



메타카올린 혼합 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식 및 성능저하 모드

이승태^{1)*}

¹⁾군산대학교 토목공학과

Magnesium Sulfate Attack and Deterioration Mode of Metakaolin Blended Cement Matrix

Seung-Tae Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

ABSTRACT In this study, experimental findings on the resistance to magnesium sulfate attack of portland cement mortar and paste specimens incorporating metakaolin (MK) are presented. Specimens with four replacement levels of metakaolin (0, 5, 10 and 15% of cement by mass) were exposed to solutions with concentrations of 0.424% and 4.24% as $MgSO_4$ at ambient temperature. The resistance of mortar specimens was evaluated through visual examination and linear expansion measurements. Additionally, in order to identify the products formed by magnesium sulfate attack, microstructural analyses such as XRD, DSC and SEM/EDS were also performed on the paste samples incorporating metakaolin. Results confirmed that mortar specimens with a high replacement level of metakaolin exhibited lower resistance to a higher concentration of magnesium sulfate solution. It was found that the negative effect of metakaolin on the magnesium sulfate attack is partially attributed to the formation of gypsum and thaumasite. Conclusively, it is necessary to pay a special attention when using metakaolin in concrete structures, particularly under highly concentrated magnesium sulfate environment.

Keywords : metakaolin, magnesium sulfate attack, gypsum, thaumasite

1. 서 론

근래에 들어, 콘크리트구조물의 고기능성을 요구하는 사회적 추세로 인하여 콘크리트의 고성능은 필수불가결의 요소로 인식되어지고 있다. 초고층 건축물, 장기간 교량 등과 같이 고내구성 및 고강도를 필요로 하는 콘크리트구조물을 건설하기 위해서는 합리적인 콘크리트 배합뿐 만 아니라 사용되는 건설재료의 선택이 무엇보다 중요하다. 이러한 시대적 요구로 인하여 오래 전부터 실리카폼 (silica fume)이 고성능 콘크리트의 제조를 위하여 널리 사용되어 오고 있으며, 앞으로도 그 사용량이 계속적으로 증가할 것으로 예상된다. 그러나, 실리카폼은 다른 혼화재료에 비하여 상대적으로 고가의 재료로써 건설비용이 상승하기 때문에 실리카폼과 유사한 효과를 내포하면서 비교적 경제적인 혼화재료로써 메타카올린 (metakaolin)에 대한 관심이 증폭되고 있다.¹⁻⁴⁾

메타카올린은 약 700~800°C의 온도에서 점토질 카올린을 소성하여 제조한 활성 알루미늄노실리케이트 (aluminosilicate)질 물질이며, 약 50~55%의 SiO_2 및 약 40~45%의 Al_2O_3 로 이루어져 있다 (Fig. 1). 메타카올린을 사용한 콘크리트는 압축강도 발현 뿐 만 아니라 염해 및 알칼리-실리카 반응 등에 대한 저항성이 매우 뛰어난 것으로 보고되고 있으며, 북미, 유럽 등 전 세계적으로 고성능 및 고강도를 요구하는 콘크리트구조물의 혼화재료로써 널리 사용되고 있다.^{5,6)} 그러나, 이와 같이 메타카올린의 내구성에 대한 많은 연구에도 불구하고 황산염침식, 특히 황산마그네슘 침식 저항성에 대한 연구 결과는 그다지 많지 않은 실정이다.

본 연구는 메타카올린을 혼합한 시멘트 경화체의 내구성 평가의 일환으로 수행되었다. 메타카올린 사용 모르타르 및 페이스트의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성을 평가하였으며, 관련 성능저하 모드를 XRD (x-ray diffraction), DSC (differential scanning calorimeter) 및 SEM/EDS (scanning electron microscope/energy dispersive spectrometer)와 같은 기기분석 기법을 이용하여 고찰하였다. 본 연구는 향후 유해환경, 특히 황산마그네슘 환경에 노출된 메타카올린을 사용한 콘크리트구조물의 내구성 평가를 위한 기초자료로써 활용하는데 그 목적이 있다.

본 연구는 메타카올린을 혼합한 시멘트 경화체의 내구성 평가의 일환으로 수행되었다. 메타카올린 사용 모르타르 및 페이스트의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성을 평가하였으며, 관련 성능저하 모드를 XRD (x-ray diffraction), DSC (differential scanning calorimeter) 및 SEM/EDS (scanning electron microscope/energy dispersive spectrometer)와 같은 기기분석 기법을 이용하여 고찰하였다. 본 연구는 향후 유해환경, 특히 황산마그네슘 환경에 노출된 메타카올린을 사용한 콘크리트구조물의 내구성 평가를 위한 기초자료로써 활용하는데 그 목적이 있다.

