

# 재생골재의 광물학적 및 화학적 특성과 대체율에 따른 동결융해 저항성

## The Petrographic and Chemical Properties of Recycled Aggregate, and the Resistance of Concrete by Replacement Ratios of Recycled Aggregate to Rapid Freezing and Thawing

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

### ABSTRACT

The availability of natural aggregates has decreased in recent years due to depleting reserves. From the viewpoint of energy and resources saving, it may be advantageous to use the waste concrete as construction aggregates. The purpose of this study is to analyze petrographic and chemical properties of recycled aggregate, and to investigate the resistance of concrete to rapid freezing and thawing by using replacement ratios (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100%) of recycled aggregate.

### 1. 서론

급속한 산업화와 인구증가 및 대량소비에 따른 폐기물에 의하여 초래되는 지구 환경오염은 국내의 할 것 없이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 이에 대한 해결방법의 하나로 자원의 순환이용 즉 "자원 리사이클링"을 들 수 있는 데 폐기물은 놓여져 있는 시간과 공간에 따라 폐기물이 될 수도 있고 가용자재로 활용될 수도 있다. 이것은 폐기물의 재이용을 위한 사회시스템의 구축이 필요함을 암시한다고 볼 수 있다. 재건축 재개발 사업의 활성화와 더불어 점차 가속되는 폐 콘크리트의 발생은 환경오염 뿐 만 아니라 자원 재활용 측면에서도 시급한 대책 수립이 요구된다.

본 연구에서는 지금까지 주로 저급재료로 사용되던 재생골재의 구성광물, 화학조성 및 물리화학적 특성과 알칼리-골재 반응성 여부를 조사하고, 재생굵은골재의 대체율에 따른 콘크리트 강도와 동결융해 저항성을 검토하여 재생골재의 유효이용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 본 연구에서 사용한 재생골재는 1973년에 가설된 부산 북구 만덕동 덕천 2호교(RC Slab교) 폐 콘크리트를 1998년 파쇄 재생한 것이다.

\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정희원, 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

\*\*\* 정희원, 부산대학교 지질학과 강사

\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 지질학과 교수

\*\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수

## 2. 골재의 광물 및 암석학적 시험

### (1) 실험방법

콘크리트 재생골재에 포함된 암석종류, 구성광물 및 화학성분을 파악하기 위해서 암석학적 기법과 함께 X-선 회절분석(XRD)을 실시하고, 주성분 원소의 화학성분을 분석하였다.

먼저 실험에 사용된 콘크리트 재생골재에 포함된 굵은골재의 암석학적 관찰을 위해 2.5mm 이상의 골재에서 가능한 굵은골재를 선별하여 박편을 제작하였다. 제작된 박편을 편광현미경을 사용하여 구성광물, 조직, 변질양상 등의 암석학적인 특징을 관찰하여 그 골재의 암석 종류를 파악하였다. 그리고 2.5mm 이하의 잔골재에 해당하는 재생골재는 0.59mm(No.30)체를 기준으로 두 가지 입도별로 시료를 분리하였다. 그리고, 재생콘크리트 골재에 포함된 모르타르 덩어리를 따로 분리하여 시료로 준비하였다(표 1 참조). 이와 같이 분리된 시료들에 포함된 구성광물 성분을 정밀하게 식별하기 위하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하고, 주성분 원소의 화학성분을 분석하였다. 분석을 위한 시료들은 막자분말기로 측정에 필요한 입도까지 분쇄하였다. X-선 회절분석은 부산대학교 지질학과에서 Rigaku사의 Geierflex 2301을 사용하여 CuK $\alpha$ 선으로 Ni-filter를 사용하였다. 측정 조건은 30kV, 15mA, scan speed는 2°2 $\theta$ /min, 시정수 1sec, slit 1°(divergent slit)~0.3 mm (receiving slit)~1°(scatter slit)로 하였다. 실험방법은 부정방위 방법의 분말 시료들로 분석하였다. 주 화학성분 분석은 부산대학교 소재의 한국기초과학연구원 연구소 부산·경남 분소에서, Philips사의 model PW 2400 X-형광분석기로 실시하였다.

