

# 쇄석 골재의 광물학적 특성 및 알칼리-골재 반응성

## The Petrographic Properties and Alkali-Aggregate Reaction of Crushed Stones

전 쌍 순\*      박 현 재\*\*      이 호 민\*\*\*      황 진 연\*\*\*\*      진 치 섭\*\*\*\*\*  
Ssang-Sun Jun      Hyun-Jae Park      Hyo-Min Lee      Jin-Yeon Hwang      Chi-Sub Jin

### ABSTRACT

In Korea, due to the shortcomings of natural aggregates and increasing needs of crushed stones, it is necessary to examine the alkali-aggregate reaction of the crushed stones. The purpose of this study is to analyze petrographic properties and alkali-aggregate reaction of crushed stones. This study was performed to investigate the alkali-aggregate reaction of crushed stones using chemical analysis, physical properties, XRD, XRF and mortar-bar method.

### 1. 서 론

최근 콘크리트용 골재로 사용되는 양질의 하천골재가 고갈상태에 직면함에 따라 쇄석 골재의 사용이 보편화되고 있다. 그러나, 쇄석 골재의 물리적인 소요품질에 대해서만 고려되고 화학반응성 문제는 검토되지 않은 채로 콘크리트 재료로 사용이 되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 암종 별로 선별하여 수집된 골재를 대상으로 각종 골재의 구성광물, 화학조성 및 물리화학적 특성과 알칼리-골재 반응성 여부를 조사하여 골재의 유해 가능성을 분석하고 이에 따른 2차 생성광물들의 성장 양상과 그들이 성능저하 현상에 미치는 영향에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다. 이를 위하여 경상남도를 중심으로 골재 현황과 지질조사 자료를 이용하여 화성암(심성암, 화산암류), 퇴적암류와 변성퇴적기원의 변성암 골재를 수집하여 실험하였다. 골재 내의 알칼리 반응성 유해 물질 존재 여부 확인은 X선 회절분석(XRD)과 편광현미경에 의한 광물학적 방법을 사용하였다. 알칼리-골재 반응성 유무해 판단은 ASTM C 227의 Mortar-Bar 시험방법에 의해 평가 분석하였고, 주 화학성분은 X선 형광분석기(XRF)로 실시하였다.

### 2. 실험 개요

#### 2.1 실험 재료

##### 2.1.1 시멘트

사용한 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트로써, 화학성분은 표 2.1과 같다. 알칼리-골재 반응

\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정희원, 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

\*\*\* 정희원, 부산대학교 지질학과 강사

\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 지질학과 교수

\*\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수

에 관련된 시멘트의 화학성분은 주로  $K_2O$ 와  $Na_2O$ 의 알칼리 성분이며, 본 실험에 사용된 시멘트의  $K_2O$ 량은 0.95%,  $Na_2O$ 량은 0.12%로써 등가알칼리량( $0.658 K_2O + Na_2O$ )으로 환산하면 0.75%이다.

표 2.1 시멘트의 화학성분

Chemical Composition(%)							
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

### 2.1.2 골재

심성암류, 화산암류, 퇴적암류 및 변성암류 중 광범위한 지역 분포를 가지며, 대표성과 골재반응의 가능성이 큰 굵은골재와 잔골재를 우선적으로 부산, 경남 지역을 대상으로 방문 수집하였다. 그리고, 부산, 경남 지역에 광범위하게 사용되는 하성 기원의 잔골재인 구포사와 재생골재를 실험에 포함시켰다(표 2.2 참조). 실험에 사용한 재생골재는 1973년에 가설된 부산 북구 만덕동 덕천 2호교(RC Slab교) 폐 콘크리트를 1998년 파쇄 재생한 것이다.

