

황산염침식을 받은 실리카 폼 혼합 시멘트 경화체의 성능 평가

Evaluation on the Performance of Silica Fume Blended Cement Matrix Exposed to External Sulfate Attack

이 승 태*
Lee, Seung-Tae

Abstract

The present study evaluates the resistance to sulfate attack of cement matrix with or without silica fume. The main variable was the replacement levels of silica fume. In order to introduce sulfate attack to cement matrix, mortars and pastes was exposed to sodium sulfate solution for 510 days. Visual examination, expansion and compressive strength loss of mortars in addition to characteristics of pore for the paste samples were regularly investigated. From the test results, it was clearly observed that the cement matrix with silica fume was very resistant to sulfate attack irrespective of the replacement levels of silica fume. However, the severe deterioration due to sulfate attack was found in cement matrix without silica fume.

요 지

본 연구는 실리카 폼을 사용한 시멘트 경화체의 황산염침식 저항성을 평가하기 위하여 수행되었다. 실리카 폼을 시멘트 중량에 대하여 0, 5, 10 및 15%의 4단계로 대체한 모르타르 및 0 및 10%의 2단계로 대체한 페이스트를 제조하여 침지실험을 실시하였다. 황산나트륨용액에 510일 동안 모르타르 및 페이스트를 침지한 후 재령별 외관조사, 팽창, 압축강도 감소율 및 공극특성을 조사한 결과, 실리카 폼 대체율에 관계없이 실리카 폼을 대체한 시멘트 경화체는 황산염침식에 대하여 저항성이 매우 우수하였으나, 보통포틀랜드시멘트 모르타르 및 페이스트는 황산염침식에 의한 극심한 성능저하 현상이 관찰되었다.

Keywords : Silica fume, Sulfate attack, Deterioration, Characteristic of pore

핵심 용어 : 실리카 폼, 황산염침식, 성능저하, 공극특성

* 정회원, 군산대학교 토목환경공학부 교수

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

•본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 급격한 산업화에 발맞추어 콘크리트구조물도 장대화, 경량화, 고층화 등과 같은 기능성을 요구하는 추세이기 때문에 이러한 시대적 요구에 부응하기 위한 콘크리트의 고성능화는 필수불가결의 요소로 자리매김하고 있다. 특히, 초고층건축물, 고속철도, 해양구조물 및 원자력발전소 등과 같은 특수목적으로 사용되는 콘크리트구조물이 증가함에 따라 사용되는 건설재료의 합리적인 선택이 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

이와 같은 맥락으로써 산업부산물로 발생하는 고로 슬래그미분말, 플라이애시, 메타카올린 및 실리카 폼과 같은 광물질혼화재를 사용하여 콘크리트를 제조할 경우, 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성이 개선되는 효과를 기대할 수 있으며, 고강도 및 고내구성 확보를 위한 고기능성 콘크리트구조물의 건설이 가능하게 된다.^{(1)~(4)} 주지하다시피 위에서 나열한 광물질혼화재 중 실리카 폼은 전기아크로(electric arc furnace)에서 실리콘, 페로실리콘 또는 실리콘 합금을 생산하는 과정에서 폐가스 중에 포함되어 있는 SiO₂를 집진기로 모은 초미립자 물질로써, 고성능감수제의 발달과 더불어 콘크리트용 혼화재료로써 그 사용범위가 점점 더 확대되어 가고 있는 추세이다. 1950년 노르웨이에서 실리카 폼을 콘크리트용 혼화재료로 활용하기 위한 연구가 시작된 이후 유럽, 북미 등 선진외국에서는 일찍이 실리카 폼을 사용한 콘크리트의 강도특성, 유동성 및 내구성 등에 대한 연구를 국가적인 차원에서 수행해 오고 있으며, 만족할 만한 연구성과도 확보하게 되었다. 그러나, 실리카 폼을 사용한 콘크리트의 내구성에 대하여 염소이온의 확산특성, 철근부식, 탄산화 및 동해 저항성 등과 관련된 연구^{(5),(6)}가 주로 수행되어 오고 있으며, 화학적침식, 특히 황산염침식에 대한 연구는 국내의 경우 선진외국에 비하여 상대적으로 많지 않은 실정이며, 관련 code의 제정도 아직까지 미비한 수준이다.

