

순환잔골재 및 플라이애쉬 혼입률에 따른 순환골재 콘크리트의 압축강도, 염소이온 투과 및 중성화 저항성 평가

심종성¹⁾·박철우^{1)*}·문일환²⁾·이희철³⁾

¹⁾ 한양대학교 토목환경공학과 ²⁾ 한국전력기술(주) ³⁾ (주)에스코건설탄트

(2005년 5월 2일 원고접수, 2005년 7월 18일 심사완료)

Fundamental Performance Evaluation of Recycled Aggregate Concrete with Varying Amount of Fly Ash and Recycled Fine Aggregate

Jongsung Sim¹⁾, Cheolwoo Park^{1)*}, Il-Whan Moon²⁾, and Hee-Chul Lee³⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Env. Engineering, Hanyang University, Ansan, 425-791, Korea

²⁾ Korea Power Engineering Corporation, Yongin, 449-912, Korea

³⁾ ESCO Engineers and Consultant Co., Ltd., Seoul, 137-838, Korea

(Received May 2, 2005, Accepted July 18, 2005)

ABSTRACT

This study investigates fundamental properties of recycled aggregate concrete which incorporated 100% recycled coarse aggregate and various amount of recycled fine aggregate. In addition, for the purpose of the improvement of long term strength and durability, a part of cement was replaced with fly ash. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation were investigated. When the coarse aggregate was completely replaced with the recycled the replacement ratio of the fine aggregate with the recycled was recommended to be limited below 60% in the consideration of strength. The strength of the steam-cured specimen was very comparable to the wet-cured at 28 days. As fly ash content increased the resistance to chloride ion penetration was increased. The chloride ion penetrability based on the charge passed was found to be low at 21 days and very low at 56 days, respectively. Carbonation depth and carbonation velocity coefficient increased as the fly ash content increased and the relationship between the carbonation depth and recycled fine aggregate replacement ratio was not clear. Up to 28 days, however, the measured carbonation depth was mostly less than 10mm which could be considered as low.

Keywords: recycled aggregate, recycled aggregate concrete, compressive strength, chloride ion penetrability, carbonation

1. 서 론

현대사회는 도시의 재개발, 생활환경의 개선 및 건물의 노후화로 인해 건설 폐기물의 일종인 폐 콘크리트의 발생량이 급격히 증가하고 있다. 이러한 폐 콘크리트로부터 얻어지는 순환골재의 사용은 천연골재의 고갈 문제 해결과 자원 재활용 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있으며, 동시에 폐 콘크리트로부터 고부가가치를 창출할 수 있는 효과적인 방안이라 할 수 있다.

1970년대 이후 순환골재 및 순환골재 콘크리트에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 오고 있으며, 순환골재를 활용한 순환골재 콘크리트의 사용 가능성이 다각도로 제시되고

있다¹⁾. 하지만, 순환골재를 사용한 순환골재 콘크리트는 천연골재를 사용한 일반 콘크리트에 비해 역학적인 성능과 내구적 성능이 다소 저하되는 것으로 알려져 있다^{2,3)}. 이러한, 순환골재 콘크리트의 역학적 성능 개선을 위해 다양한 혼화제, 혼화제의 혼입 또는 천연골재와의 혼입사용에 대한 연구가 수행되었으며, 이는 순환골재 콘크리트의 성능 향상에 효과가 있는 것으로 나타나고 있다⁴⁻⁷⁾.

선진 각국에서는 순환골재를 활용하는 기술에 많은 노력을 기울여 이미 1990년대부터 현장에 일부 적용하고 있으나 국내에서는 양질의 순환골재 생산을 위한 기술력 부족과 순환골재에 대한 일반인의 부정적 인식으로 인하여 순환 콘크리트의 제조 및 활용이 활발히 이루어지지 못하였다. 그러나 최근 순환골재의 생산 및 처리 기술이 발달함에 따라 한국산업규격 'KS F 2573(콘크리트용 재생골재)'의 1종 순환골재에 해당하는 순환골재 및 순환잔

* Corresponding author

E-mail : tiger1park@hotmail.com

©2005 by Korea Concrete Institute

골재의 대량생산이 가능해짐으로써 순환골재의 현장 적용에 대한 시발이 되고 있으며, 공학적 성질 및 파괴메카니즘 규명 등에 대한 국내 연구가 활성화 하는 계기가 되고 있다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 순환굵은골재의 혼입에 관한 것으로 잔골재의 대부분을 해사에 의존하고 있는 국내의 현 실정을 고려할 때 순환굵은골재와 함께 순환잔골재에 관한 적극적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 순환굵은골재에 치중되어온 기존의 연구와는 달리 순환굵은골재를 100% 혼입하였을 시 순환잔골재의 혼입에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 고찰하였으며, 장기강도 증가 및 내구성 향상 방안으로 플라이애쉬를 시멘트 대체제로 사용한 순환골재 콘크리트의 압축강도 및 내구성(염소이온투과 및 중성화)에 관한 연구를 수행하였다. 또한 대량생산 및 빠른 시공이 가능하며 최소한의 품질을 확보할 수 있는 장점을 지닌 프리캐스트 구조체에 적용을 위한 기초 자료로 활용하기 위해 순환골재와 플라이애쉬를 사용하고 증기양생한 콘크리트의 특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험 개요

본 연구에서는 순환잔골재와 플라이애쉬의 혼입정도와 그리고 증기양생시의 물성 및 내구성을 파악하기 위하여 실험을 실시하였다. 먼저 순환잔골재의 혼입에 따른 기초적인 경향 파악을 위하여 5×5×5cm의 입방시편체를 제작하여 모르타르의 압축강도 시험을 실시하였고, 그 결과에 의해 순환잔골재의 혼입률을 설정하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 순환골재 콘크리트 공시체를 제작한 후 수중양생과 증기+기건양생의 조건(증기양생 8시간+실험시까지 기건양생)으로 양생 후 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 의하여 1차 압축강도 시험을 실시하였다. 2차 압축강도 시

험은 순환골재 콘크리트의 배합에 플라이애쉬를 시멘트의 중량비로 혼입하였으며, 동일한 증기+기건양생 조건을 따라 양생하여 실험을 실시하였다. 내구성 시험 항목으로는 염소이온투과 저항성 시험 및 콘크리트의 중성화 시험을 실시하였다.

