



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

결합재 종류와 양생조건에 따른 시멘트 모르타르의 기초물성에 관한 실험적 연구



부경대학교 산업대학원

토목공학과

손 홍 우

공 학 석 사 학 위 논 문

결합재 종류와 양생조건에 따른 시멘트 모르타르의 기초물성에 관한 실험적 연구

지도교수 김 명 식

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2008년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

손 홍 우

손홍우의 공학석사 학위논문을 인준함

2008년 2월 26일



주심 공학박사 장희석 인
위원 공학박사 이환우 인
위원 공학박사 김명식 인

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	4
2.1 해수의 작용에 의한 침식 반응 기구	4
2.1.1 해수에 의한 콘크리트의 침식작용	5
2.1.2 염해에 의한 철근 부식 메커니즘	9
2.2 염해 저항성 향상을 위한 콘크리트의 내구성 향상 방안	10
2.2.1 내염성 향상을 위한 콘크리트 구성재료의 사용 조건	10
2.3 혼화재료	20
2.3.1 실리카흙	20
2.3.2 플라이애쉬	22
2.3.3 메타카올린	26
2.3.4 고성능AE감수제	29
3. 실험계획 및 방법	31
3.1 실험파라미터	31
3.2 실험방법	32

3.2.1 사용골재의 물성시험	32
3.2.2 모르타르의 제작	34
3.2.3 시편의 제작 및 양생	34
3.2.4 굳지 않은 모르타르 시험	35
3.2.5 경화한 모르타르 시험	35
3.3 사용재료	37
3.3.1 시멘트	37
3.3.2 결합재	37
3.3.3 골재	38
3.3.4 혼화제	38
3.3.5 양생수(침적용액)	38
3.4 시편제작	40
4. 실험결과 및 고찰	41
4.1 사용골재의 품질 특성	41
4.2 굳지 않은 모르타르의 품질 특성	42
4.3 외형 변화 특성	42
4.4 경화한 모르타르의 특성	44
4.4.1 단위중량	44
4.4.2 압축강도	52
5. 결론	60
참고문헌	62
감사의 글	

표목차

표 1 해양환경에서의 콘크리트 내구성 확보를 위한 시멘트재료 사용규정(국외)	12
표 2 해양환경에서의 콘크리트 내구성 확보를 위한 시멘트재료 사용규정(국내)	13
표 3 해양환경에 폭로한 콘크리트의 내염성 평가에 대한 연구 결과	19
표 4 Fly Ash의 품질규정	24
표 5 메타카올린의 화학적 성질	28
표 6 고성능 AE감수제의 성능	30
표 7 실험파라미터	31
표 8 보통포틀랜드시멘트의 특성	37
표 9 광물질 혼화재료의 물리·화학적 특성	37
표 10 고성능AE감수제의 물리·화학적 특성	38
표 11 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 최대 물-시멘트비	39
표 12 실험변수에 따른 시편 종류	40
표 13 사용골재의 품질 특성	41
표 14 결합재 및 양생조건 변화에 따른 경화한 모르타르의 단위중량	46
표 15 결합재 및 양생조건 변화에 따른 경화한 모르타르의 압축강도	54

그림목차

그림 1 카올리나이트의 결정구조	27
그림 2 모르타르의 제작과정	34
그림 3 실험 개요	36
그림 4 양생조건에 따른 재령별 외형변화	44
그림 5 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 28일)	47
그림 6 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 60일)	47
그림 7 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 90일)	48
그림 8 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 180일)	48
그림 9 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 270일)	49
그림 10 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 365일)	49
그림 11 양생조건에 따른 단위중량 변화율(담수)	50
그림 12 양생조건에 따른 단위중량 변화율(해수)	50
그림 13 양생조건에 따른 단위중량 변화율(10% 황산나트륨용액)	51
그림 14 양생조건에 따른 단위중량 변화율(10% 황산마그네슘용액)	51
그림 15 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(담수)	55
그림 16 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(해수)	55
그림 17 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(10% 황산나트륨용액)	56
그림 18 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(10% 황산마그네슘용액)	56
그림 19 재령에 따른 압축강도 변화율(담수)	57
그림 20 재령에 따른 압축강도 변화율(해수)	57
그림 21 재령에 따른 압축강도 변화율(10% 황산나트륨용액)	58
그림 22 재령에 따른 압축강도 변화율(10% 황산마그네슘용액)	58

A Study on the Experimental of Basic Property of Cement Mortars under Different Types of Binder and Curing Conditions

Hong - Woo, Son

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

Abstract

Recently nature sand of good quality that is accomplishing main current until the mid-1980s by fast growth of construction field along with economy development is run dry almost, is real condition that is alternated by crushed sand that is produced in stony mountain.

Concrete structures exposed to sulfate environments are apt to be deteriorated due to sulfate attack. It is, therefore, necessary to establish some plan to restrict the sulfate attack. In the present study, it was investigated the compressive strength and the unit weight change of cement mortars, and microstructure of paste immersed during immersion period in 4types of solution.

As this study is to estimate resistance of cement mortars using crushed sand under chemical attacks. Besides tests have been carried out with cement mortars by river sand and crushed sand by fine sand, cement mortars mix various proportions of silica fume(up to 5% and 15% by weight for cement), fly ash(up to 15% and 50% by weight for cement) and Metakaolin(up to 5% and 15% by weight for cement)

were prepared and immersed in pure water, sodium sulfate solution, magnesium sulfate solution, seawater for 28days, 60days, 90days, 180days, 270days, and 365days. Test on the change in the compressive strength and the unit weight of cement mortars according to the duration of immersion time and the content of silica fume, fly ash and Metakaolin was performed.

Key words : sulfate attack, Korean Standard, silica fume, fly ash, Metakolin, unit weight, compressive strength, chemical attack



1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

지금까지 콘크리트는 대략 반세기 정도의 사용 수명을 갖는다는 것이 일반적인 인식이었고, 이에 따라 콘크리트 구조물은 특별한 유지 관리 없이도 그 이상의 수명을 갖는 다고 믿어왔다. 그러나 최근 들어 여러 연구 결과와 현장조사에 따르면, 콘크리트는 노출 환경과 사용 재료에 따라 내구성이 현저히 저하하여 실제 구조물 전반에 심각한 문제를 발생시키는 것으로 조사되었다. 더욱이 최근 양질의 천연 재료들이 고갈되는 등 콘크리트 구조물이 유해 환경에 노출될 가능성이 더욱 높아짐에 따라 콘크리트 구조물의 내구적 열화 현상은 더욱 심화될 것으로 예측된다. 또한 이러한 콘크리트의 내구적 열화 문제는 구조물의 안전성 측면에서만뿐만 아니라, 구조물의 보수 및 유지 관리 측면의 경제적 요인과도 관련되어 있어 사회적으로도 그 관심이 고조되어가고 있는 실정이다. 이에 따라 최근 구조물의 건전성 확보 및 효율적인 유지관리를 위해, 구조물의 내구적 성능 및 사용 수명을 평가할 수 있는 시스템 구축에 관한 요구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

일반적으로 콘크리트의 주요 내구적 열화 현상에는 염해, 중성화, 동결융해, 황산염 침해 등이 있다. 이들 열화 현상의 공통점은 각 열화 메커니즘에 의해 콘크리트 내부에 팽창압이 유발되어 인장력에 약한 콘크리트가 재료적, 구조적으로 손상된다는 점이다. 결국 내구적으로 우수한 콘크리트란 물리적으로 공극 내부 구조가 밀실하여 유해 물질의 침투에 대한 저항성이 높고 화학적으로 외부로부터 유입된 유해물질에 대한 저항성을 가지는 콘크리트를 의미하며, 이러한 콘크리트의 내구성은 설계적 요인, 시공적 요인에 따라 콘크리트 품질, 열화정도 및 유지관리에 의해 결정된다.

특히 육상에 건설되는 콘크리트 구조물과 달리 해양환경에서 건설되는 콘크리트 구조물들은 해수의 의한 콘크리트 경화체의 열화 및 철근 부식의 영향을 받는 매우 가혹한 환경에 놓이게 된다. 이러한 해양 환경에서 해수에 의한 콘크리트의 열화는 해수와 직접 접촉하는 부위뿐만 아니라 조류, 파도, 바람 등에 의해 간접적으로 영향을 받는 구조물에서도 발생하여 장기적으로 내구성을 저하시켜 구조물의 사용 년한을 단축시킨다. 해수가 콘크리트에 미치는 작용은 황산염에 의한 콘크리트 조직의 파괴(황산염에 의한 작용)와 염화물의 침투에 의한 철근부식(염화물의 의한 작용)이라는 2가지로 크게 나눌 수 있다.

최근까지 해양 콘크리트 구조물의 경우 염화물의 침투에 의한 철근부식에 대한 연구가 주를 이루었다. 그러나 해수의 염류에 포함된 SO_4^{2-} , Mg^{2+} 등과 같은 성분들도 시멘트 경화체에 직접적으로 작용하여 콘크리트 조직을 파괴함으로서 해양환경에서의 중요한 열화인자로 인식되면서 그 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해양환경에 노출된 콘크리트 열화를 방지하기 위해, 시멘트에 광물질 혼화재료(실리카흙, 플라이애쉬, 메타카올린)를 첨가하여 모르타르를 제작하여 표준양생한 후 담수, 해수, 10% 황산염 용액에서 촉진양생시킨 다양한 시편의 기초물성(외관조사, 단위중량, 압축강도)에 대해 실험을 수행하였으며, 이 실험결과를 토대로 해양환경에 노출된 콘크리트 제조에 기초자료로 제시하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서 사용된 골재는 부산근교 김해지역 석산에서 생산되는 쇄석과 부순모래를 사용하였다. 그리고 부순모래의 입도조정용으로 낙동사를 전체 잔골재의 30%를 혼입하여 사용하였다. 시멘트는 국내 S사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트, 광물질 혼화재료로 노르웨이 Elkem사에

서 생산되는 실리카흙 분말, 국내 S사의 충남 보령산 플라이애쉬, 국내 A사의 메타카올린을 사용하였다. 혼화제는 국내 D사에서 생산된 고성능 AE감수제를 사용하였다.

그리고 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 변화를 측정해야하는 시간적인 제한 때문에 황산염 용액을 10%로 제조하여 촉진 양생 실험을 하였다.

본 실험에서 설계기준강도는 35MPa, 물-시멘트비(W/C) 45%, Flow 치는 115~130mm 범위를 만족하도록 한다. 결합재로 사용된 광물질 혼화재료 중 실리카흙의 사용량은 시멘트 단위중량의 5%, 10%, 15%, 플라이애쉬의 사용량은 시멘트 단위중량의 15%, 30%, 50%, 메타카올린의 사용량은 시멘트 단위중량의 5%, 10%, 15%로 치환하여 배합설계를 실시하였다. 이렇게 제작한 모르타르의 각종 특성변화를 파악하기 위해 다음과 같은 순서 및 방법에 의하여 연구를 수행하였다.

- ① 문헌고찰을 통해 해양 환경에 노출된 콘크리트의 특성과 황산염 침해 메커니즘에 대한 특성을 살펴본다(박영식 등, 1998; 이광명 등, 2000; 문한영 등, 2000; 이효민 등, 2003; 김광열, 2005).
- ② 선정된 사용재료의 물리·화학적 특성을 물성시험을 통하여 파악한다.
- ③ 각 사용재료의 물성시험을 통해 획득한 자료를 토대로 배합설계를 실시하여 기준 시방배합표를 작성한다(한천구, 1998; 최재진 등,

2000; 한국콘크리트학회, 2004).

- ④ 기준 시방배합표를 토대로 사용 시멘트에 결합재로 실리카흙(사용 시멘트 중량의 5%, 10%, 15%), 플라이애쉬(사용 시멘트 중량의 15%, 30%, 50%) 및 메타카올린(사용시멘트 중량의 5%, 10%, 15%)을 치환하여 모르타르를 제작한다.
- ⑤ 제작된 모르타르의 굳지 않은 모르타르의 특성을 파악하기 위해 Flow 치를 측정한다.
- ⑥ 제작한 모르타르 시험체를 표준양생 후 다양한 양생조건(담수, 해수, 10% 황산나트륨용액, 10% 황산마그네슘용액)에서 양생시켜 재령(표준양생 28일, 침적양생 28일, 60일, 90일, 180일, 270일, 365일)에 따른 단위중량과 압축강도를 측정한다.
- ⑦ 결합재 종류와 양생조건에 따른 기초물성(단위중량 및 압축강도 변화)을 분석하여 해양에서 건설되는 콘크리트 공사의 기초적 자료로 제시한다.

2. 문헌 고찰

2.1 해수의 작용에 의한 침식 반응 기구

해양 환경하에서 콘크리트의 열화 원인은 크게 물리적인 요인과 화학적인 요인으로 구분할 수 있다. 물리적인 요인으로는 해상의 파력, 조력, 풍력이나 조류와 동결 융해 등 환경에 기인하는 것이며, 화학적 침식은 주로 해수나 해양 매립지 중의 지하수에 녹아 있는 염소(Cl^-), 황산염(SO_4^{2-}), 마

그네슘(Mg^{+}), 나트륨(Na^{+}) 등의 염류들이 시멘트 수화물과 반응을 하여 시멘트 경화체를 붕괴시키거나 철근 콘크리트 중의 철근을 부식시키게 된다. 특히 해수 중 염소 이온과 황산염 이온이 염해를 일으키는 주요한 원인으로 작용하고 있는 것으로 알려져 있다(Neville, 1997).

2.1.1 해수에 의한 콘크리트의 침식 작용

1) 황산염(SO_4^{2-})에 의한 침식 작용(Neville, 2004)

황산염에 의한 콘크리트의 침식은 황산염이 시멘트의 수화 생성물과 반응하여 팽창을 일으키는 작용에서 야기된다. 황산염에 의한 시멘트 팽창 파괴 기구에 대해서는 연구자에 따라서 다소의 이론이 제기되고 있으며, 열화 기구에 대해서는 크게 다음과 같이 분류할 수 있다.

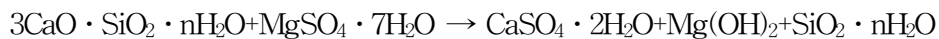
가. 경화체 내부로 침투한 SO_4^{2-} 이온과 시멘트 칼슘알루미네이트수화물($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$)과의 반응에 의한 에트링자이트(Ettringite, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot nH_2O$)의 생성에 따른 용적 팽창(Cohen et al, 2003).

나. P.K Metha에 의하면 두 종류의 에트링자이트 중 Type I은 넓은 박편상의 결정형태로 길이는 $10 \sim 100\mu m$, 두께는 수 μm 정도로 낮은 수산기($-OH$ 기) 조건하에서 생성되며, Type II는 봉상결정으로 길이 $1 \sim 2\mu m$, 두께 $0.1 \sim 0.2\mu m$ 로 높은 수산기 분위기하에서 생성되는데 이 때의 Type II 생성이 황산염에 의한 팽창파괴 원인으로 작용한다는 이론.

