

순환골재 미분말을 알칼리 자극제로 활용한 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 강도증진에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Strength Improvement of Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete Using Recycled Aggregate Powder as Alkali-activator

전 찬 수

류 동 우*

Jeon, Chan-Soo

Ryu, Dong-Woo*

Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pochon-Gun, Gyeonggi-Do, 11159, Korea

Abstract

Accordingly, this study, in order to use powder of recycled aggregate from production of recycled aggregate as an activator of ground granulated blast furnace slag, the influence of added recycled aggregate powder on physical properties of concrete induced ground granulated blast furnace slag were analyzed by hydration stages. The results of the study are summarized as follows: Except for samples eluted powder of recycled aggregate 1%, all the samples were high alkali suspensions with higher than pH 12.0. In particular, when eluted time was 5 hours, the sample eluted powder of recycled aggregate 3% showed about 15 mg/l of calcium hydroxide that was not different from the amount of calcium hydroxide in the mixing water eluted powder of recycled aggregate 5%. Hence, from this results, it can be considered that optimal eluted powder of recycled aggregate was 3% in this study. When using mixing water eluted with powder of recycled aggregate, compared to use of ordinary mixing water, it showed greater compressive strength in the entire ages, and in the sample replaced with ground granulated blast furnace slag by 50%, its compressive strength was greater than that of the OPC. As use of mixing water eluted with powder of recycled aggregate in concrete used with large amount of ground granulated blast furnace slag was more effective for improving compressive strength than ordinary mixing water, it is verified that powder of recycled aggregate had an effect of activator.

Keywords : powder of recycled aggregate, ground granulated blast furnace slag, activator, compressive strength

1. 서 론

1.1 연구의 목적

2015년 상반기 기준으로 국내의 민간 건설 수주액은 94조원을 기록하였으며, 공공수주는 28.6조원을 기록하여 역대 최고의 수주액을 기록하였다[1]. 이러한 신규 수주의 경우 기존의 건물을 해체하고 축조하는 과정이 필수적으로 발

생하기 때문에 건설 수주액의 증가와 더불어 건설폐기물 발생량 또한 크게 증가하고 있다. 건설폐기물 재활용기본계획에 의하면 2007년 건설폐기물 발생량은 6,278만 톤에서 2010년에는 6,501만 톤으로 증가하였으며, 2012년에는 6,786만 톤으로 지속적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다 [2]. 따라서 무분별하게 증가하는 건설폐기물로 인하여 환경 오염, 폐기물 매립처리 등의 어려움이 발생하며, 이를 개선하기 위한 방법으로 건설폐기물에 대한 재활용성이 대두되고 있다.

건설폐기물 재활용의 일환으로 가장 많이 사용하는 방법은 건설폐기물 중 60%에 해당되는 폐콘크리트를 파쇄하여 발생하는 순환골재를 건축 및 토목공사에 폭넓게 사용하는 것이다. 특히, 순환골재는 천연골재를 생산하는 것에 비하여

Received : October 12, 2017

Revision received : October 30, 2017

Accepted : November 16, 2017

* Corresponding author : Ryu, Dong-Woo

[Tel: 82-31-539-1949, E-mail: dwryu@daejin.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

매우 경제적이고 환경부하가 낮은 장점이 있어 부족한 골재 자원을 대체하기 위한 적절한 방안으로 각광 받고 있다. 그러나 순환골재를 콘크리트 골재로 사용하기 위해서는 골재 표면에 존재하고 있는 이물질을 제거하는 과정이 필수적이기 때문에 매년 다량의 미분말이 발생하게 된다. 기존 연구에 따르면 저품질 순환골재를 생산할 경우에는 폐콘크리트 투입량의 약 5~10% 정도의 미분말이 발생하며, 고품질 순환골재를 만드는 과정에서는 약 70% 정도의 미분말이 발생한다[3,4].

순환골재 생산시에 발생하는 미분말(이하 순환골재 미분말)은 경화된 시멘트 페이스트가 다량으로 존재하며, 여기에는 미수화시멘트와 더불어 다량의 Ca(OH)₂가 존재한다. 이로 인해 pH 12 이상의 강알칼리성을 지니게 되며 보통 콘크리트 배합설계시 순환골재 미분말을 첨가하였을 때 알칼리 자극제로서 사용이 가능할 것으로 판단하였다.

