

순환잔골재를 혼입한 자기충전 콘크리트의 현장적용을 위한 실험적 연구

An Experimental Study on Field Application of Self-Compacting Concrete Using Recycled Fine Aggregate

류 재 석¹⁾ 송 일 현^{2)*}
Ryou, Jae Suk Song, Il Hyun

Abstract

The purpose of this study, looking to which the recycled fine aggregates from waste concrete have a lot of problems as a material for structure purpose, is applying the recycled fine aggregate to Self-Compacting Concrete(In the reminder of this paper, it often referred to as SCC) by using the characteristic which the powder containing the recycled fine aggregates can increase strength and liquidity. In this study, that is, the recycled fine aggregate powder is appropriate for developing high strength(over 40 MPa) and liquidity(JSCE 2 grade), the characteristic of the SCC and it was increased the ratio of mixing the recycled fine aggregates emerging from waste concrete and the normal fine aggregates by 25%, making differential in total 5 levels and applied to SCC. After all, this study was reviewed the physical properties of the fresh concrete, analyzed the mechanical properties and durability of the hardening concrete and tried to ensure the possibility of utilizing the recycled fine aggregates as a material for SCC. As a result, this study reached a conclusion that among the 5-level replacement ratios of the physical, mechanical analysis and the durability characteristics, the normal fine aggregates could be applied up to a replacement ratio of 50% more than the recycled fine aggregates and resulted in a deterioration in performance the replacement ratio larger than 50%. It is judged that the applicability of the real structures should be followed up in order to check the possibility of applying the recycled fine aggregates to real life.

Keywords : Waste concrete, Recycled fine aggregate, Self-compacting concrete, Powder, Replacement ratio

1. 서론

최근 구조물의 초대형화, 초장대화 및 복잡한 구조물의 출현은 설계뿐만 아니라 시공상에서도 많은 어려움을 갖고 있다. 콘크리트 구조물의 구조적 성능을 개선시키기 위해 보강 철근의 과밀 배근이 증가하면서 거푸집내의 채움 정도를 확보하기 위해 유동성이 높은 콘크리트의 사용이 증가하고 있으며, 별도의 다짐 없이 과밀 배근된 거푸집의 구석까지 채울 수 있는 고성능 콘크리트의 필요성으로 인해 자기충전 콘크리트란 개념이 소개 되었다.

지난 반세기 동안 우리나라는 역사적으로 유례없는 급속한 경제성장을 이루었으며, 그 결과 물질적 풍요 및 삶의 질은 한층 더 높아졌지만 한편으로는 개발중심의 성장 논리에 가려 무분별한 환경오염과 생태계 파괴가 별다른

규제 없이 목인되어온 것 또한 부정할 수 없는 사실이다. 따라서 전 세계적 또는 국내에서는 개발과 환경 보전 및 인간 삶의 질을 고루 갖출 수 있는 방안에 대한 관심이 증가하면서부터 건설폐기물의 부산물인 순환골재를 천연골재 대체재로 재활용하는 연구가 진행되고 있다(김종필 등, 2007, 문대중 등, 2008). 환경부 통계연감에 따르면 2008년도를 기준으로 건설폐기물 총 발생량은 64,403천톤/년으로, 2006년도 61,679천톤/년, 2007년도 62,781천톤/년 대비 각각 약 4.4%와 2.5%가 증가함을 알 수 있었고, 그중에서 폐콘크리트의 경우 2006년 40,258천톤/년, 2007년 43,021천톤/년, 2008년 42,282천톤/년으로 조금의 증감을 나타내었으며, 폐아스팔트콘크리트의 경우 2006~2008년까지 7,911천톤/년, 8,094천톤/년, 9,231천톤/년을 각각 나타내고 있음을 알 수 있었다(환경부,

1) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수

2) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

* Corresponding author : sihsihlove@daum.net 02-2220-4323

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2009). 이와 같이 건설폐기물의 총 발생량은 꾸준한 증가를 보여 왔으며, 폐자재로 배출자신고, 수집·운반·보관, 처리 등 재활용 촉진을 위한 업무가 일관성 및 신뢰성 있게 처리된다면 재활용 측면에서 구조용 재료로 충분히 사용 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해 정부에서는 지난 '03년 12월 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」을 제정하였고, '06년 03월 「건설폐기물 처리기준 및 방법 등에 관한 업무처리 지침」을 개정하는 한편, '순환골재 품질 기준 및 품질인증제도'와 '순환골재 의무 사용량 고시', '건설폐기물 재활용 기본계획('07~'11)'등을 마련하여 시행하는 등 재생골재의 사용 활성화 정책을 강도 높게 추진하고 있다(한국건설자원협회, 2008). 그러나 순환골재는 일반골재에 비해 품질이 떨어져 국내에선 아직까지 실구조물에 적용된 사례가 드물며, 부가가치가 비교적 적은 도로공사, 건설공사의 성·복토 및 매입용 재료로 사용되고 있는 실정이다.(김무한, 1998)

따라서, 본 연구에서는 순환골재가 구조용 재료로서 많은 문제점을 갖고 있음을 인지하고 순환골재가 포함하고 있는 미분말이 강도증진과 유동성을 향상 시킬 수 있다는 특성을 이용하여 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete, SCC)에 적용하게 되었다. 즉, 순환골재가 갖는 미분말이 SCC 특성인 고강도와 높은 유동성을 발휘하기에 적당하여 순환골재를 일반골재 대비 25%씩 혼입률을 증가시켜, 총 5수준으로 SCC에 적용하였으며, 이에 따라 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성, 경화한 콘크리트의 역학적 및 내구 특성을 검토 수행하였다.

2. 순환골재를 혼입한 자기충전 콘크리트의 연구 배경

콘크리트에서 재료 분리는 충전하는 동안 과도한 진동기 사용과 타설 높이가 높은 구조물 및 철근이 과밀하게 배근된 구조물에서 특히 많이 발생한다. 그래서 유동성 있는 시멘트 페이스트 속에서 떠돌아다니는 골재 입자가 불안정한 분산으로 거동할 때와 높은 전단변형률에 노출됐을 때 이를 하나의 복합계로서 안정시킬 수 있는 SCC가 개발 되었다.

자기충전 콘크리트란 개념은 콘크리트의 내구성 관련을 위한 해결책으로써 1986년 일본 Kochi University of Technology의 Hajime Okamura교수에 의해 처음 소개되었으며, 일본 내 구조물들의 내구성능 저하의 주된

이유는 불충분한 다짐과 비숙련공들에 의한 것으로 밝혀졌다. 이러한 자기충전 콘크리트에 대한 개발은 내구성능이 저하된 콘크리트를 조절할 수 있는 요소로 사용되었고, 불충분한 다짐 및 비숙련공들의 시공 능력 등은 시공 과정에서 점차 사라지게 되었다(Vschoon, M. 2002).