시멘트 경화체의 황산염침식에 대한 실리카 폼의 유효성은 Akoz 등⁽⁷⁾ 및 Wee 등⁽⁸⁾의 연구에서 주장되었으나, 이와는 상반된 주장이 Cohen 과 Bentur⁽⁹⁾에 의하여 제기되기도 하였다. 그러나, 그들의 연구결과는 SO₄²⁻ 이온이 결합하는 양이온의 영향이 지배적인

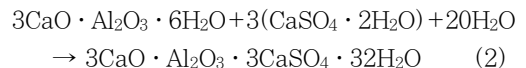
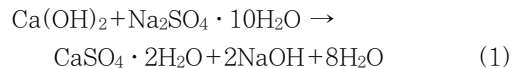
것으로 판단된다.

본 연구에서는 실리카 폼을 사용한 시멘트 경화체의 황산염침식 저항성에 대한 장기실험 데이터를 축적하기 위한 연구의 일환으로써, 실리카 폼의 대체율을 변수로 하여 황산염침식 실험을 실시하였으며, 그 결과에 대하여 고찰하기로 한다.

2. 황산염침식에 의한 시멘트 경화체의 성능저하

콘크리트구조물이 해수, 지하수, 오폐수 및 산성도양 등에 존재하는 황산염과 접하게 될 경우, 황산염이온(SO₄²⁻)은 콘크리트 중의 수화물과 반응하여 여러 유해물질을 생성하게 되며, 이러한 반응생성물의 반응속도 및 생성량에 따라 콘크리트구조물의 내구성이 저하되며, 내구수명에도 영향을 미치게 된다.

먼저, 황산염침식의 가장 큰 원인으로서는 ettringite 및 gypsum의 생성으로 나눌 수 있다. 식(1)과 같이 콘크리트 내부로 침투한 황산염이온이 시멘트 수화물 중 Ca(OH)₂와 반응하게 되면 gypsum이 생성되어 콘크리트가 연화(softening)하게 되고, 연쇄반응으로 인하여 식(2)와 같이 ettringite가 생성되므로써 콘크리트의 조직구조가 파괴되어 팽창균열의 원인이 된다.



황산염침식을 받은 시멘트 경화체의 성능저하 메카니즘을 개략적으로 도식화한 것이 Fig. 1이다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

ASTM C 150의 Type I 시멘트(OPC)에 준하는 국내산 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학

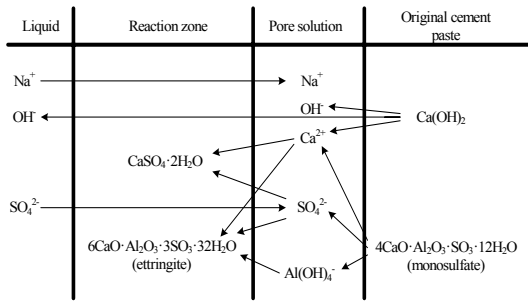


Fig. 1 황산염침식에 의한 시멘트 경화체의 성능저하 메커니즘

성분, 클링커 조성광물 및 물리적 성질은 각각 Table 1에 나타내었다.

3.1.2 실리카 폼

실리카 폼(SF)은 노르웨이 Elkem사의 제품을 사용하였으며, 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, 페이스트 샘플 제조를 위한 SF의 대체율은 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 ₂ , %	20.2	91.2
Al ₂ O ₃ , %	5.8	1.3
Fe ₂ O ₃ , %	3.0	0.8
CaO, %	63.3	0.7
MgO, %	3.4	0.3
SO ₃ , %	2.1	-
L.O.I, %	1.2	2.3
클링커 조성광물		
C ₃ S, %	54.9	-
C ₂ S, %	16.6	-
C ₃ A, %	10.3	-
C ₄ AF, %	9.1	-
물리적 특성		
Specific gravity	3.15	2.2
Fineness, m ² /kg	312	20,470

3.1.4. 고성능감수제

주성분이 폴리카르본산계인 Malialim A-20을 제조사의 표준사용량을 고려하여 시멘트 중량에 대하여 1.8% 정도로 사용하였으며, 고성능감수제의 물성은 Table 2와 같다.

Table 2 고성능감수제의 물성

주성분	폴리카르본산계 화합물
외관 및 상태	갈색 액상
고형분	20%
비중(25℃)	1.04±0.02
pH	2.5±1.0

3.1.5 시험용액

Regent급 황산나트륨 시약을 사용하였으며, ASTM C 1012에 준하여 SO₄²⁻ 이온의 농도를 33,800ppm이 되도록 조절하였다. 또, 재령이 증가함에 따라 농도가 묽어지는 점을 고려하여, 첫 1년 동안은 4주, 그 이후로는 3개월마다 새로운 용액으로 교체하여 사용하였다.