*Corresponding author E-mail : stlee@kunsan.ac.kr

Received May 19, 2008, Revised October 12, 2008,

Accepted November 28, 2008

©2009 by Korea Concrete Institute

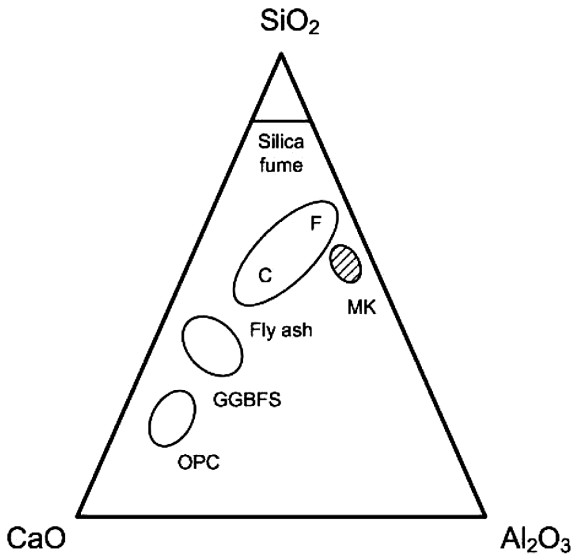


Fig. 1 Chemical composition of various supplementary cementitious materials

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트 및 메타카올린

사용된 시멘트는 KS L 5201에 준하는 S사의 보통포틀랜드시멘트 (OPC)를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분, 클링커 조성광물 및 물리적 성질은 각각 Table 1에 나타내었다. 또, 본 실험에 사용된 메타카올린 (MK)의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1에 나타난 것과 같다.

2.1.2 잔골재

잔골재는 경기도 포천에서 채취한 강모래를 사용하였

Table 1 Chemical composition, mineralogical compound and physical properties of cement and MK

Chemical composition	OPC	MK
SiO ₂ (%)	20.2	56.0
Al ₂ O ₃ (%)	5.8	37.0
Fe ₂ O ₃ (%)	3.0	2.4
CaO (%)	63.3	2.4
MgO (%)	3.4	0.3
SO ₃ (%)	2.1	-
LOI (%)	1.2	0.6
Mineralogical compound		
C ₃ S (%)	54.9	-
C ₂ S (%)	16.6	-
C ₃ A (%)	10.3	-
C ₄ AF (%)	9.1	-
Physical properties		
Specific gravity	3.13	2.63
Fineness (m ² /kg)	312	12,000

Table 2 Physical properties of fine aggregate

Specific gravity	Absorption (%)	FM
2.60	0.8	2.80

으며, 잔골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.3 화학혼화제

소요의 작업성을 확보하기 위하여 주성분이 폴리카르본산계인 Malialim A-20 고성능감수제를 결합재 중량에 대하여 약 1.8% 사용하였다.

2.2 배합

본 실험에서는 MK 대체율을 0, 5, 10 및 15%의 4단계로 선정하였으며, OPC, MK-5, MK-10 및 MK-15로 각각 명명하였다. 각 배합은 결합재 (OPC+MK)와 강모래의 중량비를 1 : 2, 물-결합재비 (w/cm)가 0.45인 모르타르를 제조하여 담수에서 1주일동안 표준양생을 실시한 후, 시험용액에 약 360일 동안 침지하였다. 한편 미세구조분석용 페이스트 시편도 w/cm가 0.45가 되도록 제조하였다.

2.3 시험용액

시험용액은 Regent급 MgSO₄ 시약을 담수에 용해시켜 저농도 (0.424% MgSO₄, 3,380 ppm of SO₄²⁻) 및 고농도 (4.24% MgSO₄, 33,800 ppm of SO₄²⁻)의 황산마그네슘 시험용액을 제조하였다. 또한, 재령이 증가함에 따라 농도가 묽어지는 점을 고려하여 4주마다 새로운 용액으로 교체하여 사용하였다.

2.4 실험 방법

2.4.1 외관조사

황산마그네슘 침식을 받은 모르타르의 균열, 박리 및 연화 등 성능저하 현상을 육안으로 관찰하기 위하여 재령별 외관조사를 실시하였으며, Tsivilis 등⁷⁾이 제안한 외관등급 평가법에 준하여 모르타르의 황산마그네슘 침식 정도를 평가하였다.

2.4.2 선형팽창

25 × 25 × 285 mm의 모르타르 공시체를 제조하여 1주일 동안 표준양생한 후, 시험용액에 침지시킨 모르타르의 재령별 팽창량을 ASTM C1012에 의하여 측정하였다.

2.4.3 X선 회절 (XRD) 분석

시험용액에 침지한 시멘트페이스트 중에 생성된 반응 생성물을 판정하기 위하여 XRD 분석을 실시하였다. 이때 측정조건은 CuKα (Ni filter) : 30 kV, 20 mA, scanning speed : 2°/min, 2θ : 5~40°로 정하였다.

