

# 재생 콘크리트의 내구성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Recycled Concrete Durability

이 명 규\*    정 상 화\*\*    김 인 수\*\*\*  
Lee, Myung Gyu    Jung, Sang Hwa    Kim, In Soo

### ABSTRACT

In this study, various tests are performed for the durability of the concrete using domestic recycled coarse aggregate including drying shrinkage, permeability, freezing-thawing resistance and CO<sub>2</sub> diffusivity. Tests of freezing-thawing resistance, chloride ion permeability and CO<sub>2</sub> diffusivity of recycled concrete show favorable results. But, the maximum drying shrinkage ratio to normal concrete is increased 24% with increasing substitution ratio of recycled aggregate. Therefore, for the use of recycled concrete in structures, the preventive measures of drying shrinkage is necessary in mix design and the adequate substitution ratio of recycled aggregate should be proposed.

### 1. 서론

재생골재의 경우 천연골재에 비해 품질이 다소 떨어지기 때문에 아직까지는 재생골재를 사용한 콘크리트 구조물이 본격적으로 건설된 사례가 없으며, 재생골재의 경우 97% 이상이 저부가가치의 성토재 및 도로보조기층용으로 사용되고 있다. 그러나, 점증하는 환경문제 및 자원고갈의 문제 등으로 인해 폐콘크리트로부터 생산되는 재생골재의 적극적인 활용의 필요성은 점점 커지고 있는 것이 현실이다. 한편, 최근까지 우리 나라에서도 폐콘크리트를 콘크리트용 골재로 재활용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔으나 대부분 굳지 않은 재생콘크리트의 특성 및 굳은 재생콘크리트 일반적 강도특성에 관한 연구가 대부분이었다. 그러나, 외국의 연구결과에 의하면 재생골재를 사용한 콘크리트의 경우 일반 콘크리트에 비해 강도저하가 문제되는 경우는 거의 없으며, 오히려 골재에 부착된 잔존 모르타르의 영향에 의한 작업성 저하와 동결융해 저항성 등의 내구성 저하가 극복해야할 점이라고 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 생산되는 재생골재를 구조체용 콘크리트로 활용할 경우 발생할 수 있는 내구성 측면에서의 문제점을 알아보기 위해 굳은 콘크리트의 내구성에 관한 실험을 실시하였다. 여기에는 재생골재를 사용한 콘크리트의 건조수축에 의한 길이변화, 동결융해 저항성, 투수성 실험 및 이산화탄소 확산계수 실험이 포함되어 있으며, 이를 통해 국내에서 생산되는 재생골재를 사용한 재생콘크리트의 내구성에 대한 종합적인 평가를 수행하였다.

\* 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 부교수

\*\* 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 객원교수

\*\*\* 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 석사과정

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 연구에 사용한 재생 굵은골재는 전주시내에 소재한 재활용업체에서 채취하였다. 분쇄, 세척 및 분류과정을 통하여 생산된 굵은골재 중 본 실험에서는 30mm를 통과하고 NO.4번체에 남는 골재를 사용하였으며 잔골재는 천연모래를 사용하였다. 그림 1은 본 실험에서 사용한 골재의 체가름 곡선이며, 잔골재와 굵은골재의 물리적 특성은 표 1에 나타나있다.

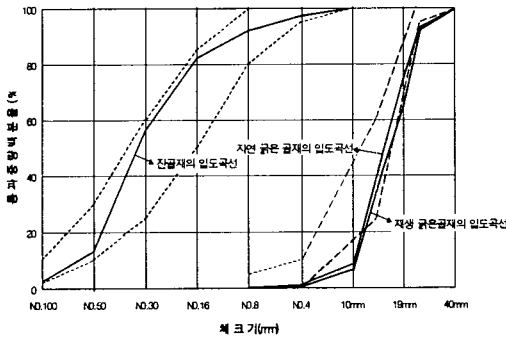


그림 1 골재의 체가름 곡선

표 1 골재의 물리적 성질

골재 종류	비중	흡수율 (%)	조립률 (FA)	마모감율 (%)
잔골재	2.57	1.83	2.57	-
천연 굵은골재	2.64	0.98	6.51	29
재생 굵은골재	2.35	6.30	7.29	44

표 2 재생 굵은골재 치환률에 따른 콘크리트의 배합표

배합량 치환률	W/C (%)	S/a (%)	단 위 량(kg/cm <sup>3</sup> )					
			물 (W)	시멘트 (C)	잔골재 (S)	굵은골재(G)		
						자연	재생	계
0	47.6	38.8	190.1	399	691.8	1094.5	0	1094.5
20	48.1		191.9		692.6	855.5	213.9	1069.4
40	48.5		193.6		693.4	626.6	417.8	1044.4
60	48.9		195.2		694.2	407.7	611.6	1019.3
80	49.2		196.7		695.0	198.9	795.4	994.3
100	49.6		198.1		695.8	0	969.3	969.3

