



미세 강섬유의 구속력이 모르타르의 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향

이종구^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학과

Effect of Mechanical Restraint due to Steel Microfibers on Alkali-Silica Reaction in Mortars

Chong-Ku Yi^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT The effect of steel microfibers (SMF) on alkali-silica reaction (ASR) was investigated using two types of reactive aggregates, crushed opal and a pyrex rod of constant diameter. Cracks are less visible in the SMF mortars compared with the unreinforced mortars. Due to crack growth resistance behavior in SMF mortar specimens, the strength loss is eliminated and the ASR products remained well confined within the ASR site. The expansion and the ASR products were characterized by microprobe analysis and inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy. The confinement due to SMF resulted in a higher Na and Si ion concentration of the ASR liquid extracted from the reaction site. The higher concentration reduced the ASR rate and resulted in a lower reactivity of the reactive pyrex rods in SMF mortars.

Keywords alkali-silica reaction, microcracking, expansion, tensile properties, fiber reinforcement

1. 서 론

반응성 실리카성분을 함유한 골재가 시멘트의 알칼리 성분과 만나 일어나는 반응을 알칼리-실리카 반응 (ASR) 이라 한다. 시멘트 내부에 존재하는 수산화이온이 골재에 존재하는 실리카성분의 Si-O 본드를 공격하여 일어나는 이 반응의 생성물은 알칼리-실리카 겔이라 불리며, 이 물질은 주변의 물을 흡수하여 팽창하는 성질을 가지고 있다. 팽창은 반응골재 주변 균열을 초래하며, 심화된 균열은 콘크리트 강도와 강성 저하의 원인이 된다. 국내에서 이러한 알칼리-실리카 반응으로 인한 피해는 흔하지 않으나, 최근에 쇄석골재가 사용된 콘크리트 포장도로에서 피해가 보고되었다¹⁾. 알칼리-실리카 반응을 대처하는 방안은 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫째는 골재나 시멘트의 화학적 성분을 조절하여 반응을 사전에 예방하는 방법이고, 둘째는 기계적으로 팽창을 구속하는 방법이다²⁻⁶⁾. 전자에 관련된 대부분의 최근 연구는 미네랄 혼화제⁷⁻¹⁰⁾나 리튬이온¹¹⁻¹²⁾을 이용한 반응과 팽창의 억제에 대해서 논의하였다. 이러한 화학적 접근은 효과적으로 알칼리-실리카 겔의 생성과 팽창을 억제하였으나, 반응이 가능한 다양한 골재의 종류와 크기, 시멘트의 종류와 성분¹³⁾, 미네랄 혼화제의 뭉침 현상¹⁴⁻¹⁵⁾, 그리고 리튬이온의 양¹⁶⁾에

따라 원하는 효과가 나타나는 문제가 있다.

본 연구는 steel microfiber (SMF)의 미세균열 생성과 진전 억제 효과¹⁷⁾가 알칼리-실리카 반응과 팽창에 미치는 영향에 대하여 두 가지의 반응성 골재를 이용하여 알아보았다. ASR에 의한 균열과 강도저하 그리고 팽창은 부순 골재 (crushed opal)를 사용하여 실험하였고, ASR의 반응성, 알칼리-실리카 겔의 생성과 성분은 둥근 pyrex 막대를 사용하였다. 둥근 막대모양의 pyrex를 사용한 연구는 지금까지 보고되지 않았으나, 이 방법은 이 실험에서 ASR의 정확한 반응량, 액체상태와 고체상태의 알칼리-실리카 겔의 성분 분석을 가능하게 해주었다.

2. 시험 방법

2.1 부순 오파 (crushed opal)를 사용한 시험체

부순 오파를 사용한 시험체는 다음과 같은 평가를 위해서 준비되고 사용되었다: (a) 현미경을 이용한 알칼리-실리카 반응 여부와 균열 확인, (b) ASR에 의한 기계적 성질의 변화, (c) ASTM C-1260에 따른 팽창실험¹⁸⁾.

ASR 시험을 위해서 ASTM C-1260에 따라 시멘트 (타입 I/II)와 잘 섞여진 잔골재를 이용하여 모르타르 막대 시험체 (25 × 25 × 286 mm)를 제작하였다. 알칼리실리카 반응을 일으키기 위하여 전체 골재의 5%를 오파로 대체하였고, 미세섬유의 영향을 알아보기 위하여 SMF를 첨

*Corresponding author E-mail : chongku@korea.ac.kr
Received December 26, 2006, Accepted April 6, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

가하지 않은 모르타르와, 균일한 비빔이 가능한 최고 SMF 용적비 (~7%) 만큼 첨가된 두 가지의 모르타르를 사용하였다 (Table 1). 첨가된 SMF는 20 × 100 μm 직사각형의 단면에 3~5 mm 길이 형태로, 생산 과정에서 생긴 다소 거친 표면을 가지고 있다 (Fig. 1). 모르타르 막대를 타설 후 24시간 후에 탈형하여 Turanli *et al.*¹⁹⁾의 연구 결과에 따라 SMF와 시멘트페이스트의 접합을 강화시키기 위해서 80°C에 6일 동안 수증양생 하였다. 이후에 양생된 막대를 ASTM C-1260에 따라 80°C의 1N NaOH 수용액에 저장하였다.

ASR에 의한 강도 변화를 알아보기 위하여 80°C의 1N NaOH 수용액 속에 0일, 7일, 14일 저장된 시험체에 대해 3점 휨 시험을 하였다. 휨 시험은 각각의 경우에 대하여 3개의 시험체를 사용하여, 모두 24개의 시험체를 사용하였다. 또한 ASR이 두 모르타르의 crack growth resistance에 미치는 영향을 알아보기 위하여 compact tension test를 실시하였다²⁰⁾.

