

열병합발전소 플라이애시와 순환잔골재를 사용한 무시멘트 모르타르의 공학적 특성

Engineering Properties of the Non-Cement Mortar using the Fly ash from Combined Heat Power Plant and Recycled Fine Aggregate

남한국

임정근

이상수*

Nam, Han-Kook

Lim, Jeong-Geun

Lee, Sang-Soo*

Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-730, Korea

Abstract

In this study, to suggest the application method of recycled fine aggregate, the non-cement mortar was prepared and studied with the binders of blast furnace slag, fly ash, and fly ash from combined heat power plant. As a basic experiment, a series of tests was conducted to determine the potions of the binders and types of activator. When the binder was consisted with 20% of fly ash and 40% of fly ash from combined heat power plant, the highest strength of the mortar was obtained, and as an activator, the combination of sodium hydroxide 2.5%, and calcium hydroxide 7.5% showed the highest strength of the mortar. Therefore, this study focuses on engineering properties of mortar contains fly ash from combined heat power plant and recycled fine aggregate according to replacement ratio of recycled fine aggregate based on the optimum mix from the basic experiment. As a result, the best replacement ratio of recycled fine aggregate is 75%.

Keywords : industrial by-product, fly ash from combined hear power plant, recycled fine aggregate

1. 서론

1.1 연구의 배경

우리나라는 역사적으로 유례없는 급속한 경제성장을 이루며 이로 인한 환경오염과 생태계 파괴가 별다른 규제 없이 진행되었다[1]. 또한 1990년대부터 건물의 재건축, 도심지의 재개발, 노후도로 보수공사 등에서 건설폐기물의 발생량이 급속하게 증가하고 있는 추세이며 건설생산은 타 산업의 생산활동에 비해 막대한 자원을 소비하고 콘크리트 구조물의 라이프사이클(Life cycle), 즉 신축·해체·재활용에 있

어서 막대한 양의 건설 폐기물을 발생시켜 지구환경에 미치는 영향이 매우 크므로 건설폐기물에서 발생하는 순환골재의 활용방안에 대한 연구가 필요한 실정이다[2].

또한, 시멘트는 매년 전 세계적으로 15억 톤 이상 생산되고 있으며 전체 CO₂ 배출량의 7% 이상을 발생시켜 지구온난화를 더욱 악화시키고 있다. 이로 인해 건설 산업에서 기후변화협약에 따른 CO₂ 감축이 국가의 절대적 의무가 되었으며[3], 2013년도 국내 CO₂ 배출량은 세계 8위 수준으로 “저탄소 녹색성장”에 의거 CO₂ 저감 정책을 시행함에 따라 화력발전소에서 발생하는 산업부산물인 플라이애시를 시멘트에 대체하여 일부 사용하고 있다. 그러나 대부분 배합설계 시스템에 의한 체계적인 배합선정이 이루어지지 않고 단순히 일부분 대체하여 사용하고 있는 실정이다.

그리고 기존에 화력발전소에서 발생하는 플라이애시 이외에 열병합발전소에서 생산되는 열병합플라이애시는 연소부 일러에서 생성되는 산업부산물로서 하나의 에너지원으로 열

Received : May 13, 2015

Revision received : June 22, 2015

Accepted : October 26, 2015

* Corresponding author : Lee, Sang-Soo

[Tel: 82-42-821-1118, E-mail: sslee111@hanbat.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

과 전력을 동시에 발생시켜 에너지 효율의 극대화를 추구하는 시스템이기 때문에 신규 증설에 애시가 큰 영향을 미치고 있고 처리문제가 시급한 실정이다. 국내의 열병합발전소에서 생성되는 플라이애시는 화력발전소에서 생산되는 플라이애시와 달리 CaO성분이 높기 때문에 수화반응 특성을 나타내고 있는 것이 특징이다. 미연탄소 함량이 낮은 양질의 플라이애시의 경우 워커빌리티의 향상, 수화열 감소, 장기강도 증진, 내구성 증대, 균열 발생 억제 등 콘크리트 품질향상에 기여하고 댐과 같은 대형 구조물에 사용되지만 이러한 목적에 사용되는 플라이애시는 화력발전소에서 사용되는 플라이애시로 제한되어 열병합플라이애시의 사용량에 대한 연구가 필요한 실정이다.

