





2019년 2월 석사학위 논문

분쇄하지 않은 순환유동층 보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트

조선대학교대학원 건축공학과 (건축공학전공) 전상민



분쇄하지 않은 순환유동층 보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트

Use of circulation fluidized bed combustion (CFBC) bottom ash in high volume slag cement without grinding

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원 건축공학과(건축공학전공) 전 상 민





분쇄하지 않은 순환유동층보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트

지도교수 김 형 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과 (건 축 공 학 전 공)

전 상 민





전상민의 석사학위논문을 인준함

위원召	당 : -	조선대학교	조교수	황	태	연	(인)
위 원	의 -	조선대학교	조교수	김	태	밍	(인)
위 문	길 :	조선대학교	부교수	김	형	기	(인)

2018년 11월

조선대학교 대학원



목 차

에1장 서 론	
제1절 연구 배경 및 목적	
제2절 연구 방법 및 범위5	
제2장 이론적 고찰8	
제1절 고로슬래그의 정의 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
제2절 순환유동층 보일러(CFBC) 애시(B.A)의 정의	
데3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래	
제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석	
데3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 	
제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 ¹³ 제1절 실험개요	
제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 ¹³ 제1절 실험개요 제2절 사용 재료 및 배합비 ¹³	
제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 	
 제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 제1절 실험개요 제2절 사용 재료 및 배합비 13 제3절 실험방법 14 15 16 17 17 18 19 19 10 11 11 11 12 13 14 15 14 15 16 17 18 19 19 19 19 10 11 11 12 13 14 15 14 15 14 15 15 16 17 18 19 19 19 10 11 11 12 12 13 14 14 14 15 14 15 14 15 15 16 17 17 18 19 19 19 10 10 10 11 11 12 14 14 15 16 17 18 19 19 10 10 11 11 12 14 	
제3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 	
데3장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 화학적 성능 분석 13 제1절 실험개요 13 제2절 사용 재료 및 배합비 13 제3절 실험방법 1. 배합에 따른 시편의 화학적 성능 측정 1. 배합에 따른 시편의 화학적 성능 측정 분석 결과	





제4장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래 그 시멘트의 물리적 성능 분석

제1절 실험개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
제2절 사용 재료 및 배합비 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
제3절 실험방법
1. 물리적 성능 분석 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
가. Mortar의 압축강도 측정36
나. Mortar의 부피안정성 측정38
제4절 실험결과 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
1. Mortar의 압축강도 측정 결과
2. Mortar의 팽부피안정성 측정 분석 결과

제5장 미분쇄 CFBC B.A를 혼입한 하이볼륨슬래

그 시멘트를	활용한 균열시기	예측 49
제1절 실험 개요		49
제2절 사용 재료 및	배합비	49
제3절 실험방법		49
1. 직접인장실험 …		49
제4절 실험결과		53
1. 직접인장실험 결	·과 ······	









표 차례

[표	2-1]	콘크리트용 고로슬래그 미분말(KS F 2563) 품질 규격9
[표	2-2]	고로내 반응
[표	3-1]	Oxide composition of binders19
[표	3-2]	Mix proportions20



그림 차례

[그림 1-1] 본 연구 흐름도 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[그림 2-1] 고로슬래그 미분말의 제조과정10
[그림 3-1] 고로슬래그
[그림 3-2] 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시
[그림 3-3] X-ray diffraction spectra of CFBC bottom ash and blast
furnace slag ·····16
[그림 3-4] Particle size distributions of raw and blended binders
(with D50 size)17
[그림 3-5] 입도분포곡선18
[그림 3-6] XRD 분석 시편 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[그림 3-7] 진공펌프 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[그림 3-8] 미세분말 분쇄기 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[그림 3-9] XRD 분석 시료 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[그림 3-10] 시간에 따른 발열량
[그림 3-11] 시간에 따른 누적 발열량
[그림 3-12] 공극의 분포
[그림 3-13] XRD 분석··································
[그림 4-1] 압축강도 거푸집
[그림 4-2] 항온항습챔버
[그림 4-3] 압축강도측정기
[그림 4-4] 부피안정성 측정용 거푸집
[그림 4-5] 부피안정성 측정용 기준 핀
[그림 4-6] DeMec gauge
[그림 4-7] 배합 및 양생 방법에 따른 압축강도 측정 그래프42
[그림 4-8] 양생방법에 따른 부피안정성 측정 그래프44
[그림 4-9] 양생방법에 따른 부피안정성 측정 그래프46
[그림 4-10] 양생방법에 따른 부피안정성 측정 그래프



[그림 5-1] 즈	직접인장실험 거푸집
[그림 5-2] 즈	직접인장실험기
[그림 5-3] ㅎ	하중-변형량 곡선 그래프
[그림 5-4] ㅎ	하중-변형량 곡선 그래프
[그림 5-5] 비	ㅐ합에 따른 직접인장강도 측정 결과 Ⅰog 그래프55
[그림 5-6] 비	ㅐ합에 따른 직접인장실험 탄성계수 측정 결과 ∣og 그래프
	57
[그림 5-7] SC	0의 균열시기 예측 그래프60
[그림 5-8] S	50의 균열시기 예측 그래프62
[그림 5-9] St	50의 균열시기 예측 그래프64
[그림 5-10]	균열 발생 예측 시기 그래프65





Abstract

Use of circulation fluidized bed combustion (CFBC) bottom ash in high volume Slag cement without grinding

Jeon, Sang min Advisor : Prof. Kim hyeong ki, Ph,D Department of Architectural Engineering, Graduate School of Chosun University

In reinforced concrete structures, concrete is being studied in various ways to replace cement. Among them, high volume slag cement is a cement with a large amount of blast furnace slag, which has advantages of long-term strength increase and reduction of construction cost, but there is a limit of replacement rate due to the initial strength drop and increase of shrinkage rate. On the other hand, it has a characteristic of expanding when using CFBC bottom ash.

In this study, chemical and physical properties of concrete were measured by mixing CFBC bottom ash with high volume slag cement. And, by direct tensile test, we predicted the cracking time by comparing with the physical properties of concrete.





제1장 서 론

제1절 연구 배경 및 목적

현대에서 들어서면서 초고층건축물의 건축과 건축물의 대형화, 설계 단계에서의 다양한 구조를 만족시키고, 노후화된 건축물의 구조 변경, 증축 등을 이유로 건축분야에서 콘크리트는 매우 중요한 재료 중 하나 로 자리 잡았다. 특히 철근 콘크리트 구조의 발견으로 시공비의 절감과 구조해석의 용이함으로 인해 콘크리트의 수요는 점점 증가하는 추세이 다. 그러나 철근콘크리트의 경우 콘크리트에서 발생하는 수축에 의한 균열을 막을 수 있는 방법이 없다는 것이 가장 큰 단점을 가지고 있다. 따라서 수축저감을 해결하는 방안이 대두되고 있다. 수축저감의 경우 무수축시멘트 혹은 팽창제를 사용하는 방법이 있지만, 두 가지 재료의 경우 매우 비싼 가격으로 유통되어 시공비가 증가한다는 단점이 있다. 그래서 부산물의 유효적 재활용을 활용하여 수축저감 방안을 찾는 연구 가 점점 중요해지고 있다.

