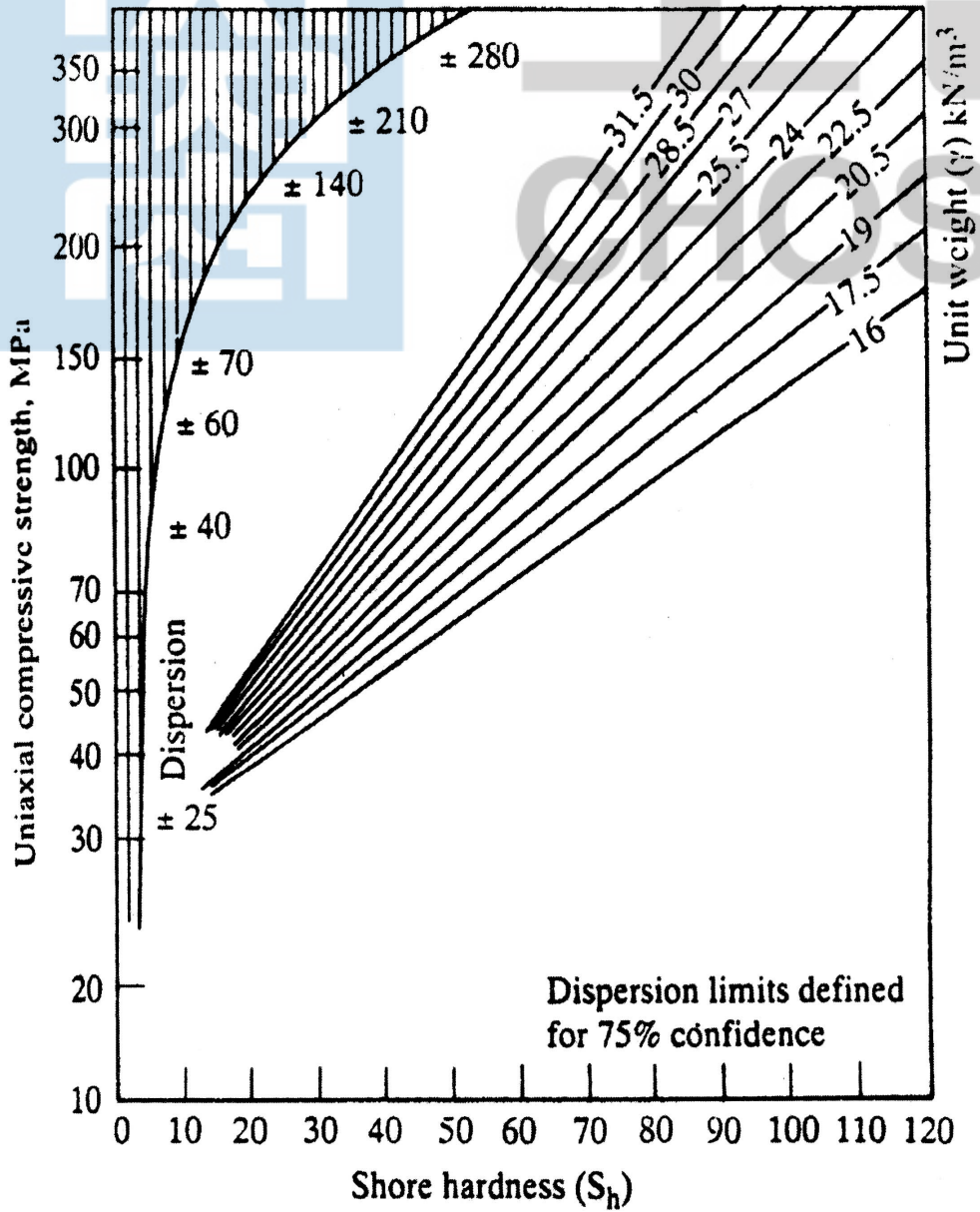


Figure 5.15. Relationship between Shore hardness value and uniaxial compressive strength.

Table 5.5. Avg. Shore hardness results.