### (2) 실험결과

육안으로 분리된, 재생콘크리트 골재 중에 포함된 굵은골재는 암록색 내지 흑색을 띤 암석과 담회색의 암석 두 종류가 포함되어 있다. 이들 암석을 박편으로 제작하여 편광 현미경을 사용하여 구성광물의 분포와 암석학적인 특징을 관찰하고, X-선 회절분석으로 구성광물을 분석한 결과, 이는 변후 안산암질 화산암류에 속하는 것으로 나타났다(표 1 및 그림 1 참조). 주 화학성분 분석 결과도 이 암석이 안산암류의 화산암에 가까운 분석 결과를 나타낸다(표 2 참조). 담회색의 골재들은 편광현미경 분석과 X-선 회절분석에 의하면 주로 석영과 장석으로 구성된 분급도가 좋은 세립질 사암으로 판명되었다. 화학 분석 결과도 미량의 유색 광물 성분을 가지는 사암임을 잘 보여주고 있다(표 2 참조). 2.5mm 이하의 잔골재에는 풍부한 석영, 장석 및 소량의 유색광물, 방해석과 시멘트광물이 포함되어 있는 것으로 나타났다(표 1 및 그림 1 참조). 방해석과 시멘트광물의 검출은 이 부분을 이루는 재생골재에 소량의 시멘트풀이 포함되어 있음을 알 수 있다. 시멘트풀은 0.59mm 이하의 작은 입도에서 더 많이 함유되고 있는 것으로 나타났다. 이상의 분석결과는 본 연구에 사용된 재생콘크리트 골재의 2.5mm 이상의 굵은골재에 해당되는 입도에서는, 간혹 모르타르 덩어리가 함유되고 있으나 주로 변후 안산암질 화산암과 사암으로 구성되어 있는 것을 보여준다. 잔골재에 해당되는 입도에서는 모래와 함께 상당량의 시멘트풀이 함유되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 재생골재에 포함된 암석과 모래에는 알칼리-실리카 반응을 일으키기 쉬운 단백석(opal), 트리디마이트(tridymite)와 크리스토팔라이트(cristobalite), 칼세도니(chalcedony)와 같은 광물은 거의 없으며, 팽창성의 점토광물은 포함되지 않고 있는 것으로 나타났다.

표 1 편광현미경과 XRD분석에 분류된 재생골재의 암석 종류와 구성 광물들

시료 분류	2.5m~0.59 mm 의 잔골재	0.59 mm 이하의 잔골재	암록색 내지 흑색 굵은골재	담회색 굵은골재	모르타르 덩어리
시료 기호	C-L59	C-H59	RE-DB	RCW	C-CONC
구성광물	석영, 장석, 방해석, 녹니석, 운모	석영, 장석, 방해석, 운모	석영, 장석, 운모, 각섬석, 녹니석,	석영, 장석	석영, 장석, 방해석, 아라이트, 운모
구성광물의 기원	모래 잔골재+콘크리트 +소량의 굵은골재	모래 잔골재 +콘크리트	변후 안산암질 화산암	사암	콘크리트+ 모래 잔골재

표 2 XRF 분석에 의한 재생골재의 주 화학성분

시료 분류	2.5m~0.59 mm 의 잔골재	0.59 mm 이하의 잔골재	암록색 내지 흑색 굵은골재	담회색 굵은골재	수화 콘크리트
시료 기호	C-L59	C-H59	RE-DB	RCW	SCEM(H)
SiO <sub>2</sub>	68.601	66.521	60.603	65.306	18.062
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.049	10.456	16.491	11.058	4.874
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.857	2.852	6.297	2.308	2.902
MnO	0.068	0.073	0.130	0.057	0.172
CaO	6.064	7.475	4.952	8.719	58.726
MgO	0.917	0.807	3.145	0.775	2.250
K <sub>2</sub> O	3.193	3.090	2.694	3.609	0.527
Na <sub>2</sub> O	2.498	2.315	3.548	2.322	0.363
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.081	0.072	0.219	0.051	0.153
TiO <sub>2</sub>	0.310	0.319	0.754	0.226	0.266
LOI	4.226	5.342	1.145	5.721	11.000
Total(%)	99.840	99.322	100.278	100.152	99.296

