



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

동결융해와 황산염의 복합작용을 받는 시멘트

모르타르의 압축강도 특성



2009년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

박진기

공 학 석 사 학 위 논 문

동결융해와 황산염의 복합작용을 받는 시멘트
모르타르의 압축강도 특성

지도교수 김 명 식

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2009년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

박 진 기

박진기의 공학석사 학위논문을 인준함

2009년 2월 25일



주 심 농학박사 이 영 대 ㉠

위 원 공학박사 국 승 규 ㉠

위 원 공학박사 김 명 식 ㉠

목 차

목차	i
표목차	iii
그림목차	iv
Abstract	v
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위 및 방법	2
2. 문헌고찰	5
2.1 혼화재료	5
2.1.1 플라이애쉬	5
2.1.2 고성능AE감수제	18
2.2 동결융해기구 및 대책	23
2.2.1 개요	23
2.2.2 동결융해 기구	25
2.2.3 동결융해 대책	27
2.3 황산나트륨에 노출된 시멘트 경화체의 성능저하 메커니즘	28
3. 실험계획 및 방법	30
3.1 사용재료	30
3.1.1 시멘트	30
3.1.2 결합재	30
3.1.3 골재	31

3.1.4 혼화제	31
3.2 실험방법	32
3.2.1 사용 골재의 물성시험	32
3.2.2 모르타르의 혼합	33
3.2.3 동결 용해 시험	34
3.2.4 시편의 제작 및 양생	36
3.2.5 굳지 않은 모르타르 시험	39
3.2.6 경화한 모르타르 시험	39
3.2.7 양생수(침적용액) 및 동결용해 조건	39
3.4 시편제작	41
4. 실험결과 및 고찰	42
4.1 사용골재의 품질 특성	42
4.2 굳지 않은 모르타르의 품질특성	43
4.3 경화한 모르타르의 품질특성	43
4.3.1 외관형상	43
4.3.2 단위중량	44
4.3.3 압축강도	49
5. 결론	57
참고문헌	61
감사의 글	

표목차

표 1 각종 물질의 조성에	9
표 2 FA의 성분 분석	9
표 3 각국의 FA 관련 기준	10
표 4 FA중의 탄소함유량이 응결시간에 미치는 영향	12
표 5 국내 시판의 고성능(AE)감수제	20
표 6 고성능 AE감수제의 성분에 의한 분류	22
표 7 보통포틀랜드시멘트의 특성	30
표 8 플라이애쉬의 물리·화학적 특성	31
표 9 고성능AE감수제의 물리·화학적 특성	31
표 10 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 최대 물-시멘트비	40
표 11 제작 시편	41
표 12 사용골재의 품질특성	42
표 13 양생조건에 따른 시편의 외관형상	43
표 14 양생조건 변화에 따른 경화한 시멘트 모르타르의 단위중량	45
표 15 양생조건 변화에 따른 경화한 시멘트 모르타르의 압축강도	50

그림목차

그림 1 동결융해장치	36
그림 2 담수양생 시편	37
그림 3 동결융해장치 내부의 모식도	38
그림 4 동결융해장치 내부	38
그림 5 양생조건별 단위중량 변화(전체)	47
그림 6 담수양생시 단위중량 변화	47
그림 7 동결융해시 단위중량 변화	47
그림 8 복합열화시 단위중량 변화	48
그림 9 양생조건별 단위중량 변화율	48
그림 10 양생조건별 압축강도 변화(전체)	53
그림 11 담수양생시 압축강도 변화	53
그림 12 동결융해시 압축강도 변화	53
그림 13 복합열화시 압축강도 변화	54
그림 14 양생조건별 압축강도 변화율	54
그림 15 OPC 모르타르의 압축강도 발현	55
그림 16 FA첨가 모르타르의 압축강도 발현	55
그림 17 OPC 모르타르의 순수 압축강도 변화율	56
그림 18 FA첨가 모르타르의 순수 압축강도 변화율	56

Compressive Strength Characteristics of Cement Mortar under Combined Exposure Conditions of Freezing-Thawing and Sulfates

Jin - Gi, Park

*Department of Civil Engineering,
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

In cold weather regions, a strong seasonal wind brings sea salts to the land. In addition to it, recently, the spreading amount of deicing salts has increased numerously for purpose of removing snow and ice. Thus the salts environment around concrete structure becomes so severe that various damages of concrete due to applied salts will be brought up. Much of countries such as America, Europe etc. is carried out study for effects of deicing salts on concrete. However, there are not test methods for deterioration of concrete subjected to both freezing-thawing and sulfate attack in Korea. In this study, we carried out test for the compound deterioration subjected to both freezing-thawing and sulfate attack, to investigate the effect of sodium chloride on the deterioration of concrete. As a result, the scaling deterioration was accelerated in the presence of freezing-thawing and sulfate attack. And the resistance to scaling was strongly influenced by the type of cement, the compressive strength of concrete

Key words : freezing-thawing, sulfate attack, fly ash, unit weight,
compressive strength

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

일반적으로 콘크리트 구조물은 비, 바람, 눈, 일조 등과 같은 여러 종류의 기상작용의 영향을 받고 있으며 이로 인하여 동결융해 작용, 온도 변화, 건조와 수분의 반복 침투 작용 등에 의해 수축팽창이 발생한다.

이 중에서 동결융해 작용은 매년 겨울이 되면 반복이 되기 때문에 장기간에 걸쳐 콘크리트의 내구성능을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 콘크리트의 동결융해 작용에 의한 내구성능 저하는 콘크리트 내부의 수분이 동결융해 작용을 반복적으로 받아 균열이 발생하거나 표층부가 박리됨으로서 표면부로부터 점차적으로 내구성이 저하되어 전체적인 콘크리트 구조물의 내구성능이 저하되는 현상을 말한다.

특히 해안에 근접한 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받을 경우, 내륙 콘크리트 구조물에 비해 내구성능 저하가 촉진된다고 알려져 있다. 그 원인으로서 해수 작용에 의해 침투압이 발생하여 콘크리트 표면부의 세공구조가 다공성(porous)으로 변함에 따라 동결 가능한 수량이 증가되어 동결융해 작용을 받을 때 수압이 크게 발생하기 때문이다. 이는 Mg^{2+} , Cl^- , $(SO_4)^{2-}$, Na^+ , K^+ 등의 이온이 존재하는 해수환경하에서는 이러한 용존 이온들이 콘크리트 경화체 내부로 침투하여 C_3A 및 시멘트 수화물과 반응하여 최종적으로 에트링자이트가 생성되는 반응과정을 통하여 팽창을 일으키므로 경화체의 성능을 저하시키는 동시에 철근콘크리트 구조물에서는 철근주변의 부동태를 파괴, 철근 부식에 의한 팽창을 유발시켜 구조물의 수명에 큰 영향을 끼친다고 알려져 있다(이광명 외, 2000). 따라서 해수 환경하의 시멘트 콘크리트 경화체의 동결융해 저항성을 향상시키기 위해서는 공기연행 이외에도 해수중 용존이온들의 침투를 억제하거나, 침투한 용존이온과 시멘트수화물 사이의 반응을 억제

시켜야 한다. 이러한 방법의 하나로서 시멘트 수화시 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 플라이애쉬, 슬래그, 실리카 흙등의 혼합재를 첨가하여 포졸란 반응에 의하여 감소시키거나, 폴리머계 혼합재를 첨가하여 폴리머-시멘트 페이스트 co-matrix내에 고립시켜 반응을 차단시키는 방법이 연구되고 있다. 그러나 국내에서는 동결융해와 황산염에 대한 각각의 단일 작용에 관한 연구는 이루어지고 있으나, 동결융해와 황산염에 대한 복합 내구성능 저하 시험방법은 규정되어 있지 않으며 또한 이에 대한 연구도 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일반 시멘트 모르타르와 포졸란계 혼합재로서 플라이애쉬를 사용하여 제조한 시멘트 모르타르 경화체를 황산염 용액에 침지시키고 동시에 동결융해를 일정 기간까지 반복적으로 작용시켜 시멘트 모르타르의 대표적 물리적 특성인 단위중량과 압축강도 변화에 대해 살펴보고, 향후 이러한 복합작용을 받는 구조물의 내구성 설계에 기초적 자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서 사용된 골재는 부산근교 김해지역 석산에서 생산되는 부순골재를 사용하였다. 시멘트는 국내에서 생산되는 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼합재로는 플라이애쉬를 사용한다. 혼화제는 국내 D사에서 생산된 고성능AE감수제를 사용한다.

콘크리트 표준시방서에서는 배합설계시 물-시멘트비의 결정을 위한 황산염에 노출정도를 규정하고 있는데, 토양내의 수용성 황산염의 경우 매우 심한 노출정도가 2%를 초과할 경우로 규정하고 있고, 물속의 황산염의 경우는 10,000ppm이 초과할 경우가 가장 가혹한 경우로 정해져 있다. 여기서, 10,000ppm을 백분율로 환산하면 1%에 해당된다. 그러나 본 연구에서는 짧은 기간에 강도변화를 측정하기 위해 10% 황산염 용액을

제조하여 촉진시험을 실시한다. 또한 동결융해의 시험방법은 KS F 2456의 방법 A(공기중 동결·수중융해)에 의해 실시한다.

본 실험에서 물-시멘트비(W/C) 45%, Flow 치는 115~130mm 범위를 만족하도록 하며, 결합재로 사용된 플라이애쉬의 사용량은 시멘트 단위중량의 20%를 치환하여 배합설계를 실시한다. 이렇게 제작한 모르타르의 단위중량 및 압축강도를 변화특성을 살펴보기 위해 다음과 같은 순서 및 방법에 의하여 연구를 수행한다.

- ① 문헌고찰을 통해 해양 환경에 노출된 콘크리트의 특성과 황산염 침해 메커니즘에 대한 특성을 살펴보고, 결합재로 사용된 플라이애쉬의 기본성질과 결합재로서의 특성에 대해 살펴본다.
- ② 사용재료의 물리·화학적 특성을 물성시험을 통하여 파악한다.
- ③ 각 사용재료의 물성시험을 통해 획득한 자료를 토대로 배합설계를 실시하여 기준 시방배합표를 작성한다
- ④ 기준 시방배합표를 토대로 일반 시멘트 모르타르 시편과 결합재인 플라이애쉬(사용시멘트 중량의 20%)를 첨가한 시멘트 모르타르를 제작한다.
- ⑤ 제작된 시멘트 모르타르의 굳지 않은 특성을 파악하기 위해 Flow 치를 측정한다.
- ⑥ 복합열화의 기구를 알기 위해 제작한 모르타르 시험체를 28일간 표준양생(0 사이클) 후 다음과 같은 3가지 방법으로 양생을 실시한다.

- A. 계속 담수양생
- B. 동결융해만 실시
- C. 복합열화(동결융해+10% 황산염 침적)

⑦ 양생 및 복합열화 기간은 제작된 모든 시편을 재령 28일 동안 표준양생한 다음 0, 30, 60, 90, 180, 240, 300 사이클까지 동결융해 실험을 실시한 후 간단한 외관조사와 단위중량 및 압축강도를 측정하여 그 변화양상을 살펴본다.



2. 문헌 고찰

2.1 혼화재료

2.1.1 플라이애쉬

1) 개요

포졸란 그 자체로는 수경성이 없는 미분상태로 실리카(silica) 질을 포함하는 혼화재료로써, 천연 포졸란과 인공 포졸란으로 나눌 수 있다. 천연적으로 구할 수 있는 포졸란에는 화산재, 규조토, 규산백토 등이 있으며, 인공 포졸란에는 플라이애쉬(FA, fly ash), 슬래그(slag), 소성점토, 혈암 등이 있고 이러한 포졸란은 콘크리트 생성시 배합수 속의 수산화칼슘과 반응하여 불용성 화합물을 만든다.

포졸란을 사용한 콘크리트의 특징은 일반적으로 워커빌리티를 개선시키고 블리딩(bleeding) 및 재료의 분리가 작으며 수화열의 완화로 발열량이 작아진다. 또한 내구성, 수밀성 및 해수에 대한 화학적 저항성이 커지게 되고 강도의 증진은 느리지만 장기 강도는 일반 콘크리트에 비해 같거나 증진되는 효과를 얻을 수 있으며 특히 인장 강도가 증진된다. 그러나 단위수량을 많이 필요로 하는 경우가 많고 건조수축이 크게 되는 단점이 있다.

인공포졸란인 FA는 석탄을 원료로 하는 화력발전소에서 분쇄된 연료의 연소에 의해 발생되며 원탄의 약 15 - 45% 비율로 발생하는 석탄회이다. 우리나라에서는 보령 및 삼천포 화력발전소가 가동된 1983년 이전에는 석탄재의 거의 전량이 해안 매립용으로 처분되었으나, 최근에는 품질개선과 시멘트 대체 재료로서의 경제적 시공 및 산업 폐기물의 재활용이라는 관점에서 일부 레미콘 회사가 원료절감의 목적으로 양질의 플라이 애쉬를 선별하여 사용하고 있는 실정이다.

플라이애쉬를 혼화제로 사용할 경우 폐자원 활용으로 인한 자원절약 등의 경제적인 측면 이외에도 다음과 같은 면에서 콘크리트의 성능을 개선시키는 장점을 가진다.

- ① 콘크리트의 워커빌리티를 좋게 하고 단위수량을 감소시킨다.
- ② 초기강도는 작아지나 장기강도가 향상된다.
- ③ 수화열 저하에 의해 콘크리트의 온도가 감소된다.
- ④ 수밀성이 향상된다.
- ⑤ 건조, 습윤에 따른 체적변화와 동결융해에 대한 저항성을 향상시킨다.
- ⑥ 알칼리 실리카 반응의 억제 효과가 있다.

그러나 플라이애쉬는 콘크리트용 혼화제로 사용할 때 위와 같은 장점이 있지만 미연소 탄소량, 입자표면에서의 유기혼화제의 흡착, 입경분포, 1 μ m이하의 미립분의 영향, 제조공장 및 시기 등에 따른 품질변동 등의 문제점이 있기 때문에 사용할 때 유의하여야 한다.

2) 플라이 애쉬의 특성

가. 물리적 특성

① 입자모양 및 크기

FA(fly ash)는 대체적으로 일부 결정성 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리형상이다. FA는 구형입자속에 여러 겹의 구면을 포함하는 단단한 입자(perospheres)와 내부에 이산화탄소(CO₂)와 질소(N₂)가스로 채워져 있는 중공체의 다공성 입자(cenospheres)로 구분된다. 또한 FA는 고석회(high-lime) FA와 저석회(low-lime) FA로 구분되는데, 이는 ASTM규정에 따라 C급과 F급으로 구분된다. Subbituminous를 원료로 하여 생성되는 F급 FA는 일반적으로 bituminous를 원료로 하여 생성되는 C급 FA보다 매끄러운 표면을 가지며 상대적으로 적은 양의 칼슘과 많은 양의 철을 함유하고 있다. FA의 입도는 포졸란의 활성화도

에 영향을 주는 물성으로써 입자크기는 0.5 - 100 μm 의 범위에 속하며 중간크기 내지 굵은 점토의 입도에 해당된다.