부산물의 유효적 재활용이란 단순히 부산물을 콘크리트 배합에서 기 존의 혼화재의 일정량을 치환하여 사용하는 것에 만족하는 것이 아니라 부산물을 이용해 오히려 기존의 천연 재료를 사용하였을 때 발생할 수 있는 성능 보다 더 좋은 성능을 발휘하도록 하는 것이다. 따라서 본 연 구에서 사용되는 고로슬래그와 순환유동층 보일러 바텀 애시는 앞으로 도 많은 연구가 필요하고 사용이 이루어져야하는 재료이다.

건축분야에서 부산물의 사용은 많이 이루어졌다. 철강 산업의 부산물 인 고로슬래그는 지속적으로 사용되어왔다. 콘크리트 부재에 시멘트 대 신 고로슬래그를 치환하여 사용하였을 때 유동성이 증가하고 수화열 온 도를 줄여주거나, 고로슬래그가 가지고 있는 잠재수경성으로 인한 장기



강도 향상 등의 장점이 있다 (김종희, 2012)¹⁾. 그러나 고로슬래그의 치환율이 증가할수록 일반 시멘트에 비해 늦은 수화반응속도로 인한 초 기강도저하 때문에 거푸집 탈형 시기가 늦어지면서 공사기간에 영향을 줄 수 있다. 또한 동절기 시공 시 저온으로 인한 응결지연으로 위험할 수 있으며, 콘크리트의 알칼리 성분과 반응하여 중성화반응을 나타낸 다. 그리고 건조수축이 증가하면서 균열이 발생한다는 문제점이 있다 (이세범, 2013), (김원종, 2012)²⁾³⁾. 따라서 고로슬래그의 치환율은 30~50% 수준으로 연구가 되어왔다. 하지만 고로슬래그의 치환율과 NaOH 와 CSA계의 팽창제, 조강성 혼화제 및 알칼리 자극제를 혼합하는 방법 으로 계속 연구가 진행되었지만, 팽창제는 고가의 제품이기 때문에 콘 크리트의 가격상승으로 시공분야에서 사용되기 힘든 실정이다 (김원종, 2012),(이명호, 2014)³⁾⁴⁾.

김원종(2012)³⁾은 고로슬래그 미분말의 활용성 증대와 더불어 다양한 자극제를 사용하여 High Volume Slag의 유동 및 강도특성을 실험하여 비교분석함으로서 콘크리트적용을 위한 High Volume Slag의 범용적인 활용성과 품질향상을 위한 기초자료를 제시하였다. 그 결과 거의 모든 알칼리 자극제에서 치환율이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나 타낸다고 하였고, 휨강도 및 압축강도 실험결과 조강제 혼입율이 1.5% 일 때 휨강도 특성이 가장우수하게 나타났다고 하였다.

이세범(2013)²¹은 환경오염 저감, 콘크리트의 품질 및 성능향상, 건 설생산현장에서의 경제성 향상을 위한 방안의 일환으로서 고로슬래그 미분말을 활용한 콘크리트의 특징을 검토한 후, 실험을 통해 얻은 결과 를 실증적으로 검증 및 분석함으로서, 고로슬래그 치환율에 따른 콘크 리트의 경화특성에 대해 평가하였고, 최종적으로 콘크리트의 품질 및 성능향상과 콘크리트용 혼화재로서 고로슬래그 미분말의 대량 활용을 위한 기초자료를 제시하였다. 그 결과 고로슬래그 결합재 내부에 불투 수성 피막이 형성되어 수화반응이 억제 되어 치환율이 증가할수록 응결





시간이 지연되었다고 하였으며, 또한 압축강도는 감소하는 것을 확인하였다.

이명호(2014)⁴⁾는 유화처리 정제유지류(ERCO)와 팽창성 기포제 (Expancel)를 활용하여 고로슬래그 미분말을 다량으로 치환한 콘크리트 실험을 하였다. 그 결과 팽창성 기포제(Expancel)가 유화처리 정제유지 류(ERCO)를 혼입함에 따라 공기량 감소를 보완해주고 강도 역시 증진된 다고 발표하였으며, 탄산화 및 내동해성의 단점을 보완하여 고로슬래그 를 다량으로 치환한 콘크리트의 내구성 향상에 탁월할 것이라고 발표하 였다.

홍성현(2014)⁵⁾은 증기양생을 통한 초기강도 확보로 인해 고로슬래그 를 다량으로 치환한 PC제품으로의 활용이 가능하다고 발표하였다.

또한 미분탄보일러의 부산물인 애시를 시멘트 대신 콘크리트에 사용 하였을 경우 입자가 작은 플라이애시에 의해 워커빌리티가 개선되며, 블리딩 현상 또한 감소한다. 포졸란 반응으로 인한 장기강도 증진 및 알칼리-골재반응 억제, 수화열 감소라는 장점도 존재한다 (최준석, 2012), (전용수, 2015), (최판길, 2010)⁷⁾⁸⁾⁹⁾. 반면 순환유동층 보일러 (CFBC)의 부산물인 애시는 미분탄보일러와는 다르게 층물질 등이 충진 된 연소로에서 연료(석탄)을 공급해주고 연소되는 도중에 연소로 안에 석회석을 주입하면 연소 중 탈황이 가능해 진다 (엄태호, 2015)¹⁰⁾. 이 때 높은 자유 CaO가 존재하게 되는데 이것은 자기수경성을 가지고 있어 서 에트린가이트의 다량생성을 촉진시킨다. 이러한 특징으로 인해 시멘 트 대신 콘크리트에 사용하였을 경우 콘크리트가 팽창한다는 단점이 있 다. 따라서 미분탄보일러의 부산물인 애시의 경우 다량사용 되어 지지 만, 수축저감이라는 문제에 대한 해결방안을 될 수 없었고 순환유동층 보일러의 부산물인 애시는 팽창이라는 단점 때문에 연구가 필요한 실정 이다.





그래서 하이볼륨 슬래그 콘크리트를 사용하는 경우 수축증가라는 문 제점이 발생하고 무수축 시멘트 혹은 팽창제를 사용해야한다는 단점이 존재하였다. 또한 하이볼륨슬래그 콘크리트의 건조수축에 대한 연구는 부족한 실정이다. 반면 순환유동층 보일러(CFBC)의 부산물인 애시는 팽 창을 증가시킨다는 단점으로 인해 사용이 되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 하이볼륨슬래그 콘크리트에 무수축시멘트 및 팽창제를 사용 하는 것이 아니라 순환유동층 보일러(CFBC) 애시의 단점을 활용하고자 기존 하이볼륨 슬래그 콘크리트에 혼입하여 서로의 문제점을 보완할 수 있는 배합을 제안하고자 한다.





