



알칼리-실리카 반응에 의한 모르타르 봉의 SEM과 EPMA 분석을 통한 미세구조 연구

전쌍순^{1)*} · 이효민²⁾ · 진치섭³⁾

¹⁾Texas A&M University ²⁾부산대학교 지구환경시스템학부 ³⁾부산대학교 토목공학과

Microstructural Study of Mortar Bar on Akali-Silica Reaction by Means of SEM and EPMA Analysis

Ssang-Sun Jun,^{1)*} Hyo-min Lee,²⁾ and Chi-Sub Jin³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, 77843, USA

²⁾Div. of Earth and Environmental Science System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

ABSTRACT In this study alkali reactivity of crushed stone was conducted according to the ASTM C 227 that is traditional mortar bar test, and C 1260 that is accelerated mortar bar test method. The morphology and chemical composition of products formed in mortar bar, 3 years after the mortar bar tests had been performed, were examined using scanning electron microscopy (SEM) with secondary electron imaging (SEI) and electron probe microanalysis (EPMA) with backscattered electron imaging (BSEI). The crushed stone used in this study was not identified as being reactive by ASTM C 227. However, mortar bars exceeded the limit for deleterious expansion in accelerated mortar bar test used KOH solution. The result of SEM (SEI) analysis, after the ASTM C 227 mortar bar test, confirmed that there were no reactive products and evidence of reaction between aggregate particles and cement paste. However, mortar bars exposed to alkali solution (KOH) indicated that crystallized products having rosette morphology were observed in the interior wall of pores. EPMA results of mortar bar by ASTM C 227 indicated that white dots were observed on the surface of particles and these products were identified as Al-ASR gels. It can be considered that the mortar bar by ASTM C 227 started to appear sign of alkali-silica reaction in normal condition. EPMA results of the mortar bar by ASTM C 1260 showed the gel accumulated in the pores and diffused in to the cement matrix through cracks, and gel in the pores were found to be richer in calcium compared to gel in cracks within aggregate particles. In this experimental study, damages to mortar bars due to alkali-silica reaction (ASR) were observed. Due to the increasing needs of crushed stones, it is considered that specifications and guidelines to prevent ASR in new concrete should be developed.

Keywords : alkali-silica reaction, reactive aggregate, SEM, EPMA, mortar bar test method

1. 서 론

국외에서는 알칼리-실리카 반응(alkali-silica reaction, ASR)으로 인한 콘크리트구조물의 피해 사례가 보고됨에 따라 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 반면, 국내에서는 이에 대한 연구 인식이 부족한 실정이다. 1990년대부터 일부 골재가 알칼리 반응성이 있는 것으로 보고는 되었지만^{1,2)} 심각한 피해 사례는 보고된 적이 없었기 때문에³⁾ 국외에 비해서 연구가 활발히 진행되지 않은 것으로 판단된다. 국내는 1990년에 들면서 양질의

골재 부족현상이 일어나면서 쇄석골재의 사용이 증가하였다.⁴⁾ 하지만 쇄석골재 사용으로 발생할 수 있는 알칼리-실리카 반응에 대한 검토 없이 사용되었을 경우, 반응성 골재가 사용된 콘크리트구조물이 보통 5~15년 후에 알칼리-실리카 반응 현상⁵⁾을 보이는 것을 감안하면, 최근이나 향후 알칼리-실리카 반응으로 인한 문제점들이 나타날 수 있을 것으로 우려된다. 이미 최근에 알칼리-실리카 반응으로 인한 구조물 손상이 보고된 바 있으며,⁶⁾ 유해 가능성 있는 쇄석골재 또한 계속해서 보고되고 있다.⁷⁾

알칼리-실리카 반응에 영향을 줄 수 있는 요인은 여러 가지가 있지만, 국외에서는 알칼리-실리카 반응의 요인으로 시멘트의 알칼리 함량을 우려해 등가알칼리량(Na₂O_{eq})이 0.6% 미만인 저알칼리형 시멘트 사용을 규정

*Corresponding author E-mail : ssjun97@gmail.com

Received April 14, 2009, Revised June 19, 2009

Accepted July 13, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

하고 있다. 하지만 국내 8개 시멘트 회사에서 1980년대 후반부터 제조한 보통포틀랜드시멘트의 화학성분을 살펴보면, 등가알칼리량이 최저 0.73%에서 최고 1.02%로 평균 0.88%로 고알칼리에 해당된다.⁸⁾ 환경적 문제로 인한 시멘트 제조 공정의 변화로 시멘트의 알칼리 함량이 증가됨에 따라 알칼리-실리카 반응으로 인한 문제가 더욱 심화될 수 있을 것으로 예상된다.^{9,10)}

알칼리-실리카 반응은 쇄석골재 내에 존재하는 반응성 광물과 시멘트의 알칼리 성분(Na^+ , K^+)이 반응하여 알칼리-실리카 gel을 형성하고, 이 반응생성물이 팽창하여 골재와 구조물에 균열을 발생시킴으로서 구조물의 내구성에 심각한 영향을 미치게 되는 것이다.

