

폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성규명을 위한 실험적 연구

전쌍순^{*1)} · 이효민²⁾ · 황진연²⁾ · 진치섭¹⁾ · 박현재¹⁾

¹⁾부산대학교 토목공학과, ²⁾부산대학교 지질학과

An Experimental Study to Determine the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Separated from Demolished Concrete and Recycled Aggregate Concrete

Ssang Sun Jun^{*1)} · Hyomin Lee²⁾ · Jin Yeon Hwang²⁾ · Chi Sub Jin¹⁾ · Hyun Jae Park¹⁾

¹⁾Pusan National University, Dept. of Civil Engineering

²⁾Pusan National University, Dept. of Geology

요 약

근래에 와서 천연골재자원의 보호와 건설 폐기물의 재활용의 측면에서 폐 콘크리트에서 분리한 재생골재의 재활용이 모색되어 왔으나, 재생골재는 주로 콘크리트 도로기층용과 구조물 뒷채움재와 같은 저급재료로 사용되고 있다. 본 연구는 재생골재의 콘크리트 용 골재로의 효율적인 재활용 가능성을 위하여, 재생골재의 구성광물, 화학조성 및 공학적 물성 특성 파악하고 재생콘크리트(RCA)의 시공성과 역학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 재생골재에 잔존하는 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트는 골재의 기초 물성 특성, 재생콘크리트의 시공성 및 굳은 콘크리트의 공학적 특성에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 적절한 양의 재생굵은골재를 대체한 재생콘크리트는 압축강도와 동결융해 내구성에서 보통 콘크리트의 기준에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서, 재생골재의 제조과정에서 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트의 제거가 효과적으로 이루어지고 적절한 대체율이 적용되면, 재생골재는 콘크리트용 골재로서 효율적인 사용이 확대 될 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 폐 콘크리트, 재생골재, 재생콘크리트, 대체율

ABSTRACT: Recently, the reuse of coarse aggregate derived from demolished concrete was introduced into practice with two environmental aspects: protection of natural sources of aggregate and recycling of construction waste. However, recycled aggregate has been used for the very limited application such as subbase material for pavement and constructional filling material because it was considered as low quality constructional materials. In the present study, in order to examine the possibility that recycled aggregate can be used for

* Corresponding author: lloydjun@hanmail.net

concrete mixing, we conducted various experimental tests to identify mineralogical, chemical and mechanical properties of recycled aggregate and to determine the workability and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). The cement paste and mortar contained in recycled aggregate significantly affect the basic mechanical properties of aggregate and the workability and mechanical properties of RAC. However, RCA mixed with the proper replacement ratio of recycled aggregate shows the comparable compressive strength and freeze and thaw resistance to those of normal concrete. Therefore, it is considered that recycled aggregate can be widely used for concrete if the cement paste and mortar can be efficiently removed from recycled aggregate and/or if the effective replacement ratios of recycled aggregate are applied for mixing concrete.

Key words: demolished concrete, recycled aggregate, recycled aggregate concrete (RCA), replacement ratios

서 론

산업화의 급속한 진전에 따른 폐기물에 의하여 초래되는 지구 환경오염은 국내외 할 것 없이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 근래에 들어 재건축, 재개발 사업의 활성화와 더불어 점차 가속되는 폐 콘크리트의 발생은 환경오염뿐만 아니라 자원 재활용 측면에서도 시급한 대책 수립이 요구되는 부분이다. 일반적으로 건설구조물은 60년 이상의 수명을 가지고 있으나, 현재 국내에서는 경제적·사회적 요인과 내구성의 저하로 20년이 지난 대부분의 건축물에서 재건축 수요가 나타나고 있어 건설폐기물은 앞으로 더욱 크게 증대될 것으로 전망된다. 이에 비해 최근 매립지 용량이 한계에 다다르고 있고, 최종처분장의 신설도 곤란한 실정인 이상 건설폐기물의 효율적인 재활용은 시급한 과제가 되고 있다.

천연골재자원의 고갈에 따른 골재의 공급 부족은 국내에서도 심각한 문제가 되고 있다. 국내의 하상 골재 채취는 환경보호와 맞물려 이미 한계에 이르렀고, 석석 골재와 해사의 사용이 증가되고 있으나, 이들도 각각 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 석산 개발과 해사 채취도 시간이 증가함에 따라 환경 보존과 운송거리의 제약 등으로 인한 지역적 수급 불균형 현상으로 나타나게 된다. 이러한, 천연골재 자원의 부족과 폐기물의 처리에 대한 해결책으로 폐 콘크리트의 재활용이 좋은 방안이 될 수 있을 것이다. 건설폐기물은 구

성성분의 특성상 재활용이 용이하며, 특히 콘크리트 폐재를 재활용한 재생골재는 골재 채취에 따른 환경문제의 저감에도 기여할 수 있다. 따라서, 최근에 들어 국내외에서 재생골재를 다양한 용도로 활용하기 위한 꾸준한 시험적 연구가 진행되고 있다(Sagoe-Crentsil et al., 2001; Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002; Zaharieva et al., 2003; 김 광우, 1994; 김무한, 1997; 이진용, 1998, 심종성외, 2003). 그러나, 많은 연구에서는 골재와 재생 콘크리트의 공학적 특성과 강도 발현에 대한 시험적 연구에 국한되어 있었다. 따라서, 본 연구에서는 재생골재의 광물학적, 화학적 특성과 공학적 물성을 종합적으로 검토한 연구를 실시하여, 지금까지 주로 저급재료로 사용되던 재생골재의 콘크리트 재료로서 활용 가능성을 정량적으로 조사하였다. 이를 위하여, 선별된 재생골재의 구성광물, 화학조성 및 물리·화학적 특성 파악을 위한 실험을 수행하였으며, 이를 기초한 알칼리-골재 반응성 판정 및 재생굼은골재의 대체율에 따른 콘크리트 강도와 동결융해 저항성을 검토하여 재생골재의 유효한 이용을 위한 기초자료를 제시하였다. 본 연구에서 사용한 재생골재는 1973년에 가설된 부산 북구 만덕동 덕천 2호교(RC Slab교)의 철거로 발생한 폐 콘크리트를 부산 근교의 한 재생골재 전문 생산 업체에서 1998년 파쇄 재생한 것이다.