표 2.2 골재의 산지 위치 및 암석 종류

골재 번호	산지 위치	암석의 종류	특징
골재 1	부산광역시 북구 만덕동	안산암질 화산암	폐 콘크리트 재생골재
골재 2	부산광역시 북구 구포동		잔골재(모래)
골재 3	울산광역시 울주군 상북면	퇴적암	
골재 4	경남 진해시 용원동	호온펠스	
골재 5	경남 김해시 생림면	화강암	
골재 6	경남 김해시 상동면	화강암	
골재 7	경남 김해시 생림면	안산암	
골재 8	경남 김해시 생림면	화강암 + 안산암	

## 2.2 실험 방법 및 계획

### 2.2.1 광물 및 암석학적 시험

암종 별로 선별하여 수집된 골재들을 대상으로 암석종류, 구성광물 및 화학성분을 파악하기 위해서 암석학적 기법과 함께 X선 회절분석(XRD)을 실시하고, 주성분 원소의 화학성분을 분석하였다. 먼저 재생골재에 포함된 골재의 암석학적 관찰을 위해 2.5mm 이상의 골재에서 가능한 굵은골재를 선별하여 색으로 시료를 분리해서 박편을 제작하였다. 2.5mm 이하의 잔골재에 해당하는 재생골재는 0.59mm 체를 기준으로 2.5~0.59mm의 잔골재와 0.59mm 이하의 잔골재로 두 가지 입도별로 시료를 분리하였다. 그리고 재생골재에 포함된 모르타르 덩어리를 따로 분리하여 시료로 준비하였다. 재생골재 외의 골재들은 시료로 박편을 제작한 후 편광현미경을 사용하여 구성광물, 조직, 변질상상 등의 암석학적인 특징을 관찰하여 그 골재의 암석 종류를 파악하였다. 분석을 위한 시료들은 막자분말기로 측정에 필요한 입도까지 분쇄하고 X선 회절분석(XRD)을 하기 위해 부정방위법으로 시료를 준비하여 실험하였다. X선 회절분석은 부산대학교 지질학과에서 Rigaku사의 Geierflex 2301을 사용하여 측정하였다. 주 화학성분 분석은 부산대학교 소재의 한국기초과학지원 연구소 부산·경남 분소에서, Philips사의 PW 2400 X선 형광분석기로 실시하였다.

### 2.2.2 골재의 물리적 성질 시험

본 연구에서는 골재의 물리적 성질을 파악하기 위해 골재의 비중 및 흡수율 시험(KS F 2504), 단위중량 시험(KS F 2505), 골재에 포함된 잔입자 시험(KS F 2511) 및 콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기불순물 시험(KS F 2510)을 행하였다.

### 2.2.3 알칼리-골재 반응 조사를 위한 시험 (KS F 2546, ASTM C 227)

채취한 골재의 알칼리-골재 반응성 판정을 위해 Mortar-Bar의 길이변화 시험을 수행하였다. Mortar-Bar의 길이변화 시험법은 시멘트와 골재의 배합에 따른 알칼리 잠재반응을 검사하는 방법으로 KS F 2546 및 ASTM C 227에 규정되어 있다. 이 시험은 시멘트와 골재를 저장하는 동안 각 조합에 따른 Mortar-Bar의 길이 변화(증감)를 측정하여, 시멘트와 골재의 배합이 나트륨이나 칼슘과 같은

알칼리의 수산기 이온을 포함한 팽창반응에 미치는 반응도를 측정하는 데 있다. 판정의 기준은 6개월에 0.1% 이상의 팽창을 유발하는 시멘트·골재 배합은 대개 해로운 반응을 일으킬 수 있는 것으로 간주된다. 6개월의 결과를 이용치 못할 경우에는 배합물이 3개월에 0.05% 이상의 팽창을 유발한다면 배합물은 해로운 알칼리 반응을 일으킬 잠재력이 있는 것으로 간주해야 한다.

(1) 시료준비

골재를 시험에 사용하기 위해 분쇄한 후 체가름하여 KS F 2546의 절차에 부합하도록 표 2.3과 같이 입도를 맞추었다.

(2) Mortar-Bar 제작

재료의 배합은 시멘트-골재 중량비를 1 : 2.25로 배합수를 첨가하여 플로우치가 105~120의 범위가 되게 한다. 공시체는 2.5×2.5×30cm 치수의 붓을 사용하여 각 골재당 5개의 길이변화 시편을 제작하였다. 모르타르 배합은 표 2.4와 같다.

(3) 시편의 보관 및 길이변화의 측정

Mortar-Bar는 KS F 2546에 따라 37.8±1.7℃의 온도를 유지하고 상대습도 95% 이상을 유지할 수 있는 항온항습실에 보관하였다. Mortar-Bar의 길이변화는 재령 24시간, 14일, 1, 2, 3, 4, 5, 6개월에 대해 측정하였다.