제2절 연구 방법 및 범위

본 연구는 하이볼륨 슬래그 콘크리트에 순환유동층 보일러(CFBC) 바 텀애시를 혼입하여 기존 하이볼륨 슬래그 콘크리트의 문제점을 보완하 고자 하였으며, 본 연구의 방법 및 범위는 다음과 같다.

처음으로 물결합재비 30%를 사용하였고, 슬래그를 시멘트 대비 0,50,70% 치환하고 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 슬래그 대비 0,10,20% 치환하여 총 9단계의 배합으로 실험을 진행하였다. 각 재료들 의 입도와 슬래그와 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 XRD(X-Ray Diffraction)을 측정하였다. 다음으로 예비실험을 통해 선별한 배합에 각각의 시편들을 XRD(X-Ray Diffraction), 공극률(MIP : Mercury intrusion porosimetry), 미소수화열을 측정하였다. 마지막으로 모든 배합의 압축강도, 인장강도, 수축 및 팽창을 측정하는 실험을 진행하였 다.

 제 1장에서는 본 연구의 서론으로 순황유동층 보일러(CFBC) 바텀 애시를 혼입한 하이볼륨 슬래그의 특성을 알아보기 위한 본 연구의 배 경, 목적, 방법 및 범위에 대하여 서술하였다.

2) 제 2장에서는 본 연구에서 활용할 고로슬래그의 정의와 하이볼륨 슬래그 시스템, 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 정의를 서술하였 다.

3) 제 3장에서는 본 연구의 실험에 대한 관한 내용을 서술한 장으로 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 혼입한 하이볼륨 슬래그의 화학 적, 물리적 특성을 알아보고자 실험 개요, 사용 재료 및 배합비, 실험 방법을 서술하고, 실험을 통해 얻은 결과를 통해 화학적, 물리적 특성





을 분석하였다.

 4) 제 4장에서는 제 3장의 결과를 통한 순환유동층 보일러(CFBC) 바 텀애시를 혼입한 하이볼륨 슬래그 콘크리트의 화학적, 물리적 특성 분 석을 통해 하이볼륨 슬래그 콘크리트의 균열시기를 예측하였다.

5) 제 5장은 본 연구의 결론으로 위 실험을 통해 얻은 결과를 전반적 으로 서술하고, 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 혼입한 하이볼륨 슬래그 콘크리트의 특성을 검토하였다.





- 순환유동층 보일러 바텀애시의 활용 가능성 검토
 - 균열시기 예측 가능성 검토

[그림 1-1] 본 연구 흐름도



조선대학교



제2장 이론적 고찰

제1절 고로슬래그의 정의

(1) 고로슬래그의 정의

고로슬래그란 한국고로슬래그미분말 협회에 따르면 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 생성물을 말하는 것으로 주원료(철 광석)와 부원료(코크스, 석회석)의 회분에 존재하는 SiO₂와 AIO₃ 등이 고온에서 석회와 반응하여 생성되며 구성원소는 일반 암석과 같고, 성 분은 시멘트와 유사하며 급냉슬래그와, 서냉슬래그로 구분된다고 한다. 고로슬래그의 미분말의 경우 위와 같은 과정을 거치며 생성된 슬래그들 을 미분쇄기로 분쇄하여 미분말이 되도록 제조한 것으로 포틀랜드 시멘 트에 치환하여 사용할 경우 포틀랜드 시멘트만 사용했을 경우 보다 다 음과 같은 우수한 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다 (김성환, 2011)¹¹⁾.

- 수화증발속도가 감소하고, 낮은 수화열로 인한 콘크리트의 온도상승억제에 효과가 있다.
- ② 장기강도가 향상된다.
- ③ 수밀성이 향상된다.
- ④ 염화물 이온 침투억제에 의한 철근의 발청억제에 효과가 있다.
- ⑤ 황산염 등에 대한 화학저항성이 향상된다.
- ⑥ 알칼리 실리카 반응의 억제 효과가 있다.
- 또한, 분말도가 큰 고로슬래그 미분말을 사용할 경우
- ⑦ 블리딩이 적고 유동성이 우수하다.
- ⑧ 고강도 콘크리트를 얻을 수 있다.

이와 같은 특성을 활용하여 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용하려고 하는 경우 고로슬래그 미분말의 치환율을 사용자의 목적과 원하는





성능 발현을 위해 자유롭게 사용할 수 있다.

(2) 고로슬래그 미분말의 품질 규격

우리나라의 경우 콘크리트에 고로슬래그를 혼화재료로 사용할 경우에 는 콘크리트용 고로슬래그 미분말(KS F 2563)로 규정되어 있다. [표 2-1]은 콘크리트용 고로슬래그 미분말(KS F 2563) 품질 규격을 나타낸 표 이다.

[표 2-1] 콘크리트용 고로	늘래그 미분말(KS F	2563) 품질	규격
------------------	--------------	----------	----

		종류				
	지	고로슬래그 미분말				
	2	1종	2종	3종		
		KS F 2563의 규정값				
밀도(g	/cm³)	2.80 이상	2.80 이상	2.8이상		
비표면적(cm²/g)		8,000~10,00 0	6,000~8,000	4,000~6,000		
ᇍᇧᆫ	재령 7일	95 이상	75 이상	55 이상		
월경도 피스(%)	재령 28일	105 이상	95 이상	75 이상		
\\+\(\#)	재령 91일	105 이상	105 이상	95 이상		
플로값	비(%)	95 이상	95 이상	95 이상		
산화마그네	슘(MgO)(%)	10.0 이하	10.0 이하	10.0 이하		
삼산화황(SO3)(%)		4.0 이하	4.0 이하	4.0 이하		
강열 감량(%)		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하		
염화물 이온(%)		0.02 이하	0.02 이하	0.02 이하		





(3) 고로슬래그의 제조 과정

고로슬래그는 선철이 제조되는 과정에서 고로 안에서 발생되는 것으로 고로의 원료인 철광석이 철과 산소가 결합되어진 산화철(Fe₂O₃ 또는 Fe₃O₄)이 SiO₂, Al₂O₃ 등과 혼합된 상태로 산출되어 나온다. 고온의 환원작용으로 철을 산소와 이물질로부터 분리하여야 한다 (진정언, 2015), (양철진, 2017)¹²⁾¹³⁾. 다음 [그림2-1]은 고로슬래그 미분말의 제조공정이며, [표 2-2]는 고로내의 반응을 표로 나타낸 것이다.