2.4.4 시차주사열량 (DSC) 분석

DSC 2010 TA International을 이용하여 시멘트페이스트 분말에 대하여 시차주사열량 분석을 실시하였으며, 측정온도는 상온 -800°C로 하였으며, 온도상승속도는 10°C/min.으로 하였다.

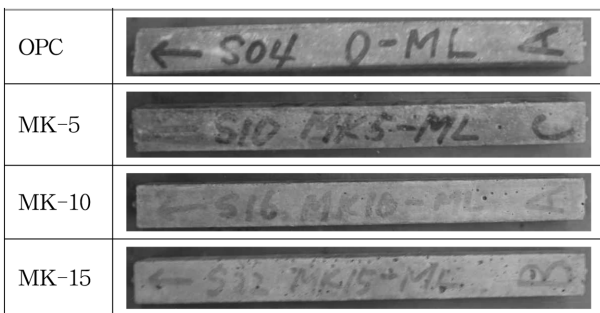
2.4.5 주사형전자현미경 (SEM) 분석

황산마그네슘 침식을 받은 시멘트페이스트의 조직구조 및 반응생성물을 관찰하기 위하여 XL30ESEM (Philips)을 이용하여 시편의 표면부분에 대한 확대촬영을 실시하였으며, 분산형 분광기를 설치하여 관찰하고자 하는 상(phase)이 어떤 원소로 구성되어 있는지를 평가하기 위하여 EDAX falcon energy system 60SEM을 이용하여 EDS 분석을 실시하였다.

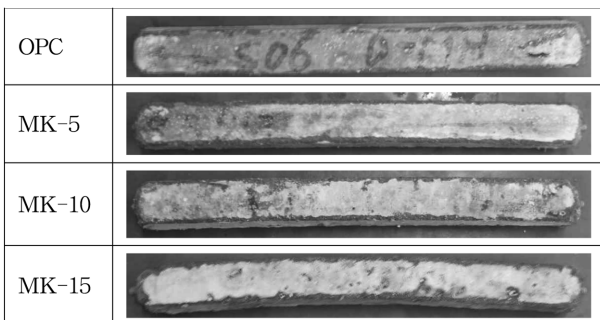
3. 실험 결과

3.1 외관 조사

Tsivilis 등⁷⁾의 연구 결과에 의하면, 시멘트 경화체가 황산염침식을 받을 경우, 끝단 (corner), 모서리 (edge) 및 면 (face)의 순서로 성능저하 현상이 발생하게 된다. Fig. 2는 두 종류 황산마그네슘 용액에 360일 동안 침지한 모르타르 공시체의 외관을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 저농도 (0.424% MgSO₄) 용액에 침지한 모르타르는 외형상 그다지 큰 성능저하 현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 고농도 (4.24% MgSO₄) 용액에 노출된 모르타르는 MK 대체율에 따른 성능저하 정도가



(a) 0.424% MgSO₄



(b) 4.24% MgSO₄

Fig. 2 Deterioration of mortar specimens exposed to magnesium sulfate solutions for 360 days

뚜렷이 구별되었으며, MK의 대체율이 증가함에 따라 모르타르의 표면부터 연화 (softening)되어 점차적으로 단면이 감소되는 성능저하 현상이 나타났다. 특히, MK-15 모르타르는 황산마그네슘 침식을 심하게 받아 모르타르의 굽힘 (bending)현상이 발생함을 확인할 수 있다.

4.24% 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 재령별 외관등급 조사 결과를 Table 3과 같이 정리하여 나타내었다.

3.2 선형팽창

황산마그네슘 침식을 받은 모르타르의 팽창 특성을 평가하기 위하여 360일 동안의 침지재령별 팽창량을 측정하였다.

Fig. 3은 두 종류 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 초기재령 팽창 특성을 나타낸 것이다. MK의 대체율 및 시험용액의 농도에 관계없이 침지재령 180일까지 모르타르의 팽창은 0.1% 이하의 적은 팽창값을 보였다. 그러나, Fig. 6에도 나타나듯이 180일 이후의 침지재령에서는 고농도 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르는

Table 3 Visual rating* of mortar specimens exposed to 4.24% MgSO₄ solution

Duration	OPC	MK-5	MK-10	MK-15
180 d.	1	2	2	2
270 d.	2	2	4	5
360 d.	3	4	5	6

* Visual rating

- 0: No visual deterioration
- 1: Some deterioration at corners
- 2: Deterioration at corners
- 3: Deterioration at corners and some cracking along the edges
- 4: Deterioration at corners and cracking along the edges
- 5: Cracking and expansion
- 6: Extensive cracking and expansion
- 7: Expansion and spalling