2.2.4 모르타르의 압축강도 시험

모르타르의 압축강도 시험은 KS L 5105에 따라 수행하였다. 공시체의 양생은 23±2℃, 습도는 90% 이상을 유지했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 광물 및 암석학적 평가

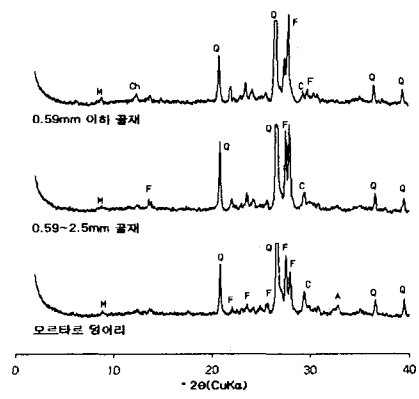
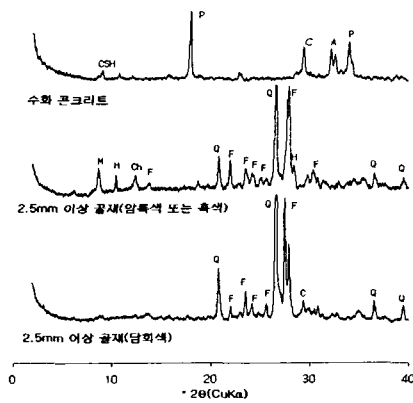
그림 3.1에서 골재 1(재생골재)의 2.5mm 이상 굵은골재에 해당되는 입도에서는, 간혹 모르타르 덩어리가 함유되고 있으나 주로 변후 안산암질 화산암과 사암으로 구성되어 있는 것을 보여준다. 잔골재에 해당되는 입도에서는 모래와 함께 상당량의 시멘트분이 함유되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 재생골재에 포함된 암석과 모래에는 알칼리-골재 반응을 일으키기 쉬운 단백석(opal), 트리디마이트(tridymite)와 크리스토팔라이트(cristobalite), 칼세도니(chalcedony)와 같은 광물은 거의 없으며, 팽창성의 점토광물은 포함되지 않고 있는 것으로 나타났다. 그림 3.2~3.7과 표 3.1을 보면 중생대 백악기 심성암류의 암석(화강암~섬록암)에서는 알칼리-골재 반응을 유발하는 것으로 알려진 파동소광을 하는 석영들이 많이 함유되어 있으며, 운모류 광물, 점토광물인 녹니석과 일라이트와 함께 지올라이트 그룹의 광물인 로우몬타이트(laumontite)가 함유되어 있다. 특히, 로우몬타이트는 열수변질에 의해 생성되는 광물로서 점토광물들과 함께 물을 함유할 경우 부피 변화로 인해 콘크리트의 유해한 광물로 알려져 있다(ASTM C 294). 화산암류 암석은 중생대 중성화산암류에 속하는 안산암과 신생대 산성화산암인 유문암질 응회암이 포함되었으며, 장식, 석영 유색광물들과 골재 반응을 유발하는 트리디마이트(tridymite)와 유리질이 포함되어 있음이 현미경관찰과 XRD 분석으로 확인되었다. 퇴적암류 골재는 백악기 진동층에 속하는 적색 세일과 실트스톤에 해당하는 암석이다. 이에는 석영, 장식과 함께 상당

표 2.3 Mortar-Bar 시험의 골재 입도

통과	잔류	중량(%)
4.75mm (No. 4)	2.36mm (No. 8)	10
2.36mm (No. 8)	1.18mm (No. 16)	25
1.18mm (No. 16)	600 $\mu$ m (No. 30)	25
600 $\mu$ m (No. 30)	300 $\mu$ m (No. 50)	25
300 $\mu$ m (No. 50)	150 $\mu$ m (No. 100)	15

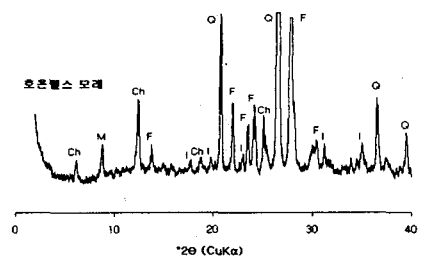
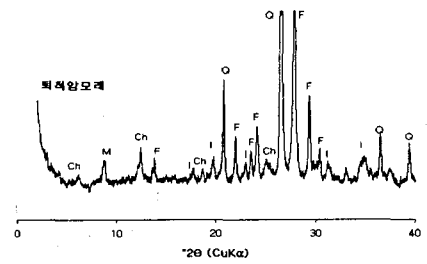
표 2.4 모르타르 배합

