



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

초기동해가 결합재를 변화시킨 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향



부경대학교 산업대학원

토목공학과

최 용 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

초기동해가 결합재를 변화시킨 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

지도교수 김 명 식

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2012년 8월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

최 용 훈

최용훈의 공학석사 학위논문을 인준함

2012년 8월 24일

주 심 공학박사 이 환 우 ㉠

위 원 공학박사 국 승 규 ㉠

위 원 공학박사 김 명 식 ㉠



목 차

목차	i
표목차	iv
그림목차	v
사진목차	vi
Abstract	vii
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법	3
1.3 연구동향	5
2. 문헌고찰	6
2.1 동결융해에 노출된 시멘트 경화체의 성능 저하	6
2.1.1 개요	6
2.1.2 동결융해기구	8
2.1.3 동결융해 대책	11
2.2 플라이애시	12
2.2.1 개요	12
2.2.2 화학적·물리적 성질	13
2.2.3 콘크리트에 미치는 영향	15
2.3 고로슬래그	17
2.3.1 개요	17

2.3.2 화학적·물리적 성질	17
2.3.3 콘크리트에 미치는 영향	19
2.4 메타카올린	22
2.4.1 개요	22
2.4.2 화학적·물리적 성질	23
3. 사용재료 및 실험방법	25
3.1 사용재료	25
3.1.1 시멘트	25
3.1.2 혼화제	26
3.1.3 골재	27
3.1.4 혼화제	27
3.2 실험방법	28
3.2.1 사용골재의 물성실험	28
3.2.2 배합설계	29
3.2.3 공시체의 제작 및 양생	30
3.2.4 굳지 않은 콘크리트 실험	30
3.2.5 경화한 콘크리트 실험	32
4. 실험결과 및 고찰	33
4.1 배합별 콘크리트의 압축강도 특성	33
4.2 초기 동해 시점별 콘크리트의 압축강도 특성	39
4.3 강도손실율	43
5. 결 론	45

참고문헌	47
------------	----



표목차

<표 2-1> 고로슬래그의 화학적 조성	18
<표 2-2> 고로슬래그의 물리적 특성	19
<표 2-3> 메타카올린의 화학적 성분	23
<표 3-1> 시멘트의 물리적 성질	25
<표 3-2> 시멘트의 화학적 성분	25
<표 3-3> 혼화재료의 특성	26
<표 3-4> 혼화재료의 화학조성비	26
<표 3-5> 사용 골재의 물리적 성질	27
<표 3-6> 배합설계표	29
<표 4-1> PLC 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	35
<표 4-2> 2성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	36
<표 4-3> 3성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	37
<표 4-4> 4성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	38
<표 4-5> 표준양생시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	40
<표 4-6> 재령 3일차 동해시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	41
<표 4-7> 재령 7일차 동해시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성	42

그림목차

<그림 2-1> 카울리나이트의 결정구조	23
<그림 4-1> PLC 콘크리트의 재령별 압축강도	35
<그림 4-2> 2성분계 콘크리트의 재령별 압축강도	36
<그림 4-3> 3성분계 콘크리트의 재령별 압축강도	37
<그림 4-4> 4성분계 콘크리트의 재령별 압축강도	38
<그림 4-5> 표준양생시 압축강도	40
<그림 4-6> 재령 3일차 초기동해시 압축강도	41
<그림 4-7> 재령 7일차 초기동해시 압축강도	42
<그림 4-8> 재령 3일차 초기동해시 강도손실을	44
<그림 4-9> 재령 7일차 초기동해시 강도손실을	44



사진목차

<사진 3-1> 슬럼프 실험	31
<사진 3-2> 공기량 실험	31
<사진 3-3> 압축강도 측정 전경	32



Influence of early-frost damage on binder-changed concrete's compressive strength

Yong - Hoon, Choi

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

Abstract

Recently, the concrete using multicomponent blended cement is being required to increase the resistance against early-frost damage. Thus, the purpose of this study is to propose the use of the concrete containing multicomponent blended cement as one of the alternative for concrete structure exposed early-frost damage. For this purpose, the concrete containing ordinary portland cement (PLC), binary blended cement (add : Ground Granulated Blast Slag), ternary blended cement (add : Fly ash), and quaternary blended cement (add : Mata-kaolin) were made for water-binder ratio of 50%, and then the compressive strength such as the concrete exposed early-frost damage were estimated for the concrete containing binary blended cement, ternary blended cement, and quaternary blended cement respectively. It was observed from the test that the compressive strength of the concrete containing PLC were found to be much better than that of the case containing multicomponent blended cement. It's necessary to ensure of quality control for early-frost damage in winter.

Key words : Early-frost Damage, Compressive Strength, Fly Ash, Ground Granulated Blast Slag, Mata-Kaolin

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트 구조물은 노출되는 환경 및 구조물 자체의 내적원인 등에 의하여 성능저하를 일으킨다. 가장 보편적인 경우는 콘크리트 표면에서의 박리나 탈락 등 미관상 좋지 못한 예를 들 수 있으며, 나아가 균열 및 강도저하 등 안전성에 문제가 될 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 구조물에 사용되는 콘크리트에 여러 결합재를 사용한 경우가 증가하고 있는 추세이다. 이에 대표적인 결합재로 산업부산물인 고로슬래그와 플라이애시는 포졸란 물질로서 콘크리트의 알칼리성 수화생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 영향으로 잠재 수경성을 발휘하는 부산물이다. 제철산업의 부산물인 고로슬래그와 화력발전소의 부산물인 플라이애시는 사용 시멘트 양을 감소시키며, 그 외에도 수화열 저감, 장기강도 증진, 수밀성 증대 등 내구성 향상에 도움을 주어, 장기적인 관점에서 보면 유지관리 비용 절감을 가져오므로 경제적 효율성이 증대 된다.

한편, 경제적인 공사비를 위하여 시공비 절감을 위한 접근 방법으로 대부분의 시공자는 전체 공사기간 관리에 주력하며 그 기간을 단축시킴으로써 보다 많은 이윤을 확보하거나 창출하려고 한다. 그 기대에 맞추어 최근에는 시공기술의 발달로 인한 연중시공이 증가하고 있으며, 이는 사계절이 뚜렷한 국내에서 동절기에도 콘크리트를 타설하는 경우가 증가되고 있다. 이러한 콘크리트 공사에는 필연적으로 물을 사용하게 되는데, 동절기에 이러한 물은 외기온의 변화에 따라 동결융해 작용을 받게 된다. 콘크리트의 성능에 크게 영향을 주는 시멘트는 물에 매우 민감

하기 때문에, 동결융해 작용의 반복은 콘크리트의 내구성에 영향을 주게 되며 이는 구조적으로 결함을 가져오게 된다. 이러한 동결기 시공에 있어서 결함재를 사용하여 시공하는 경우, 이러한 영향을 더욱더 크게 받게 된다.

따라서 본 연구에서는, 먼저 국내에서 생산되고 있으며, 콘크리트의 내구성에 우수하다고 알려져 있는, 각종 광물질 혼화재료를 사용하여 다 성분계 콘크리트를 제작한다. 다음으로 다양하게 배합변수를 변화시켜 초기 동해에 노출된 콘크리트가 동해로 인한 물리적 침식작용을 받을 때의 강도 손실율을 파악한다. 이를 위해서는 초기 동해 조건으로 동결 융해저항성 실험을 수행한다. 이러한 결과를 중심으로 초기동해가 다 성분계 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 파악하고, 동결기에 시공되는 다 성분계 콘크리트의 품질관리를 위한 방안을 도출하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는, 초기동해가 결함재를 변화시킨 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 종합적으로 분석해본 결과, 장기적인 내구성을 증진시키기 위해 결함재를 사용한 콘크리트 구조물에서 기존의 보통 시멘트콘크리트 구조물과 마찬가지로, 양생 초기에 동해를 받을 경우 강도발현에 있어서 문제가 발생할 것으로 판단되어져, 시공 시에 양생 온도가 중요하다고 판단되어진다.

1.2 연구방법

본 연구에서 사용한 골재는 부산근교 김해지역 석산에서 생산되는 부순골재를 사용한다. 시멘트는 국내 S사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트를 사용하고, 광물질 혼화재료는 고로슬래그, 플라이애시, 메타카올린을 사용하며, 혼화제는 국내 H사에서 생산되는 고성능 감수제와 AE제를 사용한다.

초기 동해 시점은 시공시 필요한 양생 기간을 파악하기 위하여 재령 3일차, 7일차로 하여 각각 재령에 맞추어 초기 동해 조건을 주었다.

초기 동해 조건으로 동결융해의 시험방법인 KS F 2456에서 A방법(수중 급속 동결융해시험방법), B방법(기중 급속 동결 후 수중 융해 시험방법)을 규정하고 있는데, (본 실험에 사용되는 실험기기에는 B 실험방법이 적용), 본 연구에서는 초기 동해 조건을 주기 위하여 방법 B를 참고하여, 기중 상태에서 4℃에서 -18℃도달 후 수중 상태에서 다시 4℃까지 온도변화시간을 네 시간 이내로 하여 하루 동안 총 6 사이클로 초기동해 조건으로 채택하였다.

