



탄산화 개질 순환 골재를 사용한 순환 골재 콘크리트의 성능 평가

하정수¹⁾ · 신진학¹⁾ · 정란¹⁾ · 김한식^{2)*}

¹⁾단국대학교 건축공학과 ²⁾삼성물산 건설부문 주거성능연구소

Performance Evaluation of Recycled Aggregate Concrete Made of Recycled Aggregate Modified by Carbonation

Jung-Soo Ha,¹⁾ Jin-Hak Shin,¹⁾ Lan Chung,¹⁾ and Han-Sic Kim^{2)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin 16890, Rep. of Korea

²⁾Residential Engineering Team, Samsung C&T Co. Ltd. Engineering & Construction Group, Yongin 17015, Rep. of Korea

ABSTRACT With the increase of decrepit facilities, construction waste increased to a certain level and now the increase is more or less stabilized. Yet construction waste still constitutes the largest portion of the overall wastes. Also, it is inevitable to spend a huge amount of the national budget due to the aggravating shortage of aggregate caused by prohibition on collection of natural aggregates as well as due to the damage to the land and environment caused by development of the sources of aggregates. As a countermeasure to the situation, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport promulgated the quality standard for recycled aggregate to manage the usage of recycled aggregate according to its quality. But use of recycled aggregate for the purpose of high added value still remains nominal. Therefore, this research aims to study the applicability of recycled aggregate concrete as structural concrete by evaluating the quality improvement effects and the performance of the recycled aggregate concrete including recycled fine aggregate and recycled coarse aggregate that have undergone carbonation for 4 days and 14 days respectively in the condition of 60% RH, 20% CO₂ and 20°C temperature, suggested for carbonation modifying from the advance research. The result shows carbonation modify contributed to quality improvement with 0.91% decrease in absorption rate for recycled fine aggregate and 0.7% decrease in absorption rate for recycled coarse aggregate. The physical properties and durability of the recycled aggregate made of aggregate modified by carbonation showed results similar to general concrete, which confirmed the possibility of applying the recycled aggregate made of recycled aggregate modified by carbonation to structural concrete.

Keywords : recycled aggregate, modified by carbonation, absorption, recycled aggregate concrete

1. 서 론

노후 시설물의 증가에 따라 건설폐기물이 일정 수준까지 증가한 이후, 현재는 어느 정도 안정화된 추세에 있지만, 아직까지도 전체폐기물 중에서 건설폐기물은 48.0%의 수준으로 가장 큰 비중을 차지하고 있다.¹⁾

섬진강 골재채취 영구금지 및 EEZ·웅진군 등 골재채취 논란으로 골재난이 심화되고 있으며, 골재공급원 개발을 위한 국토훼손 및 자연환경 파괴 등으로 환경복원에 막대한 국가예산 소요가 불가피한 실정이다. 또한, 전국 골재 부존량은 약 263억m³이며, 이 가운데 개발 가능량은 약 172억m³ 수준으로 평가되고 있다. 또한, 매년 허가 및

신고 채취로 공급되는 골재량이 약 2억m³ 수준이라는 점을 고려할 경우, 향후 70여 년간 채취가 가능할 것이라는 예측에 따라 대체 자원의 개발이 시급한 상황이다.^{2,3)}

이에 대한 해결 방안으로 국토교통부는 순환 골재의 효율적인 활용을 위하여 ‘건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률’을 제정하였으며, 콘크리트용 ‘순환 골재 품질기준’을 공포하여 순환 골재 품질에 따른 용도와 관리를 할 수 있도록 추진하고 있다.^{4,5)}

건설폐기물 총 발생량 중 약 65.1%가 순환 골재로 소비되고 있으며, 소비되고 있는 순환 골재의 용도는 성·복토용 및 도로공사용 등 부가가치가 낮은 용도로 84.3%가 사용되고 있고, 콘크리트 및 콘크리트 제품 제조용으로 약 11.0%, 아스팔트콘크리트 제조용으로 약 4.7% 사용되고 있어, 경제적 부가가치가 높은 용도로의 활용은 15.7%로 아직 저조한 실정이다.²⁾

순환 골재를 사용한 콘크리트는 일반 골재를 사용한 콘

*Corresponding author E-mail : hansic.kim1230@gmail.com

Received January 31, 2016, Revised May 11, 2016,

Accepted June 14, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

크리트에 비해 성능이 저하한다고 알려져 있다. 순환 골재를 사용한 콘크리트의 성능 저하는 순환 골재 부착 이질재(시멘트 페이스트 및 모르타르)의 양과 부착 이질재가 내포하는 공극의 양에 따라 좌우된다고 보고되고 있기 때문에, 순환 골재의 품질을 정하는 기준에 있어서 부착 이질재의 양 및 공극의 양과 관련이 깊은 흡수율을 품질 구분에 가장 큰 지표로 설정하고 있다.⁶⁾

순환 골재를 구조용 콘크리트에 적용하기 위해서는 부착 이질재가 적은 고품질의 순환 골재가 요구되기 때문에, 고품질의 순환 골재를 생산하기 위한 가열 및 기계마모법 등의 고도 처리방법이 제시되고 있으나, 많은 비용과 환경부하가 발생하여 적용이 어려운 현실이다. 따라서, 경제적이고 환경 친화적인 순환 골재의 품질 향상 기술에 대한 개발이 사회적으로 요구되고 있다.

Tangchirapat, Corinaldesi, Kou, Çakır는 순환 골재 콘크리트의 특성을 향상시킬 목적으로 왕겨 재, 플라야에서, 실리카폼, 고로슬래그미분말 및 메타카올린 등의 여러 종류의 혼화재료를 사용하였다.⁷⁻¹⁰⁾ 이러한 연구 결과로부터 혼화재료를 사용한 순환 골재 콘크리트의 성능개선에 효과가 있는 것을 확인하였다. 또한 Akça, Cartuxo는 폴리프로필렌 섬유 및 감수제를 사용하여 일부 순환 골재 콘크리트의 성능향상에 영향이 있는 것을 확인하였다.^{11,12)} 그러나, 언급된 방법들은 순환 골재 자체의 품질 개선이 아닌 첨가재료의 혼입에 의한 순환 골재 콘크리트의 품질을 개선하는 방법을 목적으로 하고 있다.

