

국내 쇠석골재의 화학반응성 분석

An Analysis on the Reaction of Crushed Aggregates

이 장 화 * 김 성 옥 ** 최 일 섭 **
Lee, Jang Hwa Kim, Sung Wook Choi, Il Sup

ABSTRACT

In the country, due to short comings of natural aggregates of good quality, it is common to use crushed stones. However, the investigation has not been done on the chemical reaction of crushed stones. This study tested and analyzed the aggregate chemical reaction by Petrographic Examination (ASTM C 295), Chemical Method (ASTM C 289) and Mortar-Bar Method (ASTM C 227).

As a result, most of test aggregates didn't show any reaction but many have common deleterious mineral. Therefore, there exists the possibility of chemical reaction in petrographic point of view.

1. 서론

1940년 T.E. Stanton에 의해서 알칼리-골재 반응이 최초로 보고된 이후 미국을 비롯하여 유럽과 일본 등지에서 알칼리-골재 반응에 의한 콘크리트 구조물의 열화손상이 꾸준히 발견되었다.⁽¹⁾

대부분의 자연산 하천골재는 수많은 세월동안 물과 태양 및 대기에 직접 노출되어 골재 내부의 불안정한 광물이나 화학적 반응을 일으키는 염분 등이 대부분 용해되어 비교적 골재 자체가 안정된 상태가 된다. 반면에 물과 태양 및 대기에 직접 노출되지 않고 지하 깊숙히 매장되어 있는 암석을 분쇄한 쇠석골재는 상대적으로 화학반응에 영향을 미칠 수 있는 물질들이 함유될 가능성이 높으며 지금까지 발생한 알칼리-골재 반응에 의한 콘크리트 구조물의 피해사례는 주로 불안정한 광물질을 포함한 쇠석골재를 사용한 경우이다.

국내에서 최근 콘크리트 구조물의 건설이 급격히 증대되고 천연골재가 고갈되어감에 따라

쇠석골재의 사용이 보편화되는 현실에서 쇠석골재의 알칼리-골재 반응에 대한 실험적 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 이미 본 학회 학술 발표회에 발표한 바 있는 1차 화학법에 따른 화학반응성 시험 분석, 2차 광물학적 반응 성분 분석과 최근에 시험분석을 끝낸 모르타 바 법에 의한 반응성 분석 결과를 토대로 국내 쇠석골재에 대한 화학반응성 여부를 실험 연구하였다.

2. 시료 쇠석골재 채취

1991년 현재 우리나라에서는 콘크리트용 골재를 생산하는 570여군데의 석산 쇠석골재 중 63곳의 시료 채취원을 대한지질도 (한국동력자원 연구소 1981년 발행)에 근거하여 암석의 종류가 다양하게 분포되도록 선정하여 1992년 5~6월 사이에 시료를 직접 현장 채취하였다. 그림 1은 전국의 골재 채취원을 대략 도식화한 것이다.