다. Calcium Monosulpho Aluminate Hydrate($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$:

이하 모노설페이트라 함)의 생성에 기인한다는 이론(Torres, 2003).

이러한 황산염에 의한 침식 작용을 보다 상세히 살펴보면, 외부로부터 시멘트 경화체 내부로 침입한 황산염이 칼슘알루미네이트 수화물과 반응하여 생성되는 에트링자이트 생성에 따른 팽창압 외에 석고와 동시에 생성되는 $Mg(OH)_2$ 가 시멘트 수화반응 중에 생성된 경화 조직의 주 성분인 칼슘실리케이트를 분해시킴으로써 황산염에 대한 침식 작용이 더 현저하게 일어난다.



2) 염화물(Cl^-)에 의한 침식작용

황산염에 의한 침식 작용이 팽창성 수화물의 생성에 따른 경화체의 물리적인 파괴(팽창성 균열)에 기인한다면 염화물에 의한 침식은 시멘트 경화체 조직의 다공화와 2차적인 철근 부식에 기인하며 콘크리트 구조물의 강도 저하와 열화를 일으키는 주요인으로 작용을 한다. 염화물 이온에 의한 침식 작용으로 다음을 들 수 있다.

가. Cl^- 이온에 의한 침식은 Cl^- 이온과 시멘트 수화물인 $Ca(OH)_2$ 와의 반응으로 가용성 $CaCl_2$ 의 생성 및 용출에 따른 경화체 조직의 다공화에 기인하며, 이 때 일부의 Cl^- 이온은 가용성이 없는 프리델씨염(Friedel's salt : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)으로 고정된다(Mindess, 2003).

나. Ftikos에 의하면 Cl^- 이온의 침투에 따라 경화체 조직의 다공화와 더불어 대표적인 수화생성물인 C-S-H로부터 칼슘 성분이 용출되며, 공극을 통해 마그네슘(Mg^{+})의 침투로 경화 조직인 C-S-H가 수경성이 없는 M-S-H(Magnesium Silicate Hydrate)로 전환된다.

다. G.L. kalousk는 SO_4^{2-} 의 침투깊이가 4mm일 때, Cl^- 이온은 13mm 정도 침투하고 있어 염해환경에서 콘크리트의 전체적인 강도 저하 현상은 중심부까지 침투한 Cl^- 이온의 영향인 것으로 보고되고 있다.

라. 콘크리트 중에 침투한 염화물 중 일부는 팽창성의 $\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 수화물로 석출되어 경화체를 팽창 파괴시킨다는 연구도 있다.

3) 황산염(SO_4^{2-})과 염화물(Cl^-)이 공존하는 환경에서의 침식 작용

해양 환경에서 해수 중의 황산염이나 염화물 이온의 화학적 침식 작용은 각 이온에 따라 다르며, 각 이온들이 공존함에 따라 그 작용은 다음과 같이 서로 상이한 침식 기구를 갖는다고 알려져 있다.

가. 염화물이 황산염이 공존하는 혼합 용액 중에서는 SO_4^{2-} 이온의 침입이 촉진되는 반면, Cl^- 의 침투는 작아진다는 시험 결과

나. 시멘트 경화체 내에서 해수의 침식 작용은 초기 재령에 있어서 Cl^- 이온의 침투가 주원인이며, 이때 Cl^- 이온은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 경화체 내부를 다공화시키고 일부는 프리텔씨염으로 고정되거나 수용성 염소로 남게 된다. 고정되지 않은 수용성 염소는 철근이 부식을 일으키는 촉매 작용을 함으로써 콘크리트 내부 열화의 요인으로 작용을 한다. 그러나 장기간 침지 후에는 경화체 내부로 황산염 이온이 침투하여 프리텔씨염과 반응하여 에트린자이트를 생성하여 표층부에서부터 팽창 파괴를 일으키게 되며, 또한 C_3A 함량이 많은 시멘트는 침투한 Cl^- 이온을

프리텔씨염으로 고정시키지만, 침투되는 SO_4^{2-} 이온과 반응하여 다시 에트린자이트로 전환됨으로써 본질적으로 염소 이온의 침투를 억제하기 위해서는 치밀한 조직을 가진 경화체를 구성할 필요가 있다고 하였다.

다. Cl^- 이온의 침투는 보통 시멘트 보다 C_3A 의 함량이 극단적으로 낮으면 염화물에 대한 저항성이 감소하여 내염성도 저하하게 된다.

라. 시멘트 경화체에서 염화물 이온(Cl^-)과 황산염이온(SO_4^{2-})의 확산 속도는 큰 차이가 나며 시멘트 경화체 내로 투과하는 투과량으로부터 구한 염화물 이온의 겔보기 확산계수는 $D_{\text{Cl}} = 1 \sim 4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 인데 반해 황산염 이온의 겔보기 확산계수는 $D_{\text{SO}_4^{2-}} = 1 \sim 6 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 으로 약 100배 정도 염화물 이온의 침투 속도가 빨라 초기 열화의 주요인으로 작용하게 된다.

따라서 염해에 의해 콘크리트 경화체에 직접적으로 작용하는 침식기구에 대하여 많은 연구자들의 공통된 견해를 토대로 침식기구를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

① 황산염과 시멘트 클링커 광물 중의 C_3A 와 반응하여 생성된 에트린자이트나 석고의 결정석출에 따른 부피팽창 또는 표면의 연화현상

② 염화물 이온 침투에 따른 시멘트 수화물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 용해와 외부 용출 및 이에 따른 경화체의 조직의 다공화

③ 염화물 이온의 팽창성 $\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 수화물 석출에 따른 경화체 조직의 다공화

④ 염해의 주요 열화 요인은 황산염보다는 침투속도가 빠른 염화물에 의해 주도되며, 염화물에 의한 조직의 다공화가 황산염 이온의 침투 경로를 제공하여 황산염에 의한 이차적인 표면 열화를 야기시키고, 내부로 침투한 염화물은 내부의 철근을 부식시켜 구조물의 전반적인 열화 현상

을 일으키게 된다.

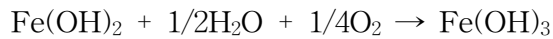
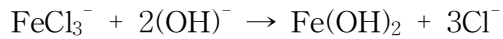
2.1.2 염해에 의한 철근 부식 메커니즘

콘크리트에 염화물이 도입되는 경로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 콘크리트 제조시 해사 등의 사용에 의해 처음부터 콘크리트 내부에 도입된 경우가 있으며, 두 번째는 외부 환경으로부터 해수 또는 비래염분 등이 콘크리트 내부로 침투하면서 염화물 이온을 도입시키는 경우이다. 염화물이 존재하면 구조물의 강재가 부식하게 되어 콘크리트 구조물에 손상을 일으키는 현상을 염해로 정의하고 있다.

해사, 혼화제, 혼합수 등에 의해 도입되는 염화물의 경우는 40% 정도는 시멘트 중의 알루미늄산 3석회와 결합하여 불용성의 수화물인 프리텔 씨염($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)을 형성하여 철근 부식에 관여하는 전체 염화물량은 감소하지만, 결합하지 않은 가용성 염화물이 존재하게 되어 철근의 부동태 피막 파괴 또는 철근 표면의 공식을 일으키게 된다. 콘크리트가 경화된 후 공극을 통하여 외부로부터 물, 산소, 염화물, 유해물질이 침투하는 현상은 기본적으로 콘크리트 자체의 투수성과 깊게 관련되어 있다. 투수성이 높으면 염화물 이온의 침투가 그만큼 쉽게 이루어진다(한국콘크리트학회, 2004).

일정량 이상의 염화물이 존재하면 염화물 이온의 작용으로 인해 부동태피막이 파괴되어 부식이 촉진되며 염화물 이온은 부식을 가속시키는 촉진제 역할을 하게 된다. 다음 식은 염화물로 인해 부식이 일어나는 과정을 반응식으로 표현한 것이다.





여기서 중요한 점은 염화물 이온은 이온화된 철이온과 결합하여 FeCl_3^- 이온을 형성한 후 수산화 제2철을 형성할 때 자기 자신은 다시 이온으로 분리되어 또 다른 철이온과 결합하게 된다는 점이다. 즉, 철근 부식에 대해 촉매 작용을 함으로써 철근 부식을 가속화시키는 역할을 하는 점이 가장 중요한 사항이며, 이로 인해 염화물 이온이 일정 수준 이상 존재하면 구조물의 내구성 예측은 어려워진다.

2.2 염해 저항성 향상을 위한 콘크리트의 내구성 향상 방안

콘크리트의 염해는 해수 중의 각종 염용액에 의한 콘크리트 경화체의 화학적인 침식작용에 기인하고 있어 콘크리트 경화체에서 일어날 수 있는 각종 화학적인 열화 반응을 근본적으로 차단하거나 억제하는 방향으로 접근되어야 한다.

콘크리트의 내염설계에 있어서 콘크리트 사용 사료의 선정, 수밀한 콘크리트의 제조를 위한 배합설계, 균질한 레미콘 생산, 시공 품질의 확보, 철근 피복 두께 증진, 내염 코팅제 등의 반영 유무 등과 같이 종합적인 검토가 요구되며, 현재 국내 콘크리트 지방서나 전문 공사 지방서 등에서는 콘크리트 내염성 향상과 관련된 배합과 시공 관리, 소요 철근 피복 두께 등에 대해서는 대부분 공통적으로 규정하고 있어 본연구에서는 화학적인 침식 작용의 주요원인인 사용 재료 측면에서 고찰하고자 한다.

2.2.1 내염성 향상을 위한 콘크리트 구성 재료의 사용 조건

해외에서 해양 환경하의 내구적인 콘크리트 공사를 위해 콘크리트의 사용 재료와 배합 측면에서 사용 지침에 대하여 표 1에 정리하고 국내에 지방서 규정에 대한 내용은 표 2에 정리하였다. 표 1의 해양 환경하에서 사용 시멘트에 대한 각국의 지방서 규정은 시멘트에 대한 특별한 제한 규정을 두지 않으나, 내구적인 재료로서 중용열 포틀랜드 시멘트와 혼합시멘트(고로시멘트 또는 플라이애쉬 시멘트)를 추천하고 있으며, 5종 시멘트에 대해서는 염화물(Cl^-)에 의한 침해가 심하게 우려되는 비말대, 파랑대 부위에 적용시 염화물에 대한 고려를 요구하고 있다.



표 1 해양 환경에서의 콘크리트 내구성 확보를 위한 시멘트 재료 사용 규정(국외)

시방서	내 용	비고																
ACI	노출조건에 따른 규정	ACI 318R-36('95)																
	<table><tr><td>노출조건</td><td>최대 W/C</td><td>최소 설계 기준 강도</td></tr><tr><td>보통조건(일반 물에 노출)</td><td>50</td><td>280</td></tr><tr><td>동결융해 및 제빙제에 노출</td><td>45</td><td>315</td></tr><tr><td>각종 염류, 해수에 노출된 철근 콘크리트</td><td>40</td><td>350</td></tr></table>		노출조건	최대 W/C	최소 설계 기준 강도	보통조건(일반 물에 노출)	50	280	동결융해 및 제빙제에 노출	45	315	각종 염류, 해수에 노출된 철근 콘크리트	40	350				
	노출조건		최대 W/C	최소 설계 기준 강도														
	보통조건(일반 물에 노출)		50	280														
동결융해 및 제빙제에 노출	45	315																
각종 염류, 해수에 노출된 철근 콘크리트	40	350																
황산염에 대한 대책안	ACI 318R-37('95)																	
<table><tr><td rowspan="2">폭로조건</td><td colspan="2">가용성 황산염</td><td rowspan="2">시멘트</td><td rowspan="2">W/C</td></tr><tr><td>토양(%)</td><td>물(ppm)</td></tr><tr><td>Moderate</td><td>0.1~0.2</td><td>150~1500</td><td>Type II, IP, IS</td><td>0.50 이하</td></tr><tr><td>Severe</td><td>0.2~2.0</td><td>1500~10000</td><td>Type V, Type II+혼합재</td><td>0.45 이하</td></tr></table>		폭로조건	가용성 황산염		시멘트	W/C	토양(%)	물(ppm)	Moderate	0.1~0.2	150~1500	Type II, IP, IS	0.50 이하	Severe	0.2~2.0	1500~10000	Type V, Type II+혼합재	0.45 이하
폭로조건			가용성 황산염				시멘트	W/C										
	토양(%)	물(ppm)																
Moderate	0.1~0.2	150~1500	Type II, IP, IS	0.50 이하														
Severe	0.2~2.0	1500~10000	Type V, Type II+혼합재	0.45 이하														
일본건축학회	1) 시멘트는 포틀랜드시멘트, 고로, 실리카, 플라이 애쉬 시멘트에 적합한 것으로 한다. 2) 계획공용기간이 “장기”인 경우 사용 시멘트는 포틀랜드 시멘트에 적합한 것을 원칙으로 한다. 3) 시멘트는 사용개소별 특기시방에 따르며, 특기 시방이 없을 때는 공사감리의 승인을 받는다.	JASS-5('97) 염화물 작용을 받는 부위에서 5종 시멘트의 사용시 주의 환기(보완대책 필요)																
일본토목학회	1) 해양 콘크리트 구조물에 사용하는 재료는 소요의 내구성을 가지는 것이어야 한다. ① 해수의 작용에 특히 내구적인 시멘트는 중용열 시멘트, 고로 슬래그, 플라이 애쉬 시멘트이며, 이를 사용할 때 초기 양생에 특별히 주의를 기울여야 한다. ② 시멘트 중의 C ₃ A 함량이 억제된 경우에는 염분의 침투가 빨라 진다는 보고도 있으므로 비말대 등이 환경에서는 사용에 요주의 ③ 적정 C ₃ A 함량은 5~6%가 양호	내구성 개선 소위원회 해설																
일본콘크리트공학협회	1) 시멘트는 포틀랜드 시멘트, 고로, 실리카, 플라이애쉬 시멘트에 적합한 것으로 한다. 2) 해수중의 염류에 의한 침식이 심하게 예상되는 부위는 고로 C종 또는 내황산염 시멘트를 이용한다. ① 고로 C종 : 슬래그량 60~70% ② 내황산염 시멘트 : C ₃ A함량을 3~4% 적량 함유할 것	해양 콘크리트 구조물 방식 지침																
일본항만협회	1) 시멘트는 포틀랜드 시멘트, 고로, 실리카, 플라이 애쉬 시멘트에 적합한 것으로 한다. 2) 상기시멘트 중 특히 내구적인 재료는 중용열 포틀랜드 시멘트, 고로 시멘트, 플라이애쉬 시멘트가 좋다. - 상기 재료에 대해서는 초기 양생에 충분한 주의 필요	항만 시설 기준 및 동해설																