2.2 Pyrex 막대를 사용한 시험체

Pyrex를 오팔대신 사용하여 짧은 모르타르 막대 시험체 (24.5 × 24.5 × 73.5 mm)의 중간에 위치하도록 제작하였다. 반응 전 정확한 pyrex의 크기(5.27 ± 0.01 mm 지름, 24.5 mm 길이)를 측정 할 수 있다는 장점은 다음과 같은

Table 1
(a) Mix proportions for ASR expansion test

	Control	7 vol.% SMF
Cement (g)	440	440
Water (ml)	207	207
Aggregate (g)	990	855
SMF (g)	0	405

(b) Detailed aggregate size distribution

Sieve no.	Control		7 vol.% SMF	
	Sand (g)	Opal (g)	Sand (g)	Opal (g)
8	94	5.0	81	4.3
16	235	12.4	203	10.7
30	235	12.4	203	10.7
50	235	12.4	203	10.7
100	141	7.4	122	6.4
Total	990		855	

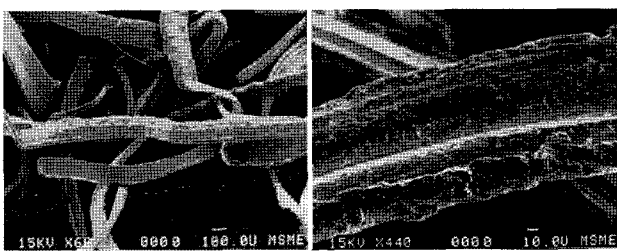


Fig. 1 Xorex steel microfibers by Novocon observed under SEM

연구를 가능하게 하였다: (a) SMF가 알칼리-실리카 반응성에 미치는 영향, (b) microprobe를 이용한 고체상태의 알칼리-실리카 겔의 화학적 성분 분석, (c) inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy를 이용한 액체상태의 알칼리-실리카 반응물 분석.

서로 다른 두 가지 모르타르의 시멘트, 물, 보통골재의 양은 Table 1에 나와 있는 배합과 같게 하였다. 단, 부순 오팔은 pyrex 막대로 대체하였다. 다짐봉을 이용하여 12 mm 두께의 모르타르를 형틀에 고르게 넣어 편편하게 다지고 중앙에 pyrex 막대를 조심스럽게 배치하였다. 그 위에 모르타르를 잘 다져넣어서 마감하였다. 이렇게 제작된 모르타르 막대를 부순 오팔을 사용한 시험체와 같은 방법으로 양생하여 80°C의 1N NaOH 수용액에 저장하였다.

80°C의 1N NaOH 수용액에 저장된 시간에 따른 pyrex의 반응량을 반응 후 잔재하는 pyrex 면적을 측정하여 알아보았다. 잔재하는 pyrex의 양은 전자현미경을 이용하여 얻어진 이미지의 분석을 통해 이루어 졌으며, 매 7-8일을 주기로 최대 77일 기간 동안 수행되었다.

Pyrex 막대 주변에 알칼리-실리카 반응에 의한 고체 생성물의 화학적 성분을 분석하기 위하여 cameca SX-51을 사용하여 microprobe 분석을 수행하였다. 분석을 위하여 분석기기에 삽입할 수 있는 시험체를 다음과 같은 방법으로 제작하였다: (a) NaOH 수용액에서 꺼낸 모르타르 막대의 길이 중앙 부분을 조심스럽게 절단한다. (b) 절단된 시험체를 건조기에 넣고 수분을 제거한다. (c) 수분이 제거된 시험체를 진공용기에 넣고 공기방울이 생기는 것을 막기 위하여 진공상태를 유지하며 낮은 점성을 가진 에폭시를 절단면에 붓는다. (d) 서서히 진공 용기에 공기를 투입하여 에폭시가 시편에 충분히 스며들도록 유도한다. (e) 에폭시와 시험체 사이의 열 변형 차이를 최소화하기 위하여 에폭시의 고온 경화를 피하고 상온에서 약 3일간 에폭시를 경화시킨다. (f) 에폭시로 쌓인 시험체의 절단면 표면을 입도 600번 연마재를 사용하여 편평한 유리면에 갈아낸다. (g) 갈아낸 면에 자외선 (UV)에 의하여 활성화되는 시멘트를 이용하여 유리판을 부착시킨다. (h) 부착된 유리를 기준으로 약 30 μm 정도 두께로 시편을 잘라낸다. (i) 잘라낸 면을 9 μm, 3 μm 연마재와 0.25 μm 다이아몬드 페이스트를 이용하여 유리와 같이 매끄러운 표면이 이루어 질 때까지 연마한다. 모든 연마 과정에 쓰이는 세척제는 알칼리-실리카 생성물의 변형을 최소화하기 위하여 물이 아닌 등유를 사용하였다.