채취한 시료골재에 대하여 암석학적으로 분류한 암석명은 표 1에 나타나 있으며 섬록암,

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

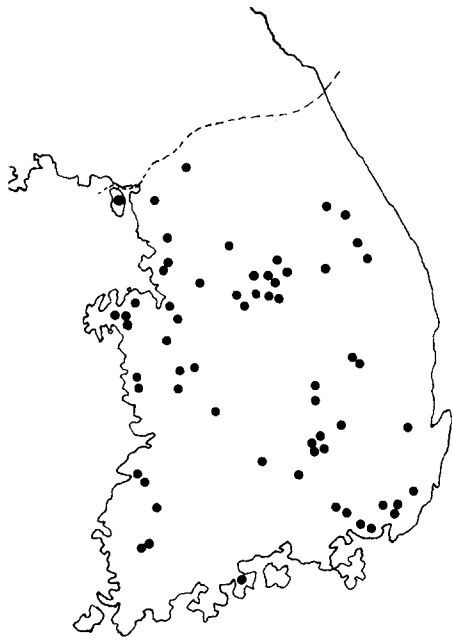


그림 1. 시료골재 채취원

화강암 계열이 우리나라에 광범위하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

3. 시험 개요

골재의 화학반응성을 시험하는 방법은 크게 광물학적 방법, 화학적 방법 그리고 물리적 방법으로 나눌 수 있다. 이 방법들은 골재의 화학반응 중 대부분을 차지하는 알칼리-실리카 반응성을 주로 시험 분석하며 알칼리-탄산염 반응성을 시험하는데는 별도의 시험법을 적용하고 있다.

본 연구에서는 이 세가지 방법이 모두 포함된 ASTM 시험법⁽²⁻⁴⁾을 기준으로 하였으며 각각의 시험법은 다음과 같다.

3.1 화학적 방법 (ASTM C 289)

(1) 시료가공

시료 골재들을 소형 크리셔로 분쇄한다음 No. 50(0.3mm)체를 통과하고 No. 100(0.15mm)체에 남는 시료를 모은 다음, 시료의 미분을 없애기 위하여 물세척을 하고 다시 체가름하여 입도 조정이 완료된 시료를 준비하였다.

표 1. 시료골재의 암석명

일련번호	암석명	일련번호	암석명
SK-1	화강섬록암	CS-1	화강암
2	화강섬록암	2	흑운모편암
3	섬장암	3	산성맥암
4	염기성맥암	4	화강섬록암
5	화강섬록암	5	흑운모편암
6	석영섬록암	6	화강섬록암
7	화강섬록암	7	화강섬록암
8	화강섬록암	8	산성맥암
		9	세일
KW-1	탄산염맥암	10-a	흑운모화강암
2	탄산염맥암	10-b	사암
3	화강섬록암	11	화강섬록암
4	석영몬조섬록암	12	산성맥암
5	탄산염맥암	13	석영화강암
6	화강암	14	화강섬록암
CN-1	산성맥암	JL-1	석영화강암
2	화강섬록암	2	화강암
3	편마암	3	산성맥암
4	섬장암	4-a	섬록암
5	섬장암	4-b	석영섬록암
6	화강섬록암	5	석영섬록암
7	화강섬록암	6	산성맥암
8	화강암		
9	산성맥암		
KN-1	화강암	KS-1	석영섬록암
2	흑운모화강암	2	염기성맥암
3	화강섬록암	3	화강섬록암
4	화강암	4	석영섬록암
5	화강섬록암	5	석영섬록암
6	석영-화강섬록암	6	석영화강암
7	섬장암	7	석영화강섬록암
8	화강암	8-a	화강섬록암
9	화강섬록암	8-b	화강암
10	섬록암	9	화강섬록암
		10	석영섬록암

(2) 반응과정

준비된 시료 25g을 1N HaOH에서 24시간 반응시킨 다음 냉각, 여과과정을 거친 후 NaOH 용액에 용출된 용해 실리카량을 측정할 수 있도록 20배 희석시켜서 용기에 담아 보관한다.

(3) 검정곡선

화학법에서 용해 실리카량을 측정하는 방법은 비중계법과 광도측정법이 있는데 본 실험에서는 분광광도계(UV-Visible Recording Spectro Photometer)를 이용한 광도 측정법을 사용하였다.

광도 측정법에서는 먼저 실리카 표준 용액을 이용하여 실리카 농축도와 빛의 전달도를 나타내는 검정곡선과 적용식을 구하여야 한다. 본 실험에서 구한 실리카 농축도 C식은 다음과 같다.

$$C = 40.287 \times ABS + 0.0181(\text{ppm})$$

$$= 0.0167 \times (40.287 \times ABS + 0.0181)(\text{mmol/l})$$

그림 2는 본 실험에서 구한 실리카 농축도와 빛의 전달도를 나타내는 검정곡선과 적용식이다.