② 포졸란 활성화도

ASTM C 618과 AASHTO M 295의 재령 7일 활성화도 시험에 따르면 FA를 35% 대체한 콘크리트 시편을 $35 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 의 온도에서 1일, $55 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 에서 6일 양생하여 보통콘크리트 강도의 75% 이상의 강도 발현을 규정하고 있다.

③ 색상

FA의 색상은 크림색으로부터 회색, 흑색에 이르기까지 다양하다. 탄소, 철분 및 수분의 함량은 색깔에 영향을 준다.

④ 비중과 부피밀도

FA의 비중은 1.9 - 2.3으로서 시멘트 비중의 2/3에 해당된다. 건조한 FA의 부피밀도는 약 $800\text{kg}/\text{m}^3$ 이다. 이 값은 치밀화 작용으로 사일로 안에서 보다 상당히 큰 값이 될 수 있다. 이 사실은 사일로 설계시 고려되어야 한다. 공기를 포함하고 있을 때의 부피밀도는 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 밖에 되지 않기 때문에 저장용량 계산시에는 이 값이 유리하다.

⑤ 분말도

분말도는 포졸란 활성화도와 콘크리트의 워커빌리티에 영향을 주는 매우 중요한 특성이다. 분말도의 측정방법으로서는 체에 의한 방법과 Blaine 투과법에 의한 비표면적 측정방법이 있는데 체에 의한 경우는 일반적으로 88- μm (No.200) 체 및 45- μm (No. 325)체에 의하여 측정한다.

KS L 5405에서는 분말도를 평균입경의 최대치(9 μm 이하)로 규제하고 있고, ASTM C 618에서는 45- μm 체 잔량 (25%이하)과 비표면적 ($2400\text{cm}^2/\text{g}$)

이상)으로 동시에 규제하고 있다. 전기집진기에서 얻어진 FA의 분말도는 대체로 $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 내외이다. 분말도는 비표면적의 값이 크거나 $45\mu\text{m}$ 체 잔량이 적을수록 높아지며 분말도가 높을수록 포졸란 활성도가 커지고 FA를 혼합한 콘크리트의 워커빌리티가 향상된다.

⑥ 다짐(Compaction)특성

BS 다짐도 시험 (BS 1377 : 1975 Test 12)은 FA의 수분과 건밀도 관계를 결정하기 위해서 행한다. 현장조건하에서 다짐도는 FA의 발생원, 사용된 다짐플랜트 및 현장조절 정도에 따라 달라진다.

나. 화학적 특성

FA는 고온연소생성물이므로 화산회와 비슷한 특성, 예를 들면 석회와 물과 결합하여 시멘트성 물질을 생성하는 포졸란 성질을 가진다. 이와 같은 반응은 반응성 규사성분과 관련이 있는 것으로 보여진다.

FA의 화학적 성분은 탄종, 연소조건 및 현장오염방지 설비의 효율에 크게 좌우된다. FA의 주요성분은 규소, 알루미늄, 철의 산화물로서 이들 세 가지 성분이 전체의 80 - 90%를 차지한다. FA의 무기성분은 표1에서 보는 바와 같이 점토성분과 비슷하다.

FA의 화학분석 결과를 중량백분율로 나타내면 위의 표2와 같고 X-ray diffraction패턴의 측정 결과 FA의 결정성분이 quartz, mullite, magetite, hematite와 무수황산칼슘이라는 것을 알 수 있다. FA의 2 - 3%(중량백분율)는 수용성 성분이며, 용액의 액성은 일반적으로 알칼리성이고, 칼슘과 황산이온을 포함하고 마그네슘, 나트륨, 칼리 및 규산염이온(아주 적은 양)도 함유한다.

표 1 각종 물질의 조성에

성분 물질명	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO or Fe ₂ O ₃		CaO	MgO
포틀랜드시멘트	22.2	5.1	-	3.2	65.4	1.2
콘 크 리 트	62.4	8.9	-	-	16.5	1.2
Fly ash	57.3	26.6	-	4.7	2.1	1.2
고로 Slag	33.4	14.5	0.4	-	41.0	6.0
전로 Slag	10.9	1.5	20.7	-	42.9	7.2
山 土	59.6	22.0	-	-	0.4	0.8
粘 土	50~70	15~35	-	2~10	1~6	1~5
全 地 殼	55.2	15.3	5.84	2.79	8.80	5.22
火 成 岩	59.12	15.34	3.80	3.08	5.08	3.49

표 2 FA의 성분 분석

탄 종		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
수 입 유연탄	역 청 탄	U 탄	69.90	24.06	2.71	0.26	0.45	0.22	0.95	0.14
		C 탄	61.41	32.58	2.67	0.39	0.18	0.20	1.06	-
		B 탄	65.70	27.31	3.40	0.13	0.31	0.48	1.97	-
		D 탄	51.79	37.01	6.03	1.21	0.49	2.76	0.32	0.71
		P 탄	56.82	29.29	7.08	0.96	1.26	0.34	0.49	0.96
		N 탄	61.78	29.12	3.37	1.03	0.55	0.71	1.52	1.07
	아역 청탄		67.30	16.70	4.77	0.37	0.58	0.61	6.96	1.40
국 내 탄	무 연 탄	서천	57.27	26.62	4.69	0.84	1.08	0.34	5.99	1.85
		영동	52.16	29.51	9.62	0.52	0.85	1.68	3.45	-
		영월	49.51	27.78	4.36	0.35	0.83	2.08	3.05	0.28

다. 각국의 FA 관련 기준

표3은 시멘트 모르타르 또는 콘크리트 혼합재료로 사용하는 FA의 규격을 비교한 것이다. 국내 발전소에서 발생하는 FA는 강열감량을 제외한 나머지 항목에서 모두 KS규격 기준 내에 있는 것으로 보고되고 있다.

표 3 각국의 FA 관련 기준

항 목		KSL 5405	ASTM618		JICA 6201	비 고	
			F급	C급			
화 학 성 분	SiO2	최 소 %			45		
	SiO2+Al2O3+Fe2O3	" %	70.0	70.0	50.0		
	MgO	최 대 %	5.0	5.0	5.0		
	SO3	" %	5.0	5.0	5.0		
	습 분	" %	1.0	3.0	3.0	1.0	
	강열감량	" %	6.0	12.0	6.0	6.0	
	알칼리(Na2O로서)	" %	1.5	1.5	1.5		
물 리 적 성 능	분 말 도	평균입경	최 대 μm	9.0			
		비표면적	최 소 cm^2/g			2400	
		44 μm 체 잔량	최 대 %		34	34	25
	포 출 란 활 성 도	시멘트 사용시(28일)	최대조절 %	85	75	75	
		석회사용시(7일)	최 소 kg/g	56	56.2	56.2	
	소요수량비	최대조절 %	105	105	105	102	
	건축수축증가	28일최대 %	0.03	0.03	0.03		
	안 정 도	오토클레브팽창또는 수축	최 대 %	0.5	0.8	0.8	
	AE제 첨가량	최대조절 %	2.0				
	균 일 성	비표면적		15			
44 μm 체 잔량				5	5		
비중			5	5	5		
모르타르 공기량 18%를 만드는데 소요되는 AE제량			20	20	20		
시멘트알칼리반응	모르타르 팽창	14일최대 %	0.020	0.020	0.020	0.020	
압축강도비		28일최대 %				60	
		91일최대 %				70	

3) 플라이애쉬를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 성질

플라이애쉬는 둥근모양의 미립자로 이루어져 있어 시멘트 페이스트의 유동성을 개선하여 소요 반죽질기를 얻기 위한 콘크리트의 단위수량을 감소시킨다. 단위수량의 감소에 의해 콘크리트 내부의 수분이동을 줄임으로서 공기의 연행여부에 관계없이 블리딩을 줄일 수 있다.

그러나 미연소탄소량이 많은 플라이애쉬는 거친 입자의 함유비율이 높아서 단위수량을 증가시키는 경우가 있으며, AE콘크리트의 경우 미연소탄소분에 의해 AE제 등이 흡착되어 연행공기량이 현저히 감소하기 때문에 목표 공기량을 얻기 위해서는 일반적으로 AE제의 사용량이 증가된다.

① 워커빌리티

플라이 애쉬입자는 앞에서 언급한 바와 같이 대부분이 구형으로 콘크리트 믹싱시 골재와의 접촉면에서 볼베어링(ball-bearing)과 같은 작용을 하여 시멘트풀과 골재와의 사이에 마찰저항을 줄여줌으로써 콘크리트의 워커빌리티를 개선, 증대시키며 단위수량과 물-시멘트비도 아울러 감소시키는 효과를 가진다. 플라이애쉬를 사용한 모르타르의 경우 플라이 애쉬의 종류와 분말도에 관계없이 보통 모르타르보다 단위수량이 적게 요구되는 것을 알 수 있으며 그 정도는 제조공장에 따라 약간 상이함을 알 수 있다.

이와 유사한 경향으로 플라이 애쉬 20종류, 대체율 25%인 콘크리트의 연구실험 결과에서 단위수량의 감소율 4-11%범위에 있음이 보고되고 있다. 한편 블리딩 속도시험에서 구한 투수계수를 플라이 애쉬 입자의 형성, 표면상태와 관련 시킴으로써 플라이 애쉬의 구형입자가 콘크리트의 워커빌리티를 개선시키는 원인이 된다고 한다.

이외에도 플라이 애쉬의 사용은 콘크리트속의 잔골재의 미립분에

의한 상승수의 길을 차단하여 블리딩량을 감소시켜 주며 굳지않은 콘크리트의 점성과 성형성을 증대시켜줌으로써 재료분리에 대한 저항성을 향상시켜 주는 효과도 기대할 수 있다.

② 응결 및 슬럼프손실에 미치는 영향

플라이 애쉬를 사용한 굳지않은 콘크리트의 응결시간은 보통콘크리트보다 약간 늦어지는 것이 일반적이며, 응결이 지연되는 이유는 플라이 애쉬의 분말도, 화학조성 및 콘크리트의 배합의 영향 때문이라고 한다. 특히 화학 조성 중에는 미연소된 탄분량이 많을수록 응결시간을 지연시키는데 크게 영향을 미친다고 한다. 탄소함유량이 굳지않은 콘크리트의 응결시간에 미치는 영향에 관한 실험결과를 나타낸 것이 표 4 이다.

표 4 FA중의 탄소함유량이 응결시간에 미치는 영향

Fly ash source	Cement (g)	Fly ash (g)	water (ml)	LOI (percent)	응결시간 (h:min)	
					초결	종결
Control	650	0	165	-	2:10	3:35
Gallatin	406	244	169	2.35	3:25	4:40
Kingston	406	244	169	3.16	4:40	5:05
Colbert	406	244	186	10.45	4:20	6:35
Watts bar	406	424	243	15.68	6:25	7:10

이 표에서 시멘트의 60%를 플라이 애쉬로 대체했을 때 탄소함유량이 많은 경우 즉, 강열감량이 큰 플라이 애쉬를 사용한 경우의 종결시간이 2배정도까지 지연되는 결과를 나타냄을 알 수 있다. 응결이 지연되는 주된 원인은 시멘트의 수화에 의하여 생성된 Ca(OH)_2 의 농도를 낮추어줌으로써 C_2S 의 수화를 억제하기 때문이라고 설명하고 있다. 한편 플라이 애쉬의 사용은 콘크리트의 시간 경과에

따른 슬럼프 손실을 감소시키는 데 유효하다고 한다. 또한 유기혼화제를 첨가한 경우에 비이온계의 혼화제를 사용한 콘크리트가 양이온계나 음이온계의 혼화제를 사용한 콘크리트에 비하여 시간경과에 따른 슬럼프손실이 크게 나타난다.

③ 유기혼화제의 흡착에 의한 영향

플라이애쉬에 유기혼화제가 흡착하는 현상은 플라이 애쉬의 성질과 유기혼화제의 분자구조와 관계되며, 흡착량은 음이온계 계면활성제에 비하여 비이온계의 경우가 낮다고 한다. 그 이유는 비이온계 계면활성제 분자가 고체표면에 수평으로 흡착하기 때문에 흡착단면적이 음이온계나 양이온계 계면활성제에 비해 크기 때문이다. 플라이 애쉬에 유기혼화제의 흡착은 플라이 애쉬 중의 미연연탄소량의 2% 전후에서 거의 포화에 달하였다는 보고가 있다.

그런데 미분말재료를 사용한 콘크리트의 공기량은 미립자의 영향으로 인해 약간 감소되는 경향이 있다. 일반적으로 워커블한 콘크리트를 잘 다지는 경우 대체로 1%정도의 공기량이 존재하게 되나 플라이 애쉬를 사용할 경우 0.5%정도로 줄어든다. 플라이 애쉬를 콘크리트에 사용할 경우 미립자의 영향에 의한 공기포의 감소와 함께 특히 AE제를 사용할 경우 미연연탄소에 AE제가 흡착함으로써 AE제의 농도가 감소되기 때문에 시멘트의 일부를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트의 경우 소량의 공기량을 얻기 위해서 AE제의 사용량을 증가시켜 주어야 한다.

한편 Lane은 플라이 애쉬 중의 미연탄소는 플라이애쉬의 강열감량을 증가시키며 강열감량과 AE제 소요량과의 사이에는 직선관계가 있다고 보고 있다. 이러한 연구와는 달리 최근에 와서 플라이 애쉬 성분 중에 비교적 알칼리를 많이 함유하고 있는 C급 플라이 애쉬에 대한 관심이 높아지면서 플라이 애쉬 중의 알칼리가 AE공기

량에 미치는 영향이 검토되고 있다. Pistill는 콘크리트 혼합수중 알칼리의 중량이 1.0%보다 크고 1.5-2.0%보다 작을 때 vinsol resin type의 공기연행제에 대한 AE공기의 간격계수(spacing factor)가 커진다고 보고하고 있다.

④ 온도 상승

플라이 애쉬는 콘크리트의 수화열을 감소시켜 수화열 저하가 중요한 중력댐 건설에 많이 사용된다. 저칼슘 플라이 애쉬가 콘크리트의 온도상승을 감소시키는 것은 사실이나, 고칼슘 플라이 애쉬는 열발생을 반드시 감소시키는 것은 아니다. 일반적으로 열발생 정도는 강도발현에 비례하며, 몇몇 고칼슘 플라이 애쉬는 물과 매우 빨리 반응하여 과다한 열을 발생시킨다.

(5) 수밀성

포졸란 반응에서 생성되는 칼슘실리케이트 수화물은 시멘트에서 생성되는 칼슘실리케이트 수화물과는 달리 비표면적이 큰 저칼슘형 수화물로서 시멘트페이스트 조직을 치밀하게 하여 물의 침투를 억제함으로써 수밀성을 향상시킨다.

