

## 순환골재 치환율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 특성

### Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios

심종성\* · 박철우\*\* · 박성재\*\*\* · 김용재\*\*\*\*

Sim, Jongsung · Park, Cheolwoo · Park, Sung Jae · Kim, Yong Jae

#### Abstract

As a manufacturing process of recycled aggregate improves the quality of recycled aggregate shall be sufficient enough to be used for structural concrete. This study characterized compressive strength and elastic modulus of concrete that used recycled coarse and fine aggregate. Before the strength tests, the fundamental characteristics of recycled aggregate were preliminarily analyzed and the recycled aggregate satisfied the class 1 requirements in KS F 2573. As the replacement ratio increased, the compressive strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete decreased. When the coarse and fine aggregates were completely replaced with the recycled, the compressive strength and elastic modulus were decreased by 13% and 31%, respectively. Based on the test results, this study suggests equations for predicting the compressive strength and elastic modulus of the recycled aggregate concrete with respect to the replacement ratio. The values from the equations were in good agreement with the test data from this study and others.

**Keywords:** recycled aggregate, recycled aggregate concrete, compressive strength, elastic modulus

#### 요 지

본 논문에서는 최근 고도처리로 생산되는 순환골재의 품질을 분석하고, 이를 구조용 콘크리트에 적용하였을 경우 구조물의 설계 및 해석에서 가장 기초적으로 요구되는 물성인 압축강도와 탄성계수의 변화를 순환굵은골재 및 순환잔골재의 치환율에 따라 검토하고자 하였다. 실험결과 순환굵은골재 및 순환잔골재는 KS F 2573의 1종의 기준을 만족하였으며, 순환골재의 치환율이 증가할수록 순환골재콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 감소하는 경향이 나타났다. 특히 순환골재로 전량치환 하였을 경우의 압축강도와 탄성계수는 일반골재콘크리트 대비 약 13%와 약 31%가 저하되었다. 이러한 실험결과를 기초로 순환골재 치환율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 추정식을 새로이 제안하였으며, 기존의 국내의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

**핵심용어 :** 순환골재, 순환골재콘크리트, 압축강도, 탄성계수

#### 1. 서 론

골재는 시멘트, 물 그리고 필요에 따라 첨가하는 혼화재료들과 같이 콘크리트를 구성하는 기본재료이다. 이러한 골재는 콘크리트 용적의 약 70% 이상을 차지하고 있기 때문에 물리적, 화학적 작용에 대하여 콘크리트의 품질을 결정하는 주요인자이며, 구조물의 안정성을 유지시키는데 중요한 역할을 하는 건설재료이다. 그러나 현재 국내에는 이러한 골재의 부존량에 대한 문제가 심각히 대두되고 있다. 2004년 한국 지질자원연구원에서 실시한 국내골재의 부존량 조사결과에 따르면 2004년의 골재수요량(2억 6천8백만 m<sup>3</sup>)을 기준으로

향후 40년 정도 공급이 가능한 것으로 보고되고 있다(한국 레미콘공업협회, 2004). 따라서 앞으로 골재수급의 문제가 심각하게 대두될 것이 예상되고 있다. 이에 정부는 추후 발생 예상되는 골재수급난에 대처하기 위해 순환골재의 콘크리트 적용을 적극 장려하고 있으나, 아직까지 그 사용성에 대한 명확한 검증이 되어있지 않은 상태이다(건설교통부, 2004).

기존의 연구 결과들에 따르면 순환골재는 미립분과 흡수율이 일반골재와 비교하여 다소 높으며(남상일, 1995; 심종우 등, 2004; Hansen, 1992; Mukai 등, 1979; Rashwan 등, 1997; Salem 등, 2003) 순환골재의 혼입은 콘크리트의 강도

\*정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수

\*\*교신저자 · 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 BK21 계약교수(E-mail: tiger1park@hotmail.com)

\*\*\*한양대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\*\*\*한국시설안전기술공단 연구원

표 1. 순환골재 치환율 및 실험변수

Specimen	Recycled Aggregate Replacement Ratio	
	Coarse aggregate	Fine aggregate
NN	-	-
RN	Recycled 100%	-
RR30	Recycled 100%	Recycled 30%
RR60	Recycled 100%	Recycled 60%
RR	Recycled 100%	Recycled 100%