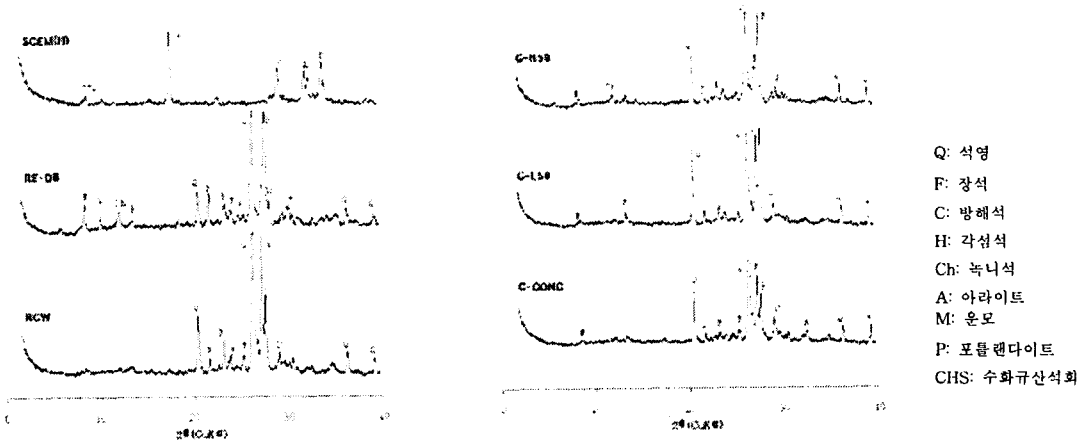


그림 1 재생골재 시료들의 x-선 분석에 의한 회절패턴

### 3. 골재의 물리·화학적 성질 시험

(1) 골재의 체가름 시험(KS F 2502) : 재생굵은골재의 입도는 표준분포를 만족하므로 입도 조정 과정 없이 그대로 사용하였으며, 재생굵은골재 대체율에 따른 굵은골재의 입도도 표준분포를 만족

하였다.

- (2) 골재의 비중 및 흡수율 시험(KS F 2503, 2504) : 골재의 채취장소 및 풍화의 정도에 따라 비중, 흡수량에는 변화가 생기며 비중이 큰 것은 일반적으로 강도가 크고 흡수량은 적고, 동결에 대한 내구성이 크다. 따라서 비중에 대한 제한이 필요하며 폐 콘크리트를 재활용하였을 때의 비중을 측정하여 골재의 적합성 여부를 판단하는 것이 중요한 사항이다. 특히 재생골재의 특성상 시멘트 모르타르가 다량 포함되어 있으므로 흡수량에서 천연골재와 많은 차이가 있을 것이다. 실험결과, 재생굵은골재의 흡수율은 천연굵은골재에 비하여 2.5배정도 크게 나타났으며, 재생굵은골재의 대체율이 증가할수록 일정한 크기로 증가하는 것을 알 수 있었다(표 3 참조).

표 3 골재의 비중 및 흡수율

골재	비중	흡수율(%)
천연잔골재	2.580	1.410
천연굵은골재	2.706	1.335
10% 재생굵은골재	2.708	1.554
20% 재생굵은골재	2.711	1.890
30% 재생굵은골재	2.700	1.950
40% 재생굵은골재	2.715	2.156
50% 재생굵은골재	2.720	2.200
60% 재생굵은골재	2.732	2.450
70% 재생굵은골재	2.738	2.890
100% 재생굵은골재	2.740	3.300

- (3) 골재의 단위중량 시험(KS F 2505) : 단위중량은 골재의 비중, 입도, 공극률 및 함수정도에 따라 변하므로 골재의 상태를 파악하는데 중요한 매개변수가 된다(표 4 참조).
- (4) 골재에 포함된 잔입자 시험(KS F 2511) : 이 시험은 골재에 포함된 0.08mm(No.200)체를 통과하는 잔입자의 양을 측정하는 것이다. 재생골재는 폐 콘크리트가 파쇄되는 과정에서 충격에 의해 미세입자들이 다량 함유될 수 있어서 재생골재와 천연골재의 잔입자량의 차이를 파악할 필요가 있다. 표 5에서 알 수 있듯이 재생골재의 잔입자량은 천연골재에 비하여 2.5배 가까운 값을 나타내고 있다. 따라서, 재생골재 사용시 잔입자량을 줄일 수 있는 처리과정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