일반적으로 순환 골재의 품질 향상을 위해 사용되는 방법은 공극이 많고 노후화 된 부착 시멘트 페이스트와 모르타르에 초점을 맞추어 약한 표면을 강화하거나 제거하는 방법이 제시되고 있다. 그에 따라 순환 골재의 표면 강화를 위해 Katz, Cheng, 김남옥, 최희복, Zhang은 순환 골재를 실리카폼 용액, 콜로이드 실리카 용액 등에 함침하거나 규산나트륨의 가수분해 반응으로 생성되는 SiO₂를 통해 Ca(OH)₂를 결속시켜 표면을 강화시키는데 이용하였다.¹³⁻¹⁷⁾ 그 결과, 순환 골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트 및 모르타르를 강화할 수 있으며, 콘크리트의 특성 또한 향상됨을 확인하였다. 그러나, 고품질의 순환 골재 생산 단가가 여전히 높은 상황에서 기타 재료들을 통하여 순환 골재의 표면을 강화하는 기존의 방법들은 현실적으로 실용화에 어려움이 많을 것으로 사료된다.

탄산화 메커니즘에 대한 보고에 따르면 탄산화의 진행에 의해 식 (1)과 같이 시멘트계 재료의 주된 수화물 중 하나인 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘을 생성함에 따라 공극이 충전된다고 알려져 있다.^{18,19)} 이에 따라 저자의 선행연구에서는 지구온난화와 함께 주목되고 있는 이산화탄소를 역으로 이용하여, 순환 골재의 탄산화 개질 기술을 제안하고 있다.

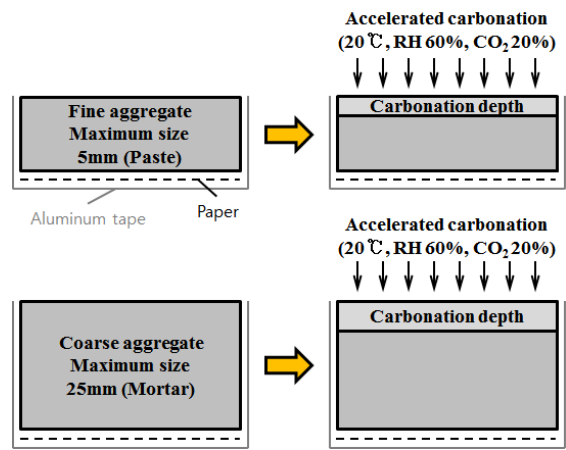
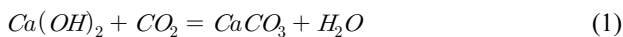


Fig. 1 Conceptual accelerated carbonation

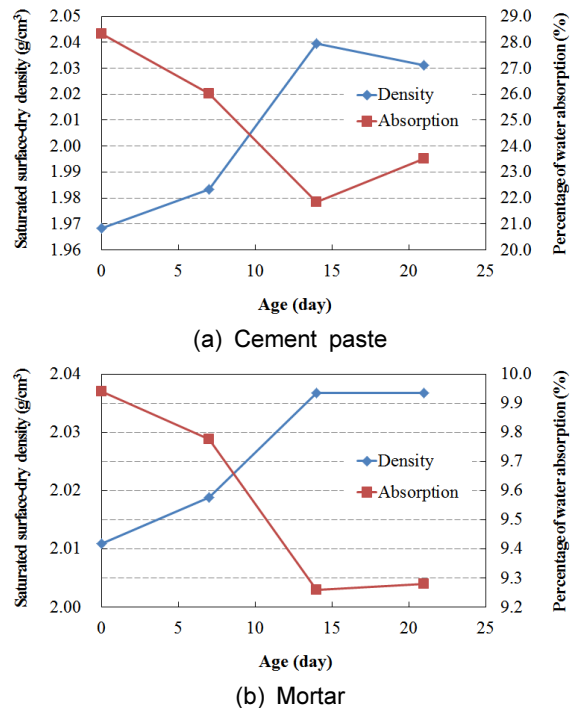


Fig. 2 Density and absorption according to the duration of carbonation

저자의 선행연구에서 순환 골재의 부착 이질재에 대한 모의시험체를 Fig. 1과 같이 제작하였고, 모의 시험체의 촉진 탄산화 개질을 수행한 결과 Fig. 2에서 보여주는 것과 탄산화 진행에 따라 밀도는 증가하고, 흡수율은 감소하는 결과를 얻었다.

콘크리트로의 적용을 위해서는 탄산화 개질 골재의 품질 개선 효과와 이를 이용한 콘크리트의 물리적 성능 개선 효과에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 저자가 선행연구에서 제시한 순환 골재의 탄산화 개질 방법에 의한 순환 골재의 품질 개선 효과 및 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 콘크리트의 성능 개선 효과에 대한 분석을 통하여, 구조용 콘크리트로의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 순환 골재의 탄산화 개질에 따른 품질 개선 효과

2.1 실험 계획 및 방법

순환 골재의 탄산화 개질에 따른 품질 개선 효과 검토를 위하여 저자가 선행연구에서 제시한 탄산화 개질 환경 조건인 20°C, RH 60%, CO₂ 20%에서 순환 잔골재는 4일, 순환 굵은 골재는 14일간 촉진 탄산화를 수행하였다. 또한, 시료 적층에 따른 촉진 탄산화의 차등을 방지하기 위하여 각 골재는 얇게 펴서 탄산화 개질을 수행하였다.

각각의 탄산화 개질 기간 동안 촉진 탄산화를 수행한 순환 골재와 탄산화를 수행하지 않은 순환 골재의 밀도 및 흡수율 시험은 KS F 2503, KS F 2504에 의거하여 수행하였다. 또한, 순환 골재의 경우 공극이 많아 밀도 및 흡수율 시험에 오차가 클 것으로 판단되어 각각 4회에 걸쳐 시험을 수행하였으며, 평균값으로부터의 오차가 큰 데이터를 제외하였다.

2.2 실험 결과

탄산화 개질을 수행하지 않은 순환 잔골재와 탄산화 개질을 수행한 순환 잔골재의 절건 밀도 및 흡수율을 Fig. 3에 나타내었고, 탄산화 개질을 수행하지 않은 순환 굵은 골재와 탄산화 개질을 수행한 순환 굵은 골재의 절건 밀도 및 흡수율을 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 이를 종합하여 Table 1에 나타내었다.

