

시멘트 모르타르의 황산염침식 저항성에 대한 SO_4^{2-} 이온 농도의 영향

Influence of SO_4^{2-} Ions Concentration on Sulfate Resistance of Cement Mortars

이승태*

Lee, Seung Tae

Abstract

This paper was conducted to evaluate the durability of cement mortars exposed to varying concentrations of sodium sulfate for up to 540 days. Three types of cement mortars, namely OPC, SRC and SGC, were exposed to four sodium sulfate solutions with concentrations of 4225, 8450, 16900 and 33800 ppm of SO_4^{2-} ions at ambient temperature. The sulfate deterioration was evaluated by measuring compressive strength and linear expansion of mortar specimens. Experimental results indicated that the maximum deterioration was noted in OPC mortar specimens in highly concentrated sulfate solution. In particular, the C_3A content in cements plays a critical role in resisting expansion due to sodium sulfate attack. Additionally, the beneficial effect of GGBS was clearly observed showing a superior resistance against sodium sulfate attack, because of its lower permeability. Another important observation was that the parameters for the evaluation of deterioration degree are greatly dependent on the products formed by sulfate attack.

Keywords : sulfate resistance, mortar, concentration of SO_4^{2-} ions, C_3A content, permeability

요 지

본 연구는 농도조건을 달리한 시험용액에 침지한 모르타르의 내구성을 평가하기 위하여 수행되었다. 3종류 시멘트 모르타르를 제조한 후, SO_4^{2-} 이온의 농도가 4225, 8450, 16900 및 33800 ppm인 4종류 황산나트륨 용액에 540일간 침지하였으며, 침지재령별 압축강도 및 선형팽창을 측정함으로써 모르타르의 황산염침식 저항성을 실험적으로 평가하였다. 실험결과에 의하면, 고농도 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르 공시체가 가장 심한 성능저하 현상을 나타내었다. 특히, 고농도 환경에서 모르타르의 팽창 특성은 사용된 시멘트의 C_3A 량과 직접적인 관련이 있었으며, GGBS를 대체한 SGC 모르타르는 조직구조의 투수성이 상대적으로 낮은 탓으로 인하여 시험용액의 농도조건에 관계없이 우수한 황산염침식 저항성을 나타내었다.

핵심용어 : 황산염침식 저항성, 모르타르, SO_4^{2-} 이온농도, C_3A 량, 투수성

1. 서 론

콘크리트는 건설재료중 경제적이며, 시공성이 우수한 재료이나, 주변 환경에 의하여 성능 및 조직구조가 영향을 크게 받는 특징이 있다. 특히 온도, 습도 등과 같은 기상작용에 의하여 콘크리트의 조직내부에 물리화학적 변화가 수반되며, 콘크리트의 사용성 및 안정성에 문제점이 발생하게 된다. 또, 콘크리트구조물이 염해, 황산염침식, 동해 및 중성화 등의 영향을 받아 성능저하를 일으키는 가혹한 환경에 놓일 경우 내구성이 크게 떨어지는 심각한 문제점이 발생한다(Corr 등, 2003; Sisomphon & Franke, 2007; Soylev 등, 2007). 특히, 지하토양 및 지하수 등과 같이 황산염을 함유한 환경하에 놓인 콘크리트구조물에 발생하는 황산염침식은 철근부식과 더불어 콘크리트의 내구수명에 영향을 미치는 대표적인

내구성 저하 요인으로 알려져 있다.

황산염환경에 콘크리트구조물이 노출되면 콘크리트의 내부 공극을 통하여 황산이온이 침투하여 시멘트 수화생성물과 반응한 후 콘크리트 조직구조에 유해한 반응물질을 생성하게 되며, 결국 생성된 반응물질의 팽창(expansion) 및 연화(softening)작용 등으로 인하여 콘크리트의 성능저하가 발생하게 되거나, 심할 경우 균열발생 및 조직붕괴를 유발한다(Hime & Mather, 1999). 콘크리트의 황산염침식에 대한 저항성을 향상시키기 위한 연구가 1세기 전부터 수행되어 오고 있으나 현재까지도 명확하게 그 메커니즘을 충분히 규명하지 못하고 있을 뿐만 아니라 합리적인 대책도 수립하지 못하고 있는 실정이다.

황산염 환경에 노출된 콘크리트는 주변온도, 황산염의 종류, 시멘트 성분, 배합, 혼화재료 및 황산염의 농도 등 여러

*정회원 · 군산대학교 토목환경공학부 조교수 (E-mail : stlee@kunsan.ac.kr)

지배요인에 의하여 영향을 받게 된다(Akoz 등, 1999; Rasheeduzzafar 등, 1994; Moon & Lee, 2003; Mangat & Khatib, 1995). 특히, 황산염의 농도는 주변온도와 더불어 콘크리트의 황산염침식을 유발하는 반응생성물의 화학반응성을 직접적으로 결정하는 인자이다. 콘크리트의 황산염침식과 SO_4^{2-} 이온 농도 조건과의 관계를 규명하기 위한 노력은 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. 예를 들자면, Al-Dulaijan 등(2003)은 시험용액의 농도조건을 달리한 모르타르의 황산염침식 저항성 실험을 통하여 플라이애시 및 실리카폼의 유용성에 대하여 연구하였으며, Lee 등(2008)은 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식에 대한 SO_4^{2-} 이온 농도의 영향을 조사하기 위하여 결정학적 분석기법을 이용하였다. 뿐만 아니라, Cao 등(1997)은 콘크리트의 황산염침식에 의한 성능저하를 저감시키기 위한 pH의 영향에 대하여 규명하고자 하였다. 이상의 연구 외에도 황산염침식에 의한 콘크리트의 내구성 및 수명을 직간접적으로 예측하기 위한 방법론적 연구가 연구자들에 의하여 수행되어 오고 있으나, 콘크리트의 황산염침식과 관련된 성능저하 예측은 물리적 및 화학적 거동에 대한 해석상의 불확실성으로 인하여 만족스러운 결과를 확보하지 못하고 있다.

