

## 쇄석 골재의 알칼리-실리카 반응 방지 대책

전생순<sup>1)</sup> · 이호민<sup>2)\*</sup> · 서기영<sup>1)</sup> · 황진연<sup>2)</sup> · 진치섭<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 부산대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 부산대학교 지질학과

(2004년 12월 19일 원고접수, 2005년 1월 17일 심사완료)

## Preventive Measures on Alkali-Silica Reaction of Crushed Stones

Ssang-Sun Jun<sup>1)</sup>, Hyo-Min Lee<sup>2)\*</sup>, Ki-Young Seo<sup>1)</sup>, Jin-Yeon Hwang<sup>2)</sup>, Chi-Sub Jin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Geology, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

(Received December 19, 2004, Accepted January 17, 2005)

### ABSTRACT

In Korea, due to the insufficiency of natural aggregates and increasing needs of crushed stones, it is necessary to examine the alkali-silica reaction of the crushed stones. The reaction produces an alkali-silica reaction gel which can imbibe pore solution and swell to generate cracks that are visible in affected concrete. In general, crushed stones are tested by petrographic examination, chemical method and mortar-bar method, but the most reliable method is mortar-bar test. This study tested alkali-silica reactivity of crushed stones of various rock types using ASTM C 227 and C 1260, and compared the results of two test methods. This study also analyzed effects of particle size and grading of reactive aggregate on alkali-silica reaction expansion of mortar-bar. The effectiveness of mineral admixtures to reduce detrimental expansion caused by alkali-silica reaction was investigated through the ASTM C 1260 method. The mineral admixtures used were fly ash, silica fume, metakaolin and ground granulated blast furnace slag. The replacement ratios of 0, 5, 10, 15, 25 and 35% were commonly applied for all the mineral admixtures and the replacement ratios of 45 and 55% were additional applied for the admixtures that could maintain workability. The results indicate that replacement ratios of 25% for fly ash, 10% for silica fume, 25% for metakaolin or 35% for ground granulated blast furnace slag were most effective to reduce alkali-silica reaction expansion under the experimental conditions.

**Keywords :** crushed stone, alkali-silica reaction, fly ash, silica fume, metakaolin

### 1. 서 론

천연골재 고갈에 따른 국내의 골재 공급 부족은 심각한 문제가 되고 있다. 하상 골재 채취는 환경보호와 맞물려 이미 한계에 이르렀고, 쇄석 골재와 해사의 사용이 증가되고 있으나, 이들은 각각 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 최근 들어 사용되는 쇄석 골재는 골재를 구성하는 암석 중에 열역학적으로 불안정한 실리카 성분이 알칼리와 쉽게 반응하여 알칼리-실리카 반응을 일으킬 수 있다. 알칼리-실리카 반응은 콘크리트 구조물을 노화시키는 현상의 하나로, 그 특징은 콘크리트의 팽창을 수반하여 표면에 발생하는 거북이 등모양의 균열이나 철근콘크리트 구속방향으로 생성된 평행한 균열이다. 이러한 균열은 콘크리트의 역학적 및 기능적인 면에서 콘크리트 성능을 저

하시켜 콘크리트의 수명이 단축되고 콘크리트 구조물이 붕괴되는 결과를 초래하게 된다. 알칼리-실리카 반응에 의한 피해를 방지하기 위해서는 골재의 알칼리 반응성을 사전에 판정하고 그에 따른 예방책을 강구할 필요가 있다.

골재의 알칼리-실리카 반응성을 판정하는 방법은 암석학적 판정법(petrographic examination), 화학법(chemical method) 및 모르타르 바 법(mortar-bar method) 등이 일반적 방법으로 사용되고 있다. 이 중에서 암석학적 방법 및 화학법은 비교적 단시간에 판정 가능한 방법이지만 유해광물이 포함되는 경우, 그것이 유해한 피해로 연결될 것인가 여부에 대한 최종적인 판정은 모르타르 바 법에 의존하는 경우가 많다. 골재의 알칼리-실리카 반응성을 판정하는 방법 중 모르타르 바 법은 비교적 신뢰성이 높지만 판정 결과를 얻는데, 3개월에서 6개월, 길게는 1년이라는 장기간을 요한다. 그래서 실용적인 관점에서는 간편하고 신뢰성이 높으며 신속하게 판정할 수 있는 방법이 요구되어 진다. 콘크리트에 사용하는 골재가 알칼리 반응

\* Corresponding author

E-mail : hmlee61@pusan.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

성의 것인지 아닌지를 단기간 동안에 정확하게 판단하는 것이 중요하다. 하지만, 알칼리-실리카 반응은 매우 천천히 진행되기 때문에 골재가 콘크리트에 유해한 팽창을 일으키는 가를 단기간에 평가하기 위해서는 적절한 방법에 의해 알칼리-실리카 반응을 촉진하는 방법이 필요하다. 또한 콘크리트 구조물에 알칼리가 추가되는 환경에서는 알칼리-실리카 반응이 촉진됨으로 이러한 설치환경 조건 하에서 반응성 여부를 평가하는 것도 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 쇄석 골재의 알칼리-실리카 반응성을 평가하는 모르타르 바 시험방법 중 판정결과를 얻는데 6개월이 소요되는 ASTM C 227과 16일 만에 판정결과를 얻을 수 있는 ASTM C 1260을 선택하여 대표적 암석 유형별로 수집한 12종의 골재들을 대상으로 쇄석 골재의 반응성을 비교, 분석하였다. 또한 본 연구에서는 반응성 골재의 입자크기 및 입도가 모르타르 바의 알칼리-실리카 반응 팽창에 미치는 영향에 관하여 검토하였다.

콘크리트는 골재, 시멘트 및 물이 주 구성성분이나 내구성 향상, 작업성 및 경제성 등을 개선 향상시키기 위하여 광물 혼화재가 사용되고 있다. 산업폐기물의 활용과 자원 보호 차원에서 플라이애쉬<sup>1)</sup>, 고로슬래그미분말<sup>2)</sup>, 실리카폼<sup>3)</sup>이 광물 혼화재로 널리 사용되고 있고, 최근 우수한 포졸란 반응특성으로 인해 그 활용이 연구되고 있는 혼화재로 메타카올린<sup>4)</sup>이 있다. 혼화재의 용도는 상당히 많지만 본 연구에서는 쇄석 골재 사용으로 문제되고 있는 알칼리-실리카 반응에 있어서 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카폼 및 메타카올린을 혼화재료로 사용할 경우 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향을 알아보고자 시멘트에 대한 혼화재의 치환율을 달리하여 ASTM C 1260 시험법으로 알칼리-실리카 반응 팽창 저감효과를 평가하여 보았다.