이 연구에서는 국내에서 생산되는 쇄석골재의 반응성과 알칼리-실리카 반응으로 인해 구조물 내에 어떠한 변화가 있는지 미세구조 분석을 통해 알아보하고자 한다. 따라서, 알칼리-실리카 반응성을 평가하는데 적용되는 ASTM C 227과 ASTM C 1260 모르타르 붕 시험법으로 반응성을 평가하고, 제작된 모르타르를 3년간 일반 환경에 노출시킨 뒤, 알칼리-실리카 반응으로 인해 생성될 수 있는 반응생성물의 확인과 화학분석을 위해 scanning electron microscopy(이하 SEM)와 electron probe microanalysis(이하 EPMA)를 이용하여 모르타르 내의 미세구조 분석을 실시하였다.

2. 시험 개요

2.1 시험 재료

사용된 시멘트는 국내 보통포틀랜드시멘트로서, 등가알칼리량($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0.658\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)이 0.75%로 고알칼리 시멘트에 해당하며, 화학성분은 Table 1과 같다. 골재는 울산 울주 지역에서 생산되는 쇄석골재를 사용하였으며, 암석 유형 확인을 통해 다량의 적색 세일과 소량의 흑색 세일이 혼합된 쇄석골재로 퇴적암류에 해당되는 암석임을 알 수 있었다. 쇄석골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of cement (%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
20.5	6.0	3.1	61.6	3.2	2.1	0.95	0.12

Table 2 Physical properties of aggregate

Density (g/cm^3)	2.62
Absorption (%)	1.52
Bulk density (kg/m^3)	1,522
Amount of material finer than no. 200 sieve (%)	0.14
Organic impurities	Color lighter than the standard color solution

2.2 시험 방법 및 계획

2.2.1 모르타르 붕 제작

(1) ASTM C 227 시험법에 따른 모르타르 붕

ASTM C 227 시험법에서는 제작된 모르타르 붕의 6개월 후 길이변화율이 0.1% 이상일 경우, 시멘트와 골재의 배합이 해로운 반응을 일으킬 수 있는 것으로 평가한다. 모르타르는 시멘트와 골재의 무게비가 1:2.25가 되도록 하고, 혼합수는 플로우치(flow value)가 105~120 정도가 되도록 첨가한다. 따라서, 물·시멘트 비(W/C)는 첨가하는 혼합수에 따라 결정된다. 이 연구에서는 플로우치가 117을 만족하도록 혼합수를 첨가하였으며, 이에 따른 물·시멘트 비(W/C)는 0.57로 나타났다. 사용된 시편의 치수는 25×25×300 mm이며, 제작한 모르타르 붕은 24시간 뒤 초기길이(initial reading)를 측정 한 후, 38°C와 95% 이상의 상대습도가 유지되는 곳에서 물이 접촉되지 않도록 보관하였다. 시험 시편의 길이변화는 시험법에 따라 6개월에 걸쳐서 측정 한 후, 장기적으로 시편의 길이변화를 살펴보기 위해 2년 동안 측정하였다.

(2) ASTM C 1260 시험법에 따른 모르타르 붕

ASTM C 1260 시험법에서는 모르타르 붕 제작 후 16일에 0.1% 이상의 팽창을 나타낼 경우, 사용된 골재는 유해 가능성이 있는 것으로 판단한다. 모르타르의 시멘트·골재 무게비는 1:2.25, 물·시멘트 비는 0.47로 배합하였다. 시험 시편의 치수는 25×25×300 mm이며, 제작한 모르타르 붕은 24시간 뒤 초기길이를 측정하고 80°C로 유지되는 물에 보관하였다. 24시간 후에 시편의 길이를 측정(zero reading)하고, 시편을 1N KOH 용액이 담긴 용기에 넣어 80°C로 유지하였다. ASTM C 1260 시험법에서는 반응성 측진을 위해 NaOH 알칼리 용액이 요구되지만, 이 연구에서는 K^+ 알칼리 이온에 따른 알칼리-실리카 반응성을 검토하였다. 모르타르 길이변화는 zero reading 후 28일까지 측정하였다.

2.2.2 SEM

모르타르 붕 시험을 시행한 후, 제작한 모르타르 붕 내에 생성된 반응생성물 확인을 위해 SEM 분석을 실시하였다. SEM은 Leo 430을 사용하였다. 시편 단면의 secondary electron image(이하 SEI)를 이용하였으며, 편평하고 부드러운 단면을 얻기 위해 low-speed rock saw를 이용하여 모르타르 붕을 자른 뒤, 시험 시편의 단면을 진공 상태에서 gold coating 하였다(Fig. 1).

