

# 복합이론에 의한 순환골재 콘크리트의 탄성계수 평가에 관한 기초적 연구

## A Basic Study for evaluation on the Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete by using Composite Model

김 현 옥      김 지 윤      김 완 기      박 원 준\*  
 Kim, Hyun-Wook   Kim, Ji-Yoon,   Kim, Wan-ki   Park, Won-Jun

### Abstract

The elastic modulus of recycled aggregate concrete (RAC) can be evaluated by using composite models with experiment. In this study, Hashin's composite model was adapted to evaluate elastic modulus considering physical properties of recycled coarse aggregate (RCA) that mortar is attached. Elastic modulus testes for cement paste, mortar and recycled coarse aggregate concrete were carried out considering W/C and recycled coarse aggregate content rate. As a result, the elastic modulus of RAC was evaluated comparing with both experiment results and the existing estimation formula. Those can be used for further studies as a preliminary data.

키 워 드 : 탄성계수, 복합이론, 굵은 순환골재, 순환골재 콘크리트  
 Keywords : elastic modulus, composite model, recycled coarse aggregate, recycled aggregate concrete

### 1. 서 론

현재 순환골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수에 관한 연구는 순환골재를 비롯한 재료 및 배합조건에 따른 관계에 관한 연구가 대부분인 실정이다. 따라서 물리적인 근거는 명시되지 않고 있으며, 통계적 또는 소정의 성능을 만족시키는 콘크리트 배합연구가 주를 이루고 있다. 식(1)과 같이 순환골재 콘크리트의 탄성계수 추정식<sup>1)</sup>은 국내외적으로 다수 제안된 콘크리트 압축강도와 단위용적질량을 지표로 하는 실험적 추정식과 동일하게 제안되어 있다.

$$E = R_1 \times R_2 \times 24 \times \left(\frac{\sigma}{30}\right)^{0.5} \times \left(\frac{\gamma}{2.2}\right)^{1.2} \quad (1)$$

- $E$  : 탄성계수 (GPa)
- $\sigma$  : 압축강도 (MPa)
- $\gamma$  : 단위용적질량 ( $t/m^3$ )
- $R_1$  : 순환골재 종류에 따라 정해지는 보정계수  
1.05(고품질 순환골재), 1.0(중·저품질 순환골재)
- $R_2$  : 순환골재 치환율에 따라 정해지는 보정계수  
1.1(치환율 30% 이하), 0.95(치환율 50% 이상)

한편, 2종류 이상의 소재로 구성된 복합체에 대해 각 소재의 함유량(체적)과 탄성계수에 근거하여 복합체의 탄성계수를 추정하는 수법(이하, 복합모델)은 물리적으로 평가하는 수법으로 잘 알려져 순환골재를 활용한 콘크리트 탄성계수 평가에 물리적인 근

거를 마련해줄 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 저품질의 순환조골재를 사용한 콘크리트를 대상으로 식(1)에 의한 추정값과 실험값을 비교하고, Hashin<sup>2)</sup>의 복합이론에 근거하여 골재 영향을 분석하고 이를 통해 후속 연구방향을 제안하고자 한다.

### 2. 순환골재 콘크리트의 탄성계수 평가

#### 2.1 복합모델에 의한 이론적 평가

적용된 Hashin<sup>2)</sup>모델은 다음과 같이 콘크리트를 구성하는 골재 및 모르타르의 체적과 각 탄성계수로 구성된다.

$$E_c = E_m \frac{[V_m E_m + (1 + V_{ca}) E_{ca}]}{[(1 + V_{ca}) E_m + V_m E_a]} \quad (2)$$

$E_c, E_{ca}, E_m$ : 콘크리트, 조골재, 모르타르의 탄성계수  
 $V_{ca}, V_m$ : 조골재, 모르타르의 상대용적 ( $V_m + V_{ca} = 1$ )

#### 2.2 실험적 평가

식(1)에 의한 추정값과 비교하기 위하여 W/C 40%, 50%의 콘크리트를 대상으로 압축강도 및 탄성계수 시험을 실시하였다. 단위수량을 고정하여 순환조골재의 치환율을 0, 50%, 100%로 설정하였고 실험을 위해 비중 3.15의 OPC를 사용하였으며 실험에 사용된 순환조골재의 물리적 성질은 표 1과 같다. 시험체는 10cm×20cm 원주공시체로 각 수준별 3개씩 제작하였고 공기량 4.5% 및 슬럼프 150~180mm를 목표로 실험에 사용된 콘크리트 배합은 표 2와 같다.

