



순환 골재 부착 이질재의 탄산화 개질에 따른 공극구조 및 물리적 특성

신진학²⁾ · 김한식¹⁾ · 정란²⁾ · 하정수^{2)*}

¹⁾삼성물산 건설부문 주거성능연구소 ²⁾단국대학교 건축공학과

Pore Structure and Physical Properties of Heterogeneous Bonding Materials of Recycled Aggregate according to Carbonation Reforming

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

¹⁾Residential Engineering Team, Samsung C&T Co. Ltd. Engineering & Construction Group, Yongin 17015, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin 16890, Rep. of Korea

ABSTRACT At present, about 40 million tons of concrete is dismantled each year, which accounts for the largest portion of the total amount of construction waste with 60.8%. It is known about 97.5% of it is recycled. However, most of the usage of waste concrete is limited to lower value-added business areas, and considering the increasing amount of waste concrete generated due to the deterioration of structures, the need for converting waste concrete to structural concrete is urgent. Therefore, this study aims at estimating the period for the optimum carbonation reforming to improve the quality of recycled aggregate, by making use of the method of accelerated carbonation reforming of the bonding heterogeneous (cement paste and mortar) for the purpose of converting recycled aggregate to structural concrete. Based on the period appropriate for the heterogeneous thickness and each bonding thickness of recycled aggregate which was drawn from previous studies, the changes in the characteristics and physical properties of pore structure according to progress of accelerated carbonation were analyzed. The result shows that with the progress of carbonation, the pore volume and the percentage of water absorption of the bonding heterogeneous decreased and the density increased, which indicates improvement of the product quality. But after certain age, the tendency was reversed and the product quality deteriorated. Synthesizing the results of previous studies and those of the present study, this study proposed 4 days and 14 days respectively for the period for the optimum carbonation reforming of recycled fine aggregate and recycled coarse aggregate.

Keywords : recycled aggregate, attached cement paste, attached mortar, accelerated carbonation, pore structure

1. 서 론

현재, 해체되는 콘크리트는 연간 4,000만톤에 이르고 있고, 전체 건설폐기물 중에서 60.8%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 중의 약 97.5%는 재활용 되고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

그러나, 이러한 폐 콘크리트의 사용용도는 노반재 및 퇴폐우기 재료 등 저부가가치 산업에 머물고 있는 실정이다. 이에 따라 건축물의 노후화로 철거가 증가되면서 더욱 증가하는 폐 콘크리트의 재사용을 감안하면 구조용 콘크리트로의 전용이 필요하다.

이에 대한 대책 방안으로 국토교통부는 순환 골재의 효율적인 활용을 위하여 건설폐기물 재활용 촉진에 관한

법률을 제정하였으며, 콘크리트용 ‘순환 골재 품질기준’을 공포하여 순환 골재 품질에 따른 용도와 관리를 할 수 있도록 하고 있다.^{2,3)}

그러나, 순환 골재는 품질이 좋지 않기 때문에, 구조체의 적용에 대해서는 대부분의 국가에서 심각하게 규제하고 있으며,^{4,5)} 그 해결 방안으로 고도 처리에 의해 생산되는 고품질 골재만을 회수하여 재활용 하는 기술이 고려되어 왔다. 이러한 고도 처리 기술은 가열이나 기계 마모를 통한 처리방법을 등이 있으며, 이로 인해 생산된 골재는 구조용 콘크리트에 사용할 수 있는 고품질 골재의 회수가 가능하다.³⁾ 그러나, 고도 처리 기술은 에너지 소비량이 큰 것과 부산 미분이 대량 발생하는 등의 과제가 있어 실용화에 이르지 못하고 있다. 폐 콘크리트를 전량 이용한 품질이 낮은 콘크리트의 재활용 방법은 환경 부하 저감 및 폐기물 배출량의 억제에 큰 장점을 가지고 있지만, 건조수축 발생이 크며, 입형이 좋지 않아 단위 수량의 증가하는 등 콘크리트의 성능이 크게 떨어지기 때

*Corresponding author E-mail : jungshall1@nate.com
 Received December 3, 2015, Revised January 18, 2016,
 Accepted February 11, 2016
 ©2016 by Korea Concrete Institute

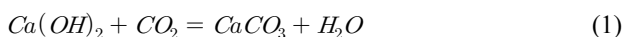
문에, 사용 용도가 제한적이다.

순환 골재 콘크리트의 상용화에서 가장 중요하게 고려되는 것은 순환 골재 생산 시의 에너지 소비량과 부산 미분 발생의 억제 및 콘크리트 성능의 유지이다. 앞서 두 가지의 해결 방법으로 단순 파쇄 처리방법에 의한 재활용이 있다. 그러나, 이러한 조건을 충족시키며 시도된 방법은 순환골재 표면에 다량으로 부착된 이질재(시멘트 페이스트 및 모르타르)가 원인이 되며 높은 흡수율과 파쇄 시 발생한 미세균열로 인해 골재 강도가 약해지는 등의 문제가 발생한다. 이러한 순환 골재를 콘크리트에 사용하면 일반 콘크리트와 비교했을 때, 단위수량 증가에 따른 건조수축의 증대 및 강도 저하 등의 문제로 실용화에 도달할 수 없게 된다.