**Table 1** Chemical composition of cement (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
20.5	6.0	3.1	61.6	3.2	2.1	0.95	0.12

**Table 2** Rock types, location, and characteristic features of aggregates used in this study

Agg. No.	Location of sampling aggregate	Rock types	Characteristic features
1	Buk-Gu, Busan	Volcanic rock	Recycled aggregate
2	Buk-Gu, Busan		Natural sand
3	Ulju-Gun, Ulsan	Sedimentary rock	Mesozoic ; Primarily red shale and minor amount of black shale included
4	Jinhae, Kyungnam	Altered volcanic rock	Mesozoic ; Highly altered near the contact of granite; Minor amount of granitic rock included
5	Kimhae, Kyungnam	Granitic rock	Mesozoic ; Biotite granite; Abundant weathered rock fragments contained
6	Kimhae, Kyungnam	Granitic rock	Mesozoic ; Hornblende granite
7	Kimhae, Kyungnam	Volcanic rock	Mesozoic ; Altered andesite
8	Kimhae, Kyungnam	Granitic and andesitic rock	Mixture of two rock types ; Artificial sand
9	Masan, Kyungnam	Metamorphic rock	Mesozoic ; Primarily hornfels and minor amount of black shale
10	Buk-Gu, Ulsan	Volcanic rock	Tertiary ; Ryolitic to andesitic in composition
11	Buk-Gu, Ulsan	Volcanic rock	Artificial sand of No.10
12	Bonghwa, Kyungbuk	Metamorphic rock	Quartzite

## 2. 시험개요

### 2.1 시험재료

#### 2.1.1 시멘트

사용한 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트로서, 화학성분은 Table 1과 같다. 알칼리-실리카 반응에 관련된 시멘트의 화학성분은 주로 K<sub>2</sub>O와 Na<sub>2</sub>O의 알칼리 성분이며, 일반적으로 등가알칼리량(0.658 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)<sup>5)</sup> 0.6%를 고알칼리와 저알칼리 시멘트를 구분하는 경계로 간주한다. 본 시험에 사용된 시멘트의 K<sub>2</sub>O량은 0.95%, Na<sub>2</sub>O량은 0.12%로 등가알칼리량으로 환산하면 0.75%이므로, 이는 시험기준인 0.6% 이상에 만족할 뿐만 아니라 고알칼리 시멘트에 해당한다.

#### 2.1.2 골재

경상남도를 중심으로 골재 현황과 지질조사 자료를 이용하여 화성암(심성암, 화산암류), 퇴적암류 및 변성퇴적기원의 변성암 골재를 생산하고 있는 업체를 방문하여 지질조사를 실시하고 암석 유형을 확인한 후 골재를 수집하였다. 그리고 부산, 경남 지역에 광범위하게 사용되는 하성 기원의 잔골재인 구포사와 재생골재<sup>6)</sup>를 다른 쇄석 골재와 비교, 분석하기 위해 본 시험에 포함시켰다(Table 2). 시험에 사용한 재생골재는 1973년에 건설된 부산 북구 만덕동 덕천 2호교(RC Slab교) 폐 콘크리트를 1998년 파쇄 재생한 것이다.

#### 2.1.3 혼화재

본 연구에서는 하동·산청 지역의 고령석 광물을 국내 A사에서 소성 제조한 메타카올린(metakaolin, MK), 광양 제철소에서 발생하는 고로슬래그를 미분쇄한 국내 K사의 고로슬래그미분말(ground granulated blast furnace slag, GGBFS), 당진화력발전소의 원료를 정제 처리한 국내 S

**Table 3** Chemical composition of admixtures (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
MK	51.7	40.312	1.825	0.486	3.314	0.992	0.469	0.02	0.003	2.612
GGBFS	33.439	14.932	0.098	5.68	43.249	0.195	0.295	0.215	0.014	0.325
FA	51.832	26.275	7.429	1.082	6.512	0.491	1.079	0.149	0.721	3.844
SF	94.296	0.141	0.36	0.913	0.108	0.311	1.632	0.263	0.119	1.214

사의 플라이애쉬(fly ash, FA) 및 국외 E사의 초미분말 실리카폼(silica fume, SF)을 사용하였으며, 각 혼화재의 화학성분은 Table 3과 같다.

## 2.2 시험방법 및 계획

### 2.2.1 골재의 물리적 성질 시험

본 연구에서는 골재의 물리적 성질을 파악하기 위해 골재의 비중 및 흡수율 시험(KS F 2504), 단위중량 시험(KS F 2505) 및 골재에 포함된 잔입자 시험(KS F 2511)을 행하였다.

### 2.2.2 골재의 광물 및 암석학적 시험

본 연구에서는 골재의 암석종류 및 구성광물을 파악하기 위해서 암석학적 기법과 함께 X선 회절분석(XRD)을 실시하였다. X선 회절분석(XRD)은 부산대학교 지질학과에서 Rigaku사의 Geierflex 2301을 사용하여 측정하였다.

### 2.2.3 모르타르 바 시험

#### (1) ASTM C 227에 의한 모르타르 바 시험

ASTM C 227에 의한 모르타르 바 법은 모르타르 바의 길이 변화(증감)를 측정하여, 6개월에 0.1% 이상의 팽창을 유발하는 시멘트·골재 배합은 해로운 반응을 일으킬 수 있는 것으로 간주한다. 6개월의 결과를 이용하지 못할 경우에는 배합물이 3개월에 0.05% 이상의 팽창을 유발하면 배합물은 해로운 알칼리 반응을 일으킬 잠재력이 있는 것으로 간주한다. 모르타르 바 시편의 배합은 시멘트-골재 중량비를 1:2.25로 배합수를 첨가하여 플로우치가 105~120의 범위가 되게 한다. 길이변화 시편은 2.5×2.5×30 cm 치수의 붓을 사용하여 제작하였다. 제작된 모르타르 바는 38±2℃의 온도를 유지하고 상대습도 95% 이상을 유지할 수 있는 항온·항습실에 보관하였다. 모르타르 바의 길이변화는 초기길이 측정 후 재령 14일, 12개월 동안 1개월 간격으로 그리고 12개월 이후에는 재령 15, 18, 24개월에 대해 측정하였다.