1.2 연구의 목적

본 연구는 지구온난화의 주범인 CO₂ 배출을 줄이기 위해 건설산업에서 다량의 이산화탄소를 배출하고 있는 시멘트의 사용량을 줄이고 이 시멘트의 대체재로 고로슬래그, 플라이애시, 열병합플라이애시 등의 산업부산물을 재활용하여 환경문제 해결과 잔골재를 대체할 수 있는 순환잔골재를 사용하여 자원부족 문제를 동시에 해결하고자 하며 열병합플라이애시의 활용처가 필요한 실정으로 본 실험을 통해 잔골재와 순환잔골재의 사용량에 따른 특성을 분석하여 고로슬래그 기반의 무시멘트 모르타르로서 활용 가능여부에 대한 기초연구 자료로 제시하고자 한다. Figure 1은 본 연구의 목적을 나타내었다.



Figure 1. Purpose of research

2. 사용재료

2.1 고로슬래그

본 실험에서 사용된 고로슬래그는 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,460cm²/g인 3종을 사용하였으며, 고로슬래그는 잠재수경성이기 때문에 별도의 알칼리 자극제가 첨가되면 경화되는 성질을 갖고 있다. Table 1은 고로슬래그의 화학적 성

분을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical component of blast furnace slag

Using materials	Chemistry components (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
BFS	34.39	14.47	0.63	41.67	6.49	-	0.36	1.20	-

2.2 플라이애시

본 실험에서 사용된 플라이애시는 밀도 2.22g/cm³, 분말도 4,120cm²/g인 것을 사용하였다. 플라이애시는 입자가 구형이며 실리카 함량이 높은 유리조직으로 구성되어 있다. Table 2는 플라이애시의 화학적 성분을 나타낸 것이다.

Table 2. Chemical component of fly ash

Using materials	Chemistry components (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	P ₂ O ₃	TiO ₂
FA	54.38	21.50	5.16	10.83	1.89	1.29	-	-	0.62

2.3 열병합플라이애시

본 실험에서 사용된 열병합플라이애시는 밀도 2.62g/cm³, 분말도 2,740cm²/g인 것을 사용하였으며, 일반 플라이애시보다 SiO₂와 Al₂O₃의 함량이 약 10% 정도 낮고, CaO의 함량이 15% 정도 높은 특징을 갖고 있다. 열병합플라이애시는 입자의 형태가 결정체를 띠고 입자의 형상으로 불규칙한 침상구조로 반수경성을 나타내는 동시에 포졸란 반응성을 띠고 있다 [1]. Table 3은 열병합플라이애시의 화학적 성분을 나타낸 것이다.

Table 3. Chemical component of CHP fly ash

Using materials	Chemistry components (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	P ₂ O ₃	TiO ₂
CHP fly-ash	35.90	15.80	12.00	26.50	1.20	5.20	-	-	0.62

2.4 잔골재

본 실험에서 사용된 잔골재는 천연 잔골재(세척사)와 순환 잔골재를 사용하였으며, ‘KS F 2526 콘크리트용 골재’와 ‘KS F 2573 콘크리트용 순환 골재’에 준하는 것을 사용하였다. Table 4는 본 실험에 사용된 잔골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

Table 4. Physical property of fine aggregate

Using materials	Diameter (mm)	Fineness modulus (FM)	Density (g/cm ³)	Absorption rate (%)	Unit volume mass (kg/ℓ)
Natural fine aggregate	5	2.82	2.60	0.78	1.561
Recycled fine aggregate	5	2.92	2.42	4.63	1.476

2.5 알칼리 자극제

본 실험에서 사용된 알칼리 자극제로는 분말형태의 NaOH와 Ca(OH)₂를 사용하였다. NaOH는 순도 98% 밀도 2.13g/cm³인 것을 사용하였으며, Ca(OH)₂는 밀도 2.24g/cm³인 것을 사용하였다.

3. 기초실험계획 및 분석

3.1 기초실험계획

본 연구에 앞서 실시한 기초실험은 시멘트 기반의 결합재를 대체하기 위하여 무시멘트계 결합재 페이스트의 최적배합을 도출하기 위한 실험으로 실험요인 및 수준은 Table 5에 나타내었다. 결합재의 적정 치환율을 분석하고자 고로슬래그를 주 결합재로 사용하고 플라이애시와 열병합플라이애시의 치환율을 각각 0, 20, 40, 60(%)로 설정하였다. 또한, 알칼리 자극제의 적정 첨가율을 분석하고자 알칼리 자극제의 첨가율은 NaOH와 Ca(OH)₂ 모두 각각 0, 2.5, 7.5, 10(%)로 설정하였다.

