시멘트 화학성분(C₃A)과 무기 혼화재에 따른 황산염 침투 특성

Sulfate Attack According to the Quantity of Composition of Cement and Mineral Admixtures

안 남 식¹ 이 재 홍¹ 이 영 학^{2*}

Ahn, Nam-Shik¹ Lee, Jae-Hong¹ Lee, Young-Hak^{2*}

Department of Architectural Engineering, Sejong University, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-747, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Giheung-Gu, Yongin, 446-701, Korea ²

Abstract

The primary factors affecting concrete sulfate resistance are the chemical composition of the Portland cement, and the chemistry and quantity of mineral admixtures. To investigate the effect of those on the sulfate attack, the testing program involved several different mortar mixes using the standardized test, ASTM C1012. Four different cements were evaluated, including one Type I cement, two Type I-II cements, and one Type V cement. Mortar mixes were also made with mineral admixtures, as each cement was combined with three different types of mineral admixtures. One Class F fly ash, one Class C fly ash, and one ground granulated blast furnace slag (GGBFS) were added in various percent volumetric replacement levels. Expansion measurements were taken and investigated with the expansion criteria recommended by ASTM.

Keywords : sulfate attack, C₃A, mineral admixtures, fly ash, furnace slag

1. 서 론

1.1 연구의 목적

콘크리트 구조체를 보수 및 재건축하기 위해서는 막대한 비용이 소요되기 때문에 근래 새로운 건설 사업에 있어서 콘크리트의 내구성과 장기 거동능력을 파악하는 것이 점점 더 중요한 문제로 제기되고 있다. 양질의 콘크리트 구조물을 생산하기 위해서는 새로운 재료들과 기술, 시험방법들을 발전시킬 수 있는 지침이 개발되어야 한다.

현재까지의 시방서에 따르면 극한 환경에서 내구성을 유지하기 위하여 투수성이 낮은 콘크리트가 필요할 경우, 배

합설계시 설계허용치를 초과하지 않는 범위 내에서 낮은 물-결합재비를 사용할 것을 제시하고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 배합설계에서의 물-결합재비는 약 40년 전에 성립된 물-시멘트비와 콘크리트의 투수성과의 상관관계를 근거로 사용되고 있는 실정이다. 이 상관관계를 사용할 경우 현대 건설 산업에서 콘크리트 투수성에 영향을 주는 모든 요소에 대한 고려를 할 수 없는 것이 문제점으로 대두되고 있기 때문에, 미국의 경우 ASTM C1012[1]의 제한 기준에 따라서 황산염 환경에 사용될 수 있는 모르타르의 배합률의 제한을 두고 있는데 반해, 국내의 경우 황산염 저항성에 대한 특별한 기준이 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국제적으로 인정되는 시험방법들을 통해 황산염 침투에 영향을 주는 요소들을 고찰하고, 국내의 극한 환경에서 내구성을 유지할 수 있는 모르타르 배합률의 기준을 제안하여 국내 콘크리트의 시공기술 및 내구성을 한 단계 끌어올리는데 기여하고자 한다.

Received : June 7, 2011

Revision received : August 19, 2011

Accepted : September 26, 2011

* Corresponding author : Lee, Young Hak

[Tel: 82-31-201-3815, E-mail: leeyh@khu.ac.kr]

©2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2. 문헌고찰

2.1 황산염 침투의 과정

황산염 침투는 황산염 이온이 존재하는 경화 콘크리트에서 발생하는 연속된 반응으로 이루어지게 된다[2]. 이러한 반응에 의해 발생하는 화합물들은 콘크리트 화합물보다 큰 부피를 가지게 되며, 이는 시멘트 페이스트의 내부 팽창을 유발시켜 경화 콘크리트의 국부적인 인장 응력을 발생시키게 된다. 이러한 국부적인 인장 응력은 콘크리트에 균열과 박리를 발생시키게 되며 콘크리트 단면의 손실로 이어져 콘크리트의 성능을 현저하게 저하시키게 된다.

2.2 황산염 침투를 저항하는 콘크리트 요인

황산염 침투에 대하여 콘크리트의 저항성에 영향을 미치는 요인들로는 포틀랜드 시멘트의 화학성분, 콘크리트의 투수성 및 혼화재의 화학성분 등을 들 수 있다.

2.2.1 포틀랜드 시멘트의 화학성분

현재 대부분의 연구에서 포틀랜드 시멘트의 주요 화학성분 중 콘크리트의 황산염 저항성에 가장 큰 영향을 주는 요인은 알루미늄산삼석회(이하 C_3A)로 정의하고 있다[3]. C_3A 는 경화되기 전의 콘크리트에서 생성된 알루미늄산 황산염의 양을 결정하게 되는데, 이 알루미늄산 황산염은 경화된 콘크리트에서 에트린자이트를 형성하게 되며, 이는 콘크리트 내부의 체적팽창에 따른 콘크리트의 손상을 유발시키게 된다[4]. 시멘트에서 C_3A 의 함량이 황산염 저항성에 영향을 미치는 가장 중요한 화학 성분이므로 ASTM C150에서는 시멘트 유형에 대하여 C_3A 의 최대함량을 규정하고 있다[5].