시험방법

재생골재의 광물 및 암석학적 특성 시험

폐 콘크리트로부터 분리된 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 골재의 암석 종류를 파악하였다. 2.5mm 이하의 잔골재에 해당하는 재생골재는 0.59mm (No.30)체를 기준으로 두 가지 입도별로 시료를 분리하였으며, 재생콘크리트 골재에 포함된 모르타르 덩어리는 따로 분리하여 시료로 준비하였다. 이와 같이 분리된 시료들에 포함된 구성광물 성분과 폐 콘크리트의 시멘트 페이스트 성분을 정밀하게 식별하기 위하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하고, 주성분 원소의 화학성분을 분석하였다. X-선 회절분석은 부산대학교 지질학과에서 Rigaku사의 Geierflex 2301을 사용하여 CuK α 선으로 Ni-filter를 사용하였다. 측정 조건은 30KV, 15 mA, scan speed는 2°2 θ /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 한국기초과학지원연구소 부산·경남 분소에서, Philips사의 model PW 2400 X-선형광분석기로 실시하였다.

재생골재의 알칼리-반응성 시험

알칼리-골재 반응의 조사를 위한 시험은 한국 산업표준규격 KS F 2546에 의거 실시하였다. 이 시험은 나트륨이나 칼슘과 같은 알칼리의 이온과 반응성 골재와의 반응에 의한 모르타르 봉의 팽창률을 측정함으로써 골재의 알칼리 반응성 여부를 시험하는 방법으로 미국표준규격 ASTM C 227에 상응하는 방법이다. 재생굵은골재를 시험에 사용하기 위해 분쇄한 후 체가름하여 KS F 2546의 절차에 부합하도록 입도를 맞추었다. 모르타르

봉은 물-시멘트 비(W/C) 67.8%, 플로우치 115로 6개의 시편을 제작하였다. 모르타르 봉은 37.8±1.7°C의 온도를 유지하고 상대습도 95% 이상을 유지할 수 있는 항온 항습실에 보관하였으며, 길이변화는 재령 24시간, 14일, 1, 2, 3, 4, 5, 6 개월에 각각 측정하였다.

재생골재의 물성 특성 시험

재생골재의 콘크리트 용 골재로서 사용 가능성 여부의 판단과 배합 설계에 필요한 다음의 기초 물성 시험들을 한국산업표준규격에 의거 실시하였다: 체가름 시험(KS F 2502), 비중 시험(KS F 2503), 흡수율 시험(KS F 2504), 단위중량 시험(KS F 2505), 잔입자 시험(KS F 2511), 마모시험(KS F 2508), 파쇄시험(KS F 2541).

재생골재 혼합에 따른 재생콘크리트의 물성 특성 시험

재생골재를 굵은골재의 중량비 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100% 수준으로 대체하여 재생콘크리트를 제작하였으며, 이에 대한 압축강도와 동결융해 저항성 시험을 수행하였다. 콘크리트 공시체 제작은 설계기준강도 280 kgf/cm²에 준하는 배합비를 설정하였다(Table 1). 콘크리트의 일축압축강도 측정용 공시체는 ϕ 10×20(cm)의 원주형 몰드를 이용하여 제작하였다. 일축압축강도 측정용 공시체는 시험 전까지 수온 20±3°C의 수조에 넣어 표준양생을 한 후, 재령 3, 7, 28일 및 동결융해시험 후 강도 측정을 하였다. 콘크리트 동결융해 공시체는 76×101×412(mm)의 몰드를 이용하여 콘크리트 공시체를 제작하였다. 공시체를 제작하고 24시간 후 탈형하여 동결융해 시험 전까지 수온 20±3°C의 수조에 넣어 표준양생을 실시하였다. 동결융해 시험은 28일 동안 표준 양생한 공시체를 이용하여 KS F 2456 '급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험'의 실험방법 B에 준한 '공기 중 급속 동결 및 수중 급속 융해법'으로 실시하였다. 시험은 2시간 사이에 4°C에서 -18°C로 떨어뜨리고 다음에 -18°C에서 4°C로 상승시키는 것을 1 주기(cycle)로 하여 매 50 주기 간격으로 300 주기까지 KS F 2437에 따라 공명 진동식 동탄성계수 측정기를 이용하여 시편의 동탄성계수를 측정

Table 1. Mixing of concrete.

Maximum Size of Coarse Agg. (mm)	Slump (cm)	Air Content (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				
					Water	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.	AE Water Reducer
19	9±1.0	4.0	45	51.8	203	451	820	803	0.902

* Designed Compressive Strength: 280 (kgf/cm²)

Table 2. Rocks and mineral constituents in the different portions of recycled aggregate.

