

# 조강시멘트와 순환골재를 적용한 콘크리트의 증기양생조건별 압축강도 특성

## Compressive Strength Properties of Concrete Using High Early Strength Cement and Recycled Aggregate with Steam Curing Conditions

김용재<sup>1</sup> · 김승원<sup>1</sup> · 박철우<sup>1\*</sup> · 심종성<sup>2</sup>

Yong-Jae Kim<sup>1</sup> · Seung-Won Kim<sup>1</sup> · Cheol-Woo Park<sup>1\*</sup> · Jong-Sung Sim<sup>2</sup>

(Received March 15, 2016 / Revised March 25, 2016 / Accepted March 25, 2016)

Recycled aggregate is a valuable resource in Korea in lack of natural aggregate. Government recognizes the importance and suggests various policies enhancing its use for higher value-added application. Most of recycled aggregate produced currently in Korea, however, is applied for low value-added uses such as embankment, reclamation, etc. Its higher valued application such as for structural concrete is very limited. Although domestic manufacturing technology of recycled aggregate is at the world level, recycled aggregate is not applied for structural concrete. Primary reasons for the limited use of the recycled aggregate include bonded mortar and cracks occurred during crushing and hence it is very difficult to predict and control the quality of recycled aggregate concrete. This research intended to grasp combined characteristics of recycled aggregate, high early strength cement, maximum temperature and time duration of steam curing and then, analyze the effects of factors. Also, it suggested the method to improve field applicability of recycled aggregate concrete.

**키워드** : 순환골재, 조강시멘트, 증기양생, 프리캐스트 콘크리트

**Keywords** : Recycled aggregate, High early strength cement, Steam curing, Precast concrete

### 1. 서론

2014년 기준 국내 천연골재자원의 부존량은 약 263억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>이며, 이중 개발이 가능한 골재자원은 약 146억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>로 추산되고 있다. 최근 골재소비량이 연간 약 21억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>임을 고려할 때 약 70년내 국내 천연골재자원은 모두 고갈될 수 있으며 향후 건설투자액이 증가될 경우 천연골재의 고갈 시기는 더욱 앞당겨질 것으로 예상되고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2014).

천연골재의 대체골재로 활용이 가능한 순환골재는 폐콘크리트에서 추출이 가능하며, 폐콘크리트는 노후 구조물의 해체증가 등으로 인해 해마다 그 발생량이 증가되는 추세를 보이고 있다. 따라서 관련 부처에서는 순환골재 품질기준제정, 순환골재 사용용도 및 의무사용량에 대한 고시제정 및 순환골재 품질인증 심사기준 완화 등을 통해 순환골재의 활용을 적극적으로 권장하고 있으며

향후 순환골재의 현장적용률을 약 45%까지 증가시키기 위한 계획을 수립하고 있다(Ministry of Environment 2011).

그러나 현재 순환골재의 현장적용률은 천연골재 수요량의 약 13%이며, 대부분 도로성토, 매립 등 저부가가치의 용도로만 활용되고 있으며 최근 순환골재를 사용한 매립지의 고농도 알칼리성 pH 유출수 등이 환경적 문제로 부각되어 도로배수층에는 pH 9.8 이상의 순환골재 적용이 금지되는 등 추후 도로용 재료로의 활용 증가는 높지 않을 것으로 예상된다. 순환골재의 고부가가치 활용률을 높이고 적용범위를 확대하기 위해서는 순환골재를 콘크리트에 혼입하여 사용하여야 하나 순환골재콘크리트는 순환골재의 부착모르타르, 골재 균열 등에 의해 작업성, 강도, 내구성이 일반 콘크리트보다 저하되는 것으로 알려져 있어 현장에서는 순환골재 콘크리트의 품질관리가 어렵고 관련자료가 미흡하다는 이유로 적용률을 높이지 못하고 있다(Nelson et al. 2004; Martin-Morales

\* Corresponding author E-mail: tigerpark@kangwon.ac.kr

<sup>1</sup>강원대학교 건설시스템공학과(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do, 25913, Korea)

<sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과(Department of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

et al. 2011; Mas et al. 2012; Ismail et al. 2012). 이에 반해 프리캐스트 콘크리트는 공장제작방식이므로 현장배합 콘크리트에 비해 품질관리가 양호하며 주로 비구조용 제품에 사용되므로 순환골재의 적용가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Soutsos et al. 2011).