및 내구성의 저하를 초래한다. 또한 순환골재콘크리트의 위 커빌리티는 일반콘크리트에 비해 다소 떨어지고 공기량은 약 1%정도 증가된다고 하였다. 특히 압축강도와 탄성계수는 약 15%와 약 20% 정도 감소하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 최근 국내에서 생산되는 순환골재를 사용한 콘크리트의 구조부재 적용을 위한 연구의 일환으로, 순환골재콘크리트의 기초적 물성을 검토하고 압축강도와 탄성계수의 특성을 파악하며 나아가 순환골재의 치환율에 따른 압축강도 추정식과 탄성계수 추정식을 제안하고자 한다.

## 2. 실험

본 실험에서는 순환골재 치환율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 특성을 파악하기 위하여 표 1과 같이 총 5가지의 치환율에 따른 시험체 변수를 설정하였으며, 이 외 순환골재의 품질, 타설 및 양생과정 등은 모두 동일하게 하여 이에 대한 영향은 해석에서 배제하였다.

### 2.1 사용재료 및 배합

일반굵은골재는 경기도 포천산 쇄석, 일반잔골재는 해사와 부순모래가 1:1 비율로 혼합된 인공골재를 사용하였으며 순환골재는 고도처리방식에 의해 생산된 KS F 2573(콘크리트용 재생골재)에 의거 1종의 순환굵은골재와 순환잔골재를 사용하였다(표 2, 3 참조). 굵은골재 최대치수는 천연골재 및

순환골재 모두 25 mm이며 본 연구에 사용되어진 순환골재의 기초분석을 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 순환굵은골재에 포함된 이물질함량을 KS F 2576(재생골재의 이물질 함유량 시험방법)의 방법에 따라 측정하였다. 측정결과, 순환굵은골재는 0.71%의 유기이물질 및 0.4%의 무기이물질이 포함되어 있었으며, 이의 대부분은 폐적벽돌 및 나무조각 등 이었다. 순환잔골재의 경우, 유기 및 무기이물질의 양이 시각적 판단으로 선별분리하기에는 적은 양이어서 추가적으로 유기불순물과 미립분 등에 관한 실험을 수행하였다. 순환잔골재의 유기불순물의 함량을 측정하기 위하여, KS F 2510(콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기 불순물 시험 방법) 과 KS F 2514(모르타르 압축강도에 의한 유기 불순물을 함유한 잔골재 시험 방법)을 실시하였다. 실험결과, 3%의 수산화나트륨용액에 침지시킨 순환잔골재의 색도는 표준용액과 비교하였을 때 색도의 변화가 거의 없었으며, 모르타르의 압축강도는 일반골재의 경우 수산화나트륨으로 씻기 전후의 강도비가 92%였다. 순환잔골재의 경우도 강도비가 90%로 규정에서 제시하는 90% 이상을 만족하였다. 잔골재의 유해물질 함유량을 측정하기 위하여 KS F 2511(골재에 포함된 잔 입자(0.08 mm체를 통과하는) 시험방법)에 준하여 실험을 실시하였다. 실험결과, 일반잔골재와 순환잔골재는 2.1%와 2.8%로 모두 콘크리트표면이 마모작용을 받는 경우의 허용값인 5% 및 순환골재 품질기준에서 제시하는 7%를 만족하였다. 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트, 혼화제는 나프탈렌계 고성능감수제와 AE제를 사용하였다.

현재 국내에는 순환골재콘크리트의 배합설계에 대한 별도 지침은 아직 제정되어 있지 않아, 본 실험에서도 배합설계에 대한 별도의 수정은 고려하지 않았다. 순환골재의 치환은 표 4와 같이 용적치환을 기준으로 하여, 압축강도는 구조용부재의 적용을 고려하여 45 MPa, 슬럼프는 10 cm, 공기량은 5%, 잔골재율은 44%로 배합설계하였다.