일반 콘크리트와 SCC와의 커다란 차이점은 후반부에서의 우수한 유동학적 특성이다. 전형적인 SCC는 높은 점성을 유지하면서도 별도의 진동 장비 없이 완벽한 충전 및 다짐을 할 수 있고, 약 200mm의 슬럼프 값과 600mm의 슬럼프 흐름 값을 갖는 유동화 콘크리트이다. 일반적으로 이러한 특성들은 보통 콘크리트 혼합물이 사용됐을 때 보다 더 높은 시멘트 페이스트/골재 비에 의해 얻을 수 있다(Mehta, Monterio, 1993).

일본 및 유럽 등에서 자기충전 콘크리트는 지난 수십년간 실구조물에서 널리 적용되었으며, 최근에는 미국에서도 널리 사용되고 있다. 이뿐만 아니라 스웨덴 도로청(Swedish National Road Administration)에서는 교량 시공과 더불어 주택건설, 터널굴착 등에서 자기충전 콘크리트의 사용을 권장하고 있으며, 네덜란드와 독일에서는 프리캐스트 산업에서 자기충전 콘크리트를 중심으로 개발을 추진하고 있다. 미국 또한 프리캐스트 산업(더블 티 거더(Double tee girder), 파일(Piles), 슬래브 치수 감소)에서 자기충전 콘크리트 기술 방법이 대체를 이루고 있다(Vschoon, M. 2002).

국내의 경우 콘크리트 제품은 된 반죽으로 강제 진동 또는 성형법으로 다짐해 증기양생을 실시하는 것이 일반적이다. 여기서 부재 두께가 얇고 철근이 밀실히 배근된 제품은 양호한 콘크리트의 충전이 얻어지지 않아 이러한 문제를 해결하고 제품 차별화, 제품 다양화 및 작업환경 개선 등을 위해 속경성 자기충전 콘크리트의 개발방향을 제시하였다(엄태선, 2002).

또한, 자기충전 콘크리트의 제조방법 중 가장 대표적인 분체계 자기충전 콘크리트의 문제점을 보완하기 위하여 골재 채움을 사용한 간편 배합설계 방법을 통해 자기충전 콘크리트를 제조한 후 일본토목학회(JSCE)에서 제시한 성능평가 기준안에 따라 유동성을 평가하였다(최연왕 등, 2003).

게다가 범국가적인 차원에서 건설폐기물로 인한 환경오염 및 예산 낭비 등의 이유로 폐콘크리트에서 발생하는 분말을 자기충전 콘크리트용 혼화재로 사용하기 위한 연구의 일환으로 폐콘크리트 분말이 자기충전 콘크리트의 강도특성에 미치는 영향을 고찰 하는가 한편, 건설폐기물

을 혼화제로 사용한 유사한 연구들이 많이 이루어지고 있다(최연왕 등, 2004).

최근에는 자기충전 콘크리트의 워커빌리티 특성 및 각종 시험방법의 이해를 돕는 자료로 자기충전 콘크리트의 워커빌리티 시험방법 및 성능 기준(이회근 등, 2006)을 국내 실정에 맞게 확립하는 연구들이 이루어지면서 자기충전 콘크리트에 대한 관심이 대두되기 시작하였다.

이상에서 살펴본 결과 국내에서는 자기충전 콘크리트에 관한 연구가 아직 미미한 수준에 머물러 있으며, 건설 폐기물에서 발생하는 폐콘크리트 순환잔골재를 사용한 콘크리트의 기초 물성, 역학적 특성 및 내구특성에 관한 연구는 매우 드물다고 생각된다. 따라서 국내에서의 자기충전 콘크리트 성능 기준 정립과 건설폐기물의 적절한 관리가 필요한 실정이다.

3. 실험 개요

3.1 사용 재료

3.1.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201 규정에 적합한 비중 3.15, 분말도 3,200cm²/g인 1종 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC라 약함)를 사용 하였다.

3.1.2 골재

굵은골재는 부순골재를 잔골재는 강중사와 부순골재를 혼합한 혼합골재를 각각 사용하였다. 또한 순환잔골재는 국내 I사의 콘크리트용 순환잔골재 품질 기준을 만족하는 골재를 사용하였으며, Table 1은 굵은골재 및 잔골재의 물리적 성질을 Table 2는 KS F 2573(KSCE, 2006)에서 규정하고 있는 콘크리트용 순환잔골재 품질기준 및 국내 I사 순환잔골재의 품질을 비교하여 나타냈다.

3.1.3 혼화재료

콘크리트 작업환경 확보 및 슬럼프 조절을 위한 국내 E사의 폴리카르본산계인 유동화제(이하 SP라 칭함)를 사

용하였고, 슬럼프 조절에 따른 재료분리 저항성을 위하여 증점제(이하 AD라 칭함)를 겸용하였으며, 이들의 물리적 성질은 Table 3과 같다. 또한 콘크리트의 워커빌리티를 향상시키고 사용 수량 감소 및 수밀성을 크게 개선시키기 위해 비중 2.22, 분말도 3,313cm²/g인 플라이애쉬(이하 FA라 약함)를 사용하였다.

3.2 실험배합

예비배합을 통해 일반잔골재 대비 순환잔골재의 혼입률에 따른 SCC의 성능평가를 만족하는 기준배합을 결정하였다. 시공성과 유동성이 향상된 콘크리트의 활용이 확대되어 목표값은 설계기준압축강도 40 MPa 이상으로 하였으며, SCC의 성능평가를 만족하는 기준배합은 Table 4와 같은 일본토목학회의 “자기충전형 콘크리트의 시험방법” 2등급 성능 기준에 준하여 실시하였다(JSCE, 1999).

3.3 시험 방법

3.3.1 순환잔골재 혼입률에 따른 기초물성 시험

1) 체가름 시험

일반잔골재 대비 순환잔골재의 혼입률에 따른 골재의

Table 1 Physical properties of fine and coarse aggregate

	fine aggregate	coarse aggregate
G _{max} (mm)	-	20
Density (g/cm ³)	2.58	2.60
Absorptivity (%)	1.26	0.86
F.M.	2.49	7.30

Table 2 Comparison of quality standard of recycled fine aggregate for concrete(KS F 2573) and recycled fine aggregate

Item	Quality Standard of Recycled Fine Aggregate for Concrete(KS)	Recycled Fine Aggregate
Absorption(%)	5(↓)	4.5
Density(g/cm ³)	2.2(↑)	2.48
Abrasion loss(%)	-	-
Volume (%)	53(↑)	61

Table 3 Physical properties of superplasticizer and anti-washout agent

	Types	Specific Gravity (25℃)	pH (25℃)	Chloride Content (%)	Alkali Content (%)	Shape
Superplasticizer	Poly-carboxylic Acid System	1.06 ± 0.05	6.5 ± 1.0	0.01(↓)	0.20(↓)	Reddish-brown Liquid
Anti-washout Agent	Cellulose System	0.5	8	-	-	Whitish Powder