3.2 모르타르 및 페이스트의 배합

결합재(OPC+SF)와 강모래의 중량비를 1:2, 물-결합재비(w/cm)가 0.45인 모르타르를 제조하였으며, 목표 흐름값을 120±15%가 되도록 조절하였다. 모르타르는 담수에서 1주일동안 표준양생을 실시한 후, 황산염용액과 담수에 510일 동안 침지하였다. 한편 MIP 측정용 페이스트 시편도 w/cm가 0.45가 되도록 제조하였다.

3.3 실험방법

3.3.1 외관조사

황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 균열, 박리 및 연화 등 성능저하 현상을 육안으로 관찰하기 위하여 재령별 외관조사를 실시하였으며, Al-Amoudi⁽¹⁰⁾가 제안한 6단계의 외관등급 분류기준에 준하여 모르타르의 황산염침식 정도를 평가하였다.

3.3.2 팽창

2.5×2.5×28.5cm의 모르타르 공시체를 제조하여 1주일 동안 표준양생한 후, 담수 및 황산염용액에 각각 침지시킨 모르타르의 재령별 팽창량을 KS F 2424의 방법에 준하여 측정하였으며, 식 (3)으로 계산하였다.

$$\Delta l = \frac{l_t - l_0}{l_0} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, Δl : 팽창량 (%)

l_t : 침지후 t재령에서 모르타르의 길이

l_0 : 침지전 모르타르의 길이

3.3.3 압축강도 감소율

담수 및 황산염용액에 침지한 모르타르의 재령별 압축강도를 KS L 5105에 의하여 측정하였으며, 압축강도 감소율은 다음 식 (4)로써 계산하였다.

$$\text{압축강도 감소율} = \frac{f_{wc} - f_{sc}}{f_{wc}} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서, f_{wc} : 담수양생한 모르타르의 압축강도(MPa)

f_{sc} : 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도(MPa)

3.3.4 페이스트의 공극크기분포

황산나트륨용액에 침지한 OPC 및 SF10 페이스트의 공극크기분포를 수은압입법(MIP: Mercury Intrusion Porosimetry)을 이용하여 측정하였다. 접촉각 130°, 최대압력 60,000psi이며, 이 때 수은의 표면장력은 485dyne/cm였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 황산염침식에 의한 모르타르의 성능저하

4.1.1 외관조사

일반적으로 시멘트 경화체가 황산염침식을 받을 경

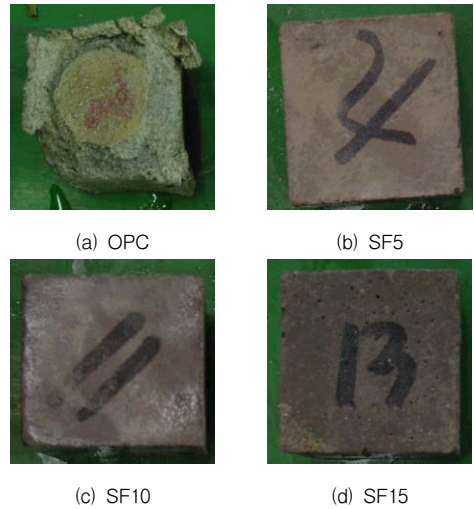


Fig. 2 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 외관

우 시험체의 끝단(corner)에서 성능저하 현상이 발생하며, 다음으로 모서리(edge) 및 면(face)의 순으로 침식현상이 발생하게 된다.⁽⁸⁾ Fig. 2는 황산나트륨용액에 510일 동안 침지한 모르타르의 외관을 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 OPC 모르타르의 경우, 황산염침식 작용으로 발생한 균열로 인하여 모르타르의 모서리부분이 탈락하는 심한 성능저하 현상이 발생하였으며, 면부분에서도 심한 균열이 발생함을 알 수 있다. 그러나, 실리카 폼을 대체한 모르타르(SF0, SF10 및 SF15)는 황산염침식에 의한 성능저하 현상이 그다지 크게 발생하지 않은 좋은 결과를 보였다. 황산염침식에 의한 모르타르의 침지재령별 외관등급 조사결과를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3 황산염침식에 의한 모르타르의 외관등급