Table 5. Basic experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Binder	· Blast Furnace Slag, Fly-ash, Combine Heat Power Plant Fly-ash	3
Replacement ratio of fly-ash and combine heat power plant fly-ash	· 0, 20, 40, 60 (wt.%)	4
Alkali activator	· NaOH, Ca(OH) ₂	2
Addition ratio of alkali activator	· 0, 2.5, 7.5, 10 (wt.%)	4
W/B	· 40%	1
Curing conditions	· Relative humidity (80±5)% Temperature (20±2)°C	1
Test items	· Flexural strength, Compressive strength	2

Table 6. Mix proportion for basic experiment

	W/B (%)	Unit weight(g)					
		W	BFS	FA	CHP FA	NaOH	Ca(OH) ₂
4:0:6-N10				0	60		
4:2:4-N10				20	40		
4:4:2-N10				40	20	10	0
4:6:0-N10				60	0		
4:0:6-N2.5C7.5				0	60		
4:2:4-N2.5C7.5				20	40		
4:4:2-N2.5C7.5				40	20	2.5	7.5
4:6:0-N2.5C7.5				60	0		
4:0:6-N5C5				0	60		
4:2:4-N5C5	40	40	40	20	40	5	5
4:4:2-N5C5				40	20		
4:6:0-N5C5				60	0		
4:0:6-N7.5C2.5				0	60		
4:2:4-N7.5C2.5				20	40		
4:4:2-N7.5C2.5				40	20	7.5	2.5
4:6:0-N7.5C2.5				60	0		
4:0:6-C10				0	60		
4:2:4-C10				20	40		
4:4:2-C10				40	20	0	10
4:6:0-C10				60	0		

3.2 기초실험결과

1) 휨강도

Figure 2는 기초실험의 휨강도 시험결과를 나타낸 것으로, Ca(OH)₂를 10% 첨가한 시험체는 모두 낮은 휨강도 값을 나타내었으며, NaOH를 10% 첨가한 시험체는 모두 높은 휨강도 값을 나타내었다. 또한, 전체적으로 열병합플라이애시의 치환율이 높아짐에 따라 휨강도 또한 증가하는 경향을 나타내었으며, 알칼리 자극제를 혼합하여 사용한 NaOH-2.5%, Ca(OH)₂-7.5%를 첨가한 시험체의 경우 가장 높은 강도 값을 나타내었다. 이는 고로슬래그는 강알칼리인 NaOH와의 반응할 경우 잠재수경성 반응이 활발히 나타나며, 플라이애시는 포졸란 반응으로서 Ca(OH)₂와의 반응성이 뛰어난 것으로 판단되는데, 열병합플라이애시는 고로슬래그와 화학적 성분 중 SiO₂와 Al₂O₃ 함유량이 비슷하기 때문에 NaOH와의 반응할 경우 포졸란 반응과 수경성 반응이 동시에 일어나 결합재로 고로슬래그와 플라이애시, 열병합플라이애시가 섞인 결합재에 모든 결합재에 충분한 반응을 일으킬 수 있는 알칼리 자극제가 적정량 혼합되어 지고 알칼리성 이온이 플라이애시에 함유된 유리막 Si-O-Si와 Al-O-Al의 공유 결합을 파괴하고, 이 과정에서 생성된 무정형 알루미늄 실리케이트 물질이 최종적으로 열병합플라이애시를 결합시켜 높은 강도를 발현한 이 유라 판단되어 진다[5].