2.2.3 EPMA

모르타르 붕 시험 실행 후, 모르타르 내 생성 물질의 화학분석을 위해 EPMA를 실시하였다. EPMA 분석은 카메라 SX-51 electron microprobe을 이용하여 측정하였다. 시험 시편 단면의 backscattered electron image(이하 BSEI)를 이용하였으며, 시험을 위한 시편은 diamond lab

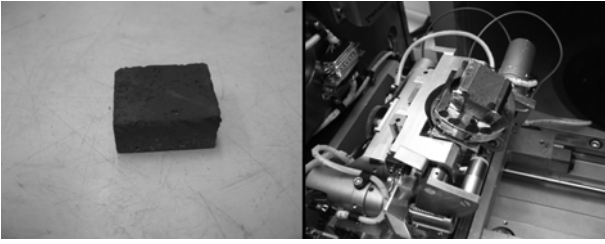


Fig. 1 Sample preparation for SEM secondary electron image (SEI) observation

wheel(Fig. 2)을 이용하여 EPMA 샘플 홀더(holder)에 맞도록 제작하였다. 다이아몬드 연마제(diamond polishing compound) 와 polisher를 이용하여 시편 표면을 polishing 한 후, 시편 시편(polished cross section)은 BSEI 관찰을 위하여 carbon coating 하였다(Fig. 3). 샘플의 미세구조 관찰은 15 kV, 20 nA에서 실시하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 모르타르 봉 시험 결과

알칼리-실리카 반응성 판정을 위해 모르타르 봉 시험 법인 ASTM C 227과 C 1260으로 쇄석골재(퇴적암 골재)의 반응성을 살펴보았다. 사용한 쇄석골재의 ASTM C 227에 의한 시험 결과의 일부는 필자에 의해 이미 보고된 바 있으며,⁷⁾ 이 연구와의 필요에 의해 일부 다시 언급하고자 한다.

시험 결과 반응성 판정을 위해 요구되는 재령 6개월 경과 후, 0.1% 이상의 팽창을 나타내지 않았으며, 재령 1년 후에는 모르타르 봉의 팽창률에 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다(Fig. 4). Alexander와 Mindess는 건조



Fig. 2 Diamond lab wheel

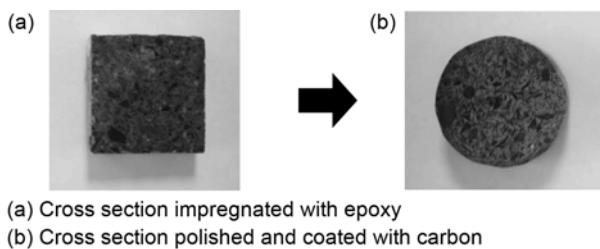


Fig. 3 Sample preparation for EPMA backscattered electron image (BSEI) observation

한 기후에 노출된 콘크리트구조물과 비교했을 때, 습하거나 수분에 노출된 구조물이 알칼리-실리카 반응에 의한 영향을 받기 쉽다고 언급하고 있다.¹¹⁾ 이 연구에서는 장기간에 걸친 알칼리-실리카 반응 가능성을 평가하기 위하여 시험 시편은 ASTM C 227 시험법에서 요구하는 38°C의 온도와 95% 이상의 상대습도를 유지시켜 모르타르를 관찰하였다. 그 결과, Fig. 4에 보는 바와 같이 재령 2년 후에도 팽창률은 0.01%를 초과하지 않았다.

하지만, 알칼리가 유입될 수 있는 환경을 고려하여 ASTM C 1260 시험법(1N KOH, 80°C)으로 알칼리-실리카 반응성을 검토한 결과, 본 연구에서 사용된 쇄석골재는 시험 시작 3일 후 급격한 팽창을 보이기 시작하여 이미 재령 9일에 팽창률 0.1%의 시험 기준을 초과하는 것을 알 수 있었다(Fig. 5). 재령 14일 이후 재령 28일의 모르타르 봉 팽창률은 0.3%로 나타났으며, 이 때 시험 시편의 표면에는 눈으로 식별 가능한 균열이 확인되었다.

따라서, 사용한 쇄석골재(퇴적암 골재)는 ASTM C 227 시험법에 따라서는 무해한 골재로 간주되지만, 알칼리-

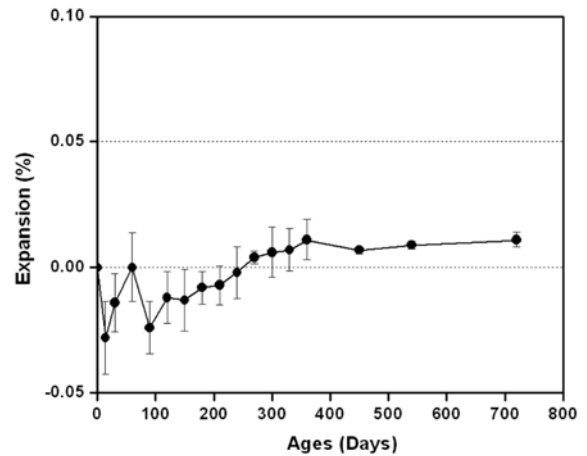


Fig. 4 Average linear expansion of mortar bar specimens (ASTM 227)

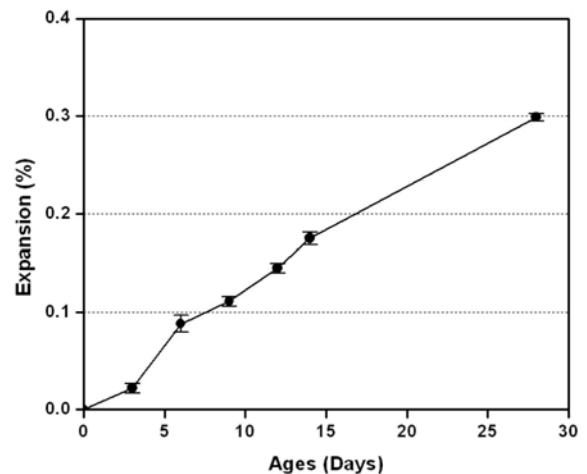


Fig. 5 Average linear expansion of mortar bar specimens (ASTM 1260)