현재, 시멘트 경화체의 황산염침식 저항성을 평가하기 위하여 사용되는 촉진시험방법인 ASTM C1012에 따르면 시험용액의 SO_4^{2-} 이온의 농도 및 온도조건을 33,800 ppm 및 23°C로 규정하고 있다. 그러나, 실제로 콘크리트구조물이 위치하는 황산염환경에서 SO_4^{2-} 이온의 농도는 이보다 낮은 경우가 대부분이며, SO_4^{2-} 이온 농도변화에 따른 콘크리트의 성능도 반드시 선형적인 관계가 아니기 때문에 저농도 조건에서 콘크리트의 거동을 확인하는 것이 매우 중요하다(Santhanam 등, 2002).

본 연구에서는 C_3A 량(1.1% 및 9.3%)이 상이한 포틀랜드시멘트 및 고로슬래그미분말을 50% 대체한 시멘트를 사용한 모르타르를 제조하였다. 또, 4단계로 SO_4^{2-} 이온 농도 조건을 조절한 시험용액 중에 모르타르 공시체를 침지한 후, 재령별 압축강도 및 선형팽창 거동을 조사하였으며, 이를 통하여 농도 조건에 따른 모르타르의 역학적 성능저하 거동을 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화재료

사용된 시멘트는 ASTM C150 규준을 만족하는 보통포틀랜드시멘트(OPC) 및 내황산염포틀랜드시멘트(SRC)이며, 고로슬래그미분말(GGBS)을 OPC 중량의 50%로 대체한 고로슬래그시멘트(SGC)를 사용하였다. 사용된 GGBS는 Grade 80의 분말도 4,000급의 저 Al_2O_3 타입을 사용하였다. 본 실험에 사용된 시멘트질 재료의 화학성분 및 물리적 특성은 표 1에 나타내었다. 또, 포틀랜드시멘트의 클링커 조성광물의 양을 나타낸 것이 표 2이다.

2.1.2 잔골재

시멘트 모르타르의 제조를 위하여 ASTM C109의 규준을

표 1. 사용된 시멘트질 재료의 화학성분 및 물리적 특성

Chemical composition, %			
	OPC	SRC	GGBS
SiO ₂	19.9	23.7	36.7
Al ₂ O ₃	5.0	3.0	10.02
Fe ₂ O ₃	2.4	4.0	0.53
CaO	63.8	64.5	38.6
MgO	2.5	3.0	10.51
SO ₃	3.0	2.0	3.59
L.O.I	2.3	0.8	-
Physical properties			
Specific surface area, m ² /kg	410	393	430
Passing 45 μm Mesh, %	90.7	95.3	-
Initial setting time, min.	128	200	-

표 2. 포틀랜드시멘트의 클링커 조성광물(%)

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	62.5	10.1	9.3	7.2
SRC	50.9	29.7	1.1	12.2

표 3. 시험용액의 농도

Symbols	1NS	2NS	4NS	8NS*
Concentration, ppm of SO ₄ ²⁻	4,225	8,450	16,900	33,800

*Reference concentration in accordance with ASTM C1012

만족하는 미국 일리노이주에서 생산된 오타와 표준사를 사용하였다.

2.1.3 시험용액 및 침지조건

고순도 Na₂SO₄ 시약을 담수에 용해시켜 4단계의 농도조건을 가진 시험용액을 제조하였으며, 농도조건은 다음 표 3과 같다. 또, 재령이 증가함에 따라 시험용액의 농도가 묽어지는 점을 고려하여, 첫 1년 동안은 4주, 그 이후로는 3개월마다 새로운 용액으로 교체하여 사용하였다. 압축강도의 비교를 위하여 포화 석회 수용액을 비교용액으로 사용하였다. 본 실험에 사용된 시험용액 및 석회 수용액은 실험기간동안 23±1°C로 유지시켰다.

2.2 배합

ASTM C1012 규준에 따라 결합재(cement+GGBS)와 잔골재의 중량비가 1 : 2.75, 물-결합재비(w/cm)가 0.485인 모르타르를 제조하여 20 MPa 이상의 압축강도가 발현될 때까지 석회 수용액에 양생시킨 후, 일부 모르타르 공시체를 꺼내어 시험용액에 약 540일 동안 침지시켰다.

2.3 시험방법

2.3.1 압축강도

석회 수용액 및 시험용액에 침지한 정방형 모르타르(5 cm)의 재령별 압축강도를 ASTM C109에 준하여 측정하였으며, 압축강도 감소율(CSL: compressive strength loss)은 다음 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$CSL(\%) = \frac{(CS_L - CS_S)}{CS_L} \times 100 \quad (1)$$

여기서, CS_S 는 시험용액에 침지한 모르타르의 압축강도(MPa)이며, CS_L 는 석회 수용액에 양생한 모르타르의 압축강도(MPa)이다.

2.3.2 팽창

각주형 공시체(2.5×2.5×28.5 cm)를 제조하여 20 MPa 이상의 압축강도가 발현된 후, 시험용액에 침지시켜 재령별 팽창량을 ASTM C1012에 준하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 압축강도

3종류 모르타르의 압축강도 발현특성을 표 4에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 초기재령에서는 SGC 모르타르의 압축강도 발현이 비교적 작았으나, 재령 91일에서는 GGBS의 대체로 인한 장기강도 발현으로 인하여 OPC 모르타르에 비하여 큰 압축강도를 나타내었다.

SO_4^{2-} 이온의 농도가 상이한 황산나트륨 용액에 침지한 OPC, SGC 및 SRC 모르타르의 침지재령별 압축강도 경향을 나타낸 것이 각각 그림 1~3이다.

