

# 폐콘크리트를 사용한 재생콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Engineering Properties of Recycled Concrete using Waste Concrete

구 봉 근<sup>\*</sup> 이 상 근<sup>\*\*</sup> 김 창 운<sup>\*\*\*</sup> 류 택 은<sup>\*\*\*\*</sup> 박 재 성<sup>\*\*\*\*</sup>  
Koo, Bong-Kuen Lee, Sang-Kuen Kim, Chang-Woon Ryu, Taek-Eun Park, Jae-Seung

### ABSTRACT

The purpose of this study is to recycle the waste concrete which is generated in large quantities as crushed stone in construction works.

This study deals with the comparative analysis on the construction works and engineering properties of recycled aggregate concrete through physical experiment. The experimental variables are the kinds of aggregates, some different aggregate composition, and  $W/C$  ratio(0.40, 0.45, 0.50).

It is able to find from the experimental results that the recycled aggregate concrete is good as general concrete on the construction works and engineering properties.

In addition to, the reliable regression analysis equations between compressive strength and various experimental data for recycled aggregate concrete are presented.

### 1. 서론

주요한 대부분의 자원을 수입에 의존하고 있는 우리 나라는 최근 경제의 성장 및 국민 생활의 향상에 따라 폐기물의 발생량이 증가되어 이의 처리문제가 심각해지고 있다. 이와 같은 상황에 비추어 볼 때 생산·유통·소비의 각 단계에 있어서 폐기물 발생 억제를 통한 경제성 향상과 환경 보호는 물론 자원의 재활용에 적극적으로 힘써야 한다.

본 연구의 목적은 여러 가지 건설 폐기물 중에서도 재활용 가능성이 높으며 구조물 해체시 다량으로 얻어지는 폐콘크리트를 대상으로 건설공사에 재이용하기 위해 재생골재를 사용한 재생콘크리트의 시공성 및 공학적 특성을 규명함으로써 향후 구조체 콘크리트의 적용을 위한 기초적 자료를 제시하고자 하였다

### 2. 재생 콘크리트의 공학적 특성 실험

- 
- \* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사
  - \*\* 충북대학교 건설기술연구소 연구원, 공학박사
  - \*\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 박사과정수료
  - \*\*\*\* 충북대학교 토목공학과 박사과정

실험변수는 골재구성과 물-시멘트비(W/C)를 고려하였으며, 골재 구성의 경우 부순돌·강모래, 재생굵은골재 A·강모래, 재생굵은골재 B·강모래, 재생굵은골재 C·강모래, 재생굵은골재 A·재생잔골재 A, 재생굵은골재 B·재생잔골재 B, 재생굵은골재 C·재생잔골재 C의 총 7가지로 구성하였다. 각각의 골재구성에 대하여 물-시멘트비는 40, 45, 50%의 3수준으로 하였고, 잔골재율(S/a)은 40%로 고정하였다. 굳지 않은 콘크리트에 대해 시간에 따른 슬럼프값 변화, 시간에 따른 플로우값 변화를 측정항목으로 두었으며, 굳은 콘크리트에 대해선 압축강도, 인장강도, 휨강도, 단위무게, 초음파 속도, 반발도, 정탄성계수 등을 고려하였다.

공시체는 각기 3개씩 제작하여 그 평균값을 사용함으로써 그 신뢰성을 높였으며, 실험결과로부터 재생골재를 구조용 콘크리트로 활용가능한지 여부와 적절한 W/C비, 그리고 골재 구성을 제안하기 위해 부순돌과 강모래의 조합을 기준으로 하여 비교·분석하였다

2.1 재료 특성

(1) 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)에 규정된 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

(2) 골재

본 연구에 사용된 굵은골재와 잔골재의 종류와 생산방법은 표 1과 같다.