[그림 2-1] 고로슬래그 미분말의 제조과정(이상수, 2006)

반 응	반 응 식						
코크스의 연소	$C + O_2 \rightarrow CO_2 \ , \ CO_2 + C \rightarrow 2 \ CO$						
간접환원	$FeO_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$						
직접환원	$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$						
고로슬래그의 생성	$ \begin{array}{c} FeS + CaO + C \rightarrow Fe + CaS + CO \\ CaO + SiO_2 \rightarrow CaO \bullet SiO_2 \end{array} $						

[표 2-2] 고로내 반응(이상수, 2006)





제2절 순환유동층 보일러(CFBC) 애시의 정의

(1) 순환유동층 보일러(CFBC) 애시의 정의

순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combustion) 이란 공기와 석회를 동시에 주입시켜 연소시킴으로써 질소산화물, 황산 화물 등 과 같은 오염물질들의 배출을 국제기준치 이하로 줄일 수 있는 친환경적인 발전설비로써, 순환유동층 보일러(CFBC)는 전 세계적으로 생산되는 석탄의 대부분인 저질탄을 완전 연소 할 수 있다는 특징으로 경제성이 증가되고, 연소효율 및 사용연료의 범위가 넓고 호완성이 크 다는 등의 장점이 있기 때문에 최근 점점 미분탄보일러방식에서 순환유 동층 보일러 방식으로 변화되는 추세이다.

순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combustion) 애시는 일반적인 미분탄 연소보일러(PC : Pulverized coal Combustion) 에서 발생되는 애시에 비해 상대적으로 낮은 온도인 850~900℃에서 순 환 식으로 연소가 가능하기 때문에 애시들의 입자들이 녹지 않기 때문 에 미분탄 보일러 애시와는 다르게 부정형의 형태를 가지고 있다는 특 징이 있고 (우양이, 2015)¹⁴⁾. 탈황을 위해 탄산칼슘과 석탄을 같이 넣 는데, 이로 인해 연소 후 순환 되는 연료와 석회석 부유입자가 반응을 하게 되어 연소로 하부에서 발생하는 것이 바텀애시이다. 이 바텀애시 의 경우에는 자유 CaO가 존재하며, 높은 황산칼슘의 농도를 나타내며 탄산칼슘이 존재한다. 특히 황산칼슘과 자유 CaO는 수경성을 가지고 있 기 때문에 순환유동층 보일러(CFBC) 애시 자체를 무기계 결합재로 사용 할 수 있다. 하지만 반대로 자유 CaO, SO3성분에 비하여 SiO2 성분이 상대적으로 감소하여 포졸란 반응에 대한 기여도 또한 감소한다. 그리 고 자유 CaO는 콘크리트가 급격하게 발열할 경우 균열을 발생시킬 수 있으며, SO3으로 인한 부피가 팽창 할 수 있다는 문제점이 존재한다. 따라서 국내에서는 순환유동층 보일러(CFBC) 애시를 사용은 하고 있지





만 대량으로 사용할 수는 없으며, 활용할 수 있는 방안과 연구가 더 필 요한 현실이다.





제3장 분쇄하지 않은 순환유동층 보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트의 화학적 성능 분석

제1절 실험개요

본 장에서는 하이볼륨슬래그 시멘트에 분쇄하지 않은 순환유동층 보 일러(CFBC) 바텀애시를 혼입한 경우 화학적 성능을 조사하고 분석하였 다. 또한 각각의 재료의 화학적 특성을 분석하고자 한다. 따라서 시멘 트, 고로슬래그와 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 기초적인 XRD(X-ray diffraction)분석과 입도분석을 하였다. 그 다음으로는 콘크 리트의 고로슬래그를 다량 치환할 경우 발생할 수 있는 화학적 성능을 알아보고자 하였고, 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 동시에 혼입 할 경우 어떤 화학적 성능이 발현되는지 분석하고자 한다. 따라서 실험 배합 중 대표배합을 설정하여 미소수화열, 공극률 (MIP : Mercury intrusion porosimetry), XRD(X-ray diffraction)분석을 하였다.

제2절 사용 재료 및 배합비

본 연구에서는 결합재로 사용한 재료는 총 3종류이다. 1종 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그(Blast Furnace slag), 순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combustion) 바텀애시를 사용하였다. 고로 슬래그의 경우 지역의 제철소에서 생산된 후 소량의 (anhydrite)와 함 께 분쇄한 것을 가져왔다. 순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combustion) 바텀애시는 군산 화력발전소에서 가져왔다. 순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combustion) 바 텀애시는 보일러에서 reject 된 뒤 호퍼를 통해 저장되어 있다가 1ton





bag을 통해 운반 후 사용하였다.

고로슬래그와 순환유동층 보일러 바텀애시는 가져온 재료 그대로 XRD(X-ray diffraction), 입도분석을 진행하였다. XRD(X-ray diffra ction) 같은 경우에는 분말법을 사용하여 측정하였다. 입도의 경우에는 측정을 위해 광회절 입도분석장치(Helos : Helium-Neon Laser Optical System)를 이용하였는데, 판데르발스 힘(van der Waals force)으로 인 한 측정 오차를 줄이기 위해 alcohol solvent에서 1시간동안 초음파 처 리 후 측정했다.



[그림 3-1] 고로슬래그







[그림 3-2] 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시

(1) XRD(X-ray diffraction)

[그림 3-3]은 고로슬래그와 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 XRD 분석결과를 나타낸다. XRD를 통해 측정한 결정상을 보면 순환유동층 보 일러 (CFBC) 바텀애시의 경우 26.6°,48.68° 피크에는 석탄에서부터 발 생한 Quartz가 존재하였고 25.44°, 31.34°, 38.62°, 40.80°,53.88° 피크에서는 탈황을 통해 발생한 Anhydrite가 존재하였다.

28.66°,32.20°,37.36° 피크에서는 탈황공정에서 일부 남은 calcite, free-lime 이 존재하였고 이것이 대기 중의 수분과 수화하여 만들어 진 Portlandite가 18.02°, 34.06°,47.1° 피크에서 존재하였다.







[그림 3-3] X-ray diffraction spectra of CFBC bottom ash and blast furnace slag

(2) 입도

[그림 3-4]은 1종 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그, 순환유동층 보일러 (CFBC) 바텀애시, 플라이애시의 입도를 나타낸 그래프이다. 입도의 경 우에는 광회절 입도분석장치(Helos : Helium-Neon Laser Optical System)를 사용하여 측정하였다. D50을 기준으로 1종 포틀랜드 시멘트 는 47.9µm, 고로슬래그는 8.9µm, 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시 는 213µm, 플라이애시는 36.2µm로 나타났다. 여기서 순환유동층 보일 러(CFBC) 바텀애시의 경우 다른 재료들의 비해 입도는 큰 편이지만, 입 도가 매우 작은 고로슬래그와 함께 사용되므로 전체 혼화재의 입도는 보통 포틀랜드 시멘트보다 작아지게 된다.