그림 1은 OPC 모르타르의 침지재령별 압축강도를 나타낸 것으로서, 황산나트륨 용액의 농도조건에 따라 압축강도 특성이 상이하게 나타남을 알 수 있다. 다시 말해서, 저농도(1NS) 황산나트륨 용액에 침지한 OPC 모르타르는 침지재령의 증가와 더불어 압축강도가 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 고농도(8NS) 용액에 침지한 모르타르는 침지재령 91일 이후부터 압축강도가 감소하기 시작하였다. 침지재령 540일에서 시험용액 농도별 OPC 모르타르의 압축강도는 각각 56.5 MPa(1NS), 50.6 MPa(2NS), 40.4 MPa(4NS) 및

표 4. 표준양생한 모르타르의 압축강도 발현 (MPa)

Mortar mix	7 d.	28 d.	91 d.
OPC	37.2	42.0	50.6
SGC	27.2	41.4	57.8
SRC	32.4	43.1	52.8

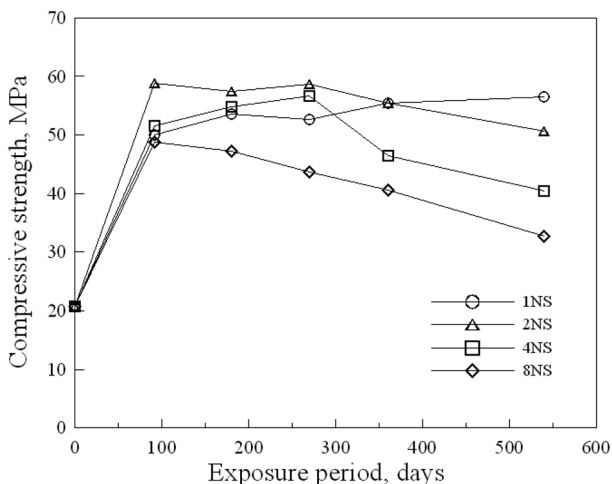


그림 1. 황산나트륨 용액에 침지한 OPC 모르타르의 압축강도

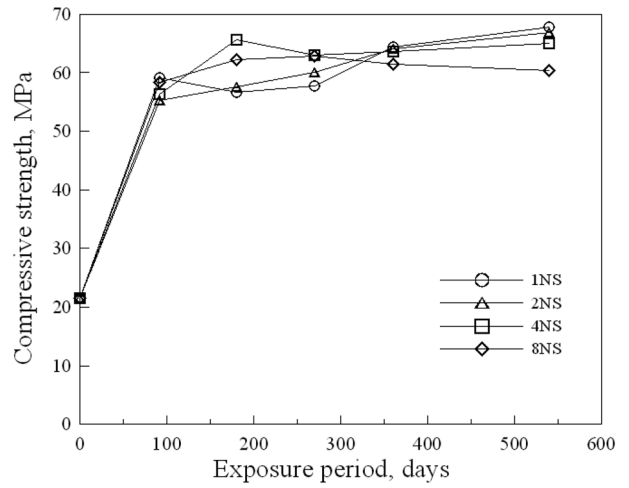


그림 2. 황산나트륨 용액에 침지한 SGC 모르타르의 압축강도

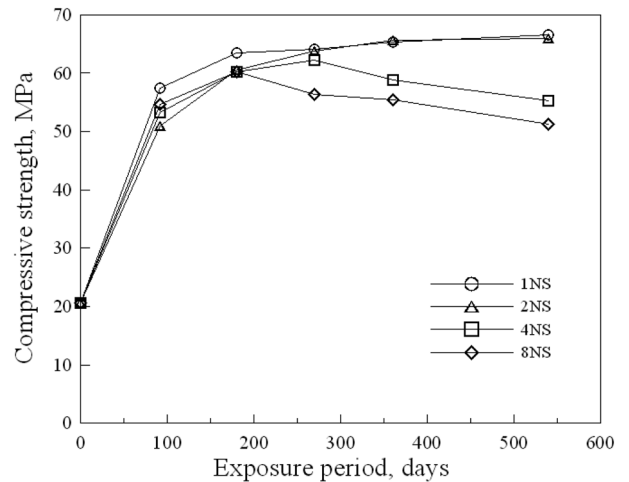


그림 3. 황산나트륨 용액에 침지한 SRC 모르타르의 압축강도

32.7 MPa(8NS)로 나타났다.

한편, SGC 모르타르의 침지재령별 압축강도 특성을 나타낸 것이 그림 2이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 SGC 모르타르는 OPC 모르타르의 압축강도 경향과는 매우 다르게 나타났다. 시험용액의 농도에 관계없이 심한 압축강도 저하는 관찰되지 않았으며, 침지재령 540일에서 SGC 모르타르의 압축강도는 약 60-67 MPa의 범위에서 서로 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림 3은 SO_4^{2-} 이온 농도에 따른 SRC 모르타르의 압축강도 변화를 나타낸 것으로서, 침지재령 270일 이후부터 농도조건에 따른 압축강도의 경향이 뚜렷하게 구별되었다. 다시 말해서, 1NS 및 2NS와 같은 저농도 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르는 침지재령이 증가함에 따라 압축강도가 증가한 반면, 4NS 및 8NS와 같이 고농도 황산나트륨 용액에 침지한 SRC 모르타르는 270일 및 180일 이후부터 압축강도가 감소하기 시작하였으며, 침지재령의 증가와 더불어 강도감소는 더욱 크게 나타날 것으로 생각된다.

황산나트륨 침식을 받은 모르타르의 강도감소에 의한 성능저하 정도를 평가하기 위하여 540일 동안 시험용액에 침지한 모르타르의 압축강도를 lime 수용액에 양생한 모르타르의 압축강도(그림 4)와 비교하였으며, 식 (1)과 같이 계산하여 압축강도 감소율로 나타내었다.