이에 일부 연구자들은 순환 골재 콘크리트의 특성을 향상시킬 목적으로 플라이애시, 쌀겨가루, 실리카폼, 폴리프로필렌 섬유 및 감수제 등의 여러 종류의 혼화재료 및 보강 재료를 사용하였다.⁶⁻⁹⁾ 이러한 연구 결과로부터 혼화재료 및 보강 재료를 사용한 순환 골재 콘크리트가 사용하지 않은 경우보다 성능 향상 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 일부 연구자들은 골재의 함수상태와 혼입율을 변경하여 일부 성능이 향상 되는 것을 확인하였다.¹⁰⁾ 그러나, 언급한 방법들은 순환 골재 자체의 특성을 향상시키는 것 보다는 배합비와 배합 방법 등을 조정하였다.

일반적으로 순환 골재의 품질 향상을 위해 사용되는 방법은 공극이 많고 노후화 된 부착 시멘트 페이스트에 초점을 맞추어 약한 표면을 강화하거나 제거하는 방법의 두 가지가 있다. 이에 일부 연구자들은 순환 골재에 나노 실리카 압입 및 기타 복합재료 첨가로 표면을 강화시키는데 이용하였다.¹¹⁾ 그 결과 부착 모르타르의 표면을 강화할 수 있으며, 콘크리트의 특성 또한 향상됨을 확인하였다. 또한 위의 표면을 강화하는 방법과는 달리, 일부 연구자들은 H₂SO₄, HCl에 순환 골재를 미리 담가두어 표면에 부착된 모르타르를 제거하고, 복합적인 방법으로 파쇄 과정을 개선하여 미세 분말과 불순물을 제거하였다.¹²⁾ 그 결과 일반 처리과정에 의한 순환 골재보다 품질이 우수하며, 일부 구조체용 콘크리트에 적용이 가능하다고 평가하였다.

순환 골재 표면에 부착되어 있는 기존 시멘트 모르타르의 구성을 고려해 볼 때, 촉진 탄산화를 통해 시멘트의 주된 수화물 중 하나인 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응하여 식 (1)에 의해 체적증가를 수반한다. 탄산화 반응은 시멘트 경화체의 공극 내부에서 일어나고 생성되는 탄산칼슘은 공극 내에서 석출하기 때문에 시멘트 경화체를 밀실하게 하여 낮은 품질은 개선하는 것이 어느 정도 가능하다.^{13,14)}



이에 따라, 본 연구의 선행 연구를 통해 국내에서 유통되고 있는 순환 골재의 입도분포를 파악하여 완전한 구형태로 가정한 순환 골재의 평균 입경 크기를 산정하였다. 또한, 염산처리에 의해 순환 잔 골재의 부착 시멘트 페이스트와 순환 굵은 골재의 모르타르의 부착 두께를 부피비에 기초하여 산출한 결과 순환 잔 골재는 Fig. 1(a), 순환 굵은 골재는 Fig. 2(b)와 같이 도출되었다.

선행 연구를 통해 Fig. 1(a)과 같이 순환 잔 골재의 평균 입경 1.82 mm에서 원 잔 골재 1.66 mm, 부착 시멘트 페이스트 0.16 mm(반지름 0.08 mm)로 구성되어 있는 결과를 얻었다. 따라서, 촉진 탄산화에 의한 시멘트 페이스트 시험체의 목표 탄산화 깊이를 평균 입경 1.82 mm에 의한 0.08 mm와 Fig. 1(b)와 같이 내부에 원 잔 골재를 포함하지 않는 페이스트 덩어리로 가정하여, 5 mm의 반지름인 2.5 mm로 설정하였다. 또한, Fig. 2(a)와 같이 순환

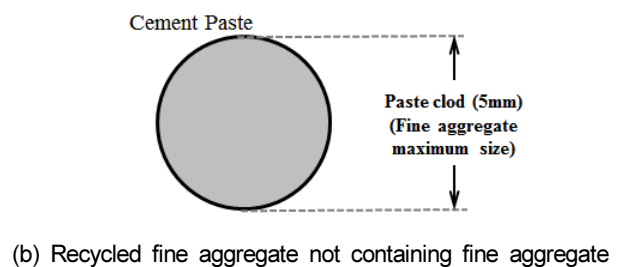
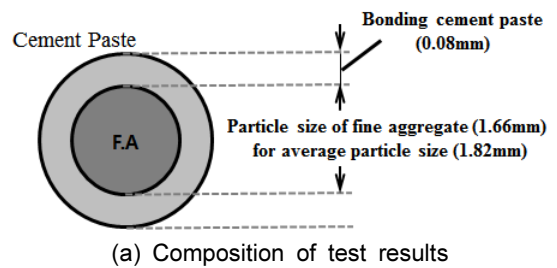


Fig. 1 Composition of recycled fine aggregate

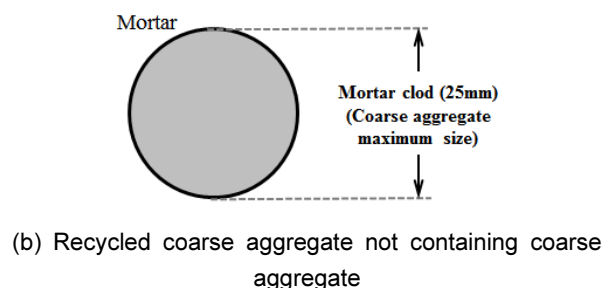
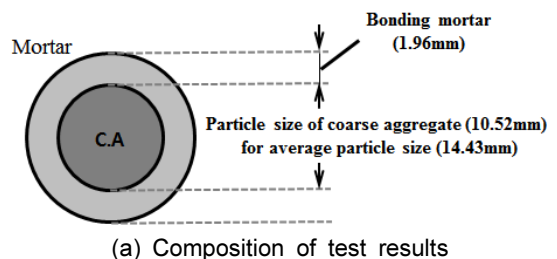