2.2 사용 재료

순환골재는 원산지의 조건 및 처리 조건에 따라 흡수율 및 마모율 등의 품질의 편차가 큰 골재가 생산될 수 있으므로, 본 연구에서 사용되어진 골재의 물성시험을 실시하였다. Table 1은 KS의 규준에 대한 실험에 사용된 순환골재의 물성을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 순환굵은골재는 최대 치수가 25mm이며 KS F 2573(콘크리트용 재생골재)의 1종 재생굵은골재의 기준을 만족하였고, 순환잔골재는 흡수율이 다소 높은 2종으로 판명되었다.

본 연구에 사용되어진 순환골재의 이물질 및 불순물에 관한 기초 분석을 위하여 다음과 같은 추가적인 실험을 수행하였다. 순환골재에 포함된 이물질함량을 KS F 2576(재생골재의 이물질 함유량 시험 방법)의 방법을 따라 측정된 결과, 굵은골재의 경우, 0.71%의 이물질이 포함되어 있었으며 이의 대부분은 폐적벽돌, 나무조각 등 이었다. 잔골재의 경우 유기불순물의 함량을 측정하기 위하여, KS F 2510(콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기불순물 시험 방법) 과 KS F 2514(모르타르 압축강도에 의한 유기불순물을 함유한 잔골재 시험 방법)을 활용하였다. 실험 결과, 3% 수산화나트륨용액에 침지시킨 순환잔골재의 색도는 표준용액과 비교하여 거의 색도의 변화가 없었으며, 모르타르의 압축강도는 일반 골재의 경우 수산화나트륨으로 씻기 전후의 강도비가 92%이며 순환잔골재의 경우 강도비가 90%로 규정에서 제시하는 90% 이상을 만족하는 수준이었다. 잔골재의 유해 물질 함유량은 KS F 2511(골

Table 1 Properties of used recycled aggregate with respect to KS F 2573

	Recycled coarse aggregate				Recycled fine aggregate			Natural fine aggregate
	(KS F 2573)			Used	(KS F 2573)		Used	Used
	Class 1	Class 2	Class 3		Class 1	Class 2		
Absorption (%)	≤ 3	≤ 5	≤ 7	1.68	≤ 5	≤ 10	6.45	2.56
S. G.	≥ 2.2			2.55	≥ 2.2		2.28	2.56
Abrasion (%)	≤ 40			21.5	-		-	-
Solid volume (%)	≥ 55			60	≥ 53		62.5	63.5
Sieve passing percent (%)	25 mm	95~100		100	-		-	-
	20 mm	-		96	-		-	-
	15 mm	30~70		33	-		-	-
	10 mm	-		32	100		100	100
	5 mm	0~10		0	90~100		100	100
	2.5 mm	0~5		0	80~100		82	88
	1.2 mm	-		-	50~90		54	61
	0.6 mm	-		-	25~65		30	36
	0.3 mm	-		-	10~35		10	17
0.15 mm	-		-	2~15		2	6	

재에 포함된 잔 입자 (0.08mm체를 통과하는) 시험 방법 실험 결과, 일반 잔골재는 4.1%, 순환잔골재는 4.8%로 모두 콘크리트 표면이 마모 작용을 받는 경우의 허용값인 5%를 만족하였다. 플라이애쉬는 국내에 보편적으로 사용되고 있는 일반 레미콘용 플라이애쉬를 사용하였으며, KS L 5405의 플라이애쉬 관련 규격과 본 연구에서 사용된 플라이애쉬 품질은 Table 2와 같다. 시멘트는 국내에서 생산되는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.3 실험 방법

2.3.1 모르타르 압축강도 시험

순환골재 콘크리트 압축강도실험을 위한 변수인 순환골재의 혼입률 산정을 위하여 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법)에 준하여 모르타르 압축강도 시험을 실시하였다. 물-시멘트비는 0.485이며 시멘트는 KS 규정에 나와 있는 바와 같이 6개의 강도측정용 표준 모르타르 시험체를 제작하는데 필요한 양인 510g으로 고정하였다. 순환골재 혼입률(0, 20, 40, 50, 60, 70, 100%)을 변수로 5×5×5cm의 입방공시체를 제작하여 1일, 3일, 7일, 14일, 21일, 28일에 대한 압축강도 실험을 실시하였다.