Table 4 Performance standard criterion by JSCE

Rank Items		1	2	3
Construction Condition	minimum gap between reinforcement (mm)	35-60	60-200	≥200
	Amount of reinforcement (kg/m^3)	≥350	100-350	≤100
Flowability	Slump Flow (mm)	600-700	600-700	500-650
Segregation Resistance	Time required to flow through V-funnel (s)	9-20	7-13	4-11
	Time required to reach 500mm of slump flow (s)	5-20	3-15	3-15
Filling height of U-box (mm)		≥300	≥300	≥300
Absolute Volume of Coarse Aggregate per Unit of SCC(m^3/m^3)		0.28-0.30	0.30-0.33	0.32-0.35

Table 5 Mix proportions of SCC according to replacement ratio of recycled fine aggregate

Replacement (%)	G_{max} (mm)	Criterion by JSCE	W/B(%)	S/a(%)	Unit Weight(kg/m^3)							
					W	C	S		G	FA	SP	AD
							Normal	Recycled				
0	20	2	35	49	191	455	807	0	851	91	6.55 (B×1.2%)	1.15 (W×0.6%)
25							605	202				
50							404	403				
75							202	605				
100							0	807				

입도상태, 조립률(Fineness Modulus, 이하 F.M.이라 약함), 골재의 적부 및 각종 골재의 적당한 비율 결정에 필요한 시험으로써 KS F 2502에 준하여 실시하였다.

2) 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험

시험방법은 KS F 2504에 의거하여 일반잔골재 대비 순환잔골재의 혼입률에 따른 일반적 성질을 판단하고, 또 콘크리트의 배합설계에 있어서 잔골재의 절대용적을 알기 위해 실시하였다. 또한 잔골재의 흡수율 시험은 잔골재 입자의 공극을 알고 콘크리트 배합의 계산에 있어 사용수량을 조절하기 위해 실시하였다.

3.3.2 굳지 않은 SCC의 시험

1) 슬럼프 플로 시험

굳지 않은 콘크리트의 반죽질기를 측정하는 방법과 동시에 워커빌리티를 판정하는 하나의 수단으로써 가장 널리 평가할 수 있는 슬럼프 플로 시험은 고유동 콘크리트 등의 슬럼프 플로 시험(KS F 2594)과 동일하다.

2) VSI(Visual Stability Index)에 의한 안정성 평가
 육안 식별 지수의 등급에 의한 콘크리트의 상태를 4(0~3)개의 등급으로 구분함으로써 SCC의 재료 분리 저항성 및 안정성을 평가한다. 육안 식별 지수의 등급과 그에 따른 콘크리트의 평가는 Table 6과 같다.

Table 6 Combined visual stability index of TR-6-03(PCI, 2003) and Master Builders(Master Builders, 2003)

Rating	Number	Criteria
Highly Stable	0	No evidence of slump segregation
Stable	1	No mortar halo
		No aggregate pile-up
		Slight bleed and air popping
Unstable	2	Just noticeable mortar halo and aggregate pile-up
		Slight mortar halo, less than 10mm
		Slight aggregate pile-up
Highly Unstable	3	Noticeable bleed
		Large mortar halo greater than 10mm

3) L-Box와 U-Box 시험

L-Box는 L형 박스에 콘크리트를 채운 후 약 1분이 경과하면 게이트를 들어 올려 콘크리트가 끝단에 도달하는 시간을 기록하고 흐름이 완전히 멈춘 후 H2/H1을 측정한다. U-Box는 U형 박스에 콘크리트를 채운 후 약 1분이 경과하면 게이트를 들어 올려 콘크리트가 반대편으로 자유롭게 흐를 수 있도록 하여 흐름이 완전히 멈춘 후 L-Box 시험과 동일하게 H2/H1을 측정하며 두 시험법 모두 1.0에 가까울수록 우수함을 나타낸다. Fig. 1, Fig. 2는 각각 L-Box와 U-Box의 단면도 및 평면도를 나타낸다(Ramage B et al. 2004).

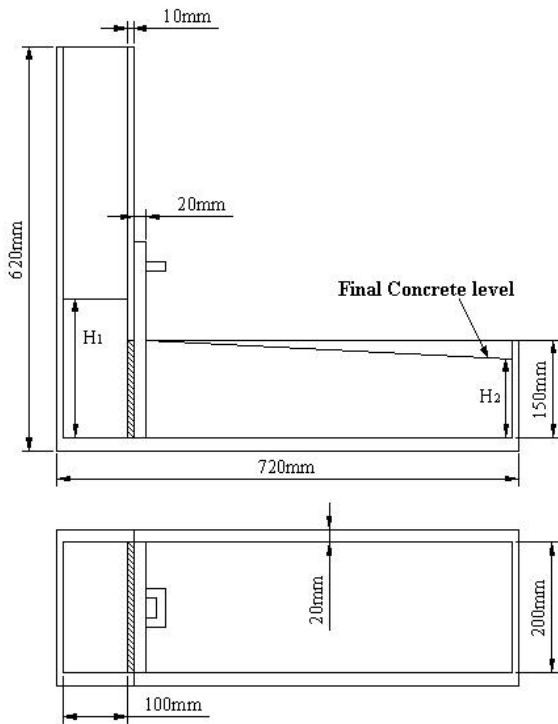


Fig. 1 L-Box Apparatus

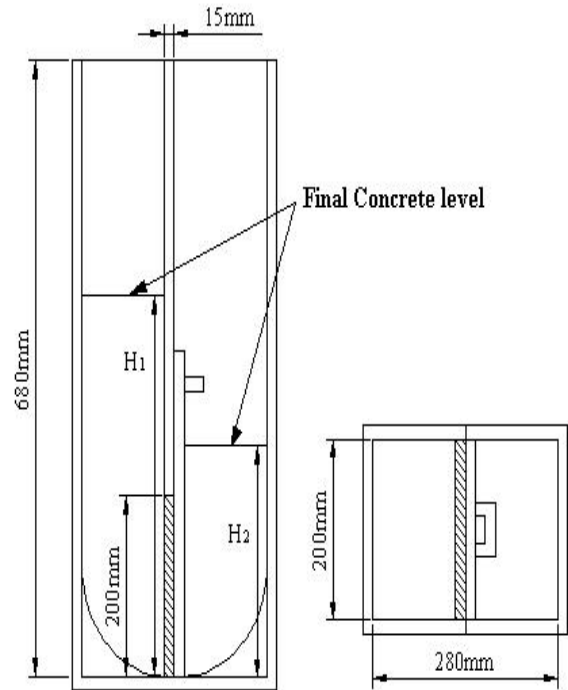


Fig. 2 U-Box Apparatus

3.3.3 경화한 SCC의 시험

1) 압축강도 시험

압축강도 공시체는 KS F 2403에 제시된 방법에 따라 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주형 공시체를 제작하였고, 재령일 동안 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중 양생을 실시한 후 KS F 2405에 제시된 방법에 따라 압축강도 시험을 실시하였다.