그림 5-8은 1NS, 2NS, 4NS 및 8NS 용액에 침지한 3종

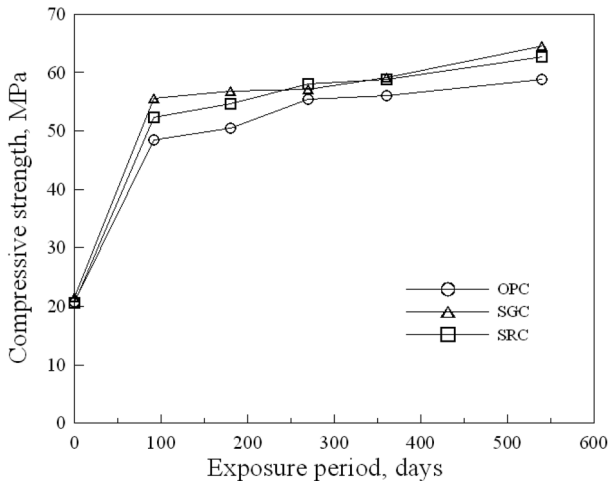


그림 4. Lime 수용액에 양생한 모르타르의 압축강도

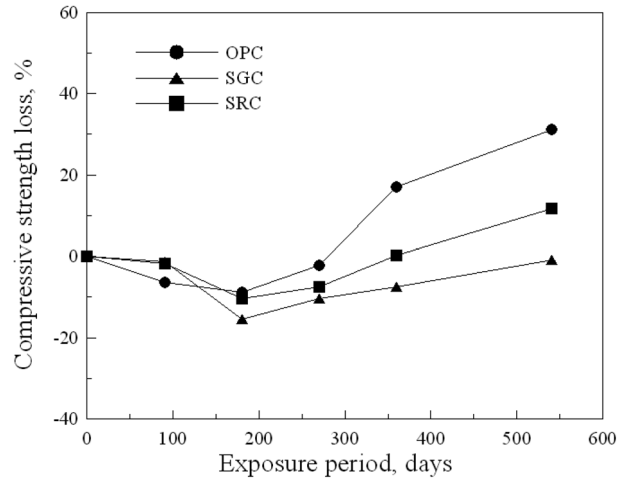


그림 7. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 (4NS)

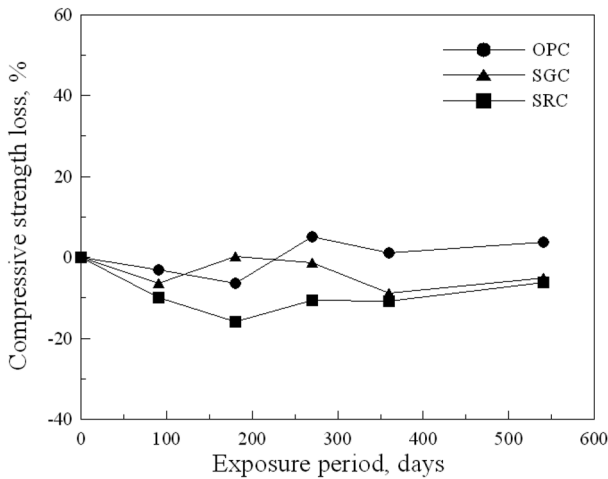


그림 5. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 (1NS)

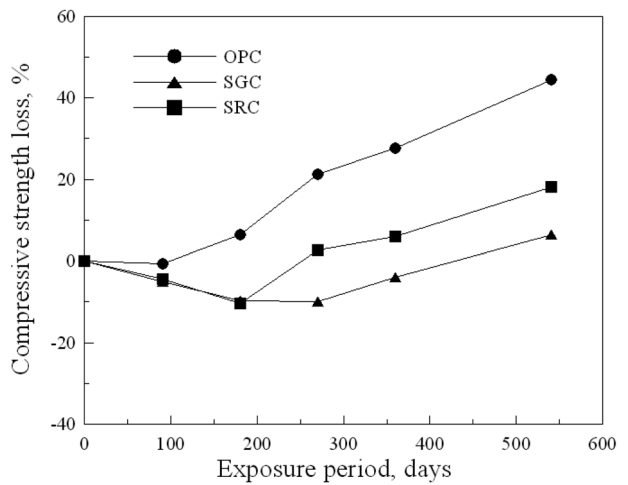


그림 8. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 (8NS)

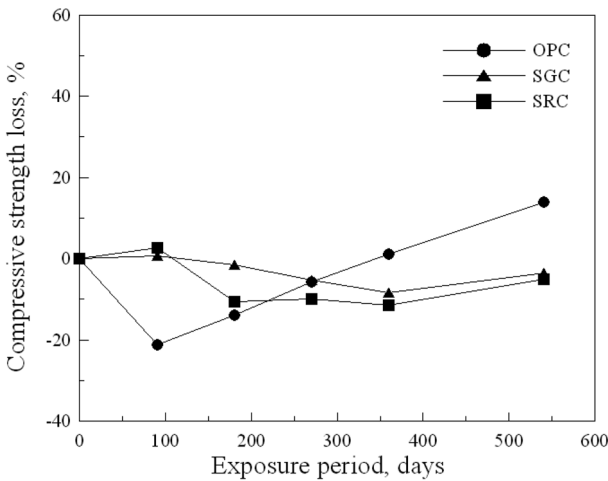


그림 6. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 (2NS)

류 모르타르의 압축강도 감소율을 각각 나타낸 것이다. 그림 5에서와 같이 1NS 시험용액에 침지한 모르타르는 540일 동안의 침식작용에도 불구하고 압축강도 감소율이 4% 이하의 매우 적은 값을 나타내므로써, 황산염침식에 의한 강도감소가 매우 적게 발생하였음을 알 수 있다.

그림 6은 2NS 시험용액에 침지한 3종류 모르타르의 압축강도 감소율을 정리하여 나타낸 것으로써, SGC 및 SRC 모

르타르의 압축강도 감소율이 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 반면, OPC 모르타르는 침지재령 91일부터 선형적으로 압축강도 감소율이 증가하기 시작하였으며, 침지재령 540일에서는 약 14%정도의 압축강도 감소율을 보였다.

4NS 시험용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 경향(그림 7)은 침지재령 180일 이후부터 OPC > SRC > SGC 모르타르의 순으로 나타났으며, 이러한 현상은 그림 8에서 제시된 바와 같이 8NS 시험용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율 경향에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 예를 들어 8NS 시험용액에서 침지재령 540일 후 SGC 모르타르의 압축강도 감소율은 약 6%인 것에 비하여, OPC 및 SRC 모르타르의 압축강도 감소율은 각각 약 44.4% 및 18.2%인 것으로 조사되었다. 요약하자면, OPC 모르타르의 황산염침식에 의한 강도감소는 SO_4^{2-} 이온의 농도에 크게 영향을 받았으며, 고농도 시험용액에 침지한 모르타르가 가장 심한 침식을 받았다. 반면, SGC 모르타르는 OPC 및 SRC 모르타르에 비하여 강도감소가 상대적으로 적게 나타나므로써 황산염침식에 대한 우수한 저항성을 나타내었다.