표 2 해양 환경에서의 콘크리트 내구성 확보를 위한 시방서의 규정(국내)

구분		상세 내용												
재료	시멘트	시멘트는 해수의 작용에 대하여 특히 내구적이어야 하므로 고로슬래그 시멘트, 플라이애쉬 시멘트 등 혼합시멘트가 좋다. 이들 혼합계 시멘트는 내해수성 이외에도 장기 재령이 강도가 크고, 수화열이 적은 이점이 있어 해역 콘크리트에 적합하지만, 초기 강도가 작은 결점이 있어 초기 습윤 양생에 주의해야 한다.												
	골재	골재는 청정, 강경, 내구적이고 적당한 입도를 가져야 하며, 먼지, 흙, 유기불순물, 염분 및 얇은 석면 등을 함유해서는 안된다. 특히 부서지기 쉬운 것, 결이 있는 것, 강도가 낮은 것, 흡수량이 큰 것 및 팽윤성이 있는 것 등은 내구성이 좋지 않은 골재이므로 적당하지 않다.												
	혼화재	고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 적당량 시멘트로 치환함으로써 수밀성이 좋고, 해수의 화학작용에 대한 내구성이 큰 콘크리트를 만들 수 있으나, 이들 혼화재의 사용효과는 혼화재의 종류, 분말도 및 혼합률에 따라 크게 상이하므로 사용시에는 실험 등을 거쳐 품질을 확인한 후 사용 방법을 정해야 한다.												
	혼화제	양질의 AE제, 감수제, AE감수제, 고성능 감수제 또는 고성능 AE감수제를 사용하여 콘크리트의 워커빌리티를 개선하고, 블리딩 및 재료 분리가 적고, 내구성 및 수밀성이 크며, 균등질의 콘크리트가 얻어지도록 하여야 한다.												
배합	물시멘트비	해양 콘크리트 구조물에서는 내구성으로부터 정하여지는 최대값은 다음을 표준으로 한다. 해양콘크리트의 물시멘트비 최대값(%)—콘크리트 표준시방서												
		<table><tr><th>환경구분</th><th>현장시공</th><th>공장 제품</th></tr><tr><td>해중</td><td>50</td><td>50</td></tr><tr><td>해상 대기중</td><td>45</td><td>45</td></tr><tr><td>물보라 지역</td><td>45</td><td>45</td></tr></table>	환경구분	현장시공	공장 제품	해중	50	50	해상 대기중	45	45	물보라 지역	45	45
		환경구분	현장시공	공장 제품										
		해중	50	50										
해상 대기중	45	45												
물보라 지역	45	45												
해수의 작용을 받는 콘크리트의 물시멘트비의 최대값(%)—건축공사 표준시방서														
<table><tr><th>해수작용의 구분</th><th>물시멘트비의 최대값(%)</th></tr><tr><td>A</td><td>45</td></tr><tr><td>B</td><td>50</td></tr><tr><td>C</td><td>55</td></tr></table>	해수작용의 구분	물시멘트비의 최대값(%)	A	45	B	50	C	55						
해수작용의 구분	물시멘트비의 최대값(%)													
A	45													
B	50													
C	55													
단위시멘트량	단위시멘트량	<table><tr><th>해수작용의 구분</th><th>적용장소</th></tr><tr><td>A</td><td>조수간만의 영향 및 항시 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분</td></tr><tr><td>B</td><td>항시 바닷물 속에 잠겨있는 부분</td></tr><tr><td>C</td><td>가끔 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분</td></tr></table>	해수작용의 구분	적용장소	A	조수간만의 영향 및 항시 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분	B	항시 바닷물 속에 잠겨있는 부분	C	가끔 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분				
		해수작용의 구분	적용장소											
		A	조수간만의 영향 및 항시 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분											
		B	항시 바닷물 속에 잠겨있는 부분											
C	가끔 해수의 파랑이나 해풍을 받는 부분													
단위시멘트량	단위시멘트량을 적당한 범위내에서 크게 하면 균등질이고 밀실한 콘크리트가 되므로 해수중의 각종 염류의 화학적 침식, 콘크리트 속의 강재의 부식 등에 대한 저항성이 커지므로 단위시멘트량은 구조물의 규모, 중요성 및 환경조건 등을 고려하여 소요의 내구성이 얻어지도록 한다. 해양 콘크리트 구조물의 단위 시멘트량은 일반적인 경우 300kgf/cm ³ 이상으로 하는 것이 좋다													
시공	시공 일반	해양 구조물에서는 시공이 불충분하거나 불량한 곳으로부터 구조물의 열화가 쉽게 진행되므로 균일한 콘크리트를 얻을 수 있도록 부어넣기, 다짐, 양생, 등에 특히 주의하여 시공하여야 한다.												
	Construction Joint	해양 구조물에서 시공이음부를 두는 경우에는 성능 저하가 생기기 쉬우므로 가능한 한 피해야 한다. 특히 최고조위로부터 위로 60cm, 최저조위로부터 아래로 60cm 사이의 감조부분에서는 시공이음이 생기지 않도록 시공 계획을 세워야 한다.												
	보호 및 양생	콘크리트가 충분히 경화되기 전에 해수에 씻기면 모르타르 부분이 유실되는 등 피해를 받을 수 있으므로 직접 해수에 닿지 않도록 보호해야 한다.												
	피복 확보	철근과 거푸집 사이의 간격은 소정의 피복 두께를 확보하여야 한다. 간격재의 설치 개수는 기초, 기둥, 벽 및 난간 등에는 2개/㎡ 이상, 보, 주거더 및 슬래브 등에는 4개/㎡ 이상을 표준으로 한다.												

가. 시멘트 선정

최근 들어 해양 구조물에 사용되는 5종 시멘트(내황산염 시멘트)의 적정성 여부에 대하여 많은 논란이 제기되고 있으며, 염화물에 의한 침식이 주로 작용하는 해양 환경에서는 오히려 부적절하다는 의견이 제기되고 있는 실정이다. 이러한 추세에 맞추어서 1986년 일본 토목학회 내구성 위원회에서는 해양환경하에서 내염성 향상을 위해서 사용 시멘트의 C_3A 의 함량이 극단적으로 적을 때는 염분에 대한 저항성이 다소 떨어진다고 보고한 바 있으며, 1997년 일본 건축학회에서 해양 콘크리트 시방을 개정하면서 사용 시멘트에 있어서 토목학회와 같은 의견을 개진한 바 있다. 이에 따라서 염화물 이온이 공존하는 해양에서 5종 시멘트를 사용할 경우 주의를 요구하고 있으며, 시멘트 중에 필요한 적정 C_3A 함량을 각 학회마다 다소의 차이는 있으나 4~6% 정도를 제시하고 있다.

이러한 이유로는 시멘트 중의 C_3A 일부가 콘크리트 중에 침입해 들어오는 염화물 이온과 반응을 하여 프리텔씨염이라는 화합물을 생성하여 고정화되면서 염화물의 침투를 방지하기 때문이라고 볼 수 있다. 그러나 尾野 등은 이 프리텔씨염 화합물이 불안정한 결정으로서 지속적으로 침입하는 황산염 이온과 반응을 다시 하여 팽창성 에트린자이트 광물로 전이되면서 콘크리트가 열화된다고 보고하였으며, 특히 A. Delagrave에 의하면 프리텔씨염에 의한 염소 이온 침투 저항 효과는 한시적이며, 다시 황산염 이온과 반응하여 에트린자이트로 변화되므로 염소 이온과 황산염 이온이 무한대로 공급되는 해양환경하에서는 C_3A 함량의 다소만으로 염화물 침투저항성을 평가하는 것은 무리이며, 실제 염소 이온의 고정화율이 C_3A 단독이 아니라 시멘트 주요광물 중의 C_3A+C_4AF 합에 의해 좌우되는데 1종과 5종 시멘트는 비슷한 수치를 가지고 있어 염소 이온의 고정화율에는 큰 차이가 없다는 최근의 연구 결과도 고려할 필요가 있다.

즉, 현재까지의 연구결과로는 정성적으로 염소 이온과 C_3A 수화물 반

응을 하여 프리텔씨염이 생성되는 것이 확인되었지만 정량적으로는 C_3A 수화물 중 몇 퍼센트가 이 반응을 하며, 염소 이온의 고정화율과 유지되는 기간에 대한 상세한 연구보고가 없는 실정에 있어 보다 장기적이며 심층적인 연구가 요망되는 분야라 할 수 있다. 실제로 C_3A 에 의해 고정되는 염화물 함량은 극히 일부분이며, C_3A 함량이 5~12% 수준에서는 큰 차이가 없는 것으로 보고되고 있다.

한편, 일본토목학회와 일본건축학회의 해양구조물에서 5종 시멘트 사용에 대한 제한적인 의견은 일본과 국내의 5종 시멘트 조성 차이에 기인한 바가 크다고 판단되는데 일반적으로 국내와는 달리 일본의 경우 화산과 온천 지대가 많고 이에 따라 토양 중에 유황 성분이 많아 유통되는 제품의 C_3A 함량 평균이 1% 이하로써 국내의 3~4%의 경우 보다 극단적으로 낮게 관리되고 있는 것은 이러한 차이를 나타낸 것이라고 사료된다.

이를 종합해 볼 때 단순히 사용 시멘트의 종류만으로 또는 외국의 시방서를 근거로 내염성의 적정 여부를 평가한다는 것은 바람직하지 않으며, 구조물 사용 환경에서 콘크리트에 영향을 미치는 각종 염분조건에 따라서 내염성이 우수한 조성을 갖는 시멘트를 선정하거나 사용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 따라서 염화물과 황산염 이온이 같이 존재하는 해양 환경하에서는 시멘트 중의 C_3A 의 함량을 적정량 유지할 필요가 있으며, 미국(ACI 357)과 유럽의 콘크리트 학회 내구성 위원회에서 제시되는 C_3A 의 적정함량 약 4~8%의 범위를 참고할 필요가 있다. 이러한 시멘트 조성성분 측면에서만 보았을 때 2종 시멘트(중용열 시멘트)가 C_3A 함량이 6~8%로 1종과 5종 시멘트의 중간 수준이며 초기강도를 좌우하는 C_3S 광물 함량이 적고, 후기에 강도 발현을 좌우하는 C_2S 광물 함량이 높아 1종 1종 시멘트 보다 $Ca(OH)_2$ 생성량도 적으므로 내염성 향상 측면에서 적합한 시멘트라고 볼 수 있으나 국내의 제반 여건 등을 고려하여 산정할 필요가 있다.

나. 혼화재의 영향

시멘트 외에 결합재 대체용 슬래그 분말이나 플라이애쉬 등의 포졸란 물질들은 자원의 재활용을 통한 경제적인 효과 외에도 콘크리트 품질도 향상시키는 부가적인 효과로 인해 점차 그 사용이 확대되어 가고 있다. 이러한 방향은 해양 콘크리트 구조물에 가장 활발하게 적용되고 있으며, 특히 해양 콘크리트 분야에서 많은 연구를 통해 그 효과가 검증되고 있다.

여러 종류의 포틀랜드 시멘트와 혼합 시멘트에 대한 내염성 실험을 통해 일반 포틀랜드 시멘트 보다는 혼합재로서 고로 슬래그 분말을 곁게 하여 혼합량을 많게 하거나 슬래그 중의 SO_3 성분을 첨가함에 따라 내구성이 증진되었으며, 메타카올린은 시멘트에 포졸란 물질을 첨가함에 따라 유리 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 포졸란 반응으로 C-S-H(Calcium Silicate Hydrate)로 전이되어 감소하고, 공극의 크기 감소와 경화 조직의 치밀화로 인해 장기강도 증진과 화학적인 내구성을 증진시키게 된다고 보고하였다. 그러나 같은 포졸란 물질의 하나인 실리카흙은 고분말도와 높은 SiO_2 함량 때문에 포졸란 반응성이 좋으며, 부식 물질의 침투를 억제하지만 단위수량의 감소와 대규모 공사에서의 적용 등이 향후 과제로 남아 있다.

또한 일본의 운수성 항만기술연구소가 연구한 각종 시멘트의 내염성에 관한 보고서에서 포틀랜드 시멘트계가 혼합 시멘트계에 비하여 표면은 침식되지 않았음에도 불구하고 내부 성상의 열화로 강도가 저하되는 반면에 혼합 시멘트계에서는 표면은 침식을 당하지만 강도비는 저하하지 않는 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 포틀랜드 시멘트계가 해수 침지 3년까지는 강도가 증가하다가 그 이후부터는 감소하는데 반해, 혼합 시멘트계는 강도 감소를 보이지 않는다는 종래의 시험 결과들과 동일한 경향으로 보여진다.

이와 같이 혼합 시멘트계가 내염성이 우수한 이유로 다음을 들 수 있다.

- ① 결합재의 일부로 치환됨으로써 시멘트의 부담이 적어진다.
- ② 시멘트 수화반응 과정에서 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 상대적으로 감소하기 때문에 염화물과 황산염에 의한 침식작용이 감소된다.
- ③ 슬래그의 잠재수경성 반응이나 포졸란 물질에 의한 포졸란 반응으로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소화되면서 내구성이 우수한 C-S-H로 변환됨으로써 강도 증진과 수밀성이 향상된다.
- ④ 특히 슬래그 분말은 성분 중의 Al_2O_3 가 시멘트 알칼리분위기에서 용출하여 칼슘알루미네이트 수화물($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)을 형성하여 침투되는 염화물 이온과 반응, 프리텔씨염으로 고착시킴으로 염화물에 대한 저항성이 증가하게 된다.

다. 콘크리트를 통한 장기 침지 시험 사례

해외 및 국내에서 수행된 해양 환경하에서 사용 재료 조건에 따른 콘크리트 내구성 시험결과는 염소 이온과 황산염 침식에 대한 저항성을 동시에 만족시키는 조건이 양호한 것으로 보고되었으며, 가장 바람직한 시멘트 광물조성은 C_3A 함량이 4~8% 범위내로 함유하면서 C_3S 함량이 낮은 조성이며, 또한 시멘트 중 일부를 슬래그로 치환한 슬래그 시멘트가 염소 이온에 대한 저항성이 특히 우수한 것으로 나타났다. 표 3에 실제 해양 환경하에 폭로한 각종 콘크리트 제조조건에 따른 내염성 평가 결과와 그 결과를 요약하여 나타내었다.

염해환경에서 콘크리트 내구성 증진은 시멘트 재료 측면과 더불어 물 시멘트비 저감(유동화제, 감수제 등의 사용)과 시멘트 사용량을 일반 육상의 배합보다 증량시키는 것(고강도화)이 보다 효과적인 것으로 나타나며, 특히 해수 중의 염류에 대한 저항성 등 내구성을 향상시키기 위해서는 수밀 콘크리트(투수계수 저감)로 설계되어야 하며, 이를 위해서는 물

시멘트비의 저감이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 이 때 물 시멘트비 40% 이하, 압축강도 400kgf/cm²의 고강도에서는 콘크리트의 투수 계수가 일반 콘크리트의 1/7~1/8 수준으로 크게 저감되어 고내구성 콘크리트가 되는 것으로 나타났다.