Fig. 2 Composition of recycled coarse aggregate

굵은 골재의 평균 입경 14.43 mm에서 원 굵은 골재 10.52 mm, 부착 모르타르 3.91 mm(반지름 1.96 mm)로 구성되어 있는 결과를 얻었다. 따라서, 촉진 탄산화에 의한 모르타르 시험체의 목표 탄산화 깊이를 평균 입경 14.43 mm에 의한 1.96 mm와 Fig. 2(b)와 같이 내부에 원 굵은 골재를 포함하지 않는 모르타르 덩어리로 가정하여, 25 mm의 반지름인 12.5 mm로 설정하였다.

상기의 도출된 결과에 따라 순환 골재의 부착 페이스트 및 모르타르를 가정한 시험체를 순환 골재 중에 원 골재를 포함하지 않는 최악 조건의 순수 페이스트 및 모르타르 덩어리로 가정하여, 각각의 최대치수 5 mm, 25 mm로 제작하였다. 이후, 촉진 탄산화 진행에 따른 시멘트 수화물의 화학적 정량분석을 실시하여 재령 경과에 따른 탄산화 깊이 계산 데이터를 선형 회귀분석 수행 결과, Fig. 3과 같이 도출되었다.

부착 이질재(시멘트 페이스트 및 모르타르)를 가정한 시험체의 탄산화 기간에 따른 탄산화 깊이를 선형 회귀 분석 수행한 결과, 순환 잔 골재의 평균 입경 1.82 mm에 대한 부착 시멘트 페이스트 두께 0.08 mm에 적합한 탄산화 기간은 재령 3.46일(≒4일), 순환 굵은 골재의 평균 입경 14.43 mm에 대한 부착 모르타르 두께 1.96 mm에 적합한 탄산화 기간은 재령 14.19일(≒14일)로 도출되었다. 또한, Fig. 1(b)와 같이 잔 골재를 포함하지 않은 순수 페이스트 덩어리 순환 잔 골재로 가정한 잔 골재 최대치수 5 mm의 반지름인 2.5 mm에 적합한 탄산화 기간은 재령 65.51일(≒66일), Fig. 2(b)와 같이 굵은 골재를 포함하지

않은 순수 모르타르 덩어리 순환 굵은 골재로 가정한 굵은 골재 최대치수 25 mm의 반지름인 12.5 mm에 적합한 탄산화 기간은 재령 95.90일(≒96일)인 것으로 도출되었다.

따라서, 본 연구에서는 부착 시멘트 페이스트 및 모르타르를 제거하는 전처리 방법과 달리 촉진 탄산화 방법에 착목하여 순환 골재의 특성을 향상시키기 위한 최적 개질 방법의 도출을 목적으로 한다. 이에 따라, 선행 연구를 통해 도출된 순환 골재의 부착 시멘트 페이스트 및 모르타르의 두께와 각 부착 두께에 적합한 순환 골재의 탄산화 기간을 토대로 촉진 탄산화 진행에 따른 공극구조 특성 및 물리적 특성 변화를 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 부착 이질재의 모의 시험체 제작

순환 골재의 부착 이질재를 가정한 시험체의 제작 및 촉진 탄산화 개념도를 Fig. 4에 나타내었다. 시험체는 순환 골재 중에 원 골재를 포함하지 않는 최악 조건의 순수 페이스트 및 모르타르 덩어리로 가정하여 각각의 최대치수 5 mm, 25 mm로 제작하였다.

촉진 탄산화 시험체 제작에 사용한 시멘트 페이스트 및 모르타르 배합을 Table 1에 나타내었다. 모르타르 배합은 고층 건물이 없던 2000년대 이전 가장 많이 사용된 설계 기준강도 21 MPa를 고려하여 반영하였고, 국내 레미콘 회사에서 현재 사용되고 있는 25-21-150 콘크리트