본 실험의 배합변수는 다음과 같다. 물-바인드비(W/B)는 50%, Flow 치는 150~180mm 범위를 만족하도록 한다. 결합재로 사용되는 광물질 혼화재료인 고로슬래그, 플라이애시, 메타카올린의 사용량은 보통 콘크리트에 사용한 시멘트 단위 중량에 대한 비로 치환하였고 그 부하와 비는 다음과 같다.

- PLC(Plain Concrete) : 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트와 비교 목적으로 제작한 보통 콘크리트
- 2성분계 콘크리트 : 고로슬래그를 시멘트 단위중량에 대해 40% 치

환한 콘크리트

- 3성분계 콘크리트 : 고로슬래그 30%와 플라이애시 10% 치환한 콘크리트
- 4성분계 콘크리트 : 고로슬래그 30%와 플라이애시 10%, 메타카울린 10%을 치환한 콘크리트

2성분계 콘크리트와 3성분계 콘크리트의 경우 여러 참고 문헌을 통하여 최적 배합을 도출하여 배합비를 산정하였고, 4성분계 콘크리트의 경우 2성분계 및 3성분계보다 강도 증진을 위하여 같은 배합비에 메타카울린을 10% 추가하였다. 이와 같이 4종류의 배합에 따라 공시체를 제작한 후, 시공초기 양생시 냉기에 노출시키기 위하여, 첫 번째로 재령 3일에, 두 번째로 재령 7일에 동결융해 시험기기에서 양생을 실시하였다. 양생실시 후에 7일, 14일, 28일 각 재령별로 압축강도를 측정하여 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트의 초기 동해에 대한 압축강도를 비교 검토하는 것이 본 연구의 연구방법이다.

1.3 연구동향

한천구 등(2000)은 한중콘크리트의 초기 동해 방지를 위한 초기 양생 기간의 산정에서 초기 동해방지를 위한 초기양생기간은 W/B가 커질수록, 예상양생온도가 낮을수록, FAC(플라이애쉬 30%첨가) 및 BSC(고로슬래그 30%첨가)를 사용할수록 길어지는 것을 확인하였다.

권영진 등(2006)은 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능 설계에서 동해의 매커니즘을 설명하였고, 동해에 대한 현황 및 그에 따른 콘크리트 구조물의 내구성능설계 기법에 대하여 국외의 자료를 중심으로 제시하였다.

윤우현 (1992)은 콘크리트 구조물의 성능저하와 내구성 중 동해와 그 대책에서, 구조물의 동해원인과 그 대책에 대해 조사하였다.

권영진 (2001)은 동절기 초기채령에서 동해를 받은 고강도콘크리트의 내해동성 평가에 관한 실험적 연구에서 초기 동해를 입은 시점이 빠를수록, 공기량이 적을수록 콘크리트의 내해동성이 저하하는 것을 확인하였다.

김진우 등(2005)은 초기동해를 입은 시멘트 모르타르의 탄산화 특성에 대한 연구의 일환으로 초기 동해를 입은 공시체는 약 20~30%정도 압축강도가 감소함을 확인하였다.

이와 같이 보통 콘크리트의 초기 동해에 관한 연구는 많으나 다수의 결합재를 혼입하여 제작한 콘크리트의 초기 동해에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

2. 문헌고찰

2.1 동결융해에 노출된 시멘트 경화체의 성능 저하

2.1.1 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.⁽¹³⁾

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 진

행되지 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 변하는 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.⁽¹³⁾ 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 내

력에 영향을 미칠 정도의 소상은 비교적 작아졌다고 할 수 있지만 미관상, 사용상 영향을 미치는 경우가 많고 유지관리상 문제가 되고 있다.

2.1.2 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.⁽²¹⁾

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, Helmut, Litvan, Verbeck, Landgren 등에 의해 콘크리트 구조물의 동결융해 작용에 대한 연구가 수행되고 있으며 좀 다른 측면에서 T.Faulker, T.Walker도 연구를 수행하였다.⁽¹⁶⁾

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 발생 기구를 살펴보면 다음과 같다. 경화된 콘크리트가 젖어있는 상태에서 온도가 낮아지면 시멘트 모르타

르의 모세간극 안에 있는 간극수가 열게 되는데 이때 약 9.1% 정도의 체적이 증가하게 된다. 간극에 따른 간극수의 상이한 빙점에 의해 열지 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 손상의 누적과정이다. 이는 부분적으로 콘크리트의 열전달율에 기인하고, 또 부분적으로 열지 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 형성되지는 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, Helmuth등의 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 잉여의 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 얼음 층에 의하여 완전한 붕락까지 다양하다.

2.1.3 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 : 적절한 공기량(3~6%)을 확보할 수 있으며, 이에 따라 응력의 흡수능력이 증대하게 된다.

② 혼화재료의 사용 : 플라이애시 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.



2.2 플라이애시

2.2.1 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 플라이애시(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.

플라이애시를 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 플라이애시는 콘크리트용 혼화재로 사용할 때 위와 같은 장점이 있지만 미연소 탄소량, 입자표면에서의 유기혼화제의 흡착, 입경분포, $1\mu\text{m}$ 이하의 미립분의 영향, 제조공장 및 시기 등에 따른 품질변동 등의 문제점이 있기 때문에 사용할 때 유의하여야 한다.

2.2.2 화학적·물리적 성질

1) 화학적 성질

플라이애시는 비균등질의 유리질과 결정상으로 구성되어 있으나 그 조성광물의 화학성분 및 분포는 원탄 및 연소조건 등의 영향을 받아 매우 폭이 넓고 다양하다. 유연탄, 반역청탄, 갈탄 및 이들을 혼합한 석탄을 연료로 사용하는 발전소에서 발생된 플라이애시의 통상적인 화학성분을 살펴보면, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO 및 SO_3 를 포함하고 있다.

이들 성분 중 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 성분비가 각각 25~60%, 5~25%, 10~30%로서 전 성분의 거의 많은 부분을 차지한다. 이와는 다르게 상대적으로 이들 세 가지 성분의 합(50%이상)이 적고, CaO 로 나타나는 칼슘혼합물의 양이 많은 플라이애시를 Class C로 분류한다.

2) 물리적 성질

플라이애시 입자의 형상, 분말도, 입경분포 및 비중은 굳지 않은 콘크리트의 물성 및 경화한 콘크리트의 강도발현에 영향을 준다.

(1) 입형

플라이애시 입자의 크기와 형상은 원료의 균일성, 분쇄정도, 연소환경, 연소의 균일성, 기계식 분리장치, 백 필터, 전기식 집진장치와 같은 집진장치의 종류 등에 따라 달라진다. 플라이애시 입자의 모양은 입자의 크기와 관계가 있으며, 대부분 유리질의 구형형태이고 속이 채워져 있는 것, 비어있는 것, 생선알과 같은 모양으로 작은 플라이애시 입자를 포함하고 있는 것 등 다양하다. 또한 이 중에는 투명한 것, 광택이 없이 불투명한 것, 약간 다공질인 것, 다공성이 심한 것, 그리고 둥근 모양, 가늘고 긴 모양 등이 있다.

(2) 분말도

플라이애시 입자의 크기는 포집에 사용한 집진장치의 종류와 성능에 따라 달라진다. 최근에 건설된 발전소에서는 전기식 집진장치나 백 필터를 사용하며 이러한 장치를 이용하여 포집한 플라이애시의 입자는 종래의 집진장치에 의한 것보다 미세한 입자까지 포함하는 좀 더 폭넓은 입경분포를 가진다.

(3) 비중

플라이애시의 비중은 화학성분 중에 철분이 많을 경우 높게 나타나며 탄소함유량이 많을 경우 낮은 경향을 보인다. 우리나라 산업규격에서는 플라이애시의 비중을 1.95이상으로 정하고 있다. Class F의 비중은 2.10~2.49, Class C의 비중은 2.31~2.86의 범위로 나타나고 있다. 플라이애시 비중의 범위는 최대 1.95~3.00 정도이며, 보통 2.20~2.80 정도인 것으로 알려져 있다. 그러나 Class C 플라이애시는 Class F 플라이애시에

비해 미세한 입자가 좀더 많이 포함되어 있으며 속이 비어 있는 중공입자의 양이 적은 까닭에 상대적으로 높은 비중을 나타낸다고 한다.

2.2.3 콘크리트에 미치는 영향

1) 워커빌리티

일반적으로 둥근 모양의 플라이애시 입자는 시멘트 풀의 유동성을 개선시켜 소요의 슬럼프를 확보하기 위한 콘크리트의 단위수량을 감소시킨다. 이것은 상대적으로 콘크리트 중의 결합재량이 많은 부배합의 효과를 가져옴으로써 성형상 및 재료분리 저항성을 비롯한 굳지 않은 콘크리트의 성질을 개선한다. 그러나 탄소량이 많은 플라이애시는 거친 입자의 함유비율이 높아서 일반적으로 단위수량을 증가시키는 경우가 많다.

2) 블리딩

플라이애시의 사용에 따른 미분말 용적의 증가는 콘크리트 내부에서의 수분의 이동을 감소시키며 워커빌리티 확보에 필요한 수량을 줄임으로써 공기의 연행여부에 관계없이 콘크리트의 블리딩을 억제한다.