#### (2) ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험

ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 법은 골재의 잠재적인 알칼리 반응성을 검사하는 것으로 16일 안에 결과를 얻을 수 있는 방법이다. 모르타르 바의 길이변화율이 시편

제작 후 16일(영점 읽기 후 14일)에 0.1% 미만의 팽창을 나타내면 골재는 유해성이 없는 것으로 간주한다. 하지만 시편이 0.1~0.2%의 팽창을 나타낸다면 골재는 잠재적인 반응성이 있는 것으로, 그리고 0.2% 이상의 팽창을 나타낸다면 반응성이 있는 골재로 간주한다. 모르타르는 시멘트와 골재를 무게비가 1:2.25가 되도록 하고, 물·시멘트비(W/C)는 0.47로 배합을 하였다. 길이변화 시편은 2.5×2.5×30 cm 치수의 붓을 사용하여 제작하였다. 제작된 모르타르 바는 24시간 동안 23℃의 온도로 유지시키고 탈형한 다음 길이를 측정하였다(initial reading). 초기길이(initial reading)를 측정한 후, 시편이 물에 충분히 잠길 수 있도록 용기에 넣고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. 24시간 후에 길이변화를 측정하였는데 이것이 영점 읽기(zero reading)이다. 영점 읽기가 끝난 후 시험 시편은 1N NaOH 용액에 담구고 80±2℃의 온도로 유지시켰다.

NaOH 용액이 들어있는 용기는 polypropylene으로 밀봉이 가능하도록 제작하였으며, 모르타르 바의 길이변화는 영점 읽기 후 3, 6, 9, 12, 14일 및 14일 이후 7일 간격으로 42일까지 매번 같은 시간에 측정하였다.

### 2.2.4 반응성 골재의 입자크기와 입도가 모르타르의 알칼리-실리카 반응 팽창에 미치는 영향

여러 종류의 쇄석 골재에 대해 알칼리 반응성을 검토한 후, 반응성이 있는 것으로 판정된 변성암 골재(골재 9)를 사용하여 반응성 골재의 입자크기와 입도가 모르타르 바의 알칼리-실리카 반응 팽창에 미치는 영향에 관하여 검토하였다.

#### (1) 시험조건

골재를 체가름하여 No.8(2.5 mm), No.16(1.2 mm), No.30(0.6 mm), No.50(0.3 mm) 및 No.100(0.15 mm)의 체(5가지)에 잔류한 것을 각각 단일 입자크기의 골재로 시험하였다.

그리고 No.16(1.2 mm) 및 No.100(0.15 mm)체에 잔류한 두 종류의 입자크기의 골재를 질량비가 각각 0.85:0.15, 0.55:0.45 및 0.30:0.70의 비율이 되도록 혼합한 것과 2.5~0.15 mm의 5 종류의 체에 잔류한 것을 Table 4에 표시한 비율로 혼합하여 혼합 입자크기의 골재로 시험하였다. 이상과 같은 조건에 대해 ASTM C 1260 시험법으로 모르타르 바를 제작하고, 각각 0.5N, 1N 및 2N의 NaOH 용액으로 시험하여 길이변화를 측정하였다.

### 2.2.5 혼화제 치환에 따른 알칼리-실리카 반응 팽창 저감효과

본 연구에서 시험한 각 혼화제(MK, GGBFS, FA, SF)의 치환율은 0, 5, 10, 15, 25 및 35%로 하였으며, 모르타르 길이변화 시험편 제작 시 모르타르 유동성 시험을 병행하여 어느 정도의 유동성을 갖는 혼화제는 치환율을 더 증가시켜 45(FA), 55%(GGBFS)까지 치환율을 달리하여 길이변화 시험을 수행하였다. 모르타르 배합은 Table 5와 같고, 각 치환율당 3개의 길이변화 시험편을 제작하였다. 모르타르 바의 길이변화는 ASTM C 1260 규정에 따라 영점 읽기 후 3, 6, 9, 12, 14일에 대해 매번 같은 시간에 측정하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 골재의 물리적 성질

본 연구에 사용된 쇄석 골재들은 대체로 2.5~2.6 정도의 비중을 나타냈으나 골재 1(재생골재), 골재 5(화강암) 및 골재 7(안산암)은 다른 골재에 비해 비중은 작고 흡수율은 3~3.5배 정도 큰 것으로 나타났다(Fig. 1, 2). 골재 5와 골재 6은 같은 유형의 암석인 화강암인데도 불구하고 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 비중과 흡수율에서 현저한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 골재 5가 풍화가 상당히 진행된 화강암 성분인 것으로 보아, 골재 구성 광물의 입도뿐만 아니라 조직 및 풍화정도가 물성에 영향을 준 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 재생골재(골재 1)와 쇄석 골재(골재 3~12)는 천연골재(골재 2)보다

Table 4 Proportions of aggregate mixing

Retained on	Case	Mass (%)			
		1	2	3	4
No.8 (2.5 mm)		5	10	5	5
No.16 (1.2 mm)		35	25	5	5
No.30 (0.6 mm)		45	25	55	45
No.50 (0.3 mm)		10	25	20	15
No.100 (0.15 mm)		5	15	15	30
Fineness Modulus		3.25	3.10	2.65	2.40

Table 5 Mixing of mortars

Admixture replacement ratio (%)	W/C	Unit weight (g)			
		Water	Cement	Admixture	Fine aggregate
0	0.47	206.8	440	-	990
5	0.47	206.8	418	22	990
10	0.47	206.8	396	44	990
15	0.47	206.8	374	66	990
25	0.47	206.8	330	110	990
35	0.47	206.8	286	154	990
45	0.47	206.8	242	198	990
55	0.47	206.8	198	242	990

단위중량이 큰 것으로 나타났다(Fig. 3). 쇄석 골재는 암석을 파쇄하는 과정에서 충격에 의해 미세입자들이 다량 함유될 수 있으므로 천연골재의 잔입자량과 차이를 파악할 필요가 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 골재 3(퇴적암), 골재 4(변질된 화산암), 골재 5(화강암) 및 골재 6(화강암)의 잔입자량은 천연골재인 골재 2(구포사)와 거의 비슷한 값을 나타냈다. 이 외에 다른 골재들은 천연골재 잔입자량의 4~5배 가까운 값을 나타내고 있다. 특히, 골재 7(안산암)과 골재 12(규석)는 천연골재의 잔입자량과 거의 10배 가까운 차이를 보였다. 이러한 차이는 골재 1(재생골재)의 경우는 시멘트풀 다량 함유에 의한 것으로 판단되며, 이 외의 골재들은 암석유형에 따른 물성 차이에 의한 것이 아니라 공정상의 문제에 의한 것으로 판단된다.