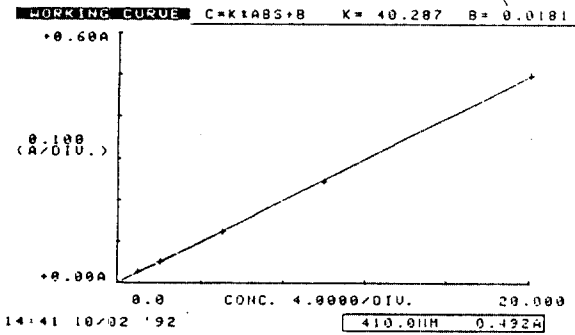


그림 2. 검정곡선

(4) 용해 실리카량(S_c), 알칼리도 감소량(R_c)
 암모늄 몰리브데이트로 발색시킨 시료 희석액을 파장 410NM의 상태에서 빛의 전달도를 읽은 다음 검정곡선에 의한 C값을 계산하여 아래의 계산식에 의하여 S_c 와 R_c 를 구하고 페놀프탈레인 지시용액을 희석용액에 떨어트린 다음 적정시켜서 아래 계산식으로 알칼리도 감소량을 계산한다.

$$S_c = 20 \times (100/V) \times C$$

여기서, S_c = SiO_2 의 농축도 (최초의 여과액 1l당 millimols)

C = 광도계로 측정한 용액의 실리카 농축도 (millimols/l)

V = 사용된 희석용액의 용적 (10ml)

$$R_c = (20N/V_1) (V_3 - V_2) \times 1000$$

여기서, R_c = 알칼리도 감소량 (mmol/l)

N = 적정에 사용된 염산(HCl)의 농도 (=0.05N)

V_1 = 사용된 희석용액의 용적 (=20ml)

V_2 = 시료 희석용액의 페놀프탈레인 종말점을 얻는데 사용된 염산의 용적 (ml)

V_3 = NaOH 공 시료의 페놀프탈레인 종말점을 얻는데 사용된 염산의 용적 (ml)

3.2 광물학적 방법 (ASTM C 295)

분석대상 골재가 모두 쇄석골재이며 대부분 1종류 또는 2종류의 암석으로 구성되어 있으므로 본 시험에서는 우선 편광현미경을 이용하여 구성광물을 감정 및 정량하였으며 동일 지역의 골재일지라도 구성암석이 여러 종류이면 암석 종류 수만큼 현미경 분석용 박편을 제작하였다.

구성광물질의 定量은 Point Count법을 적용하였고 엄밀한 측정치를 구하기 위해 앞서 근사적인 구성비를 얻고자 하였으며 보다 엄밀한 분석치가 요구되거나 다른 분석방법(X-Ray diffraction법, 전자현미경 분석 등)이 요구되는 시료에 대해서는 앞으로 추가분석할 계획이다.

표 2와 표 3은 콘크리트내에서 유해한 화학반응을 일으키는 반응성 광물에 대하여 미국과 일본에서 분류하고 있는 것을 요약 정리한 것이다.

3.3 모르터 바법 (ASTM C 227)

(1) 골재가공

골재는 분쇄과정을 통하여 아래 표 4에 나타난 입도 분포와 무게 백분율을 갖도록 하였다.

(2) 시멘트

알칼리-실리카 반응에 관련되는 시멘트중의 성분은 주로 K_2O 와 Na_2O 의 알칼리 성분이며 본 실험에 사용된 시멘트의 K_2O 량은 1.39%, Na_2O 량은 0.08%로서 등가알칼리량($0.658 K_2O + Na_2O$)으로 환산하면 0.99%이다.