3.2 선형팽창

황산나트륨 침식을 받은 3종류 모르타르의 팽창특성을 평

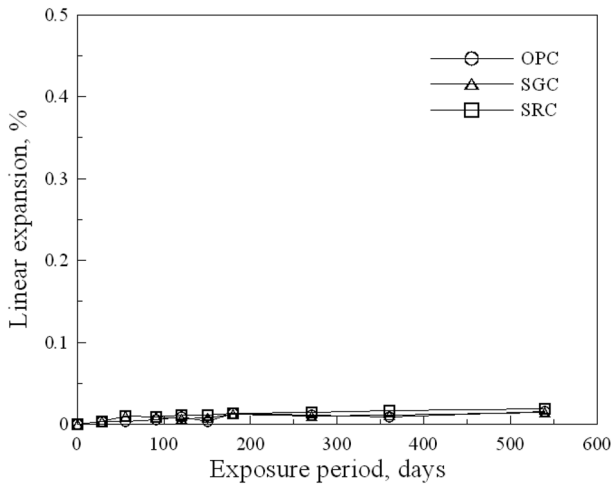


그림 9. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 선형팽창 (1NS)

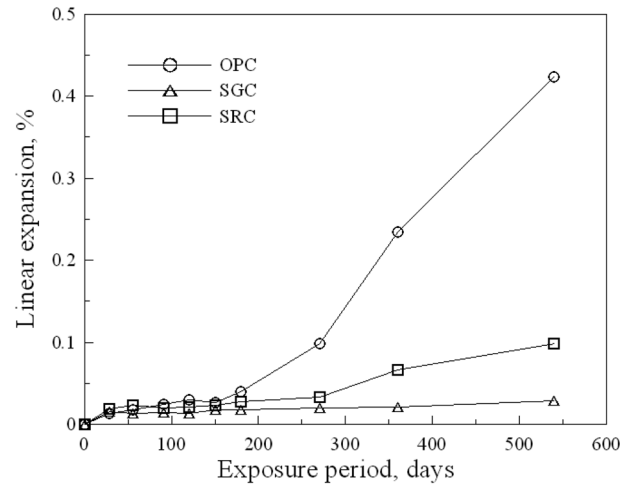


그림 12. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 선형팽창 (8NS)

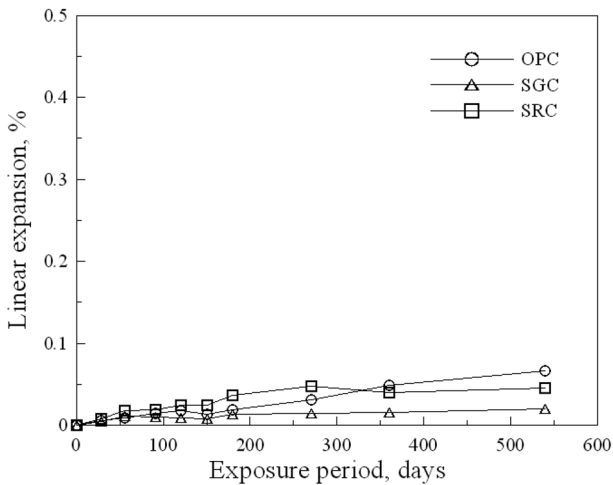


그림 10. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 선형팽창 (2NS)

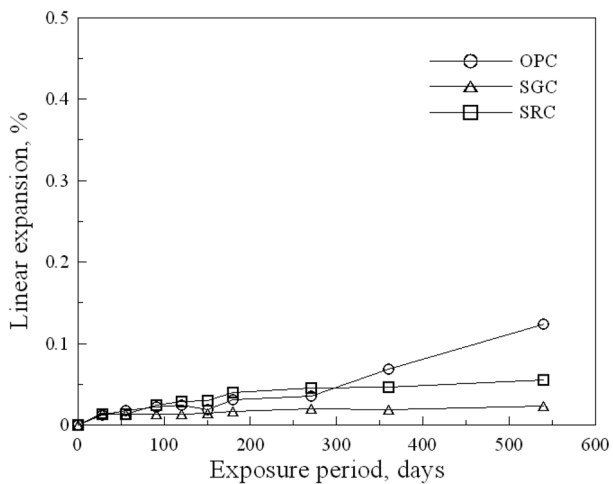


그림 11. 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 선형팽창 (4NS)

가하기 위하여 540일 동안의 침지재령별 팽창량을 ASTM C1012에 준하여 측정하였으며, SO_4^{2-} 이온 농도별 모르타르의 팽창량 측정결과를 각각 그림 9-12에 나타내었다.

그림 9는 1NS 시험용액에 침지한 모르타르의 팽창특성을 나타낸 것으로서, 모르타르 종류에 관계없이 실험기간동안 팽창이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또, 2NS 시험용액에 침지한 경우(그림 10), 3종류 모르타르는 침지재령 540일에서 0.06% 이하의 적은 팽창값을 보였다. 그림 11은

4NS 시험용액에 침지한 모르타르의 선형팽창 경향을 나타낸 것으로서, OPC 모르타르는 침지재령 270일 이후부터 점진적으로 팽창하기 시작하였으며, 침지재령 540일에서 0.124%의 팽창값을 나타내었다. 반면, SGC 및 SRC 모르타르의 팽창은 2NS 용액에 침지한 모르타르의 팽창 결과와 거의 유사하게 나타났다.