표 3 해양 환경에 폭로한 콘크리트의 내염성 평가에 대한 연구 결과

구 분	연구 내용	내염성 개선 방안
Performance of Concrete at Treat Island USA	• 16년간 북해에 설치된 구조물에 대한 내해수성 시험	1) 높은 시멘트 함량 : 380~400kgf/m ³ 2) 낮은 물 시멘트비 : 40% 3) 건전한 골재의 사용 4) 사용 시멘트중 적정량의 C ₃ A 함량을약 8% 정도 유지
CANMET	• 캐나다 Treat 섬의 조수간만대에 침적시켜 10년간 관찰 • 사용 시멘트 : 1종, 2종, 5종, 혼합계시멘트	1) 2종, 5종 시멘트가 양호하며, 물시멘트비가 높을 경우 5종이 가장 양호 2) 물시멘트비가 높을수록 열화 정도 심각 3) 슬래그, 플라이애쉬 치환율이 높으면 표면의 열화 심화 4) 적정량 이상의 시멘트 사용과 물시멘트비 저감, 혼합재의 적정 사용시 양호한 내구성 확보
鈴川 他	• 2.5% MgCl₂용액에 각 시멘트 재료 종류별 52주간 모르타르 시편 침지후 강도및 내부 세공용적 변화 평가	5종 시멘트 + 슬래그 > 1종 + 슬래그60% > 1종 + 슬래그 40% > 5종, 1종시멘트 단독 순으로 강도비 및 내부 치밀성이 양호
고만기 외	• 시멘트 종류별 콘크리트 시편의 해수 장기폭로시험(간만대) • 침지기간 : 10년(군산지역)	2종, 5종 시멘트가 가장 양호
Osterschelde Storm surge Barrier	• 내구연한 250년을 기준으로 설계된 네덜란드 해양 철근 콘크리트 구조물	1) 슬래그 시멘트 사용 2) 낮은 물 시멘트비 : 40% 3) 건전한 골재의 사용
A.M-Paillere	• 다양한 시멘트 광물조성을 갖는 8종류의 포틀랜드 시멘트와 혼합 시멘트를 이용하여 제조된 콘크리트를 15년간 해수에 침지시켜 부피 팽창 및 강도 저하율을 평가	1) C ₃ A 함량 : 최대 8% 제한 2) C ₃ A 함량 10% 초과시 2년후 호아산염에 의한 파괴 발생 3) 슬래그 첨가시 내구성 개선
Nevill	• 시멘트 페이스트의 물 시멘트비에 따른 투수 계수 시험	1) W/C 저감에 따라 투수계수는 직선적으로 저감되어 내구성 개선 2) W/C 30%에서의 투수계수는 1~2×10 ⁻¹⁴ m/s로, W/C 50%의 약 1/8 수준
椰紀元	• 콘크리트 압축강도와 투수계수간의 상관 연구	1) 콘크리트 고강도화에 따라 투수계수 감소 2) 압축강도 250kgf/cm ² : -20~30×10 ⁻¹³ m/s 3) 압축강도 450kgf/cm ² : -2~3×10 ⁻¹³ m/s(1/10로 감소)

2.3 혼화재료

2.3.1 실리카흙

1) 개요

실리카흙은 제강용의 탈산제로 사용되는 페로실리콘 합금이나 실리콘 금속 등의 규소합금을 전기로(2,000℃)에서 제조할 때 발생하는 폐가스를 집진하여 얻어지는 산업부산물의 총칭이다.

실리카흙을 혼합한 콘크리트에 관한 연구는 1950년 노르웨이에서 처음 시도되었는데 실리카흙을 혼합하면 콘크리트의 워커빌리티가 급격히 저하되기 때문에 실용화되지 못했으나 1960년대 개발된 고성능감수제와 더불어 1978년 노르웨이에서 콘크리트용 혼화재로서의 규격이 제정됨에 따라 실용화되기 시작했다.

실리카흙의 생산량은 1981년에 100만톤, 1986년에는 160만톤 정도로 세계적으로 많지 않으며, 주요 생산국은 소련, 미국, 노르웨이, 브라질 등이다. 일본의 경우 1985년에는 약 2만 5천톤이었던 것이 1991년에는 1만톤 정도로 생산량 감소가 현저하며, 국내의 경우 경기, 강원, 경북 등지에서 생산설비가 존재하였으나 전력과다소비 산업으로 폐지 또는 전환되어 현재는 거의 생산이 중단된 상태이다.

실리카흙의 평균입경이 0.02~0.54 μ m인 초미립자로 이산화규소(SiO_2) 함유율이 90%이상을 차지하고 있는 비결정질로서 시멘트 수화에서 생성되는 수산화칼슘과 강력한 포졸란 반응을 한다.

실리카흙을 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우 다음과 같은 면에서 콘크리트의 성능을 개선시키는 장점을 가진다.

- ① 강도증진 효과가 뛰어나다.

- ② 투수성이 작아 수밀성이 향상된다.
- ③ 수화 초기의 발열량이 작아 콘크리트의 온도상승 억제에 효과가 있다.
- ④ 염화물 이온 침투 억제에 효과가 있다.

이와 같은 장점의 대부분은 슬래그 미분말 및 플라이애쉬와 같은 포졸란 반응을 하는 재료의 특징과 유사하지만 실리카흙은 초미립재로서 고강도용 재료로 주로 사용되며, 산업 부산물이지만 세계적으로 생산량이 적고 국내에서는 전량 수입에 의존하고 있기 때문에 고가의 재료이다.

2) 화학성분 및 물리적 성질

실리카흙은 대부분이 비결정질로 SiO_2 량이 90%이상이며 미량성분으로 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 등이 함유되어 있으나 화학성분은 제품의 종류에 따라 다소 변화한다. 실리카흙의 색깔은 일반적으로 백색에 가까운 회색이며 입자의 형상은 구형의 초미립자로 비중이 2.1~2.2 정도이고, 비표면적은 $200,000 \sim 250,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 으로 보통포틀랜드시멘트의 70~80배이다.

3) 실리카흙을 사용한 콘크리트의 품질

(1) 굳지 않은 콘크리트

실리카흙은 비표면적이 크고 수산화칼슘과 반응하여 단시간에 겔상태의 물질을 생성하기 때문에 반죽질기가 쉽게 떨어지며, 실리카흙의 혼합율이 증가할수록 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 단위수량이 선형적으로 증가하기 때문에 이를 개선하기 위해서는 고성능AE감수제를 사용하여 단위수량을 낮출 필요가 있다.

(2) 강도

실리카흙을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현성은 대단히 양호하며 이러한 원인은 마이크로 필러효과 및 포졸란 반응이 동시에 작용함으로써 강도를 향상시키기 때문이다.

마이크로 필러효과는 초미립의 실리카흙이 0.5~1.0 μm 의 시멘트 입자 둘레에 생기는 공극을 충전하여 아주 치밀한 구조를 만들어 골재와 결합재간의 부착력이 증가하여 콘크리트의 강도가 증가되는 효과이다.

실리카흙의 혼합율은 5~15%에서 강도증진 효과가 크며 다른 포졸란 재료와 달리 초기에 포졸란 반응이 일어나는 특징을 가지고 있다.

실리카흙을 혼합한 콘크리트의 휨 및 할렬인장강도는 압축강도의 경향과 유사하며 정탄성계수는 동일한 압축강도 수준에서는 실리카흙을 사용한 경우가 낮은 탄성계수를 가진다.

(3) 내구성

실리카흙의 혼합율이 15%이하에서는 동일한 공기량을 가질 경우 충분한 동결융해 저항성을 가지지만 혼합율이 20~30%에 이르게 되면 동결융해 저항성이 떨어지며, 수밀성 증진으로 염소이온 침투가 감소되고 염산, 황산 및 유기산에 대한 화학저항성이 향상된다. 이러한 원인으로 실리카흙은 고내구성 콘크리트의 제조에 효과적이다.

2.3.2 플라이애쉬

1) 개요

플라이애쉬는 석탄을 원료로 하는 화력발전소 등에서 미분탄을 약 1,400~1,500℃의 고온으로 연소했을 때 연소보일러에서 부산되는 연소폐가스로부터 집진장치에 의해 회수된 미분말의 석탄회이다.

플라이애쉬는 산업폐기물로서 발생초기에는 전량 매립재 등으로 사용되었으나 미국 및 캐나다를 중심으로 콘크리트용 혼화재로 댐 및 수리

구조물에 사용됨에 따라 그 실용성이 높이 평가되어 미국의 경우 1954년에 플라이애쉬에 대한 규격이 처음 제정되어 1968년 ASTM C 618에서 콘크리트용 혼화재로서 천연포졸란과 함께 플라이애쉬를 규정하였다. 국내의 공업규격에는 KS L 5405에서 플라이애쉬의 품질을 규정하고 있다.

플라이애쉬는 인공포졸란에 속하며 자체적으로는 거의 수경성이 없지만 실리카 성분이 석회와 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물을 생성하여 경화하는 포졸란 반응을 한다. 또한 플라이애쉬의 입형이 구형을 이루고 있어 콘크리트의 유동성을 개선시켜준다.

플라이애쉬를 혼화재로 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 혼화재로 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) 화학성분 및 물리적 성질

플라이애쉬는 대체적으로 일부 결정성 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리질의 구상으로 화학성분 및 분포는 원탄 및 연소조건 등의

영향으로 매우 폭이 넓고 다양하다.

플라이애쉬의 화학성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO 및 SO_3 로 이루어져 있으며, 이들 성분 중 주요성분은 SiO_2 25~60%, Al_2O_3 5~25%, Fe_2O_3 10~30%로서 미국의 ASTM의 플라이애쉬 분류에 따르면 이들 3성분의 합이 70%이상일 경우의 플라이애쉬를 Class F, 상대적으로 이들 3가지 성분의 합이 적고(50%이상) CaO 로 나타나는 칼슘혼합물의 양이 많은 플라이애쉬를 Class C로 분류하고 있다.

플라이애쉬에 대한 국내 규격은 표 4에서와 같이 1992년 개정된 KS L 5405의 플라이애쉬 품질규정으로 미국의 경우처럼 플라이애쉬의 종류를 구분하고 있지 않다.

플라이애쉬의 미연소탄소 함유량을 나타내는 한 인자로 강열감량이 쓰이며 미연소탄소 함유량이 많을수록 강열감량이 일반적으로 크기 때문에 KS에서는 5%이하로 규정하고 있다. 또한 플라이애쉬의 밀도는 시멘트보다 일반적으로 작으며 보통 2.2~2.8정도이다.

표 4 Fly Ash의 품질규정

항 목	규 정 치
이산화규소(SiO_2) (%)	45 이상
습 분 (%)	1 이하
강열감량 (%)	5 이하
밀 도 (g/cm^3)	1.95 이상
분말도(블레인 방법) (cm^2/g)	2,400 이상
단위수량비 (%)	102 이하
28일 압축강도비 (%)	60 이상

3) 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 품질

(1) 굳지 않은 콘크리트

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.

(2) 강도

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도는 초기재령에서는 보통콘크리트보다 낮지만 재령이 길어짐에 따라 포졸란 반응에 의해 강도 증진효과가 크며, 플라이애쉬 혼합율의 영향을 받아 재령 28일 이후의 장기재령에서는 혼합률이 10~20%에서 강도발현이 가장 크게 나타나고 있어 혼합률의 적정 값이 존재한다. 또한 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계는 보통콘크리트의 경향과 비슷하며, 정탄성계수는 초기재령에서는 보통콘크리트보다 작으나 장기재령에서는 약간 증가하는 경향이 있다.

(3) 발열특성

플라이애쉬에 의한 포졸란 반응은 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 플라이애쉬가 반응하여 칼슘실리케이트 수화물 및 칼슘알루미네이트 수화물을 생성하기 때문에 그 반응속도는 시멘트와 비교해서 상당히 늦

으며 수화발열량도 적다. 따라서 플라이애쉬를 혼화제로 사용한 콘크리트는 콘크리트의 초기온도상승 억제에 유용하여 매스콘크리트 공사나 교량공사에 많이 이용된다.

(4) 내구성

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 적절하게 공기를 연행하였을 경우 보통콘크리트와 뚜렷한 차이는 없으며, 포졸란 반응에 의한 알칼리 골재반응 억제 효과가 있다.

콘크리트의 열화요인 중 하나인 황산염에 대한 저항성은 플라이애쉬 혼합에 의한 시멘트량의 감소(C_3A 의 감소) 및 포졸란 반응에 의한 수산화 칼슘량이 감소하여 에트링가이트 생성이 감소되기 때문에 크게 개선된다.

(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.

2.3.3 메타카올린

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 되므로, 카올린

에 Meta-라는 접두어를 붙여 변화를 표시하기 위하여 사용되었다. 국내에서 산출되는 카올린은 대부분 할로이사이트(halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화잔류형 광상에 많이 분포하고 있다.

카올린에 유사한 어휘를 가지고 있는 카올리나이트(kaolinite)는 자석을 띠는 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), 디카이트(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 1과 같이, 1개의 $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ 사면체층과 1개의 $[\text{Al}_4\text{O}_4(\text{OH})_4]$ 팔면체층으로 구성되어 있다.



그림 1 카올리나이트의 결정구조

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.

2) 화학성분 및 물리적 성질

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

표 5 메타카올린의 화학적 성질

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
MK	52.1	41.0	4.32	0.07	0.19	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 Fe₂O₃ 성분에 의해 차이가 발생한다. 주성분은 SiO₂와 Al₂O₃이며, S/A의 이론적 비는 1.18 정도이다. 국내에서 생산되는 메타카올린의 경우에는 할로이사이트질의 카올린을 원료로 하기 때문에 다른 것과는 달리 Fe₂O₃ 성분 함량이 다소 높아 연황색을 띄고 있으며, 강열감량도 약간 높다(안태호 등, 2002).

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

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

2.3.4 고성능AE감수제

레미콘용 혼화재료(admixture)의 소비형태를 보면, 일반적으로 AE감수제(air entraining and water reducing agent)의 점유비가 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 AE감수제의 사용량이 감소하였다고 보다는 레미콘의 품질향상을 위하여 여타 혼화재료의 사용량이 증가되고 있기 때문이다.

특히 고성능AE감수제(superplasticizer)의 사용량이 최근 들어 큰 폭으로 증가하고 있다. 고성능AE감수제는 기존의 감수제보다 시멘트 분산 성능이 우수하여 뛰어난 시멘트 분산효과를 이용하여 보통콘크리트와 동일한 작업성능을 가지면서 W/C저감과 고강도화를 주목적으로 하는 경우 콘크리트의 강도와 유동성을 크게 개선시키는 혼화재료이다.

