

## 증기양생이 순환골재 콘크리트의 특성에 미치는 영향

### Effect of Steam Curing on the Properties of Recycled Aggregate Concrete

이 승 태<sup>1)\*</sup>      최 진 엽<sup>2)</sup>      박 기 태<sup>3)</sup>      서 동 우<sup>4)</sup>      유 영 준<sup>5)</sup>  
Seung-Tae Lee      Jin-Yeop Choi      Ki-Tae Park      Dong-Woo Seo      Young-Jun You

#### Abstract

In this study, the effects of curing procedures on the mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) were investigated. The replacement ratios by recycled coarse aggregate were 0, 25, 50, 75 and 100% by mass of natural coarse aggregate. Steam curing was adopted to all recycled aggregate concrete mixtures. Compressive and split tensile strength, water porosity, chloride ions penetration resistance and drying shrinkage measurements were carried out to determine performance of the RACs.

From the test results, it was found that the mechanical performance of RAC decreased as the recycled aggregate contents increased. Furthermore, steam curing reduced the compressive and split tensile strength, water porosity and total charge of RAC, especially at the early ages. However, at the later ages, the beneficial effect of steam curing was less prominent. This study clearly showed that initial steam curing could be one of practical methods to improve performance of RAC with higher replacement ratio of recycled aggregate.

**Keywords :** Chloride ions penetration resistance, Drying shrinkage, Mechanical properties, Recycled aggregate concrete, Steam curing, Water porosity

#### 1. 서 론

최근 경제발전에 힘입어 생활수준이 크게 향상됨에 따라 발생하는 생활 및 산업 폐기물이 크게 증가하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 산업 폐기물 중 콘크리트 구조물의 노후화, 성능저하 및 용도/목적 변경 등으로 인하여 구조물 해체에 의하여 발생하는 폐콘크리트량도 급증하고 있는 실정이다. 우리나라의 경우, 연간 약 1,400만톤 이상의 폐콘크리트가 발생된다고 보고되고 있다 (Ministry of Environment, 2005). 최근까지 이와 같은 폐콘크리트의 상당량은 도로포장의 보조재료 또는 매립용 등으로 사용 내지는 폐기되어 왔으나, 점차 급증하는 건설폐기물을 처리할 수 있는 매립지의 부족뿐만 아니라 폐기물의 처리비용이 큰 부담이 되고 있다. 따

라서, 폐콘크리트의 합리적인 처리방법에 대한 필요성이 여러 연구자들에 의하여 강조되고 있으며, 양질의 천연골재 부족현상의 해소 및 환경보호를 위하여 콘크리트 기술자들 사이에는 폐콘크리트를 콘크리트용 순환골재로 재활용화 하는 방안이 큰 관심을 나타내고 있다. 따라서, 폐콘크리트의 재활용에 관련된 기술적 문제를 해결함으로써, 탄소배출 저감 및 천연골재의 자원고갈을 억제하는 한편, 순환골재의 의무 사용 권장량 증진법 등을 고려하여 건설순환자원의 가치를 효율적으로 활용하는 종합적인 방안이 필요한 실정이다.

외국의 경우, 독일에서는 1951년 폐콘크리트의 재활용에 대한 국가기준이 제정되어 순환골재에 대한 연구가 비교적 체계적으로 이루어지고 있으며, 덴마크에서도 1959년 공항 포장 콘크리트, 1969년 도로포장 콘크리트용으로 순환골재

1) 정회원, 군산대학교 토목공학과 부교수, 교신저자  
2) 정회원, 군산대학교 토목공학과 석사  
3) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실, 연구위원  
4) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실, 전임연구원  
5) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실, 수석연구원

\* Corresponding author : stlee@kunsan.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

가 적용된 이래 폐콘크리트의 재활용 연구가 다각적으로 수행되어 오고 있다. 또, 영국에서는 매년 약 2,000만톤 이상의 막대한 양의 건설폐기물이 발생하고 있으며, 이 중 약 절반 이상이 순환골재로 재이용되고 있다. 일본의 경우도 1990년대 자료에 의하면 폐콘크리트의 48%정도가 골재로서 재활용되고 있으며, 폐콘크리트 재활용 문제에 대한 법률제정도 이미 마련한 상태이다. 이상과 같이 선진외국에서는 환경적/경제적 관점에서 순환골재를 콘크리트용 재료로서 활용하기 위한 연구 및 관련규정의 제정에 대하여 국가적인 차원에서 지원하고 있다. 예를 들면, BCSJ (1977), RILEM (1999), DIN 4226-100 (2000), PrEN 13242 (2002) 등과 같은 규정 및 기준에 순환골재를 콘크리트용 재료로 적용하기 위한 최소한의 재료적 요구조건을 명시하고 있다.

국내의 경우, 2003년 건설폐기물의 재활용 촉진을 위한 법률을 제정함으로써 재활용 용도별 순환골재의 품질기준을 마련하고자 하였으며, 이를 바탕으로 순환골재를 콘크리트용 재료로서 재활용화하기 위한 다수의 연구 (Kim et al., 2013; Kim et al., 2010; Lee, et al., 2005)가 있었으나, 아직까지 선진외국에 비하여 관련규정이 잘 정립되어 있지 않을 뿐 만 아니라, 순환골재의 재활용화를 위한 연구 데이터도 다소 부족한 실정이다.