골재 번호	W/C (%)	사용수량 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	플로우치 (%)
골재 1	67.8	0.61	0.9	2.025	115
골재 2	67.3	2.02	3.0	6.75	120
골재 3	57.4	1.12	1.95	4.3875	117
골재 4	58.0	1.22	2.1	4.725	120
골재 5	60.0	1.26	2.1	4.725	120
골재 6	79.8	1.675	2.1	4.725	118
골재 7	60.0	1.26	2.1	4.725	119
골재 8	91.4	1.92	2.1	4.725	119



- Q : Quartz
- F : Feldspar
- C : Calcite
- H : Hornblende
- Ch : Chlorite
- A : Albite
- M : Mica
- CSH : Calcium Silicate Hydrate
- P : Portlandite

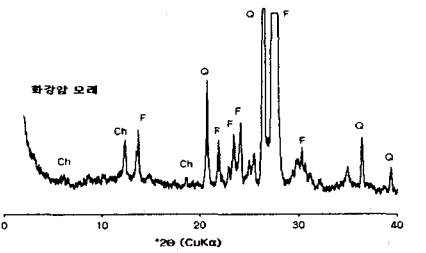
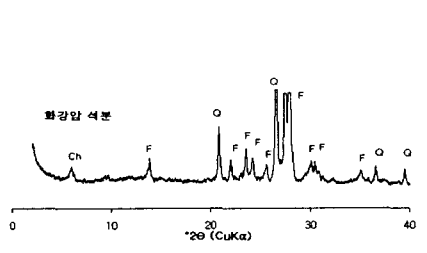
그림 3.1 골재 1의 X선 분석에 의한 회절패턴



- Q : Quartz
- F : Feldspar
- Ch : Chlorite
- M : Mica
- I : Illite and mica

그림 3.2 골재 3의 X선 분석에 의한 회절패턴

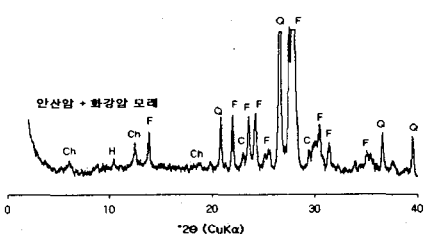
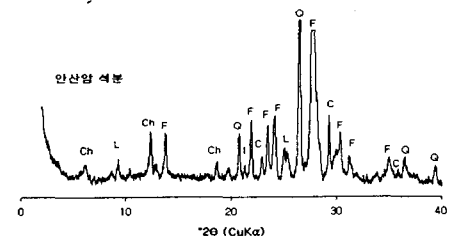
그림 3.3 골재 4의 X선 분석에 의한 회절패턴



- Q : Quartz
- F : Feldspar
- Ch : Chlorite

그림 3.4 골재 5의 X선 분석에 의한 회절패턴

그림 3.5 골재 6의 X선 분석에 의한 회절패턴



- Q : Quartz
- F : Feldspar
- L : Laumontite
- Ch : Chlorite
- C : Calcite
- H : Hornblende
- I : Illite and mica

그림 3.6 골재 7의 X선 분석에 의한 회절패턴

그림 3.7 골재 8의 X선 분석에 의한 회절패턴

량의 점토광물이 포함되어 있다. 여러 형태로 세분된 골재들에 대하여 화학성분을 조사한 결과 SiO<sub>2</sub> 약 20~80%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.3~9%, K<sub>2</sub>O 0.1~5%, Na<sub>2</sub>O 0.1~10%의 다양한 범위를 나타냈다(표 3.2 참조).