3) 응결

플라이애시를 혼합한 콘크리트에 있어서 콘크리트의 응결에 미치는 요인으로는

- ① 콘크리트의 온도와 콘크리트 주변의 온도
- ② 시멘트의 종류, 양 및 분말도
- ③ 단위수량
- ④ 수용성 알칼리의 존재여부와 양
- ⑤ 응결조절제를 비롯한 다른 혼화재료의 사용여부

⑥ 플라이애시의 종류, 양, 분말도 및 조성 등을 들 수 있다.

4) 피니셔빌리티

플라이애시 콘크리트는 응결시간이 늦기 때문에 마무리 작업시간을 늦출 필요가 있다. 마무리 작업을 서두를 경우, 표면의 바로 아래 부분의 상승수를 덮어 약점이 되는 면을 만들 수 있다. 습도가 낮거나 증발속도가 큰 환경하에서 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 응결시간의 지연은 콘크리트 표면의 수분의 증발로 인한 플라스틱 수축균열의 발생을 증가시키므로 이에 대한 대책을 마련해 둘 필요가 있다.

5) 압축강도

플라이애시를 혼합한 콘크리트의 재령에 따른 강도와 강도발현속도는 주로 플라이애시를 혼합할 경우, 콘크리트의 휨강도의 개선에 효과가 있었다는 보고도 있으나, 플라이애시 사용에 따른 압축강도와 인장강도 사이의 특별한 상관성은 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.

6) 온도상승

시멘트는 물과 반응할 때 수화열을 발생하며 이 열은 콘크리트의 초기강도 발현과 용적변화에 중요한 영향을 미친다. 이 열의 대부분은 시멘트 조성광물 중의 C_3S 와 C_3A 의 초기수화단계에서 발생된다. 수화속도와 발열속도는 시멘트량과 시멘트의 종류, 구조물의 크기, 치기방법, 치기시의 콘크리트 온도와 양생온도 등에 따라 달라진다. 특히 서중에 단위시멘트량이 큰 매스 콘크리트를 칠 경우, 수화열에 의해 발생하는 구조물에서의 열변형은 무시할 수 없을 만큼 크다.

2.3 고로슬래그

2.3.1 개요

고로슬래그는 용광로에서 선철과 동시에 생성되는 용융슬래그로 냉각 방식에 따라서 급냉슬래그, 반급냉슬래그, 서냉슬래그로 분류하고 있다. 이중 물로 급냉시켜 얻은 입상의 급냉슬래그를 건조하여 미분쇄한 것이 고로슬래그미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag)로 사용목적에 따라 석고를 첨가하는 경우도 있다. 고로슬래그미분말은 잠재수경성이 있어서 그 자체는 경화하는 성질이 미약하지만 알칼리나 황산염에 의해서 경화가 촉진되어 포틀랜드시멘트만을 단독으로 사용했을 경우에는 얻을 수 없는 아래와 같이 우수한 콘크리트의 특성이 얻어진다.

- ① 수화발열속도의 저감 및 콘크리트의 온도상승 억제 효과
- ② 장기강도의 향상
- ③ 수밀성의 향상
- ④ 염화물이온 침투억제에 따른 철근의 발청 억제 효과
- ⑤ 황산염 등에 대한 화학저항성 향상
- ⑥ 알칼리 실리카 반응의 억제 효과
- ⑦ 불리덩이 작고, 유동성이 우수한 효과
- ⑧ 고강도콘크리트의 제조에 유효

2.3.2 화학적·물리적 성질

1) 화학적 성질

JIS R 5202에 의하면 염기도는 1.8~1.9로 되어 있으며, 우리나라의 경우 KS L 5210에 포틀랜드 고로슬래그시멘트에 사용하는 고로슬래그의

염기도는 1.4이상이어야 한다고 규정하고 있다. 급냉한 유리구조의 슬래그는 잠재수경성을 나타낸다. 즉 슬래그분말을 물과 혼합하여 경화작용을 부여하기 위해서는 알칼리성 혹은 황산염 등의 자극물질을 첨가하여 OH⁻ 이온이나 SO₄²⁻ 이온이 충분한 양으로 존재하도록 해야 한다. 이들 이온의 존재하에서 고로슬래그미분말은 포틀랜드시멘트와 동일하게 수경성을 발휘한다. 일단 수화가 개시되면 장기적으로는 석회결합기능도 나타내기 때문에, 고로슬래그미분말은 포졸란반응도 함께 갖는 물질로 해석되고 있다.

고로슬래그의 주요화학적 성분은 <표 2-1>에서 알 수 있듯이 SiO₂, Al₂O₃, CaO이며 알칼리 촉진제로 수화반응이 촉진되는 성질을 갖는다. 참고로 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement : O.P.C)의 화학조성과 비교했다.

<표 2-1> 고로슬래그의 화학적 조성

조성		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	MnO	P ₂ O ₃	TiO ₂	T.S	S	SO ₃	NaO ₂	K ₂ O	Cl
종류															
고로 슬래그	Ave	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	0.40	0.008	0.96	–	0.66	–	0.23	0.31	0.004
	Min	30.7	12.6	40.5	4.2	0.02	0.19	0.000	0.42	–	0.41	–	0.11	0.18	0.001
	Max	34.9	15.2	43.9	9.2	0.64	0.55	0.016	1.73	–	1.02	–	0.40	0.45	0.007
O.P.C	Ave	21.5	5.20	64.0	1.6	2.90	0.13	0.120	0.31	–	–	2.0	0.26	0.47	0.005
	Min	20.5	4.70	62.7	0.8	2.50	0.04	0.030	0.20	–	–	1.7	0.10	0.26	0.001
	Max	22.2	5.90	65.0	3.0	3.40	0.23	0.340	0.42	–	–	2.3	0.41	0.71	0.071

2) 물리적 성질

급냉슬래그는 비중이 1.89~2.77로 그 범위가 넓지만 74 μ m 이하로 분쇄한 고로슬래그미분말의 비중은 2.85~2.94의 범위로 평균 2.9정도이다. 이는 포틀랜드시멘트의 비중보다 작은 값을 갖고 있지만 다른 혼화재인 플라이애시나 실리카흙에 비해 포틀랜드시멘트와의 비중차가 작아 결합

재로 사용할 때 분산성이 우수한 재료로 평가된다. 또한 분체입자의 형상은 매끈한 구곡상의 표면을 갖는 입방상으로 물과 접해도 표면변화는 곧바로 보이지 않고 포틀랜드시멘트의 입자와 같이 겔화하여 콘크리트의 주도에 큰 영향을 미치지 않는다. 고로슬래그의 물리적 특성은 <표 2-2>에 나타냈으며, 참고로 보통포틀랜드시멘트와 비교했다.

<표 2-2> 고로슬래그의 물리적 특성

종류	항목	염기도	산화물 (%)	강열감량 (%)	Insol.res (%)	Glass Con. (%)	비중	Moisture (%)
고로 슬래 그	Ave	1.86	0.40	+0.08	0.18	99.0	2.91	0.14
	Min	1.73	0.29	-1.40	0.01	95.0	2.88	0.00
	Max	1.99	0.61	+1.10	0.36	99.9	2.95	0.50
O.P.C	Ave	-	0.57	+1.1	0.3	-	-	-
	Min	-	0.46	+0.4	0.1	-	-	-
	Max	-	0.71	+2.0	1.8	-	-	-

2.3.3 콘크리트에 미치는 영향

고로슬래그미분말을 사용하여 제조한 콘크리트와 사용하지 않은 콘크리트를 비교하면 일반적으로 다음과 같다.

- ① 콘크리트의 단위수량을 감소시키는 것이 가능하다.
- ② 단위 굽은골재 용적을 증가시켜 잔골재율을 적게 할 수 있다.
- ③ 안정적인 슬럼프를 얻을 수 있고 분말도가 큰 것은 블리딩이 적게 된다.
- ④ 강도발현은 고로슬래그미분말의 분말도 및 함량에 따라 크게 좌우되나, 일반적으로 초기재령에서의 강도는 사용하지 않은 콘크리트보다 적게 되고, 장기재령에서는 비슷하거나 크게 된다.

⑤ 수화열은 작을수록, 치환율이 클수록 적어져 매스콘크리트 치기에 유리하다.

⑥ 양생을 충분히 하면 치밀한 수화물이 얻어져 수밀성, 내구성이 향상된다.

⑦ 겨울 등 온도가 낮은 경우에는 초기반응성의 저하로 인하여 거푸집 제거 등에 시간이 소요되어 공기단축은 어렵다.

⑧ 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트는 거푸집 제거시 청색이 나타날 수 있는데, 이것은 슬래그에 남아있는 미량의 황화물에 의한 작용이며 강도나 기타 물성에는 큰 영향을 미치지 않으며, 거푸집 제거 후 수주일 후에는 콘크리트 본래의 색으로 변하는 특성이 있다.

1) 고로슬래그미분말이 굳지않은 콘크리트에 미치는 영향

(1) 응결

고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트의 응결시간은 치환율의 영향을 크게 받지만, 분말도에 따른 영향은 비교적 작게 나타난다.

(2) 블리딩

고로슬래그미분말의 치환량이 증가함에 따라서 블리딩량이 감소하며, 분말도가 클수록 이 경향은 현저하게 나타난다. 블리딩의 종료시간은 치환하지 않은 콘크리트와 큰 차이가 없다.