고성능AE감수제는 시멘트 입자의 분산성능이 뛰어나기 때문에 감수 성능이 우수하며, 응결지연 및 과다한 공기연행, 강도저하 등의 나쁜 영향 없이 단위수량을 대폭 감소시킬 수 있다. 고성능AE감수제는 크게 주성분에 따라 폴리알킬아릴 설펜산염계, 멜라민포르말린수지 설펜산염계, 방향족다환축합물 설펜산염계 등으로 분류할 수 있고, 성능에 따라 표준형과 지연형으로 분류할 수 있으며 표 6과 같다.

표 6 고성능AE감수제의 성능

품질항목		종류	
		표준형	지연형
감수율 (%)		18 이상	18 이상
블리딩량비 (%)		60 이하	70 이하
응결시간차 (분)	초결	-30~+120	+90~+240
	종결	-30~+120	+240 이하
압축강도비 (%)	재령 3일	135 이상	135 이상
	재령 7일	125 이상	125 이상
	재령 28일	115 이상	115 이상
길이변화비 (%)		110 이하	110 이하
동결융해저항성 (%)		80 이상	80 이상
경시변화량 (60분)	슬럼프 (cm)	6.0 이하	6.0 이하
	공기량 (%)	±1.5 이내	±1.5 이내

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험 파라미터

본 연구에서는 설계기준강도를 35MPa, 물-시멘트비(W/C) 45%, Flow 치는 115~130cm 범위를 만족하도록 한다.. 잔골재는 혼합모래를 사용하고 결합재로 실리카흙(시멘트 단위중량의 5%, 10%, 15%), 플라이 애쉬(시멘트 단위중량의 15%, 30%, 50%) 및 메타카올린(시멘트 단위중량의 5%, 10%, 15%)을 치환하여 사용한다. 각각의 실험파라미터는 표 7 과 같다.

표 7 실험파라미터

구분		치환율 (%)		
		Slica Fume	Fly Ash	Metakaolin
OPC	C0	-	-	-
Slica Fume	CS5	5	-	-
	CS10	10	-	-
	CS15	15	-	-
Fly Ash	CF15	-	15	-
	CF30	-	30	-
	CF50	-	50	-
Metakaolin	MK5	-	-	5
	MK10	-	-	10
	MK15	-	-	15

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(배원만, 2005).

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 자

료를 얻을 목적으로 실시한다.

6) 찢기 시험

잔골재의 찢기 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.

8) 단위용적중량 및 입형 판정실적률 시험

단위용적중량 및 입형 판정실적률 시험은 「KS F 2505 골재의 단위중량 시험 방법」에 준하여 시험을 실시한다. 단위용적중량 시험방법은 골재의 공극률의 계산, 콘크리트의 배합을 용적으로 표시하는 경우 골재를 용적으로 계량할 때 필요한 시험이다. 그리고 실적률은 큰 것이 좋으므로 가능하면 입자의 모양이 구형에 가까운 것을 선택하도록 하며, 53% 이상이어야 한다.

9) 마모 시험

부순 자갈의 마모감량을 파악하기 위한 실험으로 「KS F 2508 로스 앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법」에 준하여 실시

한다.

3.2.2 모르타르의 제작

모르타르의 제작순서는 그림 2와 같이 먼저 부순모래, 낙동세사, 시멘트, 혼화제 순으로 믹서에 투입하여 건비빔을 실시한 다음 배합수와 고성능AE감수제를 투입하여 제작한다.

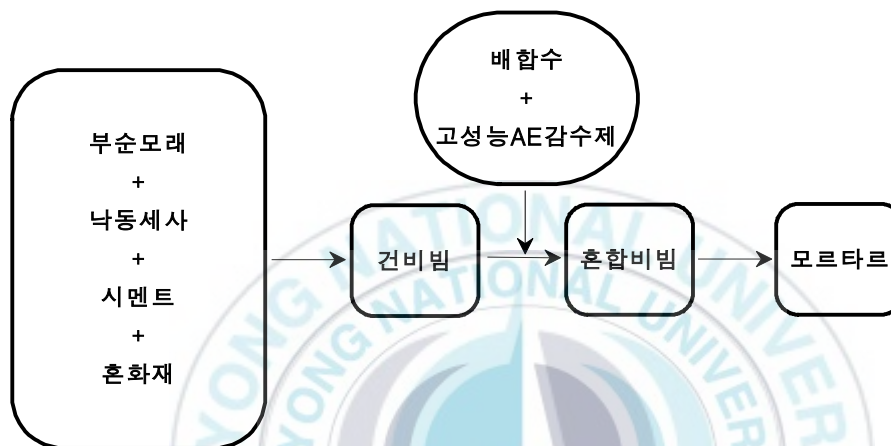


그림 2 모르타르의 제작과정

3.2.3 시편의 제작 및 양생

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

시편은 일반 시멘트를 사용한 경우와 일반 시멘트에 내염성에 효과가 있는 결합재(실리카흄, 플라이애쉬, 메타카올린)를 일정량 첨가하여 제작

하였다. 이렇게 제작된 시편은 표준양생을 실시한 후 담수와 광안리 앞 바다에서 채취한 천연해수로 양생하였으며, 황산염에 대한 침해 정도를 파악하기 위해 10% 황산나트륨 용액과 10% 황산마그네슘 용액으로 촉진 양생하였다. 모든 시편은 28일간의 표준양생 후 각각의 양생수(담수, 해수, 황산염용액)에 침적하여 침적일수 28일부터 60일, 90일, 180일, 270일, 365 일까지의 양생한 후 각 일수별 외관조사, 단위중량 및 압축강도를 측정하여 비교하였다.

3.2.4 굳지 않은 모르타르 시험

1) 플로우 측정

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

3.2.5 경화한 모르타르 시험

경화한 모르타르에 대한 기초물성을 평가하기 위한 실험 항목은 침적 재령에 따른 단위중량과 압축강도 변화를 측정하여 결합재 종류와 치환율에 따른 변화를 살펴보고 양생조건을 달리한 경우 초기 재령부터 중장기 재령까지의 압축강도 변화를 살펴 보았다. 단위중량시험과 압축강도 시험에 대한 개요 등과, 전체 실험에 대한 개요는 그림 3과 같다.

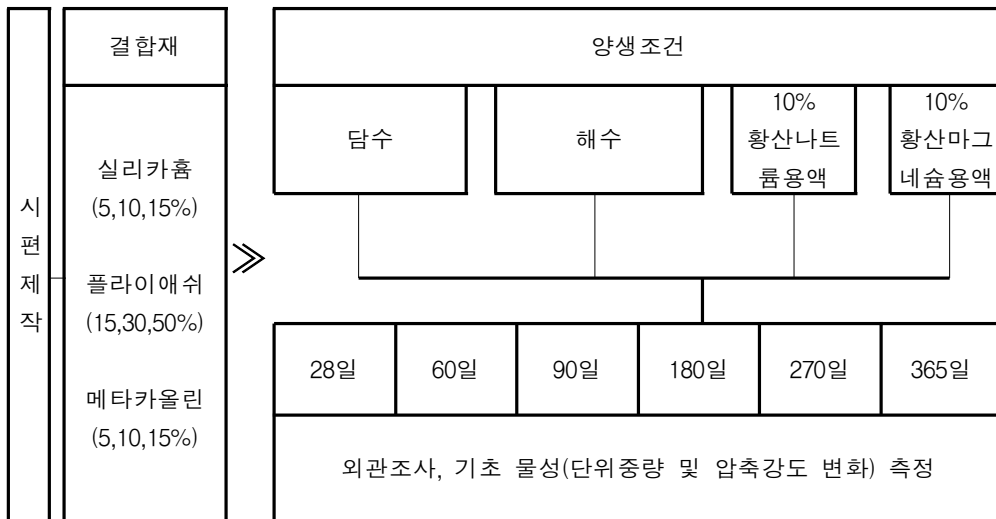


그림 3 실험개요



3.3 사용재료

3.3.1 시멘트

본 연구에서는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하며, 물리·화학적 특성은 표 8과 같다.

표 8 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

3.3.2 결합재

본 연구에서 사용된 광물질 혼화재료는 노르웨이 Elkem 사에서 생산되는 실리카흙, 국내 S사의 충남 보령산 플라이애쉬, 국내 A사의 메타카올린을 사용하며, 물리·화학적 특성은 표 9와 같다.

표 9 광물질 혼화재료의 물리·화학적 특성

종류 \ 항목	밀도	형태	주성분	비표면적 (cm ² /g)
실리카흙	2.2±0.05	분말	SiO ₂	15,000~30,000
플라이애쉬	2.1±0.05	분말	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	2,000~4,500
메타카올린	2.59	분말	SiO ₂	12,000

3.3.3 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.

3.3.4 혼화제

본 연구에서는 국내 D사에서 생산되는 폴리카르본산계의 고성능AE감수제를 사용하며, 물리·화학적 특성은 표 10과 같다.

표 10 고성능AE감수제의 물리·화학적 특성

종류 \ 항목	밀도	형태	pH	주성분
고성능AE감수제	1.04±0.05	연 황색 액체	11.5±1.5	폴리카르본산계

3.3.5 양생수(침적용액)

본 연구에서는 해양 환경을 고려하여 결합재 종류와 양생조건에 따른 모르타르의 기초물성을 평가를 위해 크게 4가지로 구분하여 양생하였다.

첫째로 담수에 양생시켜 일반적 특성변화를 관찰하고, 둘째로 광안리 인근 앞바다에서 직접 채취한 해수를 사용하여 양생하였다. 셋째로 단기간에 황산염 침해에 따른 기초물성 변화를 파악하고자 10% 황산나트륨용액과 10% 황산마그네슘 용액을 제조하여 촉진양생 하였다.

참고로 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 노출정도에 대한 평가 및 물-시멘트비는 표 11과 같다.

표 11 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 결합재 종류와 양생조건을 변화시켜 모르타르의 시편을 제작하였다. 결합재 종류는 실리카흙, 플라이애쉬, 메타카올린을 시멘트 단위중량의 일정량을 치환하였고, 표준양생 후 4가지의 양생수에 침적 재령 28일, 60일, 90일, 180일, 270일, 365일까지 양생한 후 단위중량과 압축 강도 변화를 살펴보기 위해 표 12와 같이 총 720개의 시편을 제작하였다.

표 12 실험변수에 따른 시편종류

배합재료 시편종류	실리카흙 치환율(%)	플라이애쉬 치환율(%)	메타카올린 치환율(%)	시편 개수(개)
C0	-	-	-	72
CS5	5	-	-	72
CS10	10	-	-	72
CS15	15	-	-	72
CF15	-	15	-	양생 4종류 × 재령 6종류 × 각 3개
CF30	-	30	-	
CF50	-	50	-	
MK5	-	-	5	
MK10	-	-	10	
MK15	-	-	15	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 사용골재의 품질 특성

본 연구에 사용된 사용골재의 품질 시험결과는 표 13과 같다.

표 13 사용골재의 품질특성

항목		조립률	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	마모율 (%)	단위용 적중량 (kg/m ³)	유기 불순물	0.08mm 체통과량 (%)	실적률 (%)	편장 석률 (%)	안정성 (%)
시료											
사 용 골 재	KS 규격 부순	-	2.5이상	3.0이하	-	-	표준색	7.0이하	53이상	-	10이하
	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 13의 사용골재 품질특성을 살펴보면, 굵은 골재의 경우 입형을 판정하기 위하여 편장석률을 측정해 본 결과, KS규정치 20%이하를 만족하는 것으로 나타났다. 기상작용에 대한 골재의 내구성을 조사하기 위한 안정성시험을 실시한 결과 KS 기준에 적합한 것으로 나타났으며, 마모율을 비롯한 기타 품질 특성 모두 KS를 만족하는 것으로 나타났다.

또한 잔골재로 사용된 부순모래의 특성상 조립률이 4.14로 다소 높게 나타나고 있으나, 밀도 및 단위용적중량은 KS 규정을 만족하였다. 잔골재 중에 함유되어있는 유기불순물의 함유정도를 파악하기 위한 유기불순물시험을 실시한 결과, 표준용액의 황적색보다 연한 담황색으로 우수한 품질의 콘크리트 생산에 사용이 가능한 것으로 판단되었다. 부순모래

에 포함된 미립분의 양을 파악하기 위해 0.08mm체 통과량시험을 실시한 결과, 3.8%로 역시 KS 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

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 외형 변화 특성

담수와 해수 및 황산염 용액에 축진 양생시킨 시편에 대한 화학적 침해의 외형적 변화 특성이 그림 4와 같이 나타났다. 담수의 경우 거의 외형 변화가 없고, 해수에 양생시킨 경우도 표면에 흰색의 미분말(염분)이 퇴적된 것 외에는 외형상의 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

그러나 10% 황산나트륨 용액에 침지시킨 경우는 재령 90일부터 서서히 가장자리를 따라 미세균열이 발생하고, 재령 180일 이후에는 균열폭이 커져 외관상으로 침식이 뚜렷하게 나타났다. 또한 10% 황산마그네슘 용액에 침지시킨 경우는 재령 90일 이후부터 화학적 침해로 인해 시편에 백색의 결정이 나타나고, 시편의 모서리 부분이 마모되기 시작하였다. 이후 재령 180일 이후부터는 침식현상이 더 뚜렷하게 나타나 재료분리, 박리, 박락으로 인해 시편의 성능저하 현상이 심각하게 발생함을 알 수 있었다.

또한, 4가지 양생수에 침지한 모르타르의 균열, 박리 및 열화 등 성능저하 현상을 재령별로 육안으로 관찰하여 Al-Amoudi가 제안한 6단계의 외관등급 분류기준에 준하여 침식 정도를 평가해 본 결과, 담수와 해수는 등급의 변화가 없었고, 황산염 용액의 경우 재령이 경과함에 따라 열화와 중량손실이 심해지고 있음을 알 수 있었다.

4.4 경화한 모르타르의 특성

결합재 종류별로 치환율을 변화시켜 시편을 제작한 후 수중에서 28일 동안 표준 양생한 다음 담수, 해수, 10% 황산나트륨 용액, 10% 황산마그네슘 용액에 재령 28일, 60일, 90일, 180일, 270일, 365일 동안 침적 양생하여 경화한 모르타르의 기초물성(단위중량 및 압축강도)을 측정하였다. 따라서 앞으로 표현되는 재령들은 대부분 침적재령을 의미한다.

4.4.1 단위중량

결합재 종류 및 치환율 변화, 양생조건에 따른 단위중량 측정 결과를 표 14에 정리하였다. 단위중량의 변화는 담수에서 양생시킨 경우를 기준으로 하고, 각각의 다른 양생수에 침적양생시킨 경우의 단위중량 손실을 단위중량 변화율로 나타내었다. 재령에 따른 단위중량 변화율은 그림 5~그림 10과 같고, 양생조건에 따른 단위중량 변화율은 그림 11~그림 14와 같다. 여기서 단위중량변화율은 (침적양생 단위중량-담수양생 단위중량)/담수양생 단위중량 $\times 100(\%)$ 이다.