2.3.2 콘크리트 압축강도 시험

순환골재 콘크리트의 압축강도 특성을 알아보기 위하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 순환골재 콘크리트의 압축강도 시험을 하였다. 콘크리트의 목표설계강도는 40 MPa로 설정하였으며, 슬럼프와 공기량은 8cm 와 5%가 되도록 배합설계 하였다. 2차 압축강도 시험에 사용된 콘크리트의 배합에서 플라이애쉬는 시멘트 중량비로 혼입되었으므로, 전체 골재의 용적은 약간씩 조

Table 2 Properties of used fly ash with respect to KS L 5405

	KS L 5405	Used	
Chemical properties	SiO ₂ (Min, %)	45	58.2
	Moisture content (Max, %)	1.0	0.1
	Ignition loss (Max, %)	5.0	3.2
Physical properties	S. G. (Min, %)	1.95	2.2
	Specific surface area (Min, cm ² /g)	2,400	3,550
	Water requirement, percent of control (Max, %)	102	99
	Compressive strength ratio at 28 days (Min, %)	60	94

Table 3 Chemical composition and basic physical properties of cement used

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig, loss (%)	S.G.	Surface area (cm ² /g)
20.8	6.3	3.2	61.2	3.3	2.3	1.0	3.15	3,200

절되었다. 하지만, 잔골재율은 41.5%로 유지하였다. 증기양생을 실시할 경우, 시험편은 전 양생 2시간 후, 20°C/hr의 온도상승률로 2시간 동안 80°C에서 양생된 후 서서히 냉각되는 과정을 거쳤다. 수중양생과 증기+기건양생의 조건에 따라 양생을 실시한 후 1차 실험에서는 3, 7, 28일에 그리고 2차 실험에서는 1, 7, 28, 56일에 실험을 실시하였다. Tables 4와 5는 1차 압축강도 시험과 2차압축강도 시험에 대한 콘크리트 배합표를 보여주고 있다.

2.3.3 염소이온투과저항시험

KS F 2711(전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온투과저항성시험 방법)에 의거하여 $\phi 10 \times 20$ cm원주형 몰드로 제작한 순환골재 콘크리트 공시체를 20±1°C의 수중에서 14일 양생한 후 50mm 두께로 절단한 시편에 콘크리트 보호용 도장 재료를 도포한 후 Fig. 1과 같이 확산셀을 구성하여 실험을 실시하였다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 셀의 (-)전극에 3.0%의 NaCl용액을 (+)전극에는 0.3M의 NaOH용액을 채웠으며, 매 30분마다 전압을 6시간까지 측정하여 기록하였다. 측정된 전압 값을 전류 값으로 환산한 후 회로를 통과한 총 전하량을 식 1을 이용하여 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

Table 4 Recycled aggregate concrete mix proportions for the 1st stage test (kg/m³)

Replacement ratio of recycled fines (%)	C	W	Aggregate		
			Coarse	Fine	
				Natural	Recycled
0	493	173	925	659	0
30				461	176
50				329	294
60				264	352
70				198	410
100				0	587

Table 5 Recycled aggregate concrete mix proportions for the 2nd stage test (kg/m³)

Replacement ratio (%)	C	F/A	W	Aggregate			
				Coarse	Fine		Rec'd
Rec'd fines	Fly ash	Natural	Rec'd				
0	0	493	0	173	925	659	0
	15	419	74	173	910	648	0
	30	345	148	173	895	638	0
30	0	493	0	173	925	446	191
	15	419	74	173	910	439	188
	30	345	148	173	895	432	185
60	0	493	0	173	925	246	370
	15	419	74	173	910	242	364
	30	345	148	173	895	238	358
100	0	493	0	173	925	0	587
	15	419	74	173	910	0	577
	30	345	148	173	895	0	568

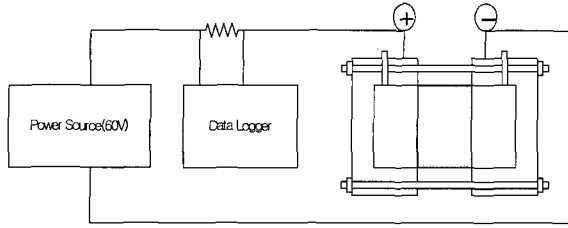


Fig. 1 Chloride ion penetration test apparatus

여기서, Q = 회로를 통과한 전하량(Coulombs), I_n = 전압이 가해진 후 n 분이 경과하였을 때의 전류(Amperes)이다.

염소이온투과 실험 후 시편을 할렬하여 할렬면에 0.1M의 $AgNO_3$ 용액을 도포하여 착색에 의한 염화물 침투깊이를 측정하였다.

2.3.4 촉진중성화 시험

$\phi 10 \times 20$ cm 원주형 몰드로 제작한 공시체를 20 ± 1 °C의 수중에서 7일간 양생 후 14일간 기건양생을 실시한 후 시험편 표면을 그라인더 및 브러쉬를 이용하여 정리한 후 표면에 콘크리트 보호용 도장 재료를 코팅하여 중성화 촉진 시험을 실시하였다. 실험 조건은 온도 30°C, 상대습도 60%, CO_2 10%로 설정하였다. 촉진 시험 후 중성화 깊이의 측정은 촉진 개시부터 7일, 14일, 21일, 28일에 측정하였다. 중성화 평가는 콘크리트 할렬인장 후에 할렬면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하고 미착색의 콘크리트 중성화 부분을 측정하였다. 측정시 공시체의 20개소에서 중성화 깊이를 측정하여 평균을 취하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 모르타르 압축강도 시험

순환잔골재를 사용하지 않은 모르타르의 압축강도와 순환잔골재 100% 혼입한 모르타르의 압축강도와의 차이는 Fig. 2에서와 같이 약 15MPa정도이며 각 재령에서 순환잔골재의 혼입률이 커질수록 압축강도는 점차 감소하는 양상이 나타나고 있다.

특히 각각의 재령에서 혼입률 60% 이상일 경우 감소율이 증가하였다. 이는 원골재의 순환처리시 완전히 제거되지 않은 기부착 모르타르 등의 영향으로 판단되며, 이러한 기부착 모르타르는 다공성이며 흡수력이 상대적으로 크므로 시멘트의 수화반응에 필요한 유효수량의 감소 및 골재와 시멘트풀 사이의 치밀한 결합을 저하시키는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상으로 인한 강도의 감소는 순환잔골재의 혼입률이 60% 이상일 때 급격히 증가되는 것을 실험 결과로부터 알 수 있었다.