표 1 파쇄방법에 따른 사용된 재생골재의 분류

| 현황<br>종류 | 소재지   | 파쇄 방법                                  |
|----------|-------|--|
| 부순돌      | 충북 청원 | Jaw-crusher                            |
| 천연강모래    | 충북 부강 | 천연산                                    |
| 재생골재 A   | 경북 경산 | Impact-crusher(1차)<br>Cone crusher(2차) |
| 재생골재 B   | 경남 김해 | Jaw-crusher(1차) Impact-crusher(2차)     |
| 재생골재 C   | 대전 유성 | Impact-crusher                         |

본 연구에 사용된 굵은골재와 잔골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 사용된 굵은골재와 잔골재의 물리적 특성

| 분류       | 기호 | 비중   | 흡수율 (%) | 단위무게 (kgf/m <sup>3</sup> ) | 마모감량 (%) | 씻기손실량 (%) | F.M. |
|----------|----|------|---------|----------------------------|----------|-----------|------|
| 부순돌      | G  | 2.60 | 3.08    | 1,552                      | 28       | 0.8       | 6.76 |
| 재생굵은골재 A | A  | 2.32 | 9.10    | 1,251                      | 39.5     | 0.5       | 6.71 |
| 재생굵은골재 B | B  | 2.31 | 8.74    | 1,339                      | 40       | 0.7       | 8.32 |
| 재생굵은골재 C | C  | 2.28 | 8.43    | 1,327                      | 43.5     | 0.6       | 7.35 |
| 강모래      | s  | 2.50 | 0.93    | 1,686                      | -        | 0.7       | 2.57 |
| 재생잔골재 A  | a  | 2.29 | 8.53    | 1,387                      | -        | 7.1       | 3.59 |
| 재생잔골재 B  | b  | 2.22 | 9.58    | 1,343                      | -        | 5.8       | 3.56 |
| 재생잔골재 C  | c  | 2.30 | 8.64    | 1,387                      | -        | 3.1       | 2.80 |

## 2.2 배합설계

배합설계는 목표슬럼프값을  $15 \pm 1$  cm로 설정하고, 혼화제를 첨가하기 전에 슬럼프값이  $8 \pm 1$  cm가 되는 때의 단위수량값을 기준으로 재료의 단위량을 결정하였다. 이때 소정의 고성능유동화제(SP)가 목표 슬럼프값을 만족시키기 위해 사용되었다. 최종 배합설계표는 표 3과 같다.

표 3 본 실험의 배합설계

| 분류 | W/C (%) | S/a (%) | 목표 슬럼프 (cm) | SP 첨가량 (%) | W (kg) | 중량배합 ( $\text{kgf/m}^3$ ) |      |      |
|----|---------|---------|-------------|------------|--------|---------------------------|------|------|
|    |         |         |             |            |        | C                         | F.A. | C.A. |
| Gs | 40      | 40      | $15 \pm 1$  | 0.3        | 197    | 493                       | 627  | 978  |
| As |         |         |             | 0.3        | 211    | 528                       | 602  | 837  |
| Bs |         |         |             | 0.28       | 203    | 508                       | 616  | 854  |
| Cs |         |         |             | 0.3        | 205    | 513                       | 612  | 838  |
| Aa |         |         |             | 0.3        | 215    | 538                       | 544  | 827  |
| Bb |         |         |             | 0.34       | 235    | 588                       | 496  | 774  |
| Cc |         |         |             | 0.3        | 220    | 550                       | 539  | 801  |
| Gs | 45      |         |             | 0.3        | 188    | 418                       | 659  | 1029 |
| As |         |         |             | 0.28       | 204    | 453                       | 632  | 880  |
| Bs |         |         |             | 0.32       | 190    | 422                       | 656  | 909  |
| Cs |         |         |             | 0.3        | 192    | 427                       | 653  | 893  |
| Aa |         |         |             | 0.3        | 210    | 467                       | 570  | 866  |
| Bb |         |         |             | 0.34       | 218    | 484                       | 540  | 843  |
| Cc |         |         |             | 0.3        | 205    | 456                       | 580  | 862  |
| Gs | 50      | 0.3     |             | 185        | 370    | 678                       | 1057 |      |
| As |         | 0.28    |             | 198        | 396    | 656                       | 914  |      |
| Bs |         | 0.25    |             | 185        | 370    | 678                       | 939  |      |
| Cs |         | 0.32    |             | 187        | 374    | 674                       | 922  |      |
| Aa |         | 0.3     |             | 205        | 410    | 591                       | 898  |      |
| Bb |         | 0.3     |             | 210        | 420    | 566                       | 882  |      |
| Cc |         | 0.3     |             | 190        | 380    | 616                       | 916  |      |