먼저 재령에 따른 단위중량 변화율을 살펴보면, 재령 28일과 재령 60일까지는 담수, 해수, 황산염 용액의 모든 양생조건에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 재령 90일에서부터 단위중량 변화율의 차이가 서서히 나타나기 시작하였다. 그 중에서도 담수와 해수에서 양생시킨 경우에 비해 황산염 용액에 축진 양생시킨 경우 황산염의 화학적인 침식으로 인해 단위중량 증가율이 점점 둔화되고 있음을 알 수 있었다. 특히 재령 180일에서는 그 결과가 확연하게 구분될 정도로 단위중량의 증가율이 차이가 남을 알 수 있었다. 재령 270일부터는 황산염 용액에 침적시킨 경우 단위중량이 오히려 감소하는 것으로 나타나 황산염에 의한 화학적 침식이 심각한

수준임을 알 수 있었다. 그 중 재령 365일에서 10% 황산마그네슘 용액에 침적시킨 OPC 시편이 0.979%로 가장 큰 중량감소를 나타내었다. 그러나 담수와 해수에서 양생시킨 OPC 시편의 경우는 재령 365일이 경과한 후에도 단위중량 변화율이 0.581%, 0.400%로 증가 현상을 나타내었다.

결합재의 종류별로 살펴보면 재령 365일에서 10% 황산마그네슘 용액에 침적한 경우 평균적으로 실리카흙을 첨가한 경우 중량감소가 가장 크게 나타났고, 다음은 플라이애쉬, 메타카올린 순이었다. 이와 같은 황산마그네슘 용액에서의 중량감소 경향은 C-S-H겔의 분해와 비결합질의 M-S-H의 생성으로 인한 시멘트 모르타르 경화체의 약화가 그 주된 원인이라고 할 수 있다. 특히, 실리카흙을 사용한 시험체에서 가장 큰 중량감소를 보이는 것은 황산마그네슘이 일으키는 시멘트의 분해작용을 실리카흙이 더욱 가속화시키는 것으로 판단된다.

양생조건에 따른 단위중량 변화율을 살펴 보면 담수의 경우에는 재령 365일까지 모든 시편에서 단위중량이 증가하는 것으로 나타났다. 해수의 경우에는 OPC의 경우 재령 270일부터 단위중량이 감소하는 것으로 나타났고 플라이애쉬 50%의 경우에는 재령 365일부터 증가율이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 해수에서 단위중량 증가율이 담수에서의 단위중량 증가율에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 전체적으로 담수와 해수에서 양생한 경우에는 모든 시편에서 0.5% 범위대로 단위중량이 증가하였다.

그에 반하여 10% 황산염나트륨 용액에 침적시킨 경우에는 재령 90일까지는 단위중량이 증가하다가 재령 180일부터 단위중량 변화율이 감소하기 시작하였고, 10% 황산마그네슘 용액의 경우에는 재령 270일부터 급속히 감소하는 경향을 보였다.

10% 황산나트륨 용액에 침적시킨 경우 OPC 재령 365일의 단위중량 감소율 0.692% 보다는 전체적으로 감소율이 작았다. 그중에서도 메타카올린 15%를 첨가한 시편의 경우 단위중량 감소율이 0.080%로 나타나

침해 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났다.

10% 황산마그네슘 용액에 침적시킨 경우도 OPC 재령 365의 단위중량 감소율 0.979%보다는 전체적으로 감소율이 작았다. 그중에서도 메타카올린 5%를 첨가한 시편의 경우가 감소율이 0.213%로 나타나 침해 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났다.



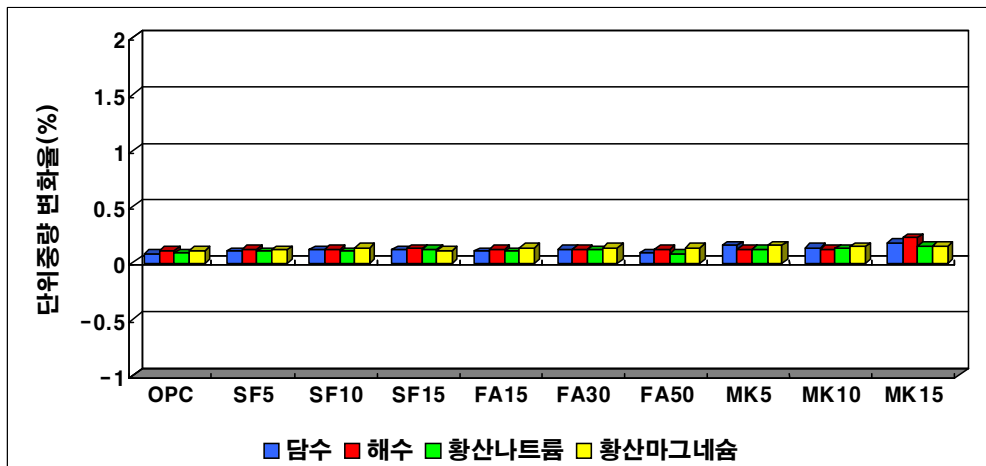


그림 5 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 28일)

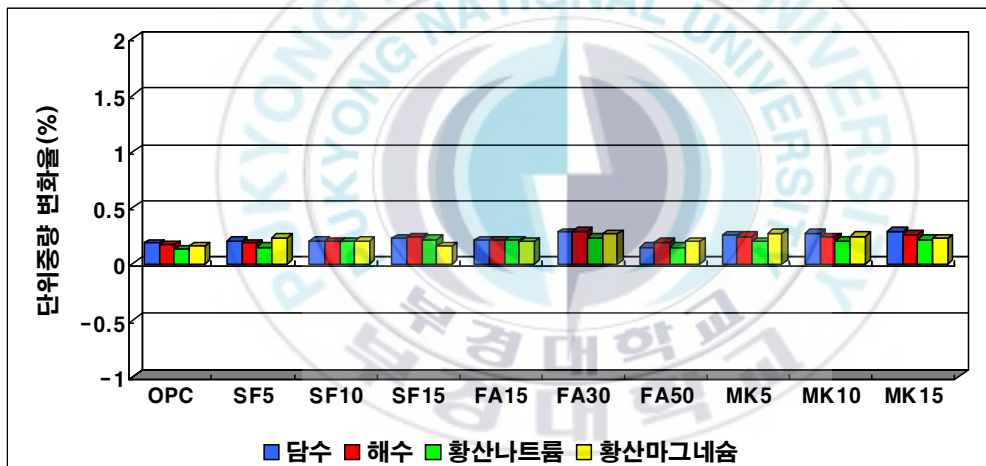


그림 6 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 60일)

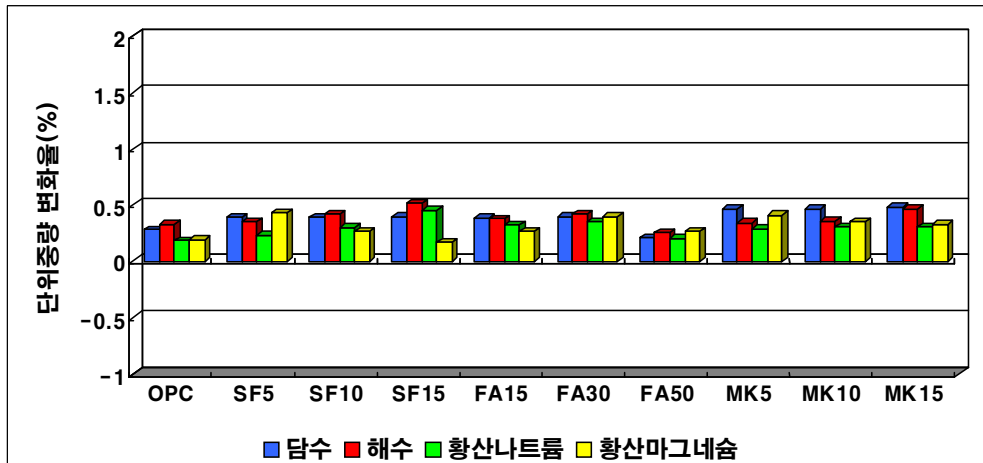


그림 7 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 90일)

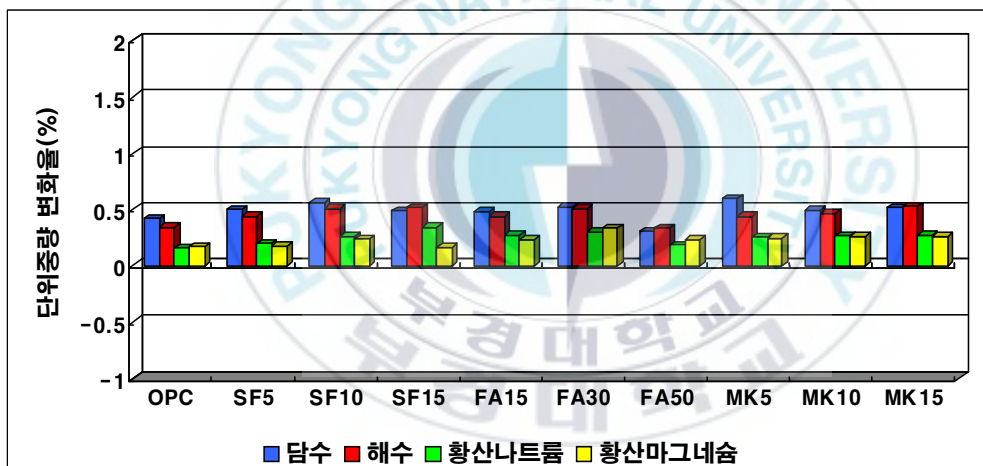


그림 8 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 180일)

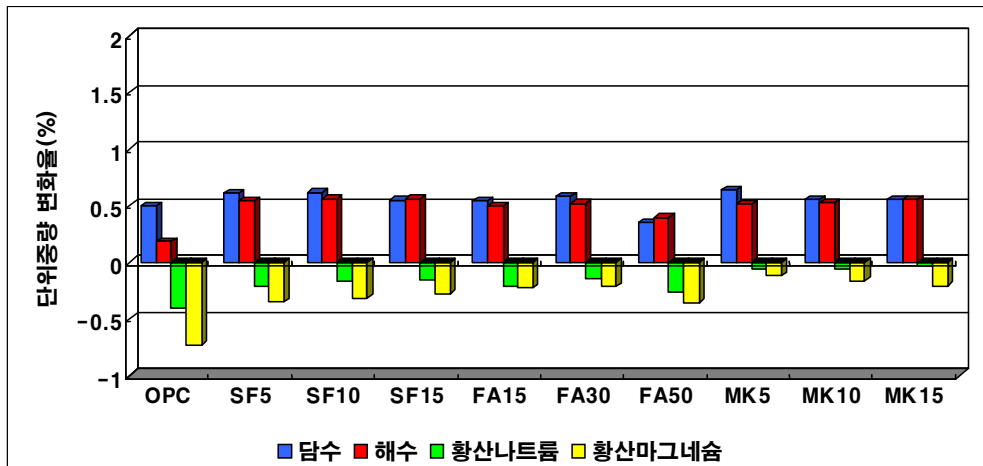


그림 9 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 270일)

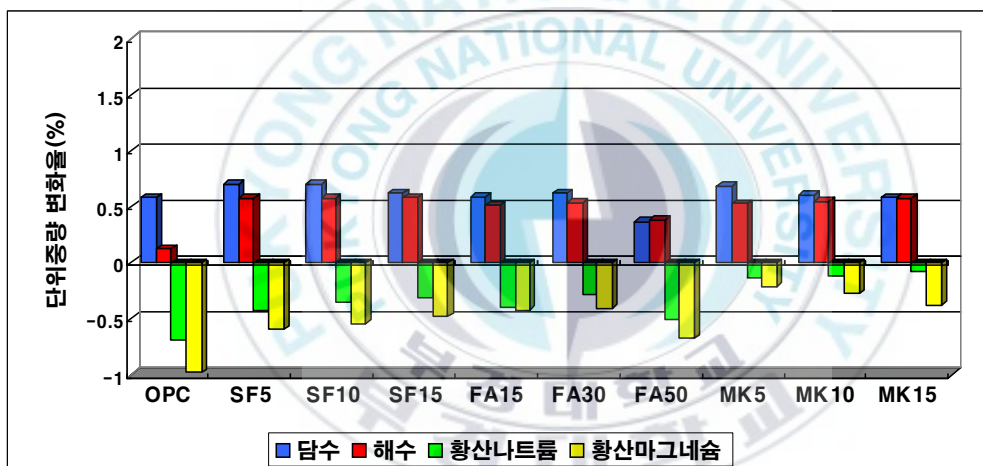


그림 10 재령에 따른 단위중량 변화율(재령 365일)

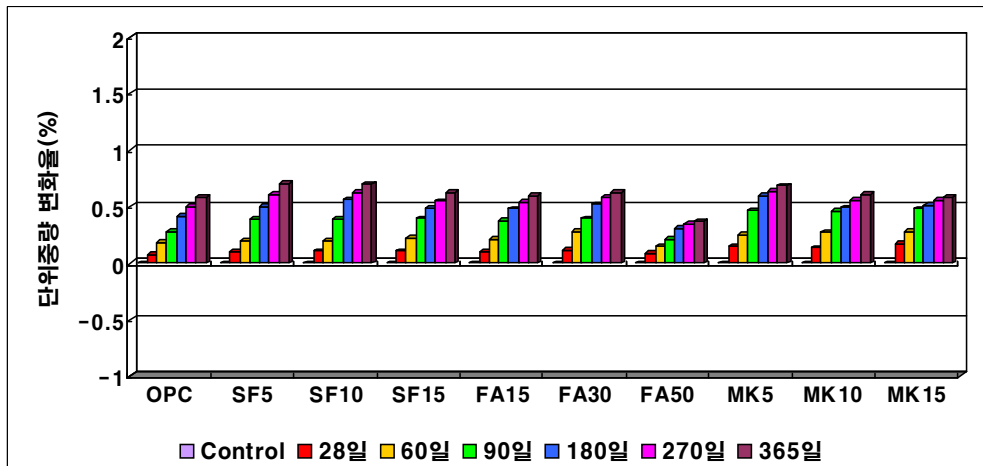


그림 11 양생 조건에 따른 단위중량 변화율(담수)