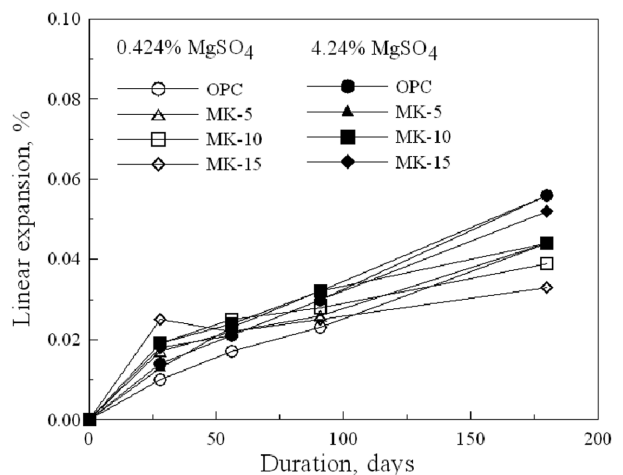


Fig. 3 Early-age expansion of mortar specimens exposed to magnesium sulfate solution

SO₄²⁻ 및 Mg²⁺ 이온의 침투 및 시멘트 수화물과의 반응으로 인하여 생성된 반응생성물 (sulfate-bearing reactants)의 영향으로 급격하게 팽창하기 시작하였다. 다시 말해서, 저농도 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 팽창량은 침지재령 360일 후에도 0.2%를 초과하지 않았으나, 고농도 황산마그네슘용액에 침지한 모르타르는 모르타르 조직이 팽창성 반응생성물의 수용한계를 초과하여 침지재령 360일에서 매우 큰 팽창값을 나타내었다.

또, Fig. 4에서 알 수 있듯이 침지재령 360일에서 OPC, MK-5, MK-10 및 MK-15 모르타르의 팽창값은 각각 0.244%, 0.360%, 0.410 및 0.556%로 나타남으로써, 고농도 환경에서 MK의 대체율이 증가할수록 모르타르의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성이 감소하는 경향임을 알 수 있다.

이상과 같이 외관조사 및 선형팽창의 실험 결과를 종합해 볼 때, 모르타르의 황산마그네슘 침식에 대한 저항성은 MK의 대체율과는 대체적으로 반비례 관계가 성립함을 알 수 있다.

3.3 XRD

Figs. 5-8은 360일 동안 0.424% 및 4.24% 황산마그네슘 용액에 침지한 시멘트페이스트의 X선 회절분석 결과를 나타낸 것이다. 시멘트페이스트의 종류 및 시험용액 농도에 관계없이 portlandite (P), calcite (C), ettringite (E), gypsum (G), thaumasite (T) 및 brucite (B) 등의 수화생성물 및 반응생성물이 생성되었음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 thaumasite (CaSiO₃CaSO₄CaCO₃·15H₂O)는 저온환경에서 생성되는 반응물질로 알려져 있으나, 본 연구에서와 같이 상온에서도 thaumasite의 생성이 가능하다는 연구 결과가 보고되고 있다.^{8,9)}

Fig. 5는 두 종류 황산마그네슘 용액에 360일 동안 침지한 OPC 페이스트의 표면부분에서 채취한 분말샘플의 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 저농도 시험용액에 침

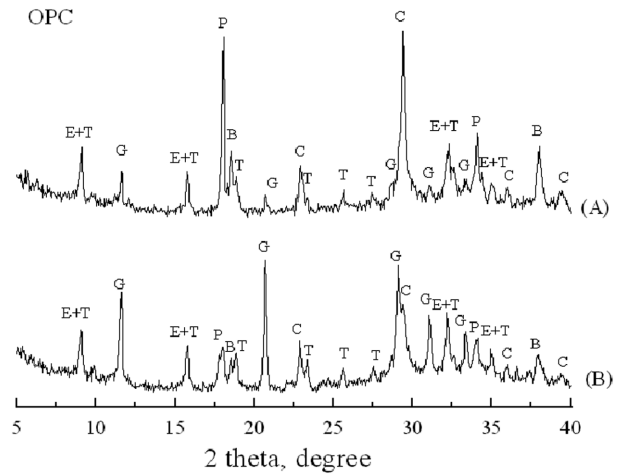


Fig. 5 XRD patterns of OPC pastes: (A) 0.424%, and (B) 4.24% magnesium sulfate solution

지한 OPC 페이스트 샘플에서는 18.1° 및 34.0° 2θ에서 portlandite의 피크가 강하게 검출된 반면, 고농도 시험용액에 침지한 페이스트는 황산마그네슘 침식 반응에 의하여 Ca(OH)₂가 소모된 탓으로 인하여 비교적 저강도 (low intensity)의 portlandite 피크가 검출됨을 확인할 수 있었다. 또한, 황산마그네슘 침식에 의하여 생성된 gypsum 피크 (11.7°, 20.7° 및 29.2° 2θ 등)도 고농도 황산마그네슘 용액에 침지한 시멘트페이스트 샘플의 XRD에서 더 뚜렷이 관찰되었다.