	Number Identification	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Average
		1 Day	PF-5-1	2	2	5	3	3	1	1	1	2	4	5	3	1	1	1	1	1	2	4
PF-5-2	4		2	1	1	2	2	4	1	2	5	4	1	3	1	1	4	1	1	4	1	2.25
PF-5-3	3		2	1	2	5	6	2	3	1	1	2	3	1	2	3	2	1	2	1	2	2.25
<b>average</b>																						<b>2.23</b>
FF-5-1	3		1	2	3	1	3	1	2	1	3	1	1	2	2	1	1	2	1	3	2	1.80
FF-5-2	1		1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1	4	1	1.45
FF-5-3	1		1	2	3	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1.40
<b>average</b>																						<b>1.55</b>
3 Day	PF-5-1	4	4	4	4	3	7	5	3	3	3	3	3	4	4	5	3	4	4	8	3	4.00
	PF-5-2	3	3	5	4	6	3	4	3	7	9	8	6	2	3	3	2	3	4	3	4	4.25
	PF-5-3	3	3	7	3	5	7	2	2	2	2	3	5	8	8	12	7	3	3	13	2	5.00
	<b>average</b>																					<b>4.42</b>
	FF-5-1	2	2	6	4	4	4	8	4	3	7	3	3	7	3	7	6	5	3	4	9	4.70
	FF-5-2	2	3	2	3	2	4	2	3	4	2	3	3	6	3	7	3	6	3	2	8	3.55
	FF-5-3	3	7	4	2	2	3	6	6	6	3	8	6	2	4	2	1	2	3	2	3	3.75
	<b>average</b>																					<b>4.00</b>
	PS-5-1	3	3	5	9	5	5	6	9	5	2	4	4	3	7	6	7	4	6	9	4	5.30
	PS-5-2	4	3	10	3	8	10	3	5	6	3	8	10	10	11	2	3	5	3	10	4	6.05
	PS-5-3	12	11	5	6	3	7	4	9	7	7	10	3	5	3	3	6	11	4	4	3	6.15
	<b>average</b>																					<b>5.83</b>
	FS-5-1	3	4	8	4	2	3	5	1	3	3	5	9	4	9	2	7	7	5	4	3	4.55
	FS-5-2	6	4	5	2	3	4	6	4	3	3	2	3	6	6	8	5	7	9	3	2	4.55
FS-5-3	4	3	5	3	4	6	4	2	6	3	2	3	3	8	5	2	5	3	8	4	4.15	
<b>average</b>																					<b>4.42</b>	
7 Day	PF-5-1	5	6	7	8	7	9	10	7	9	11	9	7	8	9	8	8	7	6	6	7	7.67
	PF-5-2	3	5	12	14	6	3	1	3	11	8	11	6	9	10	6	11	9	8	10	9	7.72
	PF-5-3	4	7	6	6	5	8	11	9	10	7	11	10	10	8	9	7	5	6	7	6	7.60
	<b>average</b>																					<b>7.66</b>
	FF-5-1	2	9	7	3	6	5	2	3	2	8	9	4	5	2	3	2	8	9	7	4	5.00
	FF-5-2	2	3	7	4	4	7	5	2	5	7	7	5	4	7	8	9	4	8	5	6	5.45
	FF-5-3	5	3	3	9	8	6	7	5	9	8	7	6	8	9	5	7	3	4	5	9	6.30
	<b>average</b>																					<b>5.58</b>
	PS-5-1	5	4	3	7	2	2	5	5	12	15	7	16	4	4	3	11	5	6	7	9	6.60
	PS-5-2	3	4	7	4	9	10	6	4	9	9	7	13	9	9	4	4	5	8	7	7	6.90
PS-5-3	4	4	5	7	9	10	10	9	7	10	9	10	7	7	6	6	6	7	5	5	7.15	
<b>average</b>																					<b>6.88</b>	

Table 5.5. Continue

	Number Identification	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	average	
		7 Day	FS-5-1	6	1	2	1	1	1	4	3	1	1	1	4	1	4	7	9	2	6	10	1
	FS-5-2	2	7	6	5	7	3	2	10	7	10	7	5	2	7	3	4	8	9	5	4	5.65	
	FS-5-3	6	9	3	2	7	7	3	3	7	9	4	7	6	6	9	7	6	7	9	5	6.10	
	<b>average</b>																					<b>5.08</b>	
28 Day	PF-5-1	11	6	9	3	5	9	13	8	9	7	14	6	10	13	5	10	8	5	2	12	8.25	
	PF-5-2	9	11	3	7	10	11	8	3	7	9	9	10	15	8	3	11	10	10	8	6	8.40	
	PF-5-3	13	14	8	8	12	6	4	11	12	11	15	14	9	10	12	6	13	11	9	13	10.55	
	<b>average</b>																					<b>9.07</b>	
	FF-5-1	6	7	8	9	3	9	13	7	6	12	8	9	7	6	8	9	10	11	8	10	9.24	
	FF-5-2	8	9	6	13	8	11	12	3	6	7	12	9	8	8	6	6	7	10	8	12	8.45	
	FF-5-3	7	8	12	6	8	8	6	7	13	11	10	8	7	9	6	6	7	10	8	12	8.45	
	<b>average</b>																						<b>8.71</b>
	PS-5-1	4	12	9	10	8	3	6	14	8	7	8	10	11	12	10	9	7	8	12	8	8.80	
	PS-5-2	11	3	9	11	9	5	7	12	9	6	7	8	10	10	11	12	6	5	8	7	8.30	
	PS-5-3	7	8	9	9	8	7	8	7	6	8	4	3	9	8	7	8	10	13	9	10	7.90	
	<b>average</b>																						<b>8.33</b>
	FS-5-1	3	7	8	15	11	14	6	7	8	7	7	13	6	7	5	3	9	11	13	15	8.75	
	FS-5-2	8	2	6	5	3	8	9	11	5	6	7	8	9	10	12	6	8	9	10	8	7.50	
	FS-5-3	8	15	8	8	11	14	10	15	2	7	3	6	5	6	8	9	7	13	5	4	8.20	
<b>average</b>																						<b>8.15</b>	

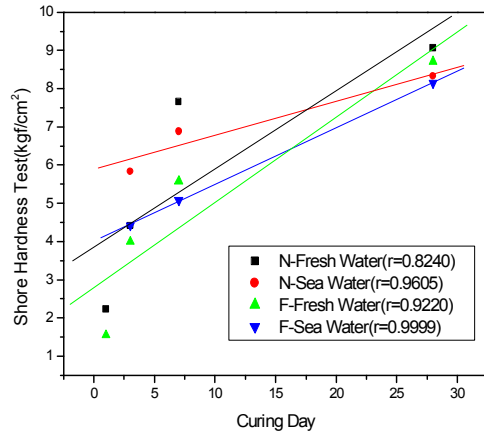
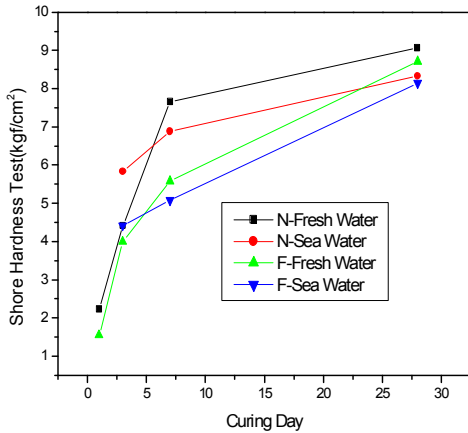


Figure 5.16. Graph of Avg. Shore hardness results.