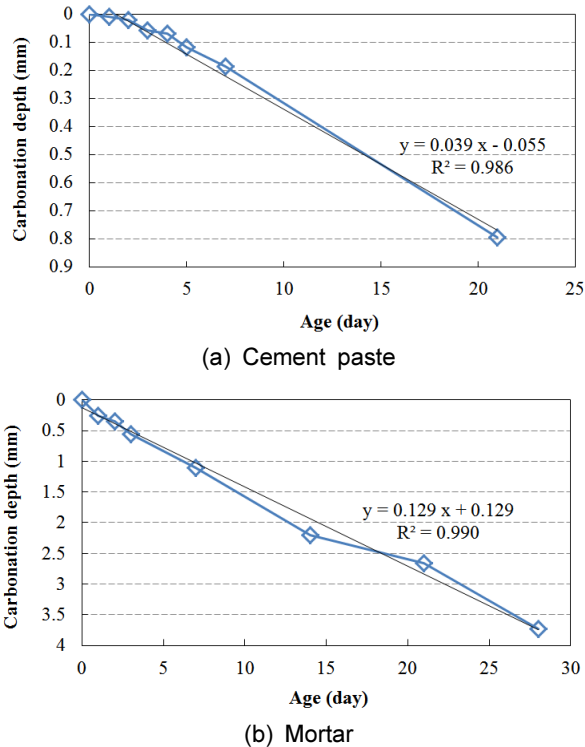


Fig. 3 The relation between the carbonation depth and the age

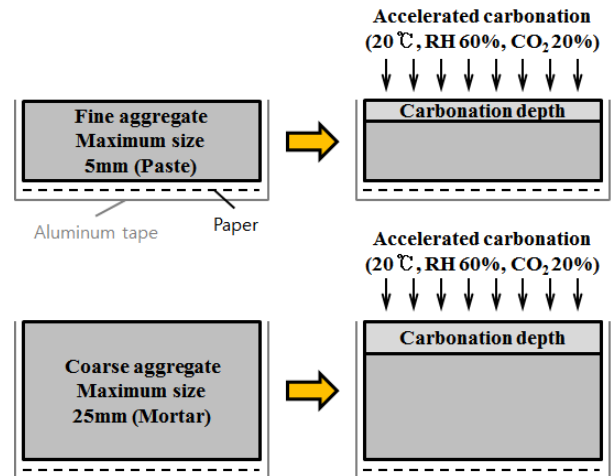


Fig. 4 Conceptual accelerated carbonation

Table 1 Mix proportion

Mixture type	W/C ⁽¹⁾ (%)	Unit weight (kgf/m ³)		
		W ⁽²⁾	C ⁽³⁾	S ⁽⁴⁾
Cement Paste	49.85	587	1177	-
Mortar		264	529	1367

*⁽¹⁾Water-cement ratio, ⁽²⁾Water, ⁽³⁾Cement, ⁽⁴⁾Fine Aggregate

배합을 기본으로 물-시멘트비(W/C)를 고정하고 페이스트와 모르타르의 배합으로 조정하였다.

제작한 시험체는 익일 탈형 후 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중에서 재령 4주까지 양생을 실시하고, 아세톤에 침지하여 수화를 정지 시켰다. 이후 탄산화에 기간에 따른 공극구조 및 물리적 특성의 정확한 측정을 위해 상부 면을 제외한 나머지 면은 알루미늄 테이프로 밀봉하여 탄산가스의 투입을 방지하였다. 그리고, 공극 구조 분석에 영향이 있을 것으로 판단되어 하부 면에 종이를 덧대어 알루미늄 테이프의 접착부가 발생하지 않도록 처리하였다. 촉진 탄산화는 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$, 이산화탄소 20%의 조건에서 진행하였으며, 탄산화 진행이 완료된 시험체는 각 재령마다 아세톤에 침지하고 내부 수분과 이산화탄소를 제거하여, 목표 재령 이후의 탄산화 반응을 억제하였다.

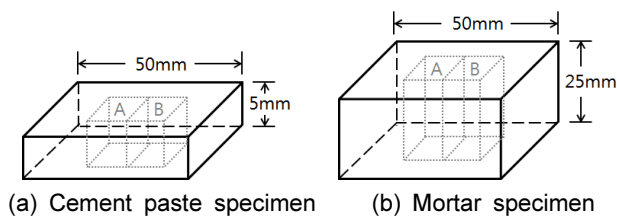
시험 항목별 시험체 재단 계획을 Fig. 5에 나타내었다. 알루미늄 테이프 접착면이 발생 되지 않는 내부의 A, B 부분을 재단하여 각각 공극 구조 분석 및 밀도, 흡수율 시험을 수행하였다.

2.2 촉진 탄산화에 의한 세공 구조

탄산화 진행에 의한 공극 구조의 변화 분석을 위해 Fig. 5-A의 형태로 재단한 각각의 시험체를 직경 5 mm 정도의 시료로 제작하고, Micromeritics Instrument사의 기공율 분석기(Porosimeter, AutoPore IV 9520)를 이용하여 수은 압입법에 의한 시료 내의 기공의 크기 측정(Mercury Intrusion Porosimetry; MIP)을 실시하였다.

2.3 촉진 탄산화에 의한 물리적 특성

탄산화 진행에 의한 물리적 특성 변화 분석을 위해



*A : Specimen of pore size distribution
B : Specimen of density and water absorption

Fig. 5 Plans of cutting off specimens

Table 2 MIP of cement pastes according to the duration of carbonation

Specimens	Total intrusion volume (ml/g)	Pore diameter (4V/A) (nm)	Total pore area (m ² /g)	Bulk density (g/ml)	Porosity (%)
Uncarbonated	0.241	9.5	100.89	1.05	25.4
Carbonated for 7d	0.129	9.9	52.52	1.61	20.8
Carbonated for 14d	0.092	9.4	39.37	1.87	17.2
Carbonated for 21d	0.133	9.1	58.46	1.94	20.5

Fig. 5-B의 형태로 재단한 각각의 시험체를 Mirage사 전자 밀도계(Electronic Densimeter, EW-200SG)를 이용하여 밀도 시험을 수행하고, 굵은 골재 흡수율 시험(KS F 2503)와 동일한 방법으로 흡수율 시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 Mercury Intrusion Porosimetry 시험 결과

3.1.1 시멘트 페이스트

탄산화 기간에 따른 시멘트 페이스트 시험체의 MIP 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한, 탄산화 기간에 따른 시멘트 페이스트 시험체 내부의 세공 분포를 Fig. 6에 나타내었고, 누적 세공량을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8에서 보여 주는 것과 같이 모세관 공극은 0.01 μm ~1 μm 의 범위로 알려져 있으며,¹⁴⁻¹⁵⁾ 탄산화가 진행됨에 따라 탄산칼슘