액체상태의 ASR 생성물을 분석하기 위하여 위와 같은 방법으로 SMF가 첨가된 모르타르와 첨가되지 않은 모르타르를 사용한 24.5 × 24.5 × 285.8 mm 모르타르 막대의 중앙에 228 mm 길이의 pyrex 막대를 삽입하여 시험체를 제작하였다. 제작된 모르타르 막대를 위와 같은 방법으로 양생하였고, 알칼리-실리카 반응을 위하여 80°C의 1N NaOH 수용액에 80일 동안 저장하였다. 액체 상태의 ASR 생성물을 다음과 같은 방법으로 추출하였다:

(a) 절삭기 이용 시 냉각수에 의한 오염을 최소화하기 위하여 모르타르 막대의 양끝 부분을 중앙의 pyrex 막대를 건드리지 않도록 절삭기를 이용하여 주변에 조심스럽게 홈을 만든 후 손으로 부러트린다. (b) 낮은 압력의 공기를 pyrex 막대가 위치한 부분에 불어 넣는다. (c) 공기를 주입하는 반대쪽 막대 끝에 용기를 놓고 흘러나오는 액체를 수집한다. (d) 수집한 액체상태의 ASR 생성물을 공기와 수분을 차단하여 분석시험 전까지 보관한다. 이렇게 추출된 ASR 생성물의 화학성분은 Perkin Elmer 5300 Optical Emission ICP 분광계를 이용하여 분석하였다.

3. 시험 결과

3.1 부순 오팔 (opal)을 사용한 시험체

3.1.1 균열의 관찰 및 특성

알칼리-실리카 반응 여부와 반응에 따른 모르타르와 오팔 골재의 변화를 살펴보기 위하여 연마된 시험체 표면을 현미경을 이용하여 관찰하였다(Fig. 2). 대부분의 오팔 골재는 알칼리-실리카 반응 후 주변의 시멘트페이스트와 분리되어 표면 처리 과정에서 손실되었으며, 기존의 골재와 시멘트페이스트 사이 경계면에는 알칼리-실리카 생성물이 반응환을 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다. SMF가 첨가되지 않은 모르타르 시험체에선 알칼리-실리카 반응의 결과로 생긴 미세한 균열을 쉽게 발견할 수 있었으며, 이러한 균열은 무색 불투명한 알칼리-실리카 겔로 채워져 있었다. 특히, 균열 내에 존재하는 알칼리-실리카 겔은 수분을 흡수하며 균열 면과 수직이 되는 방향으로 팽창응력을 가하게 되므로 모르타르나 콘크리트의 급속한 열화의 원인이 된다. 알칼리-실리카 겔의 유동성은 겔이 포함하는 Ca^{2+} 이온의 양과 밀접한 관계가 있으며, Ca^{2+} 이온의 양이 많아질수록 알칼리-실리카 겔의 유동성과 팽창성은 줄어드는 것으로 알려져 있다. SMF가 첨가된 모르타르 시험체에서는 알칼리-실리카 반응을 확인할 수 있었으나 균열은 보이지 않았다.

3.1.2 알칼리-실리카 반응에 의한 강도 변화

3점 휨 시험 후 선형해석을 이용하여 구한 평균 휨 응력은 Table 2와 같이 나타났다. SMF가 첨가되지 않은 기준 모르타르로 제작한 막대의 경우, 초기 휨 응력은 SMF가 첨가된 모르타르 막대보다 크게 나타났다. 그러나 알칼리-실리카 반응이 일어난 후 휨 응력은 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 반면에 SMF가 첨가된 모르타르 막대의 휨 응력은 ASR에 큰 영향을 받지 않았다. 기준 모르타르 막대의 휨 응력은 7, 14일간의 알칼리-실리카 반응 후 초기 휨 강도와 비교하여 각각 77%, 65% 감소하였다. 그러나 SMF가 첨가된 시험체의 휨 강도는 같은 기간에 12% 감소와 2% 증가를 보였다. 이러한 결과는 SMF의 균열 물림 효과에 의한 것으로 설명할 수 있다.

ASR 반응이 균열 진전에 필요한 인장 하중에 미치는 영향을 compact tension test를 수행하여 알아보았다. 기준 모르타르와 SMF 모르타르로 제작한 시험체를 알칼리 반응 전과 후에 시험한 결과는 Table 3과 같다. 인장

Table 2 Flexural strength of the beam by third point loading test

	Reaction period (days)	Flexural strength (MPa)	Ratio
Control	0	6.66	1.00
	7	1.52	0.23
	14	2.35	0.35
SMF	0	4.54	1.00
	7	4.02	0.88
	14	4.65	1.02

Table 3 Maximum load obtained by compact tension test

	Reaction period (days)	Maximum load (N)	Ratio
Control	0	93.88	1.00
	7	66.35	0.71
	14	58.26	0.62
SMF	0	142.97	1.00
	7	146.12	1.02
	14	136.38	0.95



Fig. 2 Micrograph of opal aggregates exposed to 1N NaOH solution for 32 days in control specimen; ASR rim is present around opal aggregates; microcracks are filled with extruded gel

하중은 NaOH 수용액에 저장된 시간이 길어질수록 감소하였다. 기준 모르타르 시험체의 인장 하중 감소율은 0일부터 7일 사이에 크게 나타났으나, 7일부터 14일 사이의 감소는 보다 완만하였다. SMF 모르타르 시험체는 ASR에 의한 인장 하중 감소를 보이지 않았는데, 이러한 결과는 SMF의 탁월한 균열 전파 저지 효과에 의한 것으로 판단된다.

3.1.3 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창

기준 모르타르 막대와 SMF 모르타르 막대의 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창과 팽창률은 Table 4와 같다. 표의 각 수치는 3개의 막대에서 얻어진 평균값으로 이루어졌다. 기준 모르타르는 SMF 모르타르에 비하여 ASR에 의한 팽창이 빠르고 많이 일어났음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 단적으로 SMF가 ASR에 의한 팽창을 아주 효과적으로 지연시키며, 감소시킨다는 것을 말해준다. 기준 모르타르의 경우 가장 큰 팽창률은 처음 이틀 동안 일어났으나, SMF 모르타르의 경우는 이틀이 지난 후에 팽창률이 증가하였다. 두 모르타르의 투과성을 측정한 결과 투과성이 비슷한 수치를 보였으므로 지연된 팽창은 단순히 투과성의 차이로 인한 것이 아님을 알 수 있었다.