실험결과 1, 3, 7일 양생 시료의 경우 Ordinary Portland Cement가 Fly Ash Cement보다 전체적으로 높은 강도를 보였으나 28일 양생 시료에서는 거의 비슷한 강도를 보여주고 있다. 하지만 증진률에서는 Fly-Ash Cement가 훨씬 증가하는 것을 볼 수 있다.

또한, 장기재령으로 갈수록 Fly ash Cement가 Normal Cement보다 더 높은 증진율을 보이고 있다. 특히, Sea Water 양생시 Ordinary Portland Cement보다 Fly Ash Cement가 가장 큰 증가율을 보이고 있다.

## 5.6 슈미트 헤머(Schmidt hammer test)

원래 Schmidt hammer는 콘크리트의 양생 강도를 추정하기 위하여 개발되었으며, 경량성 및 탄성적 반발력의 측정, 입자간의 결합력을 반영, 비파괴시험이라는 측면 때문에 수치적 정량화를 위하여 자주 사용되고 있다.

Schmidt hammer는 시료의 상대적인 경도(hardness)를 나타내는 탄성 반발 지수를 얻기 위하여 시료표면에 대고 타격하는데, Schmidt hammer 수치는 타격하는 입자의 경도뿐만 아니라 입자 사이의 결합력 효과도 역시 반영하고 있다<sup>6)</sup>.

Deere and Miller(1966), Irfan and dearman(1978), 이수곤 등이 수행한 연구결과에서 일축 압축강도와 Schmidt hammer 반발수치는 대단히 높은 상관관계가 있다고 결론지었으며<sup>3,4,9)</sup>, 일축압축강도를 추정하는데 폭넓게 사용되기도 한다<sup>5,7,14,15,24)</sup>.

본 연구에서는 V-block을 이용하여 시료를 고정시킨 후, 일본 SANYO TEST MACHINE 사의 N-type 자동 기록식 Model No : GSR을 사용하여 반발치를 측정하였다[Fig 5.17].



Figure 5.17. Photograph of the Schmidt hammer test.

Schmidt hammer를 시료표면에 타격할 때 특히 불규칙하게 낮은 Schmidt hammer 수치는 고려하지 않았으며, 각 시료 표면에서 20회의 Schmidt hammer 반발치를 구하였고, 20회의 반발치중에서 높은 수치 10개의 평균 반발치를 타격한 시료의 대표적인 Schmidt

hammer 반발치로 고려하였다. 그 밖의 일반적인 Schmidt hammer 실험 방법은 ISRM의 기준을 따랐다<sup>8)</sup>.

Schmidt 반발계수를 측정하고 반발계수와 압축강도의 관계를 통하여 압축강도를 [Fig 5.18] 그래프를 통하여 추정 할 수 있다.

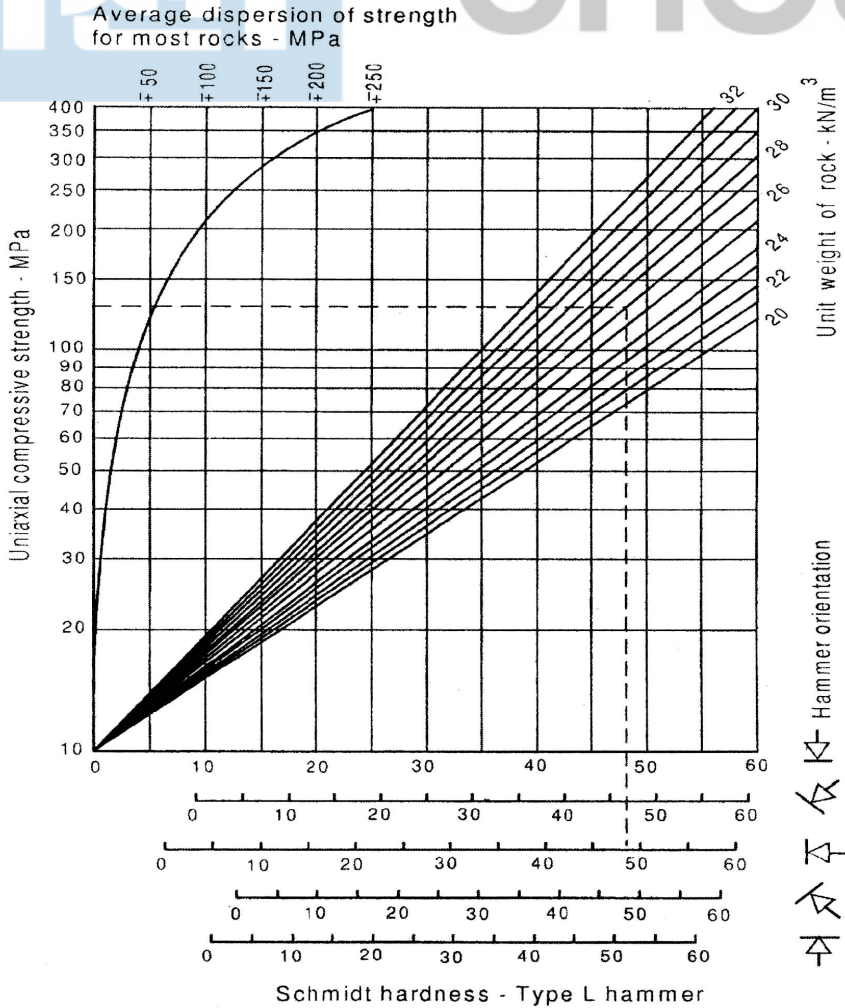


Figure 5.18. Relationship between Schmidt hammer rebound value and uniaxial compressive strength.