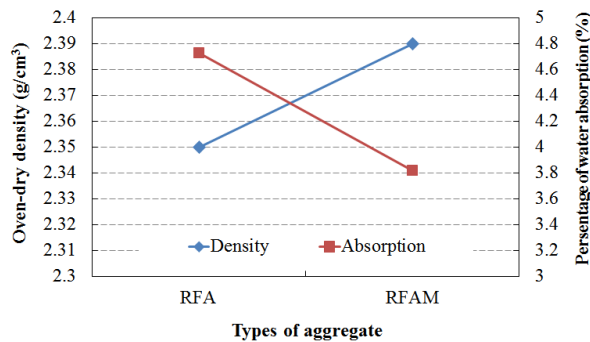


Fig. 3 Density and absorption of fine aggregate

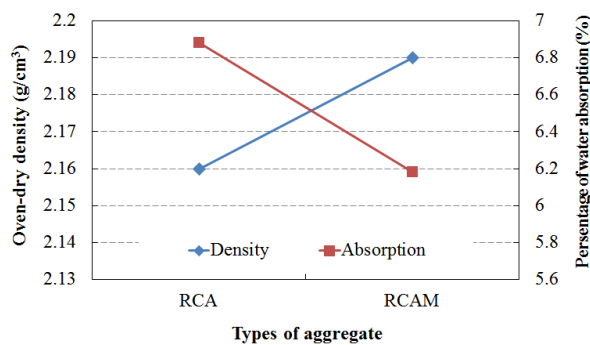


Fig. 4 Density and absorption of coarse aggregate

Table 1 Density and absorption of aggregate

Classification	Types	Oven-dry density (g/cm ³)	Absorption (%)
Fine aggregate	RFA ⁽¹⁾	2.35	4.73
	RFAM ⁽²⁾	2.39	3.82
Coarse aggregate	RCA ⁽³⁾	2.16	6.88
	RCAM ⁽⁴⁾	2.19	6.18

*⁽¹⁾Recycled fine aggregate, ⁽²⁾Recycled fine aggregate modified by carbonation, ⁽³⁾Recycled coarse aggregate, ⁽⁴⁾Recycled coarse aggregate modified by carbonation

순환 잔골재의 밀도는 탄산화 개질에 의해 2.35 g/cm³에서 2.39 g/cm³로 0.04 g/cm³가 증가하는 결과를 나타내었으며, 흡수율은 4.73%에서 3.82%로 0.91%가 감소하는 결과를 나타내었다. 이것은 저자의 선행 연구에서 순환 골재의 부착 이질재 모의 시험체를 제작하고, 촉진 탄산화 개질을 수행한 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 이 현상은 수산화칼슘의 비중이 2.24이고, 탄산칼슘(Calite)의 비중이 2.70이기 때문에, 탄산화 반응에 의해 생성되는 탄산칼슘의 증가로 밀도가 상승하였으며, 생성된 탄산칼슘이 공극 내에서 석출하여 시멘트 경화체를 밀실하게 함에 따라 흡수율이 감소된 것으로 판단된다.

순환 굵은 골재도 순환 잔골재와 동일한 메커니즘으로 탄산화 개질에 의해 밀도는 2.16 g/cm³에서 2.19 g/cm³로 0.03 g/cm³가 증가하는 결과를 나타내었으며, 흡수율은 6.88%에서 6.18%로 0.7% 감소하는 결과를 나타내었다.

3. 탄산화 개질 순환 골재를 이용한 순환 골재 콘크리트의 성능 개선 효과

3.1 실험 계획

탄산화 개질 순환 골재를 이용한 순환 골재 콘크리트의 성능 개선 효과 검토를 위한 실험계획을 Table 2에 나타내었고, 실험에 사용한 배합표를 Table 3에 나타내었다. 여기서, RFA-RCA는 촉진 탄산화를 수행하지 않은 순환 골재를 사용한 콘크리트이며, RFAM-RCAM은 저자의 선행연구에서 제시한 순환 골재 탄산화 개질 방법인 20°C, RH 60%, CO₂ 20%에서 순환 잔골재 4일, 순환 굵은 골재 14일간 탄산화를 수행한 순환 골재를 사용한 콘크리트이다. RFAM-RCAM의 성능 개선 효과를 평가하기 위하여, 결합재는 시멘트(Ordinary portland cement, OPC)만 사용하고, 단위수량을 173 kg/m³, W/C를 49.85%, s/a를 48.4%로 고정하여, 골재 종류에 따른 콘크리트의 특성을 검토하였다.

굳지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프는 골재 종류에 관계없이 모두 150±20 mm로 설정하고, 천연 골재를 사용한 콘크리트의 목표공기량은 KS F 4009에 의거하여 4.5±1.5%로 설정하고, 순환 골재와 탄산화 개질 순환 골재를 사용

Table 2 Design of experiment

Factors		Levels	
Mixture	Aggregate type	Natural aggregate	NFA, NCA
		Recycled aggregate	RFA, RCA
		Recycled aggregate modified by carbonation	RFAM, RCAM
Experiment	Fresh concrete	Slump (mm)	150±20
		Air content (%)	4.5±1.5 5.0±1.5 ⁽¹⁾
	Hardened concrete	Compressive strength	3, 7, 28 day
		Length change	0~58 day
		Accelerated carbonation	7, 14, 21, 28 day
		Chloride penetration resistance	14 day

*⁽¹⁾Recycled aggregate, Recycled aggregate modified by carbonation

Table 3 Mix proportion of concrete

Mixture	W/C ⁽³⁾ (%)	s/a ⁽⁴⁾ (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad ⁽⁹⁾ (C×%)
			W ⁽⁵⁾	C ⁽⁶⁾	FAs ⁽⁷⁾	CAs ⁽⁸⁾	
NFA ⁽¹⁾ -NCA ⁽²⁾	49.85	48.4	173	347	838	905	0.7
RFA-FCA			173	347	793	795	-
RFAM-RCAM			173	347	800	799	-

*⁽¹⁾Natural fine aggregate, ⁽²⁾Natural coarse aggregate, ⁽³⁾Water-cement ratio, ⁽⁴⁾Fine aggregate-aggregate ratio, ⁽⁵⁾Water, ⁽⁶⁾Cement, ⁽⁷⁾Fine Aggregates, ⁽⁸⁾Coarse aggregates, ⁽⁹⁾Chemical admixture

Table 4 Physical properties of aggregate

Classification	Types	G _{max} (mm)	Saturated surface-dry density (g/cm ³)	Oven-dry density (g/cm ³)	Absorption (%)	Fineness Modulus
Fine aggregate	NFA	5	2.58	2.54	1.41	2.75
	RFA		2.46	2.35	4.73	3.41
	RFAM		2.48	2.39	3.82	
Coarse aggregate	NCA	25	2.61	2.58	1.33	6.88
	RCA		2.31	2.16	6.88	6.86
	RCAM		2.32	2.19	6.18	

한 콘크리트는 KS F 2573과 순환 골재 품질기준에 경량 콘크리트 공기량 규정과 동일한 5.0±1.5%를 만족하도록 규정하고 있기 때문에, 목표 공기량을 5.0±1.5%로 설정하였다. 또한, 천연 골재를 사용한 콘크리트인 NFA-NCA의 경우 목표 슬럼프를 만족하기 위하여 화학혼화제를 0.7% 사용하였다.