### 2.2 실험변수 및 배합

본 연구는 천연 굵은골재에 대한 재생 굵은골재 치환율을 주요 실험변수로 하여 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 6가지 수준에 대해 실시하였으며 각각 R00, R02, R04, R06, R08, R10으로 표시하였다. 압축강도, 염소이온투과 실험 및 이산화탄소 확산계수 측정실험을 위해 총 48개의 원형몰드(Φ 10×20cm)를 제작하였으며, 건조수축 및 동결-융해 저항성 실험을 위해 총 54개의 빔몰드(7.5×7.5×40 cm)를 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 후 몰드를 제거하여 28일 동안 20±2℃로 유지되는 수조에서 수중양생하였다. 한편, 표 2에는 재생 굵은골재 치환율에 따른 콘크리트 배합설계가 제시되어 있다.

### 2.3 건조수축에 의한 길이변화 실험

본 연구에서는 건조수축률 측정방법을 위해 Whittemore strain gauge를 이용하였다. 실험시편은 7.5×7.5×40cm의 빔몰드를 재생 굵은골재 치환율에 따라 각각 3개씩 제작하였으며, 공시체를 제거한 후 시편 전면과 측면에 디스크를 부착하여 측정하였다. 또한, 디스크 부착 후 각 변수당 1개의 시편은 파라핀으로 밀봉하여 외부의 영향을 배제하도록 하였으며 모든 측정용 몰드는 상대습도 50±5%, 온도 20±1℃로 유지되는 항온항습조에 넣어 경과시간에 따른 길이변화를 측정하였다.

### 2.4 동결융해 저항성 실험

동결융해 저항성 시험은 KS F 2456에 따라 한 사이클을 4시간으로 하였으며, 공시체 중심에서의 온도를 4℃에서 -18℃로 하강시키고 다시 4℃로 상승시키는 것을 반복하였으며 각 공시체의 동탄성계수는 상대 동탄성계수가 60%이하가 될 때까지 또는 300사이클까지 진행하였으며, 시험시편은 7.5×7.5×40cm의 몰드를 재생 굵은골재 치환율에 따라 각각 3개씩 제작하였다. 동탄성계수 측정은 초음파 속도법을 이용하였으며, 이에 따른 계산식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ 상대 동탄성계수 : } P_c = (n_1^2 / n^2) \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $P_c$  : 동결 융해 C사이클 후의 상대 동탄성 계수 (%)

$n$  : 동결 융해 C사이클에서의 가로 1차 진동 주파수

$n_1$  : 동결 융해 C 사이클의 가로 1차 진동 주파수

$$\textcircled{2} \text{ 내구성 지수 : } DF = PN/M \quad (2)$$

여기서,  $DF$  : 시험용 공시체의 내구성 지수

$P$  : N사이클에서의 상대 동탄성계수(%)

$N$  : P가 시험을 단속시킬 수 있는 소정의 최소 값이 된 순간의 사이클 수,  
또는 동결융해 작용에 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수

$M$  : 동결 융해에의 노출이 끝날 때의 사이클 수

### 2.5 염소이온 투과실험

전기적인 방법에 의한 염소이온 투과실험은 10×20cm 공시체를 28일간 수중양생한 후 5cm 두께로 절단하여 그림 2에 나타나있는 것과 같이 염소이온 투과셀에 고정시킨 후 직류회로를 구성한다. 이 회로에서 전원은 60±0.1V의 직류를 ±0.1V 정도로 안정적으로 공급되어야 하며 전압에 미치는 영향을 적게 하기 위해 0.2Ω 정도로 작은 저항을 사용한다. 콘크리트의 투과성을 평가하기 위해서는 매 시편마다 6시간동안 30분 간격으로 전압값을 측정 후 전류로 환산하여 식(3)과 같이 총 전하량을 산정한다. 이 후 총 전하량을 ASTM의 규정과 비교하여 실험 시편의 투과성을 평가한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서,  $Q$  = 회로를 통과한 전하량(coulomb)

$I_n$  = 실험시작후  $n$ 분이 경과하였을때의 전류(amperes)

## 2.6 이산화탄소 확산계수 측정실험

콘크리트의 탄산화 과정과 관련하여 가장 중요한 요소로는 시간, 콘크리트 외부와 내부 탄산화면 사이의 이산화탄소 농도의 차이, 이산화탄소 확산계수 및 콘크리트의 알칼리 물질의 양 등을 들 수 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 이들 탄산화 영향요인 중에서 이산화탄소 확산계수를 측정실험을 통해 재생콘크리트의 탄산화저항 정도를 측정하였다. 콘크리트의 탄산화 과정에 영향을 미치는 요소 중에서 확산계수 이외의 요인은 일반적으로 일정하므로 이산화탄소 확산계수의 측정을 통해 재생콘크리트의 탄산화 저항 정도를 평가하는 것은 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것이라고 판단된다.