실리카 반응 촉진 시험법인 ASTM C 1260에 의해서는 알칼리-실리카 반응성을 나타낼 수 있는 유해한 골재로 고려되며, 또한 KOH 알칼리 용액을 사용하여도 반응성이 촉진됨을 알 수 있었다. 실제로는 1N 정도의 KOH 알칼리 용액이 외부 환경에 존재하지 않을지 모르나, KOH 용액으로 반응성 촉진 시험을 실행한 결과(ASTM C 1260), 여기서 사용한 골재가 유해한 골재일 가능성이 높은 것으로 나타났다. 이는 ASTM C 1260 보다 실제 환경 조건에 가까운 시험조건인 ASTM C 227 모르타르 봉 시험에서 2년간 뚜렷한 팽창을 나타내지 않았더라도 시간이 지남에 따라 알칼리-실리카 반응을 나타낼 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 판단된다. 즉, 두 방법의 실험 결과는 여기서 사용한 쇄석골재가 반응이 천천히 일어나는 골재일 가능성을 보여주는 것으로 판단된다. 실제 콘크리트구조물이 설치될 경우, 환경조건에 따라 주변 환경으로부터 알칼리가 콘크리트에 유입될 수 있다. 이러한 곳에 설치될 콘크리트구조물에 사용되는 쇄석골재일 경우에는 ASTM C 227 시험법을 적용하여 골재의 안정성을 평가하는 것은 위험성이 따를 것으로 판단된다.

3.2 SEM 분석

쇄석골재(퇴적암 골재)를 이용하여 ASTM C 227과 ASTM C 1260 모르타르 봉 시험법으로 반응성을 평가한 결과, ASTM C 1260에 의해서는 유해한 팽창을 나타냈으나, ASTM C 227에서는 뚜렷한 팽창을 나타내지 않았다. 하지만 ASTM C 1260에 의해 사용된 골재가 유해 가능성이 있는 것으로 판정됨에 따라 ASTM C 227 시험법에 따라 제작된 모르타르에서도 일정한 시간 경과 후 알칼리-실리카 반응이 확인될 가능성이 있는 것으로 판단되어 모르타르 내의 미세구조 분석을 실시하였다. 반응성 골재가 사용된 콘크리트구조물은 보통 5~15년 후에 알칼리-실리카 반응 현상이 나타나는 것으로 보고되고 있지만,⁹⁾ 이 연구에서 제작된 모르타르 봉 시험편의 크기(25 × 25 × 300 mm)를 고려하여 일반 환경에 3년간 노출시킨 뒤, SEM 분석을 실시하였다. SEM 분석에 사용한 모르타르 봉들은 ASTM C 227 시험법으로 2년간 그리고 촉진시험법인 ASTM C 1260 시험법으로 28일간 길이변화율을 측정 후, 일반 환경에 보관하였다. 따라서, 각각의 모르타르 봉들은 시험 배합 후, 5년 그리고 3년이 경과한 시험체이다.

Fig. 6은 ASTM C 227에 의한 모르타르 봉의 SEM SEI를 나타낸다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 얇고 긴 막대기 모양의 에트린자이트(ettringite)가 다소 규칙적인 배열로 모르타르 봉 내 pore에 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 ASTM C 1260에 의한 모르타르 봉의 SEM SEI를 보여준다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, ASTM C 1260에 의한 모르타르 봉의 pore 내에 일반적으로 알칼리-실리카 반응에 의한 겔의 형태로 알려진¹²⁻¹⁴⁾ 장미 모양(rossette morphology)의 반응생성물이 형성된 것을 확

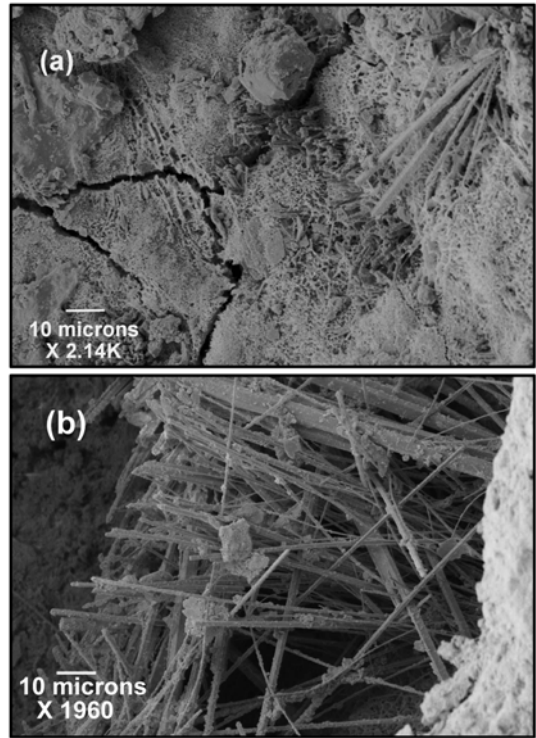


Fig. 6 SEM SE images of a cross section taken from a mortar bar after ASTM C 227 mortar bar test had been performed