3.2 사용재료

본 연구에 사용한 골재의 물리적 특성을 Table 4에 나타내었다. 천연 잔골재는 5 mm 이하의 세척사를 사용하였으며, 천연 굵은 골재는 최대치수 25 mm 이하의 부순 골재를 사용하였다. 또한, 순환 골재는 국내에서 유통되고 있는 순환 골재와 저자의 선행연구에서 제시한 순환 골재

탄산화 개질 방법에 따라 탄산화 개질을 수행한 순환 골재를 사용하였다. 화학혼화제는 폴리카보산계(Polycarboxylate, PC) AE감수제를 사용하였다.

3.3 실험방법

탄산화 개질 순환 골재를 사용한 순환 골재 콘크리트의 활용 가능성을 확인하기 위해서는 기본적인 콘크리트의 물리적 특성뿐만 아니라, 기타 내구특성에 대한 검토가 필수적이다. 이에 따라, 실험에 대한 평가항목은 굳지 않은 콘크리트의 특성과 굳은 콘크리트의 물리적 특성 및 수축, 탄산화 저항성 등으로 설정하였다. 각각의 실험항목은 Table 5의 표준에 의거하여 수행하였다. 그러나, 순환 골재를 사용한 콘크리트는 순환 골재가 내포하고

Table 5 Test methods and standards of test items

Test item	Test method and standard
Slump	KS F 2402
Air content	KS F 2421
Compressive strength	KS F 2405
Length change	KS F 2424
Accelerated carbonation	KS F 2584, 2596
Chloride penetration resistance	NT BUILD 492

있는 수분이 많기 때문에, 일반 골재를 사용한 콘크리트에 비해 높은 함수량을 가지므로, 길이변화 특성에서 차이를 나타낼 것으로 판단하여 스트레인게이지를 공시체 중심부에 매립하여 Data logger를 통해 매시간 측정하였다. 그리고, 탄산화 저항성 측정은 KS F 2584에 따라 CO₂ 농도를 5%로 수행 시, 탄산화 깊이를 측정하는데 수개월 이상 소요되어 데이터 확보가 실질적으로 어려운 실정을 고려하여, 기존 연구를 바탕으로 보유 장비의 설정 범위 최대치인 CO₂ 농도 20%로 설정하여 시험을 수행하였다.²⁰⁾

3.4 실험결과

3.4.1 굳지 않은 콘크리트 특성

골재 종류에 따른 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 Fig. 5에 나타내었다. 천연 골재를 사용한 NFA-NCA의 경우 화학혼화제를 0.7% 사용하여 목표 슬럼프와 목표 공기량에 도달하는 결과 값을 얻었다. 그러나, 순환 골재를 사용한 RFA-RCA, RFAM-RCAM의 경우 화학혼화제를 사용하지 않았음에도 목표 슬럼프와 목표 공기량에 상회하는 결과 값을 얻었다. 이것은 순환 골재의 표면에 부착된 모르타르양이 많아서 천연 골재보다 흡수율이 크기 때문에, 기건 또는 절건 상태의 골재를 사용하면 골재가 흡수하는 배합수량이 증가하여 슬럼프 손실이 많아서 프리웨팅을 실시하도록 하고 있으며, 그에 따라 본 실험에서도 표면건조 포화상태의 골재를 사용하였으며, 그로 인해 골재에 내포하고 있는 많은 수분이 시멘트 페이스트에 공급되어 W/C가 일부 상승된 요인으로 생각된다.^{5,21)} 그리고, RFAM-RCAM의 경우 RFA-RCA에 비해 슬럼프 값이 일부 감소하는 경향을 나타내었다. 그 원인은 Table 4의 흡수율 결과에서 나타나듯이 탄산화 개질 순환 골재가 일반 순환 골재보다 흡수율이 낮아서 내포하고 있는 수분 또한 적어짐에 따라 시멘트 페이스트에 공급되는 수분량이 감소한 것으로 판단된다. 또한, 순환 골재를 사용한 콘크리트의 경우 골재의 입형이 좋지 않아 워커빌리티가 불량하여 Fig. 6과 같은 형상을 띄는 결과를 나타냈다²¹⁾. 공기량 실험결과에서는 순환 골재를 사용한 콘크리트 천연 골재를 사용한 콘크리트에 비해 높은 공기량을 나타냈다. 그 원인은 파쇄로 생산되는 순환 골재는 거친 표면을 가지기 때문에, 콘크리트 비빔 시 마찰이 크게 발생하

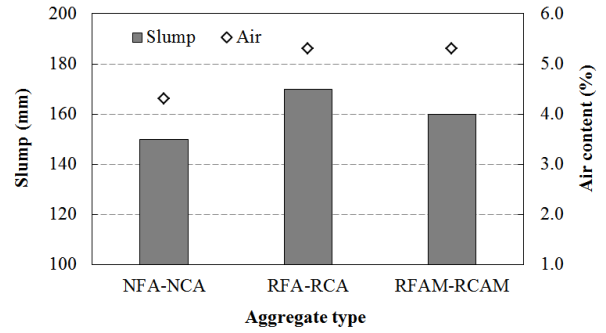
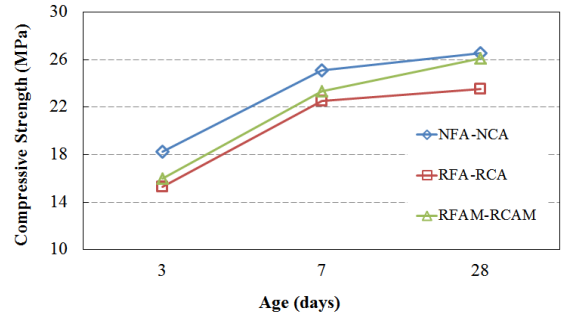