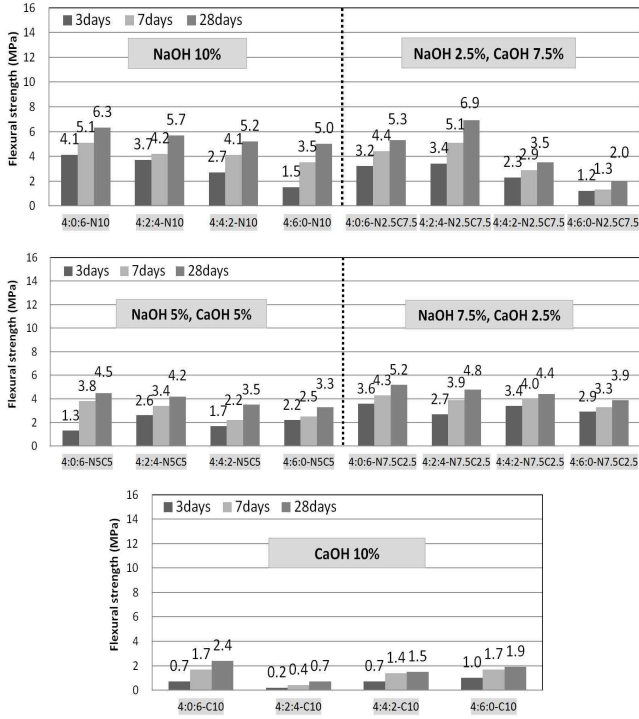


Figure 2. Flexural strength

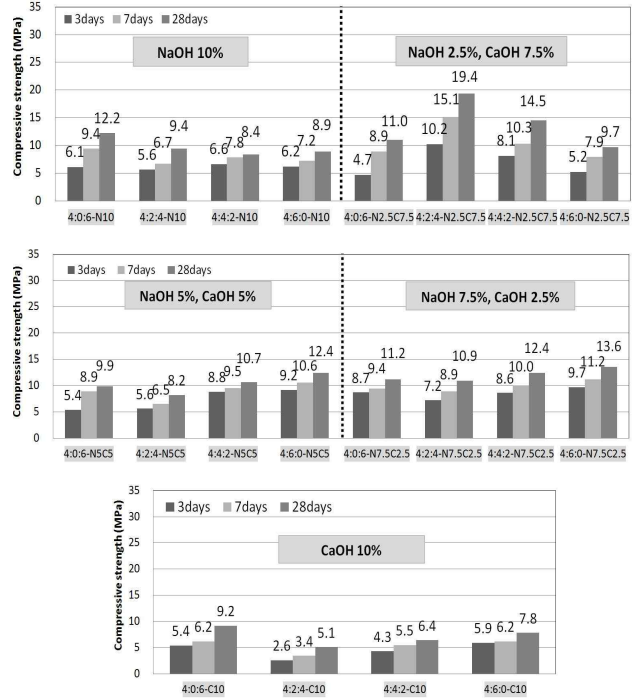


Figure 3. Compressive strength

2) 압축강도

Figure 3은 기초실험의 압축강도 시험결과를 나타낸 것으로, 알칼리 자극제를 혼합하여 사용하지 않고 단독으로 사용한 경우에는 대체로 낮은 강도를 발현하는 경향을 나타내었으며, 알칼리 자극제를 혼합하여 사용한 NaOH-2.5%, Ca(OH)₂-7.5%가 첨가된 시험체의 경우 가장 높은 강도를 발현하였다. 또한, 함강도의 경우와 마찬가지로 4:2:4-N2.5C7.5인 시험체가 가장 높은 강도를 발현하였다. 이는 알칼리 활성 반응물질은 일반적으로 점성과 활성이 큰 액체로 시멘트 수화물에 비해 치밀한 조직 구조를 가지고 있고 열병합플라이애시의 사용함에 따라 알칼리 자극제와 반응하여 규산나트륨(NaSiO₃)로 활성화 되고 이로 인해 규산나트륨은 물과 반응하여 pH를 더욱 높이고 중합반응을 증대시켜 압축강도를 증대시킨 것으로 판단된다[1].

3.3 기초실험결론

기초실험의 결과로 알칼리 자극제의 적정 첨가율은 NaOH 2.5%, Ca(OH)₂ 7.5%인 것으로 나타났으며 플라이애시와 열병합플라이애시의 적정 치환율은 플라이애시 20%, 열병합플라이애시 40%인 것으로 판단되어 본 실험에서는 결합재와 알칼리 자극제의 첨가율을 고정하고 잔골재와 순환 잔골재의 첨가율에 따른 특성을 분석하고자 한다.