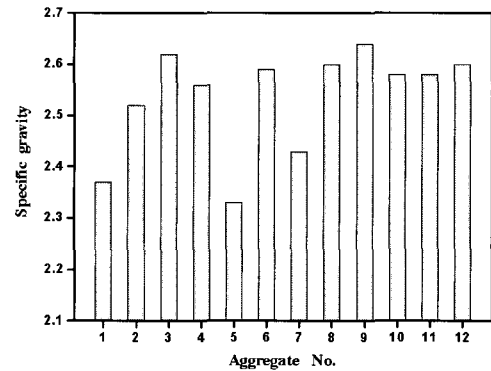


Fig. 1 Specific gravity of aggregates

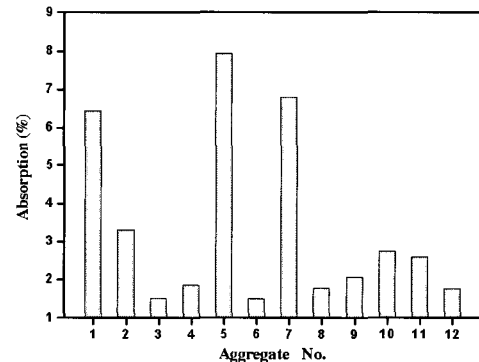


Fig. 2 Absorption of aggregates

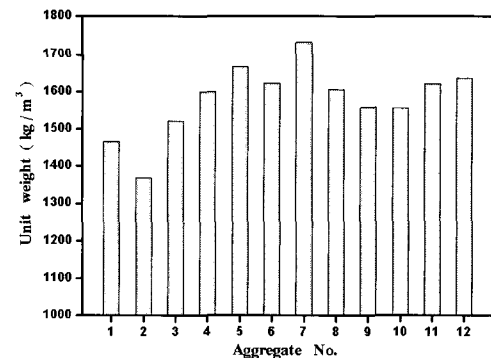


Fig. 3 Unit weight of aggregates

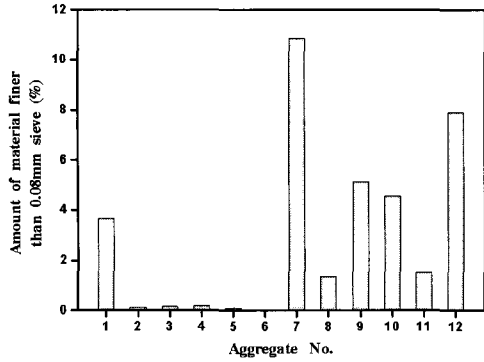


Fig. 4 Amount of fine materials retained in 0.08 mm sieve

### 3.2 골재의 광물 및 암석학적 특성

본 연구에 사용된 쇄석 골재에는 알칼리-실리카 반응을 일으키기 쉬운 단백석(opal), 트리디마이트(tridymite), 크리스토팔라이트(cristobalite) 및 칼세도니(chalcedony)와 같은 광물<sup>7)</sup>은 없었으며, 전체적으로 석영<sup>8)</sup>(quartz)과 장석(feldspar)이 주성분이며, 운모(mica)류 광물, 점토광물인 녹니석(chlorite)이 포함되어 있다. 변질된 화산암 골재 7, 8에는 지올라이트 그룹의 광물로서 함수 팽창성을 보이는 로우몬타이트(laumontite)가 특징적으로 함유되어 있는 것으로 나타났다(Table 6). 또한, 세일이 접촉변성 받아 생성된 호온펠스(골재 9)에는 이차 생성된 미세석영과 방해석들이 다량 포함되어 있었다. 골재 5는 각섬석 화강암에 속하는 것이며, 골재 6은 흑운모 화강암류에 속하는 것이다. 골재 4는 주변 화강암체의 관입에 의해 심하게 변질 또는 변성된 양상을 보이는 것으로 나타났다. 골재 10과 골재 11은 신생대 화산암류 암석으로서 산성 및 중성 화산암의 치밀한 조직의 암석이 대부분이나 응회질 암석도 골재에 포함되어 있다.

### 3.3 모르타르 바 시험결과

ASTM C 227에 의한 모르타르 바 시험결과, Fig. 6, 8 및 10에서 보는 바와 같이 6개월 경과 후 0.1% 이상(3개월에 0.05% 이상)의 팽창을 나타내는 골재는 없었다. 따라서 본 연구에 사용된 골재는 ASTM C 227 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 알칼리-실리카 반응이 천천히 일어나는 골재의 존재 여부를 확인하기 위하여 24개월 동안 모르타르 바의 길이변화를 계속 측정하였는데, 그 결과 재령 24개월이 되어도 0.05% 이상의 길이변화를 나타내는 골재는 없었으며 8개월 이후에는 재령에 따른 길이변화율의 변화도 거의 없는 것을 알 수 있다(Fig. 6, 8 및 10).

본 연구에서는 IOWA Department of Transportation에

Table 6 Major constituent minerals analyzed by XRD

Agg. No.	Mineral
1	Quartz, Feldspar, Calcite, Chlorite, Micas, Hornblende, Portlandite
3	Quartz, Feldspar, Calcite, Chlorite, Micas
4	Quartz, Feldspar, Micas
5	Feldspar, Quartz, Chlorite, Hornblende, Micas
6	Feldspar, Quartz, Chlorite
7	Feldspar, Quartz, Calcite, Chlorite, Laumontite, Hornblende
8	Feldspar, Quartz, Chlorite, Hornblende, Laumontite
9	Quartz, Feldspar, Calcite, Chlorite, Micas
10	Feldspar, Quartz, Micas, Chlorite
11	Feldspar, Quartz, Micas
12	Quartz, Micas

※ The relative abundance of constituent mineral is greater in left-hand side.