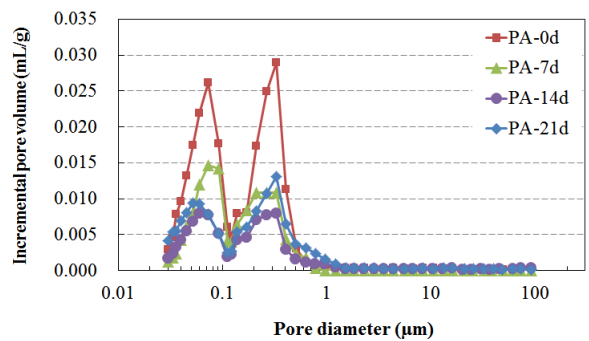


Fig. 6 Pore size distribution of cement paste according to the duration of carbonation

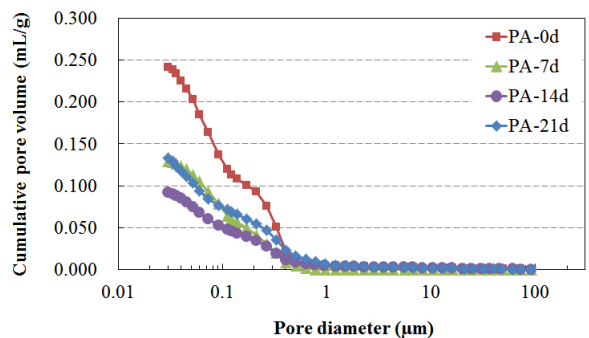


Fig. 7 Cumulative pore volume of cement paste according to the duration of carbonation

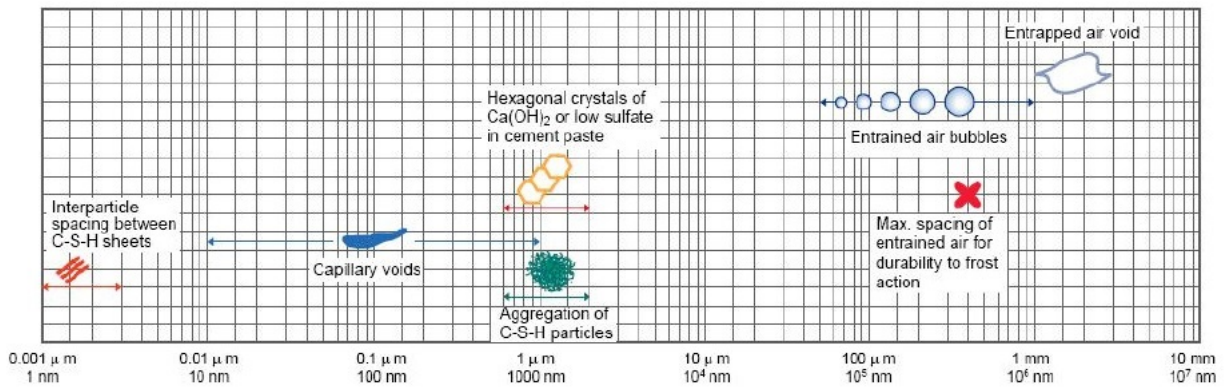


Fig. 8 Pore sizes in concrete¹⁵⁾

의 생성에 의해 공극이 충전되는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 재령 14일 이후 공극이 증가하는 결과를 나타내었고, 이것은 C-S-H의 탄산화에 따른 C-S-H 분자구조의 붕괴에 기인된 것으로 추정된다.¹⁶⁾ 또한, C-S-H의 탄산화에 의해 공극이 증가하는 것은 탄산칼슘의 생성에 의해 공극이 저장되는 체적보다 C-S-H 분자구조의 붕괴에 의해 공극이 증가하는 체적이 크기 때문으로 사료된다. 그리고 C-S-H의 탄산화에 의한 분자구조의 붕괴에 따른 공극 증가는 0.1~1 μm 범위에서 발생하였으며, 내포하고 있는 공극 범위 중 상대적으로 큰 공극 범위에서부터 발생하였다.

탄산화 기간에 따른 시멘트 페이스트 시험체 내부의 총 세공량을 Fig. 9에 나타내었다. 총 세공량은 촉진 탄산화가 진행됨에 따라 재령 14일까지 충전되는 결과를 나타내었지만, 14일 이후 다시 증가하는 결과를 나타냈다. 따라서, 공극 충전 효과가 가장 우수한 재령 14일을 탄산화 개질 제한 기간으로 설정하였다. 또한, 이 결과를 선

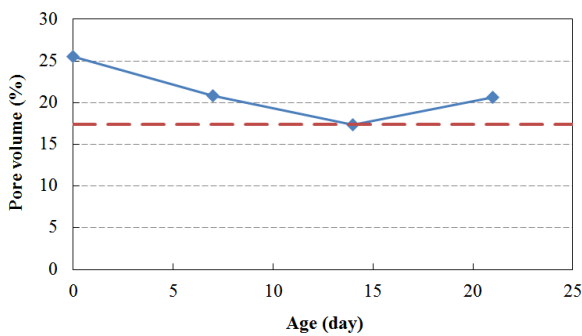


Fig. 9 Total pore volume of the cement paste

Table 3 MIP of mortar according to the duration of carbonation

Specimens	Total intrusion volume (ml/g)	Pore diameter (4V/A) (nm)	Total pore area (m ² /g)	Bulk density (g/ml)	Porosity (%)
Uncarbonated	0.095	13.5	28.05	1.92	18.3
Carbonated for 7d	0.096	13.4	28.61	1.97	18.9
Carbonated for 14d	0.093	13.9	26.81	1.95	18.2
Carbonated for 21d	0.098	15.2	25.78	1.93	18.9