표 4 단위중량(kg/m<sup>3</sup>)

잔골재	굵은골재	
	천연굵은골재	재생굵은골재
1,511	1,665	1,586

표 5 골재에 포함된 잔입자량(%)

잔골재	굵은골재	
	천연골재	재생골재
1.55	0.72	1.76

- (5) 콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기불순물 시험(KS F 2510) : 이 시험은 시멘트 모르타르 또는 콘크리트에 사용되는 천연사 중에 함유되어 있는 유기화합물의 해로운 양을 결정하기 위하여 필요하다. 유기불순물 시험결과 시험 용액의 색도가 표준색 용액보다 진하지 않기 때문에 콘크리트용 모래로 적합한 것이라 볼 수 있었다.
- (6) 굵은골재의 파쇄시험(KS F 2541) : 이 시험은 점차 증가하는 압축하중 하에서 굵은골재의 저항성을 알아보기 위한 시험으로, 표준파쇄 시험은 13mm체를 통과하고, 10mm체에 남는 골재에 대해 2.5mm체로 세립을 분리한 값을 측정한다. 본 시험은 19mm를 공칭치수로 하기 때문에 KS F 2541에 규정된 호칭치수에 의하여 3.35mm의 체를 세립을 분리하기 위한 체의 호칭치수로 하였다. 파쇄시험 결과 재생골재가 천연골재보다 파쇄값이 조금 높은 것을 알 수 있었다(표 6 참조).

표 6 굵은골재의 파쇄시험 성과

	표면건조 포화상태의 시료의 무게(g)	3.35mm체를 통과한 시료의 무게(g)	골재의 파쇄값(%)	파쇄값(%)
재생골재 (100%)	3578.9	600.6	16.8	17
	3794.1	618.5	16.3	
천연골재	3677.0	536.8	14.6	15
	3808.0	576.8	15.1	

\* 여기서, 파쇄값은 골재의 파쇄값으로 정수치로 나타낸다.

- (7) 알칼리-골재반응의 조사를 위한 시험(KS F 2546) : 이 시험은 시멘트와 골재를 저장하는 동안

각 조합에 따른 Mortar-Bar의 길이 변화(증감)를 측정하여 시멘트와 골재의 배합이 나트륨이나 칼슘과 같은 알칼리의 수산화 이온을 포함한 팽창반응에 미치는 반응도를 측정하는 것이다.

① 시료의 채집 및 준비

재생골재를 시험에 사용하기 위해 분쇄한 후 체가름하여 KS F 2546의 절차에 부합하도록 표 7과 같이 입도를 맞추었다.

표 7 Mortar-Bar 시험 골재 입도

통과	간류	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

② Mortar-Bar 제작

재료의 배합은 시멘트-골재 중량비를 1:2.25로 하고 배합수를 첨가하여 플로우치가 105~120의 범위가 되게 한다. Mortar-Bar는 W/C 67.8(%), 플로우치 115로 6개의 시편을 제작하였다.

③ 시편의 보관 및 길이변화의 측정

모든 시편은 KS F 2546에 준하여 보관하였으며, 재령 24시간, 14일, 28일, 2개월, 3개월에 길이변화를 측정하였다(표 8 참조).

표 8 Mortar-Bar의 길이변화

재령	Mortar-Bar의 팽창률(%)					
	시편-1	시편-2	시편-3	시편-4	시편-5	시편-6
14일	0.008	0.007	0.007	0.009	0.008	0.009
1개월	0.010	0.009	0.008	0.010	0.009	0.010
2개월	0.011	0.010	0.012	0.013	0.010	0.012
3개월	0.011	0.010	0.012	0.013	0.010	0.012

KS F 2546으로 시험을 할 경우 6개월에 0.10% 이상의 팽창을 유발하는 시멘트·골재 배합은 대개 해로운 반응을 일으킬 수 있는 것으로 간주한다. 6개월의 결과를 이용치 못할 경우에는 배합물이 3개월에 0.05% 이상의 팽창을 유발한다면 배합물은 해로운 알칼리 반응을 일으킬 잠재력이 있는 것으로 간주해야 한다. 시험결과 3개월 동안 0.05% 이상 팽창을 유발하는 시편은 없었으므로 알칼리-골재 반응을 일으킬 염려는 없는 것으로 판단된다.