이에 본 연구에서는 순환골재 미분말을 고로슬래그 미분말(이하 GGBS) 혼입 콘크리트의 알칼리 자극제로 활용하기 위해 배합수에 일부 첨가하여 강알칼리성을 띄게 한 후, GGBS를 단계별로 혼입한 콘크리트의 물리적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험인자 및 평가항목

본 연구는 경기지역에 위치한 건설폐기물 중간처리업체에서 얻어진 폐콘크리트를 대상으로 발생한 순환골재 미분말을 대상으로 실험을 진행하였다.

선행연구로서 순환골재 미분말을 GGBS 혼입 콘크리트용 알칼리 자극제로서의 활용 가능성을 검토하였다. 일반적으로 콘크리트 배합수로 사용하는 수돗물에 순환골재 미분말을 배합수 질량대비 1, 2, 3, 4, 5%를 혼입한 후 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 24 시간 동안 침지시켜 순환골재 미분말의 알칼리 성분용출량에 따른 pH 변화를 분석하였다. 또한, 이온크로마토그래피와 ICP-OES를 활용하여 수돗물 중의 용출성분을 정량 분석하였다. 한편, 순환골재 미분말에 의한 응결시간을 파악하고자 시멘트만 단독 사용한 페이스트와 GGBS를 50% 치환한 페이스트의 초결 및 종결 시간을 측정하였다. 순환골재 미분말의 실험인자 및 평가항목은 Table 1과 같다.

상기의 결과를 바탕으로 순환골재 미분말의 혼입율 및 침지시간에 따른 알칼리 성분의 용출량을 검토하여 최적 혼입

Table 1. Experiment factor and tests of fine powder obtained from recycled aggregates

Experiment Factors	Fine powder obtained from recycled aggregates(wt%)	1, 2, 3, 4, 5
	Time of immersion(hr)	0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 24
Tests	ICP-OES mass analysis(hr)	0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 24
	pH measurement(hr)	0.5, 1, 3, 5, 24
	Setting Time	5-minute intervals

율과 침지시간을 파악한 후 GGBS 혼입 콘크리트를 제조하여 알칼리 자극제로서의 활용가능성을 검토하였다. 특히 콘크리트 실험의 경우 배합수에 순환골재 미분말의 첨가 유무 및 GGBS 치환율에 따른 콘크리트의 강도발현 특성을 비교 분석하였다.

콘크리트 배합설계의 경우 물결합재비는 50%로 고정하였으며, 결합재의 양은 300kg/m³로 설정하였다. GGBS의 치환율은 10, 20, 30, 50, 70 (%)씩 단계별로 혼입하여 굳지 않은 콘크리트의 공기량, 슬럼프를 측정하였다. 경화 콘크리트의 경우는 재령 3, 7, 14, 28 일에서 압축강도를 측정하였다. 콘크리트 배합표는 Table 2와 같으며, 콘크리트의 실험인자 및 수준은 Table 3과 같다.

Table 2. Mix design of concrete

Specimen	Binder		Type of mixing water		Super plasticizer (kg/m ³)	Aggregate (kg/m ³)			
	W/B (%)	S/A (%)	Cement (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)		Tap-water	Water by recycled aggregates	Fine	Coarse
	Control	300	-	150		-	-	850	1004
Control-3	300	-	-	-	150	850	1004		
BS10	270	30	150	-	-	849	1003		
BS10-3	270	30	-	150	-	849	1003		
BS20	240	60	150	-	-	847	971		
BS20-3	240	60	-	150	0.60	847	971		
BS30	210	90	150	-	-	843	966		
BS30-3	210	90	-	150	-	843	966		
BS50	150	150	150	-	-	753	889		
BS50-3	150	150	-	150	-	753	889		
BS70	90	210	150	-	-	748	884		
BS70-3	90	210	-	150	-	748	884		

Table 3. Experiment factor and tests of concrete with fine powder obtained from recycled aggregates

Experiment Factors	W/B(%)	50
	S/A(%)	46
Type of mixing water	Tap-water,	Water by immersion of fine powder obtained from recycled aggregates
	Water by immersion of fine powder obtained from recycled aggregates	
Tests	GGBS(%)	0, 10, 20, 30, 50, 70
	Slump(mm)	Each condition
	Air Contents(%)	Each condition
Compressive Strength(day)	3, 7, 14, 28	

Table 4. Physical properties and chemical composition of cement

Physical properties	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time (hr:min)		lg.loss (%)	Soundness	Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final			3day	7day	28day
	3.15	3,376	4:12	5:01	2.73	0.12	31.6	44.8	56.8

Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	lg.loss
	20.13	5.78	3.32	62.29	2.42	0.64	1.06	1.63	2.73

2.2 시험편 제작

콘크리트의 비빔은 굵은 골재와 잔골재를 투입하여 30초 간 건비빔한 후 시멘트와 혼화제, 물(물+고성능 감수제)순으로 투입하여 혼합하였다. 시험체는 원주형 몰드(∅ 100mm×200mm)로 제작하여 24시간 양생한 후 탈형하여 20±3℃의 온도에서 수중양생 하였다.