4. 본 실험계획 및 방법

4.1 실험계획

본 실험의 실험수준 및 요인은 Table 7에 나타내었다. 기초 실험에서 얻어진 최적배합을 토대로 알칼리 자극제의 첨가율을 NaOH는 2.5%, Ca(OH)₂는 7.5%로 고정하였고, 플라이애시의 치환율은 20%, 열병합플라이애시의 치환율은 40%로 설정하였으며 잔골재와 순환 잔골재의 첨가율을 0, 25, 50, 75, 100(%)로 설정하였다. 잔골재의 첨가에 따른 비빔성능 확보를 위해 W/B는 65%로 설정하였고 무시멘트 경화체와 시멘트로 이루어진 경화체와의 비교를 위해 OPC를 제작하였다. 이에 따른 시험항목으로는 유동성, 공기량, 응결시간, 함강도, 압축강도 등을 측정하였다.

4.2 실험방법

본 실험의 비빔방법은 먼저 고로슬래그, 플라이애시, 열병합플라이애시를 용량 18L 강제식 모르타르 믹서에 투입한 후 60초 동안 건비빔을 실시하고 잔골재를 투입한 뒤 60초 동안 비빔을 실시한 후 알칼리 자극제와 배합수를 혼합한 용액을 첨가하여 60초 동안 비빔을 실시하여 총 180초 동안 비빔 뒤 토출하였다. 또한, 본 실험에서 굳지 않은 성상을 측정하기 위하여

유동성은 'KS L 5111'를 준용하여 측정하였고 응결시간은 'KS F 2436'에 의거하여 측정하였다. 힘 및 압축강도는 'KS L ISO 679'에 의거하여 40×40×160mm의 크기로 시험체를 제작하였으며, 재령 3, 7, 28(일)의 강도를 측정하였다.

Table 7. Experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Binder	· Cement, Blast Furnace Slag, Fly-ash, Combine Heat Power Plant Fly-ash	4
Replacement ratio of fly-ash and combine heat power plant fly-ash	· Fly-ash 20%, CHP fly-ash 40%	2
Fine aggregate	· Natural fine aggregate, Recycled fine aggregate	2
Replacement ratio of Recycled Fine aggregate	· 0, 25, 50, 75, 100 (wt.%)	5
Alkali activator	· NaOH, Ca(OH) ₂	2
Addition ratio of alkali activator	· 2.5, 7.5 (wt.%)	2
W/B	· 65%	1
Curing conditions	· Relative humidity (80±5)%, Temperature (20±2)°C	1
Test items	· Table flow, Setting time, Flexural strength, Compressive strength	4

Table 8. Mix proportion for main experiment

	W/B (%)	Unit weight(g)								
		W	C	BFS	FA	CHP FA	NaOH	Ca(OH) ₂	S	RS
OPC (S-100)			100	-	-	-	-	-	100	0
OPC (RS-100)									0	100
S-100									100	0
S-75 RS-25	65	65							75	25
S-50 RS-50			-	40	20	40	2.5	7.5	50	50
S-25 RS-75									25	75
RS-100									0	100

5. 본 실험결과 및 분석

5.1 유동성

Figure 4는 유동성 시험결과를 나타낸 것으로, 시멘트와 천연 잔골재를 사용한 OPC (S-100) 시험체의 유동성이 가장 큰 것으로 나타났으며, 순환 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 유동성이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 순환 잔골

재의 높은 흡수율로 유동성이 저하된 것이라 판단된다.

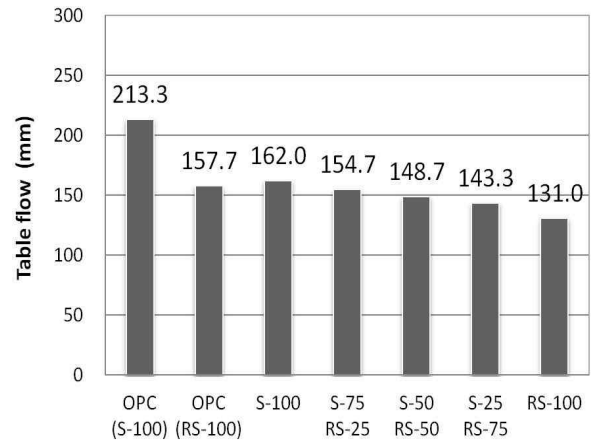


Figure 4. Table flow

5.2 응결시간

Figure 5는 응결시간 시험결과를 나타낸 것으로, 시멘트와 천연잔골재를 사용한 OPC (S-100) 시험체가 가장 빠른 응결시간을 나타내었다. 무시멘트 모르타르 시험체 중에서는 S-75 RS-25인 시험체가 가장 빠른 종결시간을 나타내었으며 무시멘트 모르타르의 경우 순환 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 응결시간이 지연되는 경향을 나타내었으며 이는 순환 잔골재의 경우 일반적으로 생산과정에서 이물질이 제거되어야 하지만 본 실험에 사용된 순환 잔골재는 이물질에 대한 성분 분석은 실시하지 않았으나 에 포함된 미량의 불순물(금속, 목재, 기타) 등에 의해 응결을 지연시킨 것으로 판단된다.