SMF는 초기 팽창을 감소시켰을 뿐만 아니라 전체적인 팽창도 감소시켰다. 1N NaOH 수용액에 저장되었던 12일 동안의 팽창 값을 비교하여 볼 때, SMF 모르타르 막대의 팽창은 기준 모르타르 막대 팽창의 1/3 밖에 미치지 못하였다. 이러한 결과는 ASR 반응이 지속될수록 SMF가 첨가된 배합과 기준배합 간의 팽창 값의 차이가 점점 더 커질 수 있음을 보여준다.

3.2 Pyrex 막대를 사용한 시험체

3.2.1 Pyrex 막대의 알칼리-실리카 반응성

SMF 모르타르의 경우보다 기준 모르타르 내에서 현저히 많은 양의 pyrex 막대가 알칼리-실리카 반응에 의하여 소모되었음을 알 수 있었다 (Fig. 3). 선형회귀분석을 통하여 구한 반응량비 (A/A_0)와 알칼리 실리카 반응 시간의 관계를 보면, SMF가 알칼리-실리카 초기 반응을 지연시키고 반응성을 감소시키는 것을 볼 수 있다. 이는 Table 4에 나타난 팽창 실험의 결과와 유사하였다. 실제 상황에서의 알칼리-실리카 반응은 반응물이 소진되면서 멈추게 되나, 충분한 반응물이 공급된 본 실험에서는 77일이 지난 후에도 반응이 계속 진행되었고, 기준 모르타

르 내에서 알칼리-실리카 반응은 SMF 모르타르의 경우보다 약 72% 정도 더 빨리 진행됨을 보여주었다.

Fig. 4는 기준 모르타르와 SMF 모르타르 내부에 삽입되었던 pyrex 막대의 반사전자사상이다. 각각의 반사전자상은 80°C 1N NaOH 수용액 속에 일정 기간 보관되었던 시험체에서 얻어졌으며, 잔여 pyrex 막대를 중앙에 보여주는 이들 이미지의 실제 크기는 6×6 mm이다. 알칼리-실리카 반응이 Powers와 Steinoor²¹⁾의 관찰과 상응하게, pyrex 막대의 모든 외부 표면에서 골고루 일어났으며 주변의 공극이나 SMF의 영향을 받지 않았다 (Fig. 4). NaOH 수용액에 0일과 7일 동안 저장되었던 시편에서 얻어진 Fig. 4 (a)와 (b)는 Fig. 3에서 보았듯이 처음 7일 동안 아주 작은 ASR이 일어났음을 보여주었다. ASR에 의한 작은 균열들은 15일 이후 기준 모르타르 시편에서 관찰되었고, 이렇게 생성된 균열은 기준 모르타르 시편의 빠른 알칼리-실리카 반응성에 크게 기여한다 (Fig. 4 (c)). SMF 모르타르 시편은 80°C 1N NaOH에 저장된 지 77일이 지난 후에도 ASR에 의한 뚜렷한 균열을 관찰할 수 없었다(Fig. 4(h)).

3.2.2 반응 생성물의 화학적 성분

1) Pyrex 막대-시멘트페이스트 경계면 부근의 ASR 생성물

Pyrex 막대 가장자리에 나타난 ASR 생성물의 화학적 분석은 microprobe를 사용하여 다섯 개의 원소 (칼슘, 칼륨, 나트륨, 규소, 알루미늄)의 양을 산출하는 것으로 수행하였다. Fig. 5는 모르타르와 pyrex 막대의 경계면 가

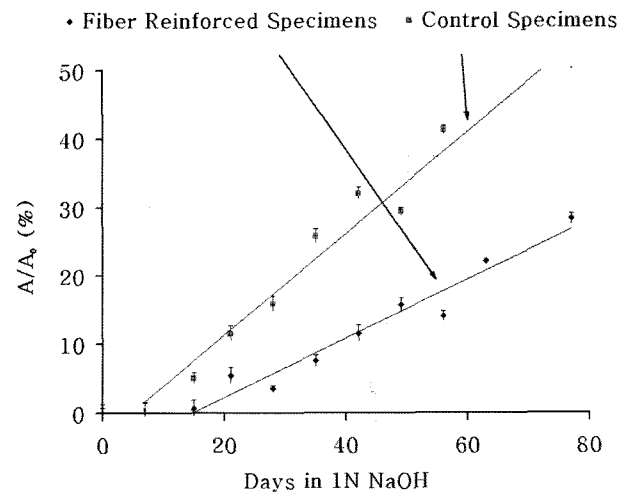


Fig. 3 Ratio of reacted area of pyrex rod to initial area in normal and SMF mortars in 80°C 1N NaOH(aq)

Table 4 Expansion data and expansion rates of control and SMF reinforced mortar prisms submerged in 1N NaOH solution at 80°C

Days of exposure	Expansion of control (%)	Rate of expansion (%/day)	Expansion of SMF (%)	Rate of expansion (%/day)
2	0.003025	0.00151	0.000225	0.00011
6	0.004918	0.00047	0.001688	0.00037
9	0.005593	0.00023	0.001860	0.00006
12	0.006100	0.00017	0.002023	0.00005