실험결과 [Table 5.6]과 같은 결과가 나왔으며, [Fig 5.19]와 같은 양상을 보였다.

Table 5.6. Avg. Results of Schmidt hammer rebound value.

회수 Indentification																					average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1 Day	측정 不																				
3 Day	PF-6-1	8	8	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8	8	
	average						9	9	9	10	10	10	10	10	8	8					9.30
	FF-6-1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	average	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6										6.00
	PS-6-1	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	
	average		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8									8.00
7 Day	PF-6-1	10	10	10	10	10	10	11	10	13	10	10	10	11	10	10	14	10	10	10	11
	average						10	11		13				11		10	14	10	10	10	11
	FF-6-1	10	10	11	10	11	10	10	10	10	10	10	10	11	10	10	12	10	10	10	10
	average			11		11				10				11		10	12	10	10	10	10
28 Day	PF-6-1	15	16	10	8	20	10	10	10	11	13	15	11	13	17	15	15	18	20	22	18
	average	15	16			20					13	15			17			18	20	22	18
	FF-6-1	12	11	13	16	15	15	14	16	18	19	17	15	10	10	10	10	10	10	11	11
	average			13	16	15	15	14	16	18	19	17	15								15.8
28 Day	PS-6-1	14	15	12	14	14	14	12	12	12	12	12	10	10	12	12	12	14	14	14	12
	average	14	15	12	14	14	14	12										14	14	14	
	FS-6-1	12	10	10	10	10	10	10	10	10	8	8	8	8	12	14	14	14	10	10	8
	average	12	12	12	12	12	12								12	14	14	14			12.6

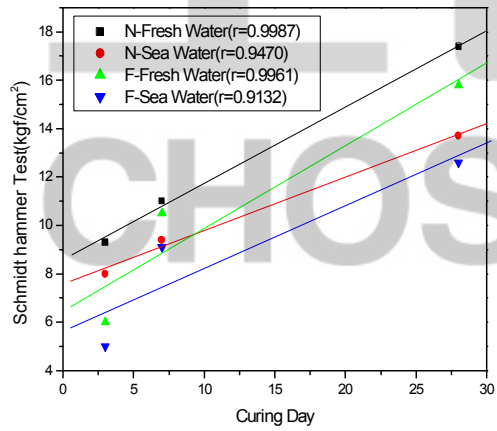
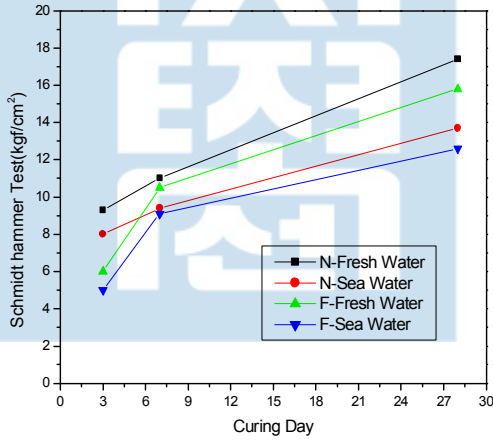


Figure 5.19. Graph of Avg. Schmidt hammer rebound value.

Schmidt hammer Test 역시 실험결과 Ordinary Portland Cement가 Fly ash Cement보다 높은 강도를 보였으며, Fresh Water에서 양생한 Sample 보다 Sea Water에서 양생한 Sample들이 증진율이 더 높은 것으로 나타났다. Fly ash Cement를 제외한 다른 시료들은 대체적으로 일정한 변화양상을 보이고 있다.



### 5.7. 점하중 강도(Point load test)

Point load test는 암석의 강도에 따른 분류를 위한 index를 알아내는데 그 목적이 있다. 이 index는 일축압축강도와 상관관계가 있어 강도를 구하는데 이용되기도 하며, 실험기구가 운반이 가능한 것이기 때문에 현장과 실험실에서 모두 실험이 가능하다.

Point load test에서는 시료의 두께(D), 너비(W), 파괴시의 하중(P)으로부터 strength index  $I_s$ 를 다음과 같은 식을 이용하여 일축압축강도를 추정 할 수 있다.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

여기서  $D_e^2 = 4A / \pi$ ,

$A = W \times D$ (가압판 접점축이 포함된 면의 단면적)

$I_s$ 를 서로 비교할 수 있는 기준치로 보정하기 위하여 D가 50 mm일 때의 index  $I_s(50)$ 으로 보정해 주어야 한다. 그 식은 다음과 같으며, F는 correction factor이다.

$$I_s(50) = F \times I_s$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \approx \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.5}$$

$I_s(50)$ 과 일축압축강도와는 평균적으로 20~25배의 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로  $I_s(50)$ 으로부터 일축압축강도( $q_u$ )를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q_u = 24 \cdot I_s(50)$$

[Fig 5.20]은 본 연구에서 사용한 Point load test 시험기이며, [Fig 5.21]은 각 시험법에 요구되는 시편 형상을 나타낸 것이다.