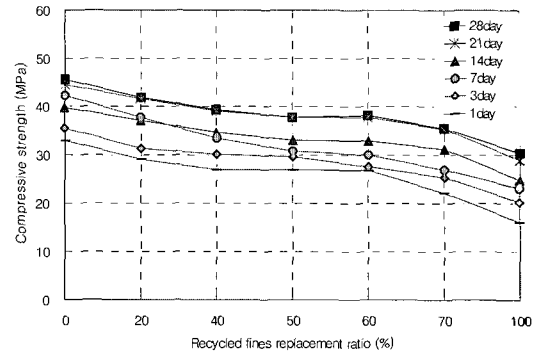


Fig. 2 Compressive strength of mortar cubes

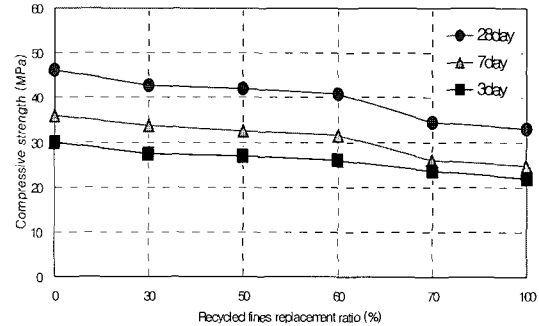


Fig. 3 Compressive strength of 1st stage concrete cured under 100% RH

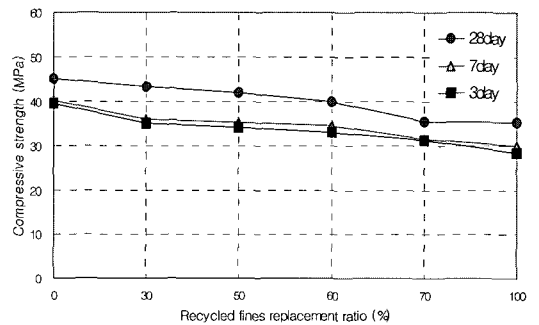
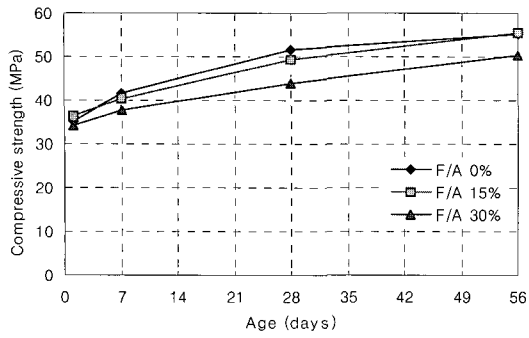


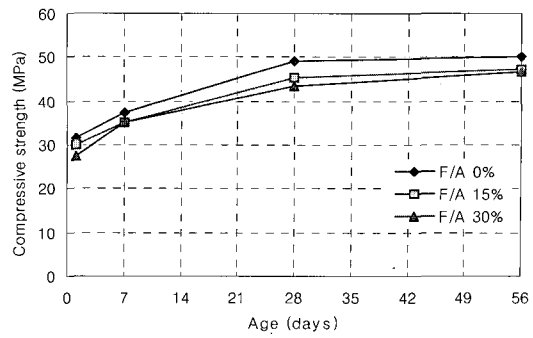
Fig. 4 Compressive strength of 1st stage concrete cured under steam curing

3.2 1차 압축강도 시험

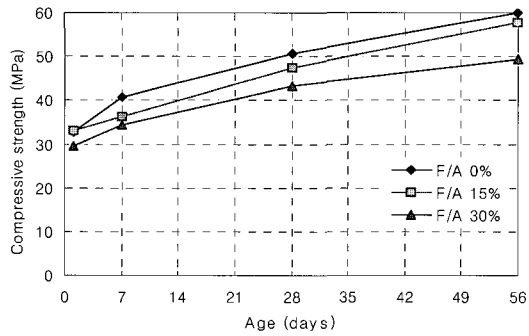
Figs. 3과 4는 순환잔골재의 혼입률에 따른 압축강도 변화를 각각의 양생조건에 대하여 보여주고 있다. 순환골재 콘크리트 역시 순환잔골재 모르타르시험과 유사한 양상인 혼입률 60%~70% 사이에서 압축강도의 급격한 감소를 관찰할 수 있었다. 이는 흡수율이 적은 순환골재보다 상대적으로 흡수율이 높은 순환잔골재의 영향이 순환골재 콘크리트에 전반적으로 작용하여 순환잔골재 혼입률 60% 이상에서 콘크리트의 치밀성 및 결합력을 저하시킨 것으로 판단된다. 이러한 현상은 박영신⁸⁾의 실험에서도 순환골재 혼입률이 약 75% 이상일 경우 강도 감소율이 증가



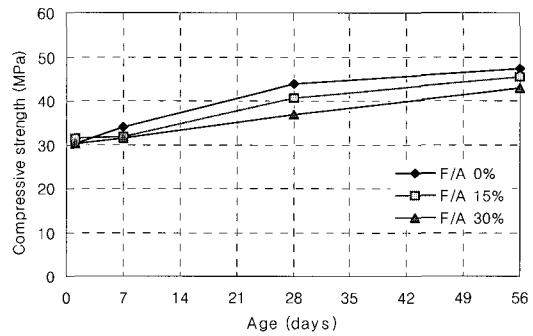
(a) Recycled fines replacement ratio (0%)



(c) Recycled fines replacement ratio (60%)



(b) Recycled fines replacement ratio (30%)



(d) Recycled fines replacement ratio (100%)

Fig. 5 Compressive strength of 2nd stage concrete with respect to replacement ratio of recycled fines

하는 것과 비슷한 양상이다. 그러나 60% 이하에서는 증기양생과 수중양생이 거의 유사한 28일 강도발현을 하는 것을 알 수 있었다.