그림 12는 고농도(8NS) 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르의 팽창특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, OPC 모르타르는 황산염침식에 의한 반응생성물의 영향으로 인하여 침지재령 180일 이후부터 급격하게 팽창하기 시작하였으며, 침지재령 540일에서 0.423%의 매우 큰 팽창 값을 나타내었다. 한편, SRC 모르타르는 침지재령 270일부터 점진적인 팽창이 발생한 반면, GGBS를 50% 대체한 SGC 모르타르는 SO_4^{2-} 이온 농도 33,800 ppm의 고농도 조건에서도 팽창이 거의 발생하지 않는 우수한 저항성을 나타내었다. 이러한 현상은 Khatri & Sirivivatnanon (1997)의 연구결과와 마찬가지로 GGBS의 사용에 따른 모르타르 조직체의 치밀화가 주원인인 것으로 판단된다.

3.3 SO_4^{2-} 이온 농도와 투수성과 모르타르의 성능저하와의 관계

본 연구에서 모르타르의 황산염침식 저항성 평가를 위한 파라미터로서 압축강도 감소율 및 선형팽창을 선정하여 적용하였으며, SO_4^{2-} 이온 농도와와의 관계를 그림 13 및 14에 나타내었다.

그림 13은 침지재령 540일에서 3종류 모르타르의 압축강도 감소율과 SO_4^{2-} 이온 농도와와의 관계를 나타낸 것으로서, 농도의 증가에 따라 모르타르의 압축강도 감소율이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 농도조건에 따른 압축강도 감소율의 민감도는 SGC 모르타르에 비하여 OPC 및 SRC 모르타르가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그림 14에서 나타난 SO_4^{2-} 이온과 모르타르의 선형팽창과의 관계에서 더욱 명확하게 확인되었다. 특히, OPC 모르타르는 농도 증가에 따른 급격한 팽창이 발생한 반면, SGC 모르타르는 농도조건에 관계없이 팽창이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 이상과 같은 결과가 나타난 이유는 황산염 침식에 의한 성능저하와 관계하는 지배적인 반응생성물이 다르기 때

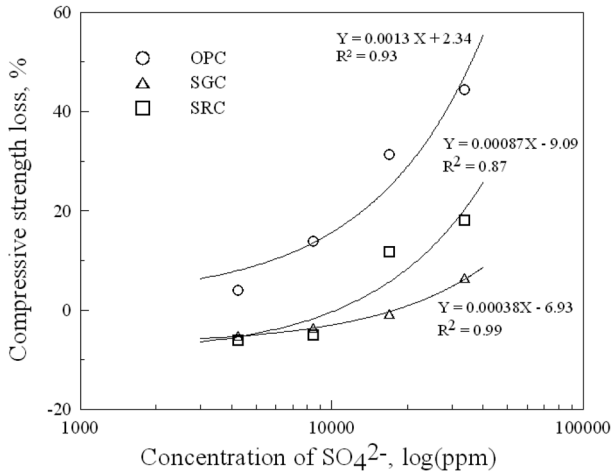


그림 13. SO_4^{2-} 이온 농도와 모르타르의 압축강도 감소율과의 관계 (540일)

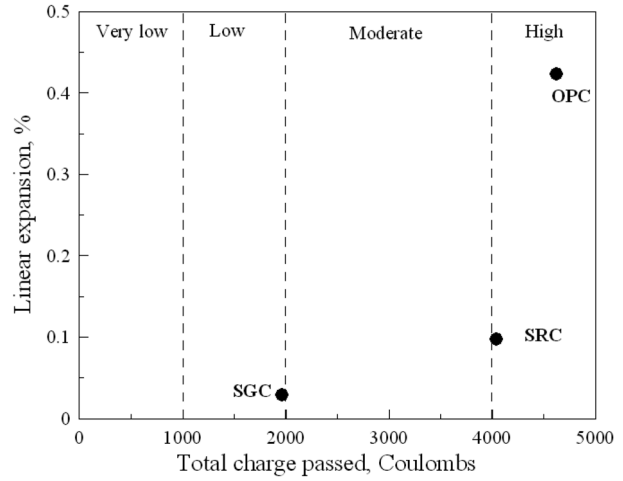


그림 15. 투수성과 모르타르의 선형팽창과의 관계 (540일)

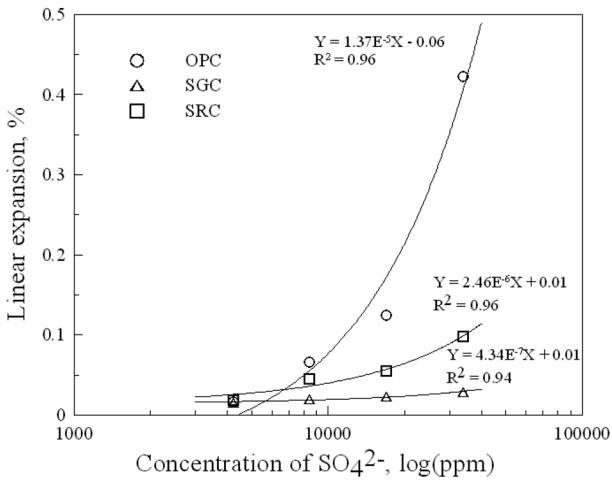


그림 14. SO_4^{2-} 이온 농도와 모르타르의 선형팽창과의 관계 (540일)

문인 것으로 판단된다. 다시 말해서, 황산염침식을 받은 시멘트 경화체의 팽창은 액상(through-solution)효과에 의한 에트링자이트(ettringite : $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)의 생성량에 의존적이며, SGC 모르타르는 GGBS의 사용으로 인하여 모르타르 조직구조가 치밀하게 되어 SO_4^{2-} 이온의 침투가 억제된 탓으로 인하여 상대적으로 팽창성 물질의 생성이 적었다. 그러나, 황산염침식에 의한 강도감소는 에트링자이트의 생성뿐 만 아니라 석고(gypsum : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 및 쏘마자이트(thaumasite : $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$)의 생성과 종합적으로 관련하기 때문에 팽창과는 다소 다르게 동작하게 된다(Irassar 등, 2002; Lee 등, 2006).