Samples	Fine Agg. (>0.59 mm)	Fine Agg. (2.5 mm~0.59mm)	Dark Colored Coarse Agg.	Light Colored Coarse Agg.	Mortar
Sample No.	C-H59	C-L59	RE-DB	RCW	C-CONC
Mineral Constituents	Q, F, C, M	Q, F, C, Ch, M	Q, F, M, H, Ch	Q, F	Q, F, C, CSH, M, P
Source	Mortar.	Mortar + Coarse Agg.	Andesitic rock	Sandstone	Sand + Cement Paste

* Q: Quartz, F: Feldspars, C: Calcite, M: Micas, H: Hornblende, Ch: Chlorite, CSH: Calcium silicate hydrate, P: Portlandite

하였다. 시험은 300 주기까지이나 최초 시험 시에 측정된 동탄성계수의 60% 이하로 떨어지면 시험을 중단하도록 하였다.

시험 결과 및 분석

재생골재의 광물 및 암석학적 특성

육안으로 분리된, 재생콘크리트 골재 중에 포함된 굵은골재는 암녹색 내지 암흑색을 띤 암석과 담회색의 암석 두 종류가 포함되어 있다. 이들 암석을 박편으로 제작하여 편광 현미경을 사용하여 구성광물의 조직과 암석학적인 특징을 관찰하고, X-선 회절분석으로 구성광물을 정밀 분석하였다 (Table 2와 Fig. 1).

암녹색 내지 암흑색의 골재는 안산암질 화산암류에 속하는 것으로 나타났다. 주 화학성분 분석 결과도 이 암석이 안산암류의 화산암에 가까운 분석 결과를 나타낸다 (Table 2). 편광 현미경으로

관찰 시, 사장석이 판상 혹은 래스(lath)상의 반정으로 나타난다. 석기들은 아주 세립질로서, 편광 현미경상에서는 그 구분이 어려우나, X-선 회절 분석으로 판독한 바 석영, 장석과 함께 유색광물인 녹니석, 흑운모, 각섬석으로 구성됨을 알 수 있다. X-선 회절 분석 결과 석영은 다량 함유된 것으로 나타나나, 현미경상에서 반정으로 나타나는 것이 없는 것으로 보아, 이들은 대부분 아주 세립질의 석기로 포함되어 있음을 알 수 있다. 굵은 사장석 반정과 그 주변에는 녹염석과 녹니석이 나타나는 것으로 보아 이 안산암질 화산암이 변질을 받았음을 시사한다. 현미경 관찰 시 황철석이 일부 포함되고 있음이 관찰되나, 산화의 흔적은 미약하게 나타나고 있다.

담회색의 골재들은 편광 현미경으로 관찰 시, 주로 분급이 잘된 약간 각질(sub-angular)에서 약간 둥근(sub-round)의 석영, 장석의 입자로 주로 구성된 세립질의 사암으로 판명되었다. X-선 회절 분석결과에서도 유색광물의 함량이 매우 적은

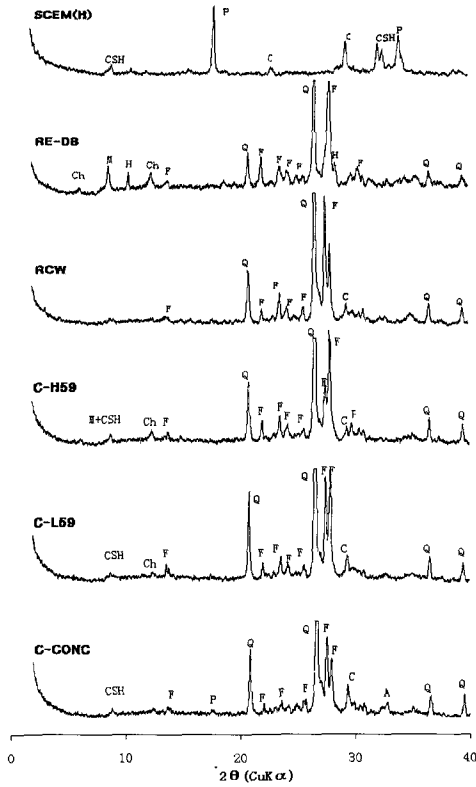


Fig. 1. X-ray Diffraction patterns of different portions of recycled aggregate. SCEM(H): hydrated cement paste, RE-DB: coarse aggregate of andesitic rocks, RCW: coarse aggregate of sandstone, C-H59: 2.5-0.59 mm size range of recycled aggregate portions, C-L59: < 0.59 mm size range of recycled aggregate portions, C-CONC: manually selected mortar portion contained in recycled aggregate. Q: quartz, F: feldspars, C: calcite, H: hornblende, Ch: chlorite, M: mica, P: portlandite, CHS: calcium silicate hydrate.

석영과 장석의 피크가 우세한 암석임을 잘 나타내어 준다(Fig. 1). 화학 분석 결과도 미량의 유색 광물 성분을 가지는 사암임을 잘 보여주고 있다(Table 3).

채 분리된 2.5-0.59mm의 잔골재에 분포하는 재생골재 부분의 XRD 분석 결과, 석영, 장석 및 소량의 방해석, 녹니석, 운모로 구성되어 있음을 알

수 있다(Table 2와 Fig. 1). 다량의 석영, 장석은 폐 콘크리트의 모르타르에서 유래된 모래 잔골재가 주로 포함되어 있음을 시사한다. 상대적으로 낮은 방해석 피크는 이 부분을 이루는 재생골재에 소량의 시멘트 페이스트가 포함되어 있음을 나타낸다. 또한, 소량의 녹니석의 검출로 보아 약간의 안산암질 화산암편이 잔골재로 약간 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 폐 콘크리트가 파쇄되는 과정에서 충격에 의해 굵은골재의 미세 입자가 포함될 수 있음을 나타낸다.