순환골재 콘크리트는 천연골재 사용 콘크리트와는 다르게 신(新)ITZ (interfacial transition zone) 외에도 부착모르타르에 의하여 생성된 구(舊)ITZ가 존재하게 되며 (Fig. 1), 부착모르타르의 영향으로 인하여 밀도 및 흡수율의 변동이 상대적으로 크기 때문에 콘크리트용 골재로서 소오의 품질을 유지하기 위한 어려움이 있다. 결과적으로 순환골재를 사용한 콘크리트는 순환골재 표면에 부착된 모르타르 및 파쇄과정

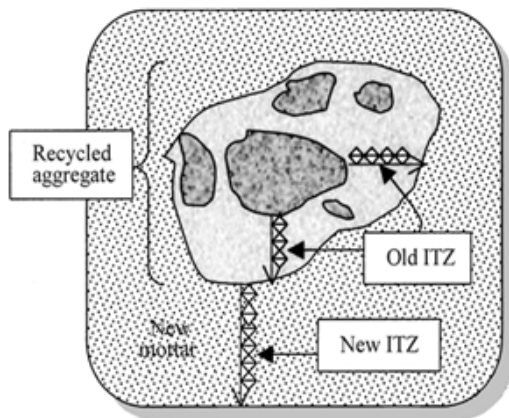


Fig. 1 Schematic diagram of old and new ITZ in recycled aggregate concrete (Ryou, 2003)

에서 발생한 내부균열의 영향으로 인하여 천연골재 사용 콘크리트에 비하여 역학적 성능 및 내구성이 떨어지게 된다 (Ryou, 2003). 따라서, 순환골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위하여 TSMA법 (Tam et al., 2005), CO<sub>2</sub> 양생법 (Zhan et al., 2013), 증기양생법 (Poon, et al., 2006) 등 여러 공학적 방법이 제시되는 등 연구자들마다 다양한 시도가 이루어지고 있다.

특히, 증기양생 (steam curing)법은 프리캐스트 콘크리트 및 콘크리트 2차제품의 생산을 위하여 널리 이용되고 있는 기법으로써, 초기재령에서 시멘트 수화물 생성을 촉진함으로써 콘크리트의 초기강도 발현에 유리한 반면, 장기강도 발현이 적은 것이 문제점으로 지적되고 있다 (Lee and Bae, 1998; Fonseca et al., 2011; Lee, 2008).

본 연구는 증기양생을 받은 순환골재 콘크리트의 성능을 실험적으로 검토하기 위한 일환으로 수행되었다. 특히, 압축 및 인장강도 특성, 투수공극량, 염소이온 침투저항성 및 건조수축량 등 증기양생을 받은 순환골재 콘크리트의 여러 역학적 성능을 수증양생된 콘크리트와 비교, 고찰하였다. 본 연구에서 도출되는 결과는 향후 순환골재의 재활용 및 이를 콘크리트 부재에 적용하기 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트 (이하 OPC)를 사용하였으며, OPC의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition, mineralogical compound and physical properties of OPC

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>	L.O.I
21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.3
Mineralogical compound (%)						
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF			
54.9	16.6	10.3	9.1			
Physical properties						
Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)					
3.15	3,280					

Table 2 Physical properties of aggregates used in this test

Properties	Sand	CG	RG
Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.65	2.64	2.37
Absorption (%)	0.98	0.66	4.31
Abrasion rate (%)		21.7	47.5
Adhered mortar (%)*	-	-	5.56

\* Acid-soluble value

Table 3 Concrete mixture proportions

Symbol	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
			W	C	S	CG	RG
R00	50	42.3	175	350	745	1015	-
R25	50	43.0	175	350	745	762	228
R50	50	43.6	175	350	745	508	456
R75	50	44.2	175	350	745	254	684
R100	50	44.9	175	350	745	-	912

### 2.1.2 골재

잔골재는 밀도  $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ , 흡수율 0.98% 및 조립률 2.80인 강모래 (sand)를 사용하였으며, 굵은골재는 밀도  $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ , 흡수율 0.66%, 최대치수 25mm인 부순골재 (CG: crushed gravel)를 사용하였다. 한편, 순환 굵은골재 (RG: recycled gravel)는 전주 J사에서 분쇄, 세척 및 분류과정을 거친 골재 중 체가름시험을 통하여 부순골재와 마찬가지로 최대치수 25mm가 되도록 입도조정하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

### 2.1.3 혼화제

콘크리트의 적절한 유동성 (슬럼프 :  $150\pm 15\text{mm}$ ) 및 공기량 ( $4.5\pm 1.0\%$ )을 확보하기 위하여 S사의 PC계열 고성능감수제 (SP제) 및 AE제를 사용하였다.