2.3 사용재료

2.3.1 시멘트

본 연구에 사용한 시멘트의 물리적 특성 및 화학적 성분은 Table 4와 같다.

2.3.2 순환골재 미분말

일반폐기물에서 발생하는 미분말의 경우 중금속 및 기타 화학적 물질 등을 일부 함유하고 있기 때문에 콘크리트에 사용할 경우 화학적 반응이 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서 사용된 순환골재 미분말은 건설폐기물 중 폐콘크리트에서 순환골재 생산시 발생하는 것을 사용하였으며, 밀도는 2.48g/cm³이며 흡수율은 4.30%이다. 그리고 순환골재의 미분말의 화학적 성분은 Table 5와 같다.

2.3.3 골재

본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 6와 같다.

2.3.4 고로슬래그 미분말

본 연구에 사용된 GGBS는 국내 S사 제품으로 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말)에 적합한 3종을 사용하였으며, 물리·화학적 특성은 Table 7과 같다.

Table 5. Chemical composition of recycled aggregate powder

Chemical Composition	Compo-sition Content (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg.loss
		48.5	11.7	4.1	29.8	1.9	1.5	2.5

Table 6. Physical properties of aggregate

Type of aggregate	Maximum size (mm)	Fineness modulus	Density	absorption ratio (%)	Solid volume (%)	Unit volume weight (kg/ℓ)
Coarse aggregate	20	6.80	2.69	1.48	58.40	1.69
Fine aggregate	5	2.85	2.56	2.33	64.35	1.68

Table 7. Chemical composition and physical properties of GGBS

Chemical Composition	Compo-sition Content (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg.loss
		31.82	17.48	0.52	43.79	4.44	3.79	0.36

Physical Properties	Fineness (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Flow Ratio (%)	Activity Coefficient(%)		
				7d	28d	91d
	4,420	2.90	103	68	98	126

2.3.5 고성능AE감수제

본 연구에 사용된 고성능 AE감수제의 화학적 특성은 Table 8과 같다.

Table 8. Chemical properties of admixture

	Main component	Type	Color	Density	Chloride	Toxicity
Superplasticizer	polycarboxylate-based	liquid	light brown	1.18 ±0.05	X	X

2.4 실험방법

2.4.1 pH미터

pH미터는 시료용액에 있는 전극 사이의 기전력의 차를 pH 값으로 바꾸어주는 장비로서 H사의 US/HI8424(Hanna)를 이용하여 측정하였다.

2.4.2 유도 결합플라즈마 질량 분석(ICP-OES)

ICP-OES 분석은 P사의 8300(PerkinElmer)를 사용하였으며, 아르곤 플라즈마를 이용하여 액체시료를 이온화시켜 각 무기원소 고유 파장을 이용한 정량 분석을 실시하였다.

2.4.3 이온크로마토그래피(Ion Chromatography)

이온크로마토그래피의 분석은 이온의 물리적 성질에 따라 이온 교환과정에서 그 이동 속도가 다른 것을 이용하여 용액 내의 이온을 분리하는 장치로서 T사의 ICS-5000 (Thermo Fisher_Dionex)를 사용하였다.

2.4.4 응결시간 측정

응결시간은 KS L ISO 9597 “시멘트의 응결 및 안정성 시험방법”에 따라 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순환골재 미분말의 사용 가능성 평가

3.1.1 pH 변화

순환골재 미분말을 배합수 질량대비 1~5%를 혼입한 후 시간 경과에 따른 pH를 측정한 결과는 Table 9와 Figure 1과 같다. Table 9의 시간에 따른 pH 측정결과는 순환골재 미분말의 혼입량에 관계없이 침지 후 5시간까지는 pH가 전체적으로 상승하였으나 5시간 이후에는 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 순환골재 미분말 1%를 혼입한 경우 침지 4시간 이후 pH 12.0가 측정되었으나 그 이외의 모든 혼입율에서는 침지 1시간 후에 pH 12.0 이상의 강알칼리성을 나타내었으며, 그 수치는 침지 5시간 경과 후에 최대가 되었다. 이러한 현상은 순환골재 미분말의 미수화 시멘트분말에 포함되어 있는 Ca(OH)₂와 더불어 Na⁺나 K⁺ 등의 각종 알칼리 이온이 수돗물에 용출되어 강알칼리성 환경이 조성된 것으로 판단된다.