### 2.2 실험방법

시험체는  $\phi 100 \times 200$  mm 원주형 공시체로서 제작 1일 후

표 2. 사용 굵은골재의 물리적 성질

Property	Recycled Coarse Aggregate				Natural Crushed C. A.		
	KS F 2573			RCA Quality Standard (MOCT)	Used	KS F 2527	Used
Absorption (%)	Class 1	Class 2	Class 3	≤ 3.0	1.82	≤ 3.0	0.47
	≤ 3.0	≤ 5.0	≤ 7.0				
Density (g/cm <sup>3</sup> )	≥ 2.2			≥ 2.5	2.61	≥ 2.5	2.64
Abrasion (%)	≤ 40			≤ 40	21.5	≤ 40	24.1
Solid Volume (%)	≥ 55			≥ 55	60.3	≥ 55	55.4

표 3. 사용 잔골재의 물리적 성질

Property	Recycled Fine Aggregate			Natural F. A.		
	KS F 2573		RCA Quality Standard (MOCT)	Used	KS F 2527	Used
Absorption (%)	Class 1	Class 2	≤ 5.0	4.55	≤ 3.0	1.16
	≤ 5.0	≤ 10.0				
Density (g/cm <sup>3</sup> )	≥ 2.2		≥ 2.2	2.43	≥ 2.5	2.61

탈형하고 20±2°C에서 28일간 수중양생을 통하여 양생하였다. 시험체의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축 강도 시험 방법)에 준하여 실시하였다. 탄성계수는 공시체의 표면에 하중가력방향을 기준으로 양쪽에 변형률게이지를 부착한 뒤 하중에 따른 변형률을 측정하여 산출하였다.

### 3. 실험결과 및 추정식 제안

#### 3.1 슬럼프 및 공기량

콘크리트를 배합표에 따라 배합한 후 측정된 슬럼프 및 공기량을 그림 1에 치환율에 따라 비교하여 나타내었다. 슬럼프는 일반골재만을 사용한 경우 12 cm 정도로 설계 슬럼프값 보다 비교적 높은 값을 나타내었다. 굵은골재를 천연골재에서 순환골재로 전량 치환한 경우 슬럼프는 1 cm 정도 증가하였으며, 굵은골재의 치환율이 100%인 상태에서 잔골재의 치환량이 증가할수록 슬럼프는 5 cm 정도 추가적으로 증가하였다. 이는 일반적으로 재생 또는 순환골재를 사용하면 콘크리트의 워커빌리티가 저하된다고 알려진 사실과 반대되는 것으로서, 일반골재로 사용된 쇄석은 생산 시 파쇄과정 중 입형이 거칠고 모난 형태를 가지게 되나, 치환되는 순환골재의 경우 원재료가 같아지고 처리과정중 크러셔 내 마모과정에 의해 상대적으로 둥근 형태를 띠게 되므로, 고성능감수제의 사용으로 슬럼프가 비교적 큰 콘크리트의 경우, 슬럼프론에 의한 워커빌리티는 순환골재콘크리트가 더 양호하게 나타난 것으로 사료된다.

공기량은 일반골재 사용 시 약 4.3% 이었으며, 순환굵은골재 치환 시 약 0.4% 정도 감소되다가 잔골재 치환율이 증가할수록 미소하게 증가는 경향을 나타내었다. 하지만, 그림 1에서와 같이 전체적인 변동의 범위는 아주 미세한 정도로 순환골재의 치환율에 따른 공기량 변화의 상관관계는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

이와같이 순환골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 물시멘트비, 골재량, 순환골재종류 및 공급원, 혼화제 및 혼화제의 사용 등의 여러 가지 변수에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있으므로, 사용전 시험배합을 통하여 슬럼프 및 공기량에 대한 특성을 미리 파악해 놓아야 할 것으로 사료된다.