Figure 5.20. Point load Tester

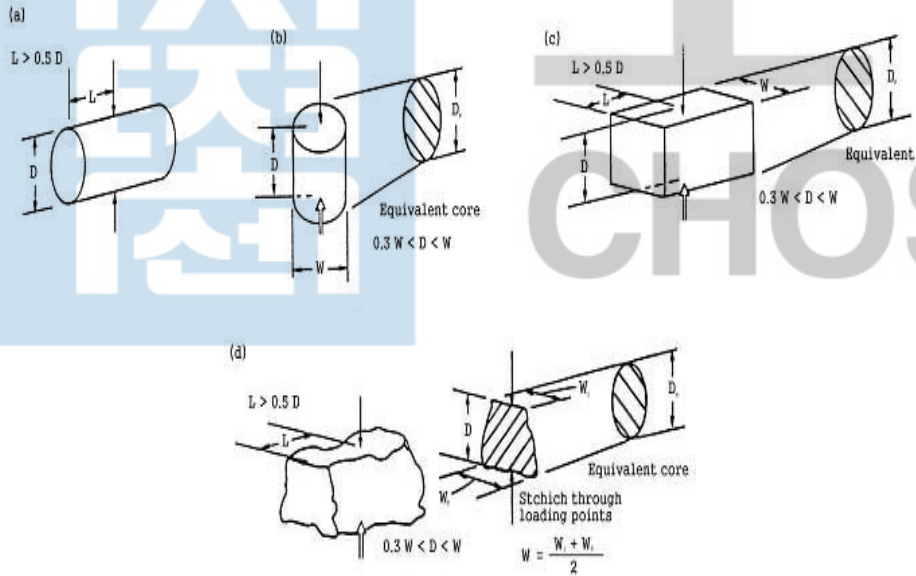


Figure 5.21. Each tests require sample form

(a) diametral test, (b) axial test, (c) block test, (d) irregular lump test

길이/직경의 비가 1.0이 되도록 절단한 후 Point Load Tester에 고정시켜 측정하였으며, 쇼어 경도와 압축강도와의 상관관계인 [Fig 5.22]를 이용하여 [Table 5.7]과 같은 결과 산출하였다. 그 양상은 [Fig 5.23]과 같다.

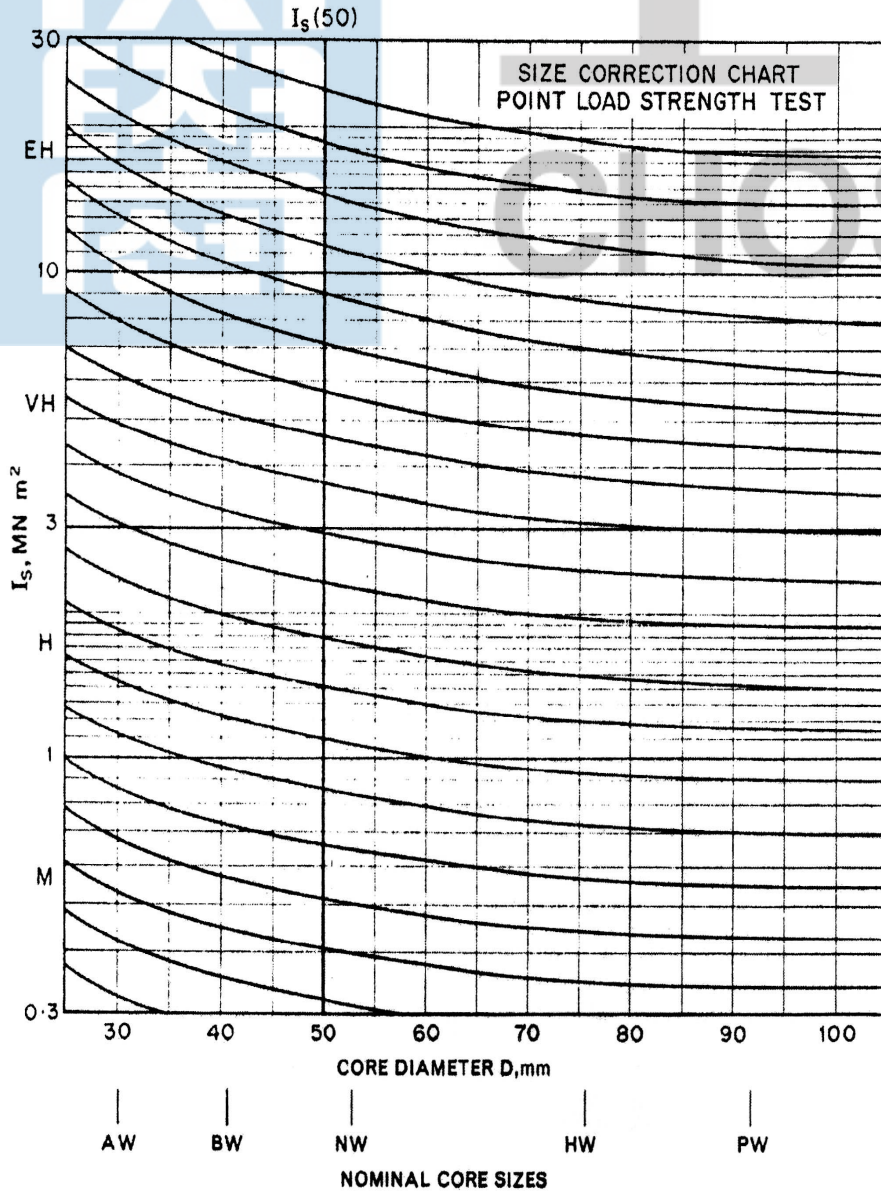


Figure 5.22. Size Correction Chart Point Load Strength Test

Table 5.7. Avg. Results of Point Load results.