3.1.2 순환골재 미분말의 알칼리이온 용출량

순환골재 미분말의 혼입에 따라 배합수 속에 용출된 알칼리 이온량을 정량분석하기 위하여 ICP-OES와 이온크로마토그래피 분석장비를 이용하여 시간에 따른 Ca(OH)₂의 총량을 분석하였다. Figure 2는 순환골재 미분말을 배합수 질량 대비 1%, 3%, 5%를 혼입하여 침지시킨 배합수의 시간에 따른 성분분석 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 각 혼입율에서 순환골재 미분말을 5시간 침지시킨 배합수에서 Ca(OH)₂의 용출량이 각각 132.91mg/l, 147.73mg/l, 152.95mg/l으로 가장 높게 나타났으며, 이러한 결과는 pH 측정결과와 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 침지시간이 동일한 경우,

Table 9. Results of pH measurement

Type	pH measurement								
	Initial	0.5h	1h	2h	3h	4h	5h	12h	24h
1%		9.9	11.5	11.8	11.9	12.0	12.0	11.9	11.9
2%		10.6	12.0	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1
3%	8.15	10.7	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.5	12.4
4%		10.8	12.3	12.4	12.5	12.6	12.6	12.5	12.4
5%		10.9	12.4	12.6	12.6	12.6	12.7	12.5	12.5

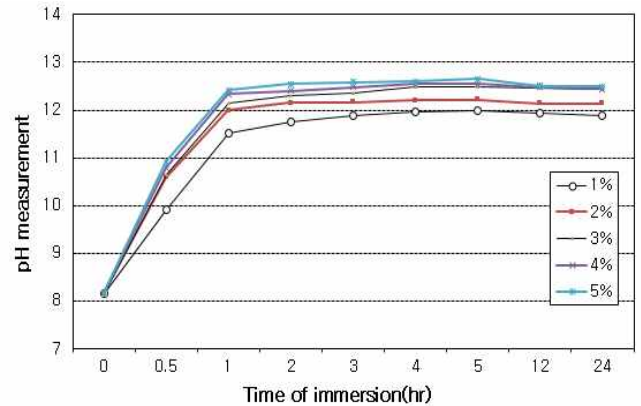


Figure 1. pH according to powder amount of recycled aggregate

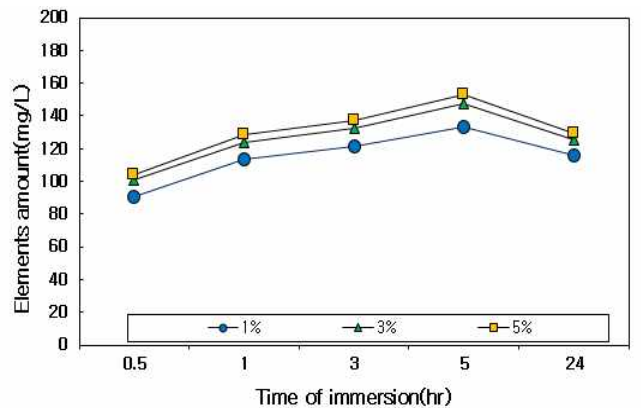


Figure 2. An amount of calcium hydroxide according to powder amount of recycled aggregate

순환골재 미분말을 3% 침지시킨 시험편의 경우 순환골재 미분말을 1% 침지시킨 시험편과 비교하여 비하여 약 15mg/l이상의 Ca(OH)₂를 함유하고 있었으나, 순환골재 미분말을 5% 침지시킨 시험편과는 5mg/l이하의 Ca(OH)₂량 차이를 보여 순환골재 미분말을 혼입율 3%와 5%를 침지시킨 배합수속의 Ca(OH)₂용출량 차이는 크지 않았다.

3.1.3 응결시간

순환골재 미분말이 혼입된 배합수가 GGBS 50% 치환 시멘트페이스트(이하 P-BS50)의 수화촉진에 어느 정도의 효

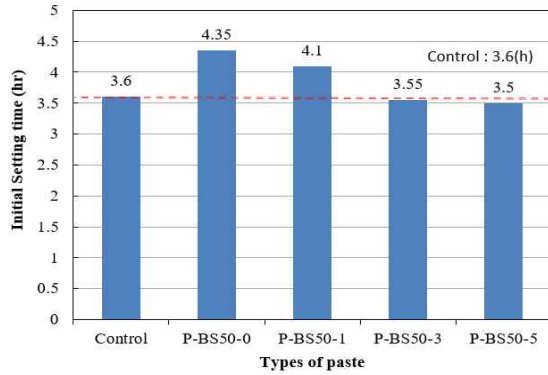


Figure 3. An Initial setting time according to powder amount of recycled aggregate