Fig. 5 Slump and air content

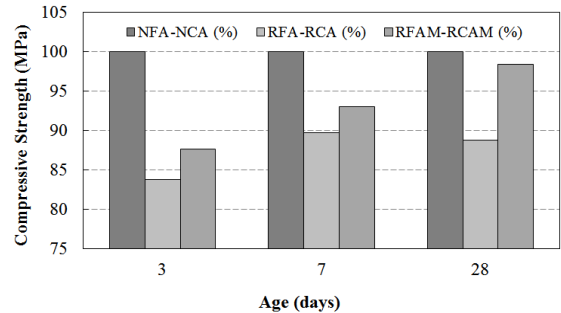


(a) Natural aggregate (b) Recycled aggregate

Fig. 6 Visual of slump test



(a) Compressive strength



(b) Ratio of compressive strength

Fig. 7 Compressive strength of concrete

며, 마찰에 의해 발생된 갇힌 공기가 콘크리트 내의 잔골재 사이에 갇히게 되어 비교적 큰 기포가 많이 발생된 것으로 사료된다.²¹⁾

3.4.2 압축강도

골재 종류에 따른 콘크리트의 압축강도 시험 결과와 NFA-NCA에 대한 압축강도비를 Fig. 7과 Table 6에 나타내었다. 모든 재령에서 NFA-NCA가 가장 우수한 강도 값을 나타내었으며, RFA-RCA가 가장 저조한 강도 값을 나

Table 6 Result of compressive strength

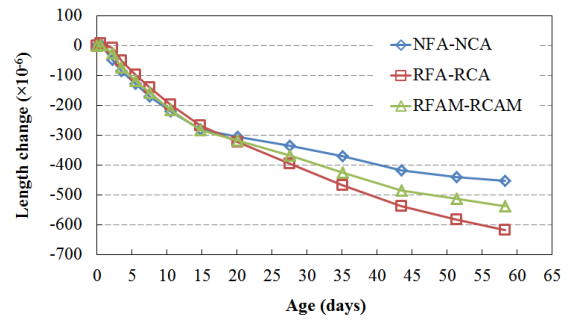
Aggregate type	Age					
	3days		7days		28days	
	C.S ⁽¹⁾ (MPa)	Ratio (%)	C.S (MPa)	Ratio (%)	C.S (MPa)	Ratio (%)
NFA-NCA	18.2	100.0	25.1	100.0	26.5	100.0
RFA-RCA	15.3	83.8	22.5	89.7	23.6	88.8
RFAM-RCAM	16.0	87.6	23.4	93.0	26.1	98.4

*⁽¹⁾Compressive strength

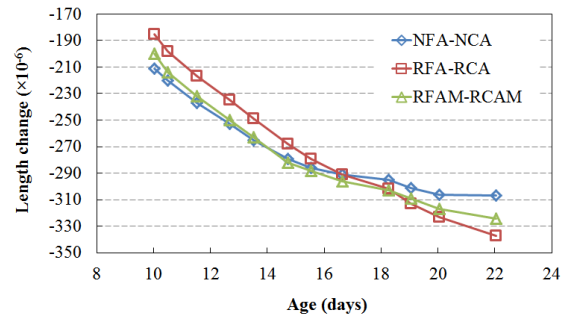
타냈다. 이것은 Table 4의 흡수율 시험 결과에서 나타난 것과 같이 순환 골재의 품질 기준을 판단하는 가장 큰 지표인 흡수율에서 차이를 보였으며, 이로 인해 일반 순환 골재가 내포하고 있는 많은 수분이 시멘트 페이스트로 공급됨에 따라 콘크리트의 강도에 미치는 영향 인자들 중 가장 큰 요인으로 알려져 있는 W/C 변화 발생에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 재령 7일까지는 RFA-RCA와 RFAM-RCAM의 압축강도비가 NFA-NCA의 90% 내외 수준인 것으로 나타났다. 그 원인은 재령 7일까지는 시멘트 수화물의 수화반응이 전부 이루어지지 않은 상태이기 때문에 순환 골재의 1차 계면 전이구역(순환 골재 내부의 원 골재와 순환 골재에 부착된 기존 이질재의 경계면)보다 새로 타설된 시멘트 경화체의 강도가 낮고, 추가적으로 순환 골재와 탄산화 개질 골재가 내포하고 있던 수분이 골재 주변의 시멘트 페이스트에 공급되어 2차 계면 전이구역(순환 골재와 새로 타설된 시멘트 경화체의 경계)에서 W/C 변화가 발생하였으며, 결과적으로 2차 계면 전이구역의 W/C 상승과 시멘트 수화물 형성 부족으로 내부 공극구조가 서로 연결됨에 따라 강도가 낮음에 의한 것으로 생각된다.²¹⁾

이어서, 재령 7일 이후 RFA-RCA는 강도 상승폭이 적지만, RFAM-RCAM은 강도 상승폭이 크며 재령 28일에서 압축강도비가 NFA-NCA의 98% 수준으로 나타났다. 재령 28일에서는 시멘트의 수화반응이 어느 정도 이루어져 새로 타설된 시멘트 경화체의 강도가 일정 수준까지 발현됨에 따라 2차 계면 전이구역이 가장 취약할 것으로 판단된다.²¹⁾ 또한, RFAM-RCAM에 사용한 탄산화 개질 순환 골재는 부착 이질재의 공극 충전으로 RFA-RCA에 사용한 일반 순환 골재에 비해 품질 자체도 향상되고, 흡수율이 감소됨에 따라 시멘트 페이스트에 공급하는 수분이 적어 RFAM-RCAM가 RFA-RCA에 비해 2차 계면 전이구역의 두께가 작으며, 결과적으로 2차 계면 전이구역의 두께감소와 아울러 시멘트 수화반응이 어느 정도 이루어져 2차 계면 전이구역의 시멘트 수화물이 시멘트 입자 사이의 공간을 채워주어 공극구조가 치밀해짐에 따라 RFA-RCA에 비해 강도 상승폭이 큰 것으로 생각된다.²¹⁾ 그리고, 콘크리트의 기계적 부착은 골재의 표면 성질과 형상에 영향을 있으며, 그에 따라 파쇄로 생산되는 순환 골재

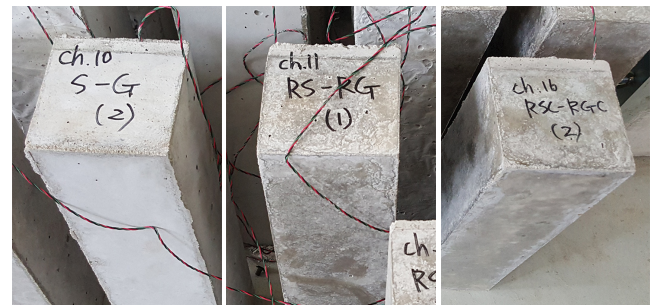


(a) 0~56 days



(b) 10~22 days

Fig. 8 Length change of concrete



(a) NFA-NCA (b) RFA-RCA (c) RFAM-RCAM

Fig. 9 Surface moisture condition of length change specimen at 3days

의 거친 표면에 의해 시멘트 페이스트와의 기계적 부착력이 일부 향상되어 RFAM-RCAM가 NFA-NCA와 유사한 강도 결과 값이 도출된 것으로 판단된다.²¹⁾ 그러나, RFA-RCA는 골재와 시멘트 페이스트 부착 부분인 2차 계면 전이구역의 두께가 크고, W/C의 상승폭이 크기 때문에 영향을 주지 못한 것으로 사료된다.