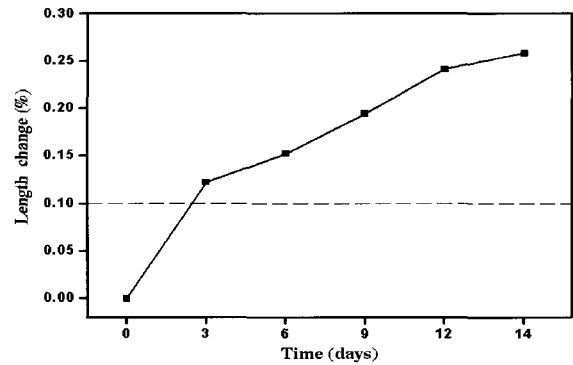


Fig. 5 Length change of mortar-bar containing borosilicate glass

서 알칼리-실리카 반응이 확인된 Mo-Sci Corporation의 Borosilicate glass를 ASTM C 1260 시험법의 적용성과 타당성 검토를 위해 표준재료로 시험에 포함시켰다. 시험결과, Fig. 5에서 보는 바와 같이 영점 읽기 후 14일에 0.25% 이상의 팽창을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험결과, 골재 3(퇴적암)과 골재 9(변성암)는 영점 읽기 후 14일에 0.2% 이상의 팽창을 나타내 ASTM C 1260 규정에 따라 반응성 골재로 판정하였다(Fig. 7, 11).

본 연구에서는 14일 이후 7일 간격으로 4번을 더 측정하여 42일까지의 길이변화율을 알아보았다. 그 결과, 반응성 골재로 판정된 골재 3(퇴적암)과 골재 9(변성암)는 계속적으로 팽창이 일어나 42일에는 0.3% 이상의 길이변화율을 나타내었고(Fig. 7, 11), Fig. 12에서 보는 바와 같이 불규칙적인 거북이 등과 같은 균열이 생긴 것을 알 수 있었다. 일반적으로 결정도가 낮은 세립의 이차생성 광물들이 퇴적암과 변성암의 교결물질로 많이 함유되어 있는데 이러한 결정도가 낮은 광물들이 화학적으로 불안정함으로

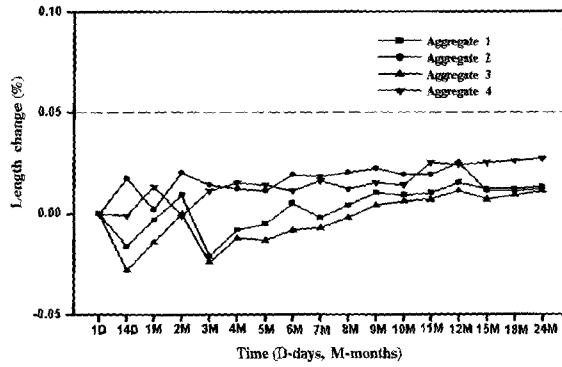


Fig. 6 Expansion of mortar-bars (ASTM C 227)

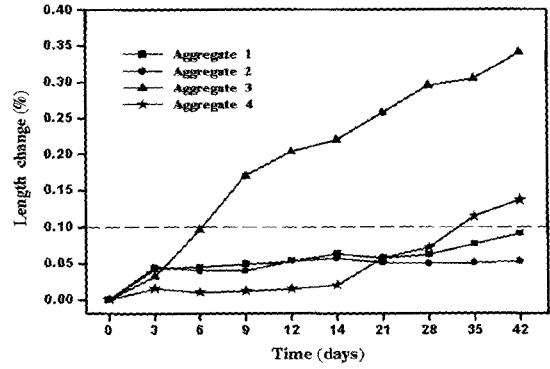


Fig. 7 Expansion of mortar-bars (ASTM C 1260)

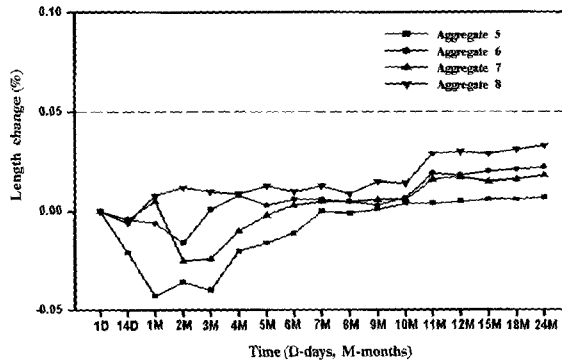


Fig. 8 Expansion of mortar-bars (ASTM C 227)

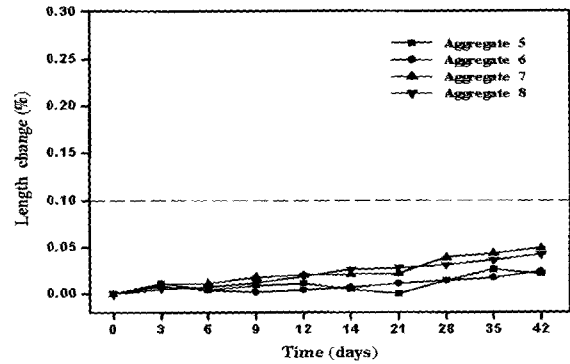


Fig. 9 Expansion of mortar-bars (ASTM C 1260)

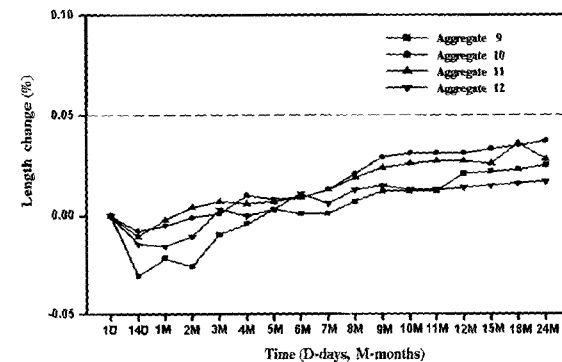


Fig. 10 Expansion of mortar-bars (ASTM C 227)

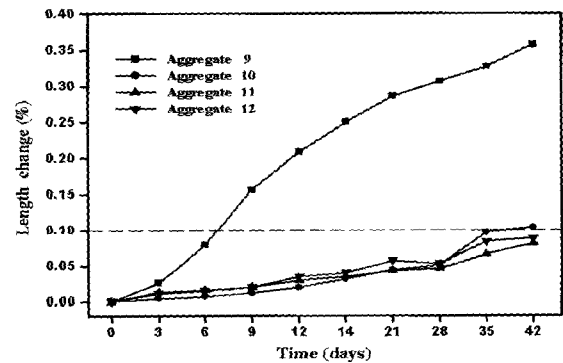


Fig. 11 Expansion of mortar-bars (ASTM C 1260)

서 인해 반응성을 보이는 것으로 생각된다.