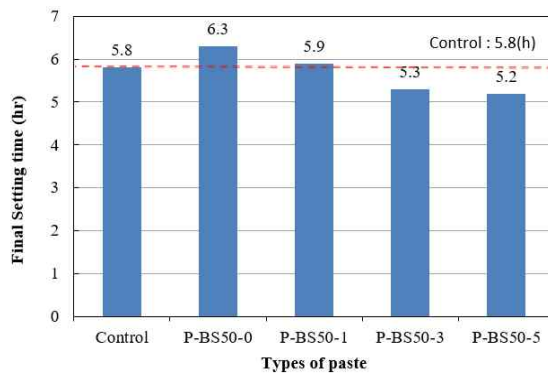


Figure 4. A final setting time according to powder amount of recycled aggregate

과가 있는지를 알아보기 위한 응결시험을 실시하였다. 순환골재 미분말의 침지시간을 5시간으로 고정한 후 혼입율 1, 3, 5%에 따른 시멘트페이스트의 응결시간 측정결과는 Figure 3 및 Figure 4와 같다. 초결시험의 경우 Figure 3과 같이 시멘트와 수돗물만을 사용한 Control시험편의 초결시간은 3.6시간으로 나타났으나, 배합수로 수돗물만을 사용한 P-BS50-0 시험편의 경우는 4.35시간으로 가장 늦은 초결시간을 나타내었다.

전체적으로 순환골재 미분말을 침지시킨 시험편의 경우 그렇지 않은 시험편에 비하여 초결시간이 단축된 것으로 나타났다으며, 순환골재 미분말의 혼입율이 증가할수록 초결시간은 단축되었다.

종결시험의 경우 Figure 4와 같이 Control 시험편에서는 종결시간이 5.8시간으로 나타났으나, P-BS50-0 시험편의 경우 6.3시간으로 가장 늦은 종결시간이 측정되어 초결시간의 실험결과와 유사한 것으로 나타내었다.

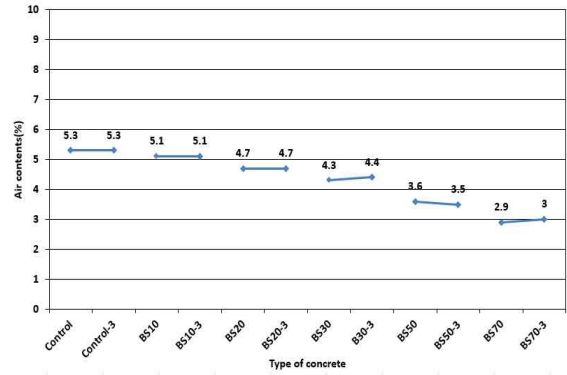


Figure 5. Results of air contents

따라서 pH변화 및 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용출량과 그에 따른 응결특성을 분석한 결과 GGBS를 자극시키기 위한 알칼리 자극제로서 순환골재 미분말의 활용가능성을 확인하였다. 최적 조건은 침지시간 5시간이며, 최적 혼입율은 3%로 판단되며, 콘크리트 배합시 본 조건을 배합수에 적용하여 GGBS의 치환율에 따른 콘크리트의 특성을 비교 평가하였다.

3.2 굳지 않은 콘크리트

3.2.1 공기량

순환골재 미분말의 첨가유무 및 GGBS 치환율에 따른 공기량 측정 결과를 Figure 5에 나타내었다.

순환골재 미분말을 침지시킨 배합수와 일반 배합수를 사용한 시험편의 공기량 측정결과, GGBS의 치환율이 높아짐에 따라 공기량은 상대적으로 낮아짐을 확인할 수 있었다. 그러나 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수와 일반 배합수의 사용에 따른 공기량 변화특성은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2.2 슬럼프

순환골재 미분말의 첨가유무 및 GGBS 치환율에 따른 슬럼프 측정 결과를 Figure 6에 나타내었다.