3.3 2차 압축강도 시험

Fig. 5는 각각의 변수에 대한 순환잔골재 혼입률과 재령, 플라이애쉬 혼입률별 압축강도를 보여주고 있다. Fig. 5의 순환잔골재를 혼입하지 않은 시험체의 경우, 플라이애쉬를 사용하지 않은 순환골재 콘크리트는 28일 이후 강도 증가율이 다소 감소하는 것을 볼 수 있으나, 플라이애쉬 15%, 30% 사용시 지속적인 강도증가를 볼 수 있다.

Fig. 5 (d)와 같이 순환잔골재 100% 사용의 경우 플라이애쉬를 30% 혼입한 경우, 강도는 목표강도인 40MPa를 만족시키지 못하였다. 일반적인 구조용 콘크리트의 강도를 약 35MPa이라 가정한다면 순환골재를 100%사용한 경우 및 플라이애쉬를 30%까지 사용한 경우 내구성을 배제한 강도의 기준만은 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다. 하지만, 1차압축강도 시험 결과에서 언급한 것과 같이 순환골재를 100% 혼입한 경우 순환잔골재의 혼입률은 강도감소율이 비교적 적은 60% 이내로 사용하고 플라이애쉬의 혼입률은 15%이정도로 제한하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, AE콘크리트에 플라이애쉬를 사용

할 경우, 미연소탄분에 의한 AE제 흡착으로 인하여 순환골재 콘크리트의 동결융해저항성에 관한 우려가 있을 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.4 염소이온투과저항성

플라이애쉬 혼입 순환골재 콘크리트의 염소이온투과저항성시험 결과 총 통과전하량은 21일과 56일을 비교해볼 때 매우 큰 통과전하량의 감소가 나타났다. 56일 통과전하량은 21일의 통과전하량의 약 25%정도밖에 되지 않는 것을 알 수 있으며, 이것은 재령에 따라 콘크리트 내부가 밀실해짐에 따라 염소이온투과에 대한 저항성이 커지기 때문인 것으로 판단되어진다. 또한, 순환잔골재의 혼입률에 의해서는 큰 차이가 나지 않지만, 플라이애쉬의 혼입률이 증가함에 따라 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 이것은 플라이애쉬의 미세입자가 콘크리트 내부의 공극을 채워 수밀성이 커졌기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6은 식 1에 의하여 계산된 통과전하량을 그림으로 비교하고 있다. ASTM C 1202(Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)에서는 총 통과전하량이 2000-4000 Coulombs의 범위를 염소이온투과성이 중간정도, 1000-2000 Coulombs의