2.2.2 콘크리트의 투수성

20세기 초, 저 투수성 콘크리트를 사용하여 황산염 이온이 콘크리트에 침투하는 것을 최소화하는 것이 황산염 침투에 대한 유일한 방대책으로 제시되었지만, 현재에는 저 투수성 콘크리트를 생산하는 데에 여러 가지 방법이 사용되고 있다[6].

2.2.3 혼화재

포틀랜드 시멘트를 혼화재로 대체하면 시멘트 내의 주요 요소인 C_3A 가 감소되어 에트린자이트의 형성이 줄어들게 되며 투수성이 낮아지게 된다. 따라서 황산염 이온이 콘크

리트에 침투하는 속도를 둔화시킬 수 있게 된다[7, 8]. 황산염 환경에서 주로 사용되는 혼화재에는 플라이애시, 실리카 폼 그리고 고로슬래그 등이 있다.

3. 실험계획

본 연구는 ASTM C1012에 따라 몇 가지 모르타르 배합을 사용하였다. 시멘트는 ASTM C150에 따라 하나의 Type I 시멘트, 두 종류의 I-II 혼합시멘트 그리고 하나의 Type V 시멘트 등이 사용되었다[9]. 모르타르 배합에는 각 시멘트와 세 종류의 다른 혼화재가 혼합되어 사용되었다. 혼화재로는 ASTM F타입 플라이애시, ASTM C타입 플라이애시 그리고 고로슬래그 미분말이 다양한 비율로 대체되어 본 실험에 사용되었다[10,11,12]. ASTM C490 시험방법[13]에 의해 모르타르 시편을 제작하여 황산염 용액에 침전시킨 후 팽창 정도를 측정하였으며, 권장되는 팽창 기준과 비교 분석하였다.

3.1 실험재료

3.1.1 포틀랜드 시멘트

표 1은 네 가지 종류의 시멘트에 대한 C_3A 성분을 나타낸 것이며, 모든 시멘트의 비중은 3.15이다. Type I 시멘트는 C_3A 의 함량에 대한 ASTM C150의 제한이 없으므로 12 %의 C_3A 의 사용이 가능하다. I-II(A) 혼합시멘트는 5.1 %의 C_3A 를 포함하고 있으며, 이는 2종 시멘트에 대한 ASTM C150 기준의 최대 한계 값인 8 %보다 상당히 낮으며, Type V 시멘트에서 요구되어지는 5 %의 한계치를 약간 넘는 수준이다. I-II(B) 혼합시멘트에 포함된 7 %의 C_3A 는 2종 시멘트의 ASTM C150 기준인 8 % 한계치보다 낮음을 알 수 있다. Type V 시멘트는 C_3A 를 0.5 %를 포함하고 있으므로, 황산염 저항에 대한 5 %의 C_3A 한계 함량을 충족시키고 있다[5].

Table 1. Chemical properties of portland cements

Cement Type (ASTM C150) Composition	Portland Cements			
	I	I-II (A)	I-II (B)	V
Tricalcium Aluminate (C ₃ A), %	12	5.1	7	0.5

3.2.2 잔골재

모르타르를 만드는데 사용된 잔골재의 비중은 2.65이며 흡수율은 0.5 %이다[14].

Table 2. Chemical and physical properties of mineral admixtures

Mineral Admixture	ASTM Class F Fly Ash	ASTM Class C Fly Ash	GGBF Slag
Moisture Content, %	0.1	0.12	0.08
% Retained on #325 Sieve	20.4	12.12	0.30
Density(g/cm ³)	2.53	2.65	2.86

3.2.3 혼화제

본 연구에는 저칼슘의 ASTM F타입 플라이애시와 고칼슘의 ASTM C타입 플라이애시, 고로슬래그 미분말이 혼화재로 사용되었으며, 이 혼화재의 물리적 성질은 표 2에 나타나 있다. 콘크리트의 황산염 침투와 관련된 플라이애시의 화학적 성분에는 산화칼슘(CaO), 이산화규소(SiO₂), 산화알루미늄(Al₂O₃) 그리고 산화철(Fe₂O₃) 등이 포함되어 있다.