본 연구에서 사용한 기체확산계수 측정장치는 Schwiete and Ludwig에 의해 제안된 정상상태에서의 기체확산계수 측정방법에 기초하고 있으며 이것은 산소와 같은 기체의 확산계수를 측정하는 데 알맞은 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 한편 그림 3에는 본 실험에서 사용한 기체확산계수 측정장치 계통도가 나타나 있으며 이를 통한 이산화탄소의 확산계수는 식(4)에 의해 구한다.<sup>2)</sup>

$$D_{CO_2} = \frac{Qf_{CO_2}L}{(1 - f_{CO_2})A} \quad (4)$$

식(4)에서  $D_{CO_2}$ 는  $CO_2$ 의 확산계수 ( $m^2/s$ ),  $Q$ 는 공시체를 통한  $N_2$ 의 유량 ( $m^3/s$ ),  $f_{CO_2}$ 는 질소가스 중의  $CO_2$ 의 몰비를 나타내며,  $L$  및  $A$ 는 각각 공시체 두께( $m$ ) 및 공시체 단면적( $m^2$ )을 나타낸다.

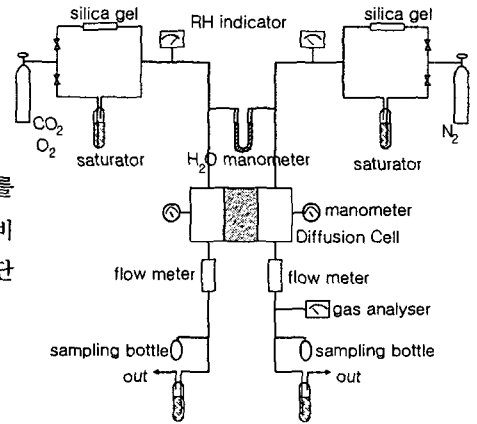


그림 2 기체확산계수 측정장치 계통도

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 건조수축에 의한 길이변화

그림 3은 재생 굽은골재 치환율에 따른 재생콘크리트의 건조수축률을 나타낸 것이다. 실험결과 재생 굽은골재 치환율이 증가할수록 건조수축률은 증가하였으며 길이변화량은  $1.67 \times 10^{-4} \sim 2.19 \times 10^{-4}$ 사이를 나타냈다. 또한, 최대 건조수축은 치환율 100%인 경우에 발생하였으며 이 경우 치환율 0%(R00)인 경우에 대한 건조수축은 약 24%정도 수축률이 증가하였다. 그림 4는 외부 환경에 의한 영향을 배제하기 위해 파라핀으로 밀봉한 경우에 대한 재생콘크리트의 건조수축율을 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 시험 공시체에 수분의 유출입이 없기 때문에 전체적으로 건조수축 양이 감소하였으며 재생골재 치환율에 따른 영향도 감소함을 알 수 있다. 이 경우 최종 측정일의 최대 건조수축률은 R00 시편에서  $0.975 \times 10^{-4}$ 이었으며, 밀봉한 공시체와 밀봉하지 않은 공시체의 수축률 차는  $1.215 \times 10^{-4}$ 으로 약 55%의 차이를 보였다.

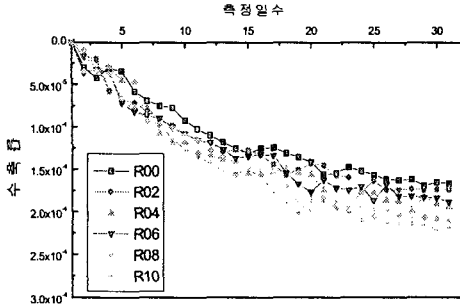


그림 3 재생골재 치환율에 따른 건조수축률

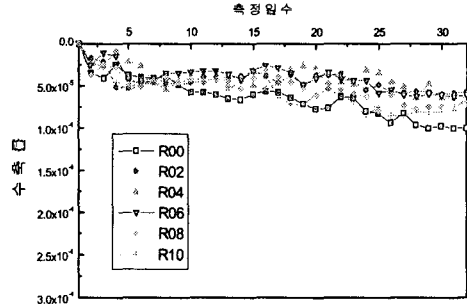


그림 4 밀봉한 경우의 건조수축률

### 3.2 동결융해 저항성

그림 5 및 그림 6에 따르면 재생골재 치환율 증가에 따른 상대동탄성계수 감소량은 치환율 20%일 때가 가장 작았으나 치환율에 따라 현저한 차이를 보이지는 않았으며, 내구성지수는 적은 골재 치환율이 40%, 80%인 경우 이외에는 평균 40%이상으로 나타났다.