프리캐스트 콘크리트는 대부분 공장제품이므로 거푸집 제거시 기 결정을 위한 탈형강도, 품질기준 만족을 위한 압축강도, 공장회전율을 높이기 위한 증기양생시간이 주요 요소이므로 순환골재를 프리캐스트 콘크리트에 적용하기 위해서는 상기와 같은 특성의 검토가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 순환골재를 프리캐스트 콘크리트에 적용함에 있어 탈형강도 및 재령 28일 강도의 확보를 위해 조강시멘트를 적용하고, 공장회전율 증가를 위해 다양한 증기양생조건을 변수로 설정하였으며 이에 대한 압축강도특성을 분석하여 순환골재 콘크리트의 실용화를 위한 기초자료를 제공하고 자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험변수

순환골재의 활용성을 높이기 위해서는 시험체의 순환골재 및 순환골재 치환율을 100%로 설정하여야 하나 순환골재 전량 치환시 콘크리트의 품질저하가 큰 것으로 알려져 있으므로 본 실험에서는 관련 문헌(Sim et al. 2006; Kim et al. 2013)의 실험결과에 따라 순환골재의 치환율은 60%, 순환골재의 치환율은 40%로 설정하였다. 사용시멘트는 일반적으로 사용되는 1종 보통시멘트와 3종 조강시멘트로 구분하였으며, 배합강도는 비구조용 프리캐스트 콘크리트와 구조용 프리캐스트 콘크리트에 모두 적용이 가능한 30MPa로 설정하였다. 양생조건은 현재 프리캐스트 공장에서 적용하는 증기양생방식과 동일한 방식(최고온도 60도, 최고온도 지속시간 4시간)을 기준으로 하였으며 증기양생 최고온도 및 최고온도 지속시간은 다음 Table 1과 같이 조절하였다. 증기양생 온도 상승률 및 하강률은 관련 기준(ACI 308R-01)에서 제시한 기준(±20 /hr)을 적용하였다. 프리캐스트 생산방식의 특성상 탈형강도 확보가 중요하므로 공시체의 압축강도는 재령 1일부터 측정하였으며, 이후 재령 7, 14, 28일에 각각 측정하였다.

### 2.2 사용재료

시멘트는 S사에서 생산된 1종 보통포틀랜드시멘트와 3종 조강포틀랜드시멘트를 사용하였다. 일반골재는 충남 공주산 부순자갈과 부순골재를 사용하였으며, 순환골재는 국내 사에서 생산된

Table 1. Experiment variable

Variable	C. Type*	Aggregate**				Type	Curing		
		Coarse		Sand			M.T.*** (°C)	T.D.**** (hr)	
		N	R	N	R				
ON-60-4	O	100%	0%	100%	0%		60	4	
HN-50-0	H	100%	0%	100%	0%	Steam	50	0	
HN-50-1								1	
HN-50-2								2	
HN-60-0							0		
HN-60-1							1		
HN-60-2							2		
HN-70-0		70	0						
HN-70-1			1						
HN-70-2			2						
HR-50-0		40%	60%	60%	40%			50	0
HR-50-1									1
HR-50-2									2
HR-60-0								60	0
HR-60-1									1
HR-60-2	2								
HR-70-0	70					0			
HR-70-1						1			
HR-70-2		2							

\* C. Type : Cement type

(O : Ordinary portland cement, H : High early strength cement)

\*\* Aggregate : Aggregate type

(N : Natural aggregate, R : Recycled aggregate)

\*\*\* M.T. : Maximum temperature of steam curing

\*\*\*\* T.D. : Time duration of maximum temperature

고품질 순환골재와 순환골재를 사용하였다. 혼화제는 국내 D사에서 생산되는 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다. 배합에 사용된 재료의 특성 및 배합표는 다음 Table 2, Table 3 및 Fig. 1과 같다.

