



황산염침식 방지를 위한 포틀랜드시멘트의 선정 - Part 1 황산나트륨 침식

김종필^{1)*}

¹⁾부천대학 토목공학과

Selection of Portland Cement for Prevention of Sulfate Attack -Part 1 Sodium Sulfate Attack

Jong-Pil Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Bucheon University, Bucheon 420-735, Korea

ABSTRACT This paper presents a detailed experimental study on the sulfate resistance of specimens made with portland cement exposed to sulfate attack. The mortar specimens were immersed in a 5% sodium sulfate solution for 360 days and regularly monitored for visual damage, compressive strength loss and expansion. In addition, at the end of 360 days, the products of sulfate attack and the mechanism of attack were investigated through X-ray diffraction, TG&DSC and scanning electron microscopy. The test results indicated that the sulfate deterioration data was ordinary portland cement > sulfate resistance portland cement > low heat portland cement. The microstructural studies indicated that the main reaction product of deterioration of the mortar specimens was the formation of ettringite, gypsum and thaumasite due to sulfate attack. For portland cement matrices, a low heat cement matrix containing the lowest C₃A and silicate ratio (C/S) was beneficial against the sulfate attack.

Keywords : portland cement, sulfate attack, sodium sulfate, compressive strength loss, reaction product

1. 서 론

콘크리트의 황산염침식은 콘크리트구조물이 해양, 지하 토양, 하수처리장 및 산업현장 등에서 배출되는 오·폐수 등의 유해 환경에 노출될 경우, 유해 이온의 침투 및 화학반응으로 인하여 콘크리트의 제성질 및 미세구조를 변화시키는 현상이다. 이러한 황산염침식을 받는 콘크리트 구조물은 심각한 성능저하를 발생시킬 뿐만 아니라, 나아가 구조체로서의 역할을 상실하게 되는 문제점이 있다.^{1,2)}

이와 같이 콘크리트의 내하력 및 내구수명에 영향을 미치는 황산염침식에 관하여 북미 및 유럽 등과 같은 선진 외국에서는 관련연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 그러나, 선진 외국에서의 장기간 동안 실험실의 재료적 연구와, 현장의 실무적 차원에서 국제적 표준화를 달성하기 위한 많은 연구 활동에도 불구하고 황산염 침식에 의한 성능저하를 평가하는 방법, 항목 등이 각 연구자들 마다 크게 상이하며, 콘크리트의 성능저하 메커니즘도 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 그럼에도, 최근 황산염침식을 받은 콘크리트구조물에 대한 현장조사 및 열적·광물학적 기기분석법을 이용한 연구를 통하여 황

산염침식 메커니즘에 관한 규명뿐만 아니라, 황산염침식에 의한 콘크리트의 성능저하를 감소시키는 방안이 꾸준히 시도되어 오고 있다.³⁻⁷⁾

국내의 경우 현재까지 황산염침식에 의한 콘크리트구조물의 성능저하 요인 분석 및 검토에 대한 체계적인 연구 성과가 미비한 상황이다. 따라서 콘크리트구조물의 성능저하에 따른 적절한 보수·보강공법의 종류가 제한되어 과도한 보수·보강 비용이 지출될 수 있으며 향후 소요될 유지관리 비용까지 고려한다면 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있다.

그러므로 적절한 보수·보강공법의 선정과 유지관리의 체계적인 방안을 확립하기 위해서는 황산염침식에 따른 콘크리트구조물의 명확한 메커니즘의 규명과 아울러 대책 방안의 제시가 필요하다.^{8,9)}

따라서, 이 연구에서는 황산염침식을 방지하기 위하여 포틀랜드시멘트 중의 황산염침식 저항성이 우수한 시멘트를 선정하고자 한다. 황산염 용액에 시험체를 침지한 후 소요의 재령에서 역학적 특성을 평가하였으며, 기기 분석을 통하여 침식 특성을 고찰하였다.

2. 황산나트륨 침식의 반응생성물

콘크리트의 황산나트륨 침식에 의해 생성되는 주요 반응생성물은 Gypsum, 에트링자이트 및 Thaumasite 등이

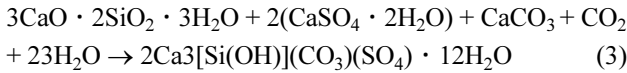
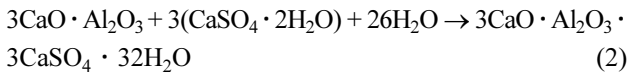
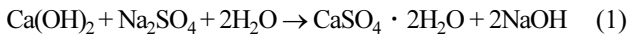
*Corresponding author E-mail : kjp@bc.ac.kr

Received January 14, 2009, Revised February 23, 2009

Accepted March 11, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

있으며, 반응생성물에 의해 콘크리트의 성능저하가 발생하게 된다. 식 (1)~(3)은 주요 반응생성물의 화학반응식을 나타낸 것이다.