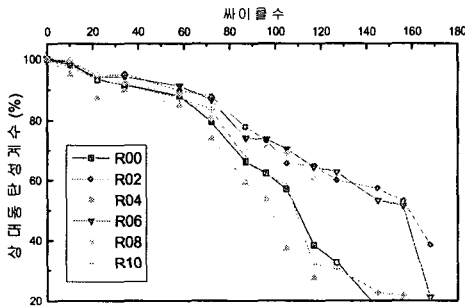


그림 5 재생골재 치환율에 따른 상대동탄성계수

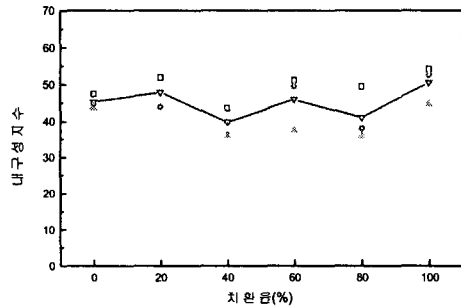


그림 6 재생골재 치환율에 따른 내구성 지수

### 3.3 염소이온 투과량

그림 7에 제시된 염소이온 투과량 실험결과에 의하면 재생 굵은골재 치환율이 증가할수록 재생 굵은골재 콘크리트 통과 전하량은 대체적으로 증가했으나 ASTM C1202의 규정과 비교해 볼 때 재생 콘크리트의 염소이온 통과 전하량은 모두 2000~4000C사이에 있으므로 재생 굵은골재 치환율에 따른 염소이온 투과량 시험 결과는 모두 양호한 것으로 판단된다.

### 3.4 이산화탄소 확산계수

그림 8에 의하면 상대습도가 10%인 경우 재생콘크리트를 통한 이산화탄소 확산계수가 매우 큰 결과를 보이고 있지만, 상대습도가 45% 이상인 경우 이산화탄소 확산계수는 일반콘크리트와 재생콘크리트 사이에 큰 차이를 보이지는 않는 것을 알 수 있다. 이것은 상대습도가 낮은 경우 기체의 확산성은 콘크리트의 조직구조에 많은 영향을 받지만 상대적으로 상대습도가 높은 경우에는 공극에 포획된 수

분의 영향이 더욱 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로, 일반적으로 콘크리트의 탄산화가 상대습도 50% 전후에 가장 활발히 진행되는 것을 고려하면 재생콘크리트의 경우가 일반콘크리트에 비해서 탄산화 현상이 현저하게 진행되지는 않을 것으로 예상된다.

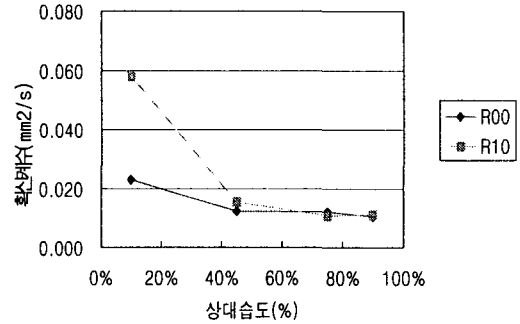
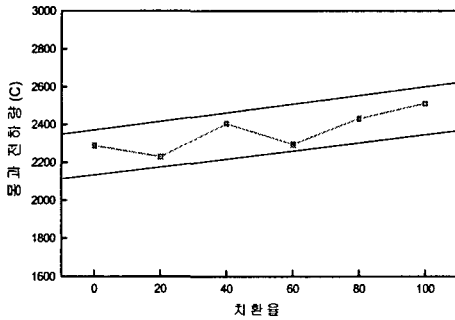


그림 7 재생골재 치환율에 따른 열소이온 투과량      그림 8 재생콘크리트의 이산화탄소 확산계수

#### 4. 결론

본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

1. 건조수축은 재생골재 치환율이 증가할수록 비례하여 큰 결과를 나타냈으며 보통콘크리트에 비해 최대 24%정도까지 증가하였다. 이에 따라 재생콘크리트의 경우 건조수축에 의한 균열발생 및 이에 따른 내구성의 저하에 대한 고려를 하여야 할 것으로 판단된다.
2. 재생골재 치환율에 따른 동결융해 저항성 및 투수성의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.
3. 재생콘크리트의 이산화탄소 확산계수는 탄산화가 활발한 상대습도 영역에서의 확산계수는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 한국과학재단(과제번호 : R05-2001-000-01341-0)의 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kropp, J. Hilsdorf, H. K. (1995) *Performance criteria for concrete durability*, Rilem report 12, E & FN Spon, London, pp231~235.
2. V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, and M. N. Fardis, "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", *ACI Material Journal*, March-April, 1991, pp186~196.