순환골재의 기본물성실험 결과, 순환골재는 콘크리트용 순환골재(KS F 2573) 기준에 적합한 입도, 밀도, 흡수율을 나타내는 것으로 확인되었으며 순환골재는 흡수율이 5.0%를 초과하는 것으로 측정되어 콘크리트용 순환골재의 흡수율 기준에는 만족하지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 본 연구는 순환골재의 프리캐스트 콘크리트 적용을 확대하기 연구이므로 별도의 처리없이 그대로 사용하였다.

### 2.3 실험방법

굳지않은 콘크리트의 물성은 슬럼프 및 공기량을 확인하였으며

슬럼프 시험은 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2421을 기준으로 측정하였다.

공시체의 양생은 Fig. 2와 같이 타설후 2시간동안 모든 공시체에 대해 전양생을 실시하였으며, 이후 +20 /hr로 양생온도를 상승시킨 후 각 변수별 최대온도 도달 및 지속시간 유지후 동일한 구배로 양생온도를 감소시켰다. 증기양생 종료후에는 기건양생을 실시하였으며 재령 1일에 탈형하여 KS F 2403에 명시된 습윤양생을 실시하였다.

제작된 공시체의 물리적 특성은 재령별 압축강도측정을 통해 분석하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405를 기준으로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 슬럼프 및 공기량

굳지않은 콘크리트의 물성 시험결과, Fig. 3과 같이 조강시멘트의 적용에 따라 슬럼프는 약간 증가되는 경향을 나타내었으나 그 증가량은 약 15mm 내외로 작은 것으로 확인되었으며, 조강시멘트의 적용에 따른 공기량의 변화도 거의 없는 것으로 측정되었다. 순환굵은골재 60%, 순환잔골재 40%의 적용에 따른 슬럼프 및 공기량의 변화를 측정한 결과 슬럼프는 일반골재 사용시와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 공기량은 약 0.7% 증가되는 경향을 나타내었다. 조강시멘트의 적용에 따른 슬럼프 증가는 조강시멘트와 일반시멘트의 분말도차에 의해 발생된 것으로 추정되나 그 차이가 작으므로 추후 현장적용시 작업성 변화에는 영향을 미치지

Table 2. Properties of aggregate

Aggregate	Max. size (mm)	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Absorption ratio(%)
Crushed coarse	25	2.69	0.91
Recycled coarse		2.54	2.16
Crushed fine	5	2.60	0.92
Recycled fine		2.44	5.17

Table 3. Mix proportions

Variable	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )							
			W	C	NS	NG	RS	RG	A	
ON-60-4	42	45	165	391	771	963	0	0	1.62	
HN series*			165	394	771	963	0	0		
HR series**			464	385	289	556				

\* ex. HN-OO-O(refer to the Table 1)

\*\* ex. HR-OO-O

않을 것으로 예상된다. 최근 생산되는 순환골재는 강자갈보다 쇠석의 함유량이 많으므로 입형이 일반쇄석과 유사하여 슬럼프의 변화가 거의 없었던 것으로 추정된다.