[그림 3-4] Particle size distributions of raw and blended binders (with D50 size)

반면 [그림 3-5]은 시멘트, SO-CFBC20, S70-CFBC0, S70-CFBC20의 입 도분포곡선을 나타낸 그래프이다. [그림 3-5]에서 보다시피 CFBC 바팀 애시의 입도가 고로슬래그와 시멘트보다 높다는 것을 확인하였다. 따라 서 고로슬래그는 사용하지 않고 CFBC 바텀애시만 20% 치환하여 사용한 경우 입도는 시멘트의 입도 47.9μm에서 111μm으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 고로슬래그를 70% 치환하여 사용한 경우에는 S70-CFBC 0의 입도는 11.8μm, S70-CFBC20의 입도는 15.6μm으로 시멘트의 입도 보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 입도가 큰 CFBC 바텀애시를 사용 하여도 동시에 혼입하는 고로슬래그의 입도가 작기 때문에 상호보완작 용을 할 수 있다는 것을 확인하였다.







[그림 3-5] 입도분포곡선

다음 [표3-1]은 1종 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그(Blast Furnace slag), 순환유동층 보일러(CFBC : Circulating Fluidized Bed Combust ion) 바텀애시, 플라이애시의 Oxide composition of binders를 나타낸 표이다. 표에서 보다시피 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 경우 플 라이애시보다 CaO, SO₃가 많이 함유되어 있는 것으로 나타났다. CaO의 경우는 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시가 고로슬래그보다 높은 수치 를 나타내었고, 고로슬래그의 경우 SiO₂와 Al₂O₃의 수치가 1종 포틀랜드 시멘트보다 높은 수치를 나타내었다.





[표3-1] Oxide composition of

binders

Compound	Ca0	SiO ₂	A1 ₂ 0 ₃	Fe ₂ 0 ₃	MgO	SO3	Na ₂ 0	K ₂ 0	TiO ₂
Cement (Type)	60.6	23.0	3.41	3.13	3.68	2.56	0.83	0.90	0.0
Slag	45.7	29.1	11.7	0.454	3.08	2.80	0.19	0.46	0.67
CFBC bottom ash	51.1	11.0	6.8	4.5	1.3	19.9	0.3	0.5	0.9
CFBC flyash	23.2	29.7	13.8	6.6	1.6	6.9	1.5	1.0	1.1

(^a Loss of ignition)





다음에 나오는 [표3-2]는 Mortar의 배합비로서 SO, S50, S70은 시멘 트대비 슬래그를 0, 30, 70% 치환한 숫자이고, CFBC0, CFBC10, CFBC20 은 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 치환율이다. S0-CFBC0, S0-CFBC10, S0-CFBC20의 경우에는 시멘트에 대한 순환유동층 보일러 (CFBC) 바텀애시의 치환율이고, S50-CFBC0, S50-CFBC10, S50-CFBC20, S70-CFBC0, S70-CFBC10, S70-CFBC20의 경우는 고로슬래그에 대한 순환 유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 치환율이다. 물결합재비(W/B)의 경우 자기수축의 감소효과를 더 명확하게 확인하고자 0.3%로 결정하였다. 낮 은 물결합재비로 인한 워커빌리티의 감소로 인해 폴리카르복실 유동화 제를 결합재 질량 전체의 0.2%를 혼입하였다. 본 연구에서 사용되는 모 래의 경우 완전 건조하여 함수량 0%의 모래를 사용하였다.

		Weig	ht composi	tion	
Mixture	Water	Cement	Slag	CFBC ash	Sand
SO-CFBCO		1	0	0	
SO-CFBC10		0.9	0	0.10	
SO-CFBC20		0.8	0	0.20	
S50-CFBC0		0.5	0.50	0	
S50-CFBC10	0.3	0.5	0.45	0.05	1.5
S50-CFBC20		0.5	0.40	0.10	
S70-CFBC0		0.3	0.70	0	
S70-CFBC10		0.3	0.63	0.07	
S70-CFBC20		0.3	0.56	0.14	

[표3-2] Mix proportions





제3절 실험 방법

1. 배합에 따른 시편의 화학적 성능 측정

본 실험에서는 다음과 같은 배합을 설정하여 미소수화열, 공극률 (MIP : Mercury intrusion porosimetry), XRD(X-ray diffraction), 입 도분석을 진행하였다. 배합은 다음과 같다.

① 물결합재비(W/B) 0.3% SO-CFBCO (고로슬래그와 순환유동층 보일러 (CFBC) 바텀애시를 사용하지 않은 배합)

② 물결합재비(W/B) 0.3% SO-CFBC20 (고로슬래그는 사용하지 않고 순 환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 시멘트 대비 20% 치환하여 사용한 배합)

③ 물결합재비(W/B) 0.3% S70-CFBCO (고로슬래그를 시멘트 대비 70% 치환하여 사용하고 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 사용하지 않은 배합)

④ 물결합재비(W/B) 0.3% S70-CFBC20 (고로슬래그를 시멘트 대비 70% 치환하여 사용하고 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 고로슬래그 대 비 20% 치환하여 사용한 배합)

미소수화열의 측정은 페이스트로 진행하였고, 그 외 모든 실험은 모 르타르로 진행하였다. 미소수화열 측정을 위해 Tokyo Ricko TCC-26 장 비를 사용하였다. 이 장비는 배합을 한 후 측정 튜브에 넣는 것이 아 닌, 장비 자체에 혼합기 튜브가 있어 이 튜브에 달린 주사기를 통해 물 이 공급되며 동시에 배합하는 특징이 있다. 이는 배합 극초기 의 발열 을 정확하게 측정하기 위한 것이다. 20℃로 재료 및 장비를 1일간 유지 하였고, 이후 장비에 넣고 배합을 시작함과 동시에 수화열을 측정하였 다.





공극률 (MIP : Mercury intrusion porosimetry), XRD(X-ray diffraction)를 측정하기 위해서 10L 믹서를 통해 2분간 배합하고 [그 림 3-6]과 같이 두께 2~3mm의 시편을 10cm X 10cm 비밀 팩에 넣어 만들 었다. 밀봉양생 시편은, 측정 당일 까지 이 비닐 팩에 보관한 반면, 수 중양생 시편은 타설 후 24시간 후 시편 배합 종류 별로 따로 물에 담가 두었다. 타설 후 3, 28, 91일에 시편을 꺼내어 손으로 작은 조각으로 쪼개어 상온에서 1일간 [그림 3-7]의 진공펌프기계를 사용 진공건조 하 여 수화를 멈춘 후 MIP에 사용되는 시편은 사용 기계적 분쇄에 의한 미 세공극 발생을 가능한 막기 위해 손으로 쪼갠 1cm 이하의 샘플을 사용 하였다. MIP 측정을 위한 장비는 AutoporelV 수은압입측정기를 사용하 였다. XRD에 사용되는 시편의 경우 1차로 망치 등의 크래셔를 이용해 분쇄하고 [그림 3-8]의 미세분말 분쇄기를 이용하여 [그림 3-9]와 같이 미세한 입자를 만든 후 실험을 수행하였다. 참고로 각 배합의 XRD 피크 에 대한 상대적 반정량분석을 위해 XRD 실험 조건을 동일하게 고정하였 다. XRD 피크의 정확한 각도 측정을 위해 상용 소프트웨어인 Match 3을 사용하였다.