수산화칼슘은 식 (1)과 같이 칼슘이온을 용출하고, 용출된 칼슘이온은 황산(SO_4^{2-})이온과 반응하여 Gypsum을 생성하게 되어 시멘트 경화체의 강도손실 및 연화(Softening) 현상을 유발한다.

식 (1)에서 생성된 Gypsum은 칼슘알루미늄에이트수화물 및 Monosulfate와 반응하여 식 (2)와 같이 에트린자이트를 형성하게 된다.

황산나트륨 환경에서는 시멘트 경화체 중의 세공용액이 고 pH 환경인 탓으로 에트린자이트가 안정성이 결여되어 팽창성을 발휘하는 동시에 조직 구조를 다공화시켜, 결국 시멘트 경화체는 조직구조를 붕괴시켜 파괴에 이르게 한다.

위의 식 (3)에 의하면, Thaumacite가 생성되기 위해서는 탄산칼슘 및 이산화탄소가 존재하는 조건에서 칼슘실리케이트수화물이 직접적으로 반응에 참여하게 된다. Gypsum 및 에트린자이트의 생성 조건과는 다르게 칼슘실리케이트수화물이 침식을 받기 때문에 시멘트 경화체의 정도 및 강도저하가 심하게 나타나며, 투수성이 급격히 증가하는 성능저하 형태를 나타내게 된다.

3. 실험 개요

3.1 시멘트

국내에서 생산되는 보통 포틀랜드시멘트(OPC), 저열 포틀랜드시멘트(LHC), 내황산염 포틀랜드시멘트(SRC)를 사용하였으며, 시멘트의 화학조성 및 물리적 특성을 Table 1에 나타내었으며, 포틀랜드시멘트의 화학조성 측정 결과로부터 Bogue식을 이용하여 계산된 시멘트의 조성 광물을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mineralogical compound of cement

	Mineralogical compounds (%)				C/S ratio *
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
OPC	54.9	16.6	10.3	9.1	3.31
LHC	27.3	53.1	3.1	9.7	0.51
SRC	49.2	28.1	3.9	10.6	1.75

* C/S ratio=C₃S/C₂S

3.2 골재

잔골재는 비중 2.60(g/cm³), 흡수율 0.8% 및 조립률 2.30인 강모래를 사용하였다.

3.3 고성능감수제

주성분이 폴리카르본산계인 Malialim A-20을 결합재 중량에 대하여 1.8% 사용하였다.

3.4 경화체의 배합

포틀랜드시멘트의 황산염침식을 평가하기 위한 배합은 물-시멘트(W/C)를 45%로 고정시키고, 시멘트와 모래의 중량비는 1:2로 정하였다. 각각의 시험체는 ASTM C1012¹¹⁾ 기준에 따라 담수에서 압축강도가 20 MPa 이상 발현되는 7일 동안 표준양생을 실시한 후 시험 용액에 침지하여 소요의 재령에서 실험 방법에 따라서 평가하였다. 또한 시멘트페이스트는 잔골재를 제외한 모르타르와 동일한 배합으로 제조하였다.

3.5 시험 용액

시험 용액은 순도 99.5% 특급시약을 사용하여 5% 황산나트륨(Na₂SO₄) 용액을 제조하였으며, 재령이 증가함에 따라 용액이 묽어지는 점을 고려하여 모든 시험 용액은 4주마다 새롭게 제조한 후 교체하여 사용하였다.