(3) 슬럼프의 경시변화에 따른 변화

고로슬래그미분말의 치환에 따른 슬럼프, 공기량의 경시변화는 거의 없다.

2) 고로슬래그미분말이 경화한 콘크리트에 미치는 영향

(1) 압축강도

콘크리트의 압축강도는 물-결합재비, 결합재의 종류, 재령 및 양생방법 등의 영향을 받는데, 고로슬래그미분말을 치환한 경우에는 이와 같은

사항 이외에도 분말도 및 치환율의 영향을 받는다.

고로슬래그미분말을 치환한 경우에는 물-결합재비와 압축강도는 거의 직선적인 관계가 있으며 치환율이 클수록 강도발현이 작게 되는 경향이 있고, 치환율에 관계없이 물-결합재비가 크게 되면 보통콘크리트에 비해 강도발현의 비율이 크게 되는 경향이 나타나며, 분말도가 크면 압축강도가 증가한다.

고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트의 경우에는 양생온도와 강도발현과의 관계는 치환하지 않은 콘크리트와 동일한 경향을 나타내고 있기 때문에 배합강도를 산정할 때 온도보정에 있어서는 동일하다고 본다.

(2) 건조에 따른 길이변화

고로슬래그미분말을 치환한 경우의 건조수축률은 물-결합재비가 클수록 크게 되는 경향이 있다.

(3) 동결융해에 대한 저항성

고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 물-결합재비가 작을수록 크게 나타나며, 치환하지 않은 콘크리트와 비교해서 동등하거나 약간 우수한 저항성을 나타내고 있다.

(4) 중성화

고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트는 시멘트 수화시에 발생하는 수산화칼슘과 고로슬래그의 성분이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하되기 때문에 콘크리트의 중성화가 빠르게 진행될 수도 있다.

(5) 수밀성

고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트에서는 치환하지 않은 콘크리트에 비해서 총세공량은 약간 많아지지만, 세공경이 매우 작아지기 때문에 수밀성이 현저히 향상된다.

2.4 메타카올린

2.4.1 개요

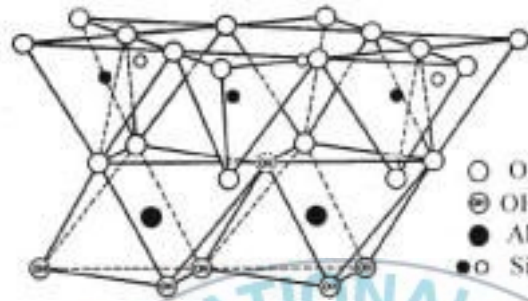
메타카올린(Meta-Kaolin)의 원료인 카올린(Kaolin, 고령토)은 원래 중국 강서성의 요업중심지인 경덕진(景德鎮) 동쪽 45km에 있는 고륙(高陸)에서 산출되는 자색의 점토로서 도자기를 만드는데 사용된 광석에 대하여 붙여진 광석명이다. 시멘트·콘크리트에 적용할 수 있는 메타카올린(Meta-Kaolin)은 카올린을 특수 처리하여 제조하게 되었으므로, 카올린에 Meta-라는 접두어를 붙여 변화를 표시하기 위하여 사용되었다. 국내에서 산출되는 카올린은 대부분 할로이사이트(Halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화잔류형 지역에 많이 분포하고 있다.

카올린에 유사한 어휘를 가지고 있는 카올리나이트(Kaolinite)는 자색을 띤 함수규산염광물로서 카올린의 주 구성광물이다. 카올린을 구성하고 있는 광물은 기본화학식이 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 또는 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 이며, 카올리나이트 이외에 할로이사이트(Halloysite), 나크라이트(Nacrite), 딕카이트(Dickite)가 있으나, 카올리나이트와 할로이사이트가 주 구성광물이다. 카올린의 불순물로 운모, 석영, 장석, 스펙타이트, 산화철광물, 산화티탄광물, 산화망간광물 등이 소량 함유되어 있다.

이 광물들은 모두 화학식이 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 이지만 결정구조가 서로 다르다. 주 구성광물의 하나인 카올리나이트의 결정구조는 <그림 2-1>과 같이, 1개의 $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ 사면체층과 1개의 $[\text{Al}_4\text{O}_4(\text{OH})_4]$ 팔면체층으로 구성되어 있다.

입자들의 형태와 크기는 카올린의 성질을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 그것은 이 두 가지가 점토와 물의 혼합물의 변형성을 좌우하기

때문이다. 또한, 이물질의 혼입은 이들 성질에 큰 영향을 준다. 카올린에 다른 점토광물들이 존재한다거나 또는 철분이 카올린 광물 격자내에 있거나 독립체로 존재할 경우에는 카올린의 원광과 제품의 밝기를 낮추기 때문에, 이들 불순물은 카올린의 질을 저하시키는 가장 큰 요인이다.



<그림 2-1> 카올리나이트의 결정구조

2.4.2 화학적·물리적 성질

메타카올린의 경우에는 액체상태로 만들고 냉각하여 유리질을 생성하기 위한 온도보다 낮은 온도에서 소성되므로 결정구조가 파괴된다.

<표 2-3> 메타카올린의 화학적 성분

화학조성 (%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃
52.1	41.0	4.32	0.19	0.07	0.89	-

메타카올린은 ASTM C 618의 N급 포졸란으로 원료가 되는 제조된 지역의 카올린 광물에 따라 약간씩 물리·화학조성이 변할 수도 있으며,

색깔 또한 백색 및 연황색 등이 있다. 이러한 색상의 차이는 함유된 미량성분에 따라 변하게 되는데, 주로 Fe_2O_3 성분 에 의해 차이가 발생한다. 주성분은 SiO_2 와 Al_2O_3 이며, S/A의 이론적 비는 1.18 정도이다. 국내에서 생산되는 메타카울린의 경우에는 할로이사이트질의 카울린을 원료로 하기 때문에 다른 것과는 달리 Fe_2O_3 성분 함량이 다소 높아 연황색을 띄고 있으며, 강열감량도 약간 높다.

또한, 국내에서 생산되는 메타카울린의 경우에는 해외에서 생산되는 메타카울린에 비해 비표면적이 다소 작다. 이러한 비표면적의 차이는 제품의 사용 환경 및 조건에 따라 변동이 다소 가능한 것으로 보여진다.

일반적으로 시멘트 대체재로서 사용되는 포졸란은 gas와 이온의 확산성 저감하여 내구성을 개선함과 함께 더 치밀한 조직의 콘크리트를 만든다. 또한, 초미립 플라이애시, 실리카흙 및 메타카울린은 화학적으로 활동적이면서 유해한 대량의 수산화칼슘을 콘크리트에서 신속히 소비한다.

3. 사용재료 및 실험방법

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201에 규정된 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 시멘트에 대한 물리·화학적 조성은 KS의 규정에 적합한 것이었으며 이를 <표 3-1>과 <표 3-2>에 정리하였다.

<표 3-1> 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(분)		안정도 (%)	압축강도(MPa)		
		초결	종결		3일	7일	28일
3.15	3,235	293	384	0.09	20	27	36

<표 3-2> 시멘트의 화학적 성분

화학조성 (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	강열 감량	Free CaO	Insol. 불용잔분
61.3	21.1	5.20	2.80	4.00	2.40	2.00	0.60	0.20

3.1.2 혼화제

본 연구에서 사용한 각각의 광물질 혼화재료는 플라이애시, 고로슬래그, 메타카올린을 사용하였다. 플라이애시는 삼천포 화력발전소에서 생산된 분말도 4,400 cm²/g인 Class F 이고, S사에서 사용된 고로슬래그를 사용하였으며, N사의 메타카올린을 사용하였다. 이들 혼화제들은 강도증진과 장기강도 확보 및 내구성 증진에 좋은 재료로 알려져 있다.

본 연구에 사용한 각각 혼화제의 물리적 성질과 화학조성비는 <표 3-3>과 <표 3-4>와 같다.

<표 3-3> 혼화재료의 특성

종류 \ 항목	밀도	형태	주성분	비표면적(cm ² /g)
플라이애시	2.2	분말	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	4,000
고로슬래그	2.59	분말	SiO ₂ , CaO, Al ₂ O ₃	12,000
메타카올린	2.85	분말	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	6,000

<표 3-4> 혼화재료의 화학조성비

종류 \ 항목	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
플라이애시	49.1	26.4	9.3	1.4	1.4	5.0	0.8
고로슬래그	34.0	16.0	0.3	36.9	8.8	0.9	2.7
메타카올린	52.1	41.0	4.3	0.1	0.2	0.9	-

3.1.3 골재

본 연구에 사용한 사용골재는 부산근교에 위치한 김해지역에서 생산되는 부순골재(쇄석, 부순모래)를 사용한다. 특히 잔골재는 부순모래에 입도 조정용으로 낙동세사를 혼합하여(부순모래:낙동세사=7:3) 사용한다.