주) 알파벳 대문자는 굵은골재, 알파벳 소문자는 잔골재(Aa: 재생굵은골재 A + 재생잔골재 a, F.A.: 잔골재, C.A.: 굵은골재)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 굵은 재생 콘크리트의 성질

#### (1) 압축강도의 변화검토

부순돌·강모래조합(Gs)의 재령 28일 압축강도는  $329 \sim 364 \text{ kgf/cm}^2$ 인데 비해 재생굵은골재·강모래 조합(Rs)에서는  $315 \sim 356 \text{ kgf/cm}^2$ 이므로 Gs 압축강도의 약 95% 정도의 압축발현을 나타내어 굵은골재가 재생골재로, 잔골재가 강모래로 쓰여질 때는 압축강도면에서는 거의 같았다. 또한, 재생굵은골재·재생잔골재조합(Rr)에서는 압축강도가  $238 \sim 340 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 Gs 압축강도의 약 83% 정도의 압축강도를 나타내는 반면, 재생굵은골재·강모래조합(Rs)의 압축강도에 비해선 약 86% 정도로 나타났다.

물-시멘트비에 따른 경향을 살펴보면 물-시멘트비가 증가할수록 모든 경우에서 압축강도가 작게 나타났고 재생골재로 조합된 콘크리트의 초기강도는 Gs에 비해 더 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다.

(2) 인장강도, 휨강도의 변화 검토

재생골은골재·강모래조합(Rs)의 인장강도는 부순돌·강모래조합(Gs) 인장강도의 최소 81%에서 최대 98%까지의 발현치를 보였고, 재생골은골재·재생잔골재조합(Rr)은 재생골은골재·강모래조합(Rs) 결과치의 약 88% 인장강도 발현을 보였다.

Rs의 휨강도는 Gs 휨강도의 최소 81%에서 최대 98%의 휨강도값을 나타내었고, Rr은 Gs 휨강도의 약 79%의 강도발현을 보였으며, Rs 결과치와 비교할 때는 약 88%의 휨강도 발현을 보였다. 압축강도가 대략 330 kgf/cm<sup>2</sup> 이하에서 Rr의 인장강도와 휨강도 추정값은 Gs와 Rs보다 크며, 압축강도가 330 kgf/cm<sup>2</sup> 이상에선 Rs의 인장, 휨강도 추정값이 Gs보다 다소 큰 것으로 나타났다.