#### 3.2 압축강도

프리캐스트 콘크리트의 적용을 위해 재령 1일에 탈형강도를 측

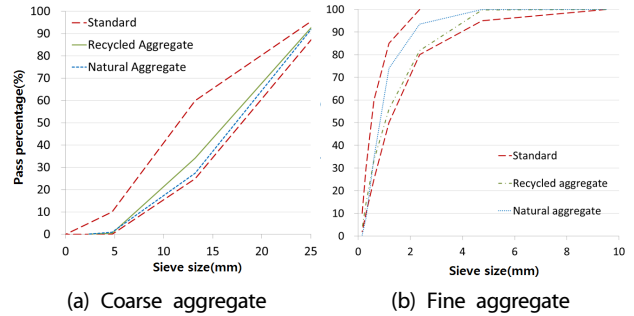
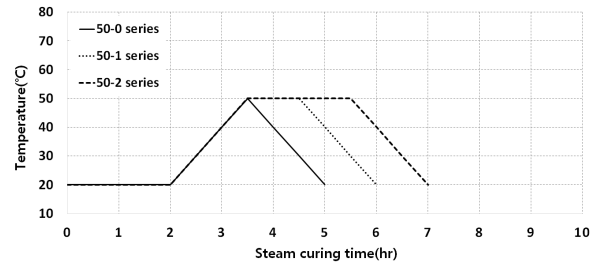
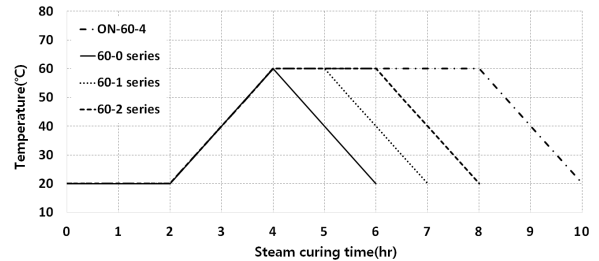


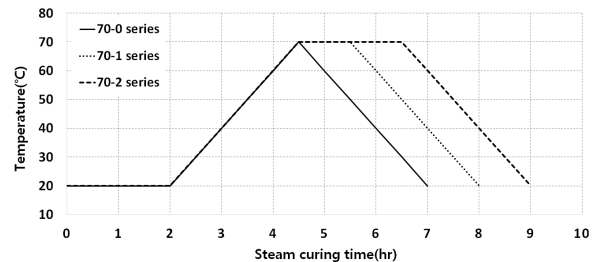
Fig. 1. Sieve analysis result



(a) Steam curing curve(maximum temperature 50°C)



(b) Steam curing curve(maximum temperature 60°C)



(c) Steam curing curve(maximum temperature 70°C)

Fig. 2. Steam curing method

정한 결과, Fig. 4와 같이 최고온도 지속시간이 증가될수록 압축강도는 증가되는 특성을 나타내었다. 일반적으로 공장제작성 제품표

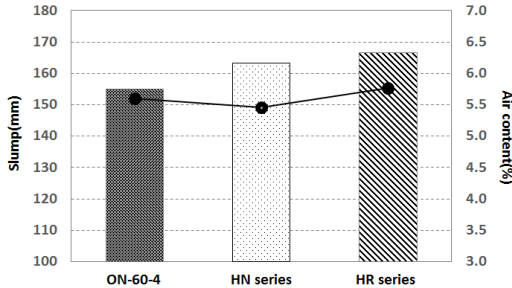
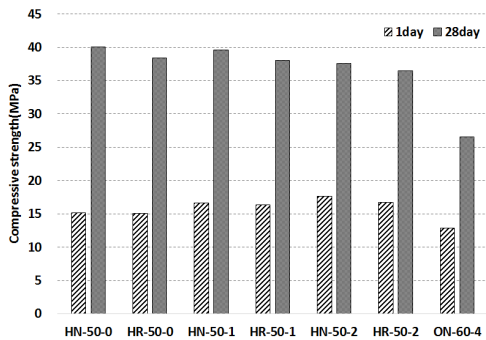
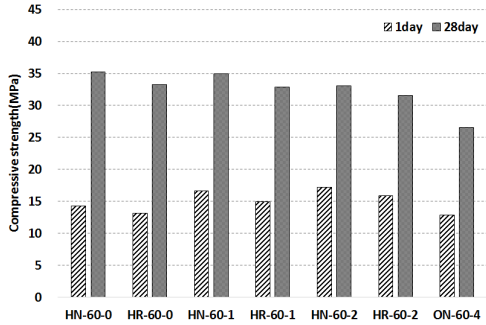