	침지재령		
	180일	360일	510일
OPC	III	IV	V
SF5	0	I	I
SF10	0	0	I
SF15	0	0	I

0 : 건전한 상태,

I : 모서리부분 약간의 미세균열

II : 미세균열 및 모서리부분 탈락

III : 연화현상 및 중량손실

IV : 과도한 균열, 연화현상 및 심한 중량손실

V : 완전파괴

4.1.2 팽창

황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 팽창특성을 알아보기 위하여 510일 동안의 침지재령별 팽창량을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 여기서, 침지재령 0일은 모르타르의 전양생(pre-curing) 7일 후를 의미한다. 실리카 폼을 대체하지 않은 OPC 모르타르는 침지재령 91일 이후, 팽창량이 급격히 증가하여 180일에서는 0.256% 정도의 값을 나타내었으며, 이후의 침지재령에서 과도한 팽창에 의하여 모르타르 공시체가 파괴되어 더 이상 측정이 불가능하였다. 이러한 현상이 나타난 이유는 $C_3A(10.3\%)$ 를 다량 함유한 OPC 모르타르 중에 ettringite의 생성량이 상대적으로 많았기 때문으로 판단된다. 한편, 실리카 폼을 대체한 모르타르의 경우, 대체율에 관계없이 팽창량이 서로 유사하게 나타났으며, 침지재령 510일에서 0.05%미만의 작은 값을 보이므로써, 황산염침식에 대한 저항성이 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 그 이유는 Wee 등⁽⁸⁾의 연구성과에서도 알 수 있듯이 실리카 폼을 사용한 모르타르는 실리카 폼의 포졸란반응에 의한 $Ca(OH)_2$ 량의 감소 및 micro-filler 효과로 인하여 모르타르 내부조직이 밀실화되어 외부 유해이온의 침투저항성이 향상되었기 때문으로 판단된다.

4.1.3 압축강도 감소율

담수 및 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 실리카 폼 대체율에 따른 압축강도를 재령별로 측정하여 정리한 것이 Fig. 4 및 5이다.

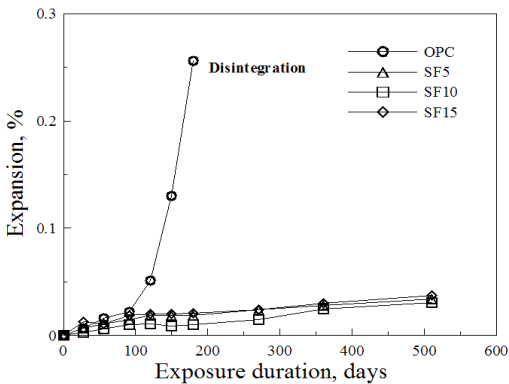


Fig. 3 실리카 폼 대체율에 따른 모르타르의 팽창

담수에 양생한 모르타르의 압축강도 발현특성을 나타낸 것이 Fig. 4로써, 재령이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 실리카 폼을 대체한 모르타르의 압축강도가 OPC 모르타르에 비하여 좋은 강도발현 경향을 보였으며, 특히, 실리카 폼을 15% 대체한 SF15 모르타르는 장기재령에서도 강도발현이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. 한편, SF5 및 SF10 모르타르는 압축강도가 거의 동일하게 발현되었다.

Fig. 5는 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로써, 실리카 폼 대체 유무에 따라 압축강도 경향이 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉, OPC 모르타르의 경우, 침지재령 28일 이후부터 압축강도가 감소하기 시작하였으며, 재령 510일에서는 약 21MPa의 매우 낮은 압축강도 값을 보였다.