	No.	Diameter (cm)	Length(cm)	Strength(psi)	Uni. Comp. Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
1 Day	PF-7-1	5.64	4.86	30	52.0
	PF-7-2	5.56	4.89	35	52.0
	<b>Average</b>	<b>5.60</b>	<b>4.68</b>	<b>32.5</b>	<b>52.0</b>
	FF-7-1	5.54	5.07	25	45.0
	FF-7-2	5.61	4.71	30	45.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>4.89</b>	<b>27.5</b>	<b>45.0</b>
3 Day	PF-7-1	5.58	5.58	55	85.0
	PF-7-2	5.59	5.51	55	85.0
	<b>Average</b>	<b>5.59</b>	<b>5.55</b>	<b>55</b>	<b>85.0</b>
	FF-7-1	5.59	5.10	45	73.0
	FF-7-2	5.56	5.53	45	69.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.32</b>	<b>45</b>	<b>71.0</b>
	PS-7-1	5.58	5.16	40	65.0
	PS-7-2	5.59	5.00	35	58.0
	<b>Average</b>	<b>5.59</b>	<b>5.08</b>	<b>37.5</b>	<b>61.5</b>
	FS-7-1	5.58	5.09	45	74.0
	FS-7-2	5.58	5.24	45	72.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.17</b>	<b>45</b>	<b>73.0</b>
7 Day	PF-7-1	5.58	5.17	80	129.0
	PF-7-2	5.58	5.87	75	110.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.52</b>	<b>77.5</b>	<b>119.5</b>
	FF-7-1	5.58	5.10	60	98.0
	FF-7-2	5.58	5.10	60	98.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.10</b>	<b>60</b>	<b>98.0</b>
	PS-7-1	5.58	5.00	60	100.0
	PS-7-2	5.58	5.30	60	95.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.15</b>	<b>60</b>	<b>97.5</b>
	FS-7-1	5.59	5.00	50	83.0
	FS-7-2	5.58	5.06	50	82.0
	<b>Average</b>	<b>5.59</b>	<b>5.03</b>	<b>50</b>	<b>82.5</b>

Table 5.7. Continue

	No.	Diameter (cm)	Length(cm)	Strength(psi)	Uni. Comp. Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
28 Day	PF-7-1	5.58	5.05	170	257.0
	PF-7-2	5.59	5.06	160	242.0
	<b>Average</b>	<b>5.59</b>	<b>5.06</b>	<b>152.5</b>	<b>249.5</b>
	FF-7-1	5.56	5.03	155	236.0
	FF-7-2	5.56	5.02	155	236.0
	<b>Average</b>	<b>5.56</b>	<b>5.03</b>	<b>135</b>	<b>236.0</b>
	PS-7-1	5.56	5.02	130	215.0
	PS-7-2	5.57	5.01	130	215.0
	<b>Average</b>	<b>5.57</b>	<b>5.02</b>	<b>130</b>	<b>215.0</b>
	FS-7-1	5.58	5.05	140	231.0
	FS-7-2	5.58	5.05	120	198.0
	<b>Average</b>	<b>5.58</b>	<b>5.05</b>	<b>130</b>	<b>214.5</b>

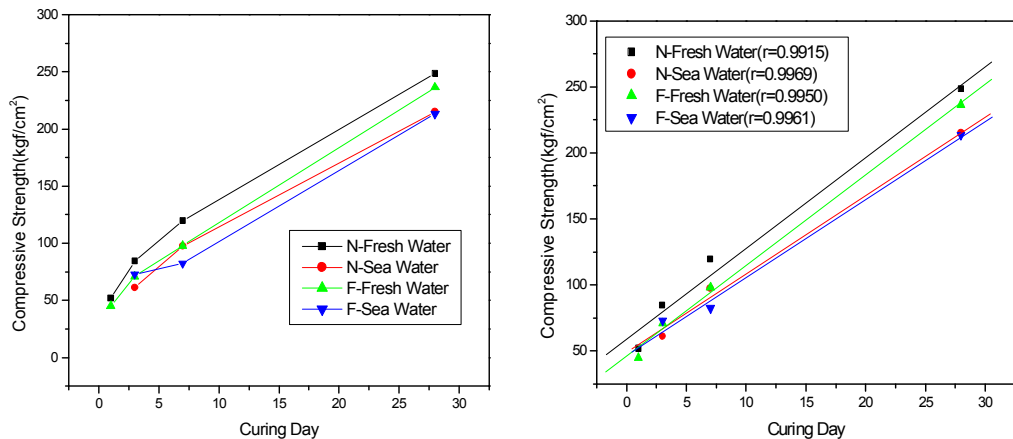
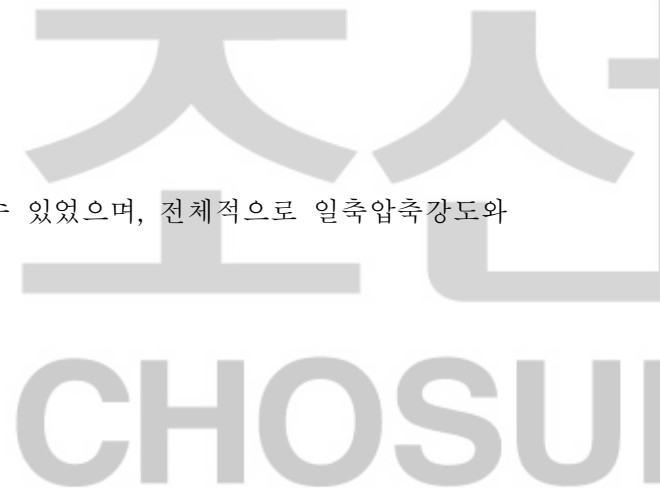
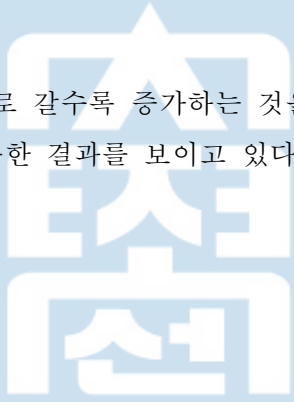