\* 한양대학교 ERICA, 친환경건축연구센터, 공학박사  
 이 논문은 2012년도 정부재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20120000723, No. No. 2012044430)

표1. 사용된 순환골재의 물리적 성질

잔골재		굵은골재		순환조골재	
흡수율(%)	밀도	흡수율(%)	밀도	흡수율(%)	밀도
1.3	2.58	1.21	2.72	6.78	2.34

표 2. 배합표(용적배합(ℓ/m³))

구분	W/C	물	시멘트	잔골재	굵은골재 (순환골재)
C40	0.4	183	145	307	320
C40-R50		183	145	307	160(160)
C40-R100		183	145	307	(320)
C40	0.5	183	116	321	334
C40-R50		183	116	321	167(167)
C40-R100		183	116	321	(334)

2.3 통계적 추정식에 의한 평가

2.2의 실험을 통해 얻어낸 압축강도 및 단위용적질량을 식(1)에 적용하여 표 3과 같이 정리한다.

표 3. 실험결과

구분	R1	R2	Fc (MPa)	γ (kg/m³)	Ec' (GPa)
C40	-	-	39.00	2.35	-
C40-R50	1.0	0.95	34.47	2.34	26.36
C40-R100	1.0	0.95	26.00	2.29	22.27
C50	-	-	34.00	2.30	-
C50-R50	1.0	0.95	34.09	2.27	25.23
C50-R100	1.0	0.95	31.00	2.26	23.89

3. 결과 및 분석

저품질의 순환조골재를 사용한 콘크리트를 대상으로 식(1)에 의한 추정값과 실험값을 비교하면 표 4와 같고, 물시멘트비의 영향이 확인되었다.

표 4. 실험결과

구분	실험값 Ec (GPa)	추정값 Ec' (GPa)	Ec/Ec' (%)
C40	20.00	-	-
C40-R50	20.00	26.36	75.9
C40-R100	17.00	22.27	76.3
C50	25.40	-	-
C50-R50	23.60	25.23	93.5
C50-R100	22.00	23.89	92.1

한편, 배합상의 영향 외에 순환골재의 영향을 분석하기 위해서는 골재의 탄성계수를 확인할 필요가 있으며, 이는 앞선 식(2)를 식(3)과 같이 변형하여 순환조골재의 탄성계수(Eca)를 추정할 수 있다. 이 경우 Eca는 간접적으로 구한 탄성계수이므로 원골재의 탄성계수와 구별된 상대적인 탄성계수이다.

$$Ea = Em \frac{[VmEm - (1 + Va)Ec]}{[VmEc - (1 + Va)Em]} \quad (3)$$

본 연구에서는 추가적인 모르타르 탄성계수를 측정하였고, 식(3)을 이용하여 사용된 순환조골재의 탄성계수(Eca)를 추정하였다. 실험 결과를 표 5에 나타낸다.

표 5. 실험결과

구분	Em (GPa)	Eca (GPa)	Ec (GPa)	Ec' (GPa)
C40	13.80	47.19	20.00	32.56
C40-R50		47.19	20.00	26.36
C40-R100		26.20	17.00	22.27
C50	18.00	52.05	25.40	29.66
C50-R50		40.40	23.60	25.23
C50-R100		32.35	22.00	23.89

물시멘트비와 순환골재 치환율의 변화는 골재가 차지하는 탄성계수에 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다. 골재 치환율이 50%까지는 골재의 탄성계수가 발현되었으나 100%치환의 경우에는 골재의 탄성계수는 매우 작게 나타났고, 이 경우의 콘크리트의 탄성계수는 배합의 영향을 받는 것으로 판단된다. 이를 통해 사용된 저품질의 순환골재의 적정사용 범위(물시멘트비와 치환율)를 간단한 실험으로서 추정할 수 있었다. 한편, 본 연구에서는 순환골재와 모르타르와의 경계면에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에, 동일한 물시멘트비에서 순환골재에 일반적으로 적용할 수 있는 보정방안에 대한 연구가 필요하다<sup>3)</sup>.

4. 결 론

본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수에 미치는 영향을 추정식과 실험에 의한 평가를 통하여 확인하였다. 배합상의 영향과 함께 순환골재의 영향을 복합모델을 이용하여 실험적으로 평가하였고, 순환조골재의 탄성계수의 영향을 확인하였다. 향후 물시멘트비와 순환골재 치환율에 따른 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박원준, 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 관계에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제28권 pp.109~116, 2012
2. C. Kiyohara, et. al Study on equation for predicting elastic modulus of concrete based on the theory composite material, Journal of structural and construction engineering, Transactions of AIJ (576), pp.7~14 (in Japanese), 2004
3. Hashin, The Elastic Modulus of Hetero-homogeneous Materials, J. of App. Mech, Vol.29, No.1, pp.143~150, 1962