영점 읽기 후 14일에 0.1% 미만의 팽창을 나타냈던 골재 중 골재 4(변질된 화산암)와 골재 10(화강암 석분)은 14일 이후부터 길이변화가 증가하여 42일에는 0.1% 이상의 팽창을 나타내었다(Fig. 7, 11). 본 연구에서 사용한 골재 4와 10은 영점 읽기 후 14일이 아니라 42일에 0.1% 이상의 팽창을 나타냈지만 골재 5~8(Fig. 9)과 비교해 본다면 팽창이 지속적으로 증가하고 있어 유해가능성이 있는 것으로 판단된다.

본 시험에 사용된 골재 중에서 6개월에 0.1% 이상(3개월에 0.05% 이상)의 팽창에서 유해임을 판정하는 ASTM

C 227에서는 반응성이 나타나지 않은 골재가 ASTM C 1260에서는 반응성이 있는 것으로 나타나 ASTM C 1260 시험법이 단기간에 반응성 골재를 확인하는데 유용할 뿐만 아니라 반응이 천천히 일어나는 골재에 대한 유해성을 판정하는 데 효과적인 것으로 판단된다. 또한, 두 방법의 시험결과는 콘크리트 구조물의 설치 후 장기적으로 알칼리가 추가되는 환경에 노출될 경우에는 골재의 알칼리-실리카 반응성이 더욱 현저해질 수 있음을 시사한다. 따라서, 이러한 환경에서 설치되는 콘크리트용 골재의 반응성은 ASTM C 1260 시험법으로 판정하는 것이 더욱 안전할 것으로 판단된다.

### 3.4 반응성 골재의 입자크기와 입도가 모르타르의 알칼리-실리카 반응 팽창에 미치는 영향

Fig. 13에서 보는 바와 같이, 반응성 골재의 입자크기가 작을수록, 그리고 NaOH 용액 농도가 클수록 모르타르 바의 팽창률도 커짐을 알 수 있다.

2.5 ~ 1.2 mm(No.16체에 잔류) 및 0.3 ~ 0.15 mm(No.100체에 잔류)의 2종류의 입자크기의 골재를 혼합하여 제작한 모르타르 바를 ASTM C 1260으로 시험한 결과, Fig. 14에서 보는 바와 같이 NaOH 용액 농도가 0.5 N, 1 N 및 2 N에 대하여 입자크기가 작은 0.3 ~ 0.15 mm(No.100체에 잔류)의 골재의 혼합비율이 증가할수록 팽창률은 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 각각의 혼합비율에 대해 NaOH 용액 농도가 0.5 N에서 1 N, 2 N으로 커질수록 길이변화도 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 NaOH 용액 농도 0.5 N, 1 N 및 2 N에 대해서 반응성 골재의 조립률(FM)이 작을수록 팽창률이 커지는 것을 알 수 있다. 이상의 시험결과들은, 반응성 골재가 입자크기가 작거나 또는 조립률(FM)이 작은 것일수록 골재의 총표면적이 증가되어 모르타르 바의 알칼리-실리카 반응성이 커지고, 또한 알칼리 용액의 농도가 클수록 알칼리-실리카 반응이 촉진되는 것을 보여준다.

### 3.5 혼화재 치환에 따른 알칼리-실리카 반응 팽창 저감효과

본 연구에서 판정된 반응성 골재에 대해 혼화재를 사용하여 알칼리-실리카 반응에 대한 저감효과를 알아본 결과, 메타카올린은 5%로 치환한 경우에는 오히려 팽창을 증가시키는 역효과를 가져왔으며 고로슬래그미분말 35% 치환은 플라이애쉬 10%, 실리카폼 10%, 메타카올린 15% 치환과 비슷한 길이변화를 나타낸 것을 알 수 있었다 (Fig. 16 ~ 19).

플라이애쉬와 실리카폼은 5%, 고로슬래그미분말은 15%, 메타카올린은 10%로 치환한 경우는 알칼리-실리카 반응에 대한 저감효과는 있었지만 영점 읽기 후 14일의 길이변화가 ASTM C 1260에서 규정한 0.1% 팽창을 넘는 것으로 나타나 유해한 팽창을 억제하기로는 치환량이 부족한 것을 알 수 있었다.

Fig. 16에서 보는 바와 같이 플라이애쉬는 치환율 25, 35, 45%에서 모르타르 길이변화가 비슷한 것으로 나타나 알칼리-실리카 반응에 대한 플라이애쉬의 적절한 치환율은 25%인 것으로 판단된다.

실리카폼은 10% 이상의 치환율에서 알칼리-실리카 반응 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 17에서 보는 바와 같이 치환율이 10%인 경우는 치환율 15, 25%



Fig. 12 Cracks caused by alkali-silica reaction of crushed stones used in the experiment

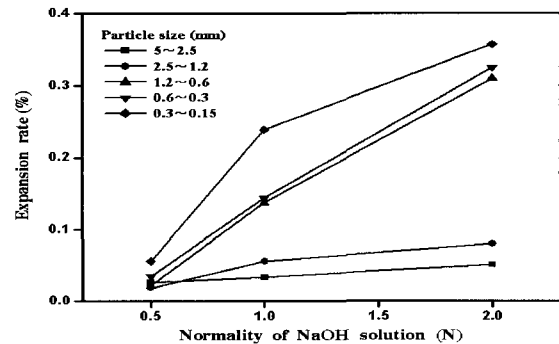


Fig. 13 The relationship between concentration of NaOH solution and expansion rate