<표 3-5> 사용 골재의 물리적 성질

구분	최대치수 (mm)	비중	조립률
굵은 골재	25	2.7	2.31
잔골재	-	2.61	7.22

3.1.4 혼화제

본 연구에서는 국내 H사에서 생산되는 폴리카르본산계의 고성능감수제를 사용하며, 공기연행제로 AE제를 0.3% 첨가하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 사용골재의 물성실험

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

1) 시료의 채취

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

2) 체가름 시험

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

3) 밀도 및 흡수율 실험

밀도 및 흡수율 실험은 「KS F 2504 골재의 밀도 및 흡수율 실험 방법」에 준하여 실시하며, 콘크리트의 배합설계에 있어서 골재의 절대용적과 빈틈 및 사용수량을 파악할 수 있다.

3.2.2 배합설계

본 실험의 배합조건은 보통콘크리트인 PLC를 기준으로 물바인드비(W/B) 50%, 잔골재율(S/a) 43%, 단위시멘트량을 423 kg/m^3 으로 고정시켜 설계하였다.

고로슬래그를 혼입하여 2성분계 콘크리트, 고로슬래그와 플라이애시를 혼입하여 3성분계 콘크리트, 고로슬래그와 플라이애시 및 메타카올린을 혼입하여 4성분계 콘크리트라 하고, 각각의 혼입율은 다음 <표 3-6>의 배합설계표에 나타나있다.

<표 3-6> 배합설계표

구 분	f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	단위량(kg/m^3)							(g/m ³)	
							W	C	S	G	GB	FA	MK	AE1	AE2
PLC	24	25	50	4.5	50	43	211	423	668	916	-	-	-	844	338
2성분계								254	668	916	169	-	-	844	338
3성분계								254	668	916	127	42	-	844	338
4성분계								212	668	916	127	42	42	844	338

3.2.3 공시체의 제작 및 양생

한국산업규격에서 정하는 「KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법」에 준하여 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 몰드를 사용하여 압축강도 측정용 공시체를 제작한다.

특히 압축강도측정용 원주공시체는 상부의 재하면은 몰드를 제거하기 전에 캐핑(capping)을 실시한다. 캐핑은 콘크리트가 몰드 내에서 공시체 성형 후 된비빔의 콘크리트에서는 2~6시간, 진비빔에서는 6~24시간 또는 그 이상 경과한 후 콘크리트 상면의 레이턴스를 와이어 브러시로 제거하고 물로 습하게 한 후 된반죽의 시멘트풀(cement paste)을 몰드의 상단과 나란하게 일치하도록 놓고 유리판 등을 이용하여 눌러준다. 캐핑 시에는 두께 6mm 이상의 판유리나 두께 13mm 이상이고 몰드의 지름보다 25mm 이상 큰 최소면적을 가진 금속앞판을 사용한다. 공시체의 단면이 0.05mm 이상의 요철이 있으면 캐핑을 실시하여 0.05mm 이하가 되도록 하여야 한다.

제작된 모든 공시체는 성형 후 몰드를 제거하여야 하고, 수중양생을 실시한다. 3일 동해시험용 공시체는 재령 3일에, 7일 동해 시험용 공시체는 재령 7일에 각각 동결융해 실험기기에서 $4^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ 에서 하루 동안 총 6사이클 초기 동해 조건을 주고 양생을 실시한다.

3.2.4 굳지 않은 콘크리트 실험

1) 슬럼프 실험

굳지 않은 콘크리트의 반죽질기, 연도, 점조성 및 작업성 등을 파악하기 위하여 「KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 실험 방법」에 따라 슬럼프를 측정한다. 슬럼프의 측정모습은 <사진 3-1>과 같다.



<사진 3-1> 슬럼프 실험

2) 공기량 실험

콘크리트에서 공기량은 강도 및 작업성에 지대한 영향을 미친다. 그러므로 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 「KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 실험 방법」에 준하여 워싱턴 에어미터를 사용하여 측정한다. 공기량의 측정모습은 <사진 3-2>와 같다.



<사진 3-2> 공기량 실험

3.2.5 경화된 콘크리트 실험

1) 압축강도

압축강도 실험은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도 실험 방법」에 준하여 실시하며, 재령 7일, 14일, 28일에 해당되는 공시체를 꺼내어 압축강도를 측정한다. 측정값은 공시체 3개를 1조로 하여 평균값을 취하도록 한다. <사진 3-3>은 압축강도 측정 전경이다.



<사진 3-3> 압축강도 측정 전경

4. 실험결과 및 고찰

4.1 배합별 콘크리트의 압축강도 특성

콘크리트 배합 종류에 따른 압축강도 측정결과는 각각 <표 4-1>~<표 4-4>에 정리하였다. 이 표의 값들을 그래프로 나타내면 <그림 4-1>~<그림 4-4>와 같다. <그림 4-1>은 표준양생과 재령 3일차 초기동해, 재령 7일차 초기동해를 받은 PLC 콘크리트의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 표준양생에서는 재령이 7일, 14일, 28일 증가함에 따라 압축강도의 발현이 꾸준히 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 재령 3일차 초기동해를 받은 경우에는 압축강도가 확연하게 떨어진 것을 확인할 수 있다. 표준양생을 시킨 PLC 콘크리트보다 재령 3일차 초기동해를 받은 콘크리트의 경우에는 재령 7일에는 약 33%, 재령 14일에는 약 43%, 재령 28일에는 약 34% 압축강도가 감소하였다. 재령 7일차 초기동해를 받은 콘크리트의 경우에는 재령 14일에는 약 16%, 재령 28일에는 약 19% 압축강도가 감소하였다.

<그림 4-2>은 표준양생과 재령 3일차 초기동해, 재령 7일차 초기동해를 받은 2성분계 콘크리트의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 표준양생에서는 PLC 콘크리트와 마찬가지로 재령이 7일, 14일, 28일 증가함에 따라 압축강도의 발현이 꾸준히 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 재령 3일차 초기동해를 받은 경우에는 압축강도가 PLC 콘크리트보다 현저하게 떨어진 것을 확인할 수 있다. 표준양생을 시킨 2성분계 콘크리트보다 재령 3일차에 초기동해를 받은 콘크리트

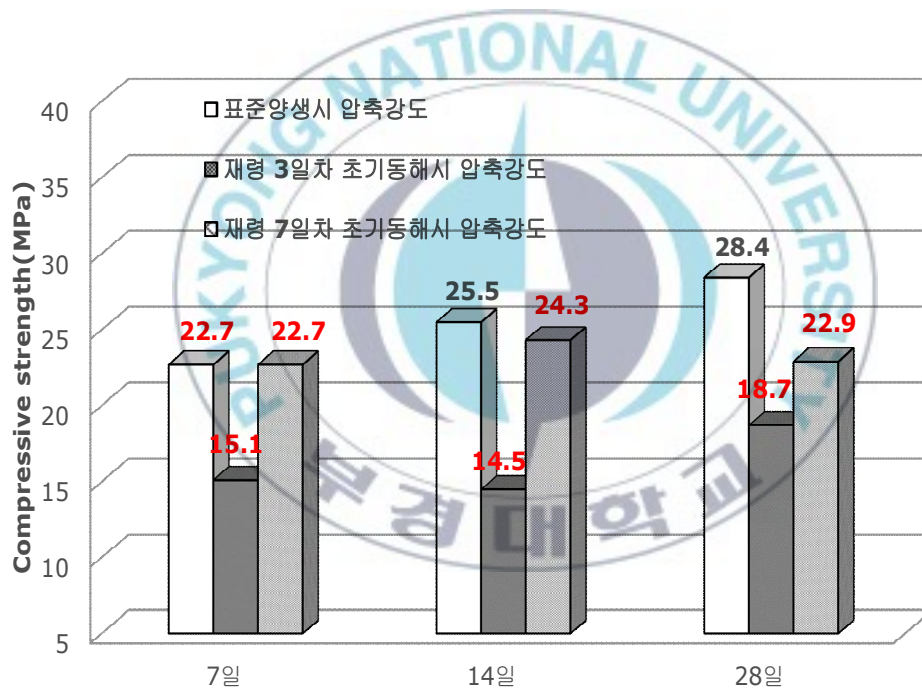
의 경우에는 재령 7일에는 약 50%, 재령 14일에는 약 41%, 재령 28일에는 약 37% 압축강도가 감소하였다. 재령 7일차에 초기동해를 받은 경우에는 재령 14일에 약 31%, 재령 28일에 30% 감소하였다.

<그림 4-3>와 <그림 4-4>은 표준양생과 재령 3일차 초기동해, 재령 7일차 초기동해를 받은 3성분계 및 4성분계 콘크리트의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 각 그래프를 살펴보면 표준양생에서는 PLC 콘크리트와 마찬가지로 재령이 7일, 14일, 28일 증가함에 따라 압축강도의 발현이 꾸준히 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 재령 3일차 초기동해를 받은 경우에는 앞서 2성분계 콘크리트와 비슷하게 압축강도가 현저하게 떨어진 것을 확인 할 수 있다. 표준양생을 시킨 3성분계 콘크리트보다 재령 3일차에 초기동해를 받은 경우에는 재령 7일에는 약 35%, 재령 14일에는 약 29%, 재령 28일에는 약 31% 압축강도가 감소하였고, 재령 7일차에 초기동해를 받은 경우에는 재령 14일에 약 11%, 재령 31일에 30% 감소하였다. 4성분계 콘크리트에서는 재령 3일차에 초기동해를 받은 경우에는 재령 7일에 약 11%, 재령 14일에는 약 30%, 재령 28일에는 약 47% 압축강도가 감소하였고, 재령 7일차에 초기동해를 받은 경우에는 재령 14일에 약 20%, 재령 28일에 18% 감소하였다.