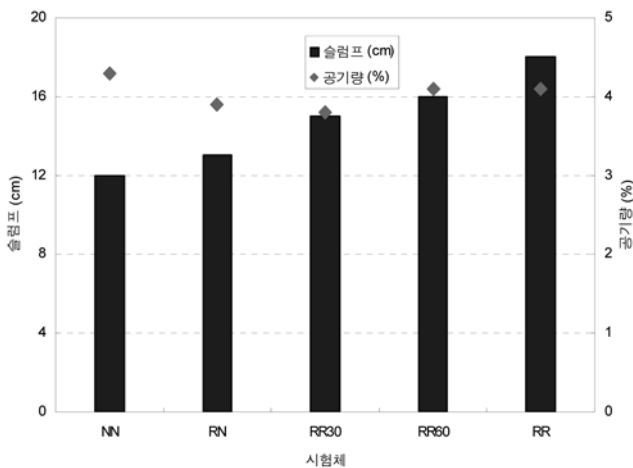


그림 1. 순환골재의 치환율에 따른 슬럼프 및 공기량 변화

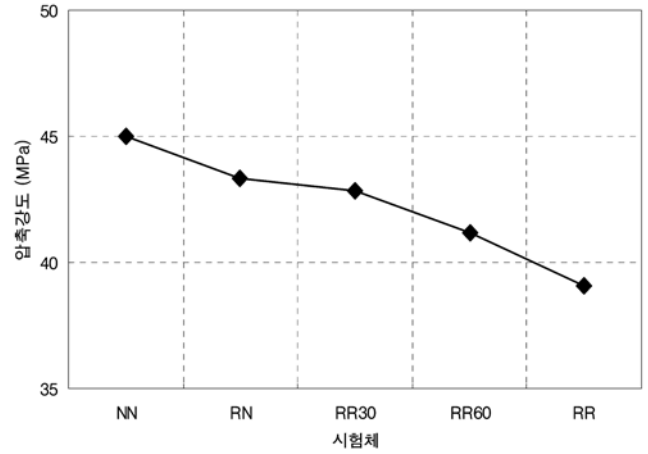


그림 2. 순환골재의 치환율에 따른 압축강도 변화

#### 3.2 압축강도

측정된 압축강도의 결과를 그림 2에 비교하였다. 일반적인 결과와 같이 순환골재의 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 굵은골재만을 순환골재로 100% 치환하였을 경우 약 2 MPa의 강도감소현상을 보였으며, 굵은골재 및 잔골재를 순환골재로 전량 치환한 경우에는 약 4 MPa의 추가적인 강도감소현상이 나타났다. 이러한 순환골재의 치환율에 따른 강도감소기울기는 치환율 30% 이내인 경우, 비교적 완만한 반면, 치환율 30% 이상인 경우 강도감소기울기가 다소 큰 것으로 나타났다. 이희철(2004)의 연구에 의하면 순환잔골재의 치환율이 60%이상일 경우 강도감소기울기는 다소 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 순환골재콘크리트의 압축강도는 잔골재의 치환율이 30-60%일 경우 큰 변화를 가지게 됨을 알 수 있다.

이러한 결과를 이용하여 순환골재의 치환율에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도저하 정도를 추정하고자 하였으며, 그 추정식은 식(1)과 같이 제안하였다. 제안한 추정식은 일반콘크리트의 압축강도를 기준으로 순환골재의 치환율에 따른 압축강도감소효과를 고려하여, 그 강도를 추정하는 형태로 구성하였다. 또한 제안한 추정식은 본 실험의 결과 및 다수의 실험논문 결과로부터 순환골재콘크리트의 압축강도의 저하 현상에는 순환굵은골재의 영향보다 순환잔골재의 영향이 더 큰 것으로 판단되었으며, 이를 치환율에 대한 함수로 식(1)과 같이 계수의 형태로 적용하였다.

과학적 추론법에 의하면 추정식의 산출에 있어 본 연구의 실험결과 뿐만 아니라 방대한 양의 실험결과가 필요하나, 순환골재콘크리트는 순환골재의 품질과 배합강도의 크기에 따라 그 성질이 크게 달라지며, 추정식 제안을 위한 실험결과가 국내에서는 아직 부족하므로 추후 연구를 위한 기초자료로서 본 식을 제안하였으며, 그에따른 추정식의 사용 범위는 고도처리에 의해 생산된 비교적 양질의 순환골재를 사용한 배합강도 30-50 MPa의 순환골재콘크리트로 제한하였다.

$$f_{ckr} = f_{ck} - 0.017G - 0.04S \quad (1)$$

여기서,  $f_{ckr}$ 은 순환골재콘크리트의 추정압축강도 (MPa),  $f_{ck}$ 은 일반골재콘크리트의 압축강도 (MPa),  $G$ 는 순환굵은골재의 치환율(%)이며,  $S$ 는 순환잔골재의 치환율(%)이다.

