

# 황산마그네슘 침식을 받은 실리카 폼 혼합 시멘트 경화체의 성능저하에 대한 미세구조적 관찰

Microstructural Investigation on the Deterioration of  
Silica Fume Blended Cement Matrix Under Magnesium Sulfate Attack

이 승 태\*

Lee, Seung-Tae

## Abstract

This paper reports the effect of replacement levels of silica fume on the resistance to magnesium sulfate attack. Mortar specimens incorporating silica fume were exposed to 5% magnesium sulfate solution for 360 days at ambient temperature. The main variable was the replacement levels of silica fume(0, 5, 10 and 15% of cement by mass). The resistance of mortar specimens incorporating silica fume against magnesium sulfate attack was regularly monitored by measuring compressive strength and expansion. In addition, in order to investigate the reactants formed by magnesium sulfate attack, various instrumental analyses such as XRD, SEM and DSC were used. Results demonstrated that the formation of gypsum, thaumasite and brucite led to a significant deterioration due to magnesium sulfate attack in cement matrix incorporating silica fume.

## 요 지

본 연구는 실리카 폼의 대체율을 4단계(시멘트 중량의 0, 5, 10 및 15%)로 달리하여 제조한 시멘트 모르타르의 황산마그네슘 침식 저항성을 평가하며, 침식에 의한 성능저하 원인을 조사하기 위하여 수행되었다. 실리카 폼 혼합 모르타르를 5% 황산마그네슘 용액에 360일 동안 침지한 후, 재령별 압축강도 및 팽창을 측정하였으며, XRD, SEM 및 DSC와 같은 여러 기기분석법을 활용하여 침식에 의한 시멘트 경화체의 성능저하 원인을 고찰하였다. 실험 결과에 의하면, 실리카 폼을 혼합한 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식은 주로 gypsum, thaumasite 및 brucite 등의 반응생성물과 깊은 관련이 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Magnesium sulfate attack, Silica fume, Instrumental analyses, Reactants

**핵심 용어 :** 황산마그네슘 침식, 실리카 폼, 기기분석, 반응생성물

\* 정회원, 군산대학교 토목환경공학부 조교수

E-mail : stlee@kunsan.ac.kr 063-469-4877

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

실리카 폼은 전기아크로(electric arc furnace)에서 실리콘, 페로실리콘 또는 실리콘 합금을 생산하는 과정에서 폐가스 중에 포함되어 있는 SiO<sub>2</sub>를 집진기로 모은 초미립자 물질이며, 고성능감수제의 발달과 더불어 콘크리트용 혼화재료로써 그 사용범위가 점점 더 확대되어 가고 있는 추세이다.

특히, 최근 콘크리트구조물의 장대화, 고층화 등과 같이 특수한 목적을 달성하기 위하여 콘크리트의 고기능성이 요구되는 시점에서 전세계적으로 실리카 폼의 적용성에 대한 관심이 고조되고 있으며, 우리나라의 경우도 산업체에서 요구하는 고성능/고강도 콘크리트의 기준을 만족하기 위하여 실리카 폼의 사용이 적극 검토되고 있으며, 사용실적도 증가하고 있는 실정이다.

1950년 이래 유럽, 북미 등 선진외국에서는 일찍이 실리카 폼을 사용한 콘크리트의 강도특성, 유동성 및 내구성 등에 대한 연구를 국가적인 차원에서 수행해 오고 있으며, 만족할 만한 연구성과도 많이 발표되고 있다. 특히, 실리카 폼을 사용한 콘크리트는 염소이온의 확산특성, 철근부식, 탄산화 및 동해저항성 등과 같은 내구성능에서 우수한 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)(10)(12)</sup> 그러나, 콘크리트의 내구성 중 황산염침식, 특히 황산마그네슘 침식에 대한 연구는 상대적으로 많지 않으며, 표준화된 평가방법도 아직 마련되고 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 콘크리트의 내구성 평가의 일환으로써 실리카 폼을 사용한 모르타르의 황산마그네슘침식 저항성 실험을 실시하였으며, 모르타르의 성능저하에 대한 실리카 폼의 유효성을 각종 기기분석법을 활용하여 미세구조적으로 고찰하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 이용하여 향후 황산마그네슘 환경하에 건설되는 실리카 폼 혼합 콘크리트구조물의 내구성문제 해결을 위한 기초적 데이터를 제시하고자 한다.