2) 휨강도 시험

휨강도 공시체 역시 KS F 2403에 제시된 방법에 따라 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 각주형 공시체를 제작하고 압축강도시험과 동일한 양생으로 KS F 2403에 제시된 방법에 따라 휨강도 시험을 실시하였다.

3.3.4 내구특성

1) 탄산화 깊이 측정 시험

압축강도시험에 사용된 공시체를 KS F 2596에 명시된 방법에 따라 탄산화 깊이 측정 시험을 실시하였으며, 탄산화 깊이를 측정할 때 사용하는 시약에는 KS M 0015에서 규정하고 있는 페놀프탈레인 용액 또는 이와 같은 성능을 가지는 시약을 사용하였다. 페놀프탈레인 용액은 95% 에탄올 90mL에 페놀프탈레인 분말 0.1g을 녹여 물을 첨가시켜 100mL로 하였다.

2) 염소이온 침투 저항성 시험

이 또한 압축강도시험에 사용된 공시체를 제작하여 KS F 2711에 규정된 시험방법에 따라 염소이온 침투 저항성 시험을 실시하였으며, 도출된 결과를 가지고 통과전하량에 따른 염소이온 침투성을 상대적으로 평가하였다. 또한 염화물이온의 농도 증가율이 시간에 대하여 일정한 구간을 찾아 Fick의 제1확산법칙으로부터 유도되는 식에 의해 확산계수를 평가하였다(쌍용양회공업주식회사, 2008). Table 7은 전하량에 따른 염소이온 침투성(KS F 2711)의 판정표를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 순환잔골재 혼입률에 따른 기초물성 특성

4.1.1 체가름 시험 특성

Fig. 3은 순환잔골재의 혼입률에 따른 입도 분포 곡선 결과를 나타낸 것이다. 입도분포 곡선은 골재가 크면 왼쪽으로 기울게 되고, 그중에서도 큰 입자가 많이 포함될수록 아래로 볼록해진다. 그림을 보면 혼입률이 증가함에 따라 그래프가 대체적으로 왼쪽으로 기울게 됨과 동시에

Table 7 Chloride ion permeability depending on electric current (KS F 2711)

Electric Current (C)	Chloride ion Permeability
>4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very Low
<100	Disregard

아래로 볼록해 짐을 알 수 있다. 이는 순환잔골재가 일반 잔골재 보다 큰 입자가 많이 포함되어 있음을 알 수 있고, 혼입률 75% 및 100%는 입도 분포가 불량하여 KS F 2502에 준하는 결과를 얻지 못하였다.

또한 순환잔골재 혼입률에 따른 조립물의 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 이를 보면, 순환잔골재의 혼입률이 증가함에 따라 조립물이 점진적으로 증가함을 알 수 있었고, 순환잔골재 혼입률 75% 및 100%를 제외하고는 잔골재 조립률 범위(F.M. 2.3~3.1)를 모두 만족 하였다. 특히, 순환잔골재의 혼입률이 0%일 때보다 오히려 25%를 혼입했을 때 최적 조립률 2.8을 나타내었는데, 이는 일반잔골재가 갖는 조립자와 순환잔골재가 갖는 세립자의 입도가 골고루 분포되어 일반잔골재만을 사용했을 때보다 더 조밀한 입도 분포를 가지는 것으로 판단된다.

4.1.2 밀도 및 흡수율 특성

순환잔골재의 혼입률에 따른 밀도 및 흡수율 결과는 Fig. 5와 같다. 표면건조 포화상태(Surface Saturated Dry, 이하 SSD라 약함)의 밀도는 순환잔골재의 혼입률이 증가함에 따라 비례적으로 작아졌으며, 순환잔골재의 100% 혼입은 일반잔골재만을 혼입했을 때 보다 SSD의 밀도가 약 4% 감소하였다. 이는 일반잔골재 보다 밀도가 작은 순환잔골재를 혼입함으로써 혼입률 증가에 따라 밀도가 함께 감소한 것으로 판단되며, 흡수율 또한 순환잔골재의 흡수율이 일반잔골재의 흡수율 보다 크기 때문에 순환잔골재의 혼입률이 증가할수록 흡수율 또한 동시에 증가된 것으로 판단된다. 곧, 재생골재는 일반골재에 비하여 부착모르타르의 다공성 때문에 흡수율이 높고, 밀도가 낮은 기존 연구 결과와 부합한다(김성수 등, 2009).

4.2 굳지 않은 SCC의 특성

4.2.1 슬럼프 플로 및 VSI 특성

순환잔골재의 혼입률에 따른 슬럼프 플로, 500mm 도

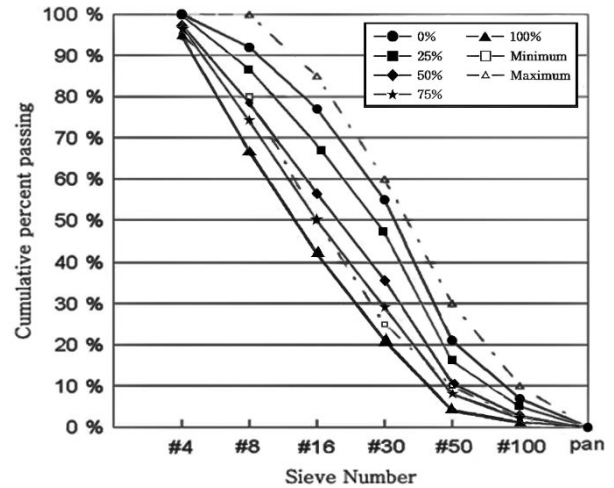


Fig. 3 Grading distribution curve depending on replacement ratio

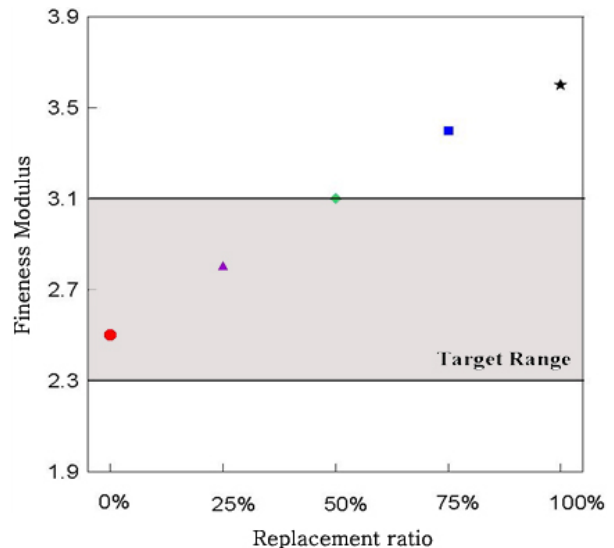


Fig. 4 F.M. depending on recycled fine aggregate replacement ratio

달시간 및 VSI를 나타낸 결과는 Table 8과 같고, 그에 대한 그래프 및 VSI 정도는 각각 Fig. 6, 7과 같다. 그 결과 슬럼프 플로 및 500mm 도달 시간은 순환잔골재 혼입률 0~50%까지는 JSCE 2등급 성능 규준에 만족하는 결과를 얻었지만 혼입률 75, 100%의 결과에서는 만족할만한 결과를 얻지 못하였으며, 혼입률이 증가할수록 슬럼프 플로는 감소하였고, 500mm 도달 시간은 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 이는 흡수율이 비교적 높은 순환잔골재의 혼입률이 증가할수록 혼합수를 흡수하면서 슬럼프 손실과 500mm 도달시간을 함께 감소시킨 것으로 판단된다.