행 연구의 열중량분석(Thermogravimetric Analysis; TGA) 결과와 비교하면 탄산화 과정에서 시멘트 경화체가 탄산화에 의해 공극 충전 효과가 최대가 되는 것은 수산화칼슘의 탄산화와 수산화칼슘 이외의 수화물의 탄산화가 일정량 진행된 시점이며, 탄산화에 의해 생성되는 탄산칼슘의 공극 충전 효과에 기인한 것이라고 사료된다. 또한, 촉진 탄산화 기간 14일 이후 세공량이 증가하는 것은 C-S-H의 붕괴에 의해 공극량이 늘어난 것으로 판단된다.¹⁶⁾ 따라서, 촉진 탄산화 재령 14일 이후에는 시멘트 경화체의 강도가 약화될 것으로 판단되며, 탄산화 개질 제한 기간을 초과한 경우에는 순환 골재의 품질향상 효과에 악영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.

3.1.2 모르타르

탄산화 기간에 따른 모르타르 시험체의 MIP 결과를 Table 3에 나타내었다. 또한, 탄산화 기간에 따른 모르타르 시험체 내부의 세공 분포를 Fig. 10에 나타내었고, 누적 세공량을 Fig. 11에 나타내었다. 모르타르 시험체에서도 시멘트 페이스트와 동일한 메커니즘으로 모세관 공극의 범위 내에서 체적이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 탄산화 14일 이후의 공극 증가 역시 시멘트 페이스트와 동일한 메커니즘으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한, C-S-H의 탄산화에 의한 분자구조의 붕괴에 따른 공극 증가는 시멘트 페이스트와 동일하게 내포하고 있는 공극 범위 중 상대적으로 큰 공극 범위에서부터 발생하였으나, 시멘트 페이스트에 비하여 큰 공극을 내포하고 있어 0.3~30 μm 범위에서 발생하였다.

탄산화 기간에 따른 모르타르 시험체 내부의 총 세공

량을 Fig. 12에 나타내었다. 총 세공량은 촉진 탄산화 재령 14일에서 공극 충전 효과가 가장 우수한 결과를 나타내었고, 재령 14일 이후 다시 증가하는 것으로 나타났다. 모르타르 시험체에서도 탄산화 개질 제한 기간을 초과한 경우에는 순환 골재의 품질향상 효과에 악영향을 미칠

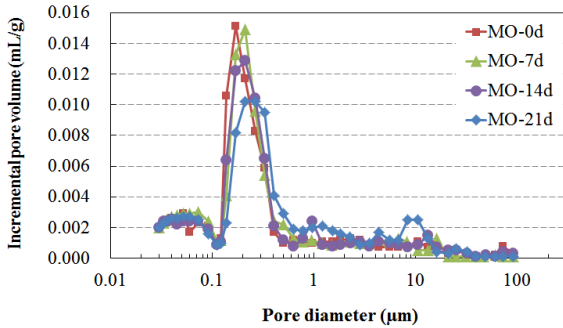


Fig. 10 Pore size distribution of mortar according to the duration of carbonation

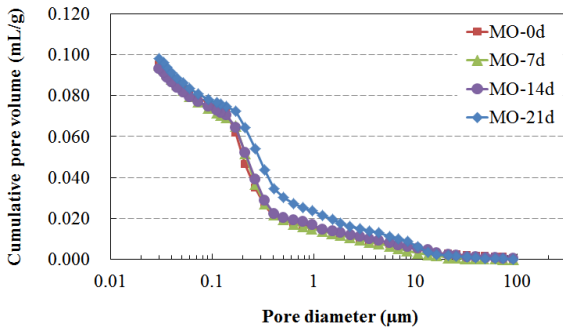


Fig. 11 Cumulative pore volume of mortar according to the duration of carbonation

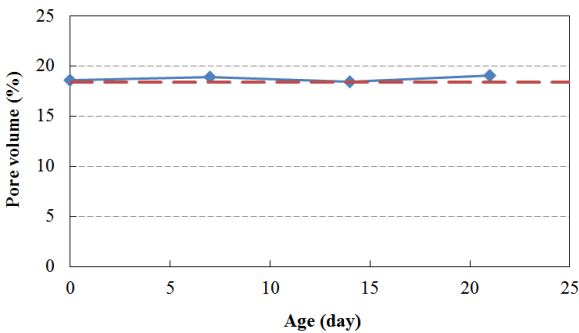


Fig. 12 Total pore volume of mortar

수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 시멘트 페이스트와 동등하게 세공량이 가장 작아지는 재령 14일을 탄산화 개질 제한 기간으로 설정하였다. 선행 연구의 TGA 결과에서 탄산화 기간 21일에서 시멘트 페이스트의 경우 공극 충전 효과에 기인하는 탄산칼슘이 18.59%, 모르타르의 경우 3.80%가 생성되어 확연한 차이를 보이는 결과로 확인할 수 있다. 시멘트 페이스트와 모르타르의 세공량 차이를 보이는 것은 탄산화 반응에 영향이 없는 잔골재를 포함하고 있음에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 밀도 및 흡수율 시험 결과

3.2.1 시멘트 페이스트

탄산화 기간에 따른 시멘트 페이스트 시험체의 밀도와 흡수율의 변화를 Table 4 및 Fig. 13에 나타내었다. 탄산화가 진행됨에 따라 흡수율은 감소하며, 밀도는 반대로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 재령 14일 이후 흡수율은 일부 증가하며, 밀도는 감소하는 경향을 나타내었다.