4. 실험 방법

4.1 모르타르의 외관조사

시험 용액에 침지한 모르타르의 성능저하 상태를 육안으로 평가하기 위하여 외관 변화를 재령별로 조사하였다. Al-Amoudi¹⁰⁾ 등의 연구에서 제시한 총 6등급으로 분류

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement

	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss	Specific gravity	Specific surface area (m ² /kg)
OPC	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	2.1	1.2	3.15	312
LHC	25.7	3.2	3.2	62.5	2.1	2.1	0.6	3.17	367
SRC	22.7	3.7	3.5	63.1	3.2	1.8	1.6	3.18	328

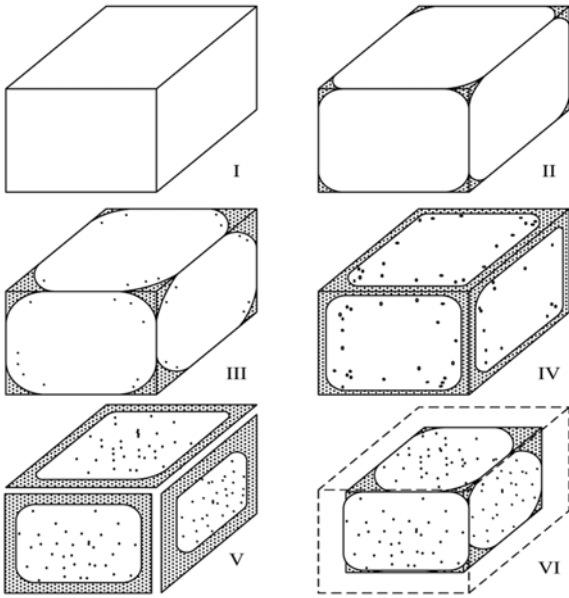


Fig. 1 Deterioration ratings of mortar

된 황산염침식에 의한 열화상태 및 외관등급기준을 Fig. 1에 나타내었으며, 이 그림에 의하여 황산염침식을 받은 모르타르의 외관상태 및 성능저하 정도를 평가하였다.

4.2 모르타르의 강도 감소

담수 및 시험 용액에 침지한 모르타르의 재령별 압축강도를 KS L 5105에 의하여 측정하였다. 한편 모르타르의 황산염침식을 평가하기 위한 척도로 시험 용액에 침지한 모르타르의 압축강도와 담수에 양생한 모르타르의 압축강도를 측정하여 식 (4)와 같이 강도감소율을 산정하였다.

$$\text{강도감소율}(\%) = \frac{C_w - C_s}{C_w} \times 100 \quad (4)$$

여기서,

C_w : 담수에 양생한 모르타르의 압축강도

C_s : 시험 용액에 침지한 모르타르의 압축강도

4.3 모르타르의 길이변화

모르타르의 길이변화는 ASTM C 1012¹¹⁾에 따라 25 × 25 × 285 mm의 모르타르를 제조하여 7일 동안 표준 양생을 실시한 후 시험 용액에 침지시킨 모르타르의 재령별 길이변화를 KS F 2424의 다이얼게이지 방법에 의하여 측정하여 식 (5)로 계산하였다.

$$\Delta L(\%) = \frac{L_t - L_o}{L_o} \times 100 \quad (5)$$

여기서,

ΔL : 길이변화 (%)

L_t : 침지 후 재령별 모르타르의 길이

L_o : 침지 전 모르타르의 길이

4.4 페이스트의 미세구조 분석

4.4.1 X-ray 회절 분석

담수 및 시험 용액의 반응생성물 확인을 위해 채취한 시료를 대상으로 RINT D/max2500(Rigaku)을 이용하여 X-ray 회절분석을 실시하였으며, 이때 측정조건은 CuK α (Ni filter): 30 kV, 20 mA, Scanning Speed: 2°/min., full scale: 15,000cps, 2 θ : 5~40°하였다.

4.4.2 중량 (TG) 및 시차주사열량 (DSC) 분석

시멘트페이스트의 분말시료를 약 25mg 채취한 후 TGA2050 (TA instruments)를 사용하여 TG 및 DSC 분석을 실시하였으며, 이때 측정 조건은 온도상승 20°C/min, 측정온도 100~1,000°C로 하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 외관상태

황산나트륨 용액에 360일 동안 침지한 포틀랜드시멘트 모르타르의 성능저하 현상을 시각적으로 고찰하기 위하여 모르타르의 외관 상태를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림에서 보통 포틀랜드시멘트 모르타르가 상대적으로 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 모서리 및 가장자리 부분에서 균열과 박락 현상으로 인한 비교적 많은 모르타르가 탈락하는 큰 성능저하 현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

또한 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르의 경우는 모서리 부분에서 부분적으로 균열이 발생하여 성능저하 현상이 진행되고 있는 상태임을 관찰할 수 있었으며, 저열 포틀랜드시멘트 모르타르는 균열 등의 성능저하에 따른 외관 변화의 흔적이 관찰되지 않아서 외관 상태가 매우 양호한 상태임을 확인하였다.