## 2.2 콘크리트 배합

콘크리트의 성능을 평가하기 위하여 CG에 대하여 RG를 각각 0, 25, 50, 75 및 100% 대체하여 5종류의 콘크리트를 제작하였으며, R00, R25, R50, R75 및 R100으로 각각 명명하였다. 이때, R00 콘크리트의 설계기준강도는 24 MPa로 선정하였다. 또, 콘크리트의 물-결합재비 (W/B)는 50%로 고정하였으며, RG 대체율에 따라 잔골재율 (S/a)은 약간씩 조절되었다. 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합표는 Table 3과 같다.

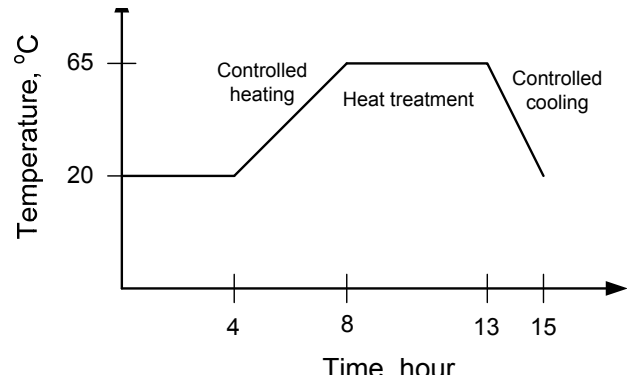


Fig. 2 Steam curing procedure

## 2.3 양생조건

본 연구의 목적은 순환골재 콘크리트의 성능에 대한 증기양생의 효과를 실험적으로 고찰하기 위한 것으로서, 수중양생 (WC: water curing)을 증기양생 (SC: steam curing)의 비교양생법으로 선택하였다. 수중양생의 경우, 콘크리트를 타설한 후, 자유수의 증발을 방지하기 위하여 비닐랩으로 24시간 동안 덮은 다음, 랩을 제거하여 공시체를 탈형한 한 후,  $20\pm 3^\circ\text{C}$  수중에 양생하였다. 또, 증기양생을 실시하기 위하여, 타설된 콘크리트 몰드를 상대습도 95%이상인 증기양생함 (steam-curing box)에 두고, Fig. 2와 같은 온도조건으로 양생을 실시하였다. 양생 1일 후, 콘크리트 공시체를 탈형하여 수중양생과 마찬가지로 소정의 재령동안 공시체를  $20\pm 3^\circ\text{C}$  수중에서 양생하였다.

## 2.4 실험방법

### 2.4.1 강도특성

콘크리트의 강도특성을 고찰하기 위하여 수중 및 증기양생한  $\varnothing 100\times 200\text{mm}$  원주형 공시체를 대상으로 콘크리트의 압축 및 쪼갠인장강도를 각각 KS F 2405 및 KS F 2423에 준하여 재령 1, 3, 7 및 28일에서 측정하였다.

### 2.4.2 투수공극량

투수공극량 시험은 ASTM C 642에 준하여 공시체 중량 800g을 초과하지 않는 범위에서 공시체 두께를 20mm로 정하여 절단 후 표면건조포화상태 중량 ( $W_{ssd}$ ), 수중중량 ( $W_{susp}$ ) 및 노건조상태 중량 ( $W_{dry}$ )을 측정한 후, 다음 식 (1)과 같이 투수공극량 ( $P_{wat}$ )을 계산하였다.

Table 4 Chloride ion penetrability based on total charge passed recommended in ASTM C 1202

Total charge passed (coulomb)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
< 100	Negligible

$$P_{wat} = \frac{W_{ssd} - W_{dry}}{W_{ssd} - W_{sus}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

### 2.4.3 통과전하량

콘크리트의 통과전하량은 ASTM C 1202에 준하여 두께 50mm의 시험체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며, 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 식 (2)로써 총 통과전하량을 산정하였다.

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

여기서, Q = 총 통과전하량 (Coulomb),  $I_x$  = x분에서의 전류값 (A)이다.

식 (2)에 의하여 계산된 총 통과전하량 (Q)은 Table 4에 제시된 기준과 비교하여 염소이온 침투저항성을 판단할 수 있다.

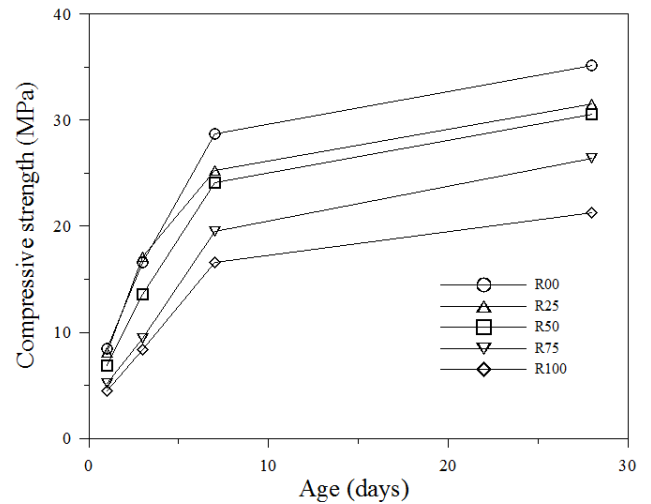
### 2.4.4 건조수축

콘크리트의 건조수축 특성을 고찰하기 위하여 100×100×400mm 공시체를 제조한 후, 1일 간 수증 및 증기양생된 콘크리트의 초기값을 측정 후, JIS A 1129에 준하여 소정의 재령에서 건조수축량을 측정하였다. 이때, 공시체 보관 챔버는 ASTM C 596에 준하여 일정한 온도 (23±2℃) 및 습도 (RH=50±5%) 조건을 유지하도록 하였다.