Figure 5.23. Graph of Avg. Point Load results

실험 결과 Ordinary Portland Cement는 3일 양생이후 Fresh Water를 양생수로 한 경우 다른 양생수에 비해 강도가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 28일 양생시에는 약 20%정도 강도가 증가하였다. 증가율에서도 Fly-Ash Cement가 Ordinary Portland Cement보다 장

기재령으로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 전체적으로 일축압축강도와 거의 유사한 결과를 보이고 있다.



## 6 결론

본 연구를 위해 양생기간(1일, 3일, 7일, 28일)별 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength), 압열인장강도(Brazilian Strength), 직접전단시험(Direct Shear Strength test), 비중(Specific Gravity), 쇼아경도(Shore Hardness Test), 슈미트해머(Schmidt Hammer Test), 점하중강도(Point Road Test)를 측정하였으며, Normal Cement의 Fresh Water 시료를 비교 기준으로 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength) 실험 결과 Normal Cement를 Fresh Water에 양생한 경우 재령별 압축강도가 재령 3일 : 176kgf/cm<sup>2</sup>, 7일 : 215.97kgf/cm<sup>2</sup>, 28일 : 314.33kgf/cm<sup>2</sup>로 KS L 5210 기준(재령 3일 : 130kgf/cm<sup>2</sup>, 7일 : 200kgf/cm<sup>2</sup>, 28일 290kgf/cm<sup>2</sup>이상) 조건을 모두 충족하였다.

2. 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength)는 3일 양생까지 전체적으로 큰 변화가 없었지만, PF를 기준으로 7일 양생에서 PS는 90%, FF는 90%, FS는 82%의 강도를 보였으며, 28일 양생에서는 PS는 85%, FF는 96%, FS는 67%의 강도를 보였다.

3. 압열인장(Brazilian Strength) 시험 결과 Ordinary Portland Cement는 3일 양생까지는 큰 변화가 없었지만 PF를 기준으로 7일 양생의 PS는 78%, FF는 87%, FS는 67%, 28일 양생에서 PS는 84%, FF는 94%, FS는 77% 88%로 강도가 감소하였다.

4. 비중, 흡수율, 공극률, 흡수율 모두 큰 차이를 보이진 않았으나 PS는 다른 시료보다 급격한 변화양상을 보였다. 이는 Ordinary Portland Cement가 다른 조건에 비해 해수의 황화물 및 염화물에 영향을 많이 받은 것으로 사료된다. 초기재령에는 함수비, 흡수율, 공극률이 Fresh Water에서 Ordinary Portland Cement이 더 양호한 변화양상을 보이나 장기재령으로 갈수록 Fly-Ash Cement가 더 양호한 변화양상을 보이고 있다.

5. 직접전단실험 결과 내부마찰각(Friction Angle)은 직접전단시 회전식 직접전단과 달리 직각 방향에서 전단력을 가했기 때문에 전체적으로 90°에 가까운 양상을 보였으며, 점착력(Cohesion)은 암석에 비해 29.42~593.34까지 아주 큰 값을 보였다. 이는 Cement mortar가 수중양생을 하여 시료내에 함수비가 높기 때문인 것으로 사료된다.

6. 쇼아경도(Shore Hardness Test)는 1, 3, 7일 양생 시료의 경우 Ordinary Portland Cement가 Fly Ash Cement보다 전체적으로 높은 강도를 보였으나 28일 양생 시료에서는 거의 비슷한 강도를 보여주고 있다.

7. Schmidt hammer Test 실험결과 Ordinary Portland Cement가 Fly ash Cement보다 높은 강도를 보였으며, Fresh Water에서 양생한 Sample 보다 Sea Water에서 양생한 Sample들이 증진율이 더 높은 것으로 나타났다. Fly ash Cement를 제외한 다른 시료들은 대체적으로 일정한 변화양상을 보이고 있다.

8. 점하중강도(Point Road Test) 실험 결과 Ordinary Portland Cement는 3일 양생이후 Fresh Water를 양생수로 한 경우 다른 양생수에 비해 강도가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 28일 양생시에는 약 20%정도 강도가 증가하였다.