또한 육안 식별 지수에 의한 콘크리트의 안정성 판별에

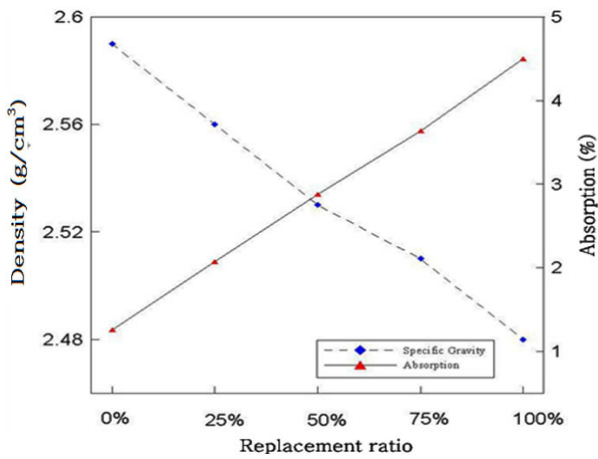


Fig. 5 Density and absorption depending on recycle fine aggregate replacement ratio

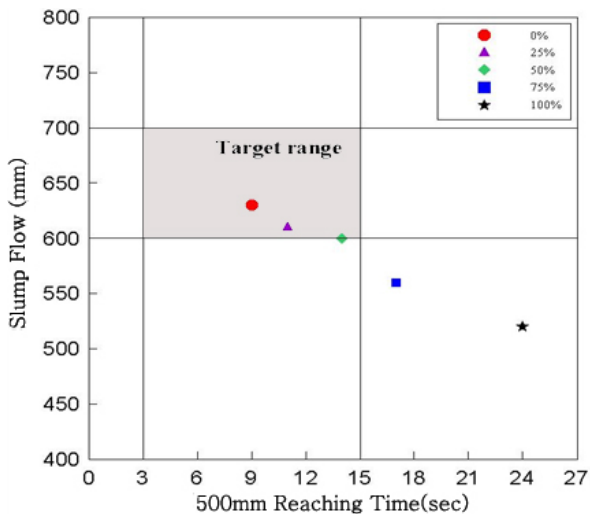


Fig. 6 500mm reaching time and slump flow depending on recycled fine aggregate replacement ratio

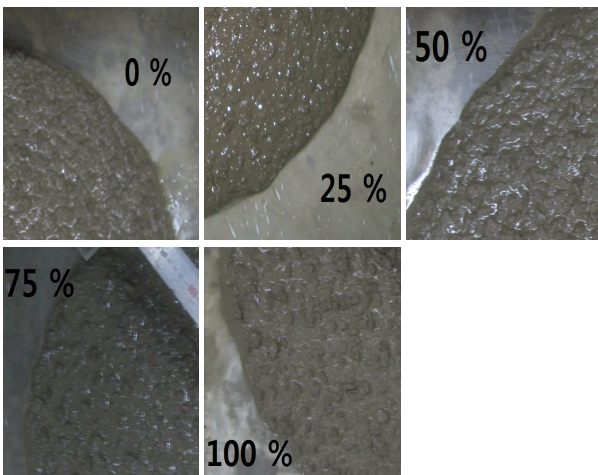


Fig. 7 VSI depending on recycled fine aggregate replacement ratio

Table 8 Slump flow and VSI depending on recycled fine aggregate replacement ratio

Replacement (%)	Slump Flow		VSI
	T_{50} (sec)	D(mm)	
0	9	630	0
25	11	610	0
50	14	600	0
75	17	560	1
100	24	520	2

서 혼입물 0~50%까지는 재료분리가 없는 높은 안정성을 보인 반면 혼입물 75%에서는 안정성, 혼입물 100%에서는 불안정성을 각각 나타내었다.

4.2.2 L-Box 및 U-Box 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 순환잔골재의 혼입률에 따른 L-Box 및 U-Box의 충전성을 슬럼프 플로와의 상관성으로 비교하여 나타낸 그래프이다. 이는 슬럼프 플로와 500mm 도달시간의 결과와 비슷한 경향을 보였으며, L-Box의 경우 0% 혼입률과 100% 혼입률은 약 1.8배의 충전 효과가 남을 알 수 있었고, U-Box의 경우 혼입률 0%와 100%는 약 1.7배의 충전 효과가 남을 알 수 있었다. L-Box의 경우 혼입률이 증가함에 따라 감소되는 슬럼프 손실이 결국 모르타르와 골재 입자 사이의 결합력을 충분히 높여 주지 못 하였기 때문인 것으로 판단되며, U-Box의 경우는 슬럼프 손실 및 재료 분리로 인해 굵은 골재가 아래로 가라앉아 게이트 부분에서의 막힘 현상 때문인 것으로 판단된다.

4.3 경화한 SCC의 특성

4.3.1 압축강도 특성

순환잔골재의 혼입률에 따른 자기충전 콘크리트의 재령별 압축강도 시험결과는 Fig. 10과 같다. 이를 보면 0% 혼입률의 경우 처음 3일 압축강도는 22 MPa로 100% 혼입물 22 MPa의 경우와 같이 낮은 압축강도를 나타냈으나 7일 이후 강도가 점차 발현됨을 알 수 있었고, 순환잔골재의 25% 혼입률이 재령 28일까지에서 가장 큰 압축강도를 나타내었는데, 이는 혼입물 25%일 때의 잔골재 조립률이 2.8로 최적조립률과 동시에 강도, 수밀성 등 소요의 품질의 콘크리트를 만들었기 때문인 것으로 판단된다.