Fig. 6은 MK-5 페이스트 샘플의 XRD 분석 결과를 나타낸 것으로써, 저농도 (A) 및 고농도 (B) 시험용액에서 반응생성물의 가장 큰 차이는 gypsum의 피크강도인 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Figs. 7 및 8에서도 유사하게 관찰되었다. 다시 말해서, MK를 대체한 시멘트 경화체의 경우, 황산마그네슘 침식에 의한 성능저하 모드는 gypsum의 생성에 의한 표면성능저하가 대표적인 것으로 관찰되었다. 특히, MK를 혼합한 시멘트 경화체 중에 생성된 gypsum은 Fig. 4에 나타난 모르타르의 선형팽창에

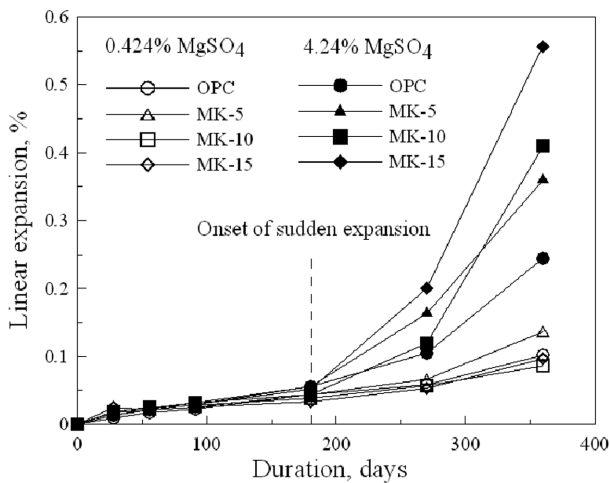


Fig. 4 General expansion of mortar specimens exposed to magnesium sulfate solution

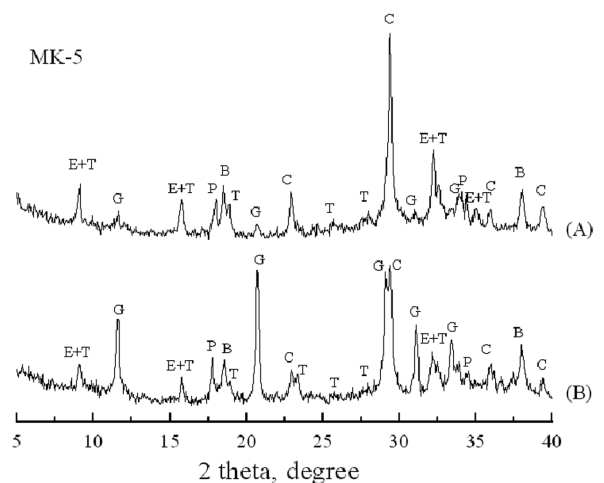


Fig. 6 XRD patterns of MK-5 pastes: (A) 0.424%, and (B) 4.24% magnesium sulfate solution

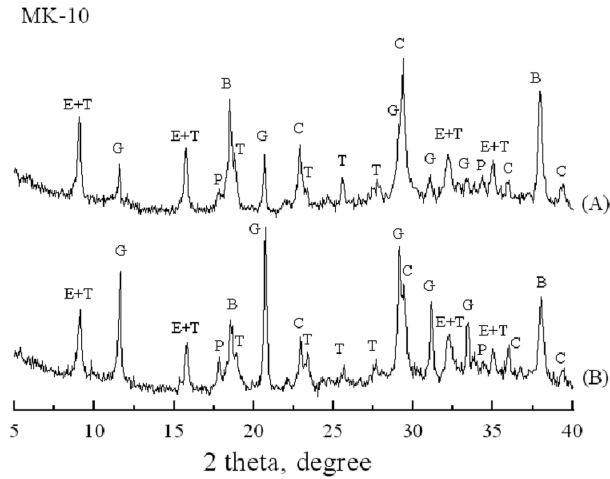


Fig. 7 XRD patterns of MK-10 pastes: (A) 0.424%, and (B) 4.24% magnesium sulfate solution