## 2. 황산마그네슘 침식에 의한 성능저하기구

콘크리트구조물이 해수, 지하수, 오폐수 및 산성토

양 등에 존재하는 황산염과 접하게 될 경우, 황산염이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 콘크리트 중의 수화물과 반응하여 여러 유해물질을 생성하게 되며, 이러한 반응생성물의 반응속도 및 생성량에 따라 콘크리트구조물의 내구성이 저하되며, 내구수명에도 영향을 미치게 된다.<sup>(11)</sup>

황산염이온은 결합하는 양이온(cation)의 종류에 따라 침식정도는 달라지게 되며,<sup>(2)(8)</sup> 일반적으로 황산염 이온에 의한 콘크리트의 성능저하는 다음 식(1), (2) 및 (3)과 같이 주로 brucite, gypsum, M-S-H 및 thaumasite 등과 같은 반응생성물의 작용에 기인하게 된다.

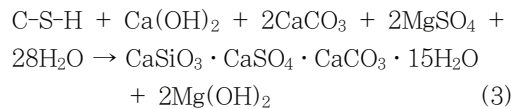
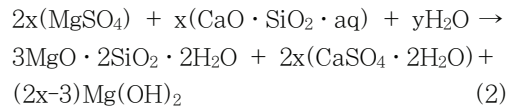
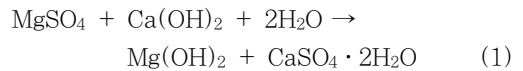


Fig. 1은 황산마그네슘 침식을 받은 시멘트 경화체의 성능저하 메커니즘을 개략적으로 도식화한 것이다.

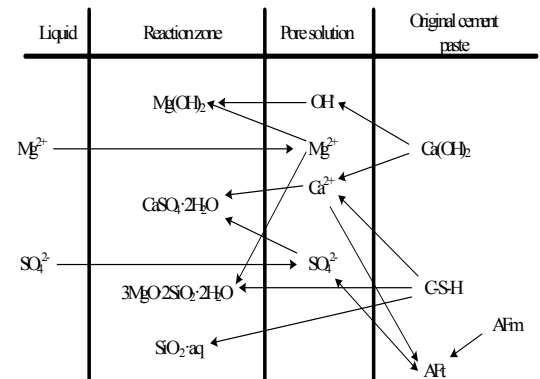


Fig. 1 황산마그네슘 침식에 의한 시멘트 경화체의 성능저하 메커니즘

### 3. 실험개요

#### 3.1 사용재료

##### 3.1.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 ASTM C150<sup>(4)</sup>의 Type I 시멘트에 준하는 보통포틀랜드시멘트(OPC)이며, 시멘트의 화학성분, 클링커 조성광물 및 물리적 성질은 각각 Table 1과 같다.

##### 3.1.2 실리카 폼

본 실험에 사용된 고미분말 실리카 폼(SF)은 노르웨이 Elkem사의 제품이며, SF의 화학성분 및 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 또한, 본 실험에 사용한 SF의 대체율은 시멘트 중량에 대하여 각각 0, 5, 10 및 15%의 4단계로 나누어 모르타르를 제조하였으며, 각각 SF-0, SF-5, SF-10 및 SF-15 모르타르로 명명하였다. 또한, 시멘트 페이스트는 SF의 대체율을 시멘트 중량의 0 및 10%로 선정하여 사용하였다.

##### 3.1.3 잔골재

비중 2.60, 흡수율 0.80% 및 조립률 2.80인 강모래를 사용하였다.

Table 1 시멘트 및 실리카 폼의 화학성분, 클링커 조성광물 및 물리적 성질

화학성분	OPC	SF
SiO <sub>2</sub> , %	20.2	91.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	5.8	1.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	3.0	0.8
CaO, %	63.3	0.7
MgO, %	3.4	0.3
SO <sub>3</sub> , %	2.1	-
L.O.I, %	1.2	2.3
클링커 조성광물		
C <sub>3</sub> S, %	54.9	-
C <sub>2</sub> S, %	16.6	-
C <sub>3</sub> A, %	10.3	-
C <sub>4</sub> AF, %	9.1	-
물리적 특성		
Specific gravity	3.15	2.2
Fineness, m <sup>2</sup> /kg	312	20.470

##### 3.1.4. 고성능감수제

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

##### 3.1.5 시험용액

시험용액은 Regent급 황산마그네슘 시약을 담수에 용해시켜 ASTM C 1012에 준하여 약 5%의 농도로 조절하여 제조하였다. 또한, 재령이 증가함에 따라 농도가 묽어지는 점을 고려하여 4주마다 새로운 용액으로 교체하여 사용하였다.