### 3.2 골재의 물리적 성질

표면건조 포화상태에서 잔골재의 비중은 보통 2.50~2.65 정도이고 흡수량은 암석의 종류에 따라 다르다. 본 실험에 사용된 골재들은 대체로 2.50~2.60 정도의 비중을 나타냈으나 골재 1(재생골재), 골재 5(화강암) 및 골재 7(안산암)은 다른 골재에 비하여 상대적으로 낮은 2.37, 2.33 및 2.43의 값을 나타냈다(그림 3.8, 3.9 참조). 비중이 작게 나온 이들 골재는 재생골재, 화강암, 및 안산암이었으며 재생골재는 재생골재의 특성상 시멘트 모르타르가 다량 포함되어 있어 다른 골재와 차이가 나타난 것으로 생각된다. 이들 골재(골재 1, 5 및 7)는 다른 골재에 비하여 흡수율이 3~3.5 배 정도 크게 나타났다. 골재의 단위중량 실험결과는 표 3.3과 같다. 골재 3(퇴적암), 골재 4(호운펠스), 골재 5(화강암) 및 골재 6(화강암)의 잔입자량은 천연골재인 골재 2

표 3.1 Result of XRD analysis of aggregates

골재번호	구성광물 (Mineral)
골재 1	석영, 장석, 방해석, 녹니석, 운모, 각섬석
골재 3	석영, 장석, 녹니석, 운모, 일라이트
골재 4	석영, 장석, 녹니석, 운모, 일라이트
골재 5	장석, 석영, 녹니석
골재 6	장석, 석영, 녹니석
골재 7	장석, 석영, 방해석, 녹니석, Laumontite, 각섬석
골재 8	장석, 석영, 녹니석, 방해석, 각섬석

\* 구성광물의 나열순서는 성분함량이 원편에서부터 성분의 함량이 많은 순으로 열거.

표 3.2 Chemical compositions of aggregates

comp. agg.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
골재 1	68.601	11.049	2.857	0.068	6.604	0.917	3.193	2.498
골재 3	61.001	14.291	4.411	0.074	3.659	2.107	2.526	3.792
골재 4	73.554	13.576	4.154	0.153	0.956	0.812	0.942	5.124
골재 5	70.641	15.129	2.782	0.065	1.335	0.312	3.853	4.103
골재 6	74.955	13.189	1.972	0.041	1.098	0.242	3.893	4.205
골재 7	63.070	17.182	2.514	0.061	5.301	1.184	1.373	6.382
골재 8	66.997	16.415	2.614	0.060	3.174	0.756	2.445	5.973

(unit : wt.%)

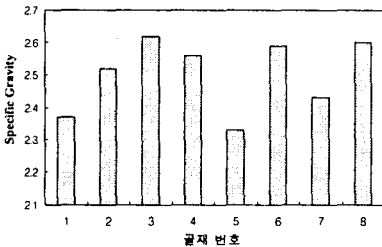


그림 3.8 골재의 비중

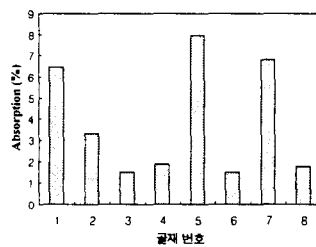


그림 3.9 골재의 흡수율

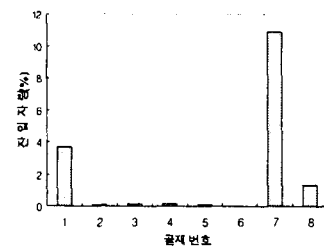


그림 3.10 골재의 잔입자량

(구포사)와 거의 비슷한 값을 나타냈다. 이 외에 다른 골재들은 천연골재 잔입자량의 3~4배 가까운 값을 나타내고 있다. 특히, 골재 7(안산암)은 천연골재의 잔입자량과 거의 10배 가까운 값의 차이를 보였다(그림 3.10 참조). 따라서, 골재 1(재생골재)과 골재 7(안산암)을 잔골재로 사용할 때는 잔입자량을 줄일 수 있는 처리과정이 필요함을 알 수 있다. 시험 용액의 색도가 표준색 용액보다 진할 때는 그 모래를 사용하기 전에 골재로서 KS F 2514(모르타르의 압축강도에 의한 잔골재 시험방법)의 시험을 할 필요가 있음을 나타내는 것이다. 유기불순물 시험결과 각 골재의 시험 용액의 색도가 표준색 용액보다 진하지 않기 때문에 콘크리트용 모래로 적합한 것이라 볼 수 있다.