압축강도를 보았을 때, 광물질 혼화재를 혼입한 다성분계 콘크리트의 경우에는 일반 PLC 콘크리트보다 초기 동해에 대한 열화에 취약한 것으로 판단된다. 이는 다성분계 콘크리트의 초기 강도발현이 PLC 콘크리트에 비해 늦은 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

<표 4-1> PLC 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

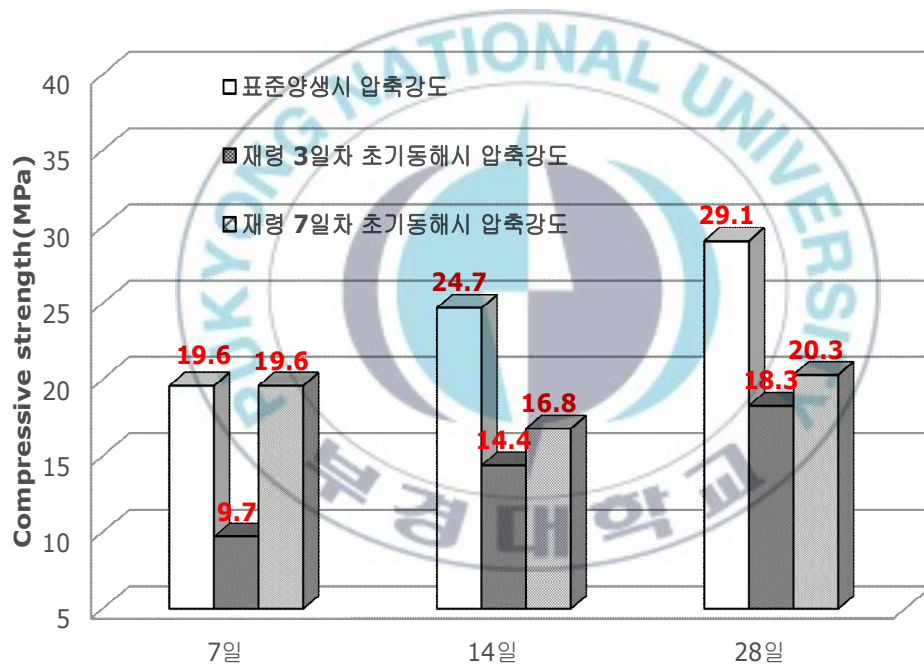
구분		재령	7 일	14 일	28 일
PLC	표준양생 압축강도(MPa)		22.7	25.5	28.4
	재령 3일차 동해	압축강도(MPa)	15.1	14.5	18.7
		감소율(%)	33.48	43.14	34.15
	재령 7일차 동해	압축강도(MPa)	22.7	24.3	22.9
		감소율(%)	0	16.08	19.37



<그림 4-1> PLC 콘크리트의 재령별 압축강도

<표 4-2> 2성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

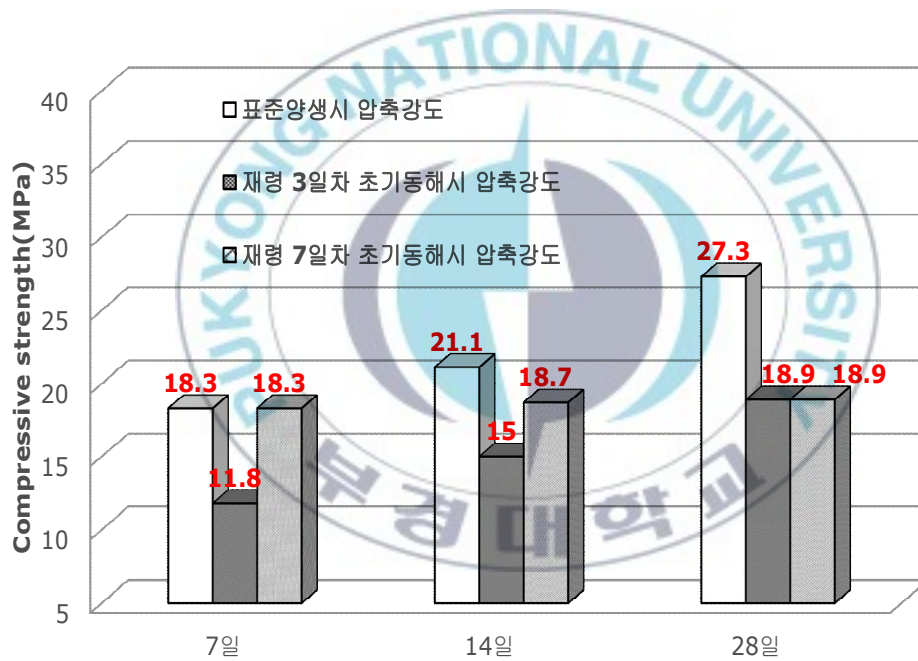
구분 \ 재령		7 일	14 일	28 일	
2성분계 콘크리트	표준양생 압축강도(MPa)		19.6	24.7	29.1
	재령 3일차 동해	압축강도(MPa)	9.7	14.4	18.3
		감소율(%)	50.51	41.7	37.11
	재령 7일차 동해	압축강도(MPa)	19.6	16.8	20.3
		감소율(%)	0	31.98	30.24



<그림 4-2> 2성분계 콘크리트의 재령별 압축강도

<표 4-3> 3성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

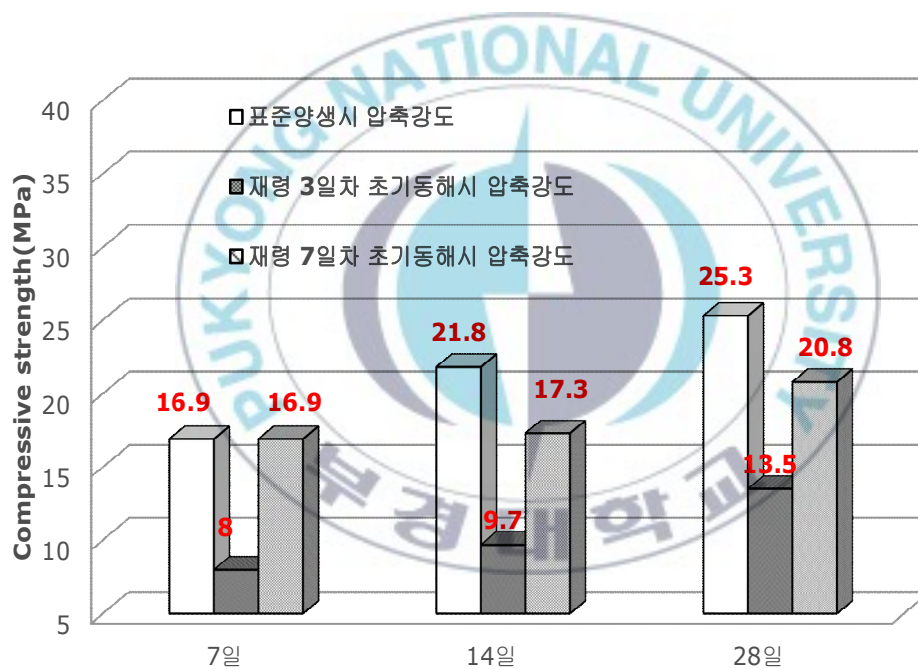
구분		재령	7 일	14 일	28 일
3성분계 콘크리트	표준양생 압축강도(MPa)		18.3	21.1	27.3
	재령 3일차 동해	압축강도(MPa)	11.8	15	18.9
		감소율(%)	35.52	28.91	30.77
	재령 7일차 동해	압축강도(MPa)	18.3	18.7	18.9
		감소율(%)	0	11.37	30.77



<그림 4-3> 3성분계 콘크리트의 재령별 압축강도

<표 4-4> 4성분계 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

구분 \ 재령		7 일	14 일	28 일
4성분계 콘크리트	표준양생 압축강도(MPa)	16.9	21.8	25.3
	재령 3일차 동해	압축강도(MPa)	8	9.7
		감소율(%)	52.66	55.5
	재령 7일차 동해	압축강도(MPa)	16.9	17.3
		감소율(%)	0	20.64
			20.64	17.79