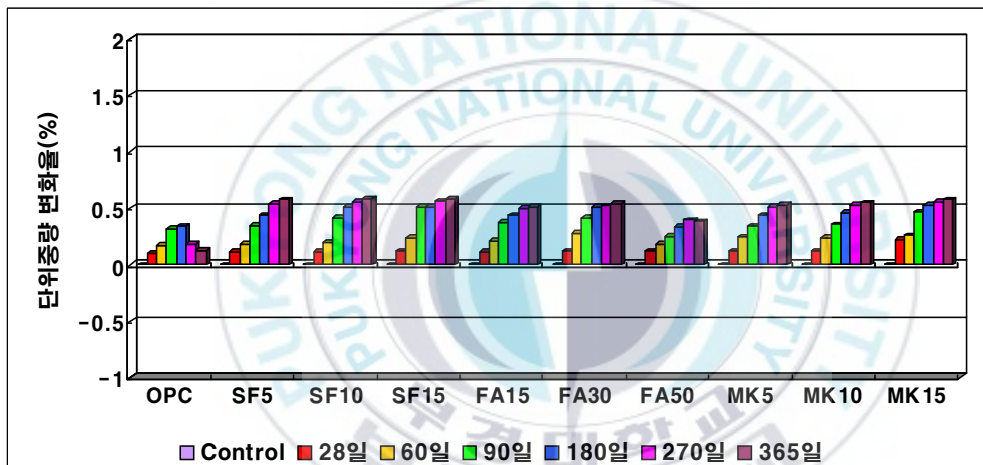


그림 12 양생 조건에 따른 단위중량 변화율(해수)

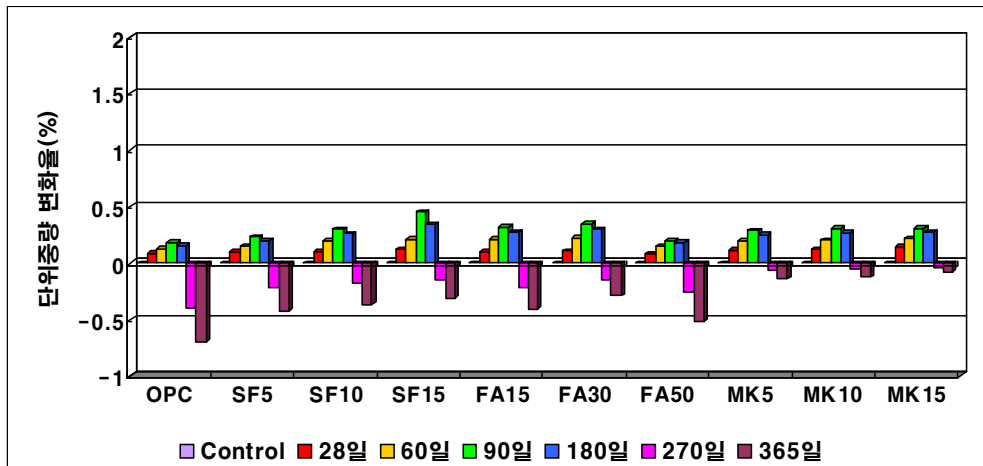


그림 13 양생조건에 따른 단위중량 변화율(10% 황산나트륨 용액)

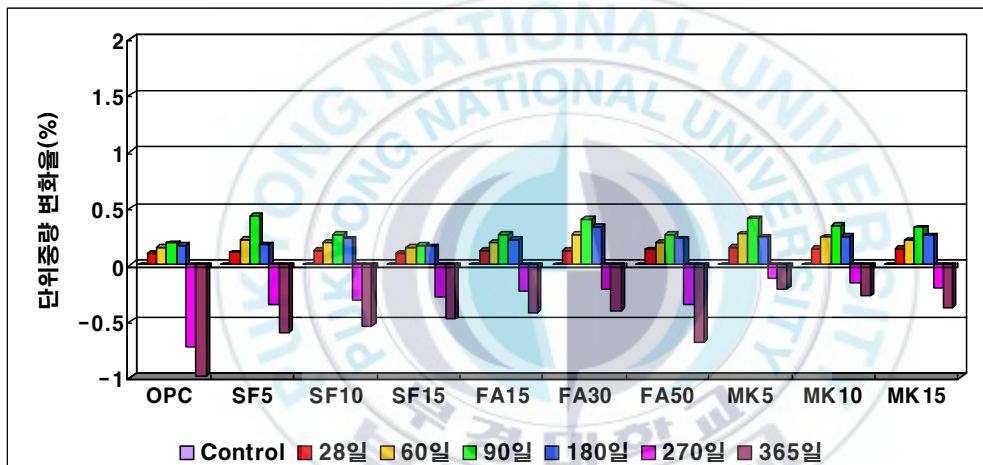


그림 14 양생조건에 따른 단위중량 변화율(10% 황산마그네슘 용액)

4.4.2 압축강도

결합재 종류 및 치환율 변화, 양생조건에 따른 압축강도 측정 결과를 표 15에 정리하였다. 재령 및 양생조건에 따른 압축강도 변화는 그림 15~그림 18과 같다. 담수에서 양생시킨 경우에 비해 침적 양생시킨 경우의 압축강도 손실변화를 비교하기 위해 압축강도 변화율로 나타내었고, 그 결과는 그림 19~그림 22와 같다. 여기서 압축강도 변화율은 (침적양생 압축강도 - 담수양생 압축강도) / 담수양생 압축강도 $\times 100(\%)$ 이다.

먼저 재령 및 양생조건에 따른 압축강도의 변화를 살펴보면, 담수의 경우에는 OPC 뿐만 아니라 결합재의 종류를 달리한 전 시편에서 재령이 증가할수록 압축강도도 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 결합재의 종류를 달리한 경우에는 메타카올린을 첨가한 시편의 압축강도가 가장 높게 발현되는 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 결합재의 종류를 달리한 경우의 압축강도가 OPC보다 평균 20MPa 이상 높게 나타나 광물질 혼화재료를 첨가한 시편이 압축강도 발현에서 월등한 것으로 나타났다. 그러나 플라이애쉬를 50%로 과다 첨가한 경우에는 예외이다.

해수에 양생한 경우의 강도 발현 상태는 대체로 담수와 흡사한 경향을 보이고는 있으나, 재령 180일을 경과한 후 재령 270일부터 압축강도가 감소하고 있어 해수에 포함된 염류가 시멘트 모르타르를 침식시켜 서서히 열화를 가져오는 것으로 판단된다.

10% 황산염 용액에 양생시킨 결과 강도 발현상태가 담수와 해수에 비해 대략 20~30MPa 정도 낮게 나타났다. 그리고 재령 180일부터 해수의 경우보다 빠르게 압축강도가 감소하는 경향을 보이고 있어 침적에 의한 시멘트 모르타르의 열화가 해수보다 더 빨리 가속화 되는 것으로 나타났다.

결합재의 종류를 달리한 시험체를 황산염 용액에 침적시킨 경우 메타카올린을 첨가한 경우가 압축강도 발현이 가장 좋은 것으로 나타났고, 그 다

음은 실리카흙, 플라이애쉬 순으로 나타났다. 특히, 결합재로 메타카올린과 실리카흙을 치환한 경우는 황산염에 침적시킨 후에도 OPC와 설계기준 강도를 크게 상회하는 것으로 나타났고, 플라이애쉬를 사용한 경우에도 전체적으로는 상회하는 것으로 나타나 광물질 혼화재료가 압축강도 면에서는 염해에 탁월한 효과가 있는 것으로 나타났다.

재령 365일에서 압축강도를 비교해 보면, 담수의 경우 메타카올린 5% 일 때 72.8MPa로 가장 높은 것으로 나타났다. 해수의 경우는 실리카흙 15% 일 때 49.5MPa로 가장 높았으며 10% 황산나트륨 용액은 메타카올린 15%를 첨가한 경우가 48.2MPa, 10% 황산마그네슘 용액은 메타카올린 15%일 경우가 41.9MPa로 압축강도가 가장 높게 나타났다.

압축강도 변화율을 살펴보면 담수의 경우에는 전체적으로 압축강도가 일정하게 증가하는 경향을 보였고, 특히 메타카올린을 5%, 10%를 첨가한 경우가 다른 결합재에 비해 10~15% 정도 높은 증가율을 보였다.

해수에서 양생한 경우에는 결합재의 종류나 그 사용량의 차이에 관계없이 거의 일정한 경향을 보였다. 특히 침지일수 180일까지는 압축강도 증가율이 서서히 증가하였으나, 재령 270일 이후에는 오히려 감소하는 경향을 보였다.

10% 황산나트륨과 황산마그네슘에 침적시킨 경우에는 재령 180일부터 압축강도가 감소율로 나타났다. 결합재 종류별로 살펴 보면 플라이애쉬의 압축강도 감소율이 가장 크고, 그 다음은 실리카흙, 메타카올린 순으로 나타났다. 따라서 해양환경에서 황산염에 의한 열화 방지에는 메타카올린이 가장 우수한 것으로 나타났다.

전체적으로 압축강도 변화율을 비교해 보면, 담수에서 양생한 경우는 모든 시편이 10~20% 범위 내외에서 증가하는 것으로 나타났으나, 10% 황산나트륨 용액과 10% 황산마그네슘 용액의 경우는 재령 90일까지는 증가로 나타나다가 재령 180일 경과한 후부터는 감소하는 것으로 나타났다.

특히 10% 황산나트륨 용액에 침적시킨 경우 전체적으로 침지 재령 365일의 OPC의 재령 365일의 압축강도 감소율 68.273% 보다는 작았다. 그 중에서도 메타카올린 5%를 첨가한 경우의 감소율이 19.846%로 가장 작게 나타나 침해 저항성이 가장 양호함을 알 수 있었다.

또한 10% 황산마그네슘 용액에 침적시킨 경우도 전체적으로 OPC 재령 365일의 압축강도 감소율 73.859%보다는 작았다. 그 중에서도 메타카올린 5%를 첨가한 경우의 감소율이 31.021%로 가장 작은 값으로 나타나 침해 저항성이 가장 좋은 것을 알 수 있었다.



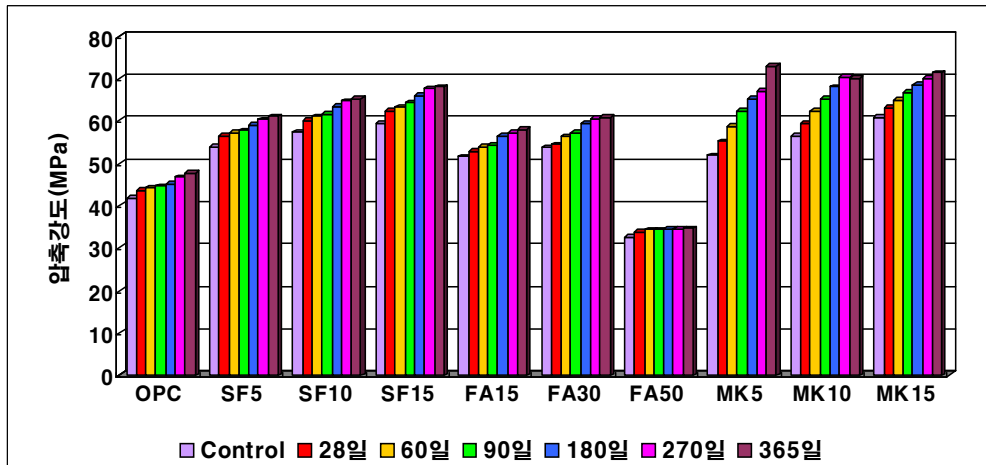


그림 15 재령 및 양생 조건에 따른 압축강도(담수)

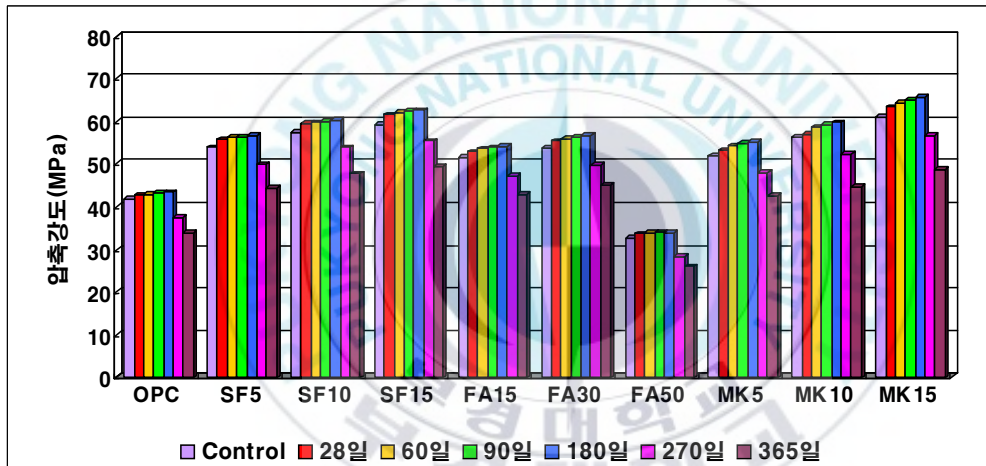


그림 16 재령 및 양생 조건에 따른 압축강도(해수)

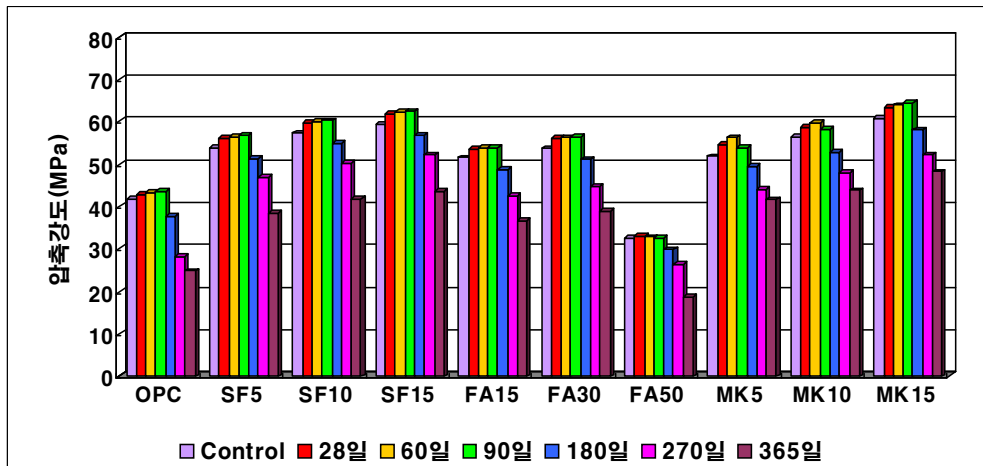


그림 17 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(10% 황산나트륨 용액)