또한 28일 이후의 강도 특성을 살펴보면 순환잔골재의

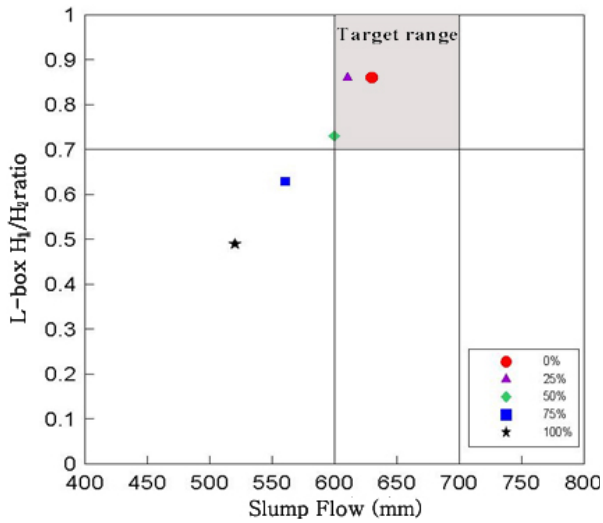


Fig. 8 Relation between slump flow and L-Box

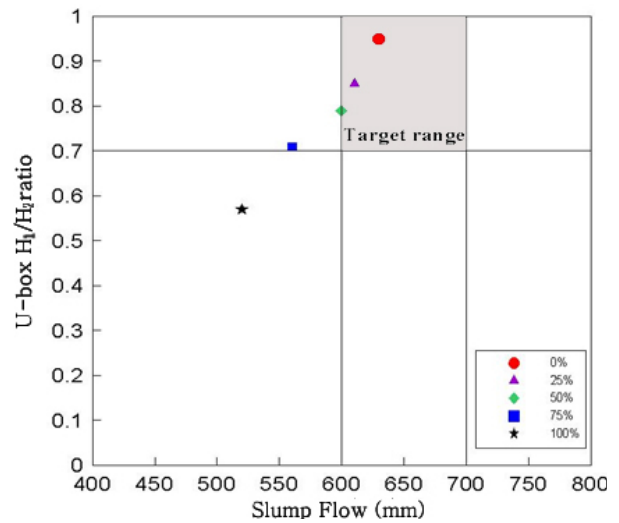


Fig. 9 Relation between slump flow and U-Box

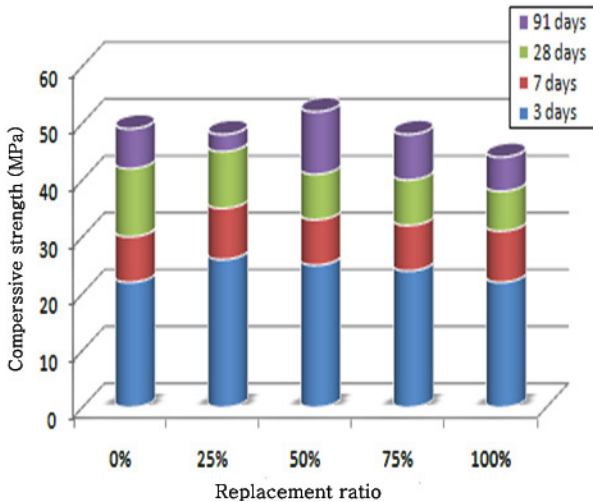


Fig. 10 Compressive strength depending on recycled fine aggregate replacement ratio

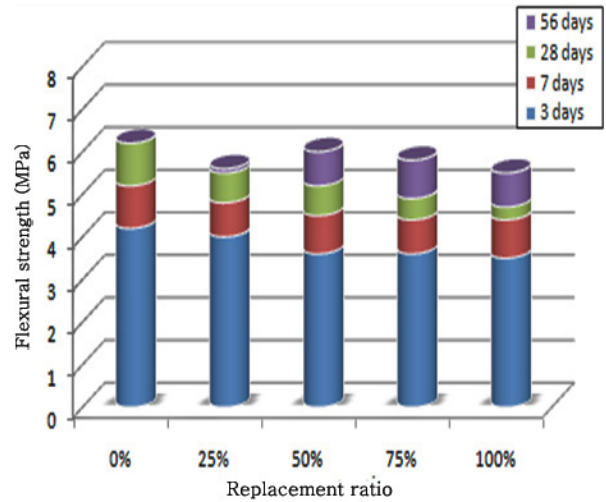


Fig. 11 Flexural strength depending on recycled fine aggregate replacement ratio

혼입률이 높을수록 강도 증가폭이 더 큼을 알 수 있었으며, 특히 장기 강도 91일 에서는 혼입률 0% 및 25%에서 강도 발현이 더디게 일어난 반면 혼입률 50~100%에서는 강도의 증가 폭이 확연하게 일어남을 알 수 있었다. 이는 순환잔골재 속에 포함된 미반응 수화물이 반응과 더불어 micro-filler 역할을 수행함으로써 시멘트페이스트의 미세공극을 충전하여 밀실한 콘크리트를 만들고 동시에 전체적으로 플라이애쉬의 첨가로 인해 장기 강도 발현률이 증가한 것으로 판단된다.

4.3.2 휨강도 특성

순환잔골재의 혼입률과 그에 따른 자기충전 콘크리트

의 재령별 휨강도를 나타낸 결과는 Fig. 11과 같다. 이를 분석해 보면, 재령 28일에서 순환잔골재를 혼입하지 않은 경우부터 혼입률이 25, 50, 75, 100%로 증가함에 따라 각각 6.2, 5.5, 5.2, 4.9, 4.7 MPa로 나타나 순환잔골재의 혼입률이 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 28일 이후 장기 강도 특성을 살펴보면 순환잔골재의 혼입률 0, 25%에서는 각각 6.2, 5.4 MPa로 28일의 6.2, 5.5 MPa와 별다른 차이가 없었지만 혼입률 50, 75, 100%에서는 28일 이후에 각각 6.0, 5.8, 5.5 MPa로 상대적인 소폭 증가를 나타내었다. 이는 압축강도 특성에서와 마찬가지로 순환잔골재 속에 포함된 미반응 수화물의 micro-filler 역할과 플라이애쉬의 첨가로 장기

강도 발현률이 증가한 것으로 판단된다.

4.4 내구특성

4.4.1 탄산화 깊이 측정 평가

KS F 2596에 제시된 방법에 따라 순환잔골재의 혼입률에 따른 재령별 탄산화 깊이를 나타낸 그래프는 Fig. 12와 같고, Fig. 13은 탄산화 정도를 나타낸다. 이를 보면 순환잔골재의 혼입률에 따른 탄산화 침투깊이는 순환잔골재의 혼입률이 증가함에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 그중 노출시간에 따른 침투 깊이는 혼입률이 25%일 때 가장 우수한 저항성을 가진 것으로 나타났다. 이는 순환잔골재에 포함된 미분말이 순환잔골재 혼입률 25%에서 최적 조립률 2.8을 갖게 함과 동시에 미분말 입자가 시멘트페이스트의 미세공극에 충전되어 투수성이 저하돼 유해물질의 침투성이 저하된 것으로 판단되며, 또한 혼입률 25%에서 우수한 micro-filler 작용을 하여 역학적으로 밀실한 콘크리트를 만드는 등 혼입률 0, 50, 75 및 100% 보다 수밀성이 높은 소요의 품질의 콘크리트를 만들었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 최종 노출 시간에서는 혼입률 0%와 25%에서 비슷한 침투 저항성을 보인 반면 혼입률 50, 75, 100%에서는 혼입률의 증가에 따라 비례적으로 낮은 저항성을 가짐을 알 수 있었다.