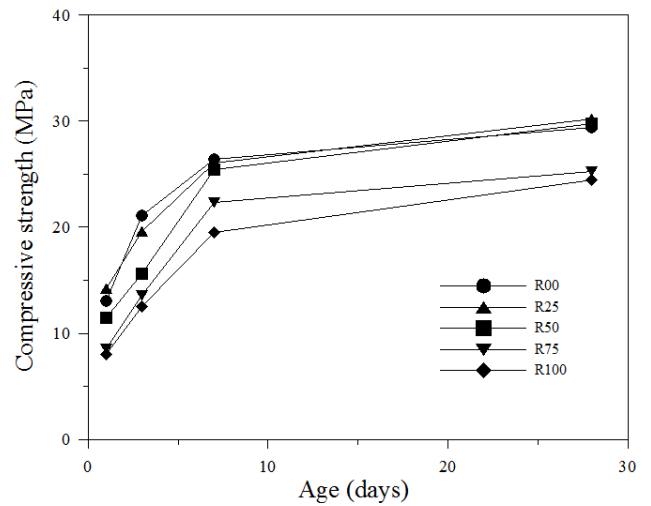
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 강도 특성

Fig. 3은 순환 굽은골재 대체율에 따른 콘크리트의 재령별 압축강도 특성을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 수증양생한 콘



(a) Water-cured mixtures



(b) Steam-cured mixtures

Fig. 3 Compressive strength development of concretes under water or steam curing condition

크리트의 압축강도 발현경향을 도식화한 것으로서, 순환골재 대체율이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도는 다소 작게 나타남을 알 수 있다. 순환 굽은골재를 100% 대체한 R100 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 약 21.3MPa로써, 부순골재만을 사용한 R00 콘크리트의 약 61% 정도로 나타났다. Fig. 2의 증기양생 과정을 통하여 제조된 콘크리트의 압축강도 발현 특성을 나타낸 것이 Fig. 3(b)이다. 이 그림에서 R00 및 R25 콘크리트의 압축강도는 재령에 관계없이 서로 유사하게 나타났으며, 대체적으로 순환 굽은골재의 대체율이 증가함에 따라 압축강도가 작게 나타나는 경향을 보였다.

한편, 순환골재 콘크리트의 압축강도 발현에 대한 증기양생의 영향을 평가하기 위하여 수증양생 콘크리트의 압축강

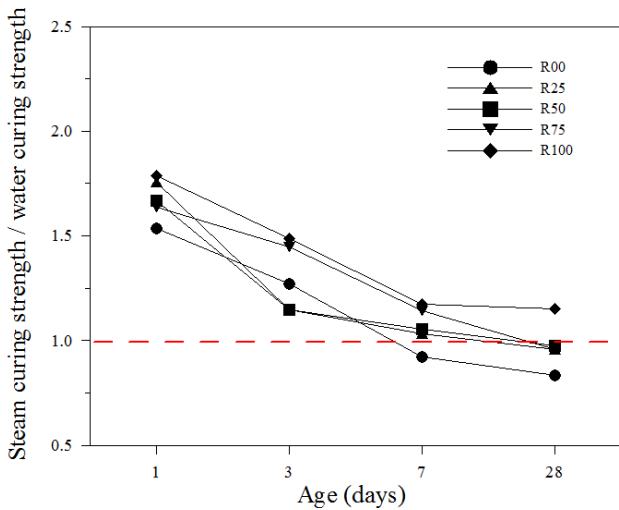
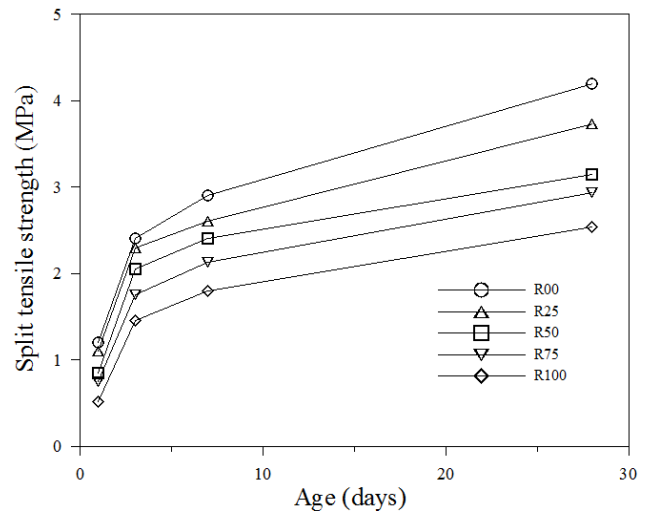