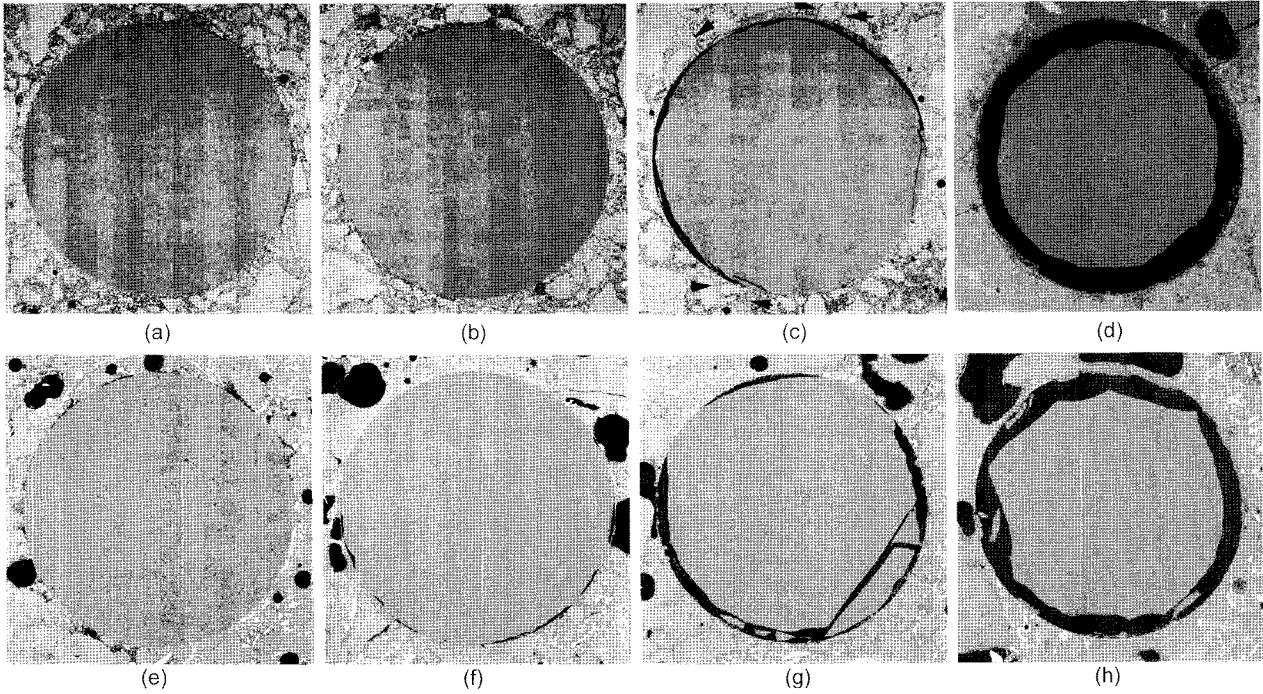


Fig. 4 Backscattered images (actual area size of 6×6 mm) of the remaining cross-section of pyrex rod in plain mortar submerged in 1N NaOH (aq) at 80°C after (a) 0 day, (b) 7 days, (c) 15 days, (d) 42 days; Those of the remaining pyrex rod in SMF mortar after (e) 0 day, (f) 15 days, (g) 42 days, (h) 77 days

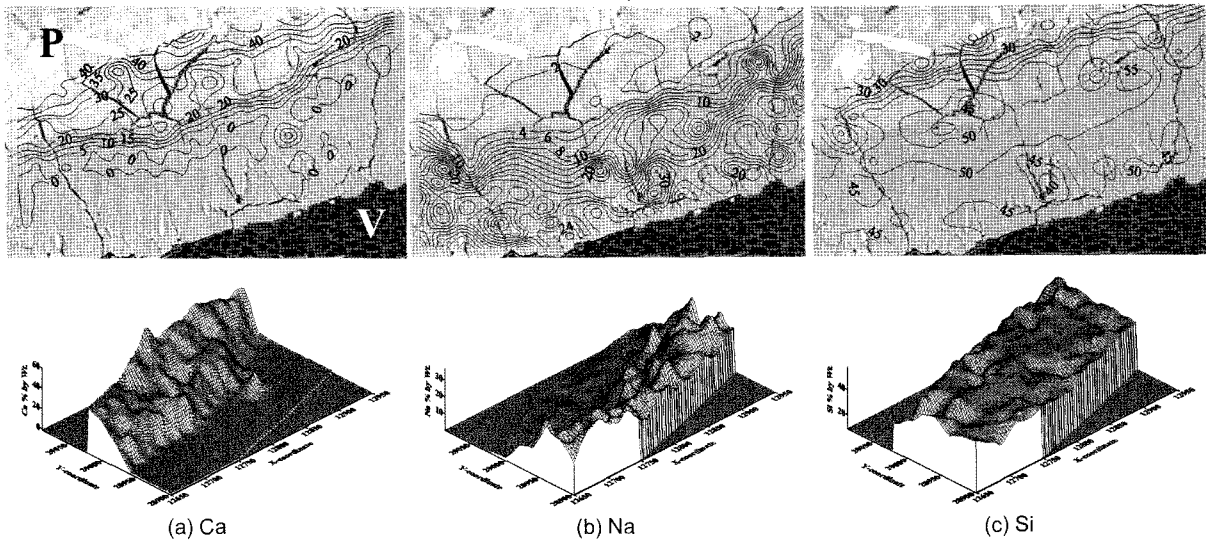


Fig. 5 Chemical analysis of reaction rim in SMF mortar (element wt.%): a) Ca, b) K, c) Si; P, paste; V, empty space filled with epoxy