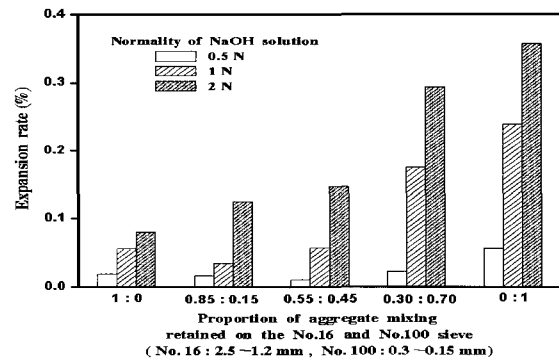


Fig. 14 The relationship between proportions of aggregate mixing retained on the No. 16 and No. 100 sieve and expansion rate

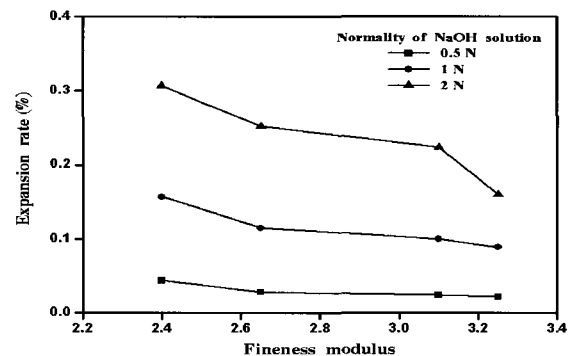


Fig. 15 The relationship between fineness modulus and expansion rate

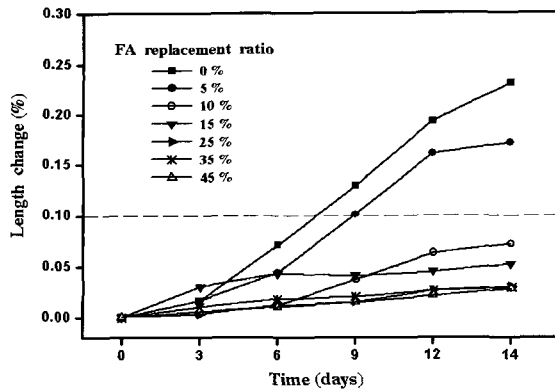


Fig. 16 Expansion of mortar-bars with various replacement ratios of fly ash

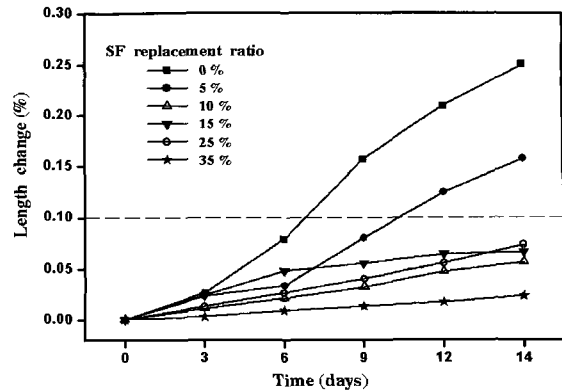


Fig. 17 Expansion of mortar-bars with various replacement ratios of silica fume

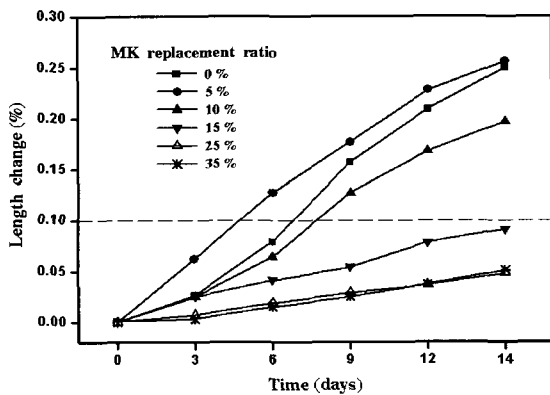


Fig. 18 Expansion of mortar-bars with various replacement ratios of metakaolin

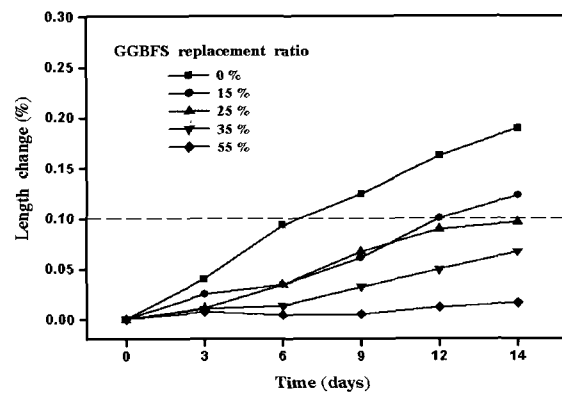


Fig. 19 Expansion of mortar-bars with various replacement ratios of ground granulated blast furnace slag

보다 더 나은 팽창 저감효과를 보였는데, 이러한 결과는 Malvar(2002)<sup>9)</sup> 등의 연구결과에서도 나타났으며, 이 원인은 현재의 시험결과로서는 명확하게 규명되지 않고 있다. 실리카퓌름은 보다 적은 양으로 알칼리-실리카 반응을 완화하는데 좋은 결과를 나타내므로 실리카퓌름 10% 치환이 팽창저감에 효과적인 최소 치환량인 것으로 판단된다.

메타카올린은 치환율 25%와 35%에서 거의 비슷한 길이변화를 보이고 있으며 재령에 따른 길이변화 증가율도 고려한다면 치환율이 25%일 때 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창 저감에 효과적인 것으로 판단된다(Fig. 18).

고로슬래그미분말은 치환율 55%가 가장 작은 팽창률을 나타내었지만 치환율 35%가 실리카퓌름 치환율 10%와 비슷한 저감효과를 나타내는 것으로 보아 고로슬래그미분말의 최소 유효 치환율은 35%인 것으로 판단된다(Fig. 19).