국내에서 생산되는 시멘트의 평균 등가알칼리량은 0.77%로서 시험기준인 0.6% 이상에 만족하며 최대 등가알칼리량은 1.2% 미만이므로 실제 사용환경에 근접한 1.2%를 시험 등가알칼리량으로 정했다. 1.2% 등가알칼리량을 맞추는 방법으로 0.21%에 해당하는 NaOH를 첨가

표 2. 미국 ASTM C 295의 반응성 광물·암석⁽³⁾

반응구분	반응성 광물·암석
알칼리실리카반응 성분	<ul style="list-style-type: none"> Opal Cristobalite Tridymite Siliceous and some intermediate Volcanic glass Chert Glassy to cryptocrystalline acid Volcanic rocks Synthetic Siliceous glasses Some argillites Metamorphic graywackes Rocks containing highly metamorphic quartz such as graywackes Phyllites Schists Gneisses Gneissic granites Vein quartz Quartzite Sandstone
알칼리탄산염반응	<ul style="list-style-type: none"> Calcareous dolomites or dolomitic limestones with clayed insoluble residues

표 3. 콘크리트내에서 화학반응하는 암석⁽⁵⁾(일본)

반응의 종류		반응성물질	반응성 광물을 포함한 암석
시멘트 또는 시멘트 성분과의 반응	알칼리 골재 반응	glass	안산암, 현무암, 유문암, 흑요석, Perlite, 응회암 등
		Crystobalite, Tridymite	안산암, 현무암, 유문암, 응회암 등
		미소석영	점판암, 혈암, 유문암 사암 등
		미소운모	Hornfelse, 편암, 천매암, 점판암, 혈암, 사암 등
	파동소광석영	편마암, 편암, Chert, 화강암, 섬록암 등	
	알칼리 골재 반응 이외의 반응	Laumontite	안산암, 유문암, 현무암, 응회암, 섬록암, 사암, 점판암, 혈암, 각섬석, 편암 등
		Montmorillonite	현무암, 안산암, 유문암, 응회암, 사암, 점판암, 혈암
Ca(OH) ₂ 존재하에 분해반응	황철광	사암, 점판암, 혈암, 안산암, 현무암, 유문암, 편암, 섬록암, Hornfelse 등	
물과 반응하는 것	MgO	사문암(蛇紋岩), 돌로마이트질 석회암	

하여 조정하였다.

(3) 공시체 제작 및 보관

공시체의 제작은 ASTM C 227의 제작 기준을 준수하여 제작하였으며 공시체의 저장은 37.8 ± 1.7℃, 상대습도 95% 이상을 유지할 수 있는 항온항습기에 보관하였으며 측정은 23 ± 1.7℃, 상대습도 50% 이상을 유지하는 항온항습실에서 측정하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 화학적 방법

시험결과와 Sc와 Rc의 값을 ASTM C 289의 유해성 판정 기준도표와 비교하여 볼 때(그림 3 참조) 대부분의 시험골재가 화학적으로 알칼리 골재 반응에 대해 안정한 것으로 나타났으며 1989년에 개정된 JIS A 5308 부속서 7의 '골재

표 4. 모르터 바 시험에 사용된 골재입도

체 의 치 수		무 계 백분율 (%)
통 과 량	남 는 량	
4.75mm(No. 4)	2.36mm(No. 8)	10
2.36mm(No. 8)	1.18mm(No.16)	25
1.18mm(No.16)	600µm(No.30)	25
600µm(No.30)	300µm(No.50)	25
300µm(No.50)	150µm(No.100)	15

의 알칼리 골재반응 시험방법(화학법)'의 기준 (Sc ≥ 10m mol이고, Rc < 700m mol 일때 Rc ≤ Sc이면 유해)에 따르면 시험골재 중 충북 충원군 이류면 만정리(CN-4), 충북 충주시 목행동(CN-9), 경기 강화군 불운면 도하리(SK-2) 3곳의 골재가 유해 가능성이 있는 것으로 나타났다.