가이 있는 $300 \times 186 \mu\text{m}$ 면적에서 관찰된 ASR 생성물의 화학 성분 분석 결과를 보여주고 있다. Fig. 5의 위쪽 행에 있는 그림은 반사전자상 위에 2차원의 등고선을 합성하여 만들어진 이미지이고, 아래 행에 있는 그림은 위의 원소함유량을 보기 쉽게 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 시멘트페이스트에 가까운 겔의 칼슘 함유량은 20%~35% 정도로 나타났고, 칼슘의 함유량은 시멘트페이스트에서 $20 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 보다 멀어질수록 급격히 줄어들을 볼 수 있다. 칼륨의 wt%는 1% 미만으로 분석된 다른 원소들과 비교하여 볼 때 많지 않았다. 반면, 나트륨의 함유량은 칼슘함유량이 큰 겔 부분을 벗어나면서 4~30%로 빠르게 증가함을 볼 수 있다. Fig. 6에서 G1과

G2로 표시된 Ca-rich, Na-rich 겔의 형성은 오팔 골재와 결합된 ASR 겔에서 관찰된 것과 흡사하였다^{21,22}.

2) 경계면에서 먼 곳의 ASR 생성물

Fig. 6에 V로 표시된 부분은 알칼리-실리카 반응시 생성된 액체상태의 알칼리-실리카이트 용액과 유동성이 큰 Na-rich 겔로 채워져 있는데, 이러한 액체상태의 반응물은 현미경 관찰을 위한 시편 제작 과정에서 대부분 소실되어 정확한 성분을 알 수 없었다. 대다수의 화학 반응이 반응물의 농도와 반응 조건에 따라서 반응성이 결정된다는 점을 감안하면, 소실된 액체상태 반응물의 분석은 본 실험에서 관찰된 ASR을 이해하는데 도움이 된

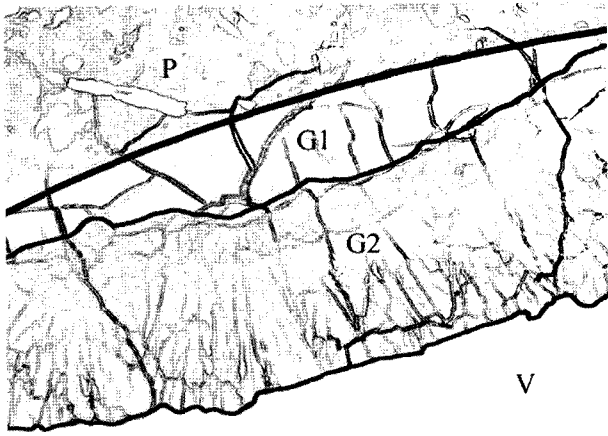


Fig. 6 Morphology of the area observed in Fig. 5: P, paste; G1 and G2, ASR product; V, void filled with epoxy.

다. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구는 ASR이 일어난 콘크리트나 모르타르 전체를 압축하여 얻은 세공용액의 성분 에 대한 것이므로 실질적으로 ASR이 일어나는 골재 주변에 존재하는 액체상태의 반응물에 대한 정보는 부족한 실정이다²³⁾. 따라서 본 연구에서는 pyrex 막대 주변의 액체를 채취하여 화학 성분을 ICP 분광법으로 분석하였다. 일반 모르타르와 SMF 모르타르 속에 포함된 나트륨 이온의 농도는 각각 3.46 mol/l와 4.59 mol/l로 얻어졌으며 이러한 수치는 시편이 저장되었던 수조의 NaOH 농도 (≈ 1 mol/l)보다 훨씬 높았다. 규소 이온의 농도 또한 기준 실험체 (2.67 mol/l)가 SMF 실험체 (3.9 mol/l) 보다 낮았으며, SMF 모르타르의 보다 높은 규소와 나트륨 이온의 농도는 SMF의 균열 억제 효과에 의한 것으로 생각된다. 추출물에서 얻은 다른 이온들 (칼슘, 칼륨, 알루미늄, 철, 마그네슘)의 농도는 1 μ mol/l에서 30 μ mol/l로 규소나 나트륨이온의 농도와 비교하여 매우 낮게 나타났다.

4. 는 의

다양한 크기와 형태의 오팔 골재가 포함된 모르타르와 일정한 직경의 막대 모양의 반응성 골재를 포함한 모르타르 모두에서 ASR을 일으키는 골재 주변의 균열이 SMF에 의해 상당히 감소되었으며, 이러한 관찰을 통하여 SMF가 ASR에 노출된 모르타르의 균열을 제어하는데 매우 효과적임을 확인하였다. 반응성 골재인 오팔을 포함한 기준 실험체를 80°C 1N NaOH 수용액에 담가둔 다음 일주일 후에 꺼내서 낮은 배율의 광학 현미경으로 관찰한 결과 반응성 골재 주변에서 균열이 쉽게 발견되었으나 SMF 모르타르에서는 균열이 발견되지 않았다. 또한 SMF는 균열의 형성과 진전을 제어하여 ASR에 의한 강도 감소를 막을 수 있었다.