슬럼프 측정결과, GGBS의 혼입율이 높아짐에 따라 슬럼프는 증가하였다. 이는 GGBS의 입자가 불투수성 산화피막을 이루고 있기 때문에 흡수율이 낮아 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다[5]. 그러나 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수와 일반 배합수의 사용에 따른 특성은 공기량과 마찬가지로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

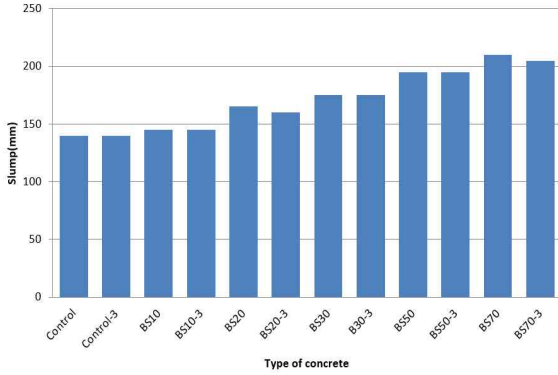


Figure 6. Results of slump test

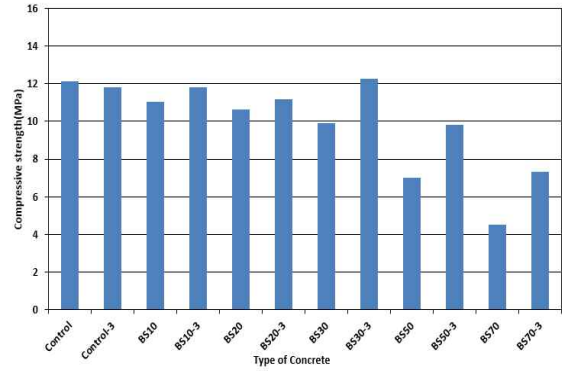


Figure 7. Results of compressive strength at 3day

3.3 경화콘크리트의 압축강도 특성

3.3.1 재령별 압축강도

순환골재 미분말의 첨가유무 및 GGBS 치환율에 따른 압축강도 측정결과를 Table 10과 Figure 7~Figure 10에 나타내었다.

Table 10. Results of compressive strength according to curing age

Type	Compressive strength(MPa)			
	3day	7day	14day	28day
Control	12.12	20.31	25.23	28.12
Control-3	11.81	21.02	25.02	29.01
BS10	11.03	18.64	26.32	29.03
BS10-3	11.8	19.67	27.15	30.7
BS20	10.63	17.12	27.33	30.03
BS20-3	11.18	21.12	28.48	31.61
BS30	9.88	18.05	29.00	33.00
B30-3	12.26	21.45	30.78	35.9
BS50	7.01	13.09	20.27	25.11
BS50-3	9.79	16.30	23.87	28.55
BS70	4.54	10.19	15.07	19.56
BS70-3	7.34	13.85	18.75	23.71

재령 3일의 경우 GGBS의 치환율과 관계없이 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 모든 시험편에서 수돗물을 사용한 시험편보다 강도발현이 우수한 것으로 측정되었다. 또한, BS30-3의 시험체의 경우 압축강도가 12.12MPa를 상회하는 것으로 나타났으며, BS10-3 및 BS20-3은 11.80MPa로 측정되었다. 이는 Control 시험체와 유사하거나 조금 높은 조기 강도발현 특성을 보였다.

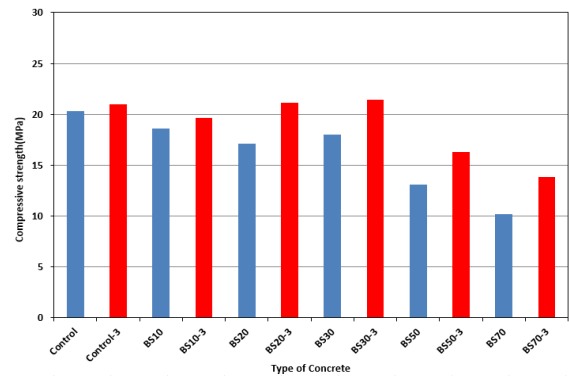


Figure 8. Results of compressive strength at 7day

재령 7일에 있어서도 재령 3일과 마찬가지로 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수를 사용한 모든 시험편이 수돗물을 사용한 시험체보다 압축강도가 우수한 것으로 측정되었다. 특히, BS20-3과 BS30-3 시험체에서는 각각 21.12MPa와 21.45MPa로 측정되어 수돗물을 사용한 Control 시험체의 압축강도인 20.31MPa를 모두 상회하는 것으로 나타났다. 한편, 수돗물을 배합수로 사용한 경우에는 GGBS 혼입율의 증가와 더불어 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다.

재령 14일이 되면서 배합수의 종류와 상관없이 GGBS 치환율 30%까지는 모두 Control 시험체의 압축강도인 25.23MPa를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 나타나는 GGBS의 잠재수경성 반응에 의한 것으로 재령 14일을 기준으로 고알칼리 환경이 만들어져서 GGBS의 산화 피막이 사라진 후 수화반응이 발생하여 강도가 발현되는 현상이기 때문이다.