0.59mm 이하의 입도에 해당하는 재생골재에는 역시 모래 잔골재에서 기원된 석영, 장석이 주 구성 광물이며, 0.59 mm 이상의 입자에서 보다 상대적으로 많은 양의 방해석이 XRD상으로 검출된다(Fig. 1). 이러한 결과는 더 많은 시멘트 페이스트가 이 입도에 속하는 재생골재에 함유되고 있음을 나타낸다. 화학분석 결과도 CaO 함량이 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있다(Table 3).

재생골재의 알칼리-반응성

재생골재의 XRD와 암석학적 관찰 결과, 재생골재를 구성하는 암석들에서 알칼리-실리카 반응을 일으키기 쉬운 광물로 알려진 단백석(opal), 트리디마이트(tridymite)와 크리스토팔라이트(cristobalite), 칼세도니(chalcedony)와 같은 광물들은 확인되지 않았다. 그리고, 콘크리트의 균열과 팽창을 유발하는 팽창성 점토광물의 함량도 현저하지 않은 것

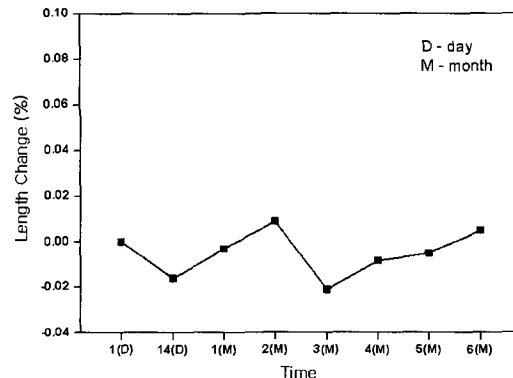


Fig. 2. Length change of mortar bar for AAR test with curing time.

Table 3. Chemical compositions of the different portions of recycled aggregate.

Samples	Fine Agg. (>0.59 mm)	Fine Agg. (2.5 mm~0.59mm)	Dark Colored Coarse Agg.	Light Colored Coarse Agg.	Cement Paste
Sample No.	C-H59	C-L59	RE-DB	RCW	SCEM(H)
SiO ₂	66.521	68.601	60.603	65.306	18.062
Al ₂ O ₃	10.456	11.049	16.491	11.058	4.874
Fe ₂ O ₃	2.852	2.857	6.297	2.308	2.902
MnO	0.073	0.068	0.130	0.057	0.172
CaO	7.475	6.064	4.952	8.719	58.726
MgO	0.807	0.917	3.145	0.775	2.250
K ₂ O	3.090	3.193	2.694	3.609	0.527
Na ₂ O	2.315	2.498	3.548	2.322	0.363
P ₂ O ₅	0.072	0.081	0.219	0.051	0.153
TiO ₂	0.319	0.310	0.754	0.226	0.266
LOI	5.342	4.226	1.145	5.721	11.000
Total(%)	99.322	99.840	100.278	100.152	99.296

으로 나타났다(Fig. 1). 그러나, 본 연구에 사용된 재생골재의 생산한 덕천 2호교의 짧은 수명과 화산암류에 포함된 세립질 석영 및 유리질 성분과 퇴적암내의 석영에 대한 알칼리-반응성 여부를 한국산업표준규격 KS F 2546에 따라 수행하였다.

시험 결과, 모르타르 봉은 6개월 동안 0.1% 이하의 팽창률을 보여줌으로서, 재생골재는 알칼리-골재 반응을 일으킬 염려는 없는 것으로 판단되었다(Fig. 2). 그러나, 재령 초기 14일까지와 3개월 후의 측정에서 모르타르 바의 수축이 발생하고 있는 특징을 보여주는데, 이는 골재에 포함된 시멘트 페이스트에 의한 수화작용과 골재의 물리적 특성에 관련된 것으로 뒤에 다시 설명한다.

재생골재의 물성 특성 시험

골재의 체가름 시험은 골재의 입도, 조립율, 굵은골재의 최대치수를 알기 위한 실험으로서, 골재의 적합성, 콘크리트의 배합설계의 기본 자료가 된다. 재생굵은골재 대체율에 따라 체가름 시험을 실

시한 결과, 재생굵은골재의 입도는 표준분포를 만족하여 입도 조정 과정 없이 그대로 콘크리트 배합에 사용 가능하였으며, 재생굵은골재 대체율에 따른 굵은골재의 입도도 표준분포를 만족하였다.

콘크리트의 비중과 흡수율은 콘크리트의 배합설계에 중요한 요인이 되는 것으로, 골재의 채취장소 및 풍화의 정도에 따라 비중과 흡수량에는 변화가 생기며, 비중이 큰 것은 일반적으로 강도가 크며 흡수량은 적고 동결에 대한 내구성이 크다. 따라서, 폐 콘크리트를 재활용하였을 때의 비중을 측정하여 골재의 적합성 여부를 판단하는 것이 중요한 사항이다. 재생굵은골재의 비중은 유사 압중의 천연굵은골재에 비하여 낮은 것을 알 수 있다(Table 4). 재생굵은골재의 흡수율은 2.5배 정도 크게 나타났으며, 재생굵은골재의 대체율이 증가할수록 일정한 크기로 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 3과 Table 4).

그러나, 흡수율은 재생골재 100% 대체율의 경우에도 한국산업표준규격 KS F 2573(콘크리트 용

폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성규명을 위한 실험적 연구

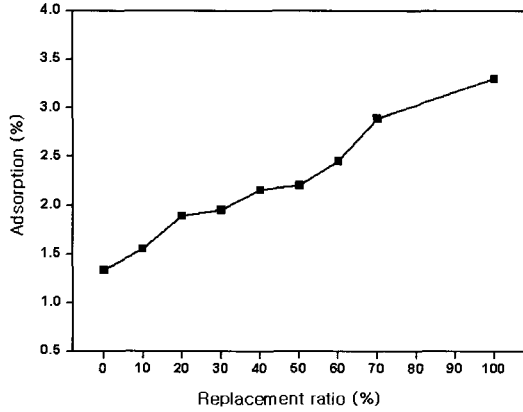


Fig. 3. A diagram showing variation of water adsorption by aggregate containing the different ratio of recycled aggregate.