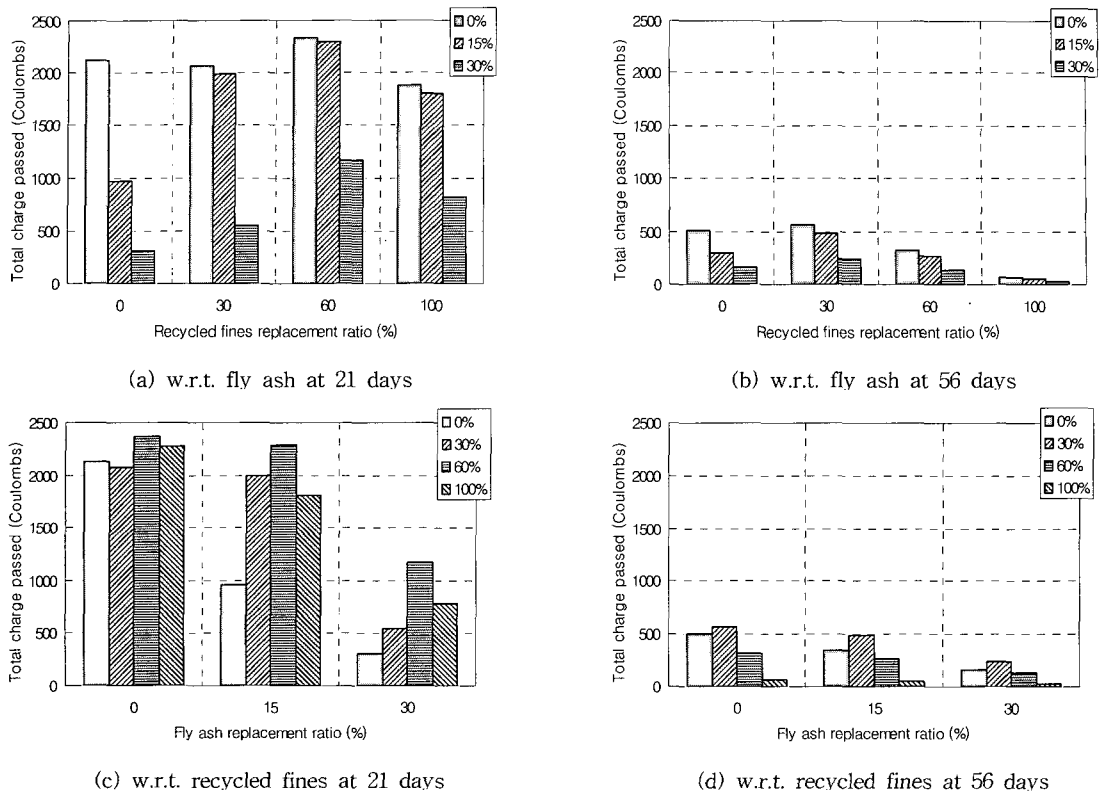


Fig. 6 Chloride ion penetrability - total charge passed

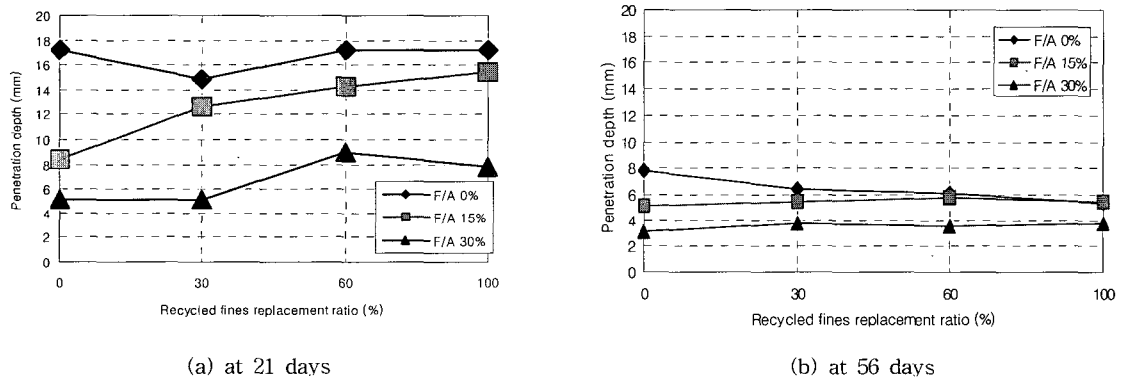


Fig. 7 Chloride ion penetrability - penetration depth

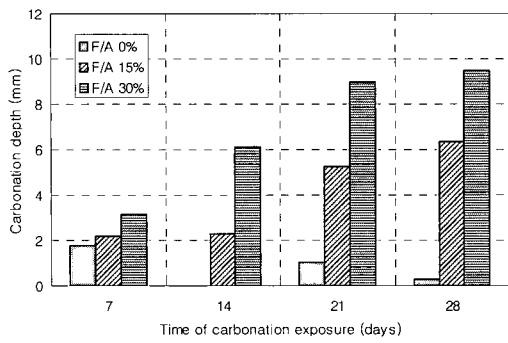
범위를 투과성이 낮음으로 분류하고 있으며, 이재호 등⁹⁾의 논문에서도 그 값은 약 4000 Coulombs 이하인 점을 고려할 때 본 실험에 사용된 순환골재 콘크리트는 그 값이 양호한 것으로 판단된다. 이것은 또한 다소 높은 설계 기준강도에 따른 낮은 물-결합재비의 영향도 있을 것으로 사료된다. 또한 순환골재에 의한 차이도 고찰되었으나 플라이애쉬 혼입률에 의한 영향이 크게 나타나 염소이온 투과에 대한 저항성은 플라이애쉬의 혼입률이 지배적인 것으로 판단된다.

염소이온투과 저항성 시험을 실시 후 시험체의 염화물 침투깊이를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 재령 21일에서의 침투깊이에 비하여 56일에서의 침투깊이는, 통과전

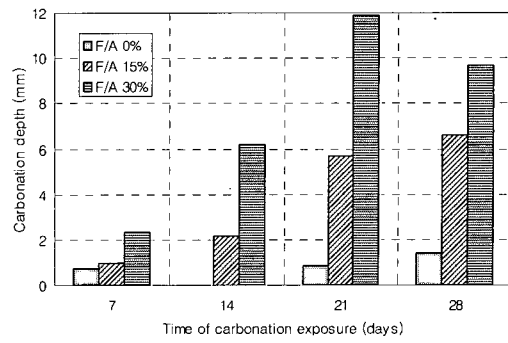
하량의 감소와 같이 아주 확연히 감소함을 알 수 있었다. 순환골재 혼입률과 침투깊이의 상관관계는 명확하지 않지만 플라이애쉬의 혼입률에 따라 상대적으로 큰 폭의 변화가 나타남을 알 수 있었다. 따라서 염화물에 의해 부식될 우려가 있는 구조물에 순환골재 콘크리트를 사용할 경우 플라이애쉬를 혼입하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

3.5 촉진 중성화 시험

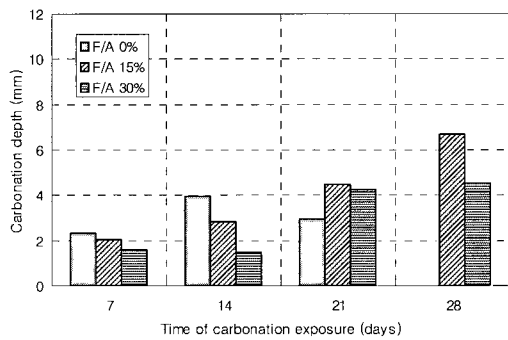
Fig. 8은 플라이애쉬와 순환골재를 대체 혼입한 순환골재 콘크리트의 중성화 깊이를 나타낸 것이다. 플라이애쉬의 혼입률에 의한 중성화 깊이를 보면 0%와 15%에



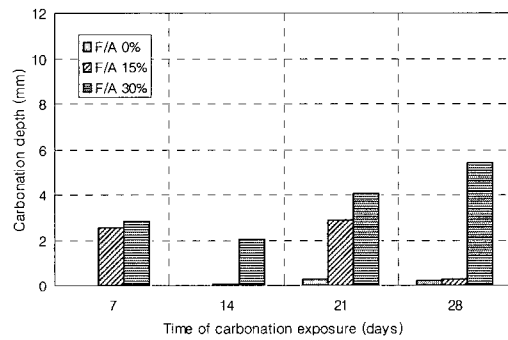
(a) Recycled fines replacement ratio (0%)



(b) Recycled fines replacement ratio (30%)