4.1 SMF를 통한 균열 제어

모르타르에 첨가된 SMF는 균열의 진전을 효과적으로 저항하는 역할을 한다(Table 4). 기준 모르타르와 SMF

모르타르의 균열 진전 거동에서 나타난 차이는 다음과 같이 설명할 수 있다. ASR에 의하여 두 모르타르 모두 반응성 골재 표면에 같은 크기의 미세 균열이 발생할 수 있다. 기준 모르타르는 균열 길이가 커질수록 균열 진전에 필요한 인장응력이 낮아지는 취성 재료의 특성을 보이며 ASR이 진행될수록 균열은 더 빠르게 진전된다. 하지만 SMF 모르타르는 SMF의 균열 보강, 균열 편향, 균열 물림 효과 같은 균열과 섬유와의 상관된 메커니즘 등을 통해서 초기 균열이 안정화되어 훨씬 낮은 균열진전을 보인다^{17,20)}. 이러한 균열진전 저항 메커니즘은 균열 선단의 뒤쪽에 형성되며, 균열이 진전될수록 단위 균열 진전에 필요한 에너지 흡수가 커지게 된다. 따라서 SMF 모르타르의 경우 기준 실험체와는 반대로 균열이 진전될수록 균열 진전에 필요한 인장응력이 커지게 되어 ASR이 진행되어도 낮은 균열 진전을 보인다.

4.2 균열 진전 저항성능이 팽창에 미치는 효과

균열 진전 저항성능이 부족한 기준 모르타르의 경우, 초기 균열 발생 후 균열 진전에 필요한 인장응력이 점차 감소하므로 ASR 겔이 초래하는 인장력에 의한 균열 길이와 균열 개구 변위 증가가 용이해진다. 반응성 골재 주변에서 시작되는 균열의 진전과 개구 변위 증가는 ASR이 진행되면서 지속되고, 진전하는 균열은 주변의 다른 균열을 만나 그물형 균열을 형성하여 팽창을 초래하게 된다.

앞서 언급했듯이 SMF 모르타르의 균열 저항성능은 균열의 크기가 커질수록 똑같은 길이의 진전을 이루기 위하여 더 큰 인장응력이 필요하게 한다. 따라서 80°C 1N NaOH 수용액에 담가둔 시간이 오래될수록 반응성 골재의 팽창을 구속하는 유효성능은 증가하게 된다. 이러한 효과는 반응성 골재에 작용하는 수동 구속 응력 (passive restraint pressure)을 증가시킨다. 따라서 반응성 골재 주변의 팽창이 감소될 것으로 예상하였고 이는 실험 결과와 일치하였다 (Table 4).

4.3 구속 효과가 겔 형성에 미치는 영향

SMF로 보강된 모르타르 실험체에서 구속 응력과 작은 균열개구 변위는 ASR 생성물의 팽창을 구속할 뿐만 아니라 ASR 겔이 반응 구역에서 주변의 모르타르로 이동하지 못하도록 이동을 제한하였다. 그러므로 반응 골재 주변에 액체 상태인 ASR 생성물(나트륨과 규소 이온) 등의 농도가 ICP 분석에 의하여 확인된 것처럼 증가하게 된다. pyrex 막대를 넣은 SMF 모르타르 실험체에서 겔 형성이 감소되는 것은 ASR 생성물의 이온 농도가 증가하여 pyrex 막대의 규소성분 용해를 제한하고 ASR 반응성을 감소시키기 때문인 것으로 추측된다 (Fig. 4). 나트륨 이온의 농도는 기준 실험체와 SMF 실험체 모두에서 외부의 1N 수산화나트륨 용액보다 훨씬 높게 나타났다.

이러한 높은 나트륨 이온의 농도는 NaOH 수용액이 모르타르 속으로 침투하여 pyrex와 반응하고 알칼리-실리카 합성물의 형태로 존재함을 보여준다. 액체 상태인 ASR 생성물의 이온 농도가 높음을 감안할 때 기준 모르타르보다 SMF 모르타르 내부에 더 큰 삼투압이 발생된 것으로 예상되며, 이러한 삼투압은 위에 언급한 SMF의 구속응력과 상쇄되어 두드러진 팽창으로 나타나지 않았다. 현존하는 Osmosis theory와 Double layer theory^{24,25)} 모두 알칼리-실리카 겔의 팽창 메커니즘을 설명하기 위해 사용하나, 두 가지 메커니즘 중 어느 것이 보다 유효한지는 아직까지 연구 과제로 남아있다. 다만 반응 골재 주변에 생성된 Ca-rich 겔과 ICP 분석에 의하여 밝혀진 알칼리-실리카 합성물의 높은 농도는 두 가지 메커니즘에서 공통적으로 필요한 요소로 알려져 있다.

5. 결 론

SMF (7% V_f) 혼입시 반응성 골재인 오팔 (opal)이 포함된 모르타르의 팽창은 (1N NaOH 80°C 수용액에 12일 저장 후) 기준 모르타르의 팽창과 비교하여 현저히 감소하였다. 또한 SMF는 기준 모르타르 실험체에 나타나는 ASR에 의한 강도 감소를 막을 수 있었다. 기준 실험체와 비교했을 때 SMF 모르타르는 더 낮은 알칼리-실리카 반응성을 보였으며, 이러한 낮은 반응성은 알칼리-실리카 반응 골재 주변에 존재하는 높은 규소 이온의 농도로 이해될 수 있다.