또한 혼입률 0%와 100%의 침투 깊이는 약 25%의 차

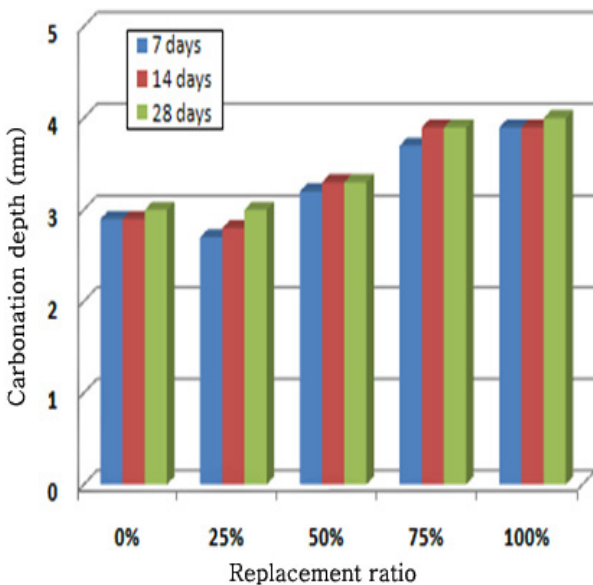


Fig. 12 Carbonation depth depending on recycled fine aggregate replacement ratio

이를 나타내었는데, 이는 순환잔골재의 입도 또는 조립률이 비교적 고르지 못해서 투수성의 증가와 함께 유해 물질의 침투 깊이가 일반잔골재를 사용했을 때보다 순환잔골재를 사용했을 때 그만큼 크다는 것을 알 수 있었다.

4.4.2 염소이온 침투 저항성 평가

순환잔골재의 혼입률에 따른 시험체별 염화물 이온의 침투 깊이의 결과는 시험이 종료된 후 시편을 접착면과 직각방향으로 할렬시켜 0.1N AgNO₃ 용액 분무에 의한 염화물이온 침투깊이를 Fig. 14에, 그리고 그에 따른 통과전하량 및 확산계수의 결과를 Fig. 15에 각각 나타내었다. 시험결과로부터 염소이온 침투성을 살펴보면, 총 통과전하량이 1000~2000으로 판정등급이 모두 “낮음”으로 나타났으며, 시험체간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 순환잔골재가 가지고 있는 물리·화학적 성질이 콘크리트용 순환잔골재 품질기준에 만족하면 어느 정도 사용이 가능한 것으로 판단된다.

또한 염소이온의 침투 깊이는 혼입률에 따라 비슷한 것을 육안 및 측정으로부터 확인할 수 있었으며, 특히 순환잔골재 혼입률 25%일 때 통과전하량, 확산계수 및 침투 깊이가 가장 낮았고, 그 외에는 혼입률이 증가할수록 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 전자는 탄산화 깊이 측정 평가 때의 투수성 감소 원인과 후자는 순환잔골재의 혼입률이 증가함에 따라 순환잔골재 표면에 부착된 노후

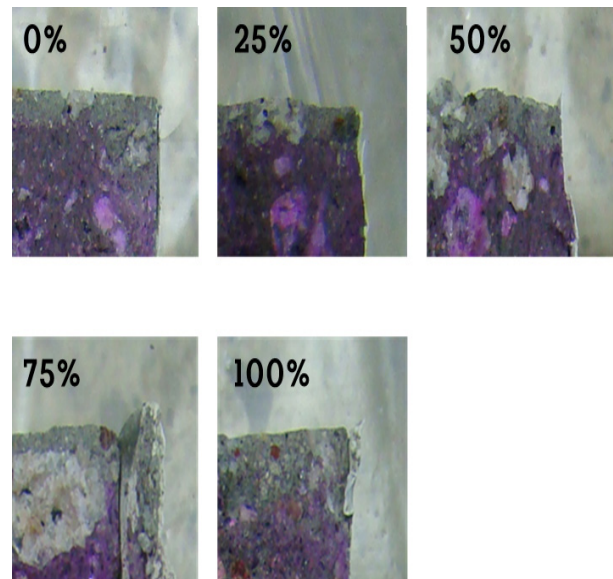


Fig. 13 Carbonation degree depending on recycled fine aggregate replacement ratio

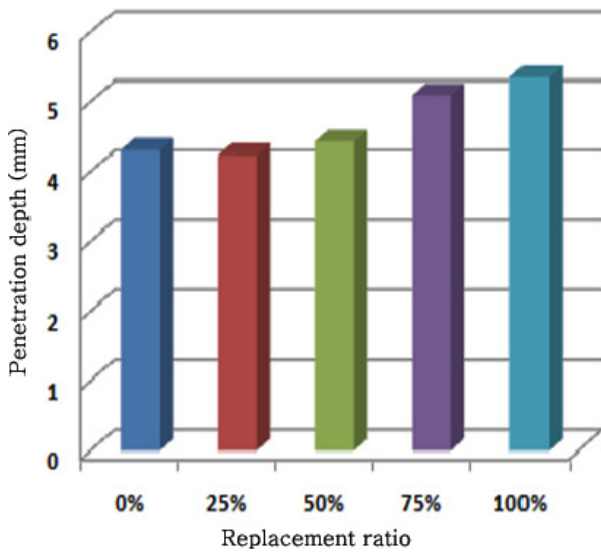


Fig. 14 Chloride penetration depth depending on recycled fine aggregate replacement ratio

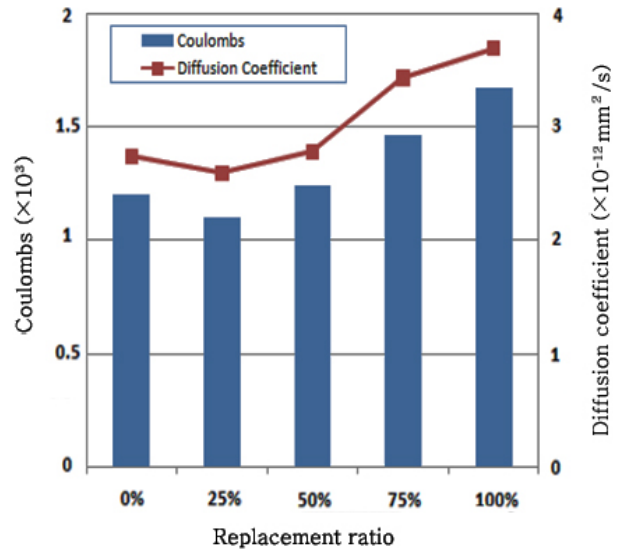


Fig. 15 Relation between coulombs and diffusion coefficient depending on recycled fine aggregate replacement ratio