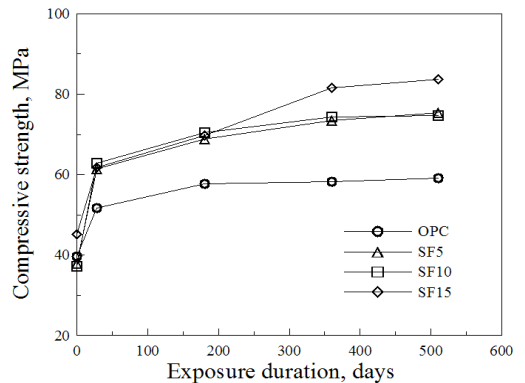


Fig. 4 담수에 양생한 모르타르의 재령별 압축강도

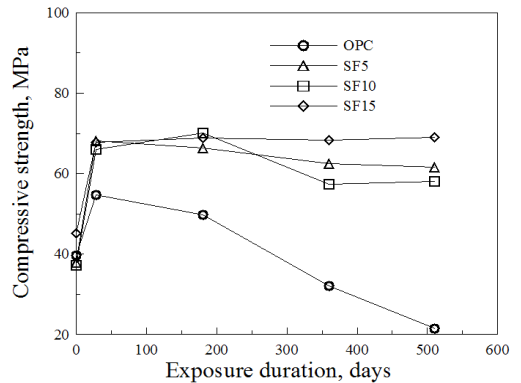


Fig. 5 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 재령별 압축강도

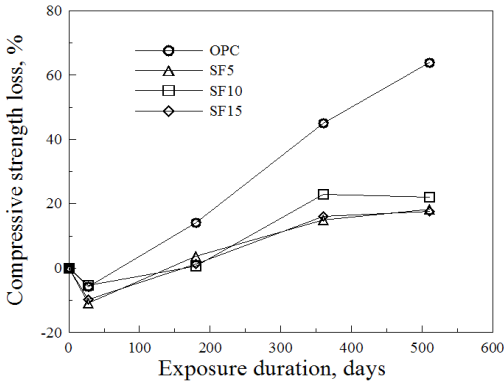


Fig. 6 모르타르의 재령별 압축강도 감소율

그러나, 실리카 폼을 대체한 SF5, SF10 및 SF15 모르타르는 장기재령에서도 압축강도의 감소가 그다지 크지 않은 상반된 결과를 나타내었으며, 침지재령 510일에서 약 58~69MPa 정도의 압축강도 값을 나타내었다.

식 (4)에 의한 압축강도 감소율로써 모르타르의 성능저하를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 초기 재령에서는 실리카 폼 대체율에 관계없이 압축강도 감소율이 음(-)의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 황산염침식에 의하여 생성된 ettringite 등의 반응생성물이 모르타르의 내부공극을 메워 조직의 치밀화를 도모한 탓으로 황산나트륨용액에 침지한 모르타르의 압축강도가 담수에 양생한 모르타르의 압축강도에 비하여 다소 크게 나타났기 때문이다. 그러나, 이 후의 침지재령에서는 지속적인 황산염침식 작용으로 인하여 모르타르의 압축강도 감소율이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, OPC 모르타르의 경우, 침지재령 28일 이후 압축강도 감소율이 선형적으로 증가하여 침지재령 510일에서 약 64%였으며, 실리카 폼 대체 모르타르는 동일재령에서 약 20%내외의 값을 보였다. 이상의 결과로부터 판단해보면 모르타르의 압축강도 감소율 경향은 전술한 모르타르의 팽창거동과 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다.

4.2 황산염침식에 의한 페이스트의 공극량 변화

4.2.1 공극크기분포

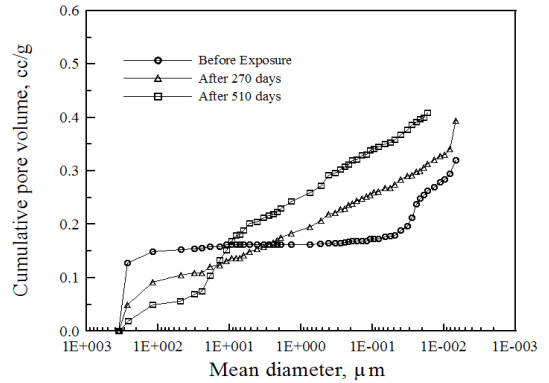


Fig. 7 황산나트륨용액에 침지한 OPC 페이스트의 공극크기 분포

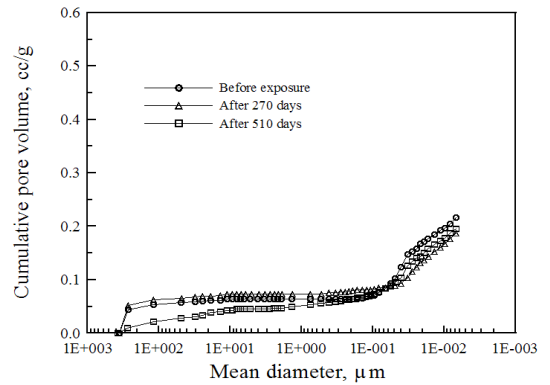


Fig. 8 황산나트륨용액에 침지한 SF10 페이스트의 공극크기 분포

Suryavanshi 등⁽¹¹⁾에 의하면 시멘트 경화체가 유해이온에 의한 침식을 받을 경우, 그 조직구조는 반응생성물질로 인하여 공극의 변화가 발생한다고 보고하고 있다. 그래서, 실리카 폼 대체 유무에 따른 페이스트의 침지재령별 공극크기분포의 변화를 알아보기 위하여 MIP법을 이용하여 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 7 및 8에 나타내었다.