또한, Table 3은 Fig. 1에 나타낸 황산염침식에 따른 성능저하 등급에 의하여 모르타르의 표면 손상 정도를 관찰하여 등급으로 평가한 결과이다. 침지 재령 360일에서 모르타르의 성능저하 등급은 시멘트 모르타르의 종류에 따라 각각 IV, 0 및 I 등급의 성능저하가 발생한 상태임을 알 수 있었다.



Fig. 2 Visual appearance of mortar

Table 3 Deterioration ratings of mortar

Immersion period (days)	Deterioration ratings		
	OPC	LHC	SRC
91	I	0	0
180	II	0	0
270	III	0	0
360	IV	0	I

5.2 강도 감소 및 길이 변화

황산나트륨 용액에 360일 동안 침지한 시멘트 조성 광물이 상이한 3종류의 포틀랜드시멘트 모르타르의 강도 감소 및 길이변화 결과를 침지 재령별로 Figs. 3 및 4에 각각 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 보통 포틀랜드시멘트 모르타르는 침지 재령 360일에서 26% 정도의 강도 감소를 나타내었다. 더욱이 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 모든 침지재령에서 보통 포틀랜드시멘트 모르타르의 강도감소가 가장 크게 나타나는 경향을 보였다.

저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르의 강도 감소는 각각 -0.3% 및 5%로 보통 포틀

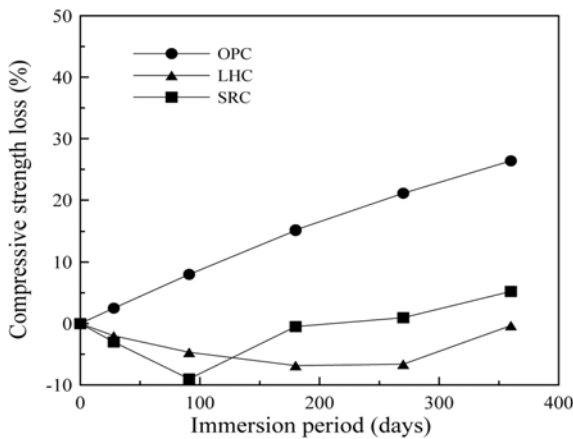


Fig. 3 Compressive strength loss of mortar

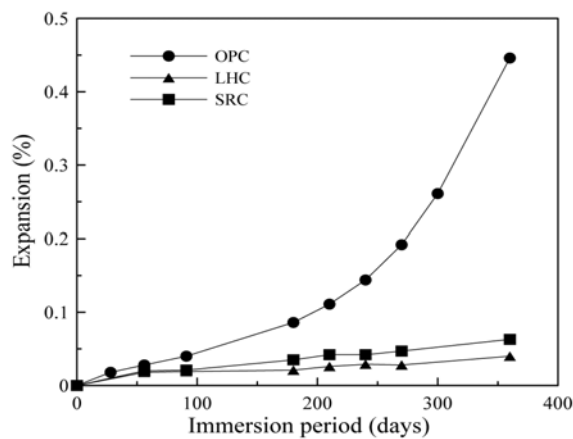


Fig. 4 Expansion of mortar

랜드시멘트에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내어 황산염침식 저항성이 우수한 것으로 판단된다. 저열 포틀랜드시멘트 모르타르는 360일의 침지 재령 동안 음(-)의 값을 나타내는 좋은 경향을 보였으며 이런 결과는 보통 포틀랜드시멘트나 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 시멘트 클링커 조성 광물 중 C₂S량이 많아 장기 강도가 증진된 결과로 사료된다.

3종류 포틀랜드시멘트 모르타르의 침지 재령별 길이 변화를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 보통 포틀랜드시멘트 모르타르는 침지재령 91일 이후부터 길이변화가 급격하게 증가하여 저열 포틀랜드시멘트나 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 큰 팽창률을 나타내었다.

또한, 침지 재령 330일 이후에는 Cohen and Mather³⁾가 제안한 시멘트 모르타르의 한계 팽창률인 0.4%를 초과하였으며 재령 360일에는 0.46%의 팽창률을 나타내었다.

C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 상대적으로 적은 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르의 팽창률은 0.1% 미만으로 보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 팽창률이 매우 작게 나타남을 확인하였다. 더욱이 강도 감소 결과와 유사하게 길이 변화에서도 저열 포틀랜드시멘트 모르타르가 보통 포틀랜드시멘트나 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 가장 우수한 저항성을 나타내었다. 이는 저열 포틀랜드시멘트에 C₂S량이 다량으로 함유되어 장기강도 증진에 따른 조직 구조가 밀실해져 길이 변화가 작게 나타난 것으로 판단된다.