#### 3.2 모르타르 및 페이스트의 배합

결합재(OPC+SF)와 잔골재의 중량비를 1:2, 물-결합재비(w/cm)가 0.45인 모르타르를 제조하여 담수에서 1주일동안 표준양생을 실시한 후, 시험용액과 담수에 360일 동안 침지하였다. 또, 시차주사열량 분석을 위한 페이스트 시편도 w/cm가 0.45가 되도록 제조하였다.

#### 3.3 실험방법

##### 3.3.1 압축강도

담수 및 5% 황산마그네슘용액에 침지한 5mm 큐빅 모르타르의 압축강도를 ASTM C109<sup>(3)</sup>에 의하여 측정하였으며, 압축강도비는 식(3)과 같이 계산하였다.

$$\text{압축강도비} = \frac{S_M}{S_W} \quad (3)$$

여기서,  $S_M$ 는 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 압축강도(MPa)이며,  $S_W$ 는 담수에 양생한 모르타르의 압축강도(MPa)이다.

##### 3.3.2 팽창

2.5×2.5×28.5cm의 모르타르 공시체를 제조하여 1주일 동안 표준양생한 후, 황산마그네슘용액에 침지시킨 모르타르의 재령별 팽창량을 ASTM C1012<sup>(5)</sup>에 의하여 측정하였다.

3.3.3. X선 회절(XRD: x-ray diffraction) 분석  
 실험용액에 침지한 모르타르 중에 생성된 반응생성물을 판정하기 위하여 XRD분석을 실시하였다. 이 때 측정 조건은 CuK $\alpha$ (Ni filter) : 30kV, 20mA, Scanning Speed : 2°/min, 2 $\theta$  : 5~40°로 정하였다.

### 3.3.4 주사형전자현미경(SEM: scanning electron microscopy) 분석

황산마그네슘 침식을 받은 모르타르의 조직구조를 관찰하기 위하여 XL30ESEM(Philips)을 이용하여 시편의 표면부분에 대한 확대촬영을 실시하였으며, 분산형 분광기를 설치하여 관찰하고자 하는 상이 어떤 원소로 구성되어 있는지를 조사하기 위해 EDAX Falcon Energy System 60SEM을 사용하여 측정하였다.

### 3.3.5 시차주사열량(DSC: differential scanning calorimetry) 분석

DSC 2010 TA International을 이용하여 시멘트 페이스트 분말에 대하여 시차주사열량 분석을 실시하였으며, 측정온도는 상온~600°C로 하였으며, 온도상승 속도는 10°C/min.로 하였다.

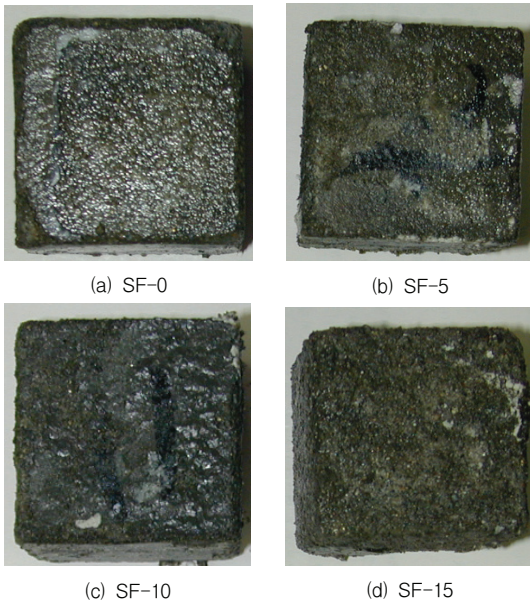


Fig. 2 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 성능저하(360일)