Fig. 7은 실리카 폼을 대체하지 않은 OPC 페이스트의 공극크기분포를 나타낸 것으로서, 침지재령에 따라 공극크기분포가 상이하게 나타남을 알 수 있다. 다시 말해서, 황산나트륨용액에 침지하기 전 페이스트는 0.05 μm 이하의 미세공극의 분포가 지배적이었으며, 0.05 μm ~10 μm 의 범위에 해당하는 공극은 거의 존재하지 않았다. 그러나, 침지재령의 증가로 인하여 황산

염침식을 지속적으로 받음에 따라 0.05 μm ~10 μm 범위의 공극이 급격히 증가함을 알 수 있다. 즉, 황산염 침식에 의하여 생성되는 반응생성물로 인하여 내부조직의 변화가 크게 발생하였음을 판단할 수 있다.

그러나, 실리카 폼을 10% 대체한 SF10 페이스트의 공극크기분포를 나타낸 것이 Fig. 8로써, 침지재령에 관계없이 거의 유사한 공극크기분포를 나타내었다.

4.2.2 누적공극량 변화 및 한계공극량

황산염침식에 의한 OPC 및 SF10 페이스트의 누적공극량을 침지재령별로 정리하여 나타낸 것이 Fig. 9이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, OPC 페이스트는 황산염침식으로 인하여 침지재령이 증가함에 따라 누적공극량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 침지재령 510일에서 0.487cc/g의 공극량을 나타내므로써, 침지전 페이스트의 공극량(0.320cc/g)보다 약 1.5배 정도 증가하였다. 그러나, 실리카 폼을 대체한 페이스트의 경우, 침지재령의 증가에도 불구하고 누적공극량은 침지전 누적공극량에 비하여 오히려 약간 감소하는 좋은 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상이 나타난 이유는 페이스트의 수화 및 포졸란반응에 의한 공극량 감소효과와 황산염침식에 의한 공극량 증가효과가 서로 거의 상쇄되었기 때문으로 판단된다.

Torii 등⁽¹²⁾은 시멘트 페이스트의 공극 중 0.1 μm 이상의 공극량과 이온의 침투저항성은 밀접한 관련이 있다는 연구결과를 발표하였으며, 화학적침식과 관련하여 페이스트 중의 0.1 μm 를 한계공극크기라고 규정하였다. 따라서, 본 연구에 사용된 시멘트 페이스트의 침지재령별 공극크기 0.1 μm 이상의 공극량(한계공극량)의 변화를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 10이다. 공극크기 0.1 μm 이상의 공극량 변화 경향도 Fig. 9에 제시된 누적공극량 변화와 매우 유사한 결과를 나타낼 수 있다. OPC 페이스트의 경우, 침지전 한계공극량에 대한 침지재령 510일의 한계공극량은 약 190%였으나, SF10 페이스트는 약 103% 정도의 비교적 낮은 값을 나타낼 수 있다.

결론적으로, 앞서 전술한 외관등급, 팽창 및 압축강도 감소율 등 모르타르의 성능저하와 페이스트의 공극크기분포 및 공극량의 변화는 밀접한 상관관계가 있었