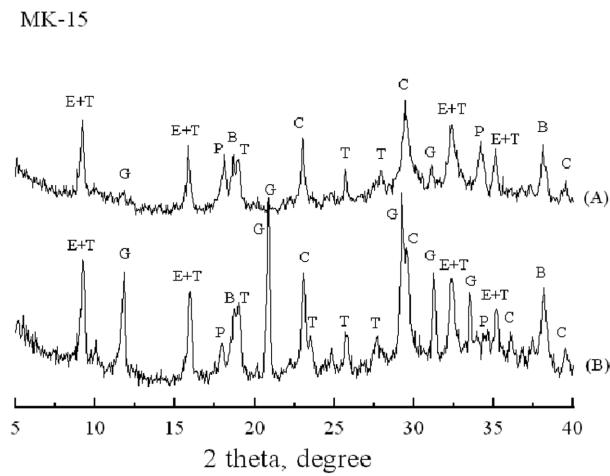


Fig. 8 XRD patterns of MK-15 pastes: (A) 0.424%, and (B) 4.24% magnesium sulfate solution

도 밀접한 관련이 있으며, 유사한 연구 결과가 Santhanam 등¹⁰⁾에 의하여 보고되기도 하였다.

또, 앞서 언급한 외관조사 및 선형팽창의 실험 결과에서 가장 심한 성능저하 현상을 나타낸 MK-15 배합에 대한 페이스트의 XRD 분석 결과인 Fig. 8에 의하면, gypsum의 피크강도 뿐만 아니라 9.1° 및 16.0° 2θ 에서 ettringite/thaumasite의 double 피크가 비교적 고강도 (high intensity)로 생성되었을 뿐 만 아니라 19.5° , 23.4° 및 26.0° 2θ 에서 thaumasite의 고유 피크가 관찰됨으로써, thaumasite의 생성도 MK 시멘트 시스템의 황산마그네슘 침식에 의한 성능 저하의 원인인 것으로 판단된다.

3.4 DSC

황산염 침식을 받은 시멘트 경화체의 반응생성물을 열분석을 통하여 직간접적으로 평가하기 위한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다. 특히, Santhanam 등¹⁰⁾은 열분석을 이용하여 CH, ettringite 및 gypsum에 대한

정량적 평가를 실시하였으며, Hartshorn 등⁹⁾은 DSC 분석을 통하여 thaumasite의 존재를 실험적으로 입증하고자 하였다.

본 연구에서는 황산마그네슘 침식을 받은 시멘트페이스트의 DSC 분석을 실시하였으며, 그 결과를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 4.24% 황산마그네슘 용액 중에 360일 동안 침지한 OPC, MK-5, MK-10 및 MK-15 페이스트 샘플의 DSC 분석 결과에 의하면, 페이스트 종류에 관계없이 황산염침식에 의한 반응생성물의 주 흡열피크가 생성되었음을 확인할 수 있었다. 특히, $80\sim 110^\circ\text{C}$ 부근에서 흡열피크가 뚜렷이 검출됨으로써, C-S-H의 탈수반응 및 ettringite/thaumasite의 생성을 직접적으로 확인할 수 있었다. 또, 시멘트페이스트의 종류에 관계없이 약 130°C 부근에서 비교적 큰 엔탈피의 gypsum 피크를 관찰할 수 있었다.

한편, 약 400°C 부근에서 brucite의 피크가 검출됨으로써, 마그네슘 이온의 침투 및 반응에 의한 시멘트페이스트의 성능저하가 지배적으로 작용함을 추정할 수 있었다. 반면, OPC 페이스트는 440°C 부근에서 portlandite의 흡열피크 (엔탈피: 15.4 J/g)가 관찰된 반면, MK를 대체한 페이스트는 이 수화물질에 해당하는 흡열피크가 검출되