3.4.3 길이변화

골재 종류에 따른 콘크리트의 길이변화량을 Fig. 8에 나타내었다. 재령 18일까지는 RFA-RCA의 길이변화량이 가장 작고, NFA-NCA의 길이변화량이 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나, 재령 18일 이후부터 NFA-NCA의 길이변화량이 감소하고, RFA-RCA의 길이변화량이 증가하여 역전되는 현상을 나타내었다. 이것은 본 실험에서 매립형 게이지를 통해 내부 중심부의 길이변화를 측정함에 의한

것으로 생각된다.

건조수축 현상은 수분 증발에 의해 발생되며, 수분 증발은 표면에서부터 발생하기 시작하여, 점차적인 수분 이동에 의해 내부까지 발생된다. 그에 따라 순환 골재의 높은 흡수율에 의해 가장 많은 수분을 내포하고 있는 RFA-RCA는 점차적인 수분 이동에 의해 발생하는 내부의 수분 증발에 가장 오랜 시간이 소요된다고 가정할 수 있으며, 결과적으로 본 실험에서는 스트레인 게이지를 시험체 중심에 매립함에 따라 내부 수분 증발로 발생하는 건조수축이 측정되기 때문에 재령 13일까지 가장 작은 결과 값을 나타낸 것으로 판단된다. 그러나, NFA-NCA는 RFA-RCA와 상이하게 천연 골재의 낮은 흡수율에 의해 내포하고 있는 수분이 적어 내부의 수분 증발에 소요되는 시간이 짧아 재령 13일까지 가장 큰 결과 값을 나타낸 것으로 판단된다. 그 현상은 Fig. 9의 재령 3일에서 길이변화 시험체의 표면 함수상태에서 나타났다. 천연 골재를 사용한 Fig. 9(a) NFA-NCA 시험체는 표면 건조가 확연하게 일어난 것을 확인할 수 있고, 순환 골재를 사용한 Fig. 9(b) RFA-RCA 시험체는 가장 많은 수분을 내포하고 있다. 덧붙여, Fig. 9(c) RFAM-RCAM 시험체는 순환 골재의 탄산화 개질에 의해 부착 이질재 공극이 충전됨에 따라 일반 순환 골재보다 흡수율이 감소되었으며, 그에 따라 RFA-RCA에 비해 내포하는 수분이 적기 때문에 RFA-RCA보다 낮은 표면 함수 상태를 나타내고 있다.

함수상태 차이에 의한 길이변화 측정값의 역전은 NFA-NCA와 RFAM-RCAM이 재령 13~14일, NFA-NCA와 RFA-RCA가 재령 17~18일, RFA-RCA와 RFAM-RCAM이 재령 17~18일에서 나타났다.

표면이 건조됨에 따라 점차적인 내부의 수분 이동 및 증발로 건조수축이 지속적으로 발생하였고, 순환 골재의 흡수율이 가장 높아 많은 수분을 내포하고 있는 RFA-RCA가 계속적으로 급격한 수축이 발생되어, 재령 58일에서 NFA-NCA에 비해 36.2% 큰 길이변화 결과 값을 나타내었다. 그리고, 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 RFAM-RCAM의 경우, 탄산화 개질에 의한 부착 이질재의 공극 충전으로 순환 골재보다 흡수율이 감소됨에 따라 RFA-RCA에 비해 완만한 경향을 나타내었으며, 재령 58일에서 RFA-RCA에 비해 13.1% 저감되는 결과를 나타내었다. 그러나, NFA-NCA 배합에 비해 18.3%가 증가한 결과를 나타내어 향후 일반 콘크리트의 품질 수준까지 도달할 수 있는 개선 방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.4.4 탄산화 저항성

골재 종류에 따른 탄산화 깊이를 Fig. 10과 Table 7에 나타내었다. 탄산화 깊이 측정 시험체는 28일간 표준수중양생을 수행한 후, 소정의 재령 동안 탄산화 측진을 수행하였으며, 모든 재령에서 NFA-NCA가 가장 우수한 탄산화 저항성을 나타내었고, RFA-RCA가 가장 저조한 탄산화 저항성을 나타냈다. 이것은 탄산가스가 콘크리트의

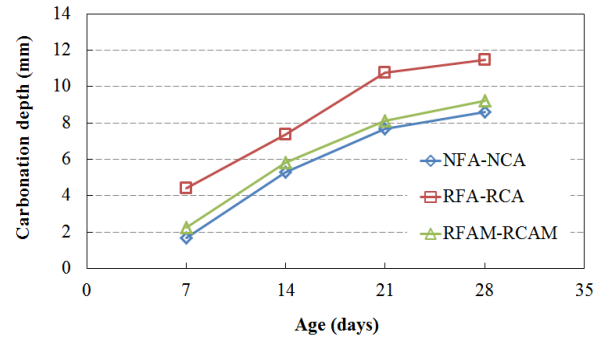


Fig. 10 Carbonation depth of concrete

Table 7 Result of carbonation depth

Aggregate type	Carbonation depth (mm)			
	7 days	14 days	21 days	28 days
NFA-NCA	1.68	5.31	7.68	8.62
RFA-RCA	4.40	7.36	10.77	11.48
RFAM-RCAM	2.26	5.83	8.12	9.22