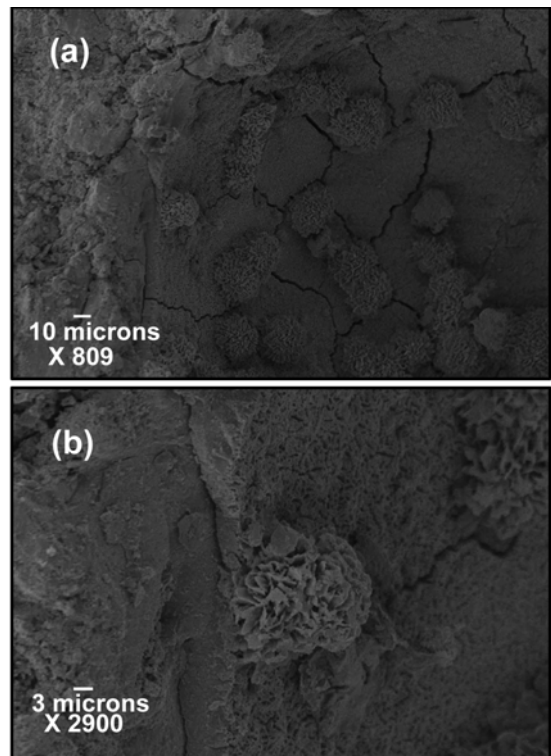


Fig. 7 SEM SE images of a cross section taken from a mortar bar after ASTM C 1260 mortar bar test had been performed

인할 수 있으며, 또한 시멘트페이스트(cement paste)에 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. SEM SEI 분석 결과, 같은 쇄석골재(퇴적암 골재)를 사용하여 각각 다른

시험법(ASTM C 227, ASTM C 1260)으로 제작한 모르타르 내에서 균열은 동일하게 발생하였지만, 모르타르 내에 생성된 반응생성물은 확연히 다른 것을 확인할 수 있었다(Figs. 6, 7). ASTM C 227에 의해 제작된 모르타르 봉에서는 골재 입자와 시멘트페이스트 사이에 알칼리-실리카 반응에 의한 흔적이나 반응생성물이 확인되지 않았지만, ASTM C 1260에 의해 유해한 팽창률을 나타내었던 모르타르 봉 내에서는 알칼리-실리카 반응에 의한 반응생성물(ASR gel)을 확인할 수 있었다(Fig. 7).

3.3 EPMA 분석

모르타르 봉 내에 형성된 반응생성물의 화학분석을 위해 EPMA를 실시하였다. SEM 분석에서 사용한 동일한 조건의 모르타르 봉을 사용하였다. Figs. 8과 9는 퇴적암 골재로 각각 제작한 모르타르 봉 단면(polished cross section)의 BSEI를 보여준다.

Fig. 8은 ASTM C 227에 의해 제작된 모르타르 봉의 BSEI를 나타낸다. BSEI(Fig. 8)에서 보는 바와 같이, 골재 입자 내에 균열이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 또한 전체적으로 BSEI를 분석한 결과 시멘트페이스트 내에도 미세한 균열이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 그리고 secondary calcite(Fig. 8, P1)이 골재 입자 내의 균열을 따라 확인되었다. BSEI 상에서 하얀색의 점처럼 보이는 생성물(P2)들이 골재 표면에서 관찰되었으며, 이 반응생성물의 EPMA 분석 결과 Al-ASR gel인 것으로 확인되었다. 이 반응생성물의 화학성분은 Table 3과 같다. 반응성 촉진 시험법이 아닌 ASTM C 227(38°C, 100% RH) 규정에 의해 무해한 것으로 판정되었던 시멘트-골재 배합이 5년 경과 후, EPMA 분석에서 Al-ASR gel이 부분적으로 미세하게 골재 입자 표면에서 확인됨에 따라

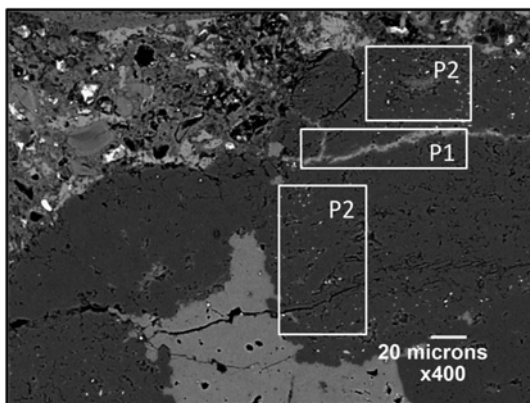


Fig. 8 EPMA BSE image of a cross section taken from a mortar bar after ASTM C 227 mortar bar test had been performed