Fig. 4 Effect of steam curing on compressive strength of recycled aggregate concretes

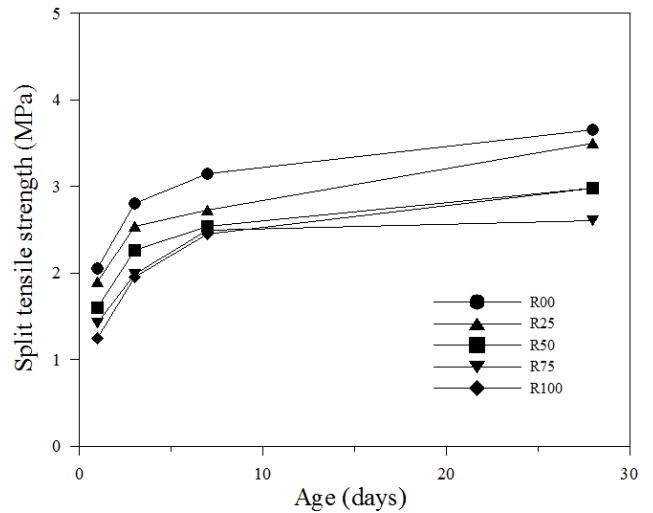
도와 비교하여 강도비 (SC/WC)로 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기재령에서는 증기양생된 콘크리트의 강도발현이 수중양생한 콘크리트 보다 크게 나타났으며, 재령의 증가와 더불어 강도비가 감소하는 경향을 나타내었다. 초기재령과는 다르게 재령 28일에서 콘크리트의 강도비는 R00 콘크리트가 약 0.83인 반면, R100 콘크리트는 약 1.15의 값을 나타내었다. 한편, 순환 굵은 골재 대체율이 25~75%인 R25, R50 및 R75 콘크리트의 재령 28일 강도비는 거의 유사하게 나타났다 (SC/WC $\approx$ 1). 결과적으로, 초기 재령 콘크리트 및 순환 굵은골재 대체율이 클수록 (100% 대체) 콘크리트의 압축강도에 대한 증기양생의 효과는 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 증기양생을 받은 콘크리트의 경우 급격한 초기수화로 인하여 순환골재 중 부착 모르타르의 ITZ가 수화물질의 생성촉진으로 인하여 밀실화되었기 때문으로 판단된다 (Poon et al., 2006).

순환 굵은골재 대체율에 따른 콘크리트의 재령별 쪼갬인장강도 특성을 나타낸 것이 Fig. 5이다. Fig. 5(a)는 수중양생한 콘크리트의 쪼갬인장강도 발현 경향을 도식화 한 것으로서, 압축강도 발현 경향 (Fig. 3)과 마찬가지로 순환골재 대체율이 증가함에 따라 콘크리트의 인장강도는 작게 나타났다. R00 콘크리트의 수중양생 재령 28일 인장강도가 약 4.2MPa인 것에 비하여 R100 콘크리트의 동일재령 인장강도는 약 2.5MPa로 나타나므로써, 순환골재 100% 대체에 따라 수중양생 콘크리트의 인장강도는 약 40% 감소한 결과를 나타내었다.

반면, Fig. 5(b)는 증기양생된 콘크리트의 쪼갬인장강도 발



(a) Water-cured mixtures



(b) Steam-cured mixtures

Fig. 5 Split tensile strength development of concretes under water or steam curing condition

현 특성을 나타낸 것으로서, 인장강도 발현경향은 수중양생한 콘크리트와 유사하였으나, 재령 28일에서 R100 콘크리트의 인장강도 (약 3.0MPa)는 R00 콘크리트 (약 3.7MPa)에 비하여 약 81%인 것으로 조사되었다.

또, 순환골재 콘크리트의 인장강도 발현에 따른 증기양생의 효과를 검토하기 위하여 강도비를 계산하여 나타낸 것이 Fig. 6으로써, Fig. 4에 나타난 압축강도 강도비 경향과 비교해서 재령 1일에서 매우 큰 값이 나타났으며, 이러한 현상은 순환골재 대체율이 높을수록 더욱 두드러진 경향을 나타내었다. 그 이유는 콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비하여 천이지대 (interfacial transition zone)의 특성에 의한 영향을 크게 받기 때문에 증기양생에 의한 천이지대 개선효과가 더

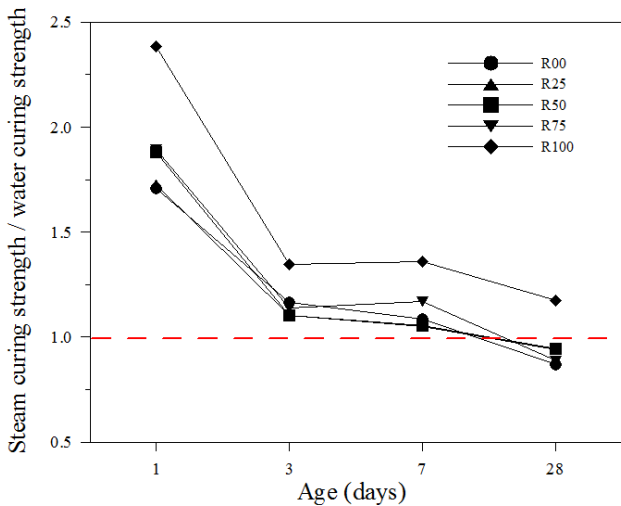


Fig. 6 Effect of steam curing on split tensile strength of recycled aggregate concretes