9. 본 연구의 결과 Fly Ash Cement가 Ordinary Portland Cement보다 물리적 특성면에서 초기에는 그 물성치가 저조하지만 장기적으로 봤을 때 그 증진률은 Fly Ash Cement가 더 높게 나오는 것을 알 수 있었다. 특히 Fly Ash Cement는 Sea Water에서 증진률이 가장 높았는데 이를 다양한 각도, 다양한 방법의 실험 및 평가 등 향후 더 많은 자료를 보완하여 해안구조물 등의 실무사용에 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

- 1) Anon, "Rock and soil description and classification for engineering geological mapping.", International Association of Engineering Geology Commission on Engineering Geological Mapping, Bull, Int, Ass, Eng, Geol, Vol 24, 1981.
- 2) Anon, "Basic geotechnical description for rock masses, International Society for Rock Mechanics, Commision on the Rock classification of Rocks and Rock masses." Int, J, Rock Mech. Min. & Sci. Abstr., vol 18, 1981.
- 3) Ayday C, Goktan R. M., Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field-testing, In : hudson J. A. editor, Int. ISRM Sym. on Rock Characterization, pp. 47-50, 1992.
- 4) Ayday C, Goktan R. M., The statistical compaison of the Schmidt hammer recording techniques. Bull Rock Mech(The Puvlication of The Turkish National Society for Rock Mechanics), Vol. 9, pp.25-35, 1993.
- 5) Carter P. G., Sneddon M., Comparison of the Schmidt hammer, point load and unconfined compression test in Carboniferous strata, In : Attewell PB, editor. Proceedings of the Conference on Rock Engineering, University of New Castle upon Type, pp. 197-210, 1977.
- 6) Deere D. U. and Miller R. P., Engineering classification and index properties for intact rock, Air Force Weapons Lanoratoru Technical Report, AFWL-TR-65-116, Kirtland Base, new Mexico, pp. 300, 1966.
- 7) Haramy K. Y., DeMarco M. J., Use of the Schmidt hammer for rock and coal testing, In : Aswath JB, Eileen W, editors. 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, pp. 549-55, 1985.
- 8) Inoue M., Omi M, Study on the strength of rocks by the Schmide hammer test, In : Rock Mechanics in Jappan, Vol. 1, pp. 177-179, 1970.
- 9) Irfan T. Y. and Dearman W. R., Engineering classification and index properties of

- weathered granite, Bulletin of the Int. Association of Eng. Geology, No. 17.
- 10) 『ISRM(International Society for Rock Mechanics)』, Rock characterization testing and monitoring : ISRM Suggested Method(ed. Brown E.T. Pergamon Press, 1981.
  - 11) Jaeger J. C., Cook N. G. W., Fundamentals of Rock Mechanics, Chpman and Hall, pp. 169-173, 1976.
  - 12) King M. S., Chaudhry N.a., Shakeel A., Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks, Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, Vol. 32, No. 2, pp. 155-163, 1995.
  - 13) King M.S., Wave velocities and dynamic elastic moduli of sedimentary rock, PhD thesis, University of California, Berkeley, pp.116, 1964.
  - 14) Sachpazis C. I. , Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's Modulus of carbonate rocks, Bull Int. Associety Eng. Geology, **Vol. 42**, pp. 75-84, 1990.
  - 15) Sheorey P. R., Barat D., Das M. N., Mykherjee K. P., Singh B., Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength, Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci, Vol. 21, pp. 39-42[Technical note], 1984.
  - 16) 강승민, 안남식, 양성철, “재령과 온도가 콘크리트의 쪼갬인장강도에 미치는 영향”, 한국 콘크리트학회 학술발표회, 2003.
  - 17) 김무한, “구조재료실험”, 문운당, 2000. 1.
  - 18) 김무한, 신현식, 김문한, “건축재료학”, 문운당, 2000. 1.
  - 19) 동양시멘트, “콘크리트의 내해수성과 시멘트”
  - 20) 신휘순, 선우춘, 이두화 “토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류”, 구미서관, 2000.
  - 21) 양형식, 이희근, “암석역학”, 서울대학교 출판부, 2002.
  - 22) 이부경, 『암석역학의 원리』, 대운, 1998.
  - 23) 이수곤, 이송, 슈미트해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법, 대한 토목학회논문집, Vol. 15, No. 1, pp. 199-210, 1995.
  - 24) 이인모, “암반역학의 원리”, SaeRon Publishing Co, 2002.

- 25) 연구석, 이봉학, 이광우, “폴리머 콘크리트의 초기강도에 미치는 양생온도의 영향”, 한국 콘크리트학회 논문집, 제2권, 제2호, pp.151~156, 1982.
- 26) 전호석, 배광현, 조성백, 박철현, 백상호, “석탄회로부터 미연탄소분 제거를 위한 정전선별 신기술 개발”, 한국지질자원연구소지, pp.14, 2003.
- 27) 정일영, 한천구, 정상진, “건축재료실험”, 형설출판사, 1999. 8.
- 28) 지경용, 연구석, 이윤수, 전철수, “콘크리트 보수용 폴리머 복합재료의 기초적 성질”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, pp.319, 1999.
- 29) 山口梅太郎, 西松 초一, 岩石力學入門, 東京大學出版會, 제4章, pp. 138-140, 1976.
- 30) 한국건설정보시스템 <http://www.cn.co.kr>
- 31) 한국도로공사 도로연구소, “폴리머 콘크리트를 이용한 시멘트 콘크리트 포장의 긴급보수 방안에 대한 연구”, 한국도로공사 연구보고서, pp.257, 1992.
- 32) 한국산업규격, “포틀랜드 시멘트(KS L 5201)”, 1999.
- 33) 한국산업규격 <http://standard.ksa.or.kr>