4) 플라이 애쉬를 사용한 경화한 콘크리트의 성질

① 재령에 따른 강도 증진의 효과

FA의 장기강도의 개성효과는 많이 보고되었으며, FA의 가장 큰 특징으로 알려져 있다. 따라서 재령에 따른 강도 증진 효과는 FAC의 특성을 규명하는데 중요한 요소가 된다. 그러나 FA를 이용한 콘크리트의 포졸란 반응에 관한 연구보고는 많으나 재령에 따라 매우 다양하므로 초기재령에서 FAC(fly ash concrete)의 강도특성을 파악하기

는 쉽지 않다. Whasha에 의하면 AE제 사용여부와 시멘트의 종류에 관계없이 FA로 포틀랜드시멘트의 일부를 대체한 콘크리트의 강도가 보통 콘크리트와 비교해서 1년 이상의 장기강도에서 더 크게 나타났다고 한다.

④ 탄성계수

플라이 애쉬는 콘크리트의 탄성계수에 많은 영향을 끼치지 않는다. Ghosh & Timuk는 강도와 탄성계수와의 관계를 모든 강도수준에서 플라이 애쉬 콘크리트의 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수와 비슷하다고 결론지었다.

⑤ 크리프

플라이 애쉬 콘크리트의 크리프에 관한 자료는 많지 않다. Lohita등은 연구결과에서 플라이 애쉬 콘크리트의 강도, 탄성계수, 수축 크리프 등에 대한 최적값은 플라이 애쉬 혼입률이 15%일 때이며, 혼입률이 15%이하일 때에는 크리프 증가는 무시할 수 있지만 혼입률이 그 이상이 되면 크리프는 약간 증가한다고 하였다. Yuan & Cook은 C급 FA를 첨가한 콘크리트가 보통 콘크리트나 20%를 첨가한 콘크리트보다 크리프에 의한 변형량이 큰 것으로 나타났다.

⑥ 건조수축

일반적으로 FA는 콘크리트의 건조수축에 큰 영향을 미치지 않는다. Yuan & Cook은 C급 FA를 사용한 연구로부터 FA에 의한 시멘트 대체는 건조수축에 거의 영향을 미치지 않는다고 결론지었다.

⑦ 수화열 및 체적변화

단면이 크고 매시브한 콘크리트 구조물을 여름철에 시공할 경우 시멘트

량이 크거나 조강시멘트 등을 사용하게 되면 시멘트의 수화반응으로 발생하는 수화열은 무시 할 수 없을 만큼 크다.

Davis는 콘크리트의 수화열을 줄여주기 위하여 시멘트의 일부를 플라이 애쉬로 대체하므로써 수화열 발생속도를 완화시켰다고 하며 재령 28일에서 수화열감소율은 정비례하지는 않지만 플라이 애쉬 대체율의 절반정도의 비율로 감소된다고 한다.

포틀랜드 시멘트를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트의 수화열이 보통 콘크리트보다 얼마간 낮으며 이 수화열의 발생량이 작은 점이 콘크리트의 건조수축을 줄이는 데 효과가 있을 것으로 생각된다. 이에 대한 연구실험 내용을 살펴보면 양질의 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트를 1개월 정도 건조시켰을 때 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 건조 수축량이 5%정도 감소되었으며 6개월 이상 건조시켰을 때 15~20%정도 감소되었다고 보고하고 있다.

⑧ 수밀성 및 내구성

플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 경우 포졸란반응으로 인하여 장기재령에서 수밀성이 향상된다. 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 투수시험결과 포틀랜드 시멘트 만을 사용한 보통 콘크리트와 비교해서 플라이 애쉬로 25%~30% 대체한 콘크리트의 투수계수 값이 훨씬 적은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 다시 말해서 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 수밀성이 크게 개선됨을 나타낸 것이다. 이 외에도 콘크리트 공시체 내부에 동심의 작은 구멍을 만들어 내부가 빈 공시체의 외부에서 수압을 가하는 간단한 투수시험방법을 통하여 플라이 애쉬의 사용이 콘크리트의 수밀성 향상은 침투성물질의 침투를 억제하여 콘크리트의 수밀성에 미치는 영향을 검토한 결과 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트가 사용하지 않은 콘크리트에 비해 우수한 결과를 나타냄을 보여주었다.

콘크리트 구조물의 물리, 화학적 침식에 대한 저항성을 높임으로써 내구

성을 개선한다.

또한 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트에 양질의 혼화제를 사용하여 알맞은 공기량을 연행시킬 경우 동결융해에 대한 저항성을 향상시켜 준다고 하며 플라이 애쉬속의 미립자에 의해 공기포가 감소될 경우에는 보통 콘크리트에 비해 내구성이 오히려 저하한다고 Timms는 그 원인에 대하여 설명하고 있다.

한편 Larson은 콘크리트 절단면에서 공기포의 크기와 분포를 측정 한 후 동결융해시험을 실시하였으며 이 때 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해시험에 의한 내구성은 보통 콘크리트와 비교해서 거의 유사한 결과를 얻었다고 보고하고 있다.

⑨ 내약품성

콘크리트구조물은 부식하기 쉬운 강재를 알칼리성의 콘크리트가 보호해 주기 때문에 강구조물에 비해서 내구성이 우수하며, 반영구적인 구조물로 생각되어 왔다. 그러나 근년에 와서 콘크리트 구조물의 조기열화문제가 사회적으로 크게 관심이 높아지고 있으며, 특히 항만구조물의 경우 해수중의 염소이온, 황산이온, 나트륨이온, 마그네슘이온 등의 염류에 의하여 콘크리트구조물이 염해를 입은 사례가 종종 발생하므로써 알칼리 골재반응에 의한 열화와 함께 콘크리트구조물의 내구성에 대한 신뢰성을 크게 저하시켰다. 이외에도 하수, 공장폐수, 산성토양 및 오염된 환경등과 같은 화학적인 침식을 받은 경우도 많이 발생하므로써 콘크리트구조물의 화학저항성에 대한 검토가 절실히 요망되는 시기로 생각된다.

콘크리트의 화학저항성에 대한 실험으로서는 일반적으로는 산, 염 및 유기물 등의 약액중에 모르타르나 콘크리트 공시체를 일정기간 침지하는 실험을 실시하고 있다.

2.1.2 고성능감수제

1) 개요

콘크리트용 혼화제는 1938년 미국에서 AE제가 발견된 이래 감수제, AE 감수제, 고성능감수제 등으로 개발되어 아직 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 성질개선에 크게 기여하고 있으며, 이제는 시멘트, 물, 골재와 더불어 콘크리트에 필수 불가결한 제4의 구성 재료로 일컬어지고 있다.

고성능감수제(Superplasticizer, High-range water reducing agent)는 고도의 감수효과를 얻을 수 있으므로 콘크리트의 품질 및 시공성 개선을 위하여 매우 효과적인 콘크리트용 혼화제이다.

고성능감수제는 고성능감수제, 유동화제, 고유동화제, 고강도화제, 고성능AE감수제 등 여러 가지로 불려지고 있으며, 각각 특징적인 성질을 가지는 경우가 많지만 일반적으로 고성능감수제, 유동화제, 슬럼프로스 저감형의 고성능(AE)감수제로 발전되어 오고 있다. 국내에서도 최근에 유동화제의 사용이 빈번해지고 고성능AE감수제도 개발되는 등 발전을 거듭하고 있으나, 국내의 기술력 향상을 위하여 제품의 성능개선 및 적용방법에 대한 기술개발과 관련기술자의 기술력 향상이 더욱 요구되고 있는 실정이다.

2) 고성능감수제의 개발현황

가. 외국의 고성능감수제의 개발현황

일반적으로 품질이 좋은 콘크리트를 제조하기 위해서는 단위수량을 낮게 설정하여 내부조직을 치밀하게 하는 것이 좋지만 이러한 콘크리트는 시공성이 나쁜 편 배합의 콘크리트가 되므로 품질을 좋게 하는 것과 시공성을 좋게 하는 것은 이율배반적이라 할 수 있다. 기존의 AE제, 감수제 및 AE감수제는 콘크리트의 워커빌리티를 개선하고, 동결융해저항성을 향

상시키며 감수효과에 의한 시멘트량의 저감 및 초기강도를 확보하기 위한 목적으로 현재까지도 콘크리트공사에 많이 적용되고 있다.

일반적으로 AE감수제는 10~15%의 감수효과가 있으므로 동일한 시공성을 확보하면서도 단위수량을 낮출 수 있지만, 1960년대에 접어들어 AE감수제보다도 더욱 뛰어난 20~30%의 감수효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 사용량이 증대해도 응결지연 및 공기량 과잉현상이 적은 고성능감수제가 개발되었다. 유동화제는 1970년대에 서독에서 개발되어 1974년에는 「유동화콘크리트의 제조와 시공에 관한 지침」이 발간되었고 1976년 영국, 1981년 캐나다, 1983년 일본에서 유동화콘크리트에 관한 지침이 작성되었다. 미국에서는 1980년에 ASTM C 494에 Type F (표준형)과 Type G(지연형)로 고성능감수제의 규격을 제정하였으며, 1985년에는 ASTM C 1017에 유동화제의 품질기준을 규정하였다. 이러한 고성능감수제의 출현은 골재의 품질악화로 인한 단위수량 증가를 방지함은 물론 콘크리트의 품질을 확보하면서도 배근이 밀집된 부위의 충전성을 향상시키고 펌프압송공법을 가능케 하였다.

1980년 후반에는 화학혼화제에 대한 연구개발이 계속되어 유동화제의 결점인 슬럼프로스 현상을 방지할 수 있는 고성능(AE)감수제가 개발되므로써 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화, 고성능화, 고기능화에 기여하게 되었고, 최근의 고강도콘크리트 및 고유동콘크리트의 제조에 결정적인 역할을 하고 있다. 이미 일본의 건축학회 및 토목학회에서는 1992년 6월과 1993년 7월에 고성능AE감수제를 사용한 콘크리트의 시공지침(안)을 발간하였으며, 1995년 3월에는 JIS A 6204 「콘크리트용 화학혼화제」에 AE제, 감수제, AE감수제 이외에 고성능 AE감수제의 품질규격을 추가로 규정하기에 이르렀다.

나. 국내의 고성능감수제의 개발현황

국내에서는 1980년대에 유동화제가 도입된 이후 계속되어 온 건설경기

의 활황에 힘입어 많은 업체에서 콘크리트용 혼화제가 개발되어 현장에 적용되고 있다. 현재 KS F 2560 「콘크리트용 화학혼화제」에는 AE제, 감수제, AE감수제를 대상으로 하고 있으며, 1996년 1월 현재 KS 표시 허가 업체는 24개에 달하고 있다. 그러나 고성능감수제는 KS F 2560의 적용대상에 포함되지 않을뿐더러 별도의 KS규격도 마련되어 있지 않지 만 이미 KS 표시 허가업체 및 미허가 업체의 일부에서는 유동화제 및 고성능 AE감수제를 생산·공급하고 있다. 필자의 조사결과에 따르면 1994년 말 현재 유동화제 생산업체는 20개 이상인 것으로 추정되며 최근에는 표 5와 같이 기존의 유동화제를 개선한 슬럼프로스 억제효과가 큰 고성능(AE)감수제를 개발하여 생산·공급하는 업체도 생겨나고 있다.

표5 국내 시판의 고성능(AE)감수제

상 품 명		주 성 분	사용량 (C×%)	제조회사
국내 업체	Lignal - SG	리그닌 + 유기산	0.5~1.0	대주상사
	Selflow R - 150	나프탈렌 + 고감수분산제	0.5~2.0	"
	Ligace - GR	나프탈렌계	0.8~2.0	세일콘
	EZCON	복합폴리머중합체	0.5~3.0	이지콘
	Phornix - H.P.C	나프탈렌 + 폴리칼본산	0.3~1.5	진웅화학
외국계 업체	Might - 150RX	나프탈렌 + 리그닌	0.15~2.4	동양MK
	Sikament 92	유기산계	0.3~2.0	시카코리아
	Sikament 1000X	멜라민계	0.5~1.5	"
	Daracem - 100	나프탈렌계	0.3~3.0	한국그레이스

유동화제를 포함한 고성능감수제의 KS규격은 아직 규정되어 있지 않지만 대한토목학회에서는 1991년에 「유동화콘크리트의 사용지침(안)·동해설」을 발간하고, 1994년에는 건설부 제정 건축공사표준시방서에 유동화콘크리트에 대한 시방이 삽입되었으며 그 부속서에 콘크리트용 유동화제품 질기준이 규정되었다. 또한 최근에는 슬럼프로스 저감형의 고성능AE감수

제의 도입 및 국내개발이 이루어져 현장적용단계에 진입하는 등 국내의 혼화제 개발이 급속도로 추진되고 있으므로 이것을 사용한 콘크리트의 시공지침(안)의 수립 및 고성능AE감수제의 품질기준 설정이 요망된다.

3) 고성능 감수제의 특성

고감수 효과를 가진 콘크리트용 혼화제의 통칭으로 사용되는 고성능감수제는 사용목적 및 성능에 따라서 여러 가지로 구분될 수 있지만, 일반적으로 슬럼프로스가 큰 현장첨가형의 유동화제와 슬럼프로스가 적은 공장첨가형의 새로운 고성능(AE)감수제로 대별할 수 있다.

AE감수제는 사용량이 시멘트 중량의 1.0%이하로 제한되는데 비하여 고성능감수제는 2.0%이상까지도 사용가능하므로 AE감수제의 감수율 10~15%보다 우수한 20~30%의 감수효과를 발휘할 수 있다. 공장제품을 제조할 경우, 특별히 고강도를 필요로 하며 동결융해저항성의 확보가 필요없을 때에는 AE성분이 함유되어 있지 않은 고강도용의 고성능감수제를 사용하지만, 유동화제는 레미콘공장 또는 현장에서는 AE콘크리트인 베이스콘크리트에 첨가하여 사용되고 있다. 국내의 현장 유동화제는 AE제나 감수제 및 AE감수제와 동일한 계면활성제로서 시멘트 입자의 분산작용에 의해 감수효과를 나타낸다. 그러나 유동화제는 AE감수제보다도 높은 감수효과를 나타내고 일반적으로 공기연행작용이 없으므로 첨가량 증가에 따른 공기량의 증가도 없으며, 응결지연현상도 거의 없지만 시간의 경과에 따른 콘크리트의 슬럼프로스가 크다는 단점이 있다. 유동화제를 주성분별로 구분하면 나프탈렌계, 멜라민계, 리그닌계 등이 대표적인 것이다.

고성능 AE감수제는 유동화제와 동일한 고감수효과를 얻을 수 있으면서도 유동화제의 단점인 슬럼프로스 현상을 대폭적으로 개선한 최신의 콘크리트용 화학혼화제로서 AE제나 AE감수제는 제1세대, 유동화제는 제2세대, 고성능AE감수제는 제3세대의 혼화제라고 일컬어지기도 한다.

슬럼프로스 저감형 고성능감수제는 AE성분이 함유된 것(고성능 AE감수제)과 AE성분이 함유되어 있지않은 고성능감수제가 있으나, 여기에서는 편의상 슬럼프로스 저감형의 제3세대 고성능감수제를 통칭하여 “고성능감수제”로 표기하기로 한다.