또, 모르타르의 투수성과 황산염침식에 의한 성능저하와의 관계를 나타낸 것이 그림 15이다. 모르타르의 투수성은 ASTM C1202의 시험방법에 준하여 실험을 실시하였으며, 황산염 용액에 침지 전 모르타르의 총통과전하량으로 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 투수성이 우수한 SGC 모르타르는 황산염 침식에 의한 성능저하가 현저하게 작게 나타난 반면, 투수성이 높은 OPC 모르타르는 큰 선형팽창량을 보이므로써, 투수성이 낮을수록 황산염침식 저항성은 개선되는 효과를 나타내었으며, 이는 Mangat & Khatib (1995)의 연구결과에서도 유사하게 나타났다. 한편, 유사한

E: ettringite, T: thaumasite, G: gypsum,
P: portlandite, C: calcite

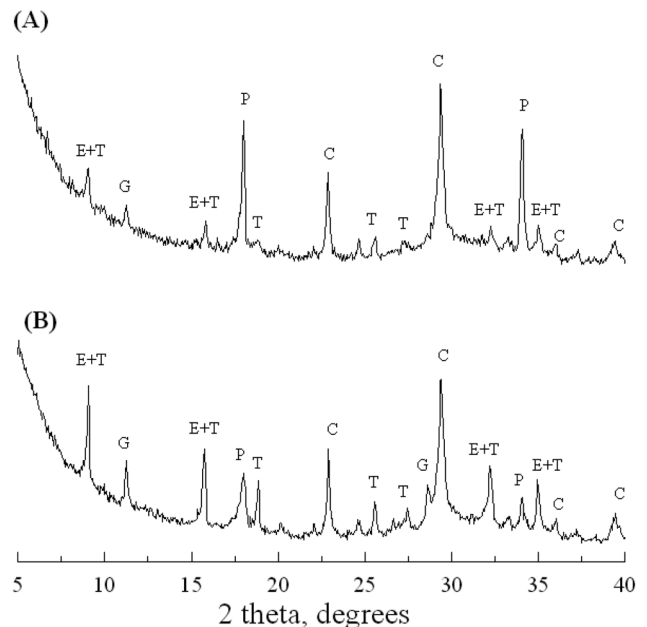


그림 16. OPC 페이스트의 XRD 분석결과: (A) 1NS 시험용액, (B) 8NS 시험용액

정도의 투수성을 가진 OPC 및 SRC 모르타르의 황산염 침식에 의한 성능저하도 차이가 비교적 크게 나타난 것은 사용된 시멘트 중 C_3A 량의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 실험결과에 대한 고찰

미국 기준(ACI Building Code 318, U.S. Bureau of reclamation Concrete Manual) 및 캐나다 기준(Canadian Standard A23.1) 등에 의하면, 콘크리트의 황산염침식에 의한 성능저하 정도는 황산염환경에 존재하는 농도와 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있으며, 토양 및 지하수의 SO_4^{2-} 이온의 농도에 따른 콘크리트 구조물의 노출등급을 규정하고 있다. 또, Lee 등(2005) 및 Santhanam 등(2002)은 황산염침식을 받은 시멘트 경화체의 역학적 성능 및 조직구조는 SO_4^{2-} 이온 농도에 따라 결정된다고 보고하고 있다. 그러나, 연구자들에 의하여 콘크리트의 황산염침식 저항성과 SO_4^{2-} 이온 농도와의

관계를 규명하기 위한 많은 노력에도 불구하고 아직 명확한 성능저하 메커니즘 및 모델식 정립은 이루어지고 있지 않다.

주지하다시피, 현재까지 시멘트 경화체의 황산염침식 저항성과 관련한 표준화된 평가방법은 ASTM C1012와 같이 SO_4^{2-} 이온의 농도가 33,800 ppm인 황산나트륨 용액(본 실험의 8NS)에 침지한 모르타르의 팽창량 측정이 유일한 방법으로 알려져 있다. 그러나, Akoz 등(1999)의 연구결과와 같이 적용된 파라미터에 따라 황산염침식에 의한 시멘트 경화체의 성능저하 평가기법은 달라지게 된다. 이러한 현상은 파라미터가 관계하는 황산염 반응물질(sulfate bearing-products)의 종류 및 생성량에 의하여 성능저하 정도가 결정되기 때문이다. 일반적으로 상온의 조건에서 시멘트 경화체가 황산나트륨 침식을 받을 경우, 저농도 환경(<1,000 ppm SO_4^{2-})에서는 에트링자이트가 주요 반응생성물이며, 고농도 환경(>8000 ppm SO_4^{2-})에서는 에트링자이트 뿐 만 아니라 석고의 생성도 시멘트 경화체의 성능저하를 유발시키는 요인인 것으로 알려져 있다(Biczok, 1967).

그림 5-8에 제시된 압축강도 감소율 결과 및 그림 9-12의 선형팽창 결과로부터 포틀랜드 시멘트계 모르타르의 황산염 침식에 의한 성능저하 정도는 C_3A 량에 비례함을 알 수 있었다. 특히, 고함량 C_3A 시멘트(9.3%)를 사용한 OPC 모르타르는 저함량 C_3A 시멘트(1.1%)의 SRC 모르타르에 비하여 고농도 황산염 환경에서 팽창값이 현저하게 크게 나타나므로써, 사용된 시멘트의 C_3A 량이 모르타르의 팽창정도를 결정하는 주 변수임을 확인하였다. 같은 맥락으로 인하여 SGC 모르타르는 모시멘트(parent cement)가 고함량의 C_3A 량을 가진 OPC일지라도 GGBS의 50% 대체에 따른 조직구조의 투수성(permeability)이 감소한 탓(Osborne, 1999)으로 인하여 선형팽창량은 SO_4^{2-} 이온의 농도조건에 거의 영향을 받지 않은 것으로 확인되었다. 요약하자면, 시멘트 경화체의 황산염 침식 저항성을 향상시키기 위하여 사용된 시멘트의 C_3A 량을 감소시키는 것보다 투수성의 감소가 보다 유효한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 그림 15에서 확인되었으며, Brown & Hooton(2002)의 연구에서도 유사하게 나타났다.