## 4. 실험결과

### 4.1 역학적 성능저하

#### 4.1.1 실리카 폼 혼합 모르타르의 표면 성능저하

일반적으로 시멘트 경화체가 외부의 유해이온에 의하여 침식을 받을 경우 경화체의 끝단(corner)에서 성능저하 현상이 발생하며, 다음으로 모서리(edge) 및 면(face)의 순으로 침식현상이 발생하게 된다.<sup>(11)</sup> Fig. 2는 5% 황산마그네슘용액에 360일 동안 침지한 4 종류 모르타르의 표면 성능저하를 비교하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 실리카 폼을 혼합하지 않은 SF-0 모르타르의 경우, 황산마그네슘 침식으로 인하여 모르타르의 끝단 및 모서리부분이 약간 탈락하는 성능저하 현상이 발생하였다. 한편, 실리카 폼을 대체한 모르타르(SF-5, SF-10 및 SF-15)는 공시체의 면부분에서도 탈락현상(peeling-off)이 비교적 심하게 나타났으며, 실리카 폼 대체율이 증가할수록 단면감소가 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

#### 4.1.2 압축강도

담수 및 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르 공시체의 재령별 압축강도를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 3 및 4 이다. 여기서 침지재령 0일은 모르타르의 전양생기간(pre-curing period) 7일 후를 의미한다.

Fig. 3은 담수에 양생한 실리카 폼 대체율별 모르타르의 압축강도( $S_w$ ) 발현특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 실리카 폼을 혼합한 모르타르가 실리카 폼을 혼합하지 않은 모르타르(SF-0)에 비하여 압축강도 발현이 우수한 것으로 나타났다. 특히, 실리카 폼 15%를 대체한 모르타르(SF-15)는 장기재령에서 비교적 압축강도 발현이 크게 나타남을 알 수 있다.

한편, 황산마그네슘 침식에 의한 모르타르의 강도특성을 고찰하기 위하여, 360일동안 5% 황산마그네슘용액에 침지한 후 모르타르의 재령별 압축강도( $S_M$ )를 나타낸 것이 Fig. 4로써, 실리카 폼 대체율에 따라 다소 상이한 압축강도 경향이 나타났다. 그러나, 공통적으로 모르타르 종류에 관계없이 침지재령 91일 이후

부터 압축강도가 감소하기 시작하였으며, 침지재령 360일에서 SF-0 및 SF-10모르타르는 침지전 압축강도보다도 오히려 작은 값을 보였다. 실리카 폼 사용 모르타르의 황산마그네슘 침식에 의한 강도감소 현상이 심화되었음을 확인할 수 있다.

압축강도비( $S_M/S_W$ )로써 황산마그네슘 침식에 의한 모르타르의 성능저하 정도를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 초기재령에서는 실리카 폼을 혼합하지 않은 SF-0모르타르의 압축강도비가 1.0 이상의 값을 나타낸 반면, 실리카 폼을 혼합한 모르타르(SF-5, SF-10 및 SF-15)는 초기재령에서도 압축강도비가 1.0 이하의 값을 나타내었다. 침지재령 28일 이후부

터 재령의 증가와 함께 모르타르의 압축강도비는 감소하기 시작하였으며, 실리카 폼 대체율에 따라 감소경향이 비교적 뚜렷하게 나타났다. 특히, 침지재령 360일에서 SF-0모르타르의 압축강도비가 약 0.72인 반면 SF-5, SF-10 및 SF-15 모르타르의 압축강도비는 각각 약 0.52, 0.47 및 0.33정도로서 황산마그네슘 침식에 대한 실리카 폼의 부(-)효과가 나타남을 확인할 수 있다. 이와 같이 황산마그네슘 환경에서 발생하는 시멘트 경화체의 압축강도 감소는 Bonen<sup>(6)</sup>의 연구결과에서도 나타났듯이 황산마그네슘 침식에 의한 gypsum 및 M-S-H 등의 반응생성물과 밀접한 관련이 있다고 생각된다. 이상의 압축강도 결과로부터 판