(c) Recycled fines replacement ratio (60%)



(d) Recycled fines replacement ratio (100%)

Fig. 8 Carbonation depth

비교할 때 상대적으로 30%에서 중성화 깊이가 큰 것을 알 수 있다. 이는 기존연구의 중성화 양상과 유사한 것을 알 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 중성화 깊이는 물-시멘트비와 시멘트 대체재 혼입률의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 혼입률의 증가에 따라 중성화 깊이가 증가하는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 시멘트 대체재로 플라이애쉬를 사용한 경우에 대해서 중성화 깊이가 증가하는 것은 플라이애쉬의 포졸란반응, 즉 플라이애쉬의 가용성분인 실리카 또는 알루미늄이 시멘트의 수화반응으로 생겨나는 수산화칼슘과 결합하는 반응으로 인해 콘크리트의 pH가 감소하기 때문인 것으로 보고 되고 있고, 또한 알칼리를 함유하고 있는 시멘트를 플라이애쉬로 일정량 대체함으로써 콘크리트의 pH를 추가적으로 감소시키는 효과를 얻을 수 있다^{11,12)}. 따라서, 이러한 시멘트의 치환은 시멘트-알칼리 골재반응을 예방하기 위한 수단으로도 사용된다. 하지만, 콘크리트의 재령이 증가할수록 플라이애쉬의 혼입에 따른 포졸란반응으로 인하여 콘크리트 경화체 조직이 치밀해짐에 따라 콘크리트의 중성화 속도가 상당히 억제되는 것으로 알려져 있다¹³⁾.

한편 순환골재의 혼입률에 따른 중성화 깊이의 변화는 뚜렷한 경향을 보기는 어려우며, 이러한 복잡한 양상은 순환골재를 생산하는 원골재의 중성화 정도와 혼입되는 순환골재에 포함된 알칼리 성분기 기인한 것으로 판단되어진다. 따라서 플라이애쉬의 양이 고정되어 있을 때 순환골재의

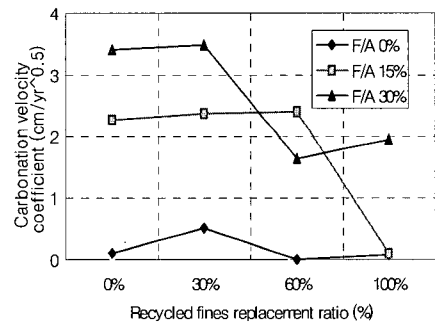


Fig. 9 Carbonation velocity coefficient of recycled aggregate concrete

혼입률에 따른 순환골재 콘크리트의 중성화에 대하여 좀 더 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

하지만, 최근 국내의 중성화에 대한 연구에 따르면 일반 콘크리트의 28일 촉진 중성화 시험에 의한 중성화 깊이가 3~11 mm 정도임을 감안할 때, 본 연구에서 사용된 플라이애쉬 혼입 순환골재 콘크리트의 중성화 저항성은 양호한 것으로 판단된다¹⁴⁾. 또한, 실험으로부터 얻어진 결과를 이용하여, 다음의 식(2)를 이용하여 중성화속도계수를 계산하였다.

$$C = A \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, C 는 중성화깊이 (cm), t 는 중성화 경과시간 (year)이며, A 는 중성화속도계수 ($cm/\sqrt{\text{year}}$)이다.

Fig. 9는 중성화경과시간이 28일인 경우에 중성화속도계

Fig. 9는 중성화경과시간이 28일인 경우에 중성화속도계수를 순환잔골재 및 플라이애쉬 혼입률에 대하여 비교한 것이다. 플라이애쉬가 30% 혼입된 경우에도 중성화속도계수는 4이하의 값으로 계산되었으며, 이는 기존의 연구 결과들의^{15,16)} 일반골재를 사용한 콘크리트의 중성화속도계수보다 작거나 비슷한 값으로 나타났다. 따라서, 콘크리트의 초기재령에서 강도발현, 충분한 양생과 물-결합제비 등을 고려한다면 순환골재 콘크리트의 중성화 효과를 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 순환골재를 사용한 콘크리트의 강도 및 염소이온투과와 중성화 시험에 대한 특성을 실험을 통하여 고찰하였다. 순환골재 콘크리트는 순환굵은골재를 100% 사용하였고 순환잔골재와 플라이애쉬의 양을 변화시키면서 혼입하였다. 또한 증기양생에 따른 강도변화를 고찰하였다. 연구를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모르타르 압축강도 시험결과 순환잔골재 혼입률이 증가할수록 강도는 감소하였으며, 이러한 강도의 감소는 혼입률이 60% 이상일 때 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 1차 콘크리트 압축강도 시험 결과 양생 방법에 따른 압축강도특성을 분석하면, 증기양생을 실시한 콘크리트는 일반수중양생을 실시한 콘크리트에 비해 높은 초기강도를 확보할 수 있었으며, 재령 28일의 압축강도 측정결과 수중양생한 콘크리트와 거의 유사하게 나타났다. 따라서 적절한 증기양생을 통하여 순환골재의 품질 확보와 현장적용이 가능한 프리캐스트 구조체에 적용이 가능할 것으로 사료된다.
- 3) 모르타르 압축강도 시험에서와 마찬가지로 순환잔골재 혼입률이 60% 이상일 경우, 순환골재 콘크리트의 강도감소율이 증가하는 현상이 나타났다. 따라서 순환굵은골재를 100% 혼입한 경우 순환잔골재의 혼입률은 60%를 넘지 않을 것을 권장한다.
- 4) 플라이애쉬를 시멘트 대체제로서 사용한 경우 일반적으로 초기강도는 낮았지만 재령 56일까지 강도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 플라이애쉬 혼입률이 증가할수록 강도는 낮게 나타났으며 순환골재 100% 사용시 플라이애쉬 혼입률이 30%인 경우 28일 목표강도를 만족하지 못하였다. 따라서 순환골재 콘크리트에 플라이애쉬를 사용할 경우, 혼입률을 15% 정도로 하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한, AE콘크리트에 플라이애쉬를 사용할 경우, 미연소탄분에 의한 AE저흡착으로 인하여 순환골재 콘크리트의 동결융해저항성에 관한 우려가 있을 수 있으므로 이에 대한 추가적인

연구가 필요할 것으로 사료된다.