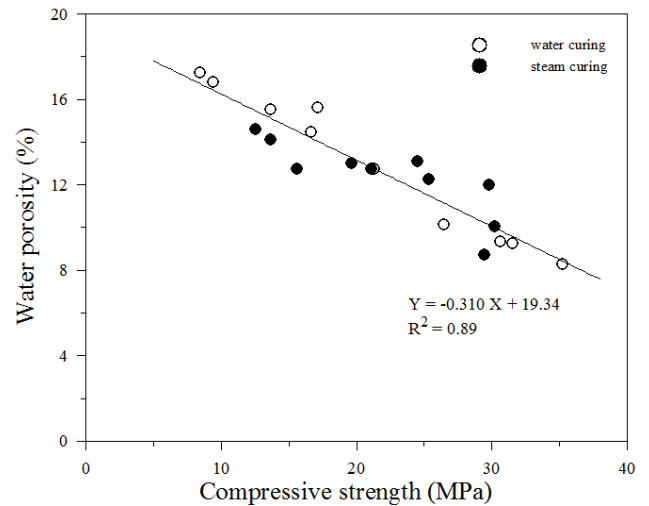


Fig. 8 Relationship between compressive strength and water porosity of recycled aggregate concrete

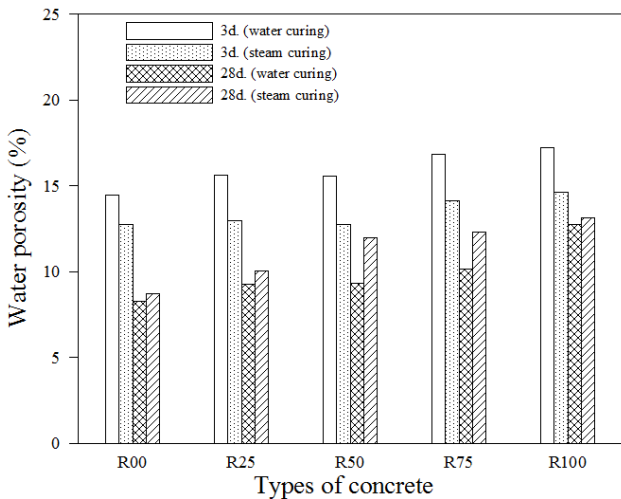


Fig. 7 Variations of water porosity of recycled aggregate concrete under water and steam curings

욱 크게 나타난 탓으로 판단되며, Poon et al. (2006)의 연구 결과와도 유사하게 나타났다. 특히, 순환골재 대체율이 100%인 R100 콘크리트의 경우, 재령 28일까지 수중양생한 콘크리트의 인장강도보다 증기양생한 콘크리트의 인장강도가 크게 나타난 반면 (SC/WC > 1), 순환골재 대체율이 0~75%인 재령 28일 콘크리트는 증기양생한 콘크리트의 인장강도가 수중양생한 콘크리트의 인장강도와 동등 또는 다소 작은 값을 나타내었다.

### 3.2 투수 공극

Fig. 7은 양생방법에 따른 콘크리트의 투수공극량을 식 (1)

과 같이 계산하여 순환골재 대체율별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 재령이 증가 (3일 → 28일)함에 따라 투수공극량은 감소하였으며, 순환골재 대체율이 증가함에 따라 투수공극량도 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 증기양생을 받은 콘크리트는 순환골재 대체율에 관계없이 재령 3일에서 수중양생한 콘크리트보다 작은 투수공극량 값을 나타낸 반면, 재령 28일에서는 오히려 크게 나타나는 반대 경향을 보였다.

한편, 콘크리트의 투수공극량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 결과로부터 투수공극량이 클수록 압축강도가 감소하는 경향이 나타났으며, 아울러 좋은 상관관계를 보임을 알 수 있다.

### 3.3 염소이온 침투저항성

Fig. 9는 ASTM C 1202 실험법에 준하여 측정된 콘크리트의 총통과전하량을 나타낸 것으로써, 재령, 순환골재 대체율 및 양생방법에 따라 서로 상이한 결과가 나타남을 알 수 있다. 특히, 부순골재에 순환골재를 25% 대체한 R25 콘크리트는 양생방법에 관계없이 R00 콘크리트와 유사한 총통과전하량을 나타내었다. 반면, 재령 3일 및 28일에서 수중양생된 R100 콘크리트의 총통과전하량은 수중양생된 R00 콘크리트와 비교하여 상대적으로 크게 나타났으며, 이러한 현상은 순환골재에 포함되어 있는 부착모르타르의 영향으로 인하여 생성된 ITZ의 증가에 기인한 것으로써, Otsuki et al. (2003)의 연구결과와도 비교적 잘 일치하였다.