Table 4. The changes in specific gravity and water adsorption of aggregate containing the different ratio of recycled aggregate.

Replacement Ratios (%)	Specific Gravity	Adsorption (%)
Natural Fine Aggregate	2.580	1.410
Natural Coarse Aggregate	2.740	1.335
10% RA	2.738	1.554
20% RA	2.732	1.890
30% RA	2.720	1.950
40% RA	2.715	2.156
50% RA	2.711	2.200
60% RA	2.708	2.450
70% RA	2.706	2.890
100% RA	2.700	3.300

재생골재)에서 규정하는 1종 재생골재 기준인 흡수율 3% 이하 수준에 거의 도달하는 것으로 나타났다.

단위중량은 골재의 비중, 입도, 공극률 및 함수 정도에 따라 변하는 것으로 시험결과, 천연골재에 비해 낮은 단위중량을 나타내고 있다(Table 5). 재생골재와 천연골재의 비중, 단위중량과 흡수율

에서의 차이는 상대적으로 낮은 비중과 높은 흡수율의 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트가 재생골재에 다량 포함됨에 의한 것으로 생각할 수 있다.

골재에 포함된 잔입자 시험은 골재에 포함된 0.08mm(No.200)체를 통과하는 잔입자의 양을 측정하는 것이다. Table 6에 나타나듯이 재생골재의 잔입자량은 천연골재에 비하여 약 2.5배의 값을 나타내고 있다. 이러한 잔입자량의 차이는 재생골재에는 폐 콘크리트가 파쇄되는 과정에서 충격에 의해 미세 입자들이 다량 함유됨을 시사한다.

굵은골재의 마모시험(KS F 2508), 파쇄시험(KS F 2541)은 부순돌, 자갈 등의 마모와 압축하중에서의 저항성을 시험하는 방법이다. 시험 결과, 재생골재가 천연골재보다 마모율이 높은 것으로 나타났다(Table 7). 그러나, 마모율은 18.7%로서 콘크리트 용 부순 골재 및 재생골재에서 공통적으로 규정하고 있는 마모율 40% 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 재생골재의 파쇄값은 17%로 천연골재의 15%보다 다소 높은 값을 보이는데 이는 재생골재가 압축하중에 대한 저항성이 낮은 것을 나타낸다.

이러한 결과들은, 재생골재에 부착되어 있는 모르타르 영향과 함께 폐 콘크리트를 파쇄하여 얻어지는 재생골재에 생성된 미소 균열로 인한 공극의 증가에 따른 영향으로 해석할 수 있다.

Table 5. Unit weight of recycled aggregate and natural aggregate.

Unit: (kgf/m³)

Natural Fine Aggregate	Coarse Aggregate	
	Natural	Recycled
1,511	1,665	1,586

Table 6. Percentage of fine aggregate passing the No. 200 sieve.

Natural Fine Aggregate (%)	Coarse Aggregate	
	Natural (%)	Recycled (%)
1.55	0.72	1.76

Table 7. Abrasion resistance of recycled aggregate and natural aggregate.

	Original Weight (g)	Abrasion Loss (g)	Abrasion Resistance (%)
Natural	4980.1	483.1	9.76
Recycled	4991.7	933.4	18.7

재생골재의 혼합이 콘크리트의 특성에 미치는 영향

재생굵은골재의 대체율에 따른 굳지 않은 콘크리트의 특성 중 콘크리트 제조 직후의 슬럼프 및 공기량의 변화를 Table 8에 나타내었다. 슬럼프치는 재생골재의 흡수율이 천연골재의 2.5배 정도로 많음에도 불구하고, 본 실험에 적용된 배합기준에서는 재생골재의 대체율에 따라 약간의 슬럼프치가 감소하는 것으로 나타났다. 공기량은 재생골재의 대체율이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 재생굵은골재가 천연골재에 비하여 잔입자가 많고 재생굵은골재에 부착된 모르타르에 의한 골재자체의 공극이 크기 때문인 것으로 생각된다.

전 대체율 범위에서 재령일이 증가함에 따라 압축강도는 각각 증가하였으며, 재생 콘크리트의 일축압축강도 시험 결과, 28일 강도를 기준으로 해서 재생골재의 대체율 40%까지는 대체율 0%의 천연골재를 사용한 보통 콘크리트의 강도 수준에 근접한 강도를 보였다. 특히, 20%까지는 보통 콘크리트의 강도 수준 이상의 강도 발현을 나타내었다(Table 9 와 Fig. 4). 이러한 현상은 모든 재령일에서 공통적으로 나타났으며, 그 이상의 대체율에서 재령일에 상관없이 강도는 감소했으며, 대체율 100%에서는 재령 3일, 7일, 28일에 각각 18.6, 12.6, 13.9% 정도의 강도 감소를 보였다. 동결융해 시험 후의 압축 강도는 모든 대체율에서 시험전의 재생 콘크리트 보다 일정 비율로 감소하여, 대체율에 따른 강도 변화 양상은 시험 전의 재생 콘크리트 시료의 감소 양상과 동일하게 나타났다(Fig. 5).