간이 성분 분석 결과 점토덩어리 함유량이 기준치(1.0 이하)보다 약 1% 높은 결과를 나타내었다.

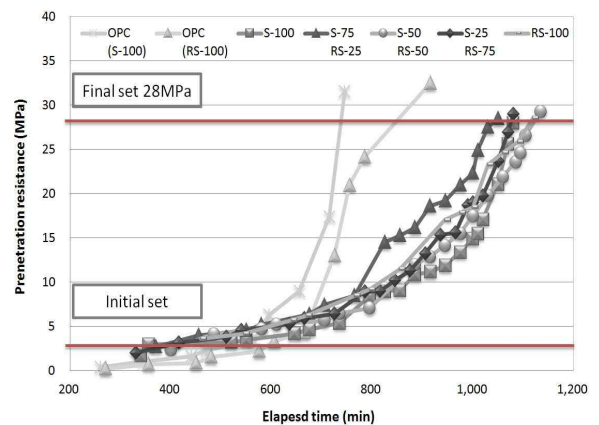


Figure 5. Setting time

5.3 휨강도

Figure 6은 휨강도 시험결과를 나타낸 것으로, 시멘트 기반의 경우 순환 잔골재가 사용된 경우 더 낮은 강도를 발현하였으며, 무시멘트 기반의 경우에는 순환 잔골재 치환율 75%까지는 강도가 증가 되는 경향을 나타내다 100%를 치환하였을 경우에는 강도가 저하되는 경향을 나타내며 S-25 RS-75인 시험체가 가장 높은 강도를 발현하였다. 이는 시멘트 기반에서는 응결시간의 결과와 마찬가지로 미립분에 의해 순환 잔골재를 사용함에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었지만, 무시멘트 기반(3성분계)의 경우 순환 잔골재에 포함된 기타 성분 등과의 반응으로 강도가 증진된 것으로 판단된다. 또한, 무시멘트 기반의 경우 시멘트 기반보다 순환 잔골재와의 부착력이나 배합수량의 저하로 인하여 강도 증진에 영향을 미친 것으로 판단된다.

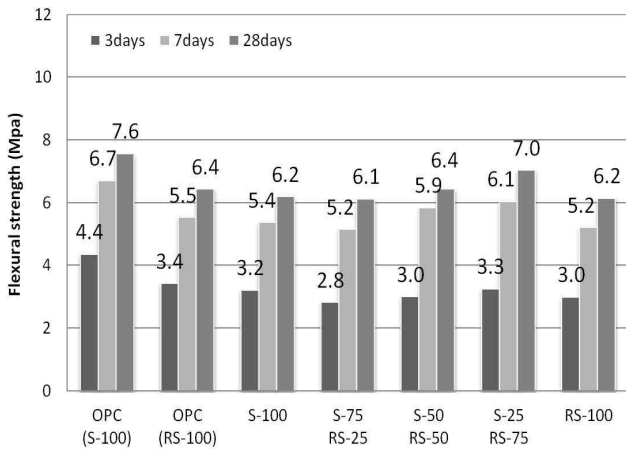


Figure 6. Flexural strength

5.4 압축강도

Figure 7은 압축강도 시험결과를 나타낸 것으로, 휨강도와 유사한 경향을 나타내며 시멘트 기반의 경우 순환 잔골재를 사용한 경우 강도가 감소하는 반면, 무시멘트 기반에서는 순환잔골재의 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내다 100% 치환시에는 다시 감소하는 경향을 나타내며 무시멘트 모르타르 시험체 중에서 S-25 RS-75인 시험체가 재령 28일 20.9MPa로 가장 높은 강도를 발현하였다. 이는 휨강도의 결과와 동일한 이유인 것으로 판단된다.