절건밀도는 절대 용적 내의 공극에 수분이 전부 제거된 상태인 골재 입자만의 밀도이며, 표건밀도는 단위 용적 내의 공극에 수분이 완전히 차있는 상태에서의 밀도로 골재의 함수 상태를 나타낸다 이에 따라, 흡수율은 단위체적 내의 공극에 따라 결정된다.

절건밀도 값에서 변화를 확연하게 보이고 있으며, 순환 골재의 밀도 기준 또한 절건밀도로 규정하고 있다.³⁾

수산화칼슘의 비중은 2.24이며 탄산칼슘(Calcite)의 비중이 2.70이기 때문에, 탄산화에 의해 생성된 탄산칼슘의

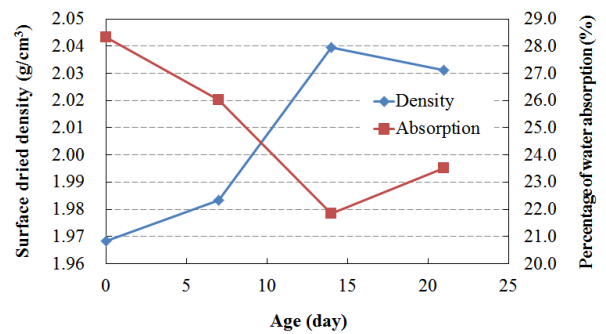


Fig. 13 Density and absorption of cement paste according to the duration of carbonation

Table 4 Density and absorption of cement paste according to the duration of carbonation

Specimens	Surface dried density (g/cm ³)	Absolute dried density (g/cm ³)	Absorption (%)
Uncarbonated	1.97	1.53	28.31
Carbonated for 7d	1.98	1.57	26.02
Carbonated for 14d	2.04	1.67	21.85
Carbonated for 21d	2.03	1.65	23.50

증가로 밀도가 상승하였으며, 탄산칼슘은 공극 내에서 석출하기 때문에, 시멘트 경화체를 밀실하게 하여 흡수율이 감소된 것으로 판단된다.

3.2.2 모르타르

탄산화 기간에 따른 모르타르 시험체의 밀도와 흡수율의 변화를 Table 5 및 Fig. 14에 나타내었다. 모르타르 시험체에서도 시멘트 페이스트와 동일한 메커니즘으로 탄산화에 의해 생성된 탄산칼슘의 증가로 밀도가 상승하였으며, 탄산칼슘은 공극 내에서 석출하기 때문에 시멘트 경화체를 밀실하게 하여 흡수율이 감소된 것으로 생각된다. 또한, 시멘트 페이스트에 비해 변화가 확연하지 않은 것은 탄산화 반응에 영향이 없는 잔골재를 포함하고 있음에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 순환 골재의 탄산화 개질에 의한 물리적 특성 평가를 위하여, 선행 연구를 통해 도출된 순환 잔 골재와 순환 굵은 골재의 부착 이질재 두께와 화학적 정량분석을 통하여 각 부착 두께에 적합한 탄산화 기간을 기반으로 수행하였다.

이질재 두께에 기초한 순환 골재의 부착 시멘트 페이스트 및 모르타르의 모의 시험체를 제작하여 촉진 탄산화를 실시하고, 선행 연구를 통해 도출된 각 부착 두께에 적합한 탄산화 기간을 토대로 탄산화 진행에 따른 공극 구조 특성 및 물리적 특성 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

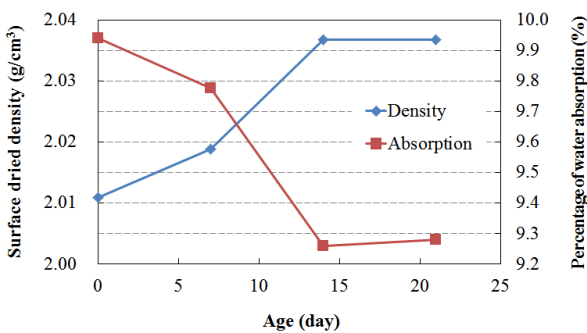


Fig. 14 Density and absorption of mortar according to the duration of carbonation

Table 5 Density and absorption of mortar according to the duration of carbonation

Specimens	Surface dried density (g/cm ³)	Absolute dried density (g/cm ³)	Absorption (%)
Uncarbonated	2.01	1.83	9.94
Carbonated for 7d	2.02	1.84	9.78
Carbonated for 14d	2.04	1.86	9.26
Carbonated for 21d	2.04	1.86	9.28