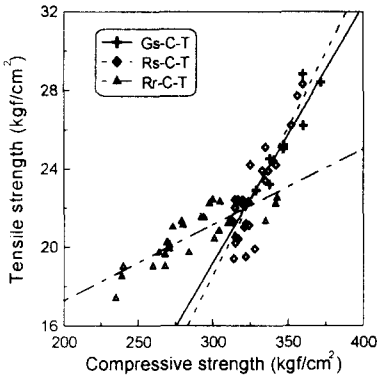


그림 1 압축강도와 인장강도의 상관관계

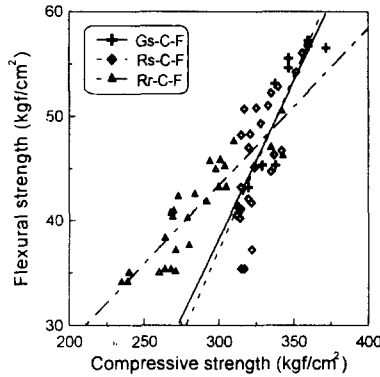


그림 2 압축강도와 휨강도의 상관관계

한편, 압축강도와 인장강도, 압축강도와 휨강도의 상관관계를 통한 선형회귀방정식에서 Rs, Rr회귀방정식의 전체 설명력은 약 80%정도로 재생골재가 포함된 조합에서도 압축강도를 측정했을 때 인장강도와 휨강도의 추정이 가능함을 알 수 있었다.

압축강도에 대한 인장강도의 비는 모든 골재조합에서 평균 1/14의 수준을 나타내었고, 압축강도에 대한 휨

강도의 비는 평균 1/7의 수준을 나타내었다.

(3) 초음파속도와 반발경도의 변화 검토

물-시멘트비가 감소함에 따라 초음파속도는 대체적으로 증가하고 있다. 초음파속도와 압축강도의 상관관계는 그림 3에 잘 나타나 있듯이 비례적인 관계를 보였다. 표 4에 이들 상관관계를 선형회귀분석하여 제시하였다.

표 4 압축강도와 초음파속도의 회귀분석식

| 분 류    | 회귀방정식                      | 결정계수 (R <sup>2</sup> ) |
|--------|----------------------------|------------------------|
| Gs-C-V | $F_c = 651.6 V_p - 2605.2$ | 0.9004                 |
| Rs-C-V | $F_c = 369.5 V_p - 1290.2$ | 0.7469                 |
| Rr-C-V | $F_c = 208.8 V_p - 604.9$  | 0.8573                 |

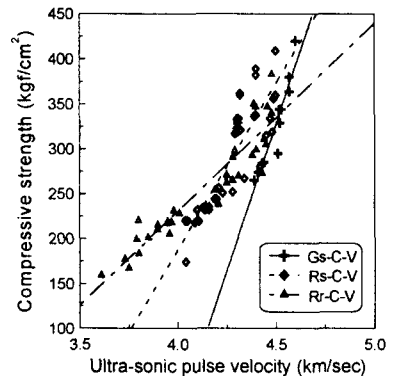


그림 3 압축강도와 초음파 속도의 상관관계

표 4에서 볼 수 있듯이 Rs나 Rr에서 초음파 속도로 압축강도를 추정할 수 있는 상관관계식의 결정계수 값이 대체로 약 0.8정도로 대체로 설명력이 있었다. 반발경도는 전반적으로 물-시멘트비 40%의 재생골재콘크리트가 물-시멘트비 50%인 경우보다 높은 반발경도를 나타냈으며, 부순돌과 강모래를 사용한 보통콘크리트의 경우와 비교해 보면 전체적으로 약 90%이상의 반발경도 발현을 나타내는 것으로 나타났다. 그림 4와 표 5는 실험으로 나온 압축강도 반발경도의 상관관계를 각

물-시멘트비와 재령일에 관계없이 골재구성조합과 관련하여 그 평균값들을 가지고 도시한 것이다. 결정계수값은 대부분 0.80이상으로, 반발경도로 압축강도의 추정이 비교적 설명력이 있었다.