3.2 배합설계

모르타르를 위한 배합설계는 중량을 기준으로 하여 모래와 시멘트를 2.75 : 1의 비율로 배합하였다. 포틀랜드 시멘트의 모르타르 배합은 비 연행 시멘트의 경우 0.485, 공기 연행 시멘트의 경우 0.460의 물-시멘트비가 사용되어야 한다[5]. 본 실험에서는 모두 비 연행 시멘트가 사용되었으므로, 배합을 위하여 0.485의 물-시멘트비를 사용하였다. 표 3은 포틀랜드 시멘트 모르타르에 대한 기본 배합을 나타낸 것이며 모르타르에 필요한 공기량은 2 %로 가정하였다.

Table 3. Mix proportions for plain portland cement mortars

Material	Content (kg/m ³)
Water	265
Portland Cement	532
Graded Sand	1456

3.3 실험과정

3.3.1 시편제작

ASTM C1012를 바탕으로 팽창 측정을 위한 실험체로 2.5cm × 2.5cm × 30cm 크기의 모르타르 시편을 제작하였으며, 압축강도시험을 위하여 5cm의 입방체를 제작하였

다. 각각 6개의 모르타르 시편과 18개의 입방체를 제작하여 실험을 수행하였다.

3.3.2 실험과정

모르타르 시편은 ASTM C490을 기준으로 19.7 MPa (2850psi)의 강도에서 초기길이를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 규산황산염용해제는 pH 6~8, 온도는 22.8 ± 1.6℃로 유지되었다. 시편의 길이는 규산황산염용해제에 처음 침수시킨 이후 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15주에 측정하였으며, 장기 측정은 침수 후 4개월 및 6개월이 지난 후에 수행되었다. 본 실험을 통하여 시간이 흐름에 따라서 규산황산염용해제에 침수된 모르타르 시편의 길이 변화를 얻고자 하였으며 길이 측정은 시편에 대한 팽창 백분율을 계산하는 데에 사용되었다.

4. 실험결과

4.1 압축강도결과

그림 1, 2, 3 및 4는 서로 다른 네 종류의 시멘트에 대한 모르타르의 압축강도 발현을 나타내고 있으며, 표 4의 각 시편번호는 시멘트 종류 및 혼화재를 구분하기 위해 구성되었고 자세한 설명은 표 4의 주석에 나타내었다. 초기 압축강도는 모르타르 시편이 35℃의 항온 양생조에서 약 24시간이 지난 후 꺼내어 측정하였는데, 모르타르는 초기 24시간의 양생 이후에 19.7 MPa (2850psi)의 압축강도에 도달하지 못하였기 때문에, 상온의 포화된 석회수 양생조에서 추가적인 양생 시간을 필요로 하였다. 본 실험에 사용된 각각의 시멘트 유형에 있어서, 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 경우 혼화재가 첨가된 모르타르보다 19.7 MPa (2850psi)의 강도가 먼저 발현되었다. 그림 1과 2에서 보는 바와 같이 I - II (A) 혼합시멘트 모르타르 중 혼화재를 사용하지 않은 PC1의 경우는 대략 48시간의 양생 후 22.4 MPa (3250psi)의 강도에 도달한 반면, I - II (B) 혼합시멘트 모르타르는 24.9 MPa (3610psi)의 강도가 발현되었다.

또한 그림 3과 4에서 보는 바와 같이 Type I 시멘트의 비혼화제 모르타르는 1-2종 혼합시멘트 모르타르와 유사하게 양생시간이 48시간이 되기 전에 20.3 MPa (2950psi)의 압축강도에 도달하였으며, Type V 시멘트 모르타르인 PC5는 양생이 96시간이 지났을 때, 22.0 MPa (3190psi)

에 도달하여 가장 느리게 압축강도가 발현되었다. 혼화재가 첨가된 모르타르는 72시간의 양생이 지난 후에도 19.7 MPa (2850psi)의 압축강도에 도달하지 못하여, 더 많은 양생시간을 필요로 하였다. 1-2종 혼합시멘트 모르타르와 Type I 시멘트에 혼화재를 사용한 모르타르는 보통 4~7 일 사이에 19.7 MPa (2850psi)의 압축강도에 도달하였다.

Figure 1. Sulfate expansions of plain portland cement mortars

Figure 2. Sulfate expansions of mortars containing combinations of type I-II (A) cement with mineral admixtures

Figure 3. Sulfate expansions of mortars containing combinations of type I-II (B) cement with mineral admixtures

Figure 4. Sulfate expansions of mortars containing combinations of type V cement with mineral admixtures