[그림 3-6] XRD 분석 시편







[그림 3-7] 진공펌프



[그림 3-8] 미세분말 분쇄기







[그림 3-9] XRD 분석 시료

제4절 실험 결과

1. 배합에 따른 시편의 화학적 측정 분석 결과

(1) 미소수화열

[그림 3-10]와 [그림 3-11]은 총 70시간 동안의 수화발열량을 나타낸 다. 먼저 [그림 3-10]을 보면 0.5 시간 이내의 극 초기 발열량(Stage 1)의 경우 SO 및 S70 모두 CFBC 바텀애시가 혼입된 경우 발열량이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 0.25 시간 (15 min) 이내에 모든 재료 의 피크가 발생하고 SO-CFBCO인 경우 극 초기 발열 피크가 0.5 mW/g 인 데 반해 SO-CFBC20의 경우 그 값이 0.8 mW/g 까지 증가한다. SO-CFBCO, SO-CFBC20과 마찬가지로 S70-CFBCO의 경우에는 극 초기 피크가 0.7 mW/g 이지만, S70-CFBC20의 경우에는 극 초기 피크가 1.3 mW/g 까지 증 가한다. 또한 1-10 시간(Stage 2) 까지도 SO 및 S70 모두 CFBC 바텀애 시를 사용한 경우 발열량이 더 크게 나타났다. 보통 포틀랜드 시멘트(OPC : Ordinary Portland Cement)의 경우 수화 Stage 3 단계에서 18 시 간의 main peak 값이 CFBC 바텀애시를 20% 치환한 경우 약 25% 정도 감




소하며 동시에 30 시간의 shoulder peak가 없어진다. 참고로, OPC의 수 화열 메인 피크는 C₃S, shoulder peak는 C₃A의 수화에 의한 것으로 알 려져 있다. S70-CFBC0, S70-CFBC20에서는 고로슬래그를 CFBC 바텀애시 로 치환함에 따라 main peak는 감소하는 반면 이 역시 Shoulder peak는 나타나지 않게 된다. [그림 3-11]은 시간에 따른 누적 발열량으로 고로 슬래그를 사용하지 않은 배합에서 누적발열량은 더 증가하였다. S0-CFBC0에서는 최종 누적 발열량이 94 J/g , OPC를 CFBC 바텀애시로 20% 치환한 S0-CFBC20의 경우 최종 누적 발열량 81 J/g 으로 감소하였 지만, S70-CFBC0에서는 최종 누적 발열량이 30 J/g , 고로슬래그를 CFBC 바텀애시로 20% 치환한 S70-CFBC 20의 경우 최종 누적 발열량 35 J/g 으로 약간 증가하였다.



[그림 3-10] 시간에 따른 발열량





(2) 공극률 (MIP : Mercury intrusion porosimetry)

[그림 3-12]는 배합의 양생 날짜 및 양생방법에 따른 공극량을 나타 낸 그래프이다. (a),(c),(e)의 그래프를 보면 (a)의 경우 SO-CFBCO과 SO-CFBC20의 공극량은 차이가 거의 없지만, (a)에서 (c),(e) 시간이 흐 를수록 각각의 공극량은 차이가 커지는 것으로 측정되었다. 마찬가지로 S70-CFBCO과 S70-CFBC20의 공극량 또한 시간에 따른 차이를 나타내었 다. 그리고 고로슬래그의 치환율이 증가하면 초기의 공극의 크기는 크 지만 시간이 지날수록 공극의 크기는 작아졌다. 따라서 공극의 크기의 차이는 고로슬래그의 의해서 영향을 줄 수 있지만, 순환유동층 보일러 (CFBC) 바텀애시에 따라 영향을 준다고 판단하기는 어렵다.







(a)











(c)











curing 28days (d) Sealed curing 28days (e) Water curing 91days (f) Sealed curing 91days)





(3) XRD (X-ray diffraction)

[그림 3-13]은 배합의 양생 날짜 및 양생 방법의 따른 XRD측정 결과 그래프이다. 참고로 XRD 장비의 부속 프로그램을 활용해 background noise를 제거한 값이다. [그림3-13]에서 결과 해석에 영향을 미치지 않 는 raw material에 대한 peak(참조 [그림3-7])은 표시하지 않았다. 또 한 모든 그래프에서 y 축의 Intensity count는 동일하게 고정하였으나 이 역시 표시하지 않았다. CFBC ash 혼입에 의한 변화를 확인인해야 할 피크는 대표적으로 E(Ettringite) peak 및 P(Portlandite) peak가 있으 며, raw material에 의한 peak 외에 CFBC 바텀애시 혼입에 의해 발생하 는 peak는 발견하지 못하였다.

(a)의 그래프를 보면 8.8°에서의 E peak가 SO-CFBCO의 배합에서 다 른 배합에 비해 월등히 크게 나온 것을 확인 할 수 있으며, 다른 배합 들의 E peak는 차이가 거의 없는 것으로 확인된다. 그러나 (a)에서 (b),(c)로 시간이 지남에 따라 E peak는 점점 차이가 줄어드는 것으로 확인된다. 또한 P peak의 경우에는 SO-CFBC20의 경우 (a)에서 보다시피 CFBC 바텀애시에 의해 발생된 P peak가 보이지만, 시간이 지남에 따라 다른 배합들과 거의 차이가 없는 것이 확인된다.

(d),(e),(f)의 그래프 경우에는 8.8°E peak가 (d),(f)에서는 SO-CFBCO의 배합이 다른 배합에 비해 높지만 (e)의 경우에는 거의 비슷 해지는 것이 확인된다. 또한 33.5°E peak의 경우에는 (d),(e),(f)의 그래프에서 SO-CFBCO의 배합이 다른 배합에 비해 높은 것으로 확인된 다. P peak의 경우에는 (d),(e),(f)의 그래프에서 거의 비슷한 것으로 확인된다.











(b)







(d)





Collection @ chosun



curing 28days (d) Sealed curing 28days (e) Water curing 91days (f) Sealed curing 91days)



제4장 분쇄하지 않은 순환유동층 보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트의 물리적 성능 분석

제1절 실험 개요

본 장에서는 하이볼륨슬래그 시멘트에 분쇄하지 않은 순환유동층 보 일러(CFBC) 바텀애시를 혼입한 경우 물리적 성능을 조사하고 분석한다. 고로슬래그를 다량으로 사용할 때 CFBC 바텀애시를 동시에 혼입할 경우 압축강도, 부피안정성에 어느 정도 영향을 주는지를 확인한다. 압축강 도의 경우 수중양생과 밀봉양생으로 구분하여 양생하고 차이를 비교하 고, 부피안정성 또한 양생방법에 따른 비교 조사하였다.