시멘트 경화체 내부에 존재하는 여러 가지 공극, 미세균열 등의 경로를 통하여 침투되며, RFA-RCA의 경우 순환 골재 부착 이질재 자체에 많은 공극이 존재하고, Table 4의 흡수율 시험 결과에서 나타난 것과 같이 높은 흡수율에 의해 순환 골재가 내포하고 있는 많은 수분이 골재 주변의 시멘트 페이스트로 공급됨에 따라 2차 계면 전이 구역의 두께가 가장 넓어 이산화탄소의 침투 경로가 가장 많기 때문에 탄산화 깊이가 가장 큰 것으로 판단된다.²²⁻²³⁾ RFAM-RCAM의 경우, 탄산화 개질을 통한 순환 골재 부착 이질재 자체의 공극 감소와 탄산화 개질 순환 골재의 흡수율 감소에 의해 2차 계면 전이 구역의 두께 또한 작아져 RFA-RCA보다 탄산화 깊이가 감소한 것으로 생각된다. 또한, 콘크리트 내부 공극에 존재하는 수분은 탄산가스의 확산을 저지하여 탄산화가 늦어진다는 보고가 있다.²³⁾ 그에 따라 Fig. 8의 길이변화 시험결과와 Fig. 9의 재령 3일에서 길이변화 시험체의 표면 함수상태에서 보여주듯이 RFAM-RCAM은 내포하고 있는 수분이 NFA-NCA에 비해 많기 때문에 지속적으로 많은 양의 수분이 공극에 공급될 것으로 사료되며, 그로 인해 공극 내 공급된 수분이 탄산가스의 확산을 저지한 것으로 판단된다. 결과적으로, RFAM-RCAM은 탄산화 개질 순환 골재 부착 이질재 자체의 공극 감소와 2차 계면 전이 구역의 두께 감소에 의한 이산화탄소의 침투 경로 감소 및 공극 내부로 많은 양의 수분이 공급되어 탄산가스의 확산 저지로 NFA-NCA와 유사한 탄산화 깊이 결과 값이 도출된 것으로 판단된다. 그러나, 공극으로의 수분 공급은 평형 상태를 유지하기 위하여 발생되기 때문에 지속적이지만 일정 수준 이상 증가하지 않을 것으로 생각되며, 그로 인해 RFA-RCA는 순환 골재 부착 이질재 자체의 많은 공극과 넓은 2차 계면 전이 구역에 의한 이산화탄소의 침투 경로 증가에 비

하여, 공극 내부로의 제한적인 수분 공급이 발생되어 수분에 의한 탄산가스의 확산 저지 효과가 크지 않은 것으로 사료된다.

3.4.5 염화물 침투 저항성

콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성을 평가하기 위해 NT BUILD 492에 의거하여 전기촉진법에 의한 염화물 확산계수를 산출하였다. 염화물이온 침투 시험체는 14일간 표준수중양생을 실시한 후 두께 50±2 mm로 중간부를 절단하여 시험을 수행하였다. 골재 종류에 따른 염화물 확산 계수를 Fig. 11과 Table 8에 나타내었다. NFA-NCA가 염화물 확산 계수가 가장 낮아 우수하게 측정되었고, RFA-RCA가 가장 저조한 염화물 침투 저항성을 나타내었다. 이것은 염화물 이온 침투 저항성 또한 탄산화 저항성과 유사한 메커니즘으로 발생하여, RFA-RCA의 경우 순환 골재 부착 이질재 자체의 많은 공극과 넓은 2차 계면 전이 구역이 존재하며, 공극으로의 제한된 수분공급에 따라 NFA-NCA에 비해 확연한 차이를 나타낸 것으로 생각된다.²²⁾ 그러나, RFAM-RCAM은 탄산화 개질 순환 골재 부착 이질재 자체의 공극 감소와 2차 계면 전이 구역의 두께 감소에 의한 염화물 이온의 침투 경로 감소 및 공극 내부로 많은 양의 수분이 공급됨에 따른 염화물 이온의 침투 저지가 복합적으로 작용하여 NFA-NCA와 유사한 염화물 확산계수를 나타낸 것으로 판단된다.²²⁾ 덧붙여, 콘크리트 중의 강재 부식에 영향을 미치는 인자 중의 하나는 공극수 중의 자유로운 Cl⁻ 농도와 OH⁻ 농도비이며, Cl⁻/OH⁻의 농도비가 0.6 이상인 경우 부식이 발생한다고 보고되고 있다.²²⁾ 동일한 환경 조건 하에서 Cl⁻ 농도가 일정하다 가정하면, OH⁻ 농도에 관련이 깊다고 할 수 있다. 따라서, pH는 탄산화가 진행됨에 따라 낮아지기 때문에, Cl⁻/OH⁻ 농도비가 높아지므로 탄산화 저항성 또한 염해와 깊은 연관성

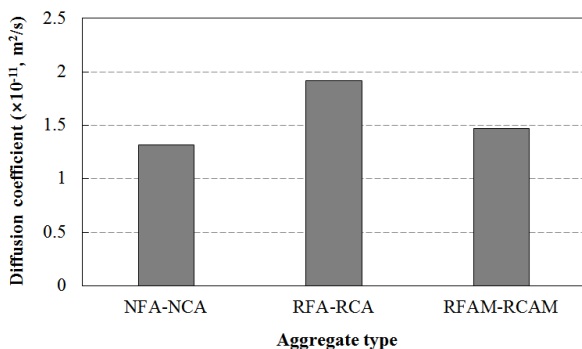


Fig. 11 Diffusion coefficient of concrete

Table 8 Result of diffusion coefficient

Aggregate type	Diffusion coefficient (m ² /s)
NFA-NCA	1.3200 × 10 ⁻¹¹
RFA-RCA	1.9185 × 10 ⁻¹¹
RFAM-RCAM	1.4721 × 10 ⁻¹¹

이 있을 것이라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 콘크리트의 구조용으로 적용 가능성을 평가하기 위하여, 먼저 저자가 선행연구에서 제시한 순환 골재 탄산화 개질 방법에 의한 순환 골재 품질 개선 효과를 검토하였다. 또한, 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 순환 골재 콘크리트의 활용 가능성을 확인하기 위하여 기본적인 콘크리트의 물리적 특성과 기타 내구특성에 대한 검토와 성능 개선 효과에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 탄산화 개질을 수행하지 않은 순환 골재와 탄산화 개질을 수행한 순환 골재의 밀도 및 흡수율 시험 결과, 탄산화 개질에 의해 절건 밀도는 증가하는 결과를 나타내었으며, 흡수율은 감소하는 결과를 나타내었다.
- 2) 콘크리트 설계 기준 강도인 재령 28일에서 압축강도 시험결과, 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 RFAM-RCAM이 일반 순환 골재를 사용한 RFA-RCA에 비해 12% 향상되었으며, 천연 골재를 사용한 NFA-NCA에 대한 압축강도비가 98% 수준으로 유사한 강도 값을 나타냈다.
- 3) 콘크리트 길이변화 시험 결과, 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 RFAM-RCAM이 재령 58일에서 일반 순환 골재를 사용한 RFA-RCA에 비해 길이변화량이 13% 저감하여 균열 저항성을 향상시키는 결과를 얻었다. 그러나, 천연 골재를 사용한 NFA-NCA에 비해 길이변화량이 18% 증가하는 결과를 나타냈다.
- 4) 탄산화와 염해 저항성 시험결과, RFAM-RCAM이 RFA-RCA에 비해 탄산화 깊이는 28%, 염화물 확산 계수는 30% 감소하는 결과를 얻었다. 또한, RFAM-RCAM은 NFA-NCA와 탄산화 깊이 7%, 염화물 확산계수 11%의 격차를 나타내어 유사한 내구수명을 가지는 것으로 확인되었다.
- 5) 길이변화의 경우 탄산화 개질 골재를 사용한 RFAM-RCAM이 천연 골재를 사용한 NFA-NCA에 비해 18%가 증가하는 결과를 나타내어, 향후 일반 콘크리트의 품질 수준까지 도달할 수 있는 개선방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