4.2 황산염 팽창

4.2.1 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르에 대한 황산염 팽창

그림 5는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르에 대한 팽창 결과를 나타낸 것이다. 그림 5는 규산화황산염용해제에 침수된 후 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15주와 4개월, 6개월이 지난 후에 측정된 시편의 팽창과 ASTM C1012에서 규정하고 있는 팽창한계를 보여주고 있다. ASTM C1012에서는 180일 재령의 모르타르를 기준으로 혹독한 황산염 환경에서는 그 팽창률이 0.05 % 이하, 보통의 황산염 환경에서는 팽창률이 0.1 % 이하를 가지고 있어야 함을 한계로 규정하고 있으며, 팽창률이 0.1 %를 초과하는 경우에는 가장 온화한 황산염 환경에서만 사용하도록 규정하고 있다. 본 실험에서는 180일이 경과된 시점에서 I-II(A) 혼합시멘트를 포함하는 모르타르 시편 (PC1)은 혹독한 황산염 환경의 180일 평균 팽창률이 0.06 %로 나타났으며 이는 규정치인 0.05%를 약간 초과하였다. I-II(B) 혼합시멘트 모르타르 (PC2)의 경우 180일 황산염 팽창률이 0.1 %를 초과하였으며, 평균 팽창률은 0.113 %로 나타났다. Type V 시멘트 모르타르 배합인 PC5의 경우 180일 평균 팽창률이 0.037 %로 가장 낮게 나타났으며, 이는 혹독한 황산염 환경에 사용할 수 있는 한계치인 0.05 %보다 낮은 것으로 나타났다. Type I 시멘트를 포함하는 모르타르 배합인 P1은 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르 중 가장 높은 팽창률이 나타났는데, 180일 팽창률이 약 0.11 %로 나타났다.

Table 4. Compressive strength according to immersion age

Batch Name	Cement Type	Fly Ash/Slag (% Rep.)*	At Immersion Into Sulfate Solution	
			Age (days)	Compressive Strength, MPa (psi)
PC1	I-II (A)	None	2.1	22.4 (3250)
1FC-1	I-II (A)	C (25%)	4	21.0 (3050)
1FC-2	I-II (A)	C (35%)	5.9	20.5 (2970)
1FA-1	I-II (A)	F (20%)	4.9	22.1 (3200)
1FA-2	I-II (A)	F (30%)	4.9	20.2 (2930)
S1	I-II (A)	Slag (50%)	4.2	20.0 (2900)
PC2	I-II (B)	None	2.0	24.9 (3610)
2FC-1	I-II (B)	C (25%)	3.9	20.8 (3020)
2FC-2	I-II (B)	C (35%)	7.0	23.3 (3380)
2FA-1	I-II (B)	F (20%)	5.9	21.0 (3050)
2FA-2	I-II (B)	F (30%)	4.8	20.8 (3020)
S2	I-II (B)	Slag (50%)	4.9	21.2 (3070)
PC5	V	None	3.8	22.0 (3190)
5FC-1	V	C (25%)	6.1	21.4 (3100)
5FC-2	V	C (35%)	7.1	20.3 (2940)
5FA-1	V	F (20%)	7.0	20.3 (2940)
5FA-2	V	F (30%)	11.9	19.7 (2850)
S5	V	Slag (50%)	7.0	21.4 (3100)
P1	I	None	1.9	20.3 (2940)
1C-1	I	C (25%)	4.8	22.3 (3230)
1C-2	I	C (35%)	4.7	22.2 (3220)
1F-1	I	F (20%)	5.2	21.4 (3100)
1F-2	I	F (30%)	6.9	20.3 (2940)
Slag-1	I	Slag (50%)	6.8	20.1 (2910)

* In this column, C stands for ASTM Class C fly ash and F stands for ASTM Class F fly ash

Figure 5. Sulfate expansions of mortars containing combinations of type I cement with mineral admixtures

4.2.2 혼화재를 첨가한 시멘트 모르타르에 대한 황산염 팽창

그림 6, 7, 8 및 9는 혼화재를 첨가한 시멘트 모르타르의

황산염 팽창률에 대한 결과를 보여주고 있다. 각 그림들은 서로 다른 혼화재를 첨가한 다섯 종류 모르타르의 팽창률을 나타내고 있으며, 혼화재가 황산염 저항에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 황산염 팽창과 비교하였다.

실험을 수행하는 동안 일부 모르타르의 경우 침수 후 180일이 지난 시편들의 상태가 매우 좋지 않아 측정이 불가능하여 이에 대한 정보는 수집할 수 없었다.

모르타르의 황산염 저항에 영향을 주는 혼화재는 혼합된 시멘트의 종류에 따라 다양하게 나타남을 알 수 있었다. ASTM F타입 플라이애시와 고로슬래그를 포함하는 모르타르의 경우 평균 180일 시편 팽창률이 모두 0.05 % 이하로 나타났다.

그림 6에서 보는 바와 같이 F타입 플라이애시와 슬래그를 포함하고 있는 1-2(A) 혼합시멘트 모르타르의 팽창률은 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 팽창률은 0.06 %였으나 혼화재가 첨가될 경우 28~30 %의 팽창률 감소를 보였다. 시멘트의 20 %를 F타입의 플라이애시로 대체한 경우 가장 높은 팽창률 감소를 보인 반면에, 오히려 30 %를 대체한 시멘트의 경우 감소율이 가장 낮게 나타났다.