표 3.3 골재의 단위중량

골재 번호	단위중량 (kgf/m <sup>3</sup> )
골재 1	1,466
골재 2	1,369
골재 3	1,522
골재 4	1,600
골재 5	1,666
골재 6	1,623
골재 7	1,733
골재 8	1,605

### 3.3 모르타르 압축강도

각 골재의 모르타르 압축강도는 표 3.4와 같다. 골재 7(안산암)과 골재 8(안산암+화강암)은 200 kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 압축강도가 나왔으며, 각 골재들은 재령 28일 때 보다 3개월에서 더 높은 강도를 나타냈다.

표 3.4 모르타르 압축강도

	골재 1	골재 2	골재 3	골재 4	골재 5	골재 6	골재 7	골재 8
28일 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	242	288.8	327.3	375.5	219.4	348.4	120.4	125.2
3개월 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	253	294.8	346.6	381.8	223.2	351.1	249.4	240.2

### 3.4 알칼리-골재 반응에 의한 Mortar-Bar 실험결과

각 재령에서 Mortar-Bar의 길이변화 측정결과는 그림 3.11에 나타내었다. 초기에는 건조수축에 의해 수축하다가 다시 원래 길이로 회복하여 팽창하는 경향을 보이고 있으며 6개월 경과 후 0.1% 이상의 팽창에서 유해임을 감안한다면 모든 골재가 알칼리-골재 반응에 대해 무해라고 판단된다.

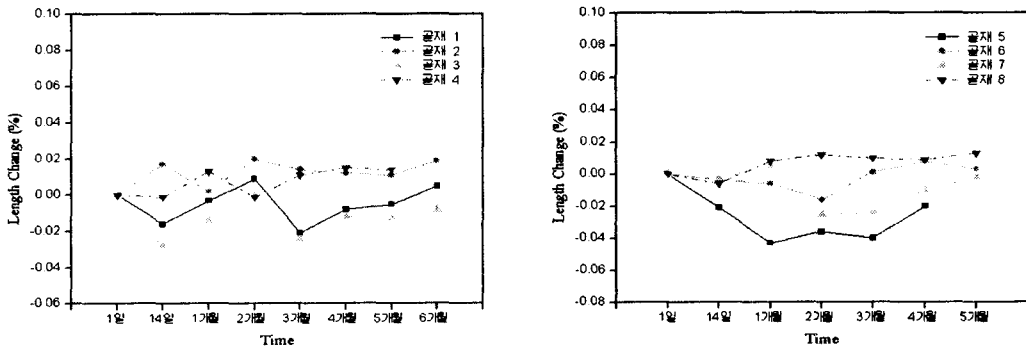


그림 3.11 Length change of mortar-bar

## 4. 결 론

- (1) 암종 별로 수집된 골재들의 주 광물성분은 Quartz, Feldspar, Chlorite, Calcite, Mica 등이며, 이의 함량과 광물의 결정 크기는 산지에 따라 크게 다르다.
- (2) 골재의 물리적 성질 시험결과 재생골재와 안산암은 다른 골재에 비해 상대적으로 낮은 비중을 나타냈고, 안산암은 다른 골재의 압축강도보다 1/2 정도 낮은 값을 나타냈다. 이들 골재를 잔골재로 사용시 잔입자량을 줄일 수 있는 처리과정이 필요하다.
- (3) 광물학적 시험 분석의 연구결과 일반적으로 지적되고 있는 유해 광물 성분이 골재에 여러 종 포함되어 있으므로 광물학적 분석 측면에서는 유해성이 있다고 할 수 있다.
- (4) 광물학적 분석에 의해서 다소 유해가능성이 있는 골재에 대하여 Mortar-Bar 시험을 수행한 결과 6개월 경과 후 0.1% 이상의 팽창을 나타내는 골재는 없었다.
- (5) 이상의 시험결과를 분석하면 본 연구 범위 내에서 시험한 쇄석 골재에 한해서 반응성 골재는 발견되지 않았지만 골재의 종류와 구성광물의 특성상 느린 속도로 반응성을 나타내는 경우가 있으므로 지속적으로 이에 대한 측정 및 실험이 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00064) 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. 하성호, 김경수, 김무한, 정지곤, "골재용 각종 암석의 알칼리-골재반응에 대한 연구", 한국광물학회지, 제3권, pp.18~33, 1990.
2. 이종득, "알칼리 골재반응 진단", 일광, pp.82~115, 1996.
3. ASTM C 227-97a, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method).