황산나트륨 용액에 침지한 시멘트 조성 광물이 상이한 포틀랜드시멘트 모르타르의 침지 재령 360일에서 강도 감소와 길이 변화의 관계를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 C₃A량이 10.3이고 칼슘실리케이트비가 3.31인 보통 포틀랜드시멘트 모르타르의 강도 감소와 길이 변화가 각각 26% 및 0.446%로 저열 포틀랜드시멘트나 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 가장 크게 나타났다. 반면 C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 적은 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 모르타르는 강도 감소와 길이 변화가 각각

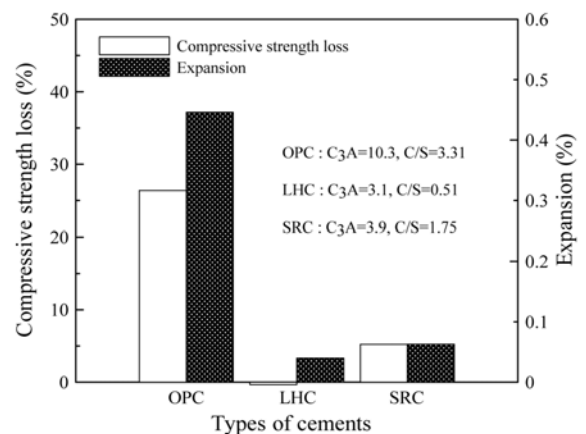


Fig. 5 Compressive strength loss and expansion of mortar

0.05% 및 5% 미만으로 보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 매우 양호한 결과를 나타내었다.

특히, C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 가장 적은 저열 포틀랜드시멘트의 경우는 강도 감소가 음(-)의 값을 나타내어 황산염침식 저항성이 매우 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 작을수록 황산염침식 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

5.3 페이스트의 반응생성물 및 미세구조

5.3.1 X-ray 회절 분석

Fig. 6은 황산나트륨 용액에 360일 동안 침지한 포틀랜드시멘트페이스트의 반응생성물을 알아보기 위하여 X-ray 회절 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

보통 포틀랜드시멘트페이스트의 담수에 침지한 X-ray 회절 분석 결과는 시멘트의 수화반응으로 인하여 Calcite, Primary 에트린자이트 및 Portlandite 회절 피크가 강하게 나타났으며, 황산나트륨 용액에 침지한 페이스트는 Calcite 피크 이외에도 황산염과의 반응으로 인한 강한 Gypsum,

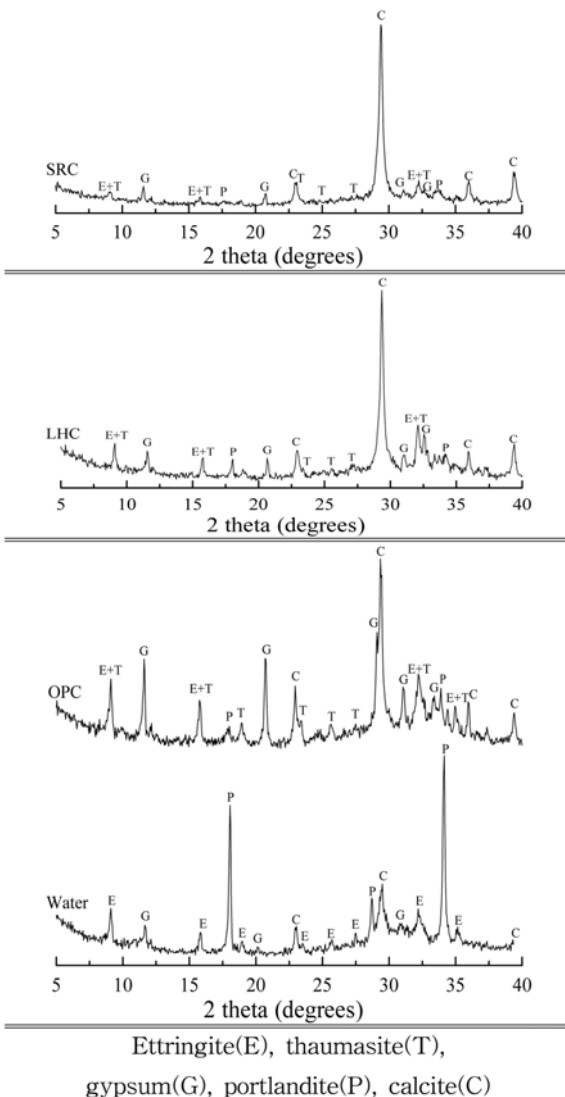


Fig. 6 X-ray patterns of cement paste

에트린자이트 및 Thaumasite 피크가 검출되었다. 뿐만 아니라, Gypsum 및 에트린자이트를 생성하기 위하여 수산화칼슘이 소모된 탓으로 Portlandite의 회절 피크는 비교적 작게 나타났다.