- 5) 재령과 플라이애쉬의 혼입률에 따른 염소이온침투 저항성은 확연히 증가하였으나, 순환잔골재의 혼입률에 따른 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 염소이온침투 저항성은 일반 콘크리트와 비교하여 양호한 것으로 판단된다.
- 6) 일반 콘크리트에 비해 순환골재 콘크리트의 중성화 깊이 및 중성화속도는 양호한 것으로 나타났으며, 일반 콘크리트의 경우와 같이 플라이애쉬가 증가함에 따라 중성화 깊이가 증가하였다. 하지만, 순환잔골재의 혼입률에 따른 중성화 깊이의 변화는 뚜렷한 양상이 나타나지 않았는데, 이는 원골재의 중성화정도와 혼입되는 순환골재에 포함된 알칼리 성분에 기인한 것으로 사료된다. 이에 대한 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원에서 지원하는 폐 콘크리트의 고부가가치 자원화기술개발 및 한양대학교에서 지원하는 폐 콘크리트의 고부가가치 자원화를 위한 기초연구의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Forster, S. W., "Recycled Concrete as Aggregate", *Concrete International*, American Concrete Institute, Vol.8, No.10, 1986, pp.34~40.
2. Buck, A. D., "Recycled Concrete as a Source of Aggregate", *Journal Proceedings*, American Concrete Institute, Vol.74, No.5, 1977, pp.212~219.
3. Hansen, T. C., *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, Routledge, 1992.
4. Hansen, T. C. and Narud, H., "Recycled Concrete and Silica Fume make Calcium Silicate Bricks", *Cement and Concrete Research*, Vol.13, No.5, 1983, pp.625~630.
5. Hansen, T. C. and Narud, H., "Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Course Aggregate", *Concrete International Design and Construction*, Vol.5, No.1, 1983, pp.79~83.
6. Yrajanson, W. A., *Recycling Portland Cement Concrete Pavements*, National Cooperative Highway Research Project Syntheses. 154, TRB, Washington D.C., USA, 1989.

7. Wainwright, P. J., Trevorrow, A., Yu, Y., and Wang, Y., "Modifying the Performance of Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate", *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Odense, Denmark, 1994, pp. 319~330.
8. 박영신, 재생골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 2003.
9. 이재호, 이광명, 정영수, "재령에 따른 플라이 애쉬 콘크리트의 염소이온 확산특성", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 15권, 1호, 2003, pp.681~686.
10. 박기근, "콘크리트의 내구성과 중성화", 콘크리트 학회지, 7권, 2호, 1995, pp.74~81.
11. S. Mindess, J. F. and Young, D. Darwin, "Concrete 2nd Edition", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002, pp.93~112.
12. 정상진, 김성식, 김제섭, 김종원, 김우상, 백민수, "플라이 애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 중성화 특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 15권, 1호, 2003, pp.69~74.
13. 조명석, 송영철, 류금성, 고경택, 김성욱, 이장화, "플라이 애쉬 혼입 콘크리트의 내구성 평가", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 14권, 1호, 2002, pp.755~760.
14. 윤재환, 이도현, 정재동, 배수환, 최광윤, "각종 혼합재를 첨가한 콘크리트의 중성화에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 15권, 1호, 2003, pp.787~792.
15. 이창수, 설진성, 윤인석, "콘크리트 중성화로 인한 철근의 부식 정도 평가", 콘크리트학회 논문집, 12권, 3호, 2000, pp.21~30.
16. 박승범, 김의성, 홍석주, 장석호, "플라이애쉬를 혼입한 강섬유보강 콘크리트의 촉진중성화 시험", 대한토목학회 1997년도학술발표회논문집, 1997, pp.367~370.

요 약

본 연구는 100%의 순환골재의 사용과 순환골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 기본적인 물성 변화를 고찰하였으며 장기 강도 증가 및 내구성 향상을 위한 방안으로 플라이애쉬를 시멘트 대체재로 사용한 순환골재 콘크리트의 강도 및 염소이온 침투 저항성과 중성화 저항성의 내구성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 순환골재의 고부가가치 자원화로서의 활용도를 극대화 시킬 수 있는 방안의 일환으로 프리캐스트 구조체로의 적용을 증기양생을 통하여 검증하였다. 순환골재를 100% 사용할 경우, 순환골재의 혼입률은 60%이하로 사용하는 것이 강도의 측면에서 유리한 것으로 판단된다. 또한 28일 강도를 비교한 결과 증기양생이 순환골재 콘크리트에도 무리 없이 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 염소이온 투과 저항성은 플라이애쉬의 양에 따라 증가하였으며, 재령 21일에서는 낮음 그리고 56일에서는 매우 낮음으로 판명되었다. 촉진중성화에 따른 후 중성화 깊이 및 중성화 속도계수는 플라이애쉬의 양에 따라 증가하는 경향을 보였지만, 측정된 깊이는 약 10mm 이하로서 우려할 만한 정도는 아닌 것으로 판단된다.

핵심용어 : 순환골재, 순환골재 콘크리트, 압축강도, 염소이온 투과 저항성, 중성화