<그림 4-4> 4성분계 콘크리트의 재령별 압축강도

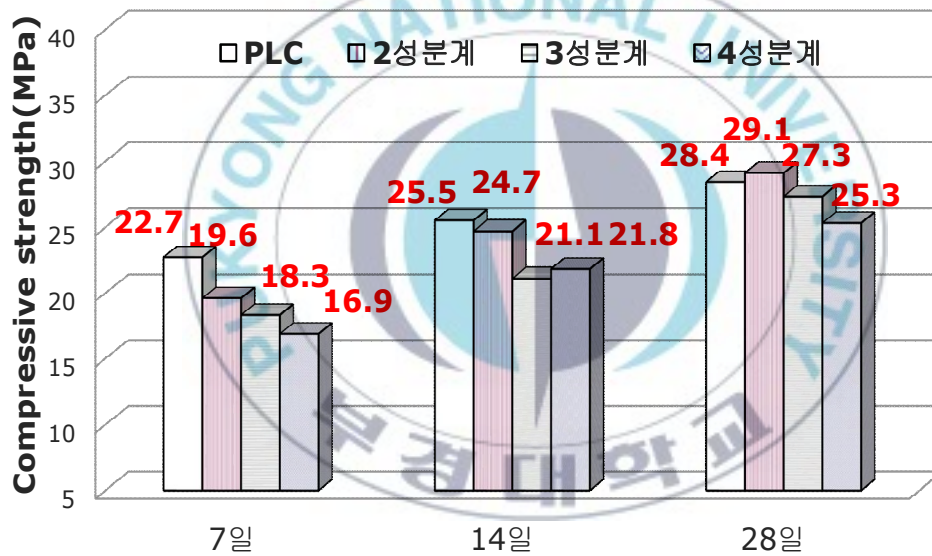
4.2 초기 동해 시점별 콘크리트의 압축강도 특성

콘크리트의 압축강도는 초기 동해 시점에 대한 영향이 직접적으로 영향을 작용하는 것으로 나타난다. 초기동해 시점에 따른 콘크리트 압축강도 측정결과는 각각 <표 4-5>~<표 4-6>에 정리하였다. 이 표의 값들을 그래프로 나타내어, <그림 4-5>은 표준양생한 콘크리트의 압축강도를, <그림 4-6>은 재령 3일차 초기 동해시 콘크리트의 압축강도를, 그리고 <그림 4-7>은 재령 7일차 초기 동해시 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. <그림 4-5>에서 압축강도를 살펴보면, 표준양생한 PLC 콘크리트가 재령 7일, 14일에 강도가 다른 공시체들보다 높았으며, 재령 28일에는 2성분계 콘크리트가 가장 높은 강도를 발현하였고, 모든 공시체들의 압축강도가 재령이 증가함에 따라 큰 변화 없이 설계 기준강도($f_{ck} = 24 \text{ MPa}$)를 만족하는 강도를 발현하였다. 재령 3일차 초기 동해를 받은 <그림 4-6>에서 압축강도를 살펴보면, 모든 재령에서 모든 공시체의 압축강도가 현저하게 낮아짐을 확인 할 수 있다. 표준양생시의 압축강도와 비교하였을 때, 작게는 28%에서 많게는 55%로 감소하여 재령 28일 기준으로 설계 기준 강도를 만족하지 못 하였다. 재령 7일차 초기 동해를 받은 콘크리트의 압축강도는 <그림 4-7>를 살펴보면, 압축강도의 감소가 17%에서 32%정도로 재령 3일차 보다는 감소가 낮으나 마찬가지로 재령 28일 기준으로 설계 기준 강도를 만족하지 못 하였다.

압축강도에 대한 결과 값으로 볼 때, PLC 콘크리트보다 광물질 혼화재를 혼입한 다성분계 콘크리트가 초기 동해 열화에 취약하다고 판단되어진다.

<표 4-5> 표준양생시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

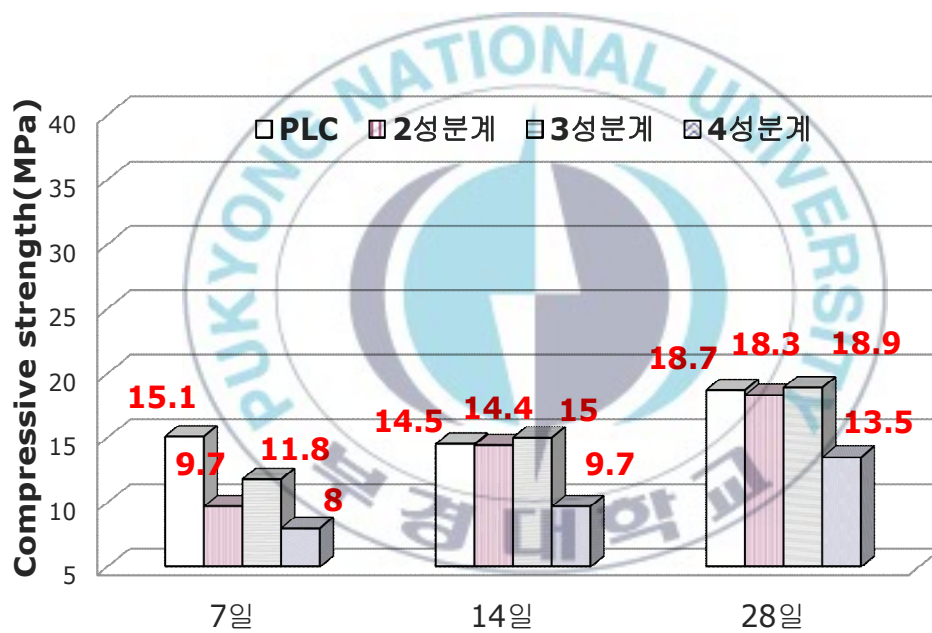
구분 \ 재령	7 일	14 일	28 일
PLC 콘크리트 압축강도(MPa)	22.7	25.5	28.4
2성분계 콘크리트 압축강도(MPa)	19.6	24.7	29.1
3성분계 콘크리트 압축강도(MPa)	18.3	21.1	27.3
4성분계 콘크리트 압축강도(MPa)	16.9	21.8	25.3



<그림 4-5> 표준양생시 압축강도

<표 4-6> 재령 3일차 동해시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

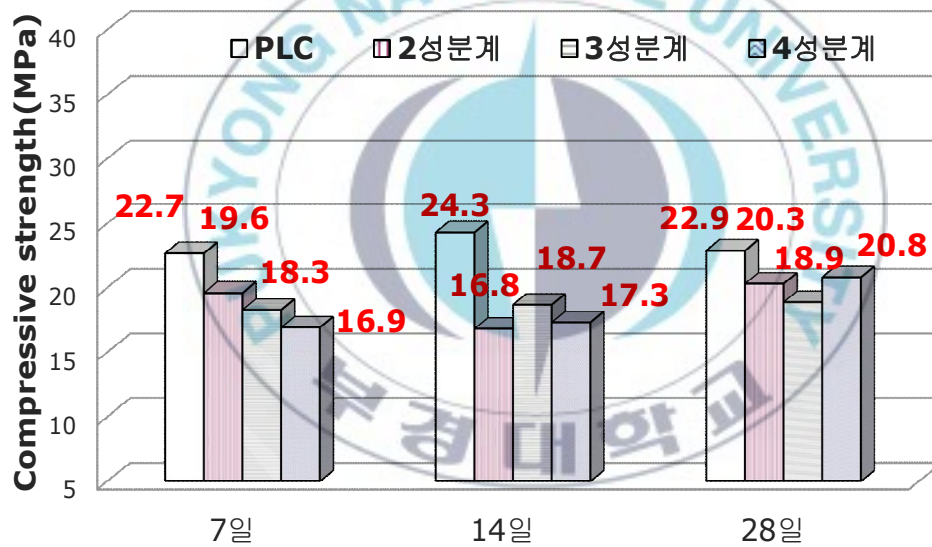
구분 \ 재령	7 일		14 일		28 일	
	강도 (MPa)	감소율 (%)	강도 (MPa)	감소율 (%)	강도 (MPa)	감소율 (%)
PLC 콘크리트 압축강도	15.1	33.48	14.5	43.14	18.7	34.15
2성분계 콘크리트 압축강도	9.7	50.51	14.4	41.7	18.3	37.11
3성분계 콘크리트 압축강도	11.8	35.52	15	28.91	18.9	30.77
4성분계 콘크리트 압축강도	8	52.66	9.7	55.5	13.5	46.64



<그림 4-6> 재령 3일차 초기동해시 압축강도

<표 4-7> 재령 7일차 동해시 배합별 콘크리트의 재령별 압축강도 변화특성

구분 \ 재령	7 일	14 일		28 일	
	강도 (MPa)	강도 (MPa)	감소율 (%)	강도 (MPa)	감소율 (%)
PLC 콘크리트 압축강도	22.7	24.3	16.08	22.9	19.37
2성분계 콘크리트 압축강도	19.6	16.8	31.98	20.3	30.24
3성분계 콘크리트 압축강도	18.3	18.7	11.37	18.9	30.77
4성분계 콘크리트 압축강도	16.9	17.3	20.64	20.8	17.79



<그림 4-7> 재령 7일차 초기동해시 압축강도

4.3 강도손실율

강도손실율은 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트와 표준양생한 PLC 콘크리트와 비교했을 시, 초기 동해에 따른 강도 손실정도를 파악하기 위한 것으로, 여기서 압축강도의 강도손실율은 다음 식과 같다.