국내의 현장에서는 80년대 이후 유동화제를 많이 사용되어왔으며 국내에서도 최근에 개발된 고성능AE감수제는 현장적용성은 물론 콘크리트의 고강도화 및 고성능화에 부응하여 향후 사용량이 대폭적으로 증가할 것으로 예상된다.

고성능 AE감수제를 주성분별과 슬럼프유지기구별로 분류하면 표6과 같다. 여기에는 나프탈렌계나 멜라민계와 같이 공장제품에 사용되는 고성능감수제나 유동화제와 동일한 계통의 것이 있지만 슬럼프로스 현상을 방지할 수 있도록 유동화제의 성분에 슬럼프유지성을 부여할 수 있는 특별한 성분이 첨가되어 있거나 전혀 다른 주성분을 가지고 있다.

표6 고성능 AE감수제의 성분에 의한 분류

분 류		성 분
주 성 분	나프탈렌계	나프탈렌설폰산 포르말린 축합물과 특수계면활성제 (변형리그닌설폰산 등)
		나프탈렌설폰산 포르말린축합물과 반응성(徐放性) 고분자
	폴리칼본산계	폴리칼본산 고분자
		폴리칼본산 고분자화합물과 架橋고분자
		末端설폰산기를 가진 폴리칼본산기를 함유한 多元고분자
	멜라민계	멜라민설폰산과 변성 리그닌
		변성메틸롤 멜라민 축합물과 수용성 특수고분자
아미노설폰산계	芳香族아미노 설폰산계 고분자	
슬럼프유지기구	1성분계	분산유지성을 가지는 분산성(감수성) 성분
	2성분계	분산성(감수성) 성분+분산유지성분
	3성분계	분산유지성을 가지는 분산성(감수성)성분 + 분산유지성분

2.2 동결융해 기구 및 대책

2.2.1 개요

콘크리트는 온도나 습도, 수분, 탄산가스, 염분 및 각종 화학물질 등의 영향을 장기간 받음으로 인하여 점차적으로 내구성이 저하되어 간다. 그 중에서도 겨울철에 발생하는 동결융해작용에 의한 내구성 저하는 콘크리트 열화작용의 대표적인 것 중의 하나이다. 우리나라도 삼한사온의 계절적 특성을 가지고 있으며, 겨울철에는 영하의 날씨가 계속되기도 한다. 따라서 동절기에 콘크리트를 타설하는 경우에는 타설 초기에 동결될 위험성이 있으며, 이미 건설되어 있는 기존의 콘크리트 구조물도 동결융해의 반복작용에 의해 장기적으로 균열이 발생되고, 내구성이 저하될 가능성이 상존하고 있다(이용호, 1994).

경화콘크리트의 동해란 콘크리트 내부의 수분이 0℃ 이하로 되었을 때의 동결팽창에 의하여 발생하는 것이며, 오랜 기간에 걸쳐 동결과 융해의 반복작용에 의해 콘크리트가 서서히 열화하는 현상을 말한다. 동해를 받은 콘크리트 구조물에서는 콘크리트 표면에 스케일링, 미세 균열 및 팝아웃 등의 형태로 열화가 발생하는 것이 일반적이며, 시공 초기에 콘크리트가 아직 굳지 않은 상태에서 동결되어 압축강도 등의 성질에 악영향을 미치는 것을 초기동해라고 하며, 경화콘크리트의 동해와는 구별되는 개념이다.

초기동해는 일반적으로 콘크리트 타설 후 시멘트의 수화가 충분히 진행되지 않아 콘크리트의 강도가 5.0 MPa에 도달하기 이전에 발생하는 것으로서, 아직 수화되지 않은 많은 잉여수분이 존재하는 타설 초기에 영하의 날씨에 노출되게 되면 콘크리트는 동결하게 되며 내부의 수분을 얼음으로 변하게 된다. 이와 같이 콘크리트 내부의 수분이 얼음으로 변

하는 과정에서 수분은 얼음의 핵이 형성된 곳으로 집중되기 쉬우며, 따라서 국소적으로 직경이 큰 공극이 형성되게 된다. 이것이 초기에 동해를 받는 콘크리트가 나중에 충분히 수화되더라도 소용의 강도가 발현되지 않는 원인이며, 특히 콘크리트의 동결은 표면으로부터 진행되므로 표면의 온도가 내부의 온도보다 낮아지게 된다. 그러므로 초기동해를 받는 콘크리트는 표면의 강도가 발현되지 않아 푸슬푸슬해지기 쉬우며, 결국 스케일링이라는 형태의 피해를 입게 된다.

그러나 장기적인 측면에서의 동해는 초기동해와 달리 강도가 충분히 발현되어 있는 경화콘크리트의 상태에서 나타나는 현상이다. 즉 기존의 구조물에서 외기에 접하는 콘크리트의 내부에는 비나 눈에 의해 수분이 침투하게 되며, 콘크리트가 동결하면 이 수분이 얼어서 팽창하였다가 다시 녹으면 수축하는 반복현상이 발생하면서, 계면이나 공극이 많은 모르타르 부분이 미시적으로 파괴되어 간다(이종호, 1991). 그러므로 겨울철이 있는 우리나라와 같은 지역에서 콘크리트 구조물을 장기간 사용하기 위해서는 동결융해 작용에 대한 메커니즘과 원인 분석을 통하여 적절한 대책수립이 필요하다.

동해에 의한 손상정도는 콘크리트의 배합(단위 시멘트량, 물-시멘트비 등), 골재의 품질, 공기량 등 콘크리트에 관련된 요인과 부재의 단면형상, 철근량 등 콘크리트 구조체에 관한 요인 및 수분의 공급 정도, 일사의 영향, 외기온(최저온도와 동결융해횟수) 등 콘크리트 구조물이 처해 있는 환경조건에 관한 것 등 많은 요인에 의하여 결정된다는 것이 이미 알려져 있다. 동해는 AE콘크리트를 일반적으로 사용하고부터는 구조물의 내력에 영향을 미칠 정도의 소상은 비교적 작아졌다고 할 수 있지만 미관상, 사용상 영향을 미치는 경우가 많고 유지관리상 문제가 되고 있다.

2.2.2 동결융해기구

자연적인 혹은 인위적인 온도의 상승, 강하로 인하여 콘크리트 내부의 온도가 간극수의 동결점 아래에서 그 이상으로, 동결점 이상에서 그 이하로 떨어지는 온도변화가 있을 때 콘크리트구조물은 성능 저하의 원인이 되는 동결융해 작용을 받게 된다(Cordon, 1966).

이에 대한 피해사례는 곳곳에서 존재하여 구조물의 부분적인 내구성의 저하를 유발하고 때로는 그 정도가 심한 경우 구조물 전체의 사용성에 큰 타격을 주기도 한다. 따라서 콘크리트 구조물의 동결융해 작용에 대한 파괴사례 분석과 원인규명에 대한 연구가 지속적으로 수행되어오고 있다.

Power, Helmute, Litvan, Verbeck, Landgren 등에 의해 콘크리트 구조물의 동결융해 작용에 대한 연구가 수행되고 있으며 좀 다른 측면에서 T.Faulker, T.Walker도 연구를 수행하였다.

이 연구들을 종합적으로 분석하여 동결융해 작용에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하를 살펴보면 크게 다음 두 가지의 가설로써 그 원인이 설명 되고 있다.

- ① Hydraulic pressure hypothesis (간극수압 가설)
- ② Frost action hypothesis (흙의 동상 가설)

이 두 가설을 중심으로 동결융해작용의 발생기구를 살펴보면 다음과 같다.

경화된 콘크리트가 젖어있는 상태에서 온도가 낮아지면 시멘트 모르타르의 모세간극 안에 있는 간극수가 얼게 되는데 이때 약 9.1% 정도의 체적이 증가하게 된다. 간극에 따른 간극수의 상이한 빙점에 의해 얼지 않은 부분의 간극수가 동결부분의 수분이 소실되는데 대한 저항력으로

간극수압이 발생하고 모세관 작용으로 동결부분의 간극은 점진적 팽창을 한다. 또 연속적인 간극수의 동결과 용해가 일어나는 경우 체적변화가 심화되고 반복되는 동결용해는 누적효과를 나타낸다. 이 작용을 주로 시멘트 경화체(Concreat Paste)에서 일어나고 콘크리트 배합시에 간극이 공기로 채워지면 이로 인해 동결용해작용은 점진적으로 진행되는 손상 과정이다. 이는 부분적으로 콘크리트의 열전달율에 기인하고, 또 부분적으로 얼지 않은 간극수에 용해된 알칼리성분의 점차적인 집중에 기인하며, 그리고 부분적으로 간극의 크기에 따른 동결점의 다양함에 기인한다.

간극안의 얼음체에 표면인장력은 체적이 작을수록 크게 되며, 따라서 동결은 큰 간극으로부터 시작하여 작은 간극으로 전개된다. 간극이 매우 작은 경우의 겔 간극(Gel pores)은 -78°C 이상에서는 그 크기가 너무 작아 얼음결정을 이루기가 힘들므로 실제로는 얼음결정이 형성되지 않으나 온도가 강하함에 따라 gel상태의 간극수와 얼음체의 엔트로피(Entropy)차이로 인하여 겔 간극수(gel water)는 얼음이 형성된 간극으로 이동할 수 있는 에너지 장을 받게 된다. 이는 동결된 얼음 결정을 크게 하고 체적의 팽창을 발생 시킨다.

동결용해 반응에 대한 초기의 연구는 이 간극수압가설(hydraulic pressure hypothesis)이 지배적인 견해였으나 이후 Power, Helmuth 등의 연구에 의해 이 가설이 반드시 시험결과와 일치하지 않음을 발견하였다. 시멘트 경화체의 동결도중 간극수의 이동이 전적으로 동결부분의 외부로 이동하는 것이 아니라 동결부분으로 간극 사이의 물이 이동하는 경우도 발생하고 또한, 체적팽창(dilatation)이 동결속도가 증가함에 따라 감소하는 것도 발견하였다. 따라서 원래 흙의 동상(frost action)을 설명하기 위한 가설인 Collinsd의 이론이 적용가능성을 검토하였다. 따라서 두 가지 요인에 의한 팽창압력이 존재하게 된다.

첫째는 간극수의 동결에 의하나 약 9.1%의 체적팽창이다. 그리고 잉

여의 수분이 간극 밖으로 밀려나가는데 동결속도는 얼음체의 선단에 의해 밀려 외부로 유출되는 물 간극수의 속도를 결정한다. 이때 발생하는 간극수압은 이 흐름에 대한 저항 즉, 잉여의 수분을 수용할 수 있는 공기간극(air void)과 연 공동(freezing cavity) 사이의 투수성과 경로의 길이에 따라 결정된다. 두 번째 힘은 상대적으로 작은 개수의 얼음결정체의 성장에 따른 간극수의 확산에 기인한 것이다.

수많은 연구에 의하면 후자의 동결융해반응 성능저하 기구가 콘크리트 동결융해의 손상에 중요한 요인으로 믿어지고 있다. 이 확산(Diffusion)은 용해액에서 동결되는 순수한 물에 의해 집중되는 용질의 국부적인 상승으로 발생하는 삼투압의 작용에 의해 발생한다. 콘크리트의 온도가 동결온도 이하로 떨어졌을 때 먼저 super cooling의 초기단계가 일어나고 이후 비교적 큰 모세관에서 얼음결정을 형성하고, 이는 얼지 않은 알칼리 함유분을 증가시키고, 동결된 공동의 용액으로 주위의 얼지 않은 부분의 물 분자를 확산시키게 하는 삼투장(osmotic potential)을 형성한다. 얼음결정체에 인접한 간극수의 묽음(dilution)은 얼음의 크기를 더욱 크게 하고 (ice accretion) 반면 얼지 않은 부분으로 부터의 간극수의 이동은 이 부분을 수축하게 한다.

결국 이러한 원인에 의해서 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 넘었을 때 이 손상의 정도는 표면의 층 분리로부터 시작되어 구조물 두께로 진전되는 얼음층에 의하여 완전한 붕락까지 다양하다.

2.2.3 동결융해 대책

동결융해에 의한 균열의 발생형태는 종방향 및 국부적인 콘크리트의 파손으로 나타나게 되는데, 이를 방지할 수 있는 방안은 다음과 같다.

① AE제, AE감수제, 고성능 AE감수제 사용 : 적정한 공기량(3~6%)을 확보할 수 있으며, 이에 따라 응력의 흡수능력이 증대하게 된다.

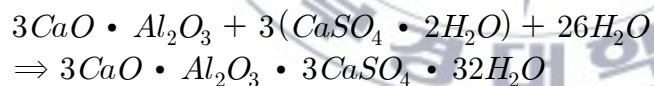
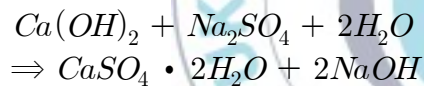
② 혼화재료의 사용 : 플라이애쉬 및 실리카흙, 슬래그 등을 사용함으로써 시멘트 경화체 내부의 조직을 치밀하게 하여, 응력이 발생할 경우 저항성이 커지는 효과를 가지게 된다.

③ 물/시멘트비 저감 : 모르타르의 매트릭스를 밀실한 조직으로 구성하게 한다

④ 단위수량 저감 : 동결이 가능한 수분함량을 최소화하여 응력의 발생을 감소시킨다.

2.3 황산나트륨에 노출된 시멘트 경화체의 성능저하 메커니즘

경화된 시멘트 경화체가 공장지대, 산성토양, 화산지대 및 해양환경 등에 노출된 경우 황산염 이온(SO_4^{2-})이 침투한 후 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 생성된 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 의 생성으로 연화작용을 일으킨 후 에틀링자이트를 생성하여 팽창작용을 일으키게 된다.



특히 황산나트륨에 의한 시멘트 경화체의 성능저하는 에틀링자이트에 의한 팽창이 주요원인으로 보고되고 있으며, 아울러 이수석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)에 의한 연화현상도 성능저하의 한 원인으로 지적되고 있다. 황산이온에 의하여 콘크리트 표면의 시멘트 페이스트 부분이 침식되어 용해되는 토포케미칼반응(Topochemical reaction)으로 시멘트 경화

체의 성능저하가 생기며 콘크리트의 강도저하 현상 및 체적변화에 의한 팽창이 발생하여 콘크리트의 품질을 크게 저하시키게 된다. 따라서 시멘트 경화체의 황산염침식에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 황산염 이온의 시멘트 경화체 중의 확산을 억제시키며, 물-시멘트 비를 낮출 뿐만 아니라 결합체에 포졸란 재료를 적절히 혼합하여 사용하는 것이 효과적이라고 알려져 있다(박영식 외, 1998).