동결융해 시험에서 동탄성계수는 300 주기까지 모든 대체율에서 거의 94% 이상의 수준에서 변화

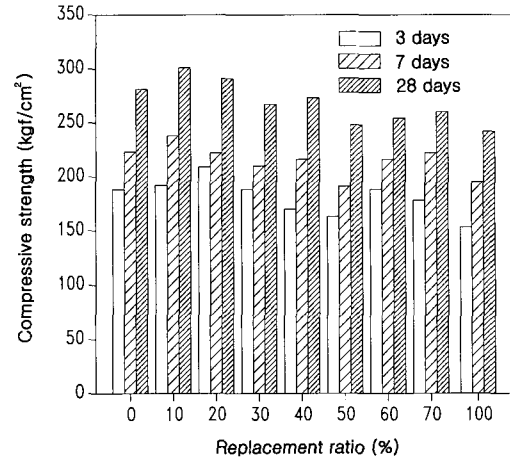


Fig. 4. Compressive strength of recycled aggregate concretes mixed with the different replacement ratios of recycled aggregate.

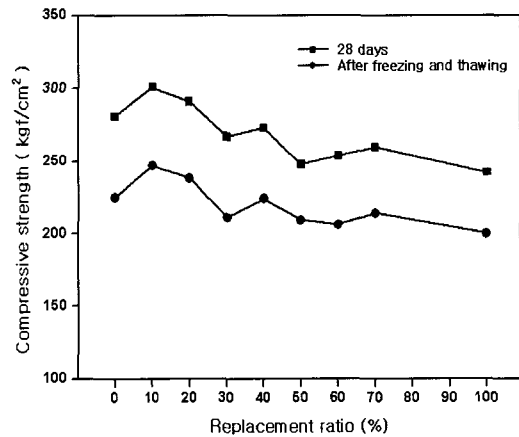


Fig. 5. A diagram showing the variation compressive strength of recycled aggregate concretes mixed with the different replacement ratios of recycled aggregate.

하였다(Fig. 6). 따라서, 내구성 지수(DF=PN/300, P: N 사이클 후의 최초 동탄성계수에 대한 백분율)는 동탄성계수와 동일하게 나타나고, 대체율이 증가함에 따라 내구성 지수도 증가하는 경향을 보였다. 내구성 지수는 재생콘크리트가 동결융해 내구성에 우수한 성능을 발휘하는 것을 나타냈다 (Table 10과 Fig. 7).

폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성규명을 위한 실험적 연구

Table 8. The properties of unconsolidated RAC mixed with the different replacement ratios of recycled aggregate.

RA Replacement Ratio(%)	Slump (cm)	Air Content (%)	Unit Weight (tonf/m ³)
0	9.0	4.1	2.332
10	9.0	4.8	2.313
20	6.5	5.4	2.310
30	7.0	5.3	2.280
40	7.5	5.7	2.283
50	8.0	6.2	2.235
60	8.0	6.4	2.238
70	7.5	6.8	2.231
100	7.0	7.1	2.201

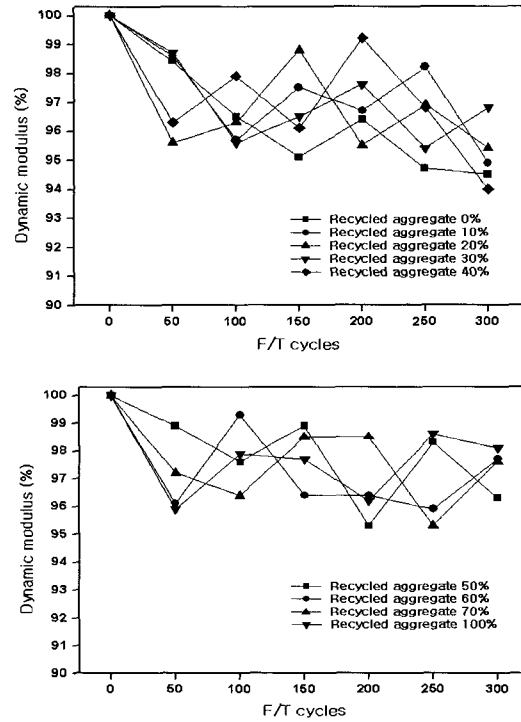


Fig. 6. A diagram showing the variation of dynamic modulus of recycled aggregate concrete by freeze/thaw cycles.

Table 9. The compressive strength values of recycled aggregate concrete at the different curing days and after freeze/thaw test.

RA Replacement Ratio (%)	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)				Percentage of Compressive strength Change ($[f_{28} - f_{f/t}] * 100 / f_{28}$, %)
	3 days (f_3)	7 days (f_7)	28 days (f_{28})	After 300 cycles of F/T ($f_{f/t}$)	
0	188	223	281	225	22.06
10	192	238	301	247	17.94
20	209	222	291	238	18.21
30	188	210	267	211	20.97
40	170	216	273	224	17.95
50	163	191	248	209	15.73
60	188	216	254	206	18.90
70	178	222	260	214	17.69
100	153	195	242	200	16.53

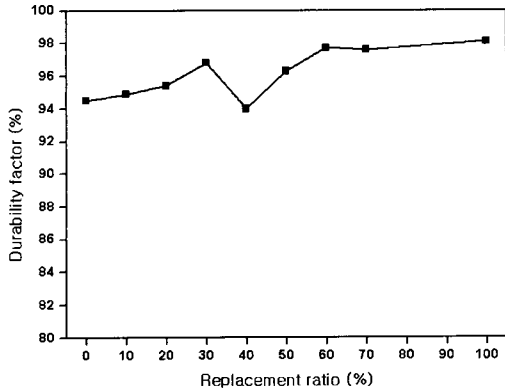


Fig. 7. A diagram showing the variation of durability factors of recycled aggregate concretes mixed with the different replacement ratios of recycled aggregate.

Table 10. The dynamic modulus and durability factor of recycled aggregate concrete after 300 cycles of freeze/thaw test.