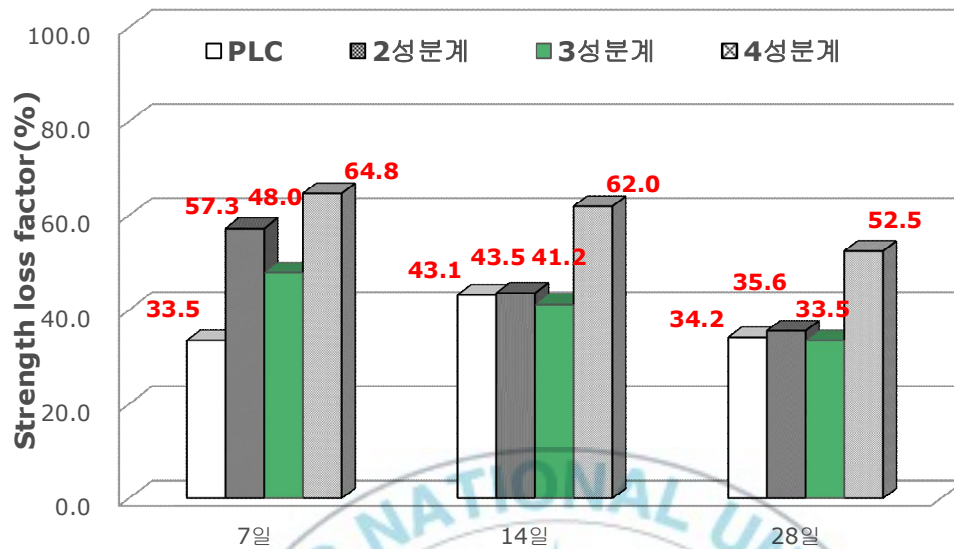
$$\text{강도손실율}(\%) = \frac{\text{표준양생PLC압축강도} - \text{초기동해시점별 압축강도}}{\text{표준양생PLC압축강도}} \times 100$$

<그림 4-8>은 재령 3일차 초기동해시 강도손실율을 나타낸 그래프이다. 재령 3일차 초기 동해시에는 모든 콘크리트에서 매우 큰 강도손실율을 보였는데, PLC 콘크리트의 경우 재령 28일 기준으로 34%의 손실율을 보였다. 광물질을 혼입한 다성분계 콘크리트의 경우, 재령 7일차에는 2성분계와 3성분계 및 4성분계 모두 48%에서 65%의 큰 손실율을 보였고, 재령 28일에서는 2성분계와 3성분계는 33%에서 35%의 손실율을 보였고, 4성분계의 경우 53%로 매우 큰 손실율을 보였다.

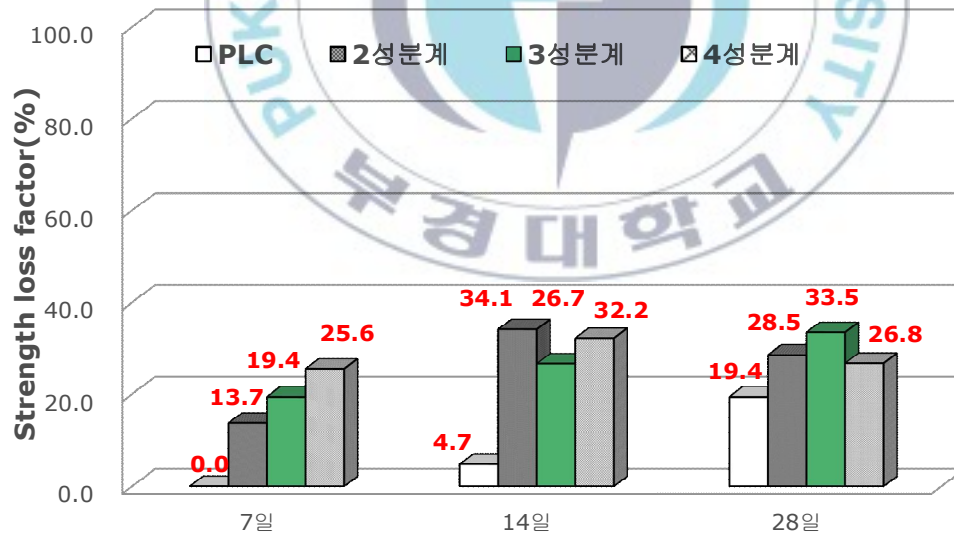
<그림 4-9>은 재령 7일차 초기 동해시 강도손실율을 나타낸 그래프이다. 재령 7일차 초기 동해시에서는 PLC 콘크리트의 경우 재령 28일 기준으로 19%의 손실율을 보였다. 광물질을 혼입한 다성분계 콘크리트의 경우, 재령 28일을 기준으로 2성분계와 3성분계 및 4성분계 각각 29%, 34%, 27%의 손실율로, PLC보다 높은 손실율을 보였다.

광물질 혼화재를 혼입하지 않은 PLC 콘크리트의 강도손실율은 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트와 비교하였을 경우 손실율이 낮은 것을 확인 할 수 있다. 이는 광물질 혼화재를 혼입한 다성분계 콘크리트가 PLC 콘크리트에 비해 초기 강도 발현이 늦어, 일정 수준의 내구성능이

갖추어지지 않아 초기 동해에 대해 취약한 것으로 판단되어진다.



<그림 4-8> 재령 3일차 초기동해시 강도손실율



<그림 4-9> 재령 7일차 초기동해시 강도손실율

5. 결 론

본 연구에서는 비교목적으로 제작한 보통 콘크리트(PLC)와 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트(2성분계, 3성분계, 4성분계)를 제작하여 재령 3일, 7일에 동해 조건을 주어, 각각 콘크리트의 압축강도를 측정하여 초기 동해에 대한 내구성을 평가하였다.

그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 표준 양생시에는 모든 실험에서 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 성능이 향상되었으나, 초기 동해시에는 표준 양생한 콘크리트보다 성능이 저하됨을 확인 하였다. 초기 동해에 따른 물리적 열화가 진행되어 시편의 손상도가 증가하였고, 재령이 증가함에 따라 강도의 회복이 조금은 나타나나 원래의 성능보다 떨어지는 것을 확인하였다.

(2) 다성분계 콘크리트는 PLC 콘크리트에 비하여 초기 동해 저항성이 낮은 것을 확인하였다. 특히 4성분계 콘크리트는 초기 동해 저항성이 매우 낮은 것을 확인 하였다. 이는 결합재의 종류가 많아, 시멘트 양이 줄어 초기강도 발현이 어려워 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다.

전체적으로 종합해보면, 본 연구결과에서는 결합재 사용에 있어서 장기적인 관점에서는 내구 성능 향상 및 경제적인 효과를 볼 수 있으나, 초기 동해에 대한 저항성이 낮기 때문에 시공초기 구조물이 노출된 환경에 의해 콘크리트의 품질이 좌우 될 수 있다고 판단되어진다. 따라서 시공기술의 발달과 공기단축을 위한 연중시공이 증가되는 현 시점에서,

광물질 혼화재를 혼입한 다성분계 콘크리트 구조물이 초기 동해에 취약하므로, 한절기 시공시에는 콘크리트의 내구성능을 위한 엄격한 품질 관리가 동반되어야 장기적으로 보통 시멘트 콘크리트보다 내구성능 향상 및 경제적으로 우수한 효과를 낼 것으로 판단되어진다.

향후 본 연구를 보완하는 실험으로 첫 번째, 초기 동해 시점을 세분화하여 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트의 최적 양생 기간을 산정하는 것이고, 두 번째로 4성분계 콘크리트의 보다 나은 성능을 발현 하기 위한 최적 배합안을 도출하여, 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트 구조물의 경제성을 살리고, 또한 내구성에 대해 보다 체계적이고 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단된다.



참고문헌

1. 권영진, “동결기 초기재령에서 동해를 받은 고강도 콘크리트의 내해동성 평가에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회지, 제13권, 1호, 2001년 4월, pp.139-145
2. 권영진 외 3명, “동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능 설계”, 콘크리트학회, 제18권 제4호, 2006년 7월, pp.41-48
3. 김진수 외 3명, “초기동해를 입은 시멘트 모르타르의 탄산화 특성”, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제25권, 제1호, 2005년 10월, pp.209-212
4. 배수호, 이준구, “3성분계 시멘트를 사용한 콘크리트의 내구성 평가”, 대한토목학회논문집, 제27권, 제2A호, 2007년 3월, pp.271-276
5. 배주성 외 3명, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 공극구조와 압축강도에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제26권, 5A호, 2006년 9월, pp.927-934
6. 백민수, 전상진, “플라이애시를 다량 치환한 콘크리트의 초기특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 18권, 11호, 2002년 11월, pp.91-98
7. 안태호, 김용태, 김병기, “시멘트·콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린 응용 가능성”, 콘크리트학회지, 제14권, 4호, 2002년 7월
8. 윤우현, “동해와 그 대책”, 콘크리트학회지, 제4권, 1호, 1992년 3월, pp.25-34
9. 이상수, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 22권, 5호, 2006년 5월, pp.137-144
10. 이창수, 윤인석, “플라이애시와 고로슬래그 미분말을 복합 활용한 3성분계 혼합 콘크리트의 내구성능에 대한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회, 제7권, 제1호, 2003년 1월, pp.139-145
11. 사단법인 한국 콘크리트학회, “콘크리트 구조설계기준”, 한국 콘크리트학회, 2007년.
12. Adam Neville, “Properties of Concrete”, 4rd Ed., Wiley, 1997.
13. Cordon, W., A., Freezing and Thawing of Concrete-Mechanism and Control, Monograph No.3, ACI/Iowa State University Press, Detroit, 1966, 99pp.