3. 실험계획 및 방법

본 연구에서는 물-시멘트비(W/C) 40%, Flow 치는 115~130cm 범위를 만족하도록 한다. 잔골재는 부순모래와 강모래를 혼합한 혼합모래를 사용하고 결합재로 플라이애쉬를 사용시멘트 단위중량의 20%를 치환하여 사용한다.

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

본 연구에서는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하며, 물리·화학적 특성은 표 7과 같다(Adam, 1997).

표 7 보통포틀랜드시멘트의 특성

물리적 특성			화학조성 (%)					
밀도	강열감량 (%)	불용잔물 (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.14	0.5~1.3	0.2~0.9	21.0~22.5	4.5~6.0	2.5~3.5	63.0~66.0	0.9~3.3	1.0~2.0

3.1.2 결합재

본 연구에서 사용된 광물질 혼화재료는 삼천포화력발전소에서 생산되는 분말도 4,440cm²/g인 Class F 플라이애쉬를 사용하였으며, 물리·화학적 특성은 물리·화학적 특성은 표 8과 같다.

표 8 플라이애쉬의 물리·화학적 특성

분말도 (cm^2/g)	비중	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	SO_3	Fe_2O_3
4,440	2.15	49.66	22.88	0.38	8.91	3.97	0.70	0.27	8.16

3.1.3 골재

본 연구에 사용한 골재는 부산근교에 위치한 김해지역에서 생산되는 부순골재(쇄석, 부순모래)를 사용한다. 특히 잔골재는 부순모래에 입도조정용으로 낙동세사를 혼입하여(부순모래:낙동세사=7:3) 사용한다.

3.1.4 혼화제

본 연구에서는 국내 D사에서 생산되는 폴리카르본산계의 고성능AE감수제를 사용하며, 물리·화학적 특성은 표 9와 같다.

표 9 고성능AE감수제의 물리·화학적 특성

종류	항목	밀도	형태	pH	주성분
	고성능AE감수제	1.04 ± 0.05	연황색 액체	11.5 ± 1.5	폴리카르본산계

3.2 실험방법

3.2.1 사용 골재의 물성시험

본 연구에 사용된 사용 골재의 물성을 파악하기 위하여 한국산업규격 (Korean Standards, KS)에서 정하는 규정에 준하여 각종 시험을 실시한다.

1) 시료의 채취

골재의 대표적인 특성을 시험하기 위해 「KS F 2501 시료의 채취 방법」에 준하여 골재의 대표적 시료를 채취한다.

2) 체가름 시험

체가름 시험은 「KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법」에 준하여 시험을 실시하며, 배합설계 및 골재의 품질관리 등에 필요한 골재의 입도, 조립률 등의 물성을 파악할 수 있다.

3) 밀도 및 흡수율 시험

밀도 및 흡수율 시험은 「KS F 2504 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법」에 준하여 실시하며, 콘크리트의 배합설계에 있어서의 골재의 절대용적과 빈틈 및 사용수량을 파악할 수 있다.

5) 안정성 시험

잔골재의 안정성 시험은 「KS F 2507 골재의 안정성 시험방법」에 준하여 실시하며, 기상작용에 대한 골재의 내구성을 조사하는 시험으로 골재를 사용한 콘크리트의 기상작용에 대한 내구성을 판단하기 위한 자료를 얻을 목적으로 실시한다.

6) 씻기 시험

잔골재의 씻기 시험은 「KS F 2511 골재에 포함된 잔입자(0.08mm체를 통과하는)시험방법」에 준하여 시험을 실시한다. 콘크리트의 강도, 내구성, 건조수축 및 작업성 등의 물성에 많은 영향을 미치는 0.08mm체를 통과하는 미립자의 양을 파악하기 위하여 실시한다. 「KS F 2511 골재에 포함된 잔입자(0.08mm체를 통과하는)시험방법」에 준하여 시험을 실시한다.

7) 유기불순물시험

잔골재의 유기불순물시험은 잔골재 중에 함유되어 있는 유기불순물의 함유정도를 파악하고, 그 모래의 사용 적부를 판정하기 위해 「KS F 2510 콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기불순물시험 방법」에 준하여 시험을 실시한다.

3.2.2 모르타르의 혼합

모르타르의 혼합은 KS L 5109의 혼합방법에 준하여 실시하며 그 방법은 다음과 같다.

모르타르 혼합 방법 : 건조한 패들 및 혼합용기를 혼합기의 제자리에 놓는다. 다음에 1배치의 재료를 다음 순서에 따라 혼합한다.

- a) 혼합수 전량을 혼합 용기 안에 붓는다.
- b) 시멘트를 물 안에 넣고 혼합기를 시동하여 제1속으로 30초 동안 혼합한다.
- c) 제1속으로 혼합하고 있는 동안 30초에 걸쳐 모래 전량을 서서히 가한다.
- d) 혼합기를 정지하고 제2속으로 바꾸어 30초동안 혼합한다.
- e) 혼합기를 정지하고 모르타르를 90초 동안 방치한다. 이 기간의 처

음 15초 동안에 용기의 측면에 부착한 모르타르를 전부 긁어 내리고, 이 시간의 나머지 시간을 용기에 뚜껑을 덮어 둔다.

f) 제 2속으로 60초 동안 혼합하고 혼합을 끝마친다.

g) 재혼합을 요할 때에는 용기의 뒷면에 부착된 모르타르 전부를 재혼합 전에 스크레이퍼로 속히 속히 배치 안에 긁어 내려야 한다.

3.2.3 동결 용해 시험

동결 용해 시험은 동결용해의 급속 반복에 대한 콘크리트 공시체의 저항을 구하기 위한 것으로, KS F 2456 「급속 동결 용해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법」에 준하여 시험을 실시한다. 동결용해 시험방법의 종류로 수중 급속 동결 용해 시험 방법(방법 A)과 기중 급속 동결 후 수중 용해 시험 방법(방법 B)이 있으며 본 연구에서는 방법 B로 시험을 실시한다. 그림 1은 본 연구에 시험에 사용된 동결 용해 시험기의 전경이다.

동결 용해는 다음과 같은 순서로 이루어진다.

① 우선 적당한 온도 측정 장치가 묻혀 있는 시험용 공시체와 유사한 콘크리트를 만들어 이를 조절용 공시체로 한다. 조절용 공시체의 온도 측정에 관한 동결 용해 시험의 요구 조건과 일치시켜 공시체의 캐비닛 내의 각 점에서 온도 변화의 극값(최대값 또는 최소값)을 찾아 낼 수 있도록 조절용 공시체의 위치를 여러 번 변경시킨다.

② 동결 용해 1 사이클은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하며 원칙적으로 4 °C에서 -18 °C로 떨어지고, 다음에 -18 °C에서 4 °C로 상승되는 것으로 한다. 각 사이클에서 공시체 중심의 최고 및 최저 온도는

각각 $(4\pm 2)^\circ\text{C}$ 및 $(-18\pm 2)^\circ\text{C}$ 의 범위 내에 있어야 하고, 언제라도 공시체의 온도가 -20°C 이하 또는 6°C 이상이 되어서는 안 된다.

③ 동결 용해 1 사이클 소요 시간은 2시간 이상, 4시간 이하로 한다. 본 연구에서 사용된 B방법의 경우 동결용해 총 시간의 20 %보다 적게 사용하여서는 안 된다.

④ 임의의 공시체 중심에서의 온도가 3°C 에서 -16°C 로 떨어지는데 소요되는 시간은 냉각 시간의 $1/2$ 이하가 되어서는 안 되고, 또 -16°C 에서 3°C 로 상승하는데 소요되는 시간은 가열 시간의 $1/2$ 이하가 되어서는 안 된다. 상호 비교를 목적으로 하는 공시체에서는 임의의 공시체의 중심 온도가 2°C 에서 -12°C 로 변화하는데 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 냉각시간의 $1/6$ 이상 차이나서도 안 된다.

또한 임의의 공시체의 중심 온도가 -12°C 에서 2°C 로 변하는데 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 가열 시간이 $1/3$ 이상 차이나서는 안 된다.

⑤ 공시체의 중심과 표면의 온도차는 항상 28°C 를 초과해서는 안 된다.

⑥ 동결 용해에서 상태가 바뀌는 순간의 시간이 10분을 초과해서는 안 된다. 36 사이클을 초과하지 않는 범위의 간격으로 용해상태에서 시험장치로부터 공시체를 꺼낸 후 실험을 할 경우에는 예외로 한다.



그림 1 동결융해장치

3.2.4 시편의 제작 및 양생

한국산업규격에서 정하는 「KS L 5109 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법」에 준하여 모르타르 믹서를 사용하여 제작한다. 시편은 「KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법」에 준하여 50mm 입방 시험체의 틀을 사용하여 압축강도 측정용 시편을 제작한다.

시편은 비교용으로 일반 시멘트 모르타르를 사용한 경우와 내구성에 효과가 있는 결합재(플라이애쉬)를 일정량 첨가하여 제작한다. 이렇게 제작된 모든 시편은 28일 동안 표준양생을 실시한 것을 0 싸이클로 하여 계속해서 다음과 같은 세 가지의 유형으로 동결융해시험을 실시한다. 첫 번째 유형으로 그림 2와 같이 동결융해를 실시하지 않고 담수에서 계속해서 양생을 실시하는 경우이다.



그림 2 담수양생 시편

두 번째로 동결융해만을 실시하는 경우이며, 마지막으로는 10% 황산나트륨 용액에서 동결융해를 받는 경우이다. 다음 그림 3은 동결융해와 복합 열화과정을 나타내는 모식도이고, 그림 4는 실제 동결융해 시험 장치 내부의 모습을 나타낸 것이다. 우선 두 개의 용기를 준비하여 A 용기에는 담수, B용기에는 10% 황산나트륨 용액을 넣고 각각의 모르타르를 넣은 다음 동결융해를 실시한다. 온도센서는 동결융해 시험기 내부의 온도 측정용 공시체에 중심부까지 구멍을 뚫어 센서를 설치한다.

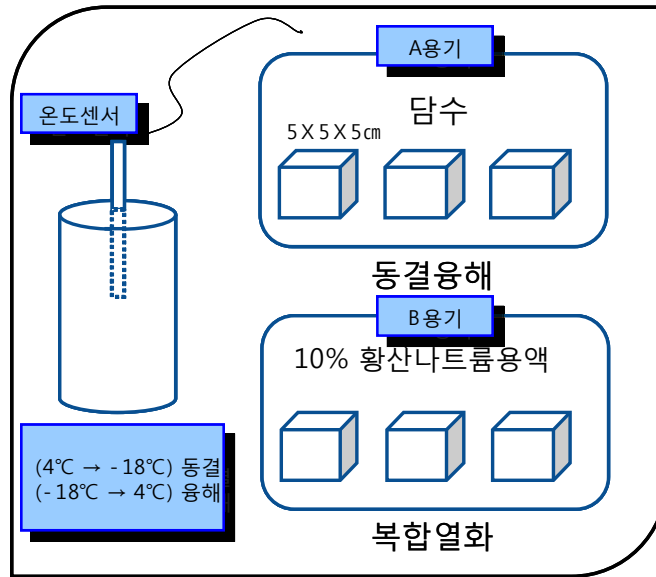


그림 3 동결융해장치 내부의 모식도



그림 4 동결융해장치 내부

이렇게 설치된 용기의 모든 시편은 0, 30, 60, 90, 180, 240, 300 사이클까지의 동결융해를 실시한 후 각 사이클별 외관조사, 단위중량, 압축강도를 측정하여 비교한다.

3.2.5 굳지 않은 모르타르 시험

모르타르의 플로우 측정은 「KS L 5111 시멘트 시험용 플로우 테이블」에 준하여 수동식 플로우 테이블을 사용하여 측정한다.

3.2.6 경화한 모르타르 시험

일반 표준양생을 기준으로 하고 동결융해와 복합열화(동결융해+황산염 침적)에서 경화한 모르타르의 대표적인 물리적 특성인 단위중량과 압축강도 변화를 측정하기 위해 0 사이클부터 300 사이클까지의 변화 양상을 살펴본다.

3.2.7 양생수(침적용액) 및 동결융해 조건

본 연구에서는 동결 융해 및 복합열화에 대한 기초물성의 평가를 위해 크게 3가지로 구분하여 양생한다.

첫째로 계속 담수에 양생시켜 일반적 특성변화를 관찰하고, 둘째로 동결 융해기기에 담수를 이용하여 열화의 진행정도를 측정하고, 셋째로 동결 융해 기기에 10% 황산나트륨 용액을 이용하여 복합열화 조건 하에서의 기초물성 변화를 측정한다.

참고로 콘크리트 표준시방서에 규정된 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 노출정도에 대한 평가 및 물-시멘트비는 다음 표 10과 같다.

표 10 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 최대 물-시멘트비(%)

황산염 노출정도	토양내의 수용성 황산염(SO ₄) (%)	물 속의 황산염(ppm)	시멘트의 종류	물-시멘트비 (%)
무시할 수 있음	0.00~0.10	0~150	-	-
보통	0.10~0.20	150~1,500	보통포틀랜드시멘트+포졸란 플라이애쉬시멘트 중용열포틀랜드시멘트 고로슬래그시멘트	50
심함	0.20~2.00	1,500~10,000	내황산염포틀랜드시멘트	45
매우 심함	2.00초과	10,000초과	내황산염포틀랜드시멘트 +포졸란	45



3.4 시편제작

본 연구에서는 결합재와 양생조건의 변화를 적절히 관찰해 볼 수 있는 적당한 수량의 모르타르 시편을 제작한다. 결합재는 플라이애쉬를 시멘트 단위중량의 20% 치환한다. 표준양생 후 동결융해 및 복합열화 조건에서는 각각 0, 30, 60, 90, 180, 240, 300 사이클이 경과한 후의 단위중량과 압축강도 변화를 살펴보기로 한다. 이를 위해 다음의 표 11과 같이 총 144개의 시편을 제작한다.

표 11 제작 시편

배합종류	양생종류	사이클 수	압축강도	중량변화	비고
OPC	담수양생	7	21	3	
	동결융해	7	21	3	
	복합열화	7	21	3	
	계	-	63	9	
OPC + F.A 20%	담수양생	7	21	3	
	동결융해	7	21	3	
	복합열화	7	21	3	
	계	-	63	9	
계			126	18	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 사용골재의 품질 특성

본 연구에 사용된 골재의 품질시험 결과는 표 12와 같다.

표 12 사용골재의 품질특성

시료	항목	조립률	밀도	흡수율	마모율	단위용	유기	0.08mm	실적률	편장	안정성
		(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	적중량					
부 순 골 재	KS 규격	-	2.5이상	3.0이하	-	-	표준색	7.0이하	53이상	-	10이하
	부순 모래	4.14	2.54	2.3	-	1690	담황색	3.8	67	-	2.0
	KS 규격	6~8	2.5이상	3.0이하	40이하	-	-	1.0이하	55이상	20이하	12이하
	쇄석	7.12	2.70	1.3	12	1494	-	0.2	55	8	3.2

표 12의 사용골재 품질특성을 살펴보면, 잔골재로 사용된 부순모래의 특성상 조립률이 4.14로 다소 높은 결과치를 얻었으며, 밀도 및 단위용 적중량은 KS 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 잔골재 중에 함유되어 있는 유기불순물의 함유정도를 파악하기 위한 유기불순물시험을 실시한 결과, 표준용액의 황적색보다 연한 담황색으로 KS 규정을 만족하였다. 또한 부순모래에 포함된 미립분의 양을 파악하기 위해 0.08mm체 통과량시험을 실시한 결과, 3.8%로 본 실험을 하기에 적합한 골재로 판명되었다.