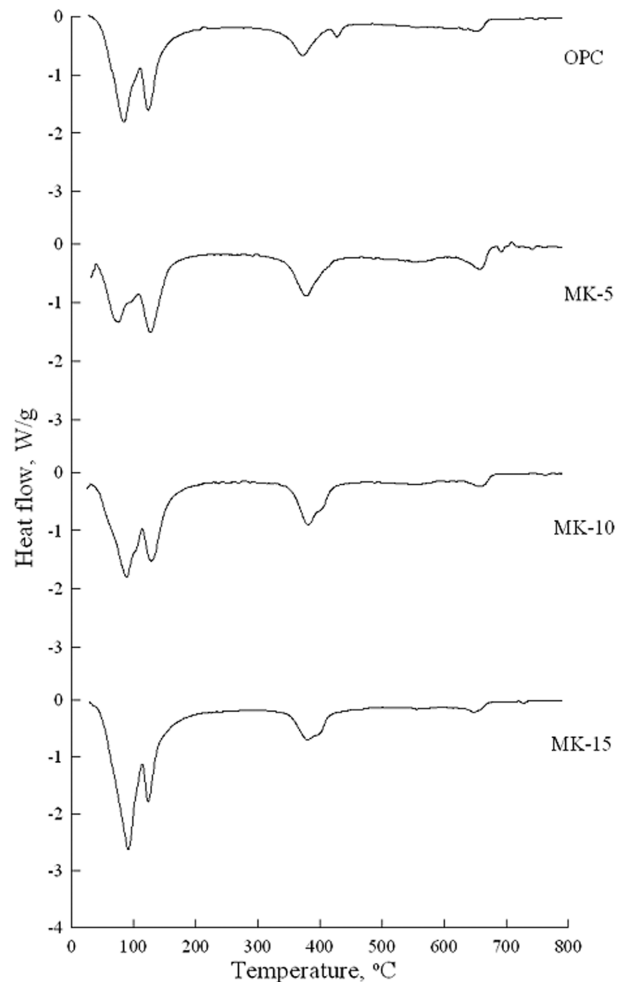


Fig. 9 DSC curves of pastes exposed to 4.24% magnesium sulfate solution

지 않음을 알 수 있다. 이상의 열분석 결과는 Figs. 5~8에서 제시된 XRD 결과와 비교적 잘 일치하였다.

3.5 SEM 및 EDS

황산마그네슘 침식 저항성을 평가하기 위하여 사용된 4 종류 모르타르 중 MK-15 모르타르가 가장 심한 성능저하 현상을 나타낸 것으로 조사되었다. 황산마그네슘 침식에 의한 MK-15 모르타르의 성능저하를 일으키는 주요 반응생성물에 대한 미세구조분석을 실시하였다.

Fig. 10은 고농도 황산마그네슘 용액에 360일 동안 침지한 MK-15 페이스트의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 페이스트 표면부에서 생성된 반응물질로 인하여 미세균열이 다량으로 관찰됨을 알 수 있다. 미세균열이 발생한 샘플의 표면부분에 대한 고배율의 확대 SEM 사진을 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림으로부터 섬유상의 미세한 반응생성물을 확인할 수 있었으며, EDS 분석 결과 (Fig. 12), 황산마그네슘 침식에 의한 thaumasite가 표면부에 다량으로 생성되어 있음을 관찰할 수 있었다. 뿐만 아니라, thaumasite층에 연속된 gypsum의 결정상도 쉽게 관찰되었다.

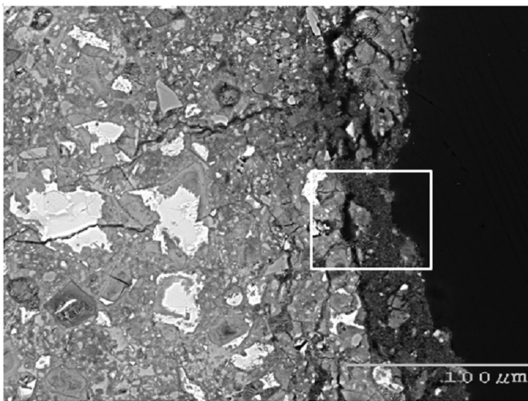


Fig. 10 SEM image of MK-15 paste exposed to 4.24% magnesium sulfate solution for 360 days