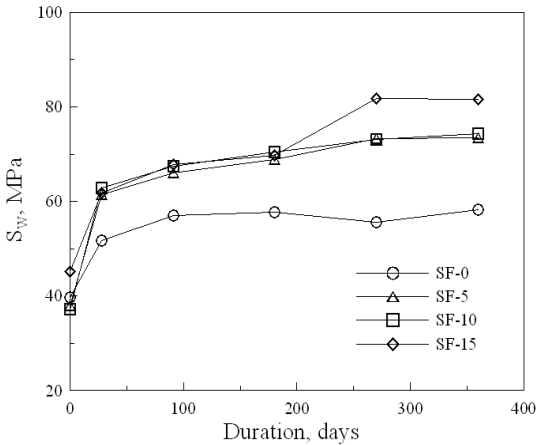


Fig. 3 담수에 양생한 모르타르의 압축강도( $S_W$ )

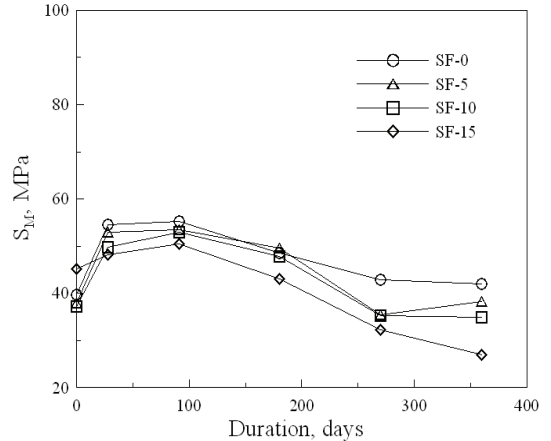


Fig. 4 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 압축강도( $S_M$ )

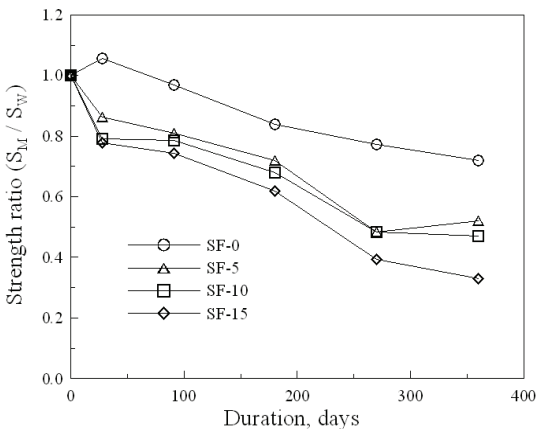


Fig. 5 모르타르의 재령별 압축강도비( $S_M/S_W$ )

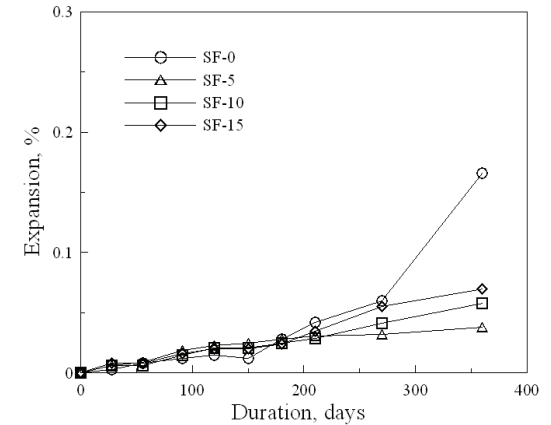


Fig. 6 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 재령별 팽창값

단하면, 실리카 폼은 시멘트 경화체 강도발현에는 매우 우수한 효과<sup>(7)</sup>가 나타날지라도 황산마그네슘이 존재하는 환경에서는 현저한 강도감소를 수반하기 때문에 신중한 재료의 선택이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

#### 4.1.3 팽창

Fig. 6은 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 재령별 팽창량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 모르타르의 팽창은 침지재령 270일까지 그다지 크게 나타나지 않았다. 그러나, 침지재령 360일에서 SF-0 모르타르는 약 0.166%의 값을 나타내므로써, 실리카 폼을 혼합한 모르타르와 비교하면 상대적으로 큰 값을 알 수 있다. 한편, 실리카 폼을 혼합한 모르타르는 침지재령 동안 대체율에 관계없이 0.1%이하의 적은 팽창값을 나타내므로써, Fig. 5에 나타난 압축강도비의 경향과는 상이한 현상임을 알 수 있다. 이러한 현상은 식 (1)과 같이 황산마그네슘침식에 의하여 시멘트 경화체 중에 생성된 불용성의 brucite ( $Mg(OH)_2$ )가 세공용액중의 알카리도를 저하시키므로써 저 pH 환경에서 모르타르 팽창의 주된 요인인 ettringite의 안정성이 저하되었기 때문이다.<sup>(1)</sup>