C타입 플라이애시가 혼합된 I-II(A) 혼합시멘트 모르타르는 매우 높은 팽창률이 나타났으며, 시멘트의 25 %를 C타입 플라이애시로 대체한 1FC-1 모르타르의 경우 180일 팽창률이 0.711 %로 나타났다. 시멘트의 35 %를 C타입 플라이애시로 대체한 모르타르의 경우 훨씬 더 높은 팽창률이 나타났는데, 침수 후 180일이 지나 심각하게 손상되었다.

Figure 6. Average 180-day expansions vs. cement C₃A contents for plain portland cement mortars in different sulfate

그림 7에서 보는 바와 같이 혼화재를 사용하지 않은 I-II(B) 혼합 시멘트 모르타르의 평균 팽창률(0.113 %)이 혼화재를 사용할 경우 57~77 % 감소하는 것으로 보아, F타입 플라이애시와 슬래그에 의한 팽창률 감소는 I-II(B) 혼합시멘트 모르타르에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

Figure 7. 180-day sulfate expansions of mortars with class F fly ash

F타입 플라이애시로 20 %를 대체한 2FA-1 모르타르 시편의 경우 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 평균 팽창률에 비해 64 %가 감소하는 것으로 나타났으며, 시멘트의 30 %를 F타입 플라이애시로 대체하였을 경우 팽창률 감소가 더욱더 커져서 77 % 감소하는 것으로 나타났다. 슬래그가 포함된 S2 시편의 경우 팽창률이 57 % 감소하였으며, C타입의 플라이애시를 첨가한 I-II(B) 혼합시멘트 모르타르의 경우 팽창률이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

I-II(B) 혼합시멘트 모르타르의 25 %를 플라이애시로 대체한 2FC-1의 180일 팽창률은 0.974 %로 나타났는데, 이는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 팽창률보다 약 9배나 높은 수치이다.

그림 8에 나타난 결과와 같이 Type V 시멘트에 혼화재가 첨가되었을 경우, F타입의 플라이애시와 슬래그에 의해 감소되는 180일 팽창률은 다른 종류의 시멘트에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. F타입 플라이애시로 20 %를 대체한 5FA-1의 평균 180일 팽창률은 0.030 %로 나타났으며, 이는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 팽창률보다 19 %가 감소된 결과이다. 플라이애시를 30 % 대체한 5FA-2는 180일 팽창률에서 확인되는 바와 같이 동일한 감소율을 보여주었다. 슬래그를 혼합한 S5 배합의 경우

180일 팽창률은 0.036 %로 혼화재를 사용하지 않은 경우에 비하여 약간 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 8. 56-day sulfate expansions of mortars with class C fly ash

C타입 플라이애시를 사용한 Type V 시멘트는 팽창이 현저하게 증가하는 것으로 나타났는데, 25 %의 플라이애시를 대체한 5FC-1의 경우, 180일이 지난 시점에는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르보다 5배가 팽창하는 것으로 나타났다. 35 %를 대체한 5FC-2의 경우 약 12배 팽창하여 팽창률이 0.459 %로 측정되었는데, 이 배합의 경우 C타입 플라이애시를 사용한 배합에서 전형적으로 발생하는 상태 약화나 균열현상이 나타나지는 않았다.

그림 9에서 보는 바와 같이 Type I 시멘트에 혼화재가 첨가되었을 경우, 황산염 팽창은 F타입 플라이애시와 슬래그에 의해서 훨씬 많은 감소가 나타나는 것으로 확인되었다. F타입 플라이애시로 20 %를 대체한 1F-1의 경우 180일 팽창률이 0.028 %로 나타났으며, 이는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르에서 나타난 팽창률보다 86 %가 감소한 결과이다. F타입 플라이애시로 30 %를 대체한 1F-2 배합은 팽창률이 77 % 감소하여 180일 팽창률이 0.045 %가 되었으며, 슬래그 배합인 Slag-1은 팽창률이 81 % 감소하여 0.038 %가 되었다.

또한 Type I 시멘트에 C타입 플라이애시를 혼합한 시멘트 모르타르의 상태는 매우 불량했으며, 침수 후 4~8주가 지나자 측정이 불가능한 상태가 되었다.