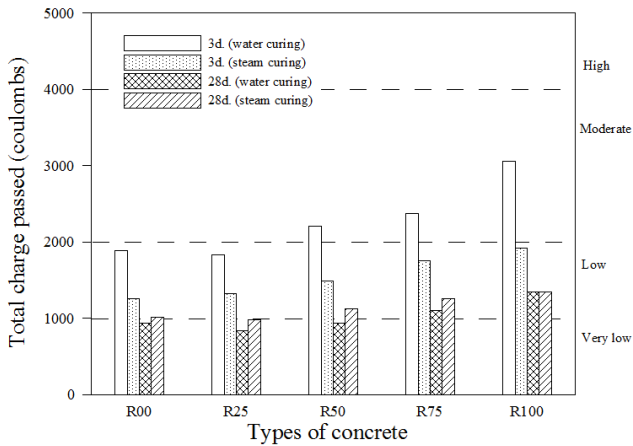


Fig. 9 Total charge passed through recycled aggregate concrete

또, 순환골재 대체율별 증기양생된 콘크리트의 총통과전하량 차이는 수증양생된 콘크리트의 총통과전하량의 차이보다는 작게 나타났으며, 이러한 현상은 초기재령 (3일)에서 더욱 명확하게 나타났다. 따라서, 양생방법에 따라 순환골재 콘크리트의 염소이온 침투저항성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

특히, Poon et al. (2006)의 연구결과와 마찬가지로 증기양생을 받은 콘크리트는 C-S-H 수화물의 생성 촉진 및 모세관 공극의 굴곡도 (tortuosity) 증진 효과로 인하여 초기재령에서 총통과전하량이 상대적으로 작게 나타나므로써, Table 4의 평가기준을 고려하면 염소이온 침투저항성이 향상됨을 확인할 수 있다.

### 3.4 건조수축

건조수축은 콘크리트 중의 수분이 증발하면서 발생하는 현상으로 크리프와 함께 시간의존적인 거동을 나타내는 콘크리트의 고유현상으로써, 과도할 경우 콘크리트에 균열을 발생시키는 주요 원인된다 (Yang et al., 2010). Fig. 10은 수증 및 증기양생한 순환골재 콘크리트의 91일 건조수축량을 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 수증양생한 콘크리트는 순환골재 대체율에 관계없이 증기양생된 콘크리트에 비하여 건조수축량이 크게 나타났다. 또, 수증양생한 콘크리트의 건조수축량은 순환골재 대체율에 따른 건조수축량의 차이가 다소 크게 나타나 반면, 증기양생한 콘크리트 건조수축량은 순환골재 대체율에 따른 영향이 상대적으로 작게 나타났다. 그 이유는 증기양생 후 콘크리트 중 수화물인 C-S-H 표면에 흡착된 수분이 수증양생에 비하여 상

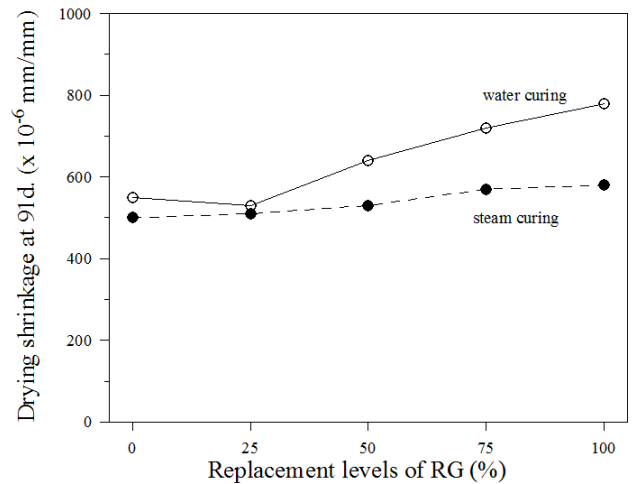


Fig. 10 Comparison of drying shrinkage of concrete mixtures at 91 days

대적으로 감소하였기 때문으로 판단된다 (Bakharev et al., 1999). 예를 들어 비교하면, 91일 재령에서 R00 콘크리트의 수증 및 증기양생된 콘크리트의 건조수축량은 약 550 및  $504 \times 10^{-6}$  mm/mm인 것에 비하여, R100 콘크리트의 수증 및 증기양생 건조수축량은 약 778 및  $580 \times 10^{-6}$  mm/mm로 각각 관찰되었다.