위를 종합한 결과, 순환 골재의 탄산화 개질에 의해 밀도는 증가하고, 흡수율은 감소하는 결과를 나타내었다. 또한, 탄산화 개질 순환 골재를 사용한 순환 콘크리트의 물리적 특성 및 내구성능이 일반 콘크리트와 유사한 결과를 나타내어 구조용 콘크리트로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Korea Environment Corporation, Generation and Processing Status of National Waste (2013), No. KECO2014-PE14-38, Ministry of Environment, 2014. pp.22-30.
2. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Study on Activation Measures of Recycled Aggregate, 11-1613000-000638-01, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014, pp.3-34.
3. Korea Construction Economy and Industry Association, Study on Master Plan establishing of Aggregate Demand and Supply, 1-1613000-000269-13, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014, pp.71-157.
4. Waste Resources Management Division, Construction Waste Recycling Promotion Act, Law No. 13527, Ministry of environment, 2015, pp.1-20.
5. Technology Policy Division, Quality Standard of Recycled Aggregate, Bulletin No. 2013-92, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013, pp.19-25.
6. Korean Agency for Technology and Standards, Recycled Aggregates for Concrete, KS F 2573, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2014, pp.6-8.
7. Tangchirapat, W., Buranasing R., Jaturapitakkul C., and Chindaprasirt P., "Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.8, 2008, pp.1812-1819.
8. Corinaldesi, V., and Moriconi, G., "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.8, 2009, pp.2869-2876.
9. Kou, S., Poon, C., and Agrela, F., "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures", *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, No.8, 2011, pp.788-795.
10. Çakır, Ö., and Sofyanlı, Ö.Ö., "Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete", *Housing and Building National Research Center Journal*, Vol.11, No.2, 2015, pp.157-166.
11. Akça, K.R., Çakır, Ö., and İpek, M., "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol.98, 2015, pp.620-630.
12. Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J.R., and Ledesma, E.F., "Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer", *Construction and Building Materials*, Vol.89, 2015, pp.36-47.
13. Katz, A., "Treatments for the improvement of recycled aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.16, No.6, 2004, pp.597-603.
14. Cheng, H., and Wang, C., "Experimental study on strengthen concrete regenerated aggregate with water glass", *New Building Materials*, Vol.12, 2004, pp.12-14.
15. Kim, N. Y., Kim, H. J., and Bae, J. S., "A Study on the Property Estimation of Recycled Coarse Aggregate and Characteristic of Recycled Aggregate Concrete Using the Surface Coated Treatment Method," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers A*, Vol.28, No.4A, 2008, pp.603-609.
16. Choi, H. B., "Water Absorbtion Controlling Type Surface Treatment Method for Quality Enhancement of Recycled Aggregate," *Journal of The Korean Institute of Building Construction*, Vol.15, No.6, 2015, pp.561-567.
17. Zhang, H., Zhao, Y., Meng, T., and Shah, S.P., "The modification effects of a nano-silica slurry on microstructure, strength, and strain development of recycled aggregate concrete applied in an enlarged structural test", *Construction and Building Materials*, Vol.95, 2015, pp.721-735.
18. Powers, T.C., "A Hypothesis of Carbonation Shrinkage", *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Vol.4, No.2, 1962, pp.40-50.
19. Papadakis, V.G., Costas, G., Vayenas, and Michael, N.F., "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.2, 1991, pp.186-196.
20. Choi, Y. J., Lee, K. M., Kim, J. H., Jung, S. H., Lee, M. K., "Applicability Study of the Rapid Carbonation Test Equipment for Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.18, No.2, 2006, pp.601-604.
21. Korea Concrete Institute, *Engineering of Concrete*, 2011, pp.300-374.
22. Korea Concrete Institute, *Engineering of Concrete*, 2011, pp.421-430.
23. Donghwa Technology Publishing Co., *Concrete : Crack, Deterioration and Measures*, 2010, pp.114-118.

요약 노후 시설물의 증가에 따라 건설폐기물은 일정 수준까지 증가한 이후, 현재는 어느 정도 안정화 된 추세에 있지만, 전체폐기물 중에서 건설폐기물은 아직까지도 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한, 천연 골재 채취 금지에 의한 골재 난 심화 및 골재 공급원 개발에 의한 국토훼손과 자연환경 파괴 등에 따라 환경복원에 막대한 국가예산 소요가 불가피한 상황이다. 이에 대한 대책 방안으로 국토교통부는 순환 골재 품질기준을 공포하여 순환 골재 품질에 따른 용도와 관리를 할 수 있도록 추진하고 있으나, 경제적 부가가치가 높은 용도로의 활용은 아직 저조한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 저자의 선행연구에서 제시한 탄산화 개질 조건인 20°C, RH 60%, CO₂ 20%에서 순환 잔골재 4일, 순환 굵은 골재 14일간 탄산화를 실시한 순환 골재의 품질개선 효과 및 이를 이용한 순환 골재 콘크리트의 성능 평가를 통하여 구조용 콘크리트로의 적용 가능성에 대한 실마리를 찾고자 한다. 그 결과, 탄산화 개질을 통하여 순환 잔골재의 흡수율이 0.91%, 순환 굵은 골재의 흡수율이 0.7% 저감되어 품질개선에 기여하였다. 또한, 탄산화 개질 골재를 이용한 순환 골재 콘크리트의 물리적 특성 및 내구성능이 일반 콘크리트와 유사한 결과를 나타내어 구조용 콘크리트로의 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 순환 골재, 탄산화 개질, 흡수율, 순환 골재 콘크리트