4.2 굳지 않은 모르타르의 품질 특성

부순모래 70%와 낙동세사 30%를 혼합 사용한 굳지 않은 시멘트 모르타르의 기초특성을 파악하기 위해 Flow치를 측정한 결과 115~130mm 사이의 값을 모두 만족하였다.

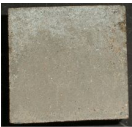





4.3 경화한 모르타르의 품질 특성

4.3.1 외관형상

담수양생과 동결융해 및 복합열화 환경에서 300 사이클까지 양생시킨 시편의 외형적 변화 특성은 표 13과 같이 나타났다. 비교용으로 양생시킨 담수양생은 거의 외형 변화가 없이 깨끗한 상태로 나타났다.

동결융해의 경우는 표면이 다공화되고 있음을 알 수 있었고, 시편의 모서리 부분에서 약간의 탈락이 발생하였다. 또한 복합열화의 경우는 동결융해에 비해 모서리 부분이 좀 더 크게 탈락이 되었고, 시편의 표면은 골재가 노출될 정도로 다공성이 심해져 있는 것을 관찰할 수 있다. 이는 황산염에 의한 침식과 동결융해의 반복작용에 의한 성능저하 현상이 두드러지게 발생되고 있음을 예측할 수 있었다.

표 13 양생조건에 따른 시편의 외관형상(300 사이클)

담수양생		동결융해		복합열화	
OPC	FA시편	OPC	FA시편	OPC	FA시편
					

4.3.2 단위중량

양생조건 변화에 따른 경화한 시멘트 모르타르의 단위중량 측정 결과를 표 14에 정리하였다. 단위중량의 변화는 담수에서 양생시킨 경우를 기준으로 동결융해와 복합열화한 경우를 상호 비교하였다. 모든 시험체의 양생은 제작 후 재령 28일동안 수중양생한 후 계속 담수양생, 동결융해, 복합열화(황산염+동결융해) 3가지로 실시하였다. 각 조건에서 양생된 시편의 단위중량은 양생재령에 따라 측정하지 않고 동결융해 싸이클에 맞춰 0, 30, 60, 90, 180, 240, 300 싸이클에서 각각 측정하였다. 1 싸이클은 평균 4시간정도로 최대 300 싸이클은 약 50일 정도 소요되었다. 그림 5는 양생조건에 따른 단위중량의 전체 변화를 나타내었다.

담수양생한 경우에서 OPC는 계속해서 단위중량이 증가하고 있었고, 동결융해의 경우 초기 단위중량은 높게 나타났으나, 동결융해 싸이클이 증가할수록 단위중량이 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 복합열화의 경우도 동결융해와 비슷한 경향을 보이고 있으며 그 값은 더 작게 나타났다.

FA를 첨가한 경우는 플라이애쉬의 포졸란 반응 특성상 수화반응이 지연되어 초기 단위중량이 낮은 상태에서 황산염과 동결융해를 받음으로서 OPC의 단위중량보다 훨씬 작은 값으로 측정되었다.

표 14 양생조건 변화에 따른 경화한 시멘트 모르타르의 단위중량

결합재종류	양생조건	단위중량(kg/m ³)																							
		담수양생							끓는물중							복합양생									
		0 cycle	30 cycle	60 cycle	90 cycle	180 cycle	240 cycle	300 cycle	0 cycle	30 cycle	60 cycle	90 cycle	180 cycle	240 cycle	300 cycle	0 cycle	30 cycle	60 cycle	90 cycle	180 cycle	240 cycle	300 cycle			
OPC (Control)	1	2337.6	2337.6	2341.6	2343.8	2352.0	2359.2	2362.4	2362.4	2358.4	2353.6	2352.8	2352.0	2351.2	2349.6	2354.4	2353.6	2347.2	2349.6	2353.6	2353.6	2348.0			
	2	2328.8	2328.8	2333.6	2338.4	2357.6	2364.8	2369.6	2372.0	2387.2	2365.6	2364.8	2352.8	2352.0	2351.2	2327.2	2324.0	2315.2	2315.2	2309.6	2306.4	2300.8			
	3	2327.2	2327.2	2332.8	2336.8	2359.2	2366.4	2371.2	2362.8	2347.2	2346.4	2345.6	2345.6	2344.0	2343.2	2319.2	2315.2	2306.4	2304.8	2299.2	2296.0	2289.6			
	평균	2331.2	2331.2	2336.0	2341.6	2356.0	2363.5	2367.7	2362.4	2357.6	2355.2	2354.4	2352.8	2349.6	2346.4	2333.6	2331.2	2323.2	2323.2	2320.8	2318.4	2312.8			
	OPC + Fly Ash 20%	1	2293.6	2293.6	2298.4	2303.2	2312.8	2322.4	2324.0	2301.6	2301.6	2299.2	2297.6	2296.0	2293.6	2292.8	2304.0	2303.2	2300.8	2296.8	2294.4	2292.8	2290.4		
2		2273.6	2273.6	2280.0	2283.2	2296.0	2304.0	2305.6	2306.4	2306.4	2301.6	2298.4	2296.8	2295.2	2289.6	2308.0	2307.2	2302.4	2296.8	2292.0	2290.4	2289.6			
3		2296.8	2296.8	2304.8	2311.2	2332.0	2338.4	2342.4	2313.6	2313.6	2308.8	2306.4	2304.8	2301.6	2298.4	2316.8	2316.0	2313.6	2308.8	2304.0	2302.4	2298.4			
평균		2288.0	2288.0	2294.4	2299.2	2313.6	2321.6	2324.0	2307.2	2307.2	2303.2	2300.8	2299.2	2296.8	2293.6	2309.6	2308.8	2305.6	2300.8	2296.8	2295.2	2292.8			

각 양생조건별 단위중량의 변화는 그림 5~그림 8과 같고, 단위중량 변화율은 그림 9와 같다. 여기서 단위중량 변화율은 (열화조건 양생 단위중량 - 담수양생 단위중량) / 담수양생 단위중량 × 100(%) 로 나타내었다.

그림 6의 담수양생시 단위중량을 살펴보면 OPC와 FA를 첨가한 모르타르 모두 싸이클(재령)증가에 따라 단위중량이 증가하고 있었다. 다만 FA를 첨가한 경우 상대적으로 낮은 수화반응으로 인해 초기 단위중량이 2%(43.2 kg/m³)정도 낮게 측정되었다. 이것은 FA의 포졸란 반응에 의한 결과이므로 장기적으로 볼 때 단위중량은 계속해서 증가할 것으로 판단된다.

그림 7과 그림 8의 동결융해와 복합열화를 받는 경우의 단위중량 변화는 FA첨가 유무와 상관없이 싸이클(재령)증가에 따라 서서히 감소하였다. OPC의 경우는 동결융해보다 복합열화의 경우가 단위중량의 감소가 더 크게 나타났다. 그 이유는 동결융해의 반복작용으로 인한 스케일링에 의해 무게감소가 주된 원인으로 판단된다.

FA를 첨가한 경우는 동결융해와 복합열화의 차이가 그리 크지 않고 비슷한 것으로 나타났다. 이것은 플라이애쉬에 의한 포졸란 반응으로 생성된 칼슘실리케이트 수화물이나 칼슘알루미늄에이트 수화물이 생성하여 경화체 내의 모세관공극을 막아 물의 이동을 억제함으로써 침투성이 감소되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 FA를 첨가한 후 초기 재령 28일 동안 충분히 양생하여 모르타르의 수밀성이 향상되었고 그로 인해 황산염 침식에 대한 영향이 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다.

그림 9의 양생조건별 단위중량 변화율을 살펴보면 담수양생시는 단위중량이 서서히 증가하고 있으며, 동결융해와 복합열화의 경우 단위중량이 서서히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 복합열화의 경우가 조금 더 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

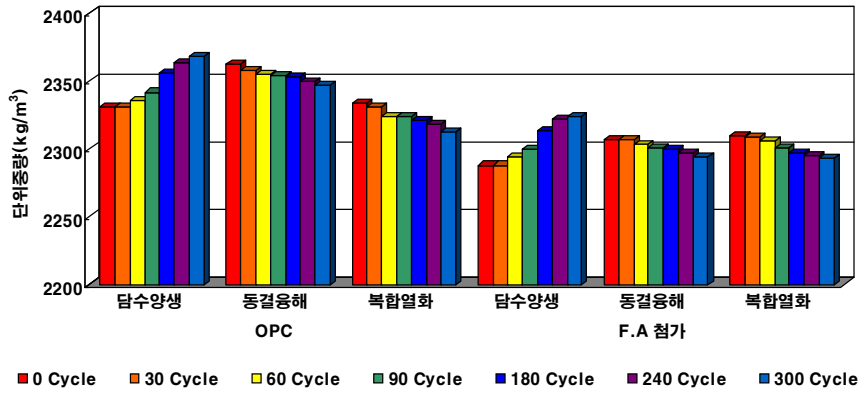


그림 5 양생조건별 단위중량 변화(전체)

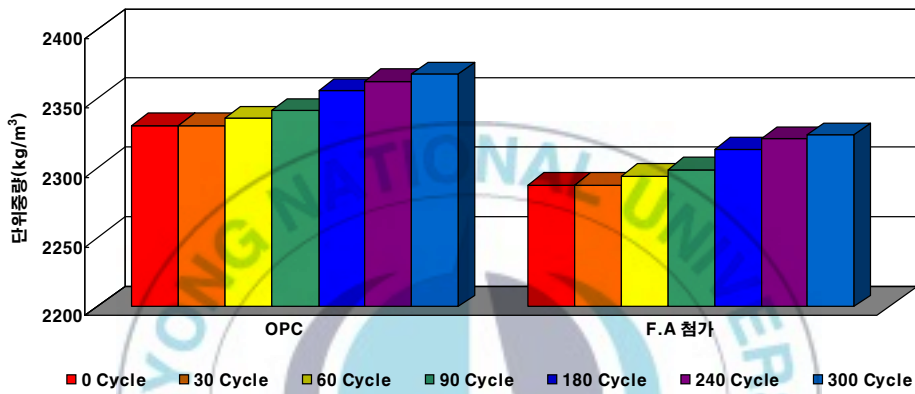


그림 6 담수양생시 단위중량 변화

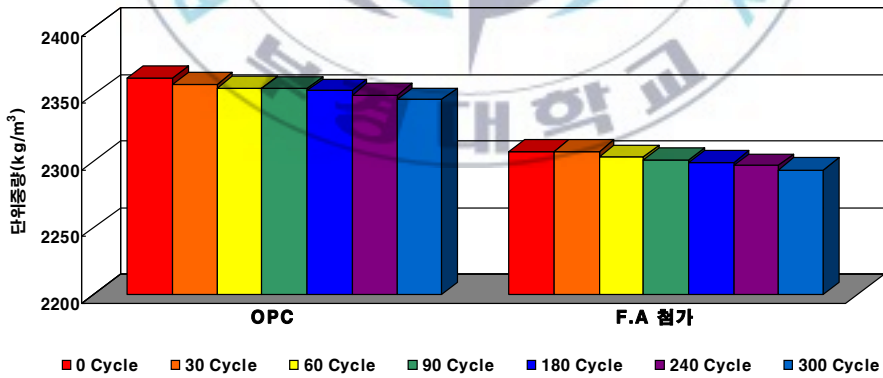


그림 7 동결융해시 단위중량 변화

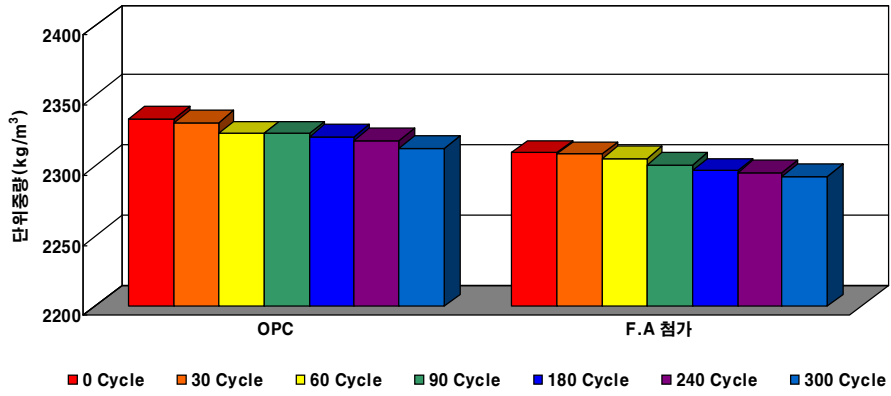


그림 8 복합열화시 단위중량 변화

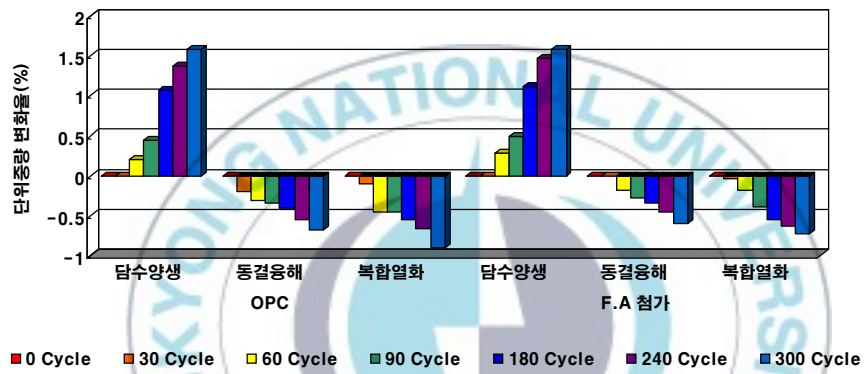


그림 9 양생조건별 단위중량 변화율

4.3.3 압축강도

양생조건에 변화에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 측정 결과는 다음 표 15에 정리하였다. 각각의 양생조건에서 단위중량을 측정한 후 압축강도를 측정하였다.

그림 10은 양생조건별 압축강도의 전체 변화를 나타낸 그림이다. 단위중량의 변화와 마찬가지로 담수양생의 경우 싸이클(재령) 증가에 따라 압축강도도 증가하는 것으로 나타났다. 그 외 동결융해나 복합열화의 경우는 싸이클(재령) 증가에 따라 압축강도 또한 감소하는 것으로 나타났다.

각 양생조건별 압축강도의 변화는 그림 11~그림 13과 같고, 양생조건별 압축강도 변화율은 그림 14와 같다. 여기서, 강도 손실에 따른 압축강도 변화율은 $(\text{열화조건 양생 압축강도} - \text{담수양생 압축강도}) / \text{담수양생 압축강도} \times 100(\%)$ 로 나타내었다.