제2절 사용재료 및 배합비

본 장에서는 앞서 사용한 재료와 배합비를 사용하였다. 수축 및 팽창 의 측정을 위해 시편에 양쪽에 핀을 배합단계에서 미리 넣은 후 측정하 였다. 본 실험에서는 9개의 배합을 모두 사용하였다.

제3절 실험방법

1. 물리적 성능 분석

가. Mortar의 압축강도 측정

본 실험을 위한 배합은 10L 믹서를 통해 2분간 배합하였다. 압축강도





측정을 위해 [그림 4-1]과 같은 5X5X5 사이즈에 몰드를 사용하였다. 배 합 후 시편과 몰드를 비닐 테이프로 감쌌다가 종결시간을 측정한 뒤 이 후부터 시편을 탈형하여 수중 양생과 밀봉 양생으로 나누어 양생하였 다. 각각의 배합은 3일, 28일, 91일 압축강도를 측정하였고, 표준편차 를 줄이고자 한 배합 당 3개의 시편을 측정하였다. 양생은 20℃, 습도 50%의 강제식 항온항습 챔버에서 보관되었다. 압축강도 측정의 경우 압 축강도측정기를 사용하였고 각 일차 마다 9개의 배합을 한 번에 한 개 씩 3번으로 나누어서 압축강도를 측정하였다.



[그림 4-1] 압축강도 거푸집



[그림 4-2] 항온항습챔버







[그림 4-3] 압축강도측정기

나. Mortar의 부피안정성 측정

본 실험도 압축강도 실험과 마찬가지로 10L 믹서를 통해 2분간 배합 하였다. 배합 및 양생조건에 따른 부피안정성을 측정하기 위해 [그림 4-4]와 같은 2.5X2.5X30cm의 몰드를 사용하였다. 길이 측정에 기준이 되는 핀은 [그림 4-5]와 같이 배합 시 매설하여 [그림 4-6]에서 보이는 DeMec gauge를 사용하여 측정하였다. 배합 후 시편을 비닐 테이프로 감 쌌다가 종결시간을 측정한 뒤 이후부터 시편을 탈형하여 길이변화를 측 정하였다. 밀봉 양생, 건조 양생, 수중 양생의 세 가지 양생 조건을 사 용하였다. 밀봉양생은 탈형 직후 시편을 플라스틱 필름 3겹으로 밀봉한





채로 측정한 것이며, 건조양생은 탈형 후 밀봉상태로 양생하다 배합 후 7일 차에 시편의 밀봉을 제거하였다. 참고로 91일간 밀봉 양생 시편의 중량 변화가 1 g 내외 (시편 초기 중량의 0.1% 내외)임을 확인하여 증 발이 없었음을 확인 하였다. 수중양생의 경우, 종결 직후 시편 탈형 한 후 바로 물에 담가두었다. 이 역시 시편 간 이온 용탈 및 흡수에 따른 실험 오차 발생을 막기 위해 시편 종류에 따라 다른 통을 사용하였다. 팽창, 자기 및 건조 수축 시편 또한 양생은 20℃, 습도 50%의 강제식 항온항습 챔버에서 보관되었다. 부피안정성의 측정은 1~7일차까지는 1 일에 1회 측정하였고, 7~28일차까지는 3일에 1회, 28~91일차까지는 7일 에 1회 측정하였다.



[그림 4-4] 부피안정성 측정용 거푸집



[그림 4-5] 부피안정성 측정용 기준 핀







[그림 4-6] DeMec gauge

제4절 실험결과

1. Mortar의 압축강도 측정 결과

[그림 4-7]은 배합, 양생 방법 및 시간에 따른 압축강도 그래프이다. (a),(b)의 그래프를 비교해보면 수중 양생과 밀봉 양생 방법 차이에 의 한 압축강도의 차이는 없는 것으로 나타났지만, 고로슬래그를 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 강도가 높게 나오는 것으로 나타났다. 확실히 고로슬래그를 다량 치환할 경우 초기강도가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. (a)의 그래프에서 S50의 경우 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 강도는 점점 감소하였지만 차이는 크지 않다. S50의 경우와 마찬가지로 모든 배합에서 CFBC 바텀애시의 치환율에 따라 변화는 있으 나 크게 차이나지 않는다. (b)의 그래프에서 S0, S50의 경우 CFBC 바텀 애시의 치환율에 따라 강도의 차이는 거의 없으나 S70의 경우에는 CFBC 바텀애시의 치환율이 10%일 경우 강도가 가장 크게 나타났다.





(c), (d)와 (a), (b)의 그래프를 비교해보면 고로슬래그를 다량 치환 하는 경우 시간이 지남에 따라 강도가 SO의 배합들 보다 증가하거나 비 숫해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 (C)의 그래프에서 S50-CFBC10의 경우에는 다른 배합보다 압축강도가 더 증가되는 경향을 보였지만 S50-CFBC20의 경우에는 비슷한 압축강도가 측정되었다. 그리고 S70의 경우 SO의 배합과 압축강도가 거의 동일하게 측정되었다. 하지만 (d)의 그래프에서는 S50-CFBC10의 강도가 더 증가한다는 것은 확인할 수 없으 며, S70-CFBC0의 경우 S0-CFBC0보다 압축강도가 증가하지만 S70-CFBC20 의 경우에는 S0-CFBC20보다 감소하였다.

(e), (f)의 그래프를 보면 고로슬래그를 50% 치환하여 사용 할 경우 장기강도가 증가한다. 또한 (e)의 그래프에서 S50의 경우 28일차에서는 S50-CFBC10의 경우가 다른 배합보다 압축강도가 증가하였지만 91일차에 서 비슷하거나 거의 차이 나지 않는 것으로 확인되었다. 또한 S0의 경 우 CFBC의 치환율이 증가할수록 압축강도가 점점 감소하였다. 그러나 S70의 경우 CFBC의 치환율이 증가할수록 압축강도는 점점 증가하였다. (f)의 그래프에서 고로슬래그를 치환하는 경우 CFBC 바텀애시의 치환율 이 20%가 되면 강도가 증가하였다. 그러나 CFBC 바텀애시의 치환율이 10%가 되면 치환하지 않은 것과 비슷하거나 감소하였다. 반면 고로슬래 그를 치환하지 않은 경우 CFBC 바텀애시의 치환율이 10%일 경우 강도는 증가하나 20%일 경우에는 감소하였다.

- 39 -













Collection @ chosun





curing 28days (d) Sealed curing 28days (e) Water curing 91days (f) Sealed curing 91days)





2. Mortar의 부피안정성 측정

[그림 4-8]은 각 배합들을 밀봉양생한 경우의 부피안정성을 나타낸 그래프로 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 초기에 부피가 증가하 였다. S50의 경우 CFBC 바텀애시의 치환율에 따라 부피변화의 큰 차이 를 보이지 않았고, 91일에 다가갈수록 점점 수축량이 수렴하는 것으로 나타났다. S0, S70의 경우 CFBC바텀애시를 치환할 경우 치환하지 않은 배합과 큰 차이를 보였다. 또한 SO-CFBCO과 SO-CFBC10의 경우와, S70-CFBC10과 S70-CFBC20의 경우에는 91일에 다가갈수록 점점 수축량이 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 밀봉양생에서의 부피변화의 경우에 는 고로슬래그를 다량으로 치환하고 CFBC 바텀애시를 사용하는 것이 좋 아 보이지만, 20%를 치환할 경우 초기 부피가 증가하는 현상때문에 문 제가 발생할 수 있다.