Figure 9. 180-day sulfate expansions of mortars with GGBF slag

5. 분석 및 고찰

5.1 황산염 저항성에 대한 시멘트 화학성분의 영향

앞서 논의한 바와 같이, 황산염 저항에 영향을 미치는 가장 중요한 포틀랜드 시멘트의 화학성분은 C_3A 의 함량이라 할 수 있다. 본 연구에서는 0~12 % 범위의 C_3A 를 포함하는 네 종류의 시멘트가 사용되었는데, 그림 10은 각각의 모르타르 시편에서 사용된 시멘트의 C_3A 의 함량에 대하여 네 종류의 시멘트 모르타르에서 얻어진 180일 팽창률을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 수평선은 ASTM C1012에서 제시하고 있는 팽창률의 최대 한계 값을 나타내고 있다.

Figure 10. 180-day sulfate expansions of mortars with C_3A amount

0.1 %의 180일 팽창률은 가장 온화한 환경과 보통의 황산염 환경을 구분하는 경계선으로 볼 수 있으며, 0.05 % 팽창률의 경우 보통의 환경과 혹독한 황산염 환경 사이에 위

치한다. 그림 10에서 보이는 수직선은 황산염 저항 시멘트를 분류한 ASTM C150의 시방서에서 규정하고 있는 포틀랜드 시멘트의 C_3A 한계량을 나타내고 있다. 첫 번째 수직선의 경우 5 %의 C_3A 를 나타내는데, 이는 혹독한 황산염 환경에 저항하는 Type V 시멘트의 C_3A 의 최대 허용량을 나타내는 것이다. 두 번째 수직선은 보통의 황산염 환경에 저항하는 1-2종 혼합 또는 2종 시멘트의 C_3A 최대 허용량인 8 %를 나타내고 있다. 시멘트 모르타르를 이용한 본 실험을 통하여 시멘트에 포함되어 있는 C_3A 양이 황산염 저항에 매우 큰 영향을 준다는 사실을 확인할 수 있었다.

그림 10에서 보이는 추세선은 네 개의 실험값을 바탕으로 나타난 것인데, 이는 팽창률에 있어 분명한 증가를 보여주며, 또한 C_3A 양이 증가할수록 황산염 저항성은 감소하고 있음을 보여주고 있다. ASTM C1012의 팽창률을 기준으로 사용하는 네 종류 시멘트에 대한 황산염 저항의 단계와 ASTM C150 기준의 C_3A 한계량을 비교하였을 경우, 네 종류 시멘트의 평가 중 세 종류의 시멘트에서 일치되는 결과를 얻을 수 있었다. Type I 시멘트는 0.199 %의 높은 180일 팽창률과 12 %의 높은 C_3A 함량 때문에 가장 온화한 황산염 환경에서만 사용할 수 있는 것으로 나타났으며, Type V 시멘트의 경우 ASTM C1012 기준과 비교할 때 180일 팽창률이 0.037 %로 낮게 나타났으며, ASTM C150에 따라서 C_3A 가 거의 포함되지 않았기 때문에, 가장 혹독한 황산염 환경에서도 사용할 수 있는 것으로 나타났다. I-II(A) 혼합시멘트는 0.06 %의 180일 팽창률과 5.1 %의 C_3A 함량으로 인하여 보통의 황산염 환경에서 사용이 가능한 것으로 고찰되었다.

그러나 I-II(B) 혼합시멘트는 ASTM C1012 기준의 황산염 저항성 평가와 ASTM C150의 평가가 다르게 나타났다. I-II(B) 혼합시멘트의 경우 7 %의 C_3A 를 포함하고 있는데, 이는 ASTM C150의 시방서의 경우 보통의 황산염 저항 시멘트의 범주 안에 있는 것으로 나타났으나, I-II(B) 혼합시멘트를 사용한 시멘트 모르타르의 180일 팽창률은 0.113 %로 나타났다. 이는 0.1 %를 초과하는 수치이긴 하지만 그 차이는 0.013 %로, 충분히 공학적인 허용오차 범위 내에 있다고 판단된다. 그러나 이 시멘트를 보통의 황산염 환경에서 사용하는 데는 각별한 주의가 필요하다고 볼 수 있다. 본 연구에서 I-II(B) 혼합시멘트와 관계된 실험 결과를 분석한 결과, 시멘트 모르타르의 황산염 저항성 단계를 결정할 때, ASTM C1012에서 제시하고 있는 팽창률

기준이 ASTM C150의 기준에 비하여 좀 더 엄격한 기준을 제시하고 있음을 알 수 있었다.

그림 10의 추세선이 보여주는 2차 방정식은 ASTM C150 기준의 최대 한계 값에 상응하는 180일 팽창률 기준을 계산하는 데에 이용될 수 있다. 추세선 방정식에 따르면, C_3A 의 함량이 5 %이면 보통의 황산염 환경에 사용할 수 있음을 의미한다. 반면에, C_3A 의 함량이 8 %이면 보통의 황산염 환경과 가장 온화한 황산염 환경 사이에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 ASTM C150 시방서에 따라서 보통의 황산염 저항 시멘트로 분류되어지는 7~8 % 사이의 C_3A 함량을 가진 시멘트가 ASTM C1012 기준의 최대 한계 값에 따라서 가장 온화한 황산염 저항 시멘트로 분류될 수 있음을 나타내고 있다.