그림 11의 담수양생시 압축강도 변화를 살펴보면 단위중량의 변화와 마찬가지로 싸이클(재령)증가에 따라 압축강도 또한 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 다만 FA를 첨가한 경우는 OPC보다 수화반응이 늦어 초기강도발현은 늦어나 300 싸이클에서는 오히려 OPC보다 크게 나와 장기적으로 볼 때 훨씬 더 증가할 것으로 예상된다.

그림 12와 그림 13의 동결융해와 복합열화를 받는 경우의 압축강도 변화를 살펴보면 전체적으로 압축강도가 싸이클(재령) 증가에 따라 서서히 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 여기서, FA를 첨가한 경우 초기재령(0 싸이클)에서의 압축강도는 늦은 수화반응으로 인해 OPC에 비해 작게 나타났으나, 300 싸이클에서는 오히려 조금 상회하는 값을 보임으로서 장기재령에서 동결융해나 복합작용을 받을 경우 효과가 있음을 예측할 수 있었다.

표 15 양생조건 변화에 따른 경화한 시멘트 모르타르의 압축강도

양생조건		단위중량(N/mm ²)																				
		담수양생							동결융해							복합열화						
		0	30	60	90	180	240	300	0	30	60	90	180	240	300	0	30	60	90	180	240	300
시험표제종류		cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle	cycle
OPC (Control)	1	73.58	70.67	75.97	78.36	84.05	86.13	88.31	73.58	68.12	74.99	66.51	59.91	59.31	57.63	73.58	67.34	71.50	64.27	59.22	48.22	51.27
	2	73.97	77.19	77.34	80.01	85.03	86.72	87.45	73.97	70.83	72.04	68.41	59.14	59.04	56.48	73.97	66.21	64.59	59.94	55.73	51.64	50.94
	3	73.93	74.95	77.85	83.58	86.84	88.06	85.60	73.93	70.40	65.30	65.24	62.21	58.02	58.42	73.93	69.01	61.21	56.42	51.34	54.43	47.64
	평균	73.82	74.27	77.06	80.65	85.31	86.97	87.12	73.82	69.78	70.78	66.72	60.42	58.79	57.51	73.82	67.52	65.77	60.21	55.49	51.43	49.95
OPC + Fly Ash 20%	1	57.92	60.31	63.71	68.22	77.40	86.44	84.55	57.92	65.69	66.75	63.84	58.44	69.74	56.92	57.92	66.20	64.86	60.12	50.61	50.02	49.12
	2	60.55	65.33	61.04	65.71	73.92	85.57	86.12	60.55	61.92	64.04	67.61	63.13	56.60	60.73	60.55	67.49	63.92	55.37	57.09	52.47	48.31
	3	64.16	63.25	64.70	72.89	75.69	79.33	93.18	64.16	67.38	64.82	66.39	64.88	57.59	59.08	64.16	64.20	66.32	59.68	59.82	50.39	51.94
	평균	60.87	62.97	63.15	68.94	75.67	83.78	87.95	60.87	64.99	65.21	65.95	62.15	59.31	58.91	60.87	65.96	65.03	58.39	55.84	50.96	49.79

플라이애쉬를 사용한 경우에서 동결융해로 인한 강도저하는 급격한 온도변화에 따라 시편의 표면에서 스케일링이 일어나고 이로 인해 단면감소가 발생하여 강도저하가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 복합열화환경에서 사용된 황산나트륨 용액은 일반콘크리트에서 팽창부식을 유발하게 되는데 플라이애쉬를 첨가함에 따라 시멘트량이 상대적으로 감소하고 포졸란 반응으로 시멘트 중의 C₃A 및 수산화칼슘(Ca(OH)₂)량이 감소하여 황산염과의 반응으로 생기는 에트린자이트의 생성량이 감소되었다. 따라서 에트린자이트의 생성에 따른 팽창압이 완화되기 때문에 황산염에 대한 부식성이 감소되어 커다란 강도저하는 없는 것으로 나타났다.

그림 14는 담수양생한 경우와 같은 사이클에서 동결융해와 복합열화 환경의 시편강도를 비교하여 압축강도 변화율로 나타낸 그림이다.

동결융해 양생 조건일 경우 OPC는 180 사이클이 경과한 한 후부터는 담수양생 시편의 강도보다 30% 이상의 강도 손실이 발생했고, FA를 첨가한 경우는 60 사이클까지 담수양생한 경우보다 5%미만의 강도 증진을 보이다가 90 사이클 이후 부터는 강도 감소를 보이며, OPC와 마찬가지로 30% 이상의 강도 손실이 발생하였다.

복합열화 양생 조건일 경우 OPC는 초기부터 담수양생에 비해 급격한 강도 감소를 보이고 있으며, 240 사이클 이후부터 담수양생 시편의 강도보다 40%이상 강도 감소를 나타내었다. 또한 FA를 첨가한 경우는 담수양생 시편보다 약간 강도 증가를 보이다가 240 사이클 이후 급격한 강도 감소를 보였다.

특히, 복합열화의 경우는 낮은 온도로 인해 활발하지는 않지만 황산염 침식으로 인해 발생하는 에트린자이트(ettringite), 석고(gypsum), 소마사이트(thaumasite) 등의 반응생성물로 인한 체적팽창과 동결융해의 급격한 온도변화로 따른 스케일링 발생이 단면감소를 야기시키고 이로 인해 담수양생과 비교해서 강도 감소율이 크게 나타난 것으로 사료된다.

그림 15와 그림 16은 OPC와 FA첨가 모르타르의 압축강도 발현상태를

보여주는 그림이다.

여기서, 그림 15의 OPC 모르타르의 경우는 동결융해와 복합열화의 경우 모두 양생초기부터 강도가 감소되고 있었고, 300 사이클에서 담수양생은 87.12 MPa, 동결융해는 57.51 MPa, 복합열화는 49.95 MPa로 각각 29.61 MPa, 37.17 MPa의 강도 감소를 보였다.

그림 16의 FA첨가 모르타르의 경우는 OPC 모르타르와는 달리 초기 60 사이클까지는 강도증진을 보이다가 그 이후 강도 감소를 보였는데 300 사이클에서 담수양생은 87.95 MPa, 동결융해는 58.91 MPa, 복합열화는 49.79 MPa로 각각 29.04 MPa, 38.16 MPa의 강도 감소를 보였다.

그림 17과 그림 18은 담수양생 시편과의 비교가 아니라 열화환경조건에 양생되기 전 0 사이클(수중양생 28일)일 때의 강도가 동결융해와 복합열화를 받으면서 순수하게 어느 정도 강도 감소가 일어나는지에 대한 그래프이다.

OPC 모르타르의 경우는 동결융해와 복합열화 모두 상당한 강도 감소를 보였다. 동결융해 환경의 경우는 300 사이클에서 약 25%, 복합열화의 경우는 약 35%까지 강도 감소를 보여 일반 콘크리트가 황산염 침해와 동결융해작용을 받을 경우 강도에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 FA를 첨가한 모르타르의 경우 동결융해에서는 180 사이클까지 강도 증진을 보임으로서 FA가 동결융해에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 복합열화의 경우는 60 사이클까지 강도가 증가하다 그 이후 감소하였는데 그 이유는 황산염에 의한 팽창효과와 팽창으로 인해 느슨해진 시멘트 모르타르 매트릭스 사이의 간극수의 동결로 인해 발생하는 것으로 사료된다.

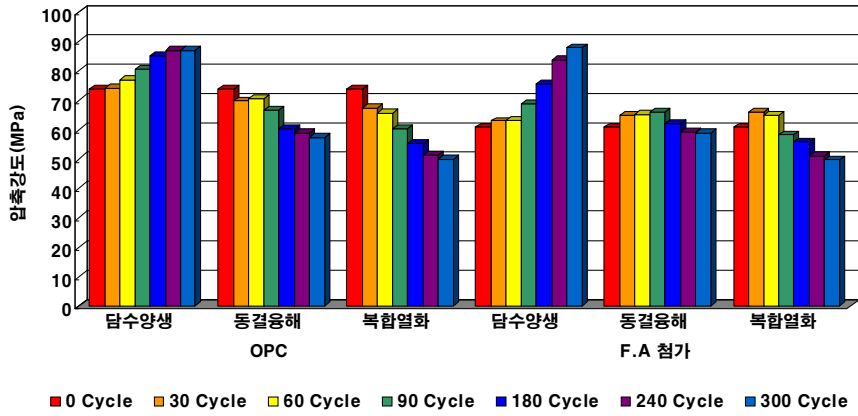


그림 10 양생조건별 압축강도 변화(전체)