그림 3은 전체 시료의 Sc와 Rc 값을 유해성 판정기준 도표에 plotting한 것이며 표 5는 JIS A 5308의 기준에 따라 경우 유해 가능성이 있는 3곳의 Sc와 Rc 값이다.

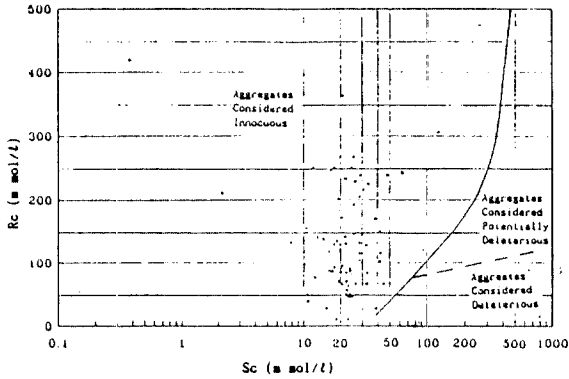


그림 3. Sc와 Rc값에 따른 유해성 판정도

표 5. 유해 가능성 시료의 Sc와 Rc값

시료명	시료 채취 원	Sc mmol/Lt	Rc mmol/Lt
SK-2	경기 강화군 불운면	18.27	10.5
CN-4	충북 증원군 이류면	38.37	27.8
Cn-9	충북 충주시 목행동	22.80	10.5

4.2 광물학적 방법

전체 시료에 대한 시험결과 중 화학법에서 유해가능성이 있는 3곳의 골재와 일반적으로 유해하다고 볼 수 있는 광물 성분인 석기, 미소운모, 백운모, 흑운모, 파동소광석영, 점토 등을 다량 함유한 시료골재에 대한 시험결과의 일부를 표 6에 나타내었다.

시험결과 유해광물로서 일본의 경우 흔히 나타나는 광물인 Tridymite와 Crystobalite는 국내에서는 잘 나타나지 않았으며 이 광물이 石基에 포함될 수도 있는데 이는 X-Ray 회절 분석, EPMA 분석을 통하여 심층 시험을 해야 할 것 같다.

화학법에서 JIS 기준으로 유해가능성이 있다고 여겨지는 3곳의 시료골재는 공통적으로

백운모를 포함한 것으로 나타났으며 지역적으로 반응성 골재를 포함할 가능성이 많은 남부 지방의 골재에서 석기성분이 다량 함유되어 있는 공통점이 있었다.

4.3 모르터 바 법

화학법과 광물학적 분석에서 전혀 반응 가능성이 없는 시료를 제외한 30개의 시료에 대하여 모르터 바 시험을 수행한 결과 1.2%의 등가알칼리량의 조건에서 3개월에 0.05%, 6개월에 0.1%의 길이 팽창량을 나타내는 시료는 없었다.

그림 4는 표 6의 시료골재에 대하여 6개월 간의 길이 팽창 변화율을 도식화 한 것이다.