현재 알칼리-실리카 반응이 일어나고 있음을 보여주는 것으로 판단된다. 이는 본 연구에서 사용한 쇄석골재가 ASTM C 227 시험법에서는 무해한 골재로, 촉진 시험법(ASTM C 1260)에서는 유해한 골재로 판정되어 쇄석골재가 반응이 천천히 일어나는 골재일 가능성이 있는 것으로 고려한 결과를 뒷받침하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 본 연구에서 사용한 쇄석골재(퇴적암 골재)의 반응성 촉진 시험(ASTM C 1260)에 의한 모르타르 봉의 BSEI를 보여준다. Fig. 9는 모르타르 봉의 pore 내에 ASR gel이 형성된 것을 나타내고 있다. Fig. 9(a)에서는 ASR gel이 축적된 pore(P3)내에 일부 미세하게 발생된 균열과 pore와 시멘트페이스트 경계면을 따라 발생된 균열을 관찰할 수 있다. Fig. 9(b)에서는 pore에 가득 생성된 ASR gel이 시멘트페이스트로 진행된 균열을 통해 흘러나온 흔적(P4)을 보여주고 있으며, 이는 EPMA 분석 결과 확인되었다. ASR gel 성분은 SiO₂-CaO-Na₂O-K₂O로,¹⁵⁻¹⁷⁾ 골재 입자 내에 생성된 균열 내에서도 ASR gel이 존재하는 것이 확인되었다. 하지만 EPMA 분석 결과, 대체적으로 pore 내에서 확인된 gel이 골재 입자 내의 균열에서 확인된 gel에 비해 Ca 함량이 더 풍부한 것으로

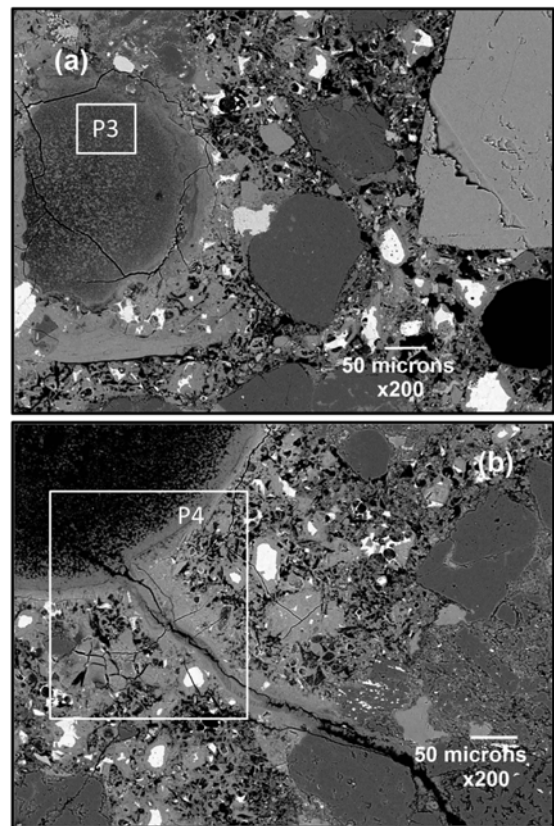


Fig. 9 EPMA BSE images of a cross section taken from a mortar bar after ASTM C 1260 mortar bar test had been performed

Table 3 EPMA analysis of ASR gel formed on the sedimentary particle

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
41.31	0.02	13.38	0.05	0.20	1.30	1.10	18.30	6.77	0.20	82.63

4. 결 론

나타났다. 알칼리-실리카 반응에 관한 일부 문헌에서도 이러한 현상이 관찰되고 있으며,^{15,16,18)} Thaulow는 gel의 Ca 함량은 gel과 페이스트(paste) 사이의 반응에 의한 것이라고 설명하고 있다.¹⁸⁾ 화학분석 결과, ASR gel에 의해 열화된 모르타르 봉 내에서, 골재 입자 주위에서 멀어짐에 따라 gel 내의 Si 함량은 감소하면서 Ca 함량은 증가하는 것을 알 수 있었다. EPMA 결과, 모르타르 봉 pore 내에는 Ca-rich gel로 채워져 있는 것으로 나타났는데, Turanli 등은 Ca-rich 결정체 생성물은 보통 장미형(rose morphology)의 형태로 관찰될 수 있다고 보고하고 있다.¹²⁾ 이 연구의 결과에서도 Ca-rich gel로 채워져 있는 pore 내에서 Fig. 7의 SEM SEI에 보는 바와 같이, 꽃잎형의 반응생성물이 관찰되었으며, 또한 쉘석골재(퇴적암 골재)와 가까이 있는 pore 내에서 확인되는 것을 알 수 있었다. EPMA 측정 결과는 Table 4에 나타내었으며, 이 측정값의 결과들은 반응생성물이 발생한 6~8 지점들의 평균값으로 얻어졌다. Table 4는 본 연구에서 측정한 반응생성물의 화학성분과 알칼리-실리카 반응에 관련된 문헌에서 보고된^{15,16)} ASR gel의 화학성분과의 비교를 나타낸다. 본 연구에서의 측정값들은 Peterson과 Katayama 등에 의해 보고된 ASR gel에 대한 화학성분과 비슷한 것을 알 수 있다.