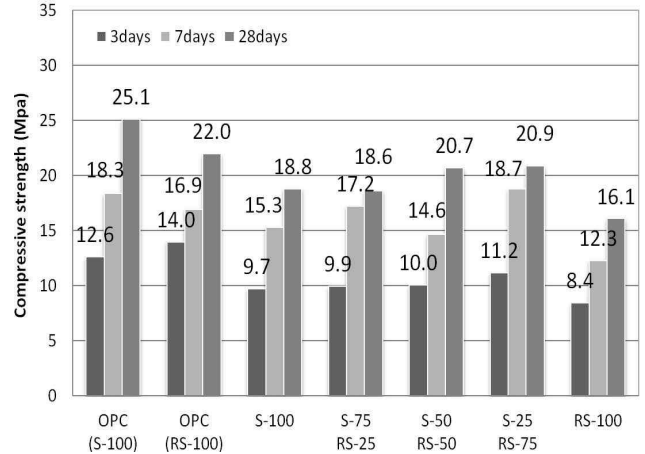


Figure 7. Compressive strength

6. 결 론

열병합발전소 플라이애시와 순환 잔골재를 사용한 무시멘트 모르타르의 공학적 특성을 분석한 결과, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유동성 시험결과, 순환 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 유동성이 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 응결시간 시험결과, 시멘트 기반과 무시멘트 기반 모두 순환 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 응결시간이 지연되는 경향을 나타내었다.
- 3) 휨강도 시험결과, 시멘트 기반에서는 순환잔골재를 사용하였을 경우 강도가 저하되는 경향을 나타내었으나 무시멘트 기반(3성분계)의 경우 순환 잔골재 치환율 75%까지는 휨강도가 증가하는 경향을 나타내었다.
- 4) 압축강도 시험결과, 휨강도와 유사한 경향을 나타내며, 순환 잔골재 치환율 75%까지는 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과로, 본 실험에 의거하여 순환잔골재 및 열병합 플라이애시를 적당량 혼입하면 시멘트를 사용한 성능과 동등한 특성을 나타내므로, 향후 SEM, XRD등 추가적인 분석과 심화된 연구를 통한다면 현장에서 열병합플라이애시와 순환 잔골재의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 순환골재의 재활용 방안 및 시멘트를 대체할 수 있는 결합재에 대한 연구가 필요한 실정으로 고로슬래그,

플라이애시, 열병합플라이애시 등을 시멘트 대체재로 활용하여 무시멘트 모르타르를 제조하고자 하였다. 기초 실험에서는 결합재의 비율 및 알칼리 자극제의 선정을 위한 실험을 실시하였으며, 실험결과 결합재는 플라이애시 20%, 열병합플라이애시 40%를 치환한 경우 가장 높은 강도 값을 나타내었으며 알칼리 자극제로 NaOH 2.5%, Ca(OH)₂ 7.5%를 혼합하여 사용할 경우 가장 높은 강도 값을 나타내었다. 따라서 본 실험에서는 기초 실험에서 얻어진 최적 배합을 토대로 순환 잔골재의 치환율에 따른 무시멘트 모르타르의 특성을 검토하여 열병합플라이애시와 순환 잔골재를 사용한 모르타르의 공학적 특성을 분석하고자 하였다. 실험결과, 순환 잔골재의 적정 치환율은 75%인 것으로 나타났다.

키워드 : 산업부산물, 열병합플라이애시, 순환 잔골재

References

1. Lim SS, Mechanical Properties of Non-Cement Matrix according to rreplacement ratio of Fly Ash in the Thermoelectric Power Plant with Combined Heat and Power Plant [Dissertation], [Daejeon (Korea)]: Hanbat National University; 2014. 56 p.
2. Jeong JY, Properties of foamed concrete according to using methods and types of foaming agent [Dissertation], [Cheonan-si (Korea)]: Kongju National University; 2012. 137 p.
3. Hwang JP, Jin SH, Ann KY, Estimation of CO₂ emission with raw materials and energy sources, Proceeding of the Korea Concrete Institute conference; 2011 Nov;2(23):785-6.
4. Lee YS, Lee SS, Song HY, Strength properties according to the conditions of low carbon inorganic composite using industrial by-product, journal of the Korea institute of building construction, 2012 Feb;12(1):54-63.
5. Lee SS, Kim YM, Park SG, Strength properties of non-portland cement lightweight matrix according to types and addition ratios of alkali activator, journal of the Korea institute of building construction, 2014, Aug;14(4):301-7.