본 연구의 실험결과로부터 얻어진 순환골재콘크리트의 압

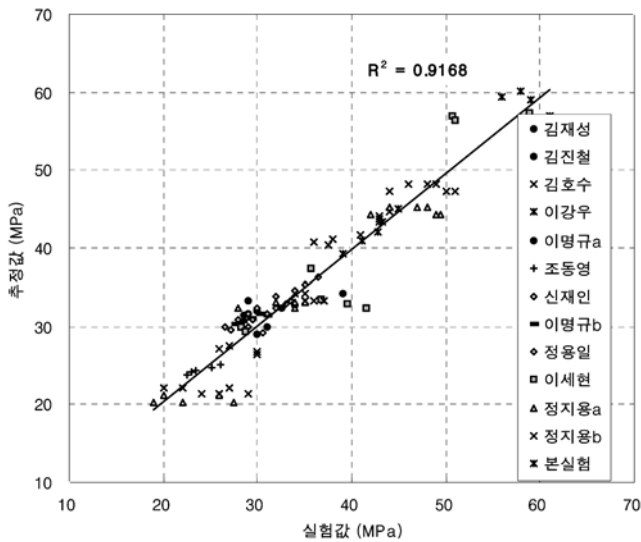


그림 3. 압축강도 추정값과 기존 실험값의 비교

축강도 추정식을 기존의 관련 연구논문들에(김재성 등, 2004; 김진철 등, 2003; 김호수 등, 2003; 신재인 등, 2001; 이강우 등, 2001; 이명규 등, 1999, 2003; 이세현 등, 2001; 정용일 등, 2002; 정지용 등, 2004a, 2004b; 조동영 등, 2003) 주어진 자료들을 이용하여 식(1)을 비교·검토하였다. 그림 3은 기존 순환골재콘크리트 연구문헌의 실험자료를 본 논문의 압축강도 추정식에 대입하여 얻어낸 추정값과 연구문헌의 실측값을 비교하여 나타내고 있다.

그림 3의 결과와 같이 추정식에 의해 산출된 값은 실측값과 매우 유사한 값을 가지고 있으며 그 오차 또한 상대적으로 매우 작은 것을 알 수 있다. 다만 30 MPa 이하의 강도 범위에서는 추정값이 실험값에 비해 약간 낮게 산출되는 경향을 보이고 있으나, 상기 오차는 비교적 크지 않은 값으로 판단되며, 앞에서 언급한 추정식의 적용범위를 제한하여 그 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 제안된 추정식은 순환골재의 치환율에 따라 순환골재

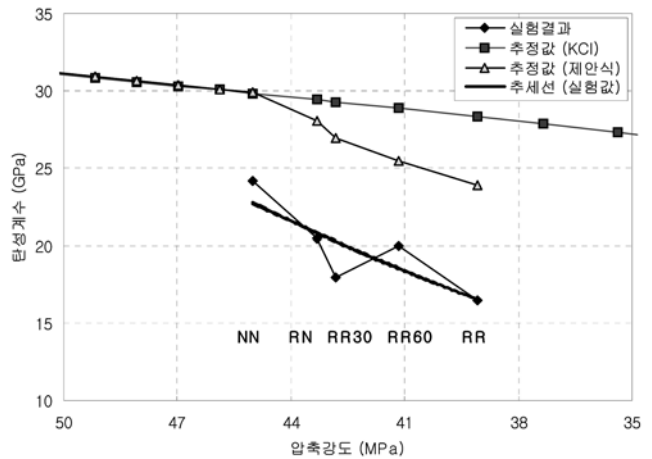


그림 4. 탄성계수 측정값 및 추정값

콘크리트의 압축강도를 간단하고 비교적 정확하게 추정할 수 있는 것으로 사료되며, 순환골재를 사용한 콘크리트의 설계, 해석 및 현장에서 사용하는데 기초자료로서 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 탄성계수

실험으로부터 구하여진 탄성계수는 그림 4에 나타나 있으며 압축강도와 마찬가지로 순환골재의 치환율이 증가할수록 탄성계수는 감소하였다. 골재의 전량을 순환골재로 치환한 콘크리트의 탄성계수는 약 8 GPa 정도 감소되는 것으로 측정되었다.