## 4. 결 론

본 연구는 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 순환골재 콘크리트의 압축강도 특성을 고찰한 결과, 초기재령에서는 순환골재 대체율이 높을수록 증기양생의 효과가 두드러지게 나타난 반면, 재령이 증가함에 따라 증기양생의 효과가 감소함을 알 수 있다. 또, 인장강도는 천이지대 개선효과가 더욱 크게 나타난 탓으로 인하여 압축강도에 비하여 증기양생의 영향을 크게 받은 것으로 관찰되었다.
- (2) 순환골재 콘크리트의 투수공극량은 순환골재 대체율이 증가함에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또, 증기양생된 콘크리트는 순환골재 대체율에 관계없이 재령 3일에서 수증양생한 콘크리트보다 투수공극량 값이 작게 측정된 반면, 재령 28일에서는 오히려 반대 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 순환골재 콘크리트의 총통과전하량 측정결과와도 비교적 잘 일치하였다.
- (3) 증기양생한 콘크리트의 건조수축량은 시멘트 수화물

인 C-S-H 중에 흡착된 수분의 감소로 인하여 순환골재 대체율에 관계없이 수중양생된 콘크리트와 비교하여 상대적으로 작게 나타났으며, 순환골재 대체율에 따른 건조수축량 차이도 매우 작은 것으로 관찰되었다.

- (4) 본 연구의 범위 내에서 종합적으로 고찰하면, 증기양생법은 순환골재 콘크리트의 초기재령 성능향상을 위하여 매우 효과적인 것으로 조사되었으며, 재령 28일에서도 수중양생한 경우와 비교해서 동등 이상의 성능을 나타내는 것으로 관찰되었다. 따라서, 순환골재를 콘크리트용 재료로써 사용하기 위하여 증기양생법을 적용하는 것이 유효할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 2014년 주요사업 “FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상기술 개발” 연구과제에서 수행된 결과로 제작되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., and Cheng, Y. B. (1999), Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1619-1625.
- BCSJ (1977), Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete, Building Contractors Society of Japan Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste.
- DIN 4226-100 (2000), Mineral Aggregates for Concrete and Mortar - Part 100: Recycled Aggregates.
- Fonseca, N., de Brito, J., and Evangelista, L. (2011), The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste, *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637-643.
- Kim, S. S., Lee, J. B., Ko, J. S., and Kim, I. K. (2013), A study on the nano silica sol coating for improving performance of recycled aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(4), 84-90 (in Korean).
- Kim, S. W., Lee, H. A., Jung, C. K., and Kim, K. H. (2010), Experimental study on bond performance of RC beams according to absorption of recycled coarse aggregates, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(3), 100-107 (in Korean).
- Lee, C. Y., and Bae, S. Y. (1998), The strength development of fly ash concrete in steam curing, *Journal of the Korean Concrete Institute*, 10(1), 613-620 (in Korean).
- Lee, M. K., Kim, K. S., Lee, K. H., and Jung, S. H. (2005), Strength of recycled concrete with furnace slag cement under steam curing condition, *Journal of the Korean Concrete Institute*, 17(4), 613-620 (in Korean).
- Lee, S. T. (2008), Effect of curing procedures on the strength and permeability of cementitious composites incorporating GGBFS, *Journal of Ceramic Processing Research*, 9(4), 358-361.
- Ministry of Environment (2005), Construction waste recycling survey report, 6-15 (in Korean).
- Otsuki, N., Miyazato, S., and Yodsudjai, W. (2003), Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 443-451.
- Poon, C. S., Kou, S. C., and Chan, D. (2006), Influence of steam curing on hardened properties of recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, 58(5), 289-299.
- PrEN 13242 (2002), Aggregates for Unbound and Hydraulically Bound Materials for Use in Civil Engineering Work and Road Construction, European Committee for Standardization.
- RILEM TC 172-EDM/CIB TG 22 (1999), Environmental Design Methods in Materials and Structural Engineering.
- Ryou, J. (2003), An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 54(1), 7-12.
- Tom, V. W. Y., Gao, X. F., and Tam, C. M. (2005), Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195-1203.
- Yang, E. I., Kim, I. S., Yi, S. T., and Lee, K. M. (2010), Comparison of measurement methods and prediction models for drying shrinkage of concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(1), 85-91 (in Korean).
- Zhan, B., Poon, C., and Shi, C. (2013), CO<sub>2</sub> curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 42, 1-8.

Received : 09/30/2013

Revised : 11/11/2013

Accepted : 11/19/2013



---

## 요 지

본 연구에서는 순환골재 콘크리트의 성능에 대한 양생방법의 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 순환골재 콘크리트 제조를 위하여 부순골재에 순환골재를 0, 25, 50, 75 및 100%로 대체하였으며, 증기양생한 콘크리트의 압축 및 쪼갬인장강도, 투수공극, 염소이온 침투저항성 및 건조수축을 소정의 재령에서 측정하여 수증양생한 콘크리트의 성능과 비교하였다. 실험결과에 따르면, 양생방법에 관계없이 순환골재 대체율이 증가할수록 콘크리트의 역학적 성능은 감소하였다. 한편, 초기재령에서 증기양생된 콘크리트는 수증양생된 콘크리트와 비교하여 매우 우수한 성능을 나타내었다. 그러나, 장기재령 (28일)에서 증기양생의 효과는 초기재령에 비하여 두드러지게 나타나지 않음을 알 수 있다. 결론적으로, 본 연구의 범위 내에서 순환골재 콘크리트의 성능향상을 위하여 증기양생법의 적용이 유용할 것으로 판단된다.

**핵심 용어** : 염소이온 침투저항성, 건조수축, 역학적 성능, 순환골재 콘크리트, 증기양생, 투수공극

---