5.2 황산염 저항에 영향을 미치는 혼화재의 효과

5.2.1 ASTM F타입 플라이애시

본 연구에 사용된 ASTM F타입 플라이애시가 칼슘의 성분을 어느 정도 포함하고 있음에도 불구하고, F타입 플라이애시를 포함하는 시멘트 모르타르에 대한 실험을 통하여 황산염 팽창을 감소시킨다는 사실을 확인 할 수 있었다.

그림 11은 F타입 플라이애시를 사용한 모르타르와 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 180일 황산염 팽창률을 비교하고 있다. F타입 플라이애시를 포함하고 있는 모르타르의 경우 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르에 비해서 황산염 저항에 대한 콘크리트의 성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. F타입 플라이애시를 사용한 모르타르는 180일 팽창률이 0.05 % 이하로 나타났는데, 이는 ASTM C1012의 팽창률 기준에 따라서 혹독한 황산염 환경에서 사용이 가능함을 보여주고 있다.

황산염 팽창에 대한 감소율은 플라이애시가 사용된 시멘트의 종류에 따라서 그 값이 다르게 나타났는데, 시멘트의 C_3A 의 함량이 증가할수록 황산염 팽창이 대폭 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 플라이애시의 함량에 따른 황산염 저항성의 효과는 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 플라이애시를 20 % 대체한 모르타르와 30 % 대체한 모르타르 모두에서 높은 황산염 저항성을 보였다.

Figure 11. 180-day sulfate expansions of F fly ash mortars

5.2.2 ASTM C타입의 플라이애시

ASTM C타입 플라이애시의 경우 높은 칼슘 함량으로 인하여, 황산염 저항성이 오히려 감소하며 콘크리트의 성능이 거의 향상되지 않는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 C타입 플라이애시가 혼합된 모르타르와 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 56일 팽창률을 비교하고 있다. C타입 플라이애시가 혼합된 모르타르 시편들의 경우, 56일이 경과하자 시편들의 상태가 매우 불량해졌기 때문에, 비교를 위해 180일 대신 56일 팽창률을 사용하였다. 그림 12의 결과에 따르면, C타입 플라이애시의 함량이 증가할수록 황산염 저항성은 오히려 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 시멘트의 C_3A 함량이 증가할수록 C타입 플라이애시가 포함된 모르타르의 팽창률도 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 결국, C타입 플라이애시가 포함된 모든 모르타르는 그 상태가 매우 불량하거나, 황산염 팽창률이 높아 황산염 환경에 사용하기에는 적합하지 않은 것으로 판명되었다.

Figure 12. 180-day sulfate expansions of C fly ash mortars

5.2.3 고로슬래그 미분말

본 연구에서는 실험에 사용되는 전형적인 대체비율을 이용하여 50 %의 슬래그를 대체하였는데, 슬래그가 포함된 모든 모르타르는 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르에 비하여 황산염 팽창률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 13은 슬래그를 포함하고 있는 모르타르와 혼화재를 사용하지 않은 시멘트 모르타르의 180일 팽창률을 비교한 것으로, F타입 플라이애시가 포함된 모르타르의 결과와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 시멘트의 C_3A 의 함량이 증가할수록 팽창률이 감소하는 결과가 나타났으며, 슬래그를 포함한 모든 모르타르의 180일 팽창률이 0.05 % 이하로 나타나는 것을 볼 수 있었다. ASTM C1012의 팽창률 기준에 따라서, 슬래그를 포함하는 모든 모르타르는 F타입 플라이애시 모르타르와 같이 혹독한 황산염 환경에 사용될 수 있음이 고찰되었다. 본 실험결과로 시멘트의 50%를 슬래그로 대체할 경우, 칼슘 수산화물이 충분히 소진되며 따라서 황산염 저항성이 향상된다는 사실을 확인할 수 있었다.

Figure 13. 180-day sulfate expansions of GGBF mortars

6. 결 론

본 연구에서는 황산염에 대해 반응하는 C_3A 와 여러 혼화재의 효과를 비교분석하기 위해 황산염 침투에 대한 여러 가지 모르타르의 저항성에 관련된 실험을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 포틀랜드 시멘트의 황산염 저항성 단계를 결정하기 위해 사용된 ASTM C1012 기준의 황산염 팽창의 최대 한계 값과 시멘트의 C_3A 한계량은 ASTM C150에 비하여 좀 더 엄격한 기준임을 확인할 수 있었다. 즉, ASTM C150 기준에 의한 보통의 황산염 환경에 적합한 1-2종 혼합시멘트의 경우 ASTM C1012의 팽창률

기준에 따르면 보통의 황산염 환경에는 각별한 주의가 필요한 것으로 나타났다. 이 실험결과는 공학자들이 보통의 또는 혹독한 황산염 환경에 적합하다고 알려진 7~8%, 혹은 4~5%의 C_3A 함량을 가진 시멘트를 사용할 경우 사용에 있어서 주의가 필요함을 의미한다.