표 5는 실험변수들에 대한 순환골재콘크리트의 측정된 탄성계수와 식(2)와 같이 현행 콘크리트 구조설계기준(콘크리트강도가 30 MPa 이상인 경우)에서 콘크리트의 압축강도에 따른 탄성계수 추정값을 비교하여 나타내고 있다.

$$E_c = 0.03\omega^{1.5}\sqrt{f_{ck}} + 7.700(f_{ck} \geq 30\text{MPa}, w = 1,450 \sim 2,500\text{kg/m}^3) \quad (2)$$

표 4. 콘크리트배합

Specimen	W/C(%)	S/a (%)	Unit volume weight (kg/m <sup>3</sup> )						HRWRA (kg)	AE (g)
			W	C	C. A.		F. A.			
					Natural	Recycled	Natural	Recycled		
NN	33	44	189.1	580.5	851.4	0	661.7	0	4.4	22
RN					0	841.7	661.7	0		
RR30					0	841.7	463.2	184.8		
RR60					0	841.7	264.7	369.7		
RR					0	841.7	0	616.1		

표 5. 탄성계수 측정값과 추정값의 비교

Specimen	$f_{ck}$		E, by test		E, by KCI		E, from eq. (3)	
	(MPa)	Reduction (%)	(MPa)	Reduction (%)	(MPa)	Reduction (%)	(MPa)	Reduction (%)
NN	45.0	-	24,185	-	29,836	-	29897	-
RN	43.3	3.8%	20,440	15.5%	29,417	1.4%	28058	6.2%
RR30	42.8	4.8%	17,981	25.7%	29,292	1.8%	26902	10.0%
RR60	41.7	7.3%	20,000	17.3%	28,870	3.2%	25485	14.8%
RR	39.1	13.1%	16,516	31.7%	28,325	5.1%	23881	20.1%

여기서,  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수(MPa),  $w$ 는 콘크리트의 단위용적질량( $kg/m^3$ )이며,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도 (MPa)이다.

본 실험에서 일반골재콘크리트의 경우 측정값과 추정값은 약 5GPa 정도의 차이가 발생하였다. 이는 탄성계수 추정식이 회귀분석을 이용하여 실제와 근접한 값을 추정할 수 있도록 제안한 것으로 본 실험의 결과와 다소 차이가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 순환골재콘크리트의 경우 치환율이 증가할수록 압축강도에 따른 탄성계수의 감소율은 일반골재 콘크리트의 강도에 따른 감소율에 비하여 크게 나타나며, 또한 현행 콘크리트 구조설계기준의 추정식은 이러한 현상을 반영하지 못하고 있다. 그림 4에서와 같이 현행 콘크리트 구조설계기준의 탄성계수 추정식의 기울기는 순환골재를 사용한 경우와 다른 양상을 나타나고있으며, 따라서 일반골재 콘크리트의 탄성계수 추정식을 순환골재콘크리트에 적용하는 것은 부적절한 것으로 판단되어 다음과 같이 순환골재콘크리트에 적용할 수 있는 수정탄성계수 추정식을 제안하였다.

$$E_{cr} = 0.03 \omega^{.5} \sqrt{f_{ckr}} + (1,700 - 14.2G - 10.9S) \quad (3)$$

$$(f_{ck} \geq 30MPa, w = 1,450 \sim 2,500kg/m^3)$$

여기서,  $E_{cr}$ 은 순환골재를 함유한 콘크리트의 추정탄성계수 (MPa),  $w$ 는 콘크리트 단위용적질량( $kg/m^3$ ),  $f_{ckr}$ 은 순환골재 콘크리트의 추정압축강도 또는 순환골재콘크리트의 압축강도 (MPa),  $G$ 는 순환골재의 치환율(%)이며,  $S$ 는 순환골재의 치환율(%)이다.

상기 식에서 일반골재를 사용한 경우의 탄성계수 값을 현행 구조설계기준의 값과 같다고 가정하였으며, 일반콘크리트의 탄성계수 추정식의 상수항에 골재의 치환율에 대한 계수항을 추가하여 순환골재콘크리트의 순환골재 치환율에 따른 탄성계수 감소량을 고려하였다. 또한, 그 결과 그림 4와 같이 치환율이 증가함에 따라 순환골재콘크리트의 탄성계수 감소량이 반영되는 것을 확인할 수 있었다.