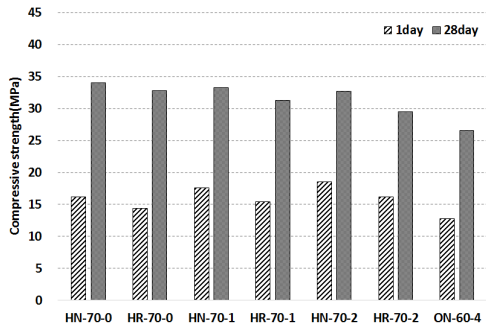
Fig. 3. Properties of fresh concrete



(a) Maximum temperature 50°C



(b) Maximum temperature 60°C



(c) Maximum temperature 70°C

Fig. 4. Compressive strength(50°C, 60°C, 70°C)

면의 손상방지를 위해 자체적으로 설정한 탈형강도는 약 12MPa이며, 이를 기준시 모든 배합이 탈형강도를 확보하는 것으로 확인되었다. 또한 최고온도 지속시간이 2시간인 경우에는 순환골재의 혼입 및 최고온도에 관계없이 압축강도가 약 15MPa이상 상회하는 것으로 확인되었다. 그러나 순환골재를 적용한 공시체는 일반콘크리트에 비해 약 2~3MPa의 강도감소현상이 발생하였으며, 이는 부착모르타르와 신모르타르의 부착 및 강도특성과 순환골재 자체의 균열에 의한 영향인 것으로 추정된다.

재령 28일 압축강도를 측정된 결과, Fig. 4에서와 같이 증기양생 최고온도가 약 50 인 공시체는 지속시간의 증가에 따라 최대 약 3MPa의 강도가 감소되었으며, 순환골재 사용시에는 강도감소 폭이 더 큰 것으로 확인되었다. 최고온도 약 60 및 70 인 공시체에서도 최고온도 지속시간 증가에 따른 압축강도 감소현상이 확인되어 증기양생 최고온도의 지속시간이 증가될수록 압축강도가 크게 저하되는 것으로 확인되었다.

순환골재의 적용에 따른 강도변화를 비교한 결과, 순환골재를 혼입한 시험체는 지속시간 증가에 따라 일반콘크리트에 비해 약 2~4MPa의 압축강도가 더 감소되는 것으로 확인되었으며, 증기양생 최고온도가 증가될수록 이러한 강도저하량은 더욱 증가되는 것으로 확인되었다. 이는 순환골재 부착모르타르와 신모르타르의 부착과 증기양생에 의한 열팽창계수차에 의한 것으로 추정되나 정량적 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5에서와 같이 동일한 지속시간 기준시, 증기양생 최대온도가 높을수록 압축강도는 크게 감소하는 것으로 확인되었다. 50-0 계열 공시체와 60-0계열 공시체의 압축강도는 큰 차이를 보인 반면 60-0계열 공시체와 70-0계열 공시체의 압축강도차는 비교적 작은 것으로 확인되었다. 이는 콘크리트의 성숙도 이론(Samuel et al, 2006)과 부합되는 결과로 판단되며 본 실험과 동일한 조건의 골재 및 조강시멘트 사용시 효율적 양생을 위한 최고온도는 약 60 이하인 것으로 판단된다.

순환골재 혼입, 저온도 증기양생 및 짧은 지속시간에도 불구하고 적정 압축강도가 발현된 이유는 최근 생산되는 조강시멘트는 과거 조강시멘트와 달리 준조강형태의 시멘트로 개선되어 알려진 바(Kim 2014)와 같은 장기강도 발현을 저하현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 과거 생산되던 조강시멘트는 보통시멘트에 비해 C<sub>3</sub>S함유량이 높아 조기강도의 발현율이 높고 수화열과 건조수축이 증가되며 1종 시멘트에 비해 장기강도가 감소되는 특성을 나타내었으나 최근 생산되는 준조강시멘트에는 C<sub>3</sub>S함량을 낮추고 C<sub>2</sub>S의 함유량을 높여 장기강도 발현을 유도한 것으로 추정된다(Kim 2014).