RA Replacement Ratio (%)	After 300 cycles of F/T	
	Dynamic Modulus (%)	Durability Factor (%)
0	94.5	94.5
10	94.9	94.9
20	95.4	95.4
30	96.8	96.8
40	94.0	94.0
50	96.3	96.3
60	97.7	97.7
70	97.6	97.6
100	98.1	98.1

고찰

본 연구에서 사용된 폐 콘크리트에서 분리한 재생골재 경우 알칼리-골재 반응성은 나타내지 않았으나, 조기 성능 저하를 나타낸 콘크리트의 경우 해체 단계에서 그 성능 저하의 원인이 규명이 필요하다. 특히, 편광현미경과 XRD 분석을 기초한 분리한 골재의 구성광물성분과 암석학적, 화

학적 특성 분석을 통한 골재의 알칼리 반응성을 시험할 필요가 있다고 판단된다. 기존 연구들 (Cody et al., 1997; 이효민의, 2003)에 의하면, 이미 알칼리-골재 반응성을 나타낸 골재의 경우, 추가된 알칼리에 의하여 더욱 현저한 반응성이 유발될 수 있으므로 이에 대한 검토가 반드시 필요한 것으로 생각된다. 특히, 본 연구에서 적용된 KS F 2546에 의거한 실험은 장기간의 시험 기간을 요구하는 방법이며, Fig. 1에서 나타나듯이 재령 일수에 따른 길이 변화에 많은 기복(팽창과 수축의 반복 현상)을 나타내어 그 정확한 반응성 판정의 효과가 의심스럽다. 이러한 수축에 의한 기복은 재생골재에 포함된 시멘트 페이스트와 페 콘크리트를 파쇄하여 얻어지는 재생골재에 생성된 미소 균열의 형성에 따른 골재의 물리적 조직 특성이 장기 재령에 따른 수화작용에 관련된 작용의 결과로 추정할 수 있다(Sidney et al., 2003). 따라서, 이러한 장기 재령 시 나타날 수 있는 물리적 수축과 팽창 작용은 단기(재령16일)에 반응성을 판정하는 ASTM C 1260에 의한 반응성 판정으로 완화됨으로 더욱 정확한 반응성을 판정을 유리한 방법이 될 것이다(전쌍순 외, 2003).

재생골재 입도 감소에 따른 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트의 함량 증가는 재생골재의 잔입자량 시험에서 천연골재와 큰 차이로 나타났다(Table 6). 재생골재에 포함된 시멘트 페이스트나 모르타르는 골재의 비중, 흡수율, 단위중량, 파쇄값 및 마모율과 같은 골재의 기초 물성치를 변화시키는 주요한 요인으로 나타났다. 이의 함유에 따른 기초 물성 특성에의 영향은 재생콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 재생골재의 흡수율은 동종의 재생골재의 흡수율 보다 2.5배 증가한 3.3%이나, 한국산업표준규격 KS F 2573 (콘크리트 용 재생골재)에서 규정하는 1종 재생골재 기준인 흡수율 3% 이하 수준에 거의 도달하는 것으로 나타났다. 그러나, 대체율의 증가에 따른 흡수율 증가는 슬럼프 감소의 경향으로 나타나는데(Table 8), 이는 본 실험에 낮은 물-시멘트비(45%)가 적용됨으로서 재생골재의 혼합에 따른 흡수율의 증가로 인한 슬럼프의 감소가 따르게 되는 것으로 생각된다. 기존의 연구들(Poon et.

al., 2003, 정용일, 2002)도 낮은 물-시멘트비에서 흡수율이 높은 재생골재의 대체율 증가는 현저한 슬럼프 감소를 보여주는 것으로 보고하였으며, 그 원인을 배합 시 재생골재에 포함된 시멘트 페이스트에 의한 슬럼프 감소로 추정하였다. 따라서, 재생골재를 혼합할 경우, 증가되는 흡수율을 고려한 물-시멘트비가 산정되어야 할 것이다. 또한, 재생골재의 대체율 증가에 따른 공기량이 비례적으로 증가하는 경향(Table 8)은 기존 연구 결과들(Gómez-Soberón, 2002, 김호수, 2003)과 일치하는 것으로, 잔존 시멘트 페이스트 영향과 함께 폐 콘크리트를 파쇄 시 충격으로 인한 재생골재에 생성된 미소 균열로 인한 공극의 증가에 따른 영향으로 해석할 수 있다.

굳은 콘크리트의 역학적 특징에서, 대체율 증가에 따른 재생콘크리트의 압축강도 감소도 재생골재에 부착된 시멘트 페이스트 또는 모르타르가 존재하는 부분이 결합부위로 작용할 경우 결합력의 약화에 의한 결과로 추정된다. 그러나, 재생골재로 40%까지 대체 혼합한 재생콘크리트는 보통 콘크리트 수준의 압축강도를 발현하였으며, 재생골재 대체율 20%까지는 압축 강도가 보통의 콘크리트보다 높게 나타난다. 이와 같은 재생콘크리트의 보통 콘크리트보다 높은 강도를 나타내는 것은 Ajdukiewicz and Kliszczewicz (2002)의 연구에서도 보고되었으나, 그의 원인은 본 연구로서 규명되지 못했다. 대체율이 증가함에 따라 동탄성 계수의 증가와 함께 내구성 지수가 증가하는 특징을 보인다. 동결융해에 대한 내구성 증가 현상은 다른 연구들(Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002, 김광우, 1992)에서도 보고되었으며, 재생콘크리트의 동결융해에 대한 내구성 증가의 설명으로서 재생골재에 생성된 미소 균열과 잔존 시멘트 페이스트에 의한 공극의 증가로 인한 동결융해작용에 대한 저항성이 증가된 것으로 생각할 수 있으나, 이 역시 더욱 자세한 연구가 필요한 부분이다.