압축강도 추정식과 마찬가지로 본 연구의 실험결과로부터 얻어진 순환골재콘크리트의 탄성계수 추정식을 기존의 관련

연구논문들에(김진철 등, 2004; 신재인 등, 2001; 이명규 등, 2003; 정용일 등, 2002) 주어진 자료들을 이용하여 식 (3)을 비교·검토하여 그 결과를 그림 5에 도식적으로 나타내었다. 그림 5에서 실선은 본 논문에서 제시하는 식 (3)을 이용한 추정식 및 실험값에 의해 작도된 회귀분석 선이며, 점선은 현행 콘크리트 구조설계기준에 제시된 일반골재콘크리트(압축강도 30 MPa 이상)의 탄성계수 추정식을 순환골재 콘크리트에 적용하였을 경우이다. 그림 5로부터 본 연구에서 제시하는 추정식은 순환골재콘크리트의 탄성계수를 비교적 정확하게 추정하는 것으로 나타났으며, 이에 비하여 현행 콘크리트 구조설계기준의 식은 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도 및 단위용적질량의 감소를 고려하였음에도 불구하고 이를 활용하기에는 그 오차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 즉 현행 콘크리트 구조설계기준에 의해 순환골재콘크리트의 탄성계수를 추정할 경우 실제보다 크게 산출될 수 있으며 실제 탄성계수가 낮아질수록, 또는 확대 해석하면, 순환골재콘크리트의 압축강도가 낮아지거나 순환골재의 치환율이 높아질수록, 그 오차는 더욱 크게 발생할 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결 론

최근 생산되는 고도처리 순환골재를 사용한 콘크리트는 일반콘크리트와는 여러 특성면에서 다소 차이가 있으며, 본 연구에서는 이러한 순환골재콘크리트의 구조부재 적용을 위해, 콘크리트구조물의 설계나 해석 시 가장 기초적으로 사용되는 물성치인 압축강도와 탄성계수의 특성을 연구하였다. 동일한 배합 타설 시에 순환골재콘크리트는 일반콘크리트에 비해 슬럼프가 크며 이는 상대적으로 순환골재의 둥근 입형에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 순환골재콘크리트의 순환골재 치환율은 공기량의 변화에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. 그러나 순환골재의 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하였는데, 굵은골재만을 치환하였을 경우 약 4%정도 굵은 골재 및 잔골재 전량을 치환한 경우 약 13% 정도의 강도감소현상이 관찰되었다. 이러한 특성을 기초로 순환골재의 압축강도를 순환골재 치환율에 따라 추정할 수 있는 추정식을 제안하였으며, 기존의 자료들과 비교 검토한 결과 매우 정확하게 추정되었다. 또한, 순환골재콘크리트의 탄성계수를 측정된 결과, 압축강도와 비슷한 양상을 나타내었다. 하지만 순환골재의 치환율에 따른 탄성계수의 감소폭은 굵은골재만을 치환하였을 경우에는 약 15%정도 감소되었으며, 굵은골재 및 잔골재 전량을 순환골재로 치환한 경우에는 약 31% 정도의 감소가 관찰되었다. 이러한 현상을 바탕으로 순환골재의 치환율에 따라 탄성계수를 추정할 수 있는 추정식을 제안하였으며, 제안된 탄성계수식은 기존의 자료들과 비교한 결과 실측치와 추정치가 상당히 근사함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 비교적 간단하게 치환율에 따라 추정할 수 있는 추정식을 제안하였으며, 이러한 추정식들은 순환골재를 사용한 콘크리트 구조부재의 설계나 해석시에 충분히 활용 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 더욱 많은 실험자료들이 축적된다면, 이러한 추정식들은 공학적으로 높은 신뢰성을 가질 수

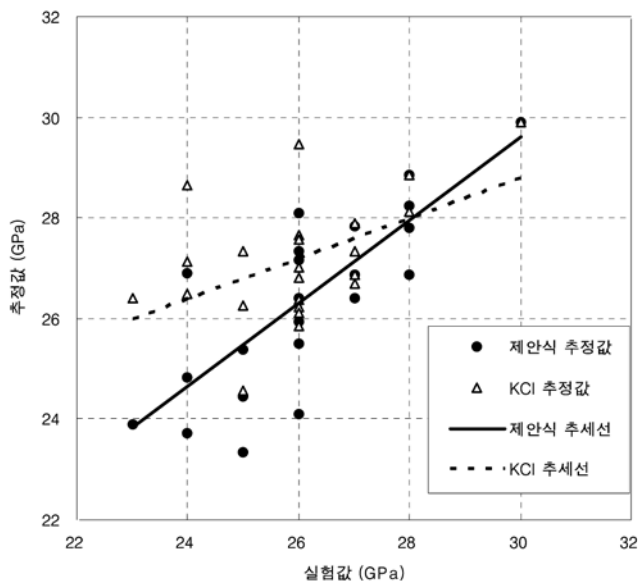


그림 5. 탄성계수 추정값과 기존 실험값의 비교

있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원에서 지원하는 폐콘크리트의 고부가가치 자원화기술개발 및 한양대학교에서 지원하는 폐콘크리트의 고부가가치 자원화를 위한 기초연구의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

건설교통부(2004) 순환골재 품질기준(안). pp. 2-27.