표 5 압축강도와 반발경도의 회귀분석식

| 분 류    | 회귀방정식                     | 결정계수 ( $R^2$ ) |
|--------|---------------------------|----------------|
| Gs-C-R | $F_c = 12.2192 R - 76.64$ | 0.8051         |
| Rs-C-R | $F_c = 18.909 R - 265.04$ | 0.8506         |
| Rr-C-R | $F_c = 12.5374 R - 74.27$ | 0.8566         |

한편, Minitab을 이용한 회귀분석 방법을 통하여 여러 인자를 동시에 투입하는 동시투입방식(ENTER)에 의한 다중회귀분석을 한 결과 식(1), (2)와 같은 관계식이 도출하였다. 식(1)과 (2)는 각각 재생골은골재·강모래조합(Rs)과 재생골은골재·재생잔골재조합(Rr)에서 초음파속도와 반발경도 측정시 압축강도의 추정식이다. 초음파속도와 반발경도 2개의 인자가 동시에 투입되므로써 각 식에 대한 전체 설명력(R Square: 상관계수)은 Rs가 87%, Rr이 89%이며, 유의도는 0.000으로 나타났다. 또한 2개 인자의 유의도(Sig F)가 설정한 유의수준 0.05보다 작으므로 각 골재조합에서 2개의 인자 모두 압축강도에 영향력이 있는 것으로 나타났다.

$$F_{C(Rs)} = -789 + 183V_p + 10.1R \quad (1)$$

$$F_{C(Rr)} = -291 + 79.2V_p + 8.47R \quad (2)$$

여기서,  $F_c$  : 압축강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $V_p$  : 초음파속도 ( $\text{km/sec}$ ),  $R$  : 반발경도

#### (4) 응력-변형률관계와 정탄성계수의 변화 검토

각 골재구성조합별 응력-변형률관계에서 변형률은 약  $1000 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$ 의 분포 내에서 최대 압축강도를 나타내었으며, 물-시멘트비가 작고, 골재의 조합이 Gs, As, Bs, Cs, Aa, Bb, Cc의 순으로 응력-변형률곡선의 초기 기울기가 완만하게 나타났다. 이는 초기 압축강도면에서 재생콘크리트의 경우가 다소 떨어짐을 보여준다.

표 6 압축강도와 정탄성계수의 회귀분석식

| 분 류     | 회귀방정식                       | 결정계수 ( $R^2$ ) |
|---------|-----------------------------|----------------|
| Gs-C-SM | $E_c = 0.0067 F_c + 0.7959$ | 0.7658         |
| Rs-C-SM | $E_c = 0.0133 F_c - 1.6347$ | 0.7108         |
| Rr-C-SM | $E_c = 0.0067 F_c + 0.7204$ | 0.7911         |

한편, 강도가 클수록 최대응력점 이후의 응력 하강곡선의 기울기는 재생골재로 제조된 골재구성이 천연 골재의 구성보다 대체적으로 더 크게 나타나 인성면에서도 약간 열세임을 알 수 있다. 그림 5와 표 6은 압축강도와 정탄성계수의 상관관계를 각 물-시멘트비와 재령일에 관계없이 골재구성조합과 관련하여 도시한 것이다. 압축강도 측정시 정탄성계수를 추정하는 선형회귀방정식의 결정계수는 약 75%이상으로 나타났으며, 재생골재를