모르타르분의 영향 때문인 것으로 각각 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 폐콘크리트에서 발생하는 순환잔골재의 혼입률에 따른 자기충전 콘크리트의 물리적, 역학적 및 내구 특성 시험을 실시하였고, 그 시험결과를 비교·분석하여 SCC로의 순환잔골재 사용여부와 혼입률의 범위를 알아보았으며, 아울러 순환잔골재가 갖고 있는 미분말이 강도 증진과 높은 점성을 발현할 수 있다는 특성을 활용하여 고유동·고점성을 갖는 SCC에 적용하여 실험을 수행하였다. 연구결과를 통해 나타난 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) 순환잔골재의 혼입률에 따른 체가름 분석 결과, 혼입률 50%까지는 조립물 및 입도 분포 곡선이 국내의 규정에 준하므로 순환잔골재를 50%까지는 치환하여 사용해도 가능할 것으로 판단되며, 또한 순환잔골재 100% 혼입은 일반잔골재만을 혼입했을 때 보다 표면건조 포화상태의 밀도가 약 4% 감소한 반면, 혼입률이 증가할수록 흡수율은 동시에 증가한 것으로 나타났다.
- (2) 굳지 않은 SCC의 경우 슬럼프 플로, L-Box 및 U-Box는 순환잔골재 혼입률 약 50%까지는 목표성능을 만족 하였으나 그 이상의 혼입률에서는 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 또한 육안 식별 지수에

의한 판정에서도 혼입률 50%까지는 재료 분리가 없는 높은 안정성을 갖는 것으로 나타났다.

- (3) 경화한 SCC의 경우 역학적특성인 압축 및 휨강도 역시 순환잔골재 혼입률 50%까지는 목표강도를 만족하였다. 특히 장기 강도 에서는 혼입률 0% 및 25%에서 강도 발현이 더디게 일어난 반면 혼입률 50~100%에서는 강도의 증가 폭이 확연하게 일어난 점으로 보아 장기강도 특성에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 나타났다.
- (4) 탄산화 및 염화물 침투 시험 결과 노출시간에 따른 침투 깊이는 혼입률이 25%일 때 가장 우수한 저항성을 가진 것으로 나타났으며, 혼입률 50%까지는 유해 물질에 대한 침투 저항성이 비교적 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김무한, 폐기물 및 순환골재 콘크리트, 한국콘크리트학회지, 10(6), 1998, pp.55-60.
2. 김성수, 류재석, 이승태, 정호섭, 토목재료학, 도서출판 구미서관, 서울, 2009, pp.91-93.
3. 김종필, 이승태, 정호섭, 박광필, 김성수, "순환골재를 혼입한 모르타르 경화체의 내구 특성", J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 16, No. 6, 2007, pp.20-27.
4. 문대중, 김양배, 류재석, "An approach for the recycling of waste concrete powder as cementitious materials", Journal of Processing Research, Vol. 9, No. 3, 2008, pp.278-281.

5. 쌍용양회공업주식회사 기술팀, 해양, 매스콘크리트 설계가이드북, 쌍용양회공업주식회사, 2008, pp.17-20.
6. 엄태선, 임채용, 유재상, 이종열, 이근호, 한재명, “속경성 자기충전 콘크리트의 기초특성 연구(I)”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, Vol. 14, No. 1, 2002, pp.79-84.
7. 이희근, 이승훈, 카말 카야트, “자기충전 콘크리트의 워커빌리티 시험 방법 및 성능 기준”, 콘크리트학회지, Vol. 18, No. 4, 2006, pp.68-72.
8. 최연왕, 문대중, 김성수, 김기형, 문한영, “폐콘크리트 미분말을 활용한 자기충전 콘크리트의 강도특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 16, No. 2, 2004, pp.489-492.
9. 최연왕, 조선규, 최욱, 김경환, 안성일, “간편 배합설계방법을 통한 중간강도 자기충전 콘크리트의 특성”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol. 15, No. 1, 2003, pp.83-88.
10. 한국건설자원협회, “순환골재 우수활용 사례집”, (국가지자체·공기업 및 민간), 2008.
11. 환경부, “전국 폐기물 발생 및 처리현황”, 폐기물통계, 환경부, 2009.
12. Japan Society of Civil Engineering, Recommendations for Self-Consolidating Concrete, Tokyo, 1999, pp.77.
13. KS F 2573, “Recycled aggregate for concrete”, Korean (industrial) Standards, KSCE, 2006.
14. Master Builders, “Rheodynamic Self-Consolidating Concrete”, Master Building Concrete Solutions, Cleveland, Ohio. 2003. <www.masterbuilding.com>
15. PCI; “Guidelines for Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants”, TR-6-03, April 2003.
16. P. K. Mehta, J. M. Paulo Monteriro, “Concrete Microstructure, Properties, and Materials”, Prentice Hall, 1993.
17. Ramage, B., Kahn, L. and Kurits, K., “Evaluation of self-compacting Concrete for Bridge Structure Applications: Task 1 Report”, Structural Engineering Mechanics and Material Special Research Problem Report, Georgia Institute of Technology, June, 2004.
18. Vschon, M., ASTM Puts Self-Consolidating Concrete to the Test, ASTM Standardization, July, 2002, pp.34-37.

(접수일자 : 2011년 4월 4일)

(수정일자 : 2011년 5월 24일)

(심사완료일자 : 2011년 6월 8일)

요 지

본 연구에서는 폐콘크리트에서 발생하는 순환잔골재가 구조용 재료로서 많은 문제점이 있음을 인지하고 순환잔골재가 포함하고 있는 미분말이 강도증진 효과와 유동성을 증가 시킬 수 있다는 특성을 이용하여 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete, 이하 SCC로 표기)에 활용하게 되었다. 즉 순환잔골재가 갖는 미분말이 자기충전 콘크리트 특성인 고강도(40 MPa 이상)와 높은 유동성(JSCE 2등급)을 발휘하기에 적당하여 폐콘크리트에서 발생하는 순환잔골재를 일반잔골재 대비 순환잔골재의 혼입률을 25%씩 증가시켜, 총 5수준으로 달리하여 자기충전 콘크리트에 적용하였으며, 이에 따라 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성, 경화한 콘크리트의 역학적 및 내구 특성을 검토하여 순환잔골재를 자기충전 콘크리트 재료로서 활용 가능성을 검토하고자 한다. 그 결과 물리적, 역학적 및 내구특성의 5수준 배합비율 중 일반잔골재 대비 순환잔골재는 50% 혼입률까지 적용 가능하다는 결론을 얻었으며, 그 이상의 혼입률에서는 오히려 성능저하가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 또한 실생활에서의 적용 가능성을 알아보기 위한 실구조물의 적용성이 차후 검토 되어야 할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 폐콘크리트, 순환잔골재, 자기충전 콘크리트(SCC), 미분말, 혼입률