- 2) F타입의 플라이애시를 사용할 경우 황산염 팽창률을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 각각의 모르타르는 혹독한 황산염 환경에 대한 ASTM C1012의 팽창률 기준을 만족하였다.
- 3) C타입 플라이애시를 포함하는 모르타르의 경우, 황산염 팽창률을 크게 증가시키는 만큼, 황산염 환경에서 사용하는데 부적합한 것으로 나타났다.
- 4) 슬래그를 포함하는 모르타르는 황산염 저항성을 향상시켜 주는 것을 확인할 수 있었다. 슬래그는 황산염 팽창률을 감소시키는 만큼 각각의 모르타르는 혹독한 환경에 사용이 가능함을 확인할 수 있었다.

위와 같은 결론을 바탕으로 국내의 극한 환경에서 내구성을 유지할 수 있는 모르타르 배합률의 기준이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

요 약

경화 콘크리트의 물성에 있어서 황산염 저항에 가장 큰 영향을 미치는 두 요소로서 포틀랜드 시멘트의 화학적 성분과 그 양을 들 수 있다.

본 연구에서는 황산염 침투에 대한 영향을 고찰하기 위하여 ASTM C1012의 규정을 바탕으로 여러 종류의 모르타르를 제작하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 황산염 침투에 대한 영향을 평가하기 위해 TYPE I, 두 가지의 TYPE I-II 시멘트와 TYPE V의 시멘트 등 네 가지 모르타르를 사용하여 실험을 수행하였다. 또한 각각의 모르타르 혼합물들에 사용된 무기혼합물의 경우에도 세 가지 종류를 사용하였다. F타입 플라이애시와 C타입 플라이애시, 고로슬래그를 부피비를 기준으로 대체하여 사용하였으며, 실험을 통한 콘크리트의 팽창률을 ASTM 규정의 권장 팽창 기준을 바탕으로 비교·분석하였다.

키워드 : 황산염 침투, C_3A , 무기혼합물, 플라이애시, 고로슬래그

Acknowledgement

This research was supported by the MKE (The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the Convergence-ITRC (Convergence Information Technology Research Center) supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)" (NIPA-2011-C6150-1101-0003) and a grant (code# 2009-0087819, 2010-0019373 and 2011-0010300) from the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government.

References

1. ASTM International, ASTM C1012/C1012M-10 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, American Society for Testing and Materials; 2010
2. Han MC, Effect of Mineral Admixture Types on the Engineering Properties and the Drying Shrinkage of the Concrete, Journal of Korea Institute of Building Construction, 2009 Oct;9(5):121-7.
3. Park MS, Kim YS, A Study on the Sulfate Attack Resistance of Concrete Using EAF Slag as Fine Aggregate, Journal of Korea Institute of Building Construction, 2009 Jan;9(1):81-7.
4. Kim SB, Song HW, Park SG, Park LH, A Study on Properties Engineering of Concrete Using Natural Inorganic Minerals, Proceeding of the Korea Institute of Building Construction; 2005 May: The Korea Institute of Building Construction; 2005. p. 81-4.
5. ASTM International, ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement, American Society for Testing and Materials; 2008.
6. Ismail M., Ali M, El-Miligy A, and Afifi M, Acid resistance of polyester-impregnated modified cement mortar, Journal of Applied Polymer Science, 1999;73(5):685-93
7. Ismail M, and El-Hemaly S, Durability properties of γ -radiation-induced polymer-modified cement mortar. I, Effect of sodium sulfate, Journal of Applied Polymer Science, 1991;42(4):993-1000
8. Pushpa B, Finishing of textile materials, Journal of Applied Polymer Science, 2002;83(3):631-59
9. Bellport BP, Combating sulfate attack on concrete on bureau of reclamation projects, Swenson EG, Editor, Performance of concrete: resistance of concrete to sulphate and other environmental conditions, Toronto (Canada): University of Toronto Press; 1968. p. 77-92.
10. Tikalsky PJ, Carrasquillo RL, The Effect of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, The Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1989 Aug. 306 p.
11. Wang GS, Poole T, Sulfate Resistance of Mortars Using Portland Cement and Blends of Portland Cement and Pozzolan or Slag, Department of Army Technical Report, 1988.
12. ASTM International, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, American Society for Testing and Materials; 2009.
13. ASTM International, ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, American Society for Testing and Materials; 2010.
14. ASTM International, ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand, American Society for Testing and Materials; 2006.