저열 포틀랜드시멘트페이스트의 X-ray 회절 분석 결과 29.4°의 2θ에서 calcite의 강한 피크가 나타났으며, 9.1°의 2θ에서 에트린자이트 및 Thaumasite의 중첩피크와 11.7°의 2θ에서 발생하는 Gypsum의 피크가 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 보통 포틀랜드시멘트페이스트의 X-ray 회절 분석 결과에 비하여 황산염침식으로 생성되는 반응생성물의 회절 피크가 작게 나타나는 것은 성능저하 정도가 작게 발생하는 것을 의미하며, 모르타르의 역학적 성능저하와 유사하게 저열 포틀랜드시멘트에서 반응생성물의 회절 피크가 가장 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 저열 포틀랜드시멘트페이스트의 경우 적은 C₃A 량 및 칼슘실리케이트비로 인하여 수산화칼슘이 작게 생성된 것에 기인한 것으로 판단된다.

한편, 내황산염 포틀랜드시멘트페이스트에 대한 X-ray 회절 분석을 실시한 결과 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 전반적으로 황산염침식 반응생성물의 회절 피크가 작게 나타났다. 이는 시멘트 조성 광물 중 C₃A 량이 적어 에트린자이트의 생성을 감소시킨 탓으로 사료된다. 그러나 저열 포틀랜드시멘트페이스트에서 생성된 반응생성물에 비하여 회절 피크가 다소 크게 생성되어 모르타르의 역학적 성능저하가 다소 크게 발생하였다.

5.3.2 중량(TG) 및 시차주사열량(DSC) 분석

황산나트륨 용액에 360일 동안 침지한 포틀랜드시멘트페이스트의 반응생성물을 확인하기 위하여 성능저하가 발생된 표면부에서 채취한 경화체에 대하여 TG & DSC 분석 결과를 비교하여 나타낸 것이 Figs. 7~9이다. 일반적으로 황산염침식을 받은 시멘트 중의 반응생성물 및 수산화생성물인 Ettringite+Thaumasite, Gypsum 및 Portlandite가 열에 의하여 현저한 흡열반응 및 중량감소가 일어나는 온도를 각각 약 125°C, 145°C 및 460°C 정도로 보고

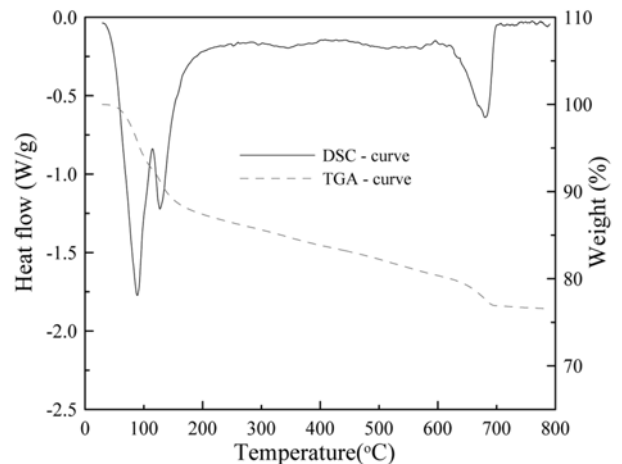


Fig. 7 TG & DSC curve of cement paste (OPC)

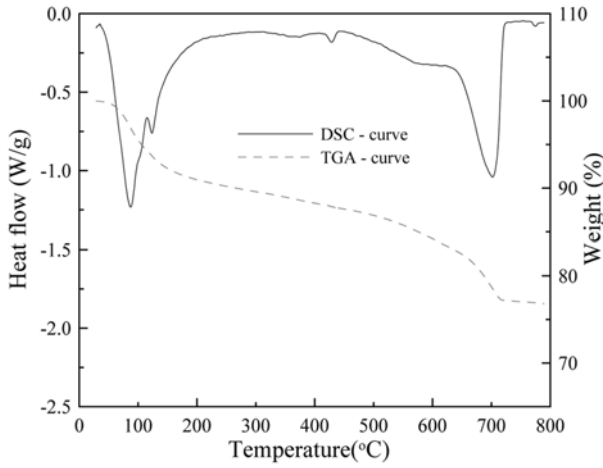


Fig. 8 TG & DSC curve of cement paste (LHC)