결론

이상과 같은 재생골재의 구성광물, 화학조성 및 공학적 물성 특성을 조사하고, 재생콘크리트(RCA)의 시공성과 공학적 특성에 대한 연구결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 재생골재의 광물 및 암석학적 특성 시험 결과, 재생골재의 입도가 감소함에 따라 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트의 함량이 증가하며, 이는 재생골재의 잔입자량의 증가 및 알칼리-골재 반응성 판정을 저해하는 주 요인이 될 수 있는 것으로 분석되었다.

(2) 재생골재의 물성 시험 결과, 재생골재에 잔존하는 폐 콘크리트의 모르타르 및 시멘트 페이스트는 골재의 비중, 흡수율, 단위중량 및 마모율과 같은 골재의 기초 물성 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 해석된다.

(3) 콘크리트의 일축압축강도 시험 결과, AE감수제와 적절한 양의 재생골은골재를 대체한 재생콘크리트는 28일 강도를 기준으로 해서 보통 콘크리트 수준의 강도 발현을 확인할 수 있었으나, 재생골재의 대체율이 40% 이상일 경우 강도는 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 동결융해 시험에서 재생골재의 대체율이 증가함에 따라 내구성 지수도 약간 증가하는 경향을 보였으며, 내구성 지수는 재생콘크리트가 동결융해 내구성에 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

(5) 본 연구에 사용된 재생골재는 천연골재에 비교하여 공학적 기초 물성치에서 현저히 큰 차이는 나타나지 않았으며, 이를 사용한 재생콘크리트의 공학적 특성도 보통 콘크리트의 기준에 근접하는 것으로 나타났다.

이상의 결론과 같이 재생골재에 잔존하는 모르타르 내지 시멘트 페이스트는 골재의 기초 공학적 물성, 재생콘크리트의 굳지 않은 콘크리트와 굳은 콘크리트의 공학적 특성 발현을 저해하는 주 요인이 되는 것으로 나타났다. 그러나, 재생골재의 제조과정에서 이들 성분의 제거가 효과적으로 이루어지면, 재생골재는 콘크리트 용 골재로서 효율적인 사용이 확대될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2001-00064)로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김광우, 1992, 재생콘크리트의 동결융해저항성과 변형특성, 콘크리트학회지, 제4권, 제4호, p. 15-122.

김광우, 박제선, 이봉학, 연구석, 1994, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 콘크리트학회지 제6권, 제6호, p. 51-65.

김무한, 1997, 산업부산물 및 폐기물을 이용한 콘크리트용 골재-재생골재의 현황 및 재활용 방안, 콘크리트학회지, 제9권, 제6호, p. 11-17.

김호수, 백철우, 반성수, 최성우, 류득현, 2003, 재생골재를 사용한 재생 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, 제15권, 제1호, p. 25-34.

심종성, 문도영, 박성재, 김용재, 2003, 재생골재의 고부가가치화에 대한 연구, 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, 제15권, 제1호, p. 41-46.

이진용, 1998, 폐콘크리트의 재활용기술, 대한토목학회지, 제46권, 제12호, p. 11-16.

이호민, 황진연, 진치섭, 이진성, 전쌍순, 2003, 특정환경조건하에서의 콘크리트 내 이차광물 생성과 그에 수반된 성능저하현상, 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권, 제1호, p. 651-656.

전쌍순, 이호민, 진치섭, 황진연, 이진성, 2003, ASTM C 227과 ASTM C 1260에 따른 쇄석 골재의 알칼리-골재 반응성, 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권, 제1호, p. 13-18.

정용일, 양은익, 정기철, 김학모, 최중철, 2002, 재생골재 대체가 콘크리트 성능에 미치는

영향, 한국 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제114권, 제2호, p. 233-238.

Ajdukiewicz, A and Kliszczewicz, A., 2002, Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, Cement and Concrete Composites, v. 24, n. 2, p. 269-279.

Cody, R. D., Spry, p. G, Cody, A. M and Lee, H., 1997, Expansive mineral growth and concrete deterioration, Iowa Department Transportation, Final Report HR-384, p. 201.

Gómez-Soberón, J. M. V., 2002, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, Cement and Concrete Research, v. 32, n. 8, p. 1301-1311.

Poon, C. S., Shui, Z. H, Lam, L, Fok, H. and Kou, S. C., 2003, Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete, Cement and Concrete Research, In Press, Uncorrected Proof.

Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T and Taylor, A. H., 2001, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research, v. 31, n. 5, p. 707-712.

Sidney, M, Young, J. F. and Drrwin, D., 2003, Concrete, Pearson Education Inc., p. 644

Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F. and Wirquin, E., 2003, Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Composites, v. 25, n.. 2, p. 223-232.

투 고 일	2003년 7월 21일
심 사 일	2003년 7월 22일
심사완료일	2003년 8월 18일

폐 콘크리트에서 분리된 재생골재와 재생콘크리트의 공학적 특성규명을 위한 실험적 연구

이효민

부산대학교 지질학과, 환경문제연구소
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3455
E-mail: hmlee61@hotmail.com

전쌍순

부산대학교 토목공학과
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-1534
E-mail: lloydjun@hanmail.net

황진연

부산대학교 지질학과
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2254
E-mail: hwangjy@pusan.ac.kr

진치섭

부산대학교 토목공학과
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2351
E-mail: csjin@pusan.ac.kr

박현재

부산대학교 토목공학과
609-735, 부산시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-1534
E-mail: chandos@pusan.ac.kr