참고문헌

1. 홍승호, 한승환, 윤경구, “알칼리-실리카 반응에 의한 시멘트 콘크리트 포장 파손 사례”, 콘크리트학회 논문집, 18권 3호, 2006, pp.355~360.
2. Clayton, N., “The Effects of Alkali Silica Reaction on the Strength of Prestressed Concrete Beams”, *Struct. Engr.*, Vol.68, 1990, pp.287~292.
3. McGown, J. K. and Vivian, H. E., “Studies in Cement-Aggregate Reaction, XXIII: The Effect of Superincumbent Load on Mortar Bar Expansion”, *Aust. J. Appl. Sci.*, Vol.5, 1954, pp.94~97.
4. Yamura, K., “Effect of Steel Reinforcement on Alkali Silica Reaction of Concrete”, *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, Vol.43, 1994, pp.970~975.
5. Koyanagi, W., “Characteristics and Simulation of Concrete Cracks Caused by AAR”, *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Kyoto, 1989, pp.845~850.
6. Ahmed, T., Burley, E., and Rigden, S., “Effect of Alkali-Silica Reaction on Bearing Capacity of Plain and Reinforced Concrete”, *ACI Mater. J.*, Vol.96, 1999, pp.557~570.
7. Aquino, W., Lange, D. A., and Olek, J., “The Influence of Mtakaolin and Silica Fume on the Chemistry of Alkali-Silica Reaction Products”, *Cem. Concr. Compos.* Vol.23, 2001, pp.485~493.

8. Sprung, S. and Adadian, M., “The Effect of Admixtures on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete”, *Proceedings, Symposium on Effect of Alkalis on the Properties of Concrete*, London, Sept., Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, 1976, pp.125~137.
9. Oberholster, R. E. and Roy, D. M., “The Effectiveness of Mineral Admixtures in Reducing Expansion due to the Alkali-Aggregate Reaction with Malmesbury Group Aggregates”, *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, National Building Research Institute, Pretoria, 1981, Article S252/31.
10. Juenger, M. C. G. and Ostertag, C. P., “Alkali-Silica Reactivity of Large Silica Fume-Derived Particles”, *Cem. Concr. Res.*, Vol.34, No.8, 2004, pp.1389~1402.
11. MacCoy, E. J. and Caldwell, A. G., “New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion”, *J. Am. Concr. Inst.*, Vol.22, 1951, pp.693~706.
12. Diamond, S. and Ong, S., “The Mechanisms of Lithium Effects on ASR”, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Concrete Society of UK, London, 1992, pp.269~278.
13. Hobbs, D. W., “Deleterious Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction: Influence of PFA and Slag”, *Magn. Concr. Res.*, Vol.36, 1986, pp.191~205.
14. Diamond, S., “Alkali Silica Reaction-Some Paradoxes”, *Cem. Concr. Compos.*, Vol.19, 1997, pp.391~401.
15. St. John, D. A. and Freitag, S. A., “Fifty Years of Investigation and Control of AAR in New Zealand”, *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Proceedings of the 10th International Conference*, Melbourne, 1996, pp.150~157.
16. Kawamura, M. and Fuwa, H., “Effect of Lithium Salts on ASR Gel Composition and Expansion of Mortars”, *Cem. Concr. Res.*, Vol.33, 2003, pp.913~919.
17. Yi, C. K. and Ostertag, C. P., “Strengthening and Toughening Mechanisms in Microfiber Reinforced Cementitious Composites”, *J. Mater. Sci.*, Vol.36, 2001, pp.1513~1522.
18. ASTM C 1260-94, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards v.04.02, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1999, pp.650~653.
19. Turanlı, L., Shomglin, K., Ostertag, C. P., and Monteiro, P. J. M., “Reduction in Alkali-Silica Expansion due to Steel Microfibers”, *Cem. Concr. Res.*, Vol.31, 2001, pp.827~835.
20. Ostertag, C. P. and Yi, C. K., “Quasi-Brittle Behavior of Cementitious Matrix Composites”, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.278, 2000, pp.95~98.
21. Powers, T. C. and Steinmour, H. H., “Part I-The Chemical Reactions and Mechanisms of Expansion”, *ACI J.*, Vol.26, 1955, pp.497~515.
22. Bleszynski, R. F. and Thomas, M. D. A., “Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solution”, *Adv. Cem. Based Mater.*, Vol.7, 1998, pp.66~78.
23. Durand, B., Berard, J., and Roux, R., Soles, J. A. “Alkali-Silica Reaction: the Relation between Pore Solution Characteristics and Expansion Test Results”, *Cem. Concr. Res.*, Vol.20, 1990, pp.419~328.

24. Sposito, G., *The Surface Chemistry of Soils*, Oxford University Press, New York, 1984
25. Prezzi, M., Monteiro, P. J. M., and Sposito, G., "The Alkali-

Silica Reaction, Part I: Use of the Double-Layer Theory to Explain the Behavior of Reaction-Product Gels", *ACI Mat. J.*, Vol.94, No.1, 1997, pp.10~17.

요 약 Steel microfiber (SMF)가 알칼리-실리카 반응 (ASR)에 미치는 영향을 두 가지 종류 (부순 오팔과 직경이 일정한 pyrex 막대)의 반응 골재를 사용하여 알아보았다. ASR에 의한 균열은 기준 모르타르에서 쉽게 발견되었으나 SMF 모르타르의 균열은 아주 제한적 이었다. SMF의 균열 진전 제어 메커니즘을 통하여 ASR에 의한 모르타르의 강도 저하와 팽창을 효과적으로 막을 수 있었고, ASR 생성물들의 유동성이 저하됨을 알 수 있었다. ASR 생성물의 성분을 microprobe 분석과 ICP 분광계를 이용하여 알아보았다. SMF의 구속 효과는 액체상태인 ASR 생성물의 높은 나트륨이온과 규소이온의 농도를 초래하였으며, 높은 이온의 농도는 ASR 알칼리-실리카 반응성을 저하하는 원인으로 생각되어 진다.

핵심용어 : 알칼리-실리카 반응, 미세균열, 팽창, 인장특성, 섬유보강