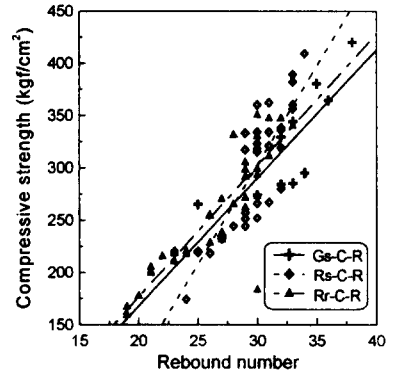


그림 4 압축강도와 반발경도의 상관관계

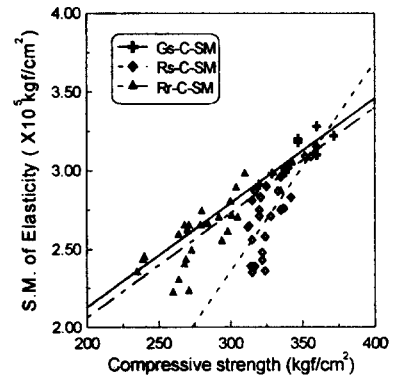


그림 5 압축강도와 정탄성계수의 상관관계

사용한 골재구성조합의 정탄성계수는  $G_s$ 의 정탄성계수와 비교할 때 평균적으로 약 86%이상의 값을 나타냈다. Minitab을 이용한 다중회귀분석을 한 결과 식(3), (4)와 같은 관계식이 도출되었다. 식(3)과 (4)는 각각 재생굵은골재·강모래조합( $R_s$ )과 재생굵은골재·재생잔골재조합( $R_r$ )에서 압축강도와 단위 무게 측정시 정탄성계수의 추정식이다. 압축강도와 단위무게 2개의 인자가 동시에 투입되므로써 전체 설명력(R Square: 상관계수)은  $R_s$ 가 88%,  $R_r$ 이 87%이며 유의도는 0.000으로 나타났다. 또한 2개 인자의 유의도(Sig F)가 설정한 유의수준 0.05보다 작으므로 각 골재조합에서 2개 인자 모두 정탄성계수에 영향력이 있는 것으로 나타나 재생골재조합에서도 압축강도와 단위무게 측정시 정탄성계수를 추정할 수 있었다.

$$EC_{(R_s)} = 473.4U_W^{3.03}F_C^{0.65} \quad (3)$$

$$EC_{(R_r)} = 4964.2U_W^{0.58}F_C^{0.62} \quad (4)$$

여기서,  $EC$  : 정탄성계수 ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $U_W$  : 단위무게 ( $\text{tf/m}^3$ ),  $F_C$  : 압축강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 폐콘크리트를 파쇄하여 얻은 재생골재로 재생콘크리트를 제작, 똑같은 조건에서 제작한 쇠석콘크리트와 비교하여 유동특성 및 역학적 특성에 관한 실험적 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굵지 않은 재생콘크리트의 물리적 특성을 실험적으로 규명한 결과 시공성면에서 일반콘크리트에 손색이 없는 것으로 판단되었다.

(2) 재생콘크리트의 물-시멘트비는 40, 45, 50% 중 40%가 굵은 콘크리트의 물리적 특성에 있어 가장 우수하게 나타났으며, 시공성면에서도 문제가 되지 않아 재생콘크리트의 적절한 물-시멘트비는 40%로 판단되었다.

(3) 재생굵은골재·강모래조합( $R_s$ ) 콘크리트의 28일 압축강도는  $315 \sim 356 \text{ kgf/cm}^2$ 로 쇠석콘크리트 28일 압축강도의 약 95% 정도에 해당하는 압축강도 발현을 나타내어서, 재생굵은골재·강모래조합은 일반구조용 재료로 충분히 사용가능하다고 판단되었다.

(4) 재생굵은골재·재생잔골재조합( $R_r$ ) 콘크리트의 인장 및 휨강도는 쇠석콘크리트의 약 80%의 발현치를 보였고, 재생굵은골재·강모래조합( $R_s$ )은 약 90%의 발현치를 나타내었다. 또한, 압축강도와의 상관관계에선 결정계수(coefficient of determination)가 약 0.8정도로 재생골재가 포함된 조합에서도 압축강도를 측정시인장강도와 휨강도의 추정이 가능하였다.

(5) 본 실험에 사용된 재생골재조합( $R_s, R_r$ )에 따른 다중회귀분석결과 비교적 신뢰성 있는 압축강도와 정탄성계수 추정식을 제시하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Hansen, T. C., and Boegh, E., "Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-aggregate Concrete," *ACI Journal*, No. 82-56, pp. 648~662, 1985.
2. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, "Recycling Portland Cement Concrete", Demonstration Project Program DP No. 47, 1985.
3. Kasai, Y., "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan", *Third International RILEM Symposium*, October, 1993.
4. Yannas, S. F., "Waste Concrete as Aggregate for New Concrete", *ACI Journal*, August, 1997.