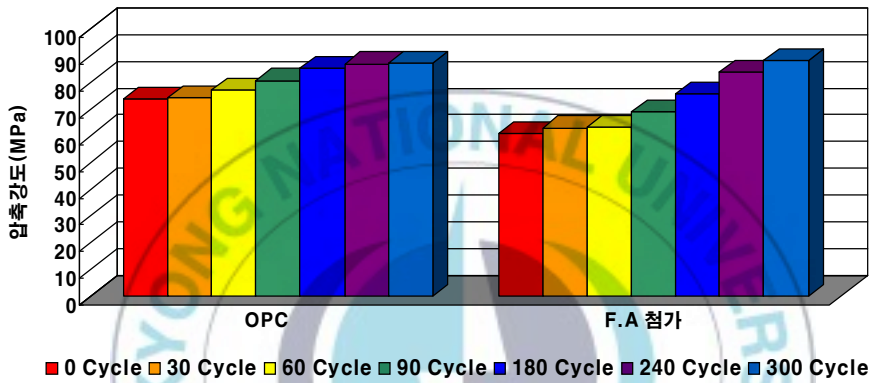


그림 11 담수양생시 압축강도 변화

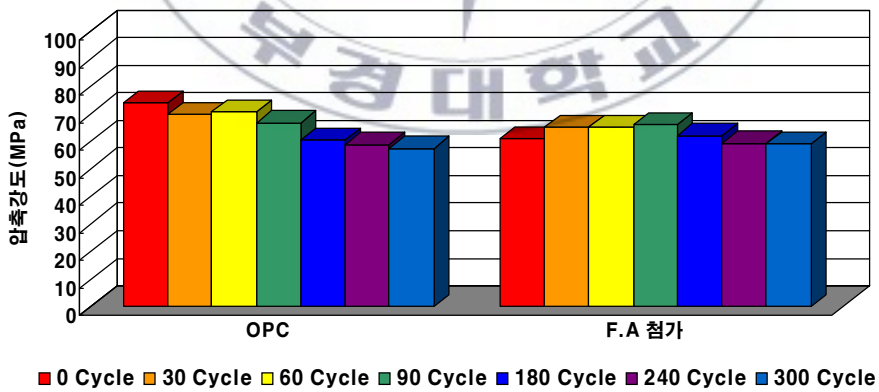


그림 12 동결융해시 압축강도 변화

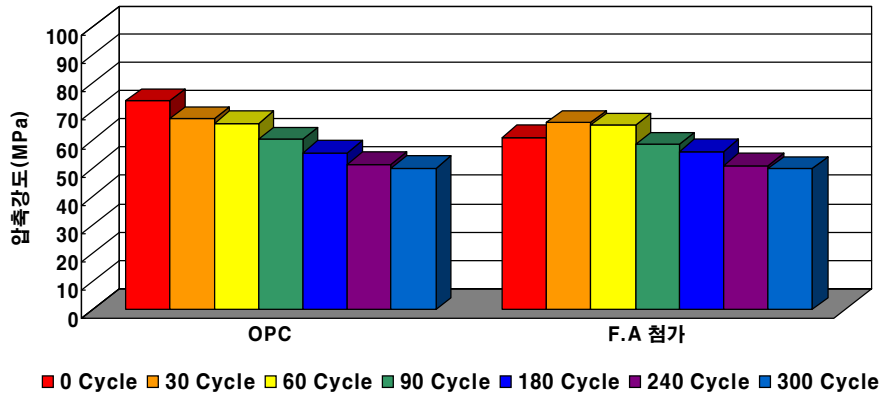


그림 13 복합열화시 압축강도 변화

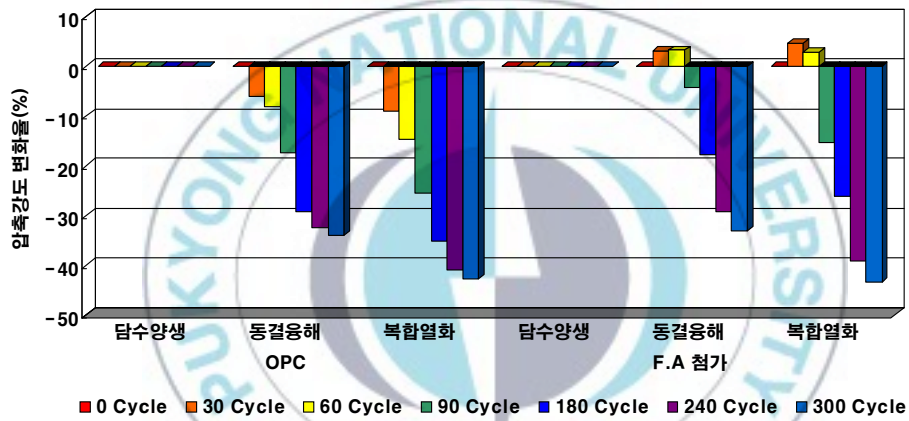


그림 14 양생조건별 압축강도 변화율

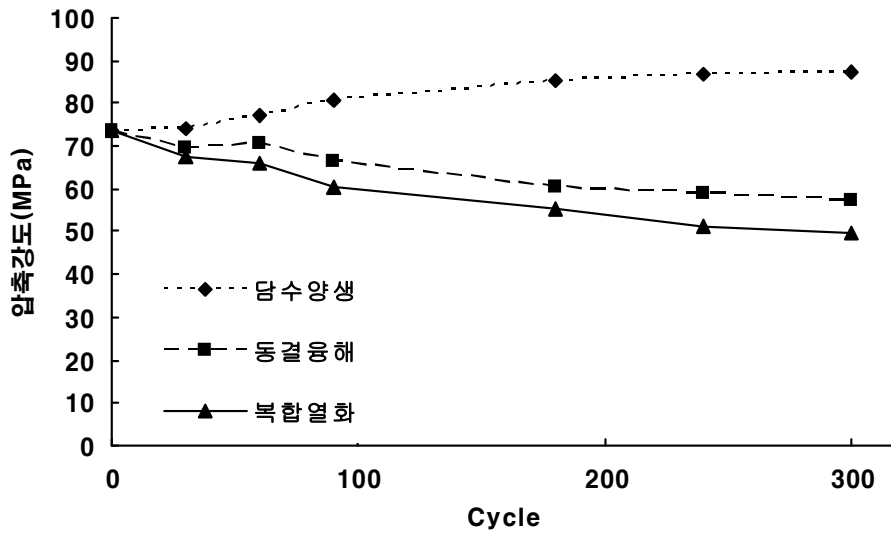


그림 15 OPC 모르타르의 압축강도 발현

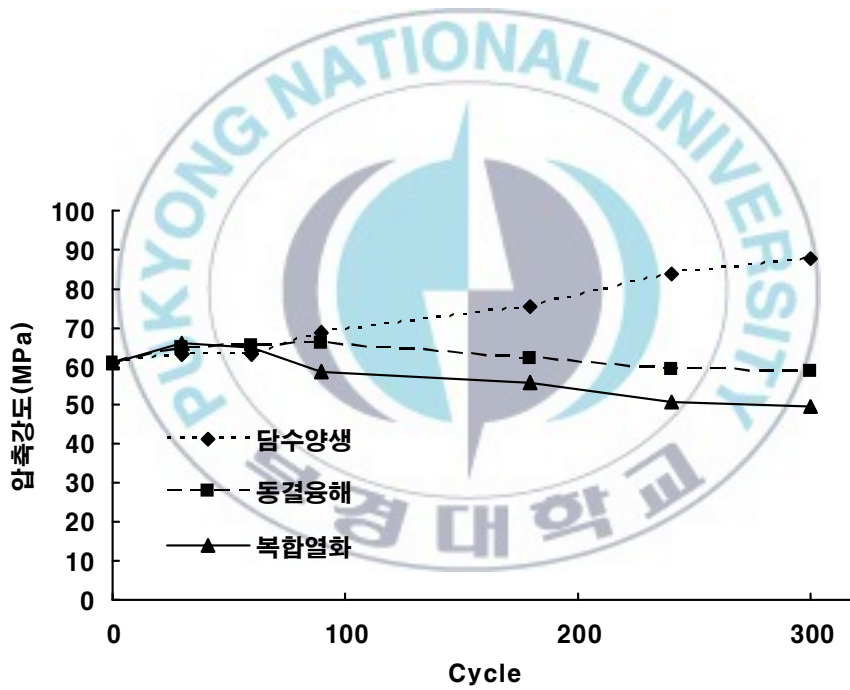


그림 16 FA첨가 모르타르의 압축강도 발현

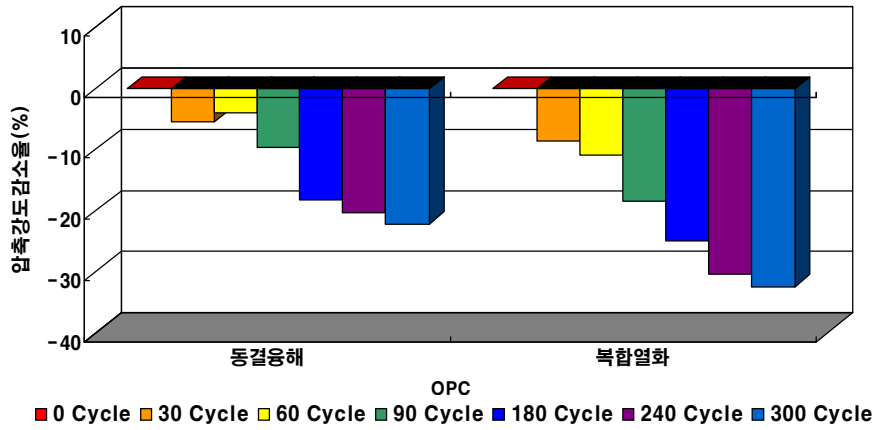


그림 17 OPC 모르타르의 순수 압축강도 변화율

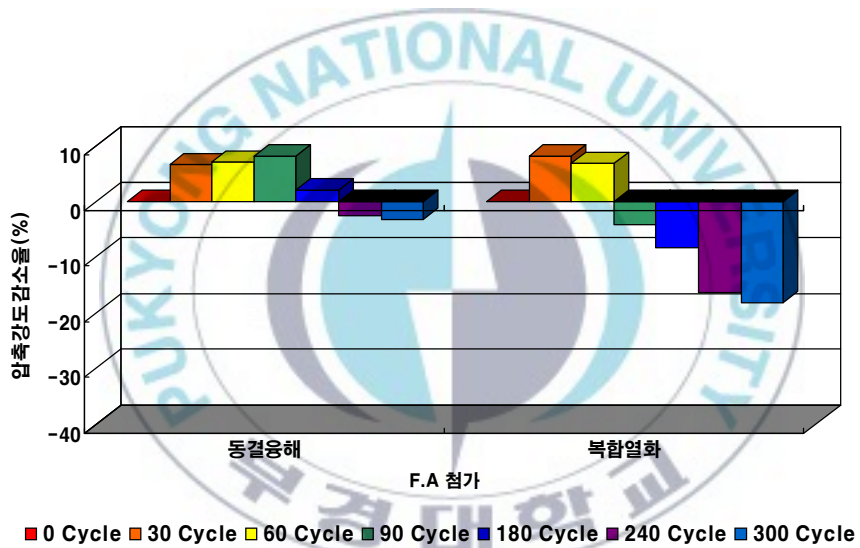


그림 18 FA첨가 모르타르의 순수 압축강도 변화율

5. 결 론

본 연구에서는 시멘트 모르타르와 포졸란계 혼화재료인 플라이애쉬를 단위시멘트량의 20%를 첨가한 시멘트 모르타르를 제작하였다. 제작된 모든 시편은 수중에서 28일 동안 표준양생시킨 것을 0 사이클로하여 계속 담수양생, 동결융해, 10% 황산염용액에서 동결융해를 받는 복합열화 조건으로 각각을 300 사이클까지 양생한 다음 간단한 외관조사, 단위중량 및 압축강도의 변화를 측정하였다.

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 양생조건별 외관변화 형상은 담수양생은 외형변화가 없이 깨끗한 상태로 나타났다. 그러나 동결융해의 경우는 시편의 표면이 다공화되고 시편의 일부가 탈락되는 형상을 보였다. 특히 복합열화의 경우는 시편 표면의 다공화와 탈락현상이 더욱 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 담수양생시 단위중량은 OPC와 FA를 첨가한 모르타르 모두 사이클 증가에 따라 단위중량이 증가하였다. 다만 FA를 첨가한 경우 상대적으로 늦은 수화반응으로 인해 초기 단위중량이 2%(43.2kg/m³)정도 낮게 측정되었다.
- (3) OPC 모르타르는 동결융해보다 복합열화의 경우가 단위중량 감소가 더 크게 나타났다. 그 이유는 황산염에 의한 약간의 열화진행과 더불어 동결융해의 반복작용으로 인한 스케일링에 의해 무게감소가 주된 원인으로 판단된다.

- (4) FA를 첨가한 모르타르의 경우 동결융해와 복합열화의 차이는 그리 크지 않고 비슷한 것으로 나타났다. 이것은 플라이애쉬에 의한 포졸란 반응으로 생성된 칼슘실리케이트 수화물이나 칼슘알루미늄 수화물이 생성하여 경화체 내의 모세관공극을 막아 물의 이동을 억제함으로써 침투성이 감소되어 나타난 결과로 플라이애쉬의 마이크로 필러 현상에 의해 황산염 침해에 대한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.
- (5) 담수양생시 압축강도는 사이클(재령)증가에 따라 압축강도 또한 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 다만 FA를 첨가한 경우는 OPC보다 수화반응이 지연되어 초기강도발현은 낮으나 300 사이클에서는 오히려 OPC보다 높게 나와 장기적으로 볼 때 강도는 훨씬 더 증가할 것으로 예상된다.
- (6) 동결융해와 복합열화를 받는 환경에서 FA를 첨가한 경우 초기재령(0 사이클)에서의 압축강도는 낮은 수화반응으로 인해 OPC에 비해 작게 나타났으나, 300 사이클에서는 오히려 조금 상회하는 값을 보임으로서 장기재령에서 동결융해나 복합작용을 받을 경우 효과가 있음을 예측할 수 있었다.
- (7) 동결융해 양생 조건에서 OPC 모르타르의 압축강도는 초기 0 사이클이 경과한 한 후부터 담수양생 시편의 강도보다 30% 이상의 강도 손실이 발생했고, FA를 첨가한 경우는 60 사이클까지 담수양생한 경우 보다 5%미만의 강도 증진을 보이다가 90 사이클 이후 부터는 강도 감소를 보이며, OPC와 마찬가지로 30% 이상의 강도 손실이 발생하였다.

- (8) 복합열화 양생 조건에서 OPC 모르타르는 초기부터 담수양생에 비해 급격한 강도 감소를 보이고 있으며, 240 사이클 이후부터 담수양생 시편 강도보다 40%이상 강도 감소를 나타내었다. 또한 FA를 첨가한 경우는 담수양생 시편보다 약간 강도 증가를 보이다가 240 사이클 이후 급격한 강도 감소를 보였다.
- (9) 복합열화 양생조건의 경우는 낮은 온도로 인해 활발하지는 않지만 황산염 침식으로 인해 발생하는 에트린자이트(ettringite), 석고(gypsum), 소마싸이트(thaumasite) 등의 반응생성물로 인한 체적 팽창과 동결융해의 급격한 온도변화로 따른 스케일링 발생이 단면 감소를 야기시키고 이로 인해 담수양생과 비교해서 강도 감소율이 크게 나타난 것으로 사료된다.
- (10) OPC 모르타르는 열화환경조건에 양생되기 전 0 사이클(수중양생 28일)일 때의 강도가 동결융해와 복합열화를 받으면서 급격한 강도 감소를 보였다. 동결융해의 경우는 300 에서 약 25%, 복합열화의 경우는 약 35%까지 강도 감소를 보임으로서 일반 콘크리트가 황산염 침해와 동결융해작용을 받을 경우 강도에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 FA를 첨가한 모르타르의 경우 동결융해에서는 180 까지 강도 증진을 보임으로서 FA가 동결융해에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 복합열화의 경우는 60 까지 강도가 증가하다 그 이후 감소하였는데 그 이유는 황산염에 의한 팽창효과와 팽창으로 인해 느슨해진 시멘트 모르타르 매트릭스 사이의 간극수의 동결로 인해 발생하는 것으로 사료된다.
- (11) 향후 연구과제는 슬래그 미분말, 3성분계 등의 다양한 혼화재료

를 사용한 경우와 동결융해와 염해를 포함한 다양한 복합열화를 받는 경우도 연구되어야 할 것으로 생각된다.

그리고 동결융해와 여러 가지 열화조건에서 모르타르 내의 미세구조 관찰을 통해 수화생성물 변화도 연구되어야 할 것으로 사료된다.

이러한 연구를 통해 복잡한 열화 환경에 노출되는 콘크리트 구조물의 보다 정확한 내구성능 평가가 이루어 질것으로 기대된다.



참고문헌

1. 이용호, “공기량 및 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 동결융해 특성에 관한 실험적 연구”, 석사학위논문, 서울대학교, 1994. 2.
2. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가”, 한국콘크리트학회논문집, 제13권, 4호, 2001. 8.
3. 박영식, 서진국, 이재훈, 신영식, “황산염의 침해를 받는 고강도 콘크리트의 강도특성과 물성변화”, 콘크리트학회지, 제10권, 5호, 1998. 10.
4. 이광명, 구현본, “해양환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 수명 평가”, 한국구조물진단학회, 제4권, 제3호, 2000. 7.
5. 이종호, 장복기, “포틀랜드 시멘트 모르타르의 미세구조와 동결융해저항성에 대하여”, 한국요업학회논문집, 제28권, 11호, 1991. 8.
6. 이양수, 김정환, 최상훈, 한기성, “혼합재를 사용한 시멘트경화체의 해수중에서의 동결융해 저항성”, 한국요업학회논문집, 제27권, 제5호, 1990. 4.
7. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서 해설집”, 기문당, 2004. 2.
8. 김광우, 이봉학, 도영수, “재생콘크리트의 동결융해저항성과 변형특성”, 한국콘크리트학회논문집, 제4권 4호, 1992. 12.
9. Adam Neville, “Properties of Concrete”, 4rd Ed., Wiley, 1997.
10. Cohen et al., “Mechanism of sulfate attack”, Cement and Concrete Research Vol. 33, pp. 341~346, 2003.
11. S.M. Torres et all, “Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack”, Cement & Concrete Composites Vol. 25, pp. 947-954, 2003.
12. Cordon, W., A., Freezing and Thawing of Concrete-Mechanism and Control, Monograph No.3, ACI/Iowa State University Press, Detroit, 1966, 99pp.
13. Powers, T.C., “A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete,” ACI Journal, Proceedings V.41, No.4, Feb.1945, pp.245-760

14. Powers, T.C., "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete," ACI Journal, Proceeding V.50, No.9, May 1954, pp.741-76.
15. Powers, T.C., "Basic Considerations Pertaining to Freezing and Thawing Tests," Proceedings, ASTM, V.55, 1955, pp.1132-1155.
16. Bazant,Z.P., Chern,J.C. "Mathematical Model for Freeze-Thaw Durability of Concrete," Journal of American Ceramic Society, Vol.9, No.71, 1988, pp.776-783.
17. Detwiler,R.J., Dalglish,B.J., and Williamson,R.B., "Assessing the Durability of Concrete in Freezing and Thawing," ACI Material Journal, Jan. 1989. pp29-35.
18. Pigeon, M., Lachance,M., "Critical Air Void Spacing Factors for Concrete Submitted to Slow Freeze-Thaw Cycles," ACI Journal, July 1981, pp.282-291.
19. Khayat,K.H., Nasser,K.W., Hester,W.T., "Alternative Method to Measure Air Content in Fresh Concrete," ACI Journal, July 1990, pp.355-362.



◆감사의 글◆

학문의 길에 들어서서 많은 배움의 끝을 조그마한 결실로 보답하고자 하니 부끄러울 따름입니다.

이 논문이라는 결실이 완성되기까지 항상 다독여주시며 격려해주신 김명식 교수님께 우선 고개 숙여 깊은 감사를 드립니다. 또한 논문을 완성하기 위해 고생을 아끼지 않으신 이영대 교수님과 국승규 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 배움의 길에서 가르침에 열과 성을 아끼지 않으신 손인식 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님, 정두희 교수님, 이환우 교수님, 이상호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

논문실험에 대하여 많은 조언과 논문이 완성되기까지 많은 노고를 아끼지 않으신 백동일 박사님과 건설재료실 식구인 최강석, 구영모, 강준호에게도 감사드립니다.

학문의 길에서 헤매지 않도록 마음을 다잡는데 큰 도움을 준 우리 명연회 식구인 염치선 회장님을 비롯한 모든 회원님들께도 감사를 전합니다. 그리고 언제나 격려와 사랑을 아끼지 않았던 많은 선후배님, 가족과 직장 동료에게도 이러한 고마운 마음을 함께 전합니다.

길다면 길고 짧다면 짧은 배움의 기간 동안 스스로 성숙해지고 다듬어진 계기가 된 것 같습니다. 응원해주신 모든 분들께 감사하다는 말을 전하며 이제 서면의 말을 끝낼까 합니다. 감사합니다.