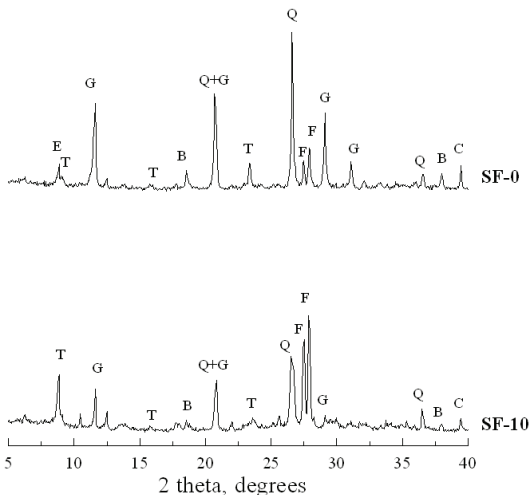


Fig. 7 5% 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르의 x선 회절 분석결과(360일)

(Note: E=ettringite, G=gypsum, T=thaumasite, B=brucite, Q=quartz, F=feldspar, C=calcite)

따라서, 황산마그네슘이 지배적인 환경에 노출된 시멘트 경화체의 저항성을 평가할 때, 환경조건을 고려한 합리적인 평가기법을 이용하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

## 4.2 미세구조 평가

### 4.2.1 XRD

360일 동안 황산마그네슘 침식을 받은 SF-0 및 SF-10 모르타르의 X선 회절(XRD) 분석결과를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 실리카 폼 사용 유무에 관계없이 ettringite, gypsum, thaumasite 및 brucite 등의 반응생성물이 생성됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 모르타르 제조시 사용된 골재의 영향으로 인하여 quartz 및 feldspar의 피크도 관찰되었다. 그러나, 황산마그네슘 침식 및 실리카 폼의 포졸란반응(pozzolan reaction)으로 인하여 potlandite의 피크는 검출되지 않음을 확인할 수 있다. 특히, 실리카 폼을 혼합하지 않은 SF-0 모르타르의 XRD는  $11.5^\circ$  2 $\theta$ 에서 gypsum 피크가 강하게 검출되었다. 뿐만 아니라 brucite의 피크가  $18.5^\circ$  및  $38.0^\circ$  2 $\theta$ 에서 검출되므로써 마그네슘이온( $Mg^{2+}$ )이 모르타르 중으로 침투 및 반응하였음을 알 수 있다. 그러나, 시멘트 경화체의 강도감소와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 M-S-H (혹은 M-C-S-H)는 반응물질의 조직구조가 비정질인 탓으로 인하여 XRD 분석법으로 생성여부를 증명할 수 없었다.

이상과 같이 XRD 분석 결과를 종합하면, 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식현상은 thaumasite, gypsum 및 brucite의 생성과 매우 밀접한 관련이 있다고 판단된다.

### 4.2.2 SEM

5% 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 표면 조직구조 특성을 관찰하기 위하여 SEM 및 EDS 기법을 이용한 분석을 실시하였으며, 침지재령 360일에서 SF-0 및 SF-10 모르타르의 SEM 사진을 나타낸 것이 각각 Fig. 8 및 9이다.

Fig. 8에서 보아 알 수 있듯이 SF-0 모르타르의

표면에는  $Mg^{2+}$  및  $SO_4^{2-}$  이온과 시멘트 수화물과의 반응으로 인하여 brucite 및 gypsum으로 이루어진 이중층(double layer)이 생성되었음을 알 수 있다.