GGBS의 치환율이 동일한 경우, 각 시험체들의 압축강도

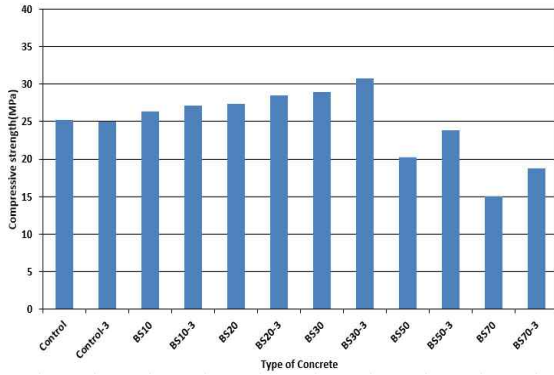


Figure 9. Results of compressive strength at 14day

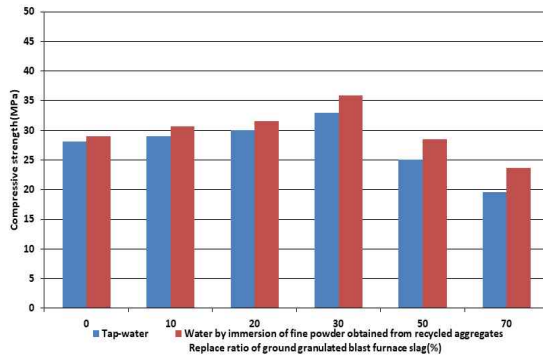


Figure 10. Results of compressive strength at 28day

는 재령 3, 7일과 마찬가지로 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수를 사용한 시험체의 강도발현이 우수한 것으로 나타났다. 특히 BS30-3 시험체의 강도가 30.78MPa로 측정되어 Control의 강도인 25.23MPa 보다 약 22% 정도의 강도 증가율을 나타냈다.

Figure 10은 재령 28일에서 GGBS를 혼입한 콘크리트 압축강도를 측정한 결과이다. 재령 28일에서는 BS50-3 시험체에서도 Control 시험체의 강도를 초과하는 현상이 관찰되었으며, BS30-3 시험체의 강도가 35.9MPa로 Control 시험체의 28.12MPa 보다 약 28%의 강도증가율을 나타냈다. 이러한 결과로부터 GGBS를 다량 사용하는 콘크리트에서 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수 사용이 일반 배합수보다 강도증진에 효과적임을 확인할 수 있었다.

3.3.2 활성화 지수

순환골재 미분말의 알칼리 자극제로서의 효과를 비교분석하기 위해 Control 대비 압축강도발현 정도를 나타내는 활성화지수를 도입하여 정리한 결과를 Table 11에 나타냈다.

순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 경우 그렇

Table 11. P.A.I according to concrete type

Type	P.A.I(%)			
	3day	7day	14day	28day
Control	100	100	100	100
BS10	91	92	104	103
BS10-3	97	97	108	109
BS20	88	84	108	107
BS20-3	92	104	113	112
BS30	82	89	115	117
BS30-3	101	106	122	128
BS50	58	64	80	89
BS50-3	81	80	95	102
BS70	37	50	60	70
BS70-3	61	68	74	84

지 않은 경우와 비교하여 전 재령에서 강도발현성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 재령 3일에서 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 BS30-3 시험체는 Control 대비 101%의 활성도를 나타냈으나, 수돗물을 사용한 BS30 시험체는 82%의 활성도를 나타내어 활성도의 차이가 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 그리고 재령 28일의 경우 BS30-3 시험체는 Control 대비 128%의 활성도를 나타내어 조기재령과 장기재령 모두에서 순환골재 미분말의 알칼리 자극효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 순환골재 미분말을 GGBS의 알칼리 자극제로 활용하기 위해 배합수에 일부 첨가하여 강알칼리성을 띄게 한 후, GGBS를 단계별로 치환한 콘크리트의 물리적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 순환골재 미분말 1%를 침지시킨 배합수를 제외하고 침지시간 1시간 이후 전 시험체 모두 pH 12.0 이상이 측정되어 조기 침지시간에 강알칼리성 환경이 된 것을 알 수 있었다. 특히, 침지시간이 5시간일 때 전 배합수에서 가장 높은 pH가 측정되어 알칼리 자극제로서 활용가능성이 가장 높은 침지 시간은 5시간임을 확인할 수 있었다.
- 2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 용출량을 측정한 결과 순환골재 미분말을 5시간 침지시킨 시험편에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 이 가장 높게 나타났다. 침지시간이 동일한 경우, 순환골재 미분말을 3% 혼입시킨 배합수가 1% 혼입시킨 배합수에 비하여 약 15mg/l이상의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 을 더 함유한 것으로 나타

났으며, 5%를 혼입 시킨 배합수의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 량과는 차이는 크지 않아 최적 혼입율은 3%로 판단된다.