4. 재생콘크리트의 동결융해 시험

(1) 시편제작

콘크리트 동결융해 공시체는 76×101×412mm의 몰드를 이용하여 재생골재를 굵은골재의 중량비 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100% 수준으로 대체하여 각 콘크리트를 제작하였다.

(2) 시험방법

동결융해 시험은 KS F 2456 '급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험'의 실험방법 B에 준한 '공기중 급속동결 및 수중 급속융해법'으로 실시하였다. 시험은 2시간 사이에 4℃에서 -18℃로 떨어뜨리고 다음에 -18℃에서 4℃로 상승시키는 것을 1 cycle로 하여 매 50 cycles 간격으로 300 cycles 까지 KS F 2437에 따라 공명진동식 동탄성계수 측정기를 이용하여 시편의 동탄성계수를 측정하였다.

(3) 시험결과

동결융해 시험에서 상대동탄성계수의 변화량은 거의 95% 수준에서 변화하였다(그림 2 참조). 내

구성 지수의 변화량도 변화가 작았다(최초 시험시 상대동탄성계수의 60% 수준까지 떨어지지 않았으므로 동탄성계수와 값이 동일하다). 그리고 압축강도 감소율은 재생굵은골재 대체율이 높아질수록 약간 줄어드는 경향을 보였다(그림 3 참조).

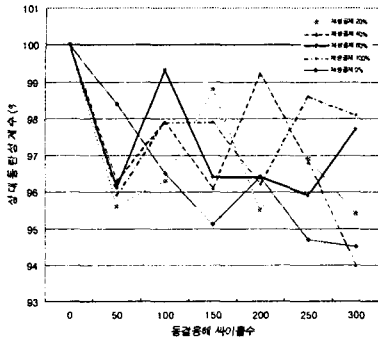


그림 2 사이클에 따른 상대동탄성계수

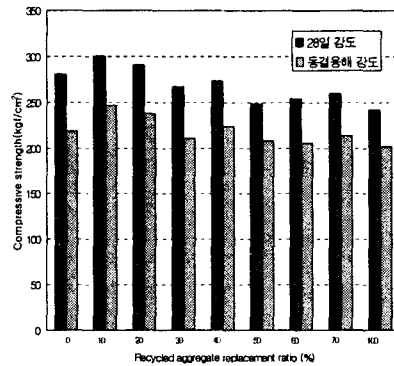


그림 3 굵은골재 대체율에 따른 일축압축강도

## 5. 결 론

- (1) 재생골재의 X-선 회절분석결과 알칼리-실리카 반응을 일으키기 쉬운 광물은 포함되지 않았다.
- (2) 재생굵은골재는 천연굵은골재에 비해 상대적으로 비중이 낮았으며 흡수율은 재생굵은골재의 대체율에 따라 높아짐을 알 수 있었다.
- (3) 재생굵은골재 사용시 대체율이 증가할수록 슬럼프값은 조금씩 감소하고, 단위중량도 기본 콘크리트보다 대체적으로 감소하였다.
- (4) 재생콘크리트의 Mortar-Bar법에 의한 길이변화가 3개월에 평균 0.001% 정도로 알칼리-골재 반응을 일으킬 염려가 없는 것으로 판단된다.
- (5) 콘크리트의 일축압축강도 시험 결과, AE감수제와 적절한 양의 재생굵은골재를 대체한 콘크리트는 28일 강도를 기준으로 해서 기본 콘크리트 수준의 강도 발현을 확인할 수 있었다.
- (6) 재생콘크리트의 동결융해 시험결과, 사이클수에 대한 상대동탄성계수 및 내구성 지수의 변화는 거의 없었다.

## 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. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서·해설," 기문당, pp.530, 2000.
3. Lee, H., "Expansive mineral growth and concrete deterioration: A microstructural and microanalytical study," Ph. D. dissertation, Iowa State University, pp.292., 1999.