EPMA 화학분석 결과, 반응성 촉진 시험 후의 모르타르 봉에서는 골재 입자의 균열과 pore 내에 알칼리-실리카 gel로 채워져 있는 것으로 확인되었으며, ASTM C 227에 의해 무해한 길이변화율을 나타내었던 모르타르 봉에서는 pore 내에서는 gel이 확인되지 않았지만 골재 입자 표면에서는 부분적으로 미세하게 반응성을 보이고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 현재 국내에서 사용되고 있는 쉘석골재가 알칼리-실리카 반응을 발생시키고 있음을 미세구조를 통한 실험적 결과로 나타남으로서, 향후 사용된 쉘석골재의 알칼리-실리카 반응으로 인한 문제점들이 나타날 수 있을 것으로 우려된다.

Table 4 EPMA analysis of reaction products in the sedimentary aggregate

	ASR gel		Tetsuya Katayama (2004)		Karl Peterson (2006)	
	Paste	Aggregate	Paste	Aggregate	Paste	Aggregate
SiO ₂	46.65	61.27	45.59	52.43	49.6	54.10
TiO ₂	0.00	0.01	0.54	0.15	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.85	0.13	0.37	3.41	0.30	0.20
Fe ₂ O ₃	0.18	0.18	0.00	0.00	0.10	0.10
MgO	0.12	0.05	0.00	0.17	0.00	0.00
CaO	30.86	14.19	29.20	13.87	33.40	18.00
Na ₂ O	0.01	0.02	3.47	4.50	0.50	2.10
K ₂ O	7.59	7.03	4.37	8.30	1.20	7.20
SO ₃	0.08	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.09	0.21	0.20	0.10
Total	86.45	82.90	84.05	83.03	85.40	81.90
Si/Ca	1.51	4.32	1.56	3.78	1.48	3.00

현재 국내에서 생산되고 있는 쉘석골재(퇴적암 골재)를 이용하여 ASTM C 227과 ASTM C 1260 모르타르 봉 시험법으로 반응성을 평가한 후, SEM과 EPMA를 이용하여 모르타르 내의 미세구조 분석을 실시한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) ASTM C 227에 의해서는 0.01% 미만의 팽창률을 나타낸 쉘석골재는 ASTM C 1260 반응 촉진 시험에 의해서는 0.3% 정도의 유해한 길이변화율을 나타내었다. 이는 ASTM C 1260 시험법(1 N KOH, 80°C) 보다 실제 환경 노출 조건에 가까운 시험조건인 ASTM C 227(38°C, 100% RH) 모르타르 봉 시험에서 2년간 뚜렷한 팽창을 나타내지 않았다 하더라도 시간이 지남에 따라 알칼리-실리카 반응을 나타낼 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 판단된다.
- 2) K⁺ 알칼리 이온을 이용하여 ASTM C 1260 모르타르 봉 시험을 실시한 결과, KOH 알칼리 용액을 사용하여도 반응성이 촉진됨을 알 수 있었다.
- 3) 모르타르 봉 시험 후, 일반 환경에 3년간 노출시킨 모르타르 봉의 SEM SEI 분석결과, ASTM C 227에 의해 제작된 모르타르 봉에서는 골재 입자와 시멘트페이스트 사이에 알칼리-실리카 반응에 의한 흔적이나 pore 내에서 반응생성물이 확인되지 않았다. 하지만 ASTM C 1260에 의한 모르타르 봉 내에서는 알칼리-실리카 반응의 전형적인 반응생성물로 알려진 장미형(rose morphology)의 알칼리-실리카 gel이 확인되었다.
- 4) EPMA 분석 결과, ASTM C 227에 의해 무해한 길이변화율을 나타내었던 모르타르 봉에서도 Al-ASR gel이 골재 입자 표면에서 부분적으로 미세하게 확인됨에 따라 현재 알칼리-실리카 반응이 일어나고 있음을 보여주는 것으로 판단된다. 그리고 반응성 촉진 시험 후의 모르타르 봉에서는 골재 입자에 발생된 균열 내부뿐만 아니라 pore 내부에 알칼리-실리카 gel이 축적되어 있는 것으로 확인되었다.
- 5) 국내에서 현재 생산되는 쉘석골재 사용에 따른 구조물 내부에 발생한 변화를 미세구조를 통해 확인한 실험 결과, 알칼리-실리카 반응으로 인한 골재 입자의 균열과 반응생성물을 확인할 수 있었다. 따라서 국내 쉘석골재 사용량 증가에 따라 새로운 건설에 있어서 알칼리-실리카 반응 방지를 위한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(KRF-2006-214-D00169).