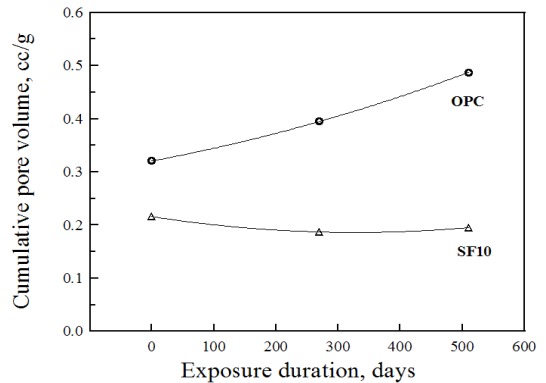


Fig. 9 황산나트륨용액에 침지한 페이스트의 누적공극량

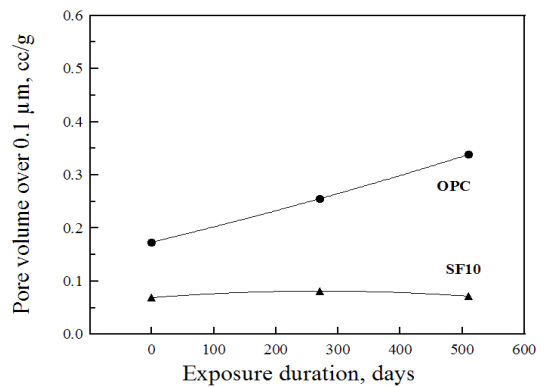


Fig. 10 황산나트륨용액에 침지한 페이스트의 공극크기 0.1 μm 이상 공극량

으며, 실리카 폼을 대체한 시멘트 경화체의 우수한 황산염침식 저항성은 실리카 폼의 반응작용에 의한 경화체 조직의 밀실화가 주된 원인 중 하나임을 알 수 있다.

5. 결론

실리카 폼을 대체한 모르타르 및 페이스트의 황산염 침식 저항성 실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 황산나트륨용액에 510일 동안 침지한 모르타르의 외관을 조사한 결과, OPC 모르타르는 황산염침식 작용에 의한 팽창균열로 인하여 모르타르가 다량으로 탈락하는 극심한 성능저하 현상이 발생한 반면, 실리카 폼을 대체한 모르타르는 성능저하 현상

이 그다지 크게 발생하지 않은 비교적 건전한 상태를 유지하였다.

- 2) 팽창 및 압축강도 감소율을 이용하여 모르타르의 성능저하를 평가한 결과, 실리카 폼을 대체한 모르타르는 장기 침지재령에서도 성능저하가 크게 나타나지 않는 우수한 황산염침식 저항성이 관찰되었다. 그러나, OPC 모르타르는 비교적 초기재령에서도 성능저하 현상이 크게 발생함을 알 수 있었다.
- 3) OPC 페이스트는 황산나트륨용액에 대한 침지재령이 증가함에 따라 공극크기 $0.05\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 범위의 공극량이 급격히 증가한 반면, 실리카 폼을 10% 대체한 페이스트는 수화 및 포졸란반응에 의한 공극량 감소효과와 황산염침식에 의한 공극량 증가효과가 서로 상쇄되어 공극량 변화가 그다지 크지 않은 결과를 나타내었다. 또한 페이스트의 누적공극량 및 한계공극량은 서로 유사한 경향을 보였다.
- 4) 외관등급, 팽창 및 압축강도 감소율 등 모르타르의 성능저하와 페이스트의 공극크기분포 및 공극량의 변화는 밀접한 상관관계가 있었으며, 실리카 폼을 대체한 시멘트 경화체의 우수한 황산염침식 저항성은 실리카 폼의 포졸란반응 및 micro-filler 효과에 의한 시멘트 경화체 조직의 밀실화가 주된 원인으로 판단된다.

참고문헌

1. Ganjian. E & Pouya. H.S, "Effect of Magnesium and Sulfate Ions on Durability of Silica Fume Blended Mixes Exposed to the Seawater Tidal Zone," Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 7, 2005, pp. 1332-1343.
2. Atis. C.D, "Strength Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted and Workable Concrete, and Influence of Curing Condition," Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 6, 2005, pp. 1112-1121.
3. Gruber. K.A et al., "Increasing Concrete Durability with High-Reactive Metakaolin," Cement and Concrete Composites, Vol. 23, No. 6, 2001,

pp. 479-484.

4. Razak. H.A & Wong. H.S, "Strength Estimation Model for High-Strength Concrete Incorporating Metakaolin and Silica Fume," Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 4, 2005, pp. 688-695.
5. 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.
6. 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.
7. Akoz. F et. al., "Effects of Sodium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume," Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6, 1995, pp. 1360-1368.
8. Wee. T.H et al., "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures," ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 536-549.
9. 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.
10. 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.
11. Suryavanshi. A.K et al., "Pore Size Distribution of OPC & SRPC Mortars in Presence of Chloride," Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, 1995, pp. 980-988.
12. Torii. K & Kawamura. M, "Effect of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack," Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 2, 1994, pp. 361-370.

(접수일자 : 2006년 11월 1일)