김재성, 권인표, 강석표, 홍성윤(2003) 재생골재를 사용한 콘크리트의 기초물성에 관한 실험적 연구. **한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집**, 제15권, 2호, pp. 116-119.

김진철, 양성철, 조운호, 김남호(2004) 재생골재 콘크리트의 강도 및 파괴특성 실험. **한국도로학회 논문집**, 한국도로학회 제6권, 1호, pp. 37-45.

김호수, 백철우, 반성수, 최성우, 류득현(2003) 재생 골재를 사용한 재생 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구. **한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집**, 제15권, 1호, pp. 25-30.

남상일(1995) 재생골재콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 충남대학교, pp. 35-40.

신재인, 류택은, 양승규, 구봉근(2001) 플라이애쉬를 혼합한 재생골재 콘크리트의 내구성. **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제13권, 1호, pp. 23-29.

심중우, 이문환, 이세현, 전현규(2004) 재생골재 생산방식의 차이에 따른 재생 골재의 품질특성에 관한 비교연구. **대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집**, 2004, pp. 195-198.

이강우, 이종호, 강석표, 최세진, 최희용, 김무한(2001) 폐전주 재생골재의 기초물성 및 대체율에 따른 고강도영역 재생골재 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구. **한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집**, 제13권, 1호, pp. 495-500.

이명규, 윤건호(1999) 재생골재 치환률에 따른 콘크리트의 역학적 특성. **한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집**, 제11권,

2호, pp. 119-122.

이명규, 정상화, 윤건호(2003) 재생콘크리트의 내구성에 관한 실험연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권, 1A호, pp. 85-93.

이세현, 서치호(2001) 고강도 영역의 재생골재 콘크리트의 물리적 특성. **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제13권, 6호, pp. 575-583.

이희철(2004) 프리캐스트 구조체를 위한 플라이애쉬 혼입 재생골재콘크리트의 성능평가. 석사학위논문, 한양대학교, pp. 34-54.

정지용, 강철, 최선미, 곽은구, 김진만(2004a) 재생골재의 품질에 따른 콘크리트의 공학적 특성. **한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집**, 제16권, 2호, pp. 197-200.

정지용, 곽은구, 김진만(2004b) 고품질 재생골재를 사용한 콘크리트의 특성. **한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집**, 제16권, 1호, pp. 384-387.

정용일, 양은익, 정기철, 김학모, 최중철(2002) 재생골재 대체가 콘크리트 성능에 미치는 영향. **한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집**, 제14권, 2호, pp. 233-238.

조동영, 배상호, 박길현(2003) 재생골재 콘크리트의 혼합률에 따른 콘크리트 압축강도. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, pp. 2922-2926.

한국레미콘공업협회(2004) 골재수급 불안정의 해소방안. pp. 1-43.

Hansen, T.C. (1992) Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Report of Technical Committee 37-DRC, *Demolition and Reuse of Concrete*, RILEM, Routledge, 1992.

Mukai, T. et al. (1979) Study on Reuse of Waste Concrete for Aggregate of Concrete. *Proc. Energy and Resources Conservation in Concrete Technology*, Japan-US Cooperative Science Programme, San Francisco, US.

Rashwan, M.S. and Abourizk, S. (1997) The Properties of Recycled Concrete, *Concrete International, ACI*, Vol. 19, No. 7, pp. 58-60.

Salem, R.M., Burdette, E.G., and Jackson, N.M. (2003) Resistance to Freezing and Thawing of Recycled Aggregate Concrete. *ACI Materials Journal, ACI*, Vol. 100, No. 3, pp. 216-221.

(접수일:2005.8.12/심사일:2005.10.20/심사완료일:2005.11.17)