Fig. 9는 실리카 폼을 10% 대체한 SF-10 모르타르의 침지재령 360일에서의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 황산마그네슘 침식을 받은 모르타르의 표면부에 망상구조를 가진 thaumasite가 다량으로 생성되었으며, 골재와 시멘트 페이스트의 계면부분에 기둥상의 gypsum이 생성되었음을 확인하였다. 특히, SF-10 모르타르가 보다 장기간 황산마그네슘 환경에 노출될 경우, gypsum의 상전이(phase transition)현상으로 인하여 보다 많은 양의 thaumasite로 전이될 것으로 생각된다.

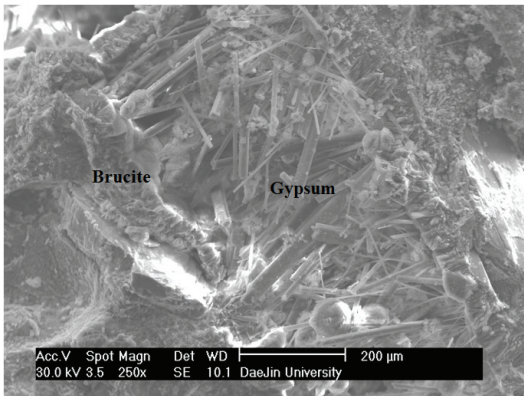


Fig. 8 5% 황산마그네슘용액에 침지한 SF-0 모르타르의 SEM 사진(360일)

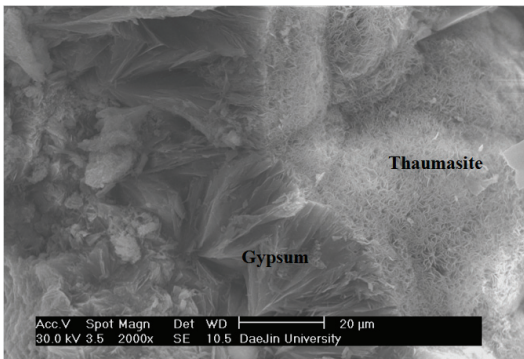


Fig. 9 5% 황산마그네슘용액에 침지한 SF-10 모르타르의 SEM 사진(360일)

#### 4.2.3 DSC

5% 황산마그네슘 용액에 270일 동안 침지한 SF-0 및 SF-10 페이스트의 DSC 분석결과를 나타낸 것이 각각 Fig. 10 및 11이다.

Fig. 10은 SF-0 페이스트의 DSC 곡선이며, 약 145, 420 및 495°C 부근에서 주 흡열피크를 나타내므로써, 페이스트 중에 ettringite/thaumasite, brucite 및 portlandite가 생성되었음을 알 수 있다. 한편, SF-10 페이스트의 DSC 곡선을 나타낸 것이 Fig. 11로써 약 405°C 및 450°C 부근에서 brucite 및 portlandite의 흡열피크가 각각 검출되었다. 뿐만 아니라, SF-0 페이스트와는 다르게 실리카 폼을 혼합한 페이스트(SF-10)의 경우, 실리카 폼의 포졸란반응으로 인하여 생성된 2차 C-S-H의 분해를 나타내는 double 피크를 90-110°C 부근에서 관찰할 수 있었다.

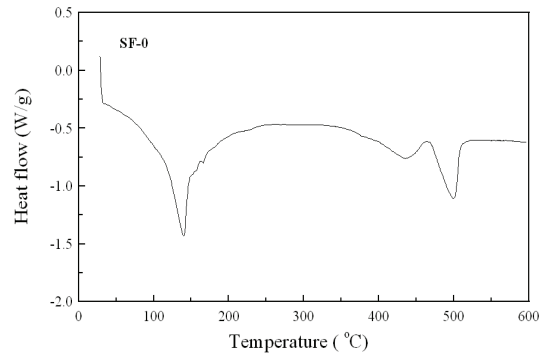


Fig. 10 5% 황산마그네슘용액에 침지한 SF-0 페이스트의 DSC 분석결과(270일)

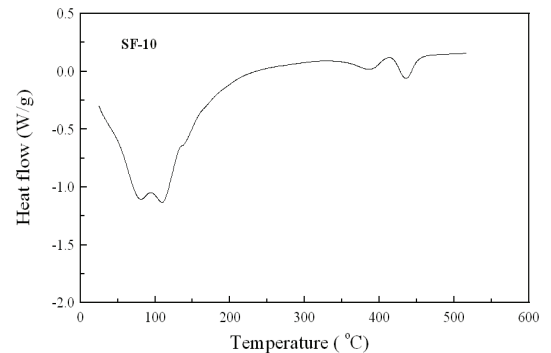


Fig. 11 5% 황산마그네슘용액에 침지한 SF-10 페이스트의 DSC 분석결과(270일)