- 1) 부착 이질재를 가정한 모의 시험체에서 탄산화가 진행됨에 따라 탄산칼슘의 생성에 의해 0.01~1 μm 범위의 미세관 공극이 감소되는 경향을 나타내었다. 그러나, 재령 14일 이후 공극이 증가하는 결과를 나타내었고, 이것은 C-S-H의 탄산화에 따른 C-S-H 분자구조의 붕괴에 기인된 것으로 추정된다.
- 2) C-S-H의 탄산화에 의해 공극이 증가하는 것은 탄산칼슘의 생성에 의해 공극이 저감되는 체적보다 C-S-H 분자구조의 붕괴에 의해 공극이 증가하는 체적이 크기 때문으로 사료된다. 그리고, C-S-H의 탄산화에 의한 분자구조의 붕괴에 따른 공극 증가는 각 부착 이질재가 내포하고 있는 공극범위 중 상대적으로 큰 공극 범위에서 부터 발생하였다.
- 3) 총 세공량은 촉진 탄산화가 진행됨에 따라 재령 14일까지 충전되는 결과를 나타내었지만, 이후 다시 증가하는 결과를 나타냈다. 따라서, 공극 충전 효과가 가장 우수한 재령 14일을 탄산화 개질 제한 기간으로 설정하였다. 또한, 탄산화 개질 기간을 초과한 경우에는 순환 골재의 품질 향상에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 탄산화가 진행됨에 따라 흡수율은 감소하며, 밀도는 반대로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 탄산화에 의해 생성된 탄산칼슘의 증가로 밀도가 상승하였으며, 탄산칼슘은 공극 내에서 석출하기 때문에 시멘트 경화체를 밀실하게 하여 흡수율이 감소된 것으로 판단된다.
- 5) 부착 이질재의 두께에 적합한 탄산화 개질 기간에 대한 선행 연구와 본 연구의 탄산화 기간에 의한 공극 구조 및 물리적 특성 시험 결과를 종합하여 순환 잔 골재의 최적 탄산화 개질 기간은 4일, 순환 굵은 골재의 최적 탄산화 개질 기간은 14일로 도출하였다.
- 6) 따라서, 선행연구에서 도출된 화학적 특성과 본 연구에서 도출된 물리적 특성을 종합한 결과 부착 이질재의 탄산화 개질에 따른 흡수율 저감, 밀도 향상에 의해 순환 골재의 품질향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 향후, 본 기술의 실용화를 위해서는 탄산화 개질에 의한 순환 골재 및 이를 이용한 순환 콘크리트의 품질 개선 효과에 대한 검토가 필요 할 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. Waste Resources Management Division, Construction Waste Recycling Promotion Act, Law No. 13527, Ministry of environment, 2015, pp.1-20.
3. Technology Policy Division, Quality Standard of Recycled Aggregate, Bulletin No. 2013-92, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013, pp.5-82.
4. Tam, V.W.Y., Gao, X.F., and Tam, C.M., "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.6, 2005, pp.1195-1203.
5. Xiao, J., Li, W., Fan, Y., and Huang, X., "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Construction and Building Materials*, Vol.31, 2012, pp.364-383.
6. Behnood, A., Gharehveran, M.M., Asl, F.G., and Ameri, M., "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash", *Construction and Building Materials*, Vol.96, 2015, pp.172-180.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Alexander, S.B., Jefferay, R.R., and Andres, S., "Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.79, 2015, pp.83-89.
11. 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.
12. Song, I.H., and Ryou, J.S., "Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol.72, 2014, pp.56-64.
13. Power, T.C., *A Hypothesis of Carbonation Shrinkage*, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol.4, No.2, 1962, pp.40-50.
14. Yamada, J., Ariizumi, M., Knowledge of Descriptive Cement and Concrete, Kajima Co., 1989, pp.71-76.
15. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., *Concrete : Microstructure, Properties and Materials : Third edition*, McGraw-Hill, New York, 2005. p.31.
16. Kunieda, Y., Research on Low-Quality Recycled Aggregate Reforming Technology by Accelerated Carbonation, Graduate School of Engineering, University of Tokyo master's thesis, 2010, pp.139-140.

요 약 현재, 해체되는 콘크리트는 연간 4000만톤에 이르고 있고, 전체 건설폐기물 중에서 60.8%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 중의 약 97.5%는 재활용 되고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 폐 콘크리트의 사용용도는 대부분 저부가가치 산업에 머물고 있는 실정이며, 향후 건축물의 노후화로 더욱 증가하는 폐 콘크리트의 발생량을 감안하면 구조용 콘크리트로의 전용이 절실하다. 따라서, 본 연구에서는 순환 골재를 구조용 콘크리트로의 적용을 위하여 부착 이질재(시멘트 페이스트 및 모르타르)의 촉진 탄산화 개질 방법을 이용하여 순환 골재의 품질 향상을 위한 최적 개질 기간의 추정을 목적으로 한다. 선행 연구를 통해 도출된 순환 골재의 부착 이질재 두께와 각 부착 두께에 적합한 탄산화 기간을 바탕으로 촉진 탄산화 진행에 따른 공극구조 특성 및 물리적 특성 변화를 분석하였다. 그 결과, 탄산화가 진행됨에 따라 부착 이질재의 세공량과 흡수율이 감소하고, 밀도는 증가하여 품질이 향상되는 경향을 나타내었으나, 일정 재령 이후에는 경향이 역전되어 품질이 저하하는 결과를 나타내었다. 따라서, 선행 연구 결과와 본 연구 시험 결과를 종합하여 순환 잔 골재와 순환 굵은 골재의 최적 탄산화 개질기간을 각각 4일, 14일로 제안하였다.

핵심용어 : 순환 골재, 부착 시멘트 페이스트, 부착 모르타르, 촉진 탄산화, 공극구조