참고로, 그림 16은 1NS 및 8NS 시험용액에 360일 동안 침지한 OPC 페이스트($w/c=0.485$)의 XRD 분석 결과를 나타낸 것으로써, 농도조건에 따른 반응생성물의 피크강도가 매우 상이함을 알 수 있다. 다시 말해서, 1NS 시험용액에 침지한 OPC 페이스트는 황산염 반응생성물의 피크 강도가 상대적으로 작게 나타났으며, 포틀랜드자이트의 피크 강도는 매우 크게 나타났다. 반면, 8NS 시험용액에 침지한 OPC 페이스트는 에트링자이트, 쏘마자이트 및 석고 등 반응생성물의 피크 강도가 매우 크게 검출되었다. 따라서, 그림 8 및 그림 12에 나타난 바와 같이 고농도 황산나트륨 환경에서 OPC 모르타르의 심한 성능저하는 이상의 반응생성물이 지배적으로 작용한 탓으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 황산염환경에 노출된 모르타르의 성능저하에 대한 SO_4^{2-} 이온 농도의 영향을 실험적으로 규명한 것으로

써, 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 저농도 시험용액에 침지한 3종류 모르타르의 압축강도 감소율은 모르타르 종류에 관계없이 비교적 작게 나타나는 경향을 나타내었으며, 고농도 시험용액에 침지한 모르타르의 압축강도 감소율은 OPC > SRC > SGC 모르타르의 순으로 나타났다. 특히, OPC 모르타르의 황산염침식에 의한 강도감소는 SO_4^{2-} 이온의 농도에 크게 영향을 받은 반면, SGC 모르타르는 OPC 모르타르에 비하여 황산염침식에 의한 강도감소가 현저하게 적게 나타났다.
2. 고농도(8NS) 황산나트륨 용액에 침지한 OPC 모르타르는 C_3A 량이 상대적으로 큰 탓으로 황산염침식에 의한 반응생성물의 생성량이 많아 SRC 및 SGC 모르타르에 비하여 매우 큰 팽창 값을 나타내었다. 한편, C_3A 함량이 적은 SRC 모르타르의 경우, 저농도 조건에서는 OPC 모르타르와 유사한 선형팽창 거동을 나타내었으나, 고농도 환경에서는 OPC 모르타르보다 매우 적은 팽창값을 보였다. 한편, GGBS의 사용에 따른 모르타르 조직체의 치밀화로 인하여 SGC 모르타르는 고농도 조건에서도 팽창이 거의 발생하지 않는 우수한 저항성을 나타내었다.
3. 황산염침식을 받은 포틀랜드 시멘트계 모르타르의 팽창은 시멘트 성분 중 C_3A 량과 밀접하게 관련된 에트링자이트의 생성량에 의존적으로 반응하였으나, 황산염침식에 의한 모르타르의 강도감소는 에트링자이트, 석고 및 쏘마자이트의 생성과 종합적으로 관련하기 때문에 팽창과는 다소 다르게 거동하였다.

이상의 촉진 황산염침식 저항성 실험결과를 통하여, 황산염환경에 콘크리트구조물이 노출될 경우 발생하는 성능저하는 SO_4^{2-} 이온의 농도조건에 지배적인 영향을 받기 때문에 황산염환경에 내구적인 콘크리트의 적용을 위하여 구조물이 위치하는 환경에 대한 올바른 이해가 반드시 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2007-313-D00794). 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Akoz, F., Turker, F., Koral, S., and Yuzer, N. (1999) Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 537-544.
- Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameem, M., and Ibrahim, M. (2003) Sulfate resisting of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 4, pp. 429-437.
- Biczok, I. (1967) *Concrete Corrosion Concrete Protection*. Chemical Publishing, New York.
- Brown, P. and Hooton, R.D. (2002) Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 361-370.

- Cao, H.T., Bucea, L., Ray, A., and Yozghatlian, S. (1997) The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 2, pp. 161-171.
- Corr, D.J., Monteiro, P.J.M., and Bastacky, J. (2003) Observations of ice lens formation and frost heave in young Portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 10, pp. 1531-1537.
- Hime, W.G. and Mather, B. (1999) Sulfate Attack, or is it ?. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 789-791.
- Irassar, E.F., Gonzalez, M., and Rahhal, V. (2002) Sulphate resistance of Type V cements with limestone filler and natural pozzolana. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 361-368.
- Khatri, R.P. and Sirivivatnanon, V. (1997) Role of permeability in sulphate attack. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1179-1189.
- Lee, S.T., Hooton, R.D., Kim, S.S., and Kim, E.K. (2006) Effect of fineness of high-alumina ground granulated blastfurnace slag on magnesium sulphate attack. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 58, No. 5, pp. 301-311.
- Lee, S.T., Moon, H.Y., Hooton, R.D., and Kim, J.P. (2005) Effect of solution concentrations and replacement levels of metakaolin on the resistance of mortars exposed to magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 7, pp. 1314-1323.
- Mangat, P.S. and Khatib, J.M. (1995) Influence of fly ash, silica fume, and slag on sulfate resistance of concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 542-552.
- Moon, H.Y. and Lee, S.T. (2003) Influence of silicate ratio and additives on the sulphate resistance of Portland cement. *Advances in Cement Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 91-101.
- Osborne, G.J. (1999) Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No. 1, pp. 11-21.
- Rasheeduzzafar, Al-Amoudi, O.S.B., Abdulfauwad, S., and Maslehuddin, M. (1994) Magnesium-sodium sulfate attack in plain and blended cements. *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 201-222.
- Santhanam, M., Cohe, M.D., and Olek, J. (2002) Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 585-592.
- Sisomphon, K. and Franke, L. (2007) Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 12, pp. 1647-1653.
- Soylev, T.A., McNally, C., and Richardson, M. (2007) Effectiveness of amino alcohol-based surface-applied corrosion inhibitors in chloride-contaminated concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 972-977.

(접수일: 2008.6.4/심사일: 2008.6.29/심사완료일: 2008.7.28)