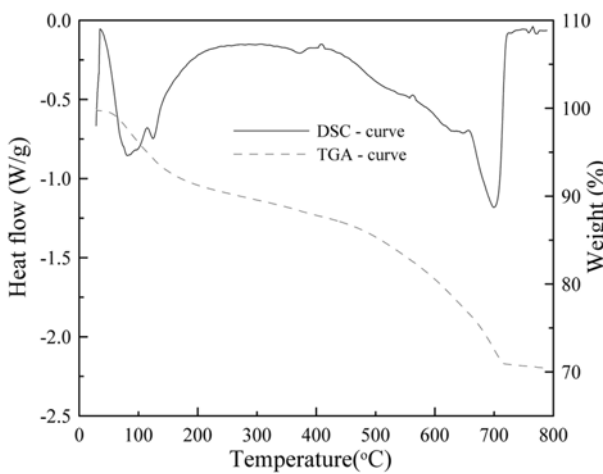


Fig. 9 TG & DSC curve of cement paste (SRC)

하고 있다.¹²⁾ 또한 650°C 부근에서는 Calcite 피크가 발생하게 된다.

Fig. 7은 보통 포틀랜드시멘트페이스트의 TG & DSC 분석 결과로 이 그림에서 460°C 부근에서 흡열반응을 일으키는 Portlandite는 황산이온과 반응하여 Gypsum 및 에트린자이트를 생성시키기 위해 소모된 탓으로 Portlandite 피크가 거의 소멸되어 흡열반응과 중량 변화가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 한편 125°C 부근에서 발생하는 에트린자이트와 Thumasite의 동반 흡열반응은 강하게 발생하였으며, Gypsum에 의한 흡열반응 또한 크게 발생하여 팽창에 의한 성능저하가 발생됨을 알 수 있었다.

Figs. 8 및 9는 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트페이스트의 TG & DSC 분석 결과로서 황산염이온과 반응하여 생성되는 반응생성물인 에트린자이트, Thumasite 및 Gypsum의 흡열반응이 상대적으로 보통 포틀랜드시멘트페이스트에 비하여 약하게 나타났으며, 460°C 부근에서 흡열반응을 발생시키는 Portlandite 피크는 상대적으로 보통 포틀랜드시멘트페이스트에 비하여 다소 크게 발생하여 성능저하가 작게 발생함을 알 수 있었다.

저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트페이

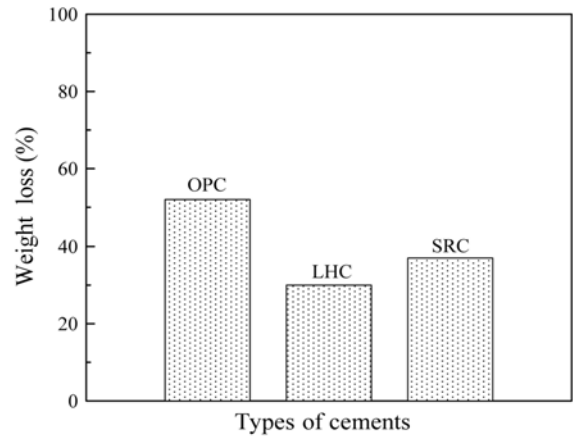


Fig. 10 Weight loss of cement paste

스트의 경우 Gypsum에 의한 흡열반응이 매우 약하므로 125°C 부근의 에트린자이트 피크는 secondary 에트린자이트 보다는 primary 에트린자이트에 의한 피크로 사료된다. 이런 이유는 저열 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트페이스트의 경우는 강도 증진 및 미세 조직 구조가 치밀해져 황산염침식에 의한 반응생성물의 생성이 감소되어 황산염 이온에 의한 성능저하가 작게 발생되었다.

한편, 시멘트페이스트의 성능저하 부분의 X-ray 회절 분석과 DSC 분석 결과에서 확인된 반응생성물에 대한 열중량 변화를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 10이다. 황산나트륨 용액에 침지한 경우는 에트린자이트, Thumasite 및 Gypsum의 흡열반응 온도 145°C까지의 열중량 변화 결과이다.