- 3) 순환골재 미분말 사용에 따른 응결시간 측정결과 혼입율이 높을수록 초결과 종결시간이 단축된 것으로 나타났다. 응결시간을 통해 GGBS를 자극시키기 위한 알칼리 자극제로서 순환골재 미분말의 최적 침지시간은 5시간으로 판단된다.
- 4) 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 경우 일반배합수를 사용한 경우와 비교하여 전 재령에서 강도발현이 더 우수한 것으로 나타났으며, 재령 28일 기준으로 BS50-3 시험체에서도 Control 시험체의 강도를 초과하는 것을 확인하였다. GGBS를 다량 사용하는 콘크리트에서 순환골재 미분말을 침지시킨 배합수 사용이 일반 배합수 보다 강도증진에 효과적인 것으로 나타나 순환골재 미분말이 알칼리 자극제로서의 효과가 있음을 입증하였다.
- 5) 활성화지수의 평가결과, 재령 3일에서 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 BS30-3 시험체는 Control 대비 101%의 활성도를 나타내었으나, 일반 배합수를 사용한 BS30의 시험체는 82%의 활성도를 나타내었다. 재령 28일의 경우에서도 BS30-3 시험체는 Control 대비 128%의 활성도를 나타내어 조기재령과 장기재령 모두에서 순환골재 미분말의 알칼리 자극 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 경우 일반배합수를 사용한 경우와 비교하여 전 재령에서 강도발현이 더 우수한 것으로 나타나 순환골재 미분말의 알칼리 자극효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 순환골재 미분말과 배합수와의 교반방법, 배합수의 사용온도 등에 의하여 결과는 달라질 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하며 내구성능 등에 대한 검증도 필요할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 순환골재 생산시 발생하는 미분말을 고로슬래그 미분말의 알칼리 자극제로 활용하기 위해 배합수에 일부 혼입하여 강알칼리성을 띄게 한 후, 고로슬래그 미분말을 단계별로 치환한 콘크리트의 물리적 특성에 미치는 영향

을 종합적으로 분석하였다. 그 결과 순환골재 미분말의 침지시간이 5시간일 때 전 시험편에서 가장 높은 pH가 측정되어 알칼리 자극제로서 활용가능성이 가장 높은 침지시간임을 확인할 수 있었으며, 순환골재 미분말을 3% 혼입시킨 시험 배합수가 1% 혼입시킨 배합수에 비하여 약 15mg/l이상의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 을 더 함유한 것으로 나타내었다. 순환골재 미분말을 혼입시킨 배합수를 사용한 경우 일반배합수를 사용한 경우와 비교하여 전 재령에서 강도발현이 더 우수한 것으로 나타났으며, 조기재령과 장기재령 모두 순환골재 미분말의 알칼리 자극효과가 있음을 확인할 수 있었다.

키워드 : 순환골재 미분말, 고로슬래그 미분말, 자극제, 압축 강도

References

1. Lee HW, Park CH, The fluctuation of construction in 2016. Proceeding of the fluctuation of construction and immovable in 2016; 2015 Nov 03; Seoul, Korea, Seoul (Korea): Construction Economy Research Institute of Korea; 2015. p. 1-58.
2. Lee DG, (An) experimental study on the properties of light-weight foamed concrete using waste concrete powder[*master's thesis*]. [Kongju (Korea)]: Kongju National University; 2010. 97 p.
3. Kang DW, The study on the improvement of recycled cement using cementitious powder from waste concrete[*master's thesis*]. [Pusan (Korea)]: Dong-A University; 2012. 51 p.
4. Hwang GK, Development of environment-friendly foamed lightweight concrete with blast furnace slag and recycled aggregate powder [*master's thesis*]. [Chung-Ju (Korea)]: Chung-Ju University; 2014. 86 p.
5. Shin SY, A study on the increase early strength of concrete with blast furnace slag using wash water from recycled aggregates [Dissertation]. [Pusan (Korea)]: Pusan National University; 2015. 118 p.
6. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC, An experimental study on the carbonation and drying shrinkage of concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag. Journal of Korea Institute of Building Construction, 2012 Aug;12(4):393-8.