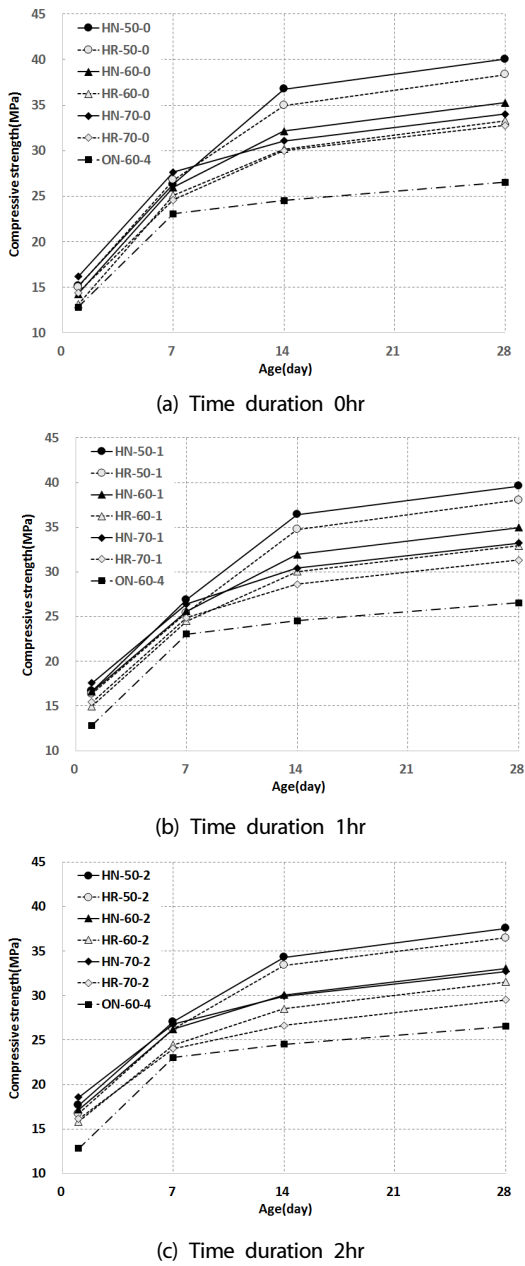


Fig. 5. Compressive strength(0hr, 1hr, 2hr)

#### 4. 결론

본 연구에서는 순환골재의 적용률 확대를 위해 프리캐스트 콘크리트의 적용을 목표로 조강시멘트와 증기양생조건에 따른 순환골재콘크리트의 압축강도특성을 분석하고자 하였다. 조강시멘트, 순환골재 적용, 증기양생 최고온도 및 지속시간의 변화에 따른 순환골재 콘크리트의 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 조강시멘트의 적용에 따라 슬럼프는 약간 증가되는 경향을 나타 내었으나 그 증가량은 약 15mm 내외로 작은 것으로 확인되었으며, 공기량의 변화도 거의 없는 것으로 확인되었다.
2. 순환골재의 적용에 따른 슬럼프 및 공기량의 변화를 측정할 결과 슬럼프는 일반골재 사용시와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 공기량은 약 0.7% 증가되어 현장적용시 순환골재의 적용이 작업성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.
3. 모든 배합에서 탈형강도는 약 12MPa을 초과하였으며, 최고온도 지속시간이 2시간인 경우에는 순환골재의 혼입 및 최고온도와 관계없이 약 15MPa이상 상회하는 것으로 확인되었다.
4. 재령 28일 압축강도를 측정된 결과, 최고온도 지속시간의 증가에 따라 최대 약 3MPa의 강도가 감소되었으며, 순환골재 사용 시에는 최대 3MPa이 더 감소하는 것으로 측정되었다.
5. 증기양생 최고온도 및 지속시간이 증가될수록 HR계열 시험체의 압축강도는 감소하였으나 ON-60-4 시험체보다 모두 높은 것으로 확인되어 조강시멘트 적용 및 증기양생이력 조절이 순환골재콘크리트의 품질 및 생산성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.
6. 순환골재 혼입, 저온도 증기양생 및 짧은 지속시간에도 불구하고 적정 압축강도가 발현된 이유는 최근 개선된 조강시멘트는 C<sub>3</sub>S함량을 낮추고 C<sub>2</sub>S의 함유량과 분말도를 높였기 때문인 것으로 추정된다.
7. 조강시멘트의 적용, 증기양생이력의 조절을 통해 순환골재 사용에 따른 순환골재콘크리트의 강도저하현상을 보완할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 향후 구조용 순환골재콘크리트의 프리캐스트화도 가능할 것으로 예상된다.
8. 그러나 어도, 어소블럭 등 친수성 프리캐스트 제품 및 지중 프리캐스트 제품에 대한 순환골재 적용을 위해서는 내구성, 환경유해성 등에 대한 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(15RDRP-B066780-03)에 의해 수행되었습니다.