황산나트륨 용액의 경우 보통 포틀랜드시멘트 및 내황산염 포틀랜드시멘트 경화체의 열중량 변화는 각각 52% 및 39%로 나타났다. 반면 저열 포틀랜드시멘트 경화체의 열중량 변화는 30% 정도로서 반응생성물을 가장 작게 생성시킨 것으로 확인되었다.

6. 결 론

황산염침식을 방지하기 위하여 포틀랜드시멘트 중의 황산염침식 저항성이 우수한 시멘트를 선정하기 위하여 모르타르의 역학적 특성 및 기기분석을 통하여 침식 특성을 평가한 결과, 외관 조사, 강도 감소 및 길이 변화에 따른 성능저하 순서는 보통 포틀랜드시멘트>내황산염 포틀랜드시멘트>저열 포틀랜드시멘트 순으로 나타났다. 저열 포틀랜드시멘트의 경우 장기강도가 증진되는 C₂S가 다량으로 함유되어 조직구조가 밀실해졌으며, C₃A량이 적어 에트린자이트 등 반응생성물의 생성을 감소시킨 것에 기인한 효과로 강도감소 및 길이변화가 작게 나타나는 것으로 확인되었다.

한편, 시험 용액에 침지한 포틀랜드시멘트페이스트의 주요 반응생성물은 Calcite 피크 이외에도 황산염과의 반응으로 인한 Gypsum, 에트린자이트 및 Thumasite로 확

인되었다.

포틀랜드시멘트의 경우 시멘트의 조성광물 비에 따라 성능저하 형태가 상이하며, 특히, C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 가장 적은 저열 포틀랜드시멘트가 황산염침식 저항성에 매우 우수한 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. 이승태, 김성수, 김종필, “콘크리트의 황산염침식 및 평가 기준,” 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 911~914.
2. 문한영, 김홍삼, 이승태, “해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하 원인 규명,” 대한토목학회논문집, 22권, 1호, 2002, pp. 171~180.
3. Cohen, M. D. and Mather, B., “Sulfate Attack on Concrete Research Needs,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, 1991, pp. 62~69.
4. 김종필, “황산염침식을 받는 시멘트 경화체의 성능향상을 위한 연구,” 한양대학교 박사학위논문, 2005, 165 pp.
5. Moon, H. Y., Lee, S. T., and Kim, J. P., “Experimental Approach on Sulfate Attack Mechanism of Ordinary Portland Cement Matrix: Part I. Sodium Sulfate Attack,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, 2004, pp. 557~564.
6. Marchand, J. and Skalny, J., “Materials Science of Concrete : Sulfate Attack Mechanisms,” The American Ceramic Society, 1998, pp. 99~173.
7. Neville, A. M., “The Confused World of Sulfate Attack on Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1275~1296.
8. 김도겸, 김성수, 이승태, 김종필, “화학적 침식을 고려한 콘크리트구조물의 내구성 증진 방안,” 콘크리트학회지, 18권, 4호, 2006, pp. 49~56.
9. ACI Building Code 318, “Requirement for Structural Concrete and Commentary,” American Concrete Institute, 2003, pp. 37~38.
10. Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., and Saadi, M. M., “Effect of Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements,” *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 1, 1995, pp. 15~24.
11. ASTM C 1012, “Test for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to Sulfate Solution,” 1995.
12. Sha, W., O'Neill, E. A., and Guo, Z., “Differential Scanning Calorimetry Study of Ordinary Portland Cement,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1487~1489.

요 약 황산염침식을 방지하기 위하여 포틀랜드시멘트 중의 황산염침식 저항성이 우수한 시멘트를 선정하기 위한 연구의 일환으로 황산나트륨 용액에 360일간 침지한 후 모르타르의 역학적 특성 및 기기분석을 통하여 침식 특성을 평가한 결과, 외관조사, 강도감소 및 길이변화에 따른 성능저하 순서는 보통 포틀랜드시멘트 > 내황산염 포틀랜드시멘트 > 저열 포틀랜드시멘트 순으로 나타났다. 포틀랜드시멘트의 주요 반응생성물은 Calcite 피크 이외에도 황산염과의 반응으로 인한 Gypsum, 에트린자이트 및 Thaumasite로 확인되었다. 포틀랜드시멘트의 경우 시멘트의 조성광물 비에 따라 성능저하 형태가 상이하게 나타났다. 특히, C₃A 량과 칼슘실리케이트비가 가장 적은 저열 포틀랜드시멘트가 황산염침식 저항성에 매우 우수한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 포틀랜드시멘트, 황산염침식, 황산나트륨, 강도감소, 반응생성물