참고문헌

1. 이장화, 김성욱, “화학법에 따른 쇄석골재의 알칼리 반응성 분석,” 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 4권, 2호, 1992, pp. 25~30.
2. 윤재환, 정재동, 이영수, “쇄석골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 6권, 2호, 1994, pp. 108~117.
3. 윤재환, “콘크리트의 알칼리·골재반응과 대책,” 콘크리트학회지, 4권, 1호, 1992, pp. 11~16.
4. 고경택, 류금성, 윤기원, 한천구, 이장화, “잔골재 종류가 콘크리트 물성에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 4호, 2006, pp. 459~467.
5. Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings, R., Sherman, T. W., and Greene, J. L., “Alkali-Silica Reaction Mitigation: State of the Art and Recommendations,” *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 5, 2002, pp. 480~489.
6. 홍승호, 한승환, 윤경구, “알칼리-실리카 반응에 의한 시멘트 콘크리트 포장 파손 사례,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp. 355~360.
7. 전쌍순, 이효민, 서기영, 황진연, 진치섭, “쇄석골재의 알칼리-실리카 반응 방지 대책,” 콘크리트학회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 129~137.
8. 전쌍순, “암석 종류에 따른 국내 쇄석골재의 알칼리-실리카 반응성,” 박사학위논문, 부산대학교 대학원, 2006.
9. 전쌍순, 이효민, 진치섭, 황진연, “메타카올린 치환에 따른 알칼리-실리카 반응 팽창 저감효과,” 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집, 16권, 1호, 2004, pp. 360~363.
10. Aquino, W., Lange, D. A., and Olek, J., “The Influence of Metakaolin and Silica Fume on the Chemistry of Alkali-Silica Reaction Products,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, No. 6, 2001, pp. 485~493.
11. Alexander, M. and Mindess, S., “Aggregates in Concrete,” *Modern Concrete Technology Series*, Vol. 33, 2005, pp. 308~331.
12. Turanli, L., Bektas, F., and Monteiro, P. J. M., “Use of Ground Clay Brick as a Pozzolan Material to Reduce the Alkali-Silica Reaction,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 10, 2003, pp. 1539~1542.
13. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., “Alkali-Aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 2, 2007, pp. 175~183.
14. Bektas, F., Turanli, L., Topal, T., and Goncuoglu, M. C., “Alkali Reactivity of Mortars Containing Chert and Incorporating Moderate-Calcium Fly Ash,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp. 2209~2214.
15. Peterson, K., Gress, D., Dam, T. V., and Sutter, L., “Crystallized Alkali-Silica Gel in Concrete from the Late 1980s,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 8, 2006, pp. 1523~1532.
16. Katayama, T., “How to Identify Carbonate Rock Reactions in Concrete,” *Materials Characterization*, Vol. 53, No. 2-4, 2004, pp. 85~104.
17. Fernandes, I., Noronha, F., and Teles, M., “Examination of the Concrete from an Old Portuguese Dam: Texture and Composition of Alkali-Silica Gel,” *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 11-12, 2007, pp. 1160~1170.
18. Thaulow, N., Jakobsen, U. H., and Clark, B., “Composition of Alkali Silica Gel and Ettringite in Concrete Railroad Ties: SEM-EDX and X-Ray Diffraction Analyses,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 2, 1996, pp. 309~318.

요약 이 연구에서는 알칼리-실리카 반응성을 평가하는데 적용되는 ASTM C 227과 ASTM C 1260 모르타르 붕 시험법으로 쇄석골재의 반응성을 평가하고, 제작된 모르타르를 3년간 일반 환경에 노출시킨 뒤, 알칼리-실리카 반응으로 인해 생성될 수 있는 반응생성물 확인과 화학분석을 위해 SEM과 EPMA 분석을 실시하였다. 이 연구에서는 SEM의 secondary electron image(SEI)와 EPMA의 backscattered electron image(BSEI)를 이용하였다. 이 연구에 사용된 쇄석골재는 ASTM C 227에 의해서는 2년간 뚜렷한 팽창을 나타내지 않았지만, KOH 용액을 이용한 반응촉진법에 의해서는 유해 가능성이 있는 것으로 나타났다. 모르타르 붕 시험 시행 후, SEM SEI 분석 결과, ASTM C 227에 의해 제작된 모르타르 붕에서는 골재 입자와 시멘트페이스트 사이에 알칼리-실리카 반응에 의한 흔적이거나 pore 내에서 반응생성물이 확인되지 않았다. 하지만 ASTM C 1260에 의한 모르타르 붕에서는 알칼리-실리카 반응의 전형적인 반응생성물로 알려진 꽃잎형(rose morphology)의 알칼리-실리카 겔(gel)이 확인되었다. EPMA 분석 결과, ASTM C 227에 의한 모르타르 붕에서도 골재 입자 표면에 부분적으로 미세하게 Al-ASR gel이 확인됨에 따라 ASTM C 227에 의해 2년간 무해한 팽창을 나타내었던 모르타르 붕에서도 알칼리-실리카 반응이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 반응성 촉진 시험 후의 모르타르의 EPMA 분석 결과에서는 골재 입자에 발생된 균열 내부뿐만 아니라 pore 내부에 알칼리-실리카 겔이 축적되어 있는 것으로 나타났으며, 또한 pore 내에서 확인된 겔이 골재 입자 내부에 생성된 겔에 비해 Ca 함량이 더 풍부한 것으로 나타났다. 국내에서 생산되는 쇄석골재 사용으로 인하여 구조물 내부에 발생한 변화를 미세구조를 통해 확인한 결과, 알칼리-실리카 반응에 의한 구조물 열화를 알 수 있었다. 따라서, 국내 쇄석골재 사용량 증가에 따라 새로운 건설에 있어서 알칼리-실리카 반응 방지를 위한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 알칼리-실리카 반응, 반응성 골재, SEM, EPMA, 모르타르 붕 시험