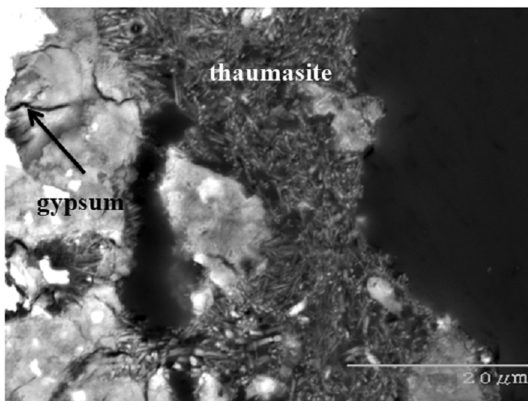


Fig. 11 SEM image of the marked area in Fig. 11 at higher magnification

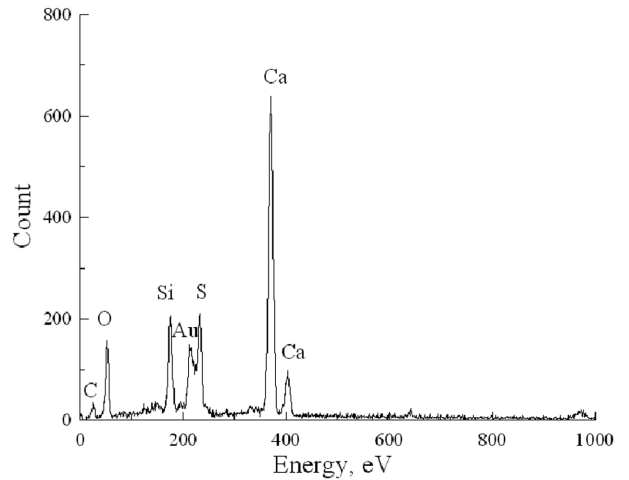


Fig. 12 EDS profile indicating the presence of thaumasite

4. 결 론

본 연구는 메타카올린을 4단계로 대체한 모르타르 및 페이스트의 황산마그네슘 침식 저항성 및 관련 성능저하 모드에 대하여 고찰하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 농도를 달리한 두 종류 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르의 외관조사 결과, 고농도 (4.24%) 용액에 노출된 모르타르는 MK 대체율이 증가할수록 모르타르의 표면부터 연화되는 성능저하 현상이 관찰되었다.
- 2) 저농도 시험용액에 침지한 모르타르의 선형팽창은 모르타르 종류에 관계없이 대체적으로 매우 작은 값을 나타내었으나, 고농도 황산마그네슘 용액에 침지한 모르타르는 침지재령 180일 이후부터 재령의 증가와 더불어 고함량 메타카올린을 혼합한 모르타르의 팽창값이 크게 나타나는 경향을 보였다.
- 3) XRD, DSC 및 SEM/EDS 분석을 통하여 황산마그네슘 침식에 의한 성능저하 모드를 고찰한 결과, gypsum 및 thaumasite의 생성이 주요 원인인 것으로 조사되었으며, 이러한 반응생성물은 메타카올린의 대체율 및 시험용액의 농도가 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.
- 4) 따라서, 지하수 및 지하토양과 같은 황산마그네슘 환경에 메타카올린을 사용한 콘크리트구조물을 축조할 경우, 황산마그네슘 침식에 대한 세심한 주의가 요망된다.

참고문헌

1. S. Wild, S., Khabit, J. M., and Jones, A., "Relative Strength Pozzolan Activity and Cement Hydration in Superplasticised Metakaolin Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 10, 1996, pp. 1537~1544.
2. Coleman, N. J. and Page, C. L., "Aspects of the Pore Solu-

- tion Chemistry of Hydrated Cement Pastes Containing MK,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 1, 1997, pp. 147~154.
3. Klimesch, D. S. and Ray, A., “Use of the Second-Derivative Differential Thermal Curve in the Evaluation of Cement-Quartz Pastes with Metakaolin Addition Autoclaved at 180 °C,” *Thermochimica, Acta*, Vol. 307, No. 2, 1997, pp. 147~154.
 4. Curcio, F., DeAngelis, B. A., and Pagliolico, S., “Metakaolin as a Pozzolanic Microfiller for High-Performance Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 6, 1998, pp. 803~809.
 5. Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., “Increasing Concrete Durability with High-Reactive Metakaolin,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 6, 2001, pp. 479~484.
 6. Boddy, A., Hooton, R. D., and Gruber, K. A., “Long-Term Testing of the Chloride-Penetration Resistance of Concrete Containing High-Reactive Metakaolin,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 5, 2001, pp. 759~765.
 7. Tsivilis, S., Sotiriadis, K., and Skaropoulou, A., “Thaumasite Form of Sulfate Attack (TSA) in Limestone Cement Pastes,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 27, No. 2, 2007, pp. 1711~1714.
 8. Brown, P. and Hooton, R. D., “Ettringite and Thaumasite Formation in Laboratory Concretes Prepared Using Sulfate-Resisting Cements,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 3, 2002, pp. 361~370.
 9. Hartshorn, S. A., Sharp, J. H., Swamy, R. N., “The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Portland-Limestone Cement Mortars Stored in Magnesium Sulfate Solution,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 3, 2002, pp. 351~359.
 10. Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek, J., “Effects of Gypsum Formation on the Performance of Cement Mortars during External Sulfate Attack,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, 2003, pp. 325~332.

요 약 본 연구는 메타카올린을 혼합한 시멘트 경화체의 황산마그네슘 침식 저항성을 평가하며, 관련 성능저하 모드를 고찰하기 위하여 수행되었다. 메타카올린의 대체율을 4단계로 조절하여 모르타르를 제조하였으며, 두 종류 황산마그네슘 용액 (0.424% 및 4.24% $MgSO_4$)에 360일 동안 침지한 후 재령별 외관조사 및 선형팽창 정도를 모니터링하였다. 아울러, XRD, DSC 및 SEM/EDS와 같은 기기분석 기법을 이용하여 황산마그네슘 용액에 침지한 메타카올린 혼합 시멘트 페이스트 중에 생성된 반응생성물 조사 및 미세구조 분석을 실시하였다. 본 실험에서 수행한 실험 결과에 의하면, 메타카올린의 대체율이 증가할수록 모르타르의 황산마그네슘 저항성이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 황산마그네슘 침식에 의하여 생성된 gypsum 및 thaumasite와 같은 반응생성물의 영향 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 메타카올린, 황산마그네슘 침식, 집섬, 쏘마사이트