#### References

ACI Committee 308. (2001). Guide to Curing Concrete (ACI 308R-01), American Concrete Institute.  
 Ismail, S., Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated

- recycled concrete aggregate(RCA) for structural applications, *Construction and Building Materials*, **44(1)**, 464–476.
- Kim, E., Sung, B., Lee, H., Kim, Y., Park, C., Sim, J. (2014). Compressive strength characteristics of high early strength concrete mixed with recycled aggregate, *Korean Recycled Construction Resource Institute*, **14(1)**, 217–218 [in Korean].
- Kim, S. (2014). Durability Characteristics of High Early Strength Concrete Using GGBS, Master's Thesis, Hanyang University, Korea.
- Kim, Y., Lee, H., Park, C., Sim, J. (2013). Performance evaluation of recycled aggregate concrete block reinforced with GFRP, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **14(12)**, 6565–6574 [in Korean].
- Korean Ministry of Environment. (2011). Basic Plan for Recycling Construction Waste(2nd) [in Korean].
- Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2014). Basic Plan for Supply and Demand of Aggregate [in Korean].
- Martin-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the spanish structural concrete code EHE-08, *Construction and Building Materials*, **25(12)**, 742–748.
- Mas, B., Cladera, A., Olmo, T. D., Pitarch, F. (2012). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use, *Construction and Building Materials*, **27(1)**, 612–622.
- Nelson, S. C. (2004). High-Strength Structural Concrete with Recycled Aggregate, Ph. D Thesis, University of Southern Queensland, Australia.
- Samuel, A. W., Anton, K. S., Robert, W. B., Jeffery, M. N. (2006). Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength, Alabama Department of Transportation.
- Sim, J., Park, C., Park, S., Kim, Y. (2006). Characterization of compressive strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete with respect to replacement ratios, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **26(1)**, 213–218 [in Korean].
- Soutsos, M. N., Tang, K., Millard, S. G. (2011). Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase ii : concrete paving blocks, *Construction and Building Materials*, **25(7)**, 3131–3143.

### 조강시멘트와 순환골재를 적용한 콘크리트의 증기양생조건별 압축강도 특성

순환골재는 천연골재가 부족한 국내에서 매우 유용한 골재자원이며, 정부에서도 이러한 중요성을 인식하고 순환골재의 고부가가치 활용을 위한 다양한 정책을 제안하고 있다. 그러나 현재 국내에서 생산되는 순환골재는 대부분 성토, 매립 등 저부가가치의 용도로 활용되고 있으며 구조용 부재와 같은 고부가가치 활용은 아직 이루어지지 않고 있다. 국내 순환골재 생산기술은 세계적인 수준임에도 불구하고 순환골재콘크리트의 구조용 부재적용은 아직 이루어지지 않고 있으며 이는 순환골재의 표면에 부착된 부착모르타르와 순환골재의 생산과정에서 발생하는 균열로 인해 순환골재콘크리트의 품질을 예측하고 조절하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 순환골재콘크리트의 현장적용성 증진을 위한 일환으로 순환골재, 조강시멘트, 증기양생 최고온도 및 최고온도 지속시간이 순환골재콘크리트에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.