플라이애쉬, 실리카퓌름, 고로슬래그미분말 및 메타카올린의 알칼리-실리카 반응에 대한 팽창억제는 모르타르의 수밀성 증가로 인한 알칼리 침투 억제 효과와 모르타르내 가용 포틀랜드이트 양이 줄어 유해성이 높은 알칼리-칼슘형의 실리카겔 형성을 감소시킴에 따라 팽창률이 저하된

것으로 판단되며<sup>10)</sup>, 유해성이 높은 Ca-함유 실리카겔 형성을 감소시킬 수 있는 혼화재의 포졸란 반응특성은 각각 다른 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

- 1) ASTM C 227의 기준에 의하면 모든 시험골재가 무해한 것으로 나타났지만 ASTM C 1260의 기준을 적용할 경우 2곳의 골재가 반응성이 있는 것으로 나타났다.
- 2) ASTM C 227에 의해 24개월이 지난 후에도 나타나지 않은 현상이 ASTM C 1260으로 짧은 기간에 반응성을 나타내는 골재를 알 수 있었다. 이처럼 ASTM C 1260에 의한 모르타르 바 시험법은 단기간에 반응성 골재를 확인하는 데 유용할 뿐만 아니라 반응이 천천히 일어나는 골재 및 알칼리가 추가되는 환경에 건설되는 콘크리트용 골재에 대한 유해성을 판정하는 데 더욱 안전하고 효과적인 것으로 판단된다.
- 3) 입자크기가 작거나 또는 조립률(FM)이 작은 반응성 골재일수록 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창이 증가하



- 였으며, 알칼리 용액의 농도가 클수록 알칼리-실리카 반응이 촉진되는 것을 알 수 있었다.
- 4) ASTM C 1260에 의해 0.2% 이상의 팽창을 나타낸 반응성 골재(골재 9, 번성암)의 경우, 알칼리-실리카 반응을 억제할 수 있는 시멘트 증량에 대한 혼화제의 최소 유효 치환율이 플라이애쉬는 25%, 실리카폼은 10%, 메타카올린은 25%, 고로슬래그미분말은 35%로 각각 나타났다. 이 치환율은 반응성 골재에 의한 알칼리-실리카 반응의 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.
  - 5) 본 연구에 나타났듯이, 국내에서도 쇄석 골재 사용 시 알칼리-실리카 반응성에 대한 검토를 반드시 수행하고, 이에 대한 피해 방지를 위한 방안으로 혼화제 사용에 대한 검토와 규정의 수립을 제안한다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 목적기초연구(R01-2001-00064) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 이진용, 최수홍, 강석화, 이광평, “플라이애쉬 함유량이 콘크리트의 공기전 성질 및 역학적 특성에 미치는 영향”, 콘크리트학회논문집, 제11권, 6호, 1999, pp.25~33.
2. 김현수, 지남용, “고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 염화물 침투특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 복합술 발표회논문집, 13권, 1호, 2001, pp.997~1002.
3. 김형태, “실리카폼 및 실리카폼 콘크리트의 특성과 이용”, 콘크리트학회지, 3권, 3호, 1991, pp.23~30.
4. 김용태, 안태호, 강범구, 이정율, 김병기, “콘크리트 혼화제로서의 메타카올린의 기초적인 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 13권, 2호, 2001, pp.281~286.
5. 윤재환, 정재동, 이영수, “쇄석 골재의 알칼리-실리카 반응에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, 6권, 2호, 1994, pp.108~117.
6. 전생순, 이효민, 황진연, 진치섭, 박현재, “폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성구명을 위한 실험적 연구”, 대한지질공학회, 13권, 3호, 2003, pp.345~358.
7. 이장화, 김성욱, “국내 쇄석골재의 화학반응성 연구”, 콘크리트학회논문집, 7권, 1호, 1995, pp.136~144.
8. Monteiro, P. J. M., Shomglin, K., Wenk, H. R. and Hasparyk, N. P., “Effect of Aggregate Deformation on Alkali-Silica Reaction,” *ACI Materials Journal*, Vol.98, No.2, 2001, pp.179~182.
9. 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.
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 and Concrete Composite*, Vol.23, No.6, 2001, pp.485~493.

### 요 약

최근 양질의 하천골재가 고갈상태에 직면함에 따라 쇄석 골재의 사용이 보편화되고 있지만 쇄석 골재 사용으로 야기될 수 있는 알칼리-실리카 반응에 대한 문제를 검토하지 않은 채 콘크리트 재료로 사용하고 있는 실정이다. 알칼리-실리카 반응은 콘크리트에 유해한 팽창을 일으키는 작용으로서, 반응결과 알칼리-실리카 겔이 형성되고 이러한 겔이 수분을 계속 흡수함으로써 체적 팽창을 일으켜 콘크리트에 균열이 발생된다. 골재의 알칼리-실리카 반응성을 판정하는 방법은 암석학적 판정법, 화학법 및 모르타르 바 법이 일반적으로 사용되지만, 이 중에서 모르타르 바 법이 비교적 신뢰성이 높다. 본 연구에서는 모르타르 바 시험방법 중 ASTM C 227과 ASTM C 1260을 선택하여 암석 유형별로 수집한 12종의 골재들을 대상으로 쇄석 골재의 반응성을 비교, 분석하였다. 또한 본 연구에서는 반응성 골재의 입자크기 및 입도가 모르타르 바의 알칼리-실리카 반응 팽창에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 혼화제의 용도는 상당히 많지만 본 연구에서는 쇄석 골재 사용으로 문제되고 있는 알칼리-실리카 반응에 있어서 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카폼 및 메타카올린을 혼화제로 사용할 경우 알칼리-실리카 반응에 미치는 영향을 알아보고자 시멘트에 대한 혼화제의 치환율을 달리하여 ASTM C 1260 시험법으로 알칼리-실리카 반응에 대한 팽창 저감효과를 평가하여 보았다. 본 연구에서는 혼화제의 치환율을 0, 5, 10, 15, 25 및 35%로 하였으며, 모르타르 유동성 시험을 병행하여 어느 정도의 유동성을 갖는 혼화제는 45, 55%까지 치환율을 증가하여 길이변화 시험을 수행하였다. 시멘트 증량에 대한 혼화제 치환율이 플라이애쉬는 25%, 실리카폼은 10%, 메타카올린은 25%, 고로슬래그미분말은 35%일 경우 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창을 가장 효과적으로 방지할 수 있는 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 쇄석 골재, 알칼리-실리카 반응, 플라이애쉬, 실리카폼, 메타카올린