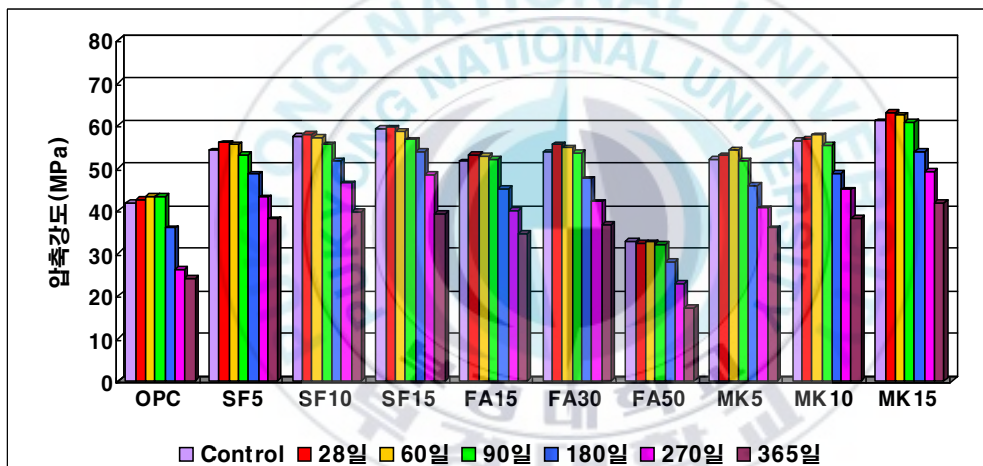


그림 18 재령 및 양생조건에 따른 압축강도(10% 황산마그네슘 용액)

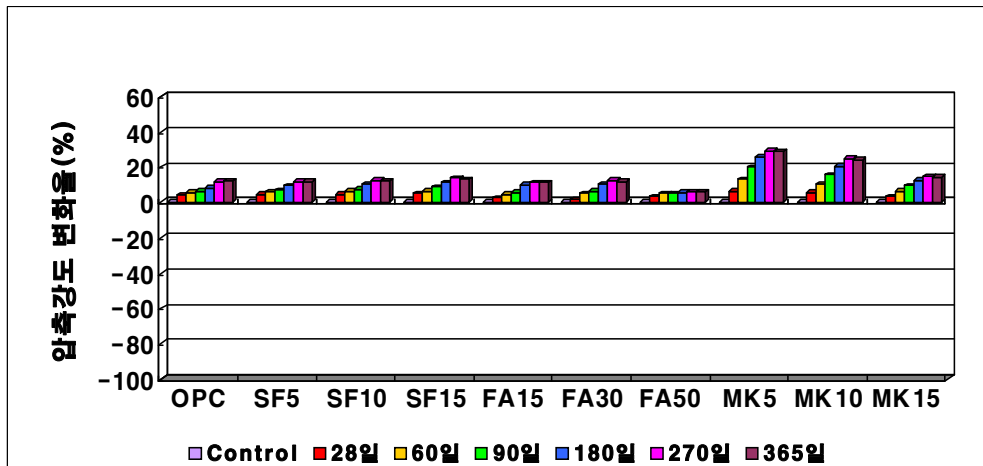


그림 19 재령에 따른 압축강도 변화율(담수)

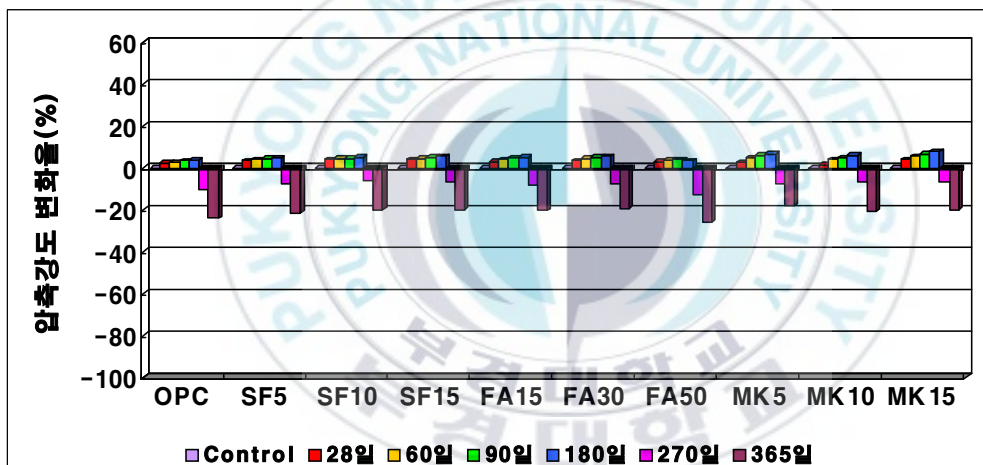


그림 20 재령에 따른 압축강도 변화율(해수)

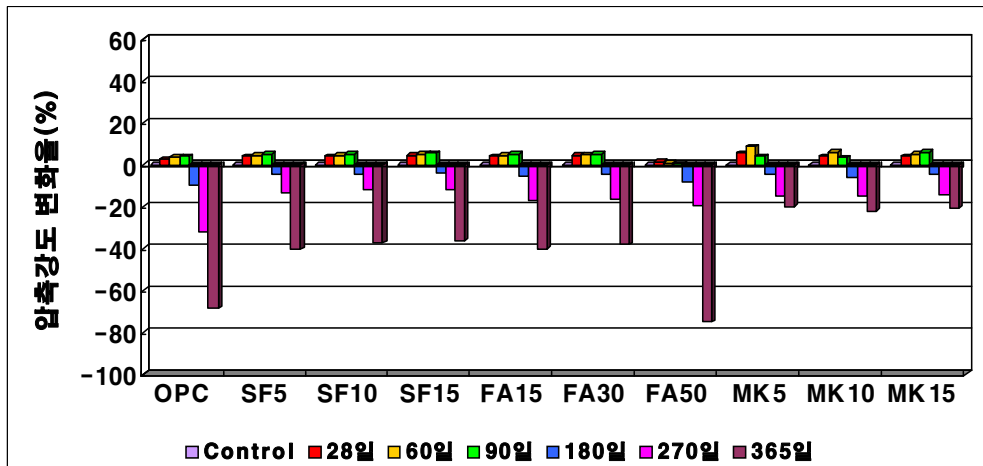


그림 21 재령에 따른 압축강도 변화율(10% 황산나트륨 용액)

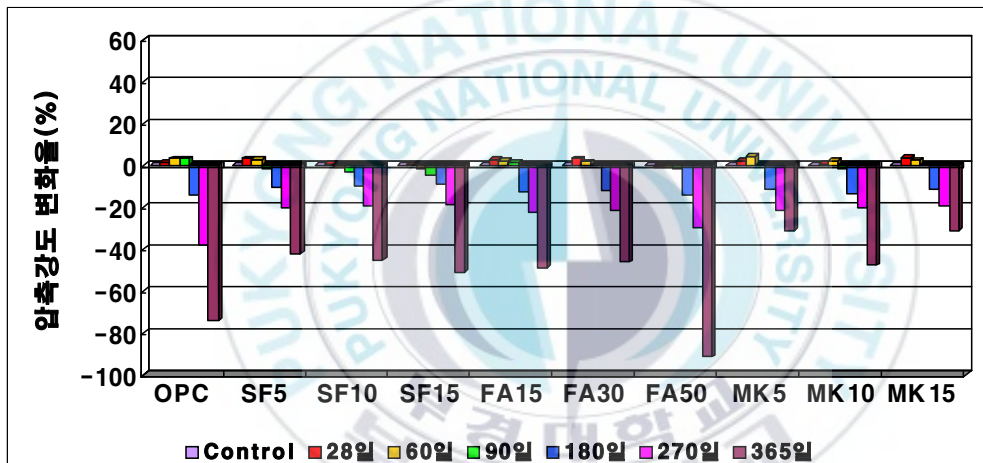


그림 22 재령에 따른 압축강도 변화율(10% 황산마그네슘 용액)

5. 결 론

본 연구에서는 해양환경에 노출된 내염성 콘크리트를 제조하기 위한 기초 연구를 위해 설계기준강도 35MPa, 물-시멘트비(W/C)를 45%, 플로우치를 115~130mm 범위로 하였다. 결합재로 사용된 광물질 혼화재료 중 실리카흙의 사용량은 단위시멘트량의 5%, 10%, 15%로, 플라이애쉬의 사용량은 단위시멘트량의 15%, 30%, 50%로, 메타카올린의 사용량은 단위시멘트량의 5%, 10%, 15%로 치환하여 모르타르 시험체를 제작하였다. 담수, 해수, 10% 황산나트륨용액, 10% 황산마그네슘용액에 침지하여 침지 채령 28일, 60일, 90일, 180일, 270일, 365일의 외형변화, 단위중량, 압축강도의 변화를 측정하였다.

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 시험체를 담수, 해수, 10% 황산나트륨용액, 10% 황산마그네슘용액에 침지하여 외형변화를 관찰한 결과 담수와 해수의 경우에는 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. 그러나 10%의 황산나트륨 및 황산마그네슘용액에 침지한 두 경우 모두는 침지 채령 90일부터 가장자리에서부터 변화를 보이기 시작하여, 180일 이후에는 균열 또는 마모현상이 뚜렷하게 나타났다.

(2) 4가지로 양생수를 달리한 모르타르 시험체의 균열, 박리 및 열화 등의 성능저하현상을 채령별로, 육안으로 관찰하여 Al-Amoudi가 제안한 6단계의 외관등급 분류기준에 준하여 침식정도를 평가해 보았다. 담수와 해수에 침지한 경우에는 채령에 관계없이 등급의 변화가 없었으나, 10%의 황산나트륨 및 황산마그네슘용액에 침지한 경우에는 두 경우 모두에서 채령이 경과함에 따라 열화나 중량손실이 심해짐을 알 수 있었

다.

(3) 양생조건을 달리한 경우의 단위중량 변화율을 비교해 보면 담수와 해수의 경우에는 모든 시편에서 0.5% 범위내외로 단위중량이 증가하였다. 그러나 10%의 황산나트륨과 황산마그네슘의 경우에는 침지 재령 180일까지는 단위중량이 증가하다가 270일부터는 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 결합재의 종류를 달리하여 열악한 양생조건인 10%의 황산나트륨과 황산마그네슘에 침지한 경우의 단위중량 변화는 메타카올린을 첨가한 시편이 침해저항성이 가장 양호한 것으로 나타났다. 특히 황산마그네슘의 영향은 C-S-H겔의 분해와 비결합질의 M-S-H의 생성으로 인한 시멘트 모르타르 경화체의 약화가 그 주원인으로 볼 수 있고, 실리카흙을 첨가할 경우 다른 결합재에 비해 상대적으로 시멘트의 분해작용을 더욱 가속화시키는 것으로 판단되었다.

(5) 양생조건을 달리한 경우의 압축강도는 담수의 경우에는 침지일수에 관계없이 꾸준히 증가하였으나, 해수의 경우에는 180일까지는 증가하다가 270일 부터는 오히려 감소하였다. 양생조건이 열악한 10%의 황산나트륨용액과 황산마그네슘용액에서는 90일까지는 증가하다가 180일 이후에는 꾸준히 감소하였다.

(6) 결합재의 종류를 달리하고 양생조건을 달리한 침지 재령 365일에서의 압축강도는 담수의 경우에는 메타카올린을 5% 사용한 경우가 가장 높게 나왔고, 해수의 경우에는 실리카흙을 15% 사용한 경우가, 10% 황산나트륨 또는 황산마그네슘을 사용한 경우에는 메타카올린을 15% 사용한 경우가 가장 높게 나왔다.

(7) 압축강도 발현성상을 비교해 보면 OPC에 비해 결합재의 종류를 달리한 열악한 양생조건(10% 황산나트륨 및 황산마그네슘 용액)에서 효과적인 것으로 나타났다. 그중에서도 황산나트륨의 침해에 대해서는 실리카흙과 메타카올린을 첨가한 경우가 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

(8) 단위중량 및 압축강도에서 메타카올린의 치환율에 비례하여 화학적 침해에 대한 저항성이 더욱 양호해 짐을 알 수 있었다. 이는 치환율이 높아질수록 겔의 결합력이 높아지고 그에 따라 조직이 치밀해지며 유해한 이온의 확산이 차단됨으로 인한 결과로 판단된다.

(9) 플라이애쉬로 치환할 경우 치환율 30%까지는 단위중량 및 압축강도가 증가하였으나, 치환율을 50%로 과다 사용시는 오히려 크게 감소한다. 이는 포졸란 반응에 필요한 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 부족으로 반응하지 못한 플라이애쉬가 유리되어 발생한 결과로 판단되며, 플라이애쉬의 적정 사용량은 30% 전후일 것으로 생각된다.

향후 연구과제는 결합재를 사용한 콘크리트의 염해 저항 성능은 조직의 치밀성을 대표하는 강도특성 이외에 혼화재료가 갖는 재료적 특성 및 치환율 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 염해 환경에 노출되는 철근 콘크리트 구조물의 보다 정확한 내구성능 평가를 위해서는 압축강도 발현특성 검토와 더불어 황산염에 대한 확산계수의 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김광열, “부순모래 콘크리트의 황산염 침해에 대한 연구”, 석사학위논문, 부경대학교, 2005. 8.
2. 문한영, 이승태, 김홍삼, 김진철, “시멘트 모르타르의 황산염 및 해수 침식에 대한 저항성”, 대한토목학회논문집, 제20권, 제3-A호, 2000. 5.
3. 박영식, 서진국, 이재훈, 신영식, “황산염의 침해를 받는 고강도 콘크리트의 강도특성과 물성변화”, 콘크리트학회지, 제10권, 5호, 1998. 10.
4. 배원만, “부산근교에서 생산된 부순골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 부경대학교, 2005. 2.
5. 이광명, 구현본, “해양환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 수명 평가”, 한국구조물진단학회, 제4권, 제3호, 2000. 7.
6. 이종득, “콘크리트 구조물 조직 진단”, 도서출판 일광, 2004. 4.
7. 이효민, 황진연, 진치섭, “해안지역 콘크리트의 성능저하 현상과 이에 수반되는 이차광물의 형성 특징”, 자원환경지질, 제36권, 제5호, 2003. 10.
8. 안태호, 김용태, 김병기, “시멘트·콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린 응용 가능성”, 콘크리트학회지, 제14권, 4호, 2002. 7.
9. 최재진, 최연왕, 김기형, “최신토목재료학”, 기문당, 2000.1.
10. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서 해설집”, 기문당, 2004. 2.
11. 한천구, “콘크리트의 특성과 배합설계”, 기문당, 1998. 7.
12. Adam Neville, “Properties of Concrete”, 4rd Ed., Wiley, 1997.
13. Adam Neville, “The confused world of sulfate attack on concrete”, Cement and Concrete Research Vol. 34, pp. 1275~1296, 2004.
14. Cohen et al., “Mechanism of sulfate attack”, Cement and Concrete Research Vol. 33, pp. 341~346, 2003.
15. S.M. Torres et al., “Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack”, Cement & Concrete Composites Vol. 25, pp. 947-954, 2003.
16. Sidney Mindess, J. Francis Young, and David Darwin, “Concrete, 2rd Ed.”, Prentice Hall, 2003.