## 5. 결 론

본 논문에서는 실리카 폼을 대체한 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식에 의한 성능저하 현상을 역학적 및 미세구조적 관점에서 고찰하였으며, 실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 5% 황산마그네슘용액에 360일동안 침지한 모르타르는 실리카 폼의 대체율이 증가할수록 표면 성능저하가 크게 발생하는 경향을 나타내었다. 특히, 모르타르의 압축강도비를 조사한 결과, 실리카 폼을 혼합한 모르타르는 실리카 폼을 대체하지 않은 SF-0모르타르에 비하여 압축강도비의 감소가 상대적으로 크게 나타나므로써, 황산마그네슘 환경에서 실리카 폼의 부(-)효과를 확인할 수 있었다.
- 2) SF-0 모르타르의 팽창은 실리카 폼을 혼합한 모르타르에 비하여 약간 크게 나타났으며, 침지재령 360일에서 실리카 폼을 혼합한 모르타르는 대체율에 관계없이 0.1%이하의 적은 팽창값을 나타내었다. 이는 황산마그네슘 침식에 의하여 생성된 brucite가 세공용액중의 알카리도를 저하시킴으로써 ettringite의 안정성이 저하되었기 때문으로 판단된다.
- 3) XRD 및 SEM 기법을 이용하여 황산마그네슘 침식의 원인을 조사한 결과, gypsum, thaumasite 및 brucite 등의 반응생성물이 모르타르 성능저하의 주요원인으로 작용하였으며, 열분석에서도 유사한 결과가 도출되었다.
- 4) 종합적으로, 실리카 폼을 사용한 시멘트 경화체의 성능저하 정도는 환경조건에 의하여 영향을 크게 받으며, 황산염이온과 결합하는 양이온의 종류에 따라 성능저하 현상이 다르게 나타난다. 특히, 황산마그네슘 환경에 콘크리트구조물을 축조할 시 실리카 폼의 적용성에 대한 세심한 주의가 요망된다.

### 참고문헌

1. Al-Amoudi.O.S.B., "Studies on Soil-Foundation Interaction in the Sabkha Environment of Eastern Province of Saudi Arabia", Ph.D. Dissertation, King Fahd University, Saudi Arabia, 1992.
2. Al-Amoudi.O.S.B., "Attack on Plain and

Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments", Cement and Concrete Composites, Vol. 24, No. 3, 2002, pp. 305-316.

3. ASTM C109-99., "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, 1999.
4. ASTM C150-00., "Standard Specification for Portland Cement", American Society for Testing and Materials, 2000.
5. ASTM C1012-95., "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", American Society for Testing and Materials, 1995.
6. Bonen,D.A., "Microstructural Study of the Effect Produced by Magnesium Sulfate on Plain and Silica Fume-Bearing Portland Cement Mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 3, 1993, pp. 541-553.
7. Cheng-Yi,H. & Feldman, R.F., "Hydration Reactions in Portland Cement-Silica Fume Blends", Cement and Concrete Research, Vol. 15, No. 4, 1985, pp. 585-592.
8. Cohen.M.D & Bentur.A., "Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions", ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 3, 1988, pp. 148-157.
9. Hooton.R.D. & Titherington.M.P., "Chloride Resistance of High-Performance Concretes Subjected to Accelerated Curing", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 9, 2004, pp. 1561-1567.
10. Kayali.O. & Zhu.B., "Corrosion Performance of Midium-Strength and Silica Fume High-Strength Reinforced Concrete in a Chloride Solution", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, No. 1, 2005, pp. 117-124.
11. Wee.T.H et al., "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures", ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 536-549.
12. Yazici.H., "The Effect of Silica Fume and High-Volume Class C Fly Ash on Mechanical Properties, Chloride Penetration and Freeze - Thaw Resistance of Self-Compacting Concrete", Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 4, 2008, pp. 456-462.

(접수일자 : 2008년 5월 20일)

(심사완료일자 : 2008년 6월 13일)