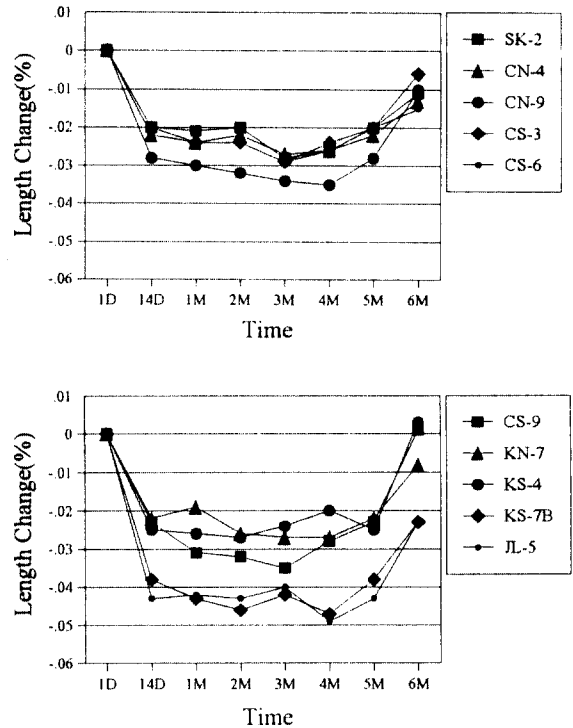


그림 4. 모르터 바 길이 변화율

5. 결론

국내 쇄석골재에 대한 알칼리-실리카 반응에 대한 골재의 유해 가능성을 연구하기 위하여 제주도를 제외한 전국에서 골고루 분포 채

표 6. 모달 분석에 의한 구성광물 분포

시험 번호	석기	미소 운모	백운모	파동 석영	석영	사장석	정장석	흑운모	연니석	점토	불투명 광물	연염석	치트	암편	합계
SK-2			1		42	32	28	5							102
CN-4			30		69						1				100
CN-9			25		54				20		1				100
CS-3	22	17		40	38									14	131
CS-6		3		38		27	31		1						100
CS-9		12			61					28					101
KN-7	117	6				10		1			1		3		136
KS-4	180				23	15					2				220
KS-7b	117	6				10		1			1		3		138
JL-5	360	55			24	13						13			452

취한 63곳의 쇠석골재에 대하여 화학법, 광물학적 분석, 모르타 바 법의 3가지 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) ASTM C 289의 화학법을 기준으로 시험한 결과 모든 시험골재가 무해한 것으로 나타났으나 판정기준을 JIS A 5308 부속서 7을 적용할 경우 경기 강화 불운, 충북 중원 이류, 충북 충주 목행 3곳의 골재가 유해 가능성이 있는 것으로 나타났다.

(2) 광물학적 시험 분석의 연구결과 일반적으로 지적하고 있는 유해광물성분이 시료골재에 여러종 포함되어 있으며 편광현미경으로 분석이 어려운 미립질의 유해광물이 남부지방 골재에 다량 함유된 석기에 포함되어 있을 수 있으므로 광물학적 분석 측면에서는 유해성이 상존하고 있다고 할 수 있다.

(3) 화학법과 광물학적 분석에 의해서 다소 유해 가능성이 있는 골재를 포함한 30개의 시료골재에 대하여 모르타 바 시험을 수행한 결과 유해 기준치 이상의 팽창을 나타내는 시료는 없었다.

이상의 시험결과를 분석하면 암층구조가 대부분 신생대 이전에 형성되었으며 거의 화산활동이 없었던 비교적 안정된 지층을 지닌 우리나라의 암층구조로 볼때 석산에서 생산되는 대부분의 국내 쇠석골재는 화학반응성에 안정된 상태를 나타내는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 잔골재의 수급사정이 좋지 않은 시기

에 해사를 사용한 콘크리트에서 골재의 화학반응으로 인한 피해가 심각했던 바 있는 이웃 일본의 경우를 비추어 볼때 해사의 사용이 점차 확산되는 우리나라의 현실정에 발생할 지도 모르는 골재의 화학반응으로 인한 피해를 방지하기 위하여 더욱 깊은 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구에 아낌없는 자문을 해주신 수원대 윤재환 교수님과 실험시설의 제공과 측면 후원을 해주신 동양중앙연구소 정재동 박사님 이하 2차 제품 연구실 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Swamy, R.N, "The Alkali-Silica Reaction in Concrete" Blackie and Son Ltd, UK, 1992
2. ASTM C 289, Standard Test Method for Reactivity of Aggregates (Chemical Method)
3. ASTM C 295-85, Standard Practice for Petrographic Examination of Aggregate for Concrete
4. ASTM C 227, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregates Combinations (Mortar-Bar Method)
5. 丸草夫, 骨材品質にかかわる 耐久性の診断手法 -岩石・鑛物學的手法-, 콘크리트工學, Vol.26, No.7, July 1988.