(a)







(b)



[그림 4-8] 양생방법에 따른 부피안정성 측정 그래프

Collection @ chosun



[그림 4-9]는 각 배합들을 1주일동안 밀봉양생하고 밀봉 제거 후 양 생한 경우의 부피안정성을 측정한 그래프이다. 위 그래프에서는 밀봉을 제거하고 측정하기 시작한 부분이 중요한 부분이다. 밀봉을 제거하고 측정하기 시작한 시기를 보면 SO의 배합들은 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 수축량이 더 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타났지만, S50, S70의 경우 CFBC 바텀애시를 치환하지 않은 것과 10%를 치환한 것의 건 조수축은 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 건조수축의 경우에는 고로 슬래그를 다량으로 치환하고 CFBC 바텀애시 또한 20%까지 사용할 경우 수축량은 더욱 감소할 것이다.



(a)







(b)





- 46 -





[그림 4-10]은 각 배합들을 수중양생한 경우의 부피안정성을 측정한 그래프이다. 모든 배합에서 CFBC의 치환율이 증가할수록 부피변화량도 증가하는 것으로 나타났다. 특히 SO의 배합에서는 CFBC 바텀애시의 치 환율이 20%인 경우 부피변화량은 더욱 뚜렷하게 증가하였다. 그러나 고 로슬래그의 치환율이 증가한 경우에는 부피변화량은 감소하였다. S70-C FBC20의 경우에는 초기에 수축이 발생한 것을 볼 수 있다.



(a)







(b)



[그림 4-10] 양생방법에 따른 부피안정성 측정 그래프

- 48 -

Collection @ chosun



제5장 분쇄하지 않은 순환유동층 보일러 바텀애시를 혼입한 하이볼륨슬래그 시멘트를 활용한 균열시기 예측

제1절 실험 개요

본 장에서는 직접인장강도 실험을 통해서 균열시기를 예측해보고자 한다. 제 4장에서 측정한 부피안정성의 결과를 활용하여 직접인장강도 와 비교해보고자 한다. Mortar의 경우 날짜에 따른 변형률과 직접인장 강도 실험을 통한 파괴응력과 변형률을 활용하여 날짜에 따른 탄성계수 를 구하고 비교하여 균열시기를 예측하고자 한다.

제2절 사용 재료 및 배합비

본 장에서의 사용 재료는 위에서 사용한 재료이며, 또한 배합비의 경 우에도 같은 배합비를 사용하였다.

제3절 실험방법

1. 직접인장실험

직접인장실험의 경우 압축강도 및 부피안정성 실험과 마찬가지로 10L 믹서를 통해 2분간 배합하였다. 직접인장실험을 위해 [그림 5-1]과 같 은 모래시계형 몰드를 사용하였다. 직접인장실험에 사용된 실험기계는 [그림5-2]와 같다. 직접인장실험의 경우 각 배합 당 3개의 시편을 실험 하였고, 직접인장실험을 통해서 [그림 5-3]과 같은 변형량과 하중을 측 정할 수 있다. [그림 5-3]의 변형량과 하중을 활용하여 날짜 및 배합에





따른 탄성계수 값을 구하여 로그그래프로 나타낸다. 그러나 [그림 5-3] 의 경우 그래프 초반에 변형률과 하중의 변화가 불규칙적이기 때문에 탄성계수의 오차가 생길 수 있으므로 변화가 규칙적으로 생기기 시작한 부분을 [그림 5-4]와 같이 (0,0)점으로 조정하여 탄성계수 값을 구하였 다. 탄성계수는 그림의 기울기이다. 인장강도를 구하는 식은 다음과 같 다.

$$\sigma = -\frac{9.8 \times N}{t \times L}$$
 (MPa) ··· 식 5-1

(N:직접인장실험의 파단 하중, t:시편의 두께, L:시편의 가로 길이)

그 후 ε(t)×E(t)≥δ(t) 즉, 수축 실험을 통해 측정한 날짜에 따른 변형량과 직접인장실험으로 구한 로그식에 날짜를 넣고 해석한 값을 곱 한 결과보다 직접인장실험을 통해 구한 응력이 작아질 때 균열이 발생 한다는 개념을 이용하여 균열시기를 예측해 보았다.



[그림 5-1] 직접인장실험용 거푸집







[그림 5-2]직접인장실험기











[그림 5-4] 하중-변형량 곡선 그래프





제4절 실험결과

1. 직접인장실험 결과

(1) 직접인장실험을 통해 측정한 인장강도

[그림 5-5]는 직접인장실험을 통해 측정한 인장강도를 나타낸 log 그 래프이다.

(a)의 그래프를 보면 1일차의 경우 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할 수록 인장강도는 감소하지만, SO-CFBC10의 경우에는 약 3일에, SO-CFBC 20의 경우에는 약 9일에 SO-CFBC0의 인장강도보다 증가하는 것으로 나 타났다. 또한 SO-CFBC10의 경우가 SO-CFBC20의 경우보다 인장강도는 더 높은 것으로 나타났다.

(b)의 그래프 경우에는 S50-CFBC0, S50-CFBC10, S50-CFBC20의 1일차 인장강도가 거의 같은 것으로 나타났고, S50-CFBC0, S50-CFBC20의 경우 에는 시간이 지나도 거의 같은 증가율을 보이는 것으로 나타났다. 하지 만 S50-CFBC10의 경우에는 다른 두 배합과는 다르게 시간이 지나면서 인장강도 증가율에 차이를 나타냈다.

(c)의 그래프는 S70-CFBCO, S70-CFBC10, S70-CFBC20의 인장강도가 거 의 차이가 나타나지 않고 시간에 따른 인장강도 증가율 또한 차이가 없 는 것으로 나타났다.





(a)



(b)







⁽c)

[그림 5-5] 배합에 따른 직접인장강도 측정 결과 log 그래프

(2) 직접인장실험을 통해 측정한 탄성계수 (the modulus of elasticity)

[그림 5-6]은 직접인장실험으로 구한 인장강도와 변형량으로 탄성계 수를 구한 후 로그추세선을 그린 그래프이다. (a)의 그래프를 보면 인 장강도와 마찬가지로 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 초기 탄성 계수는 감소하였다. 그러나 시간이 지남에 따라 CFBC 바텀애시의 치환 율이 증가하면 탄성계수 또한 증가하였다. SO-CFBC20의 경우 다른 두 배합보다 탄성계수 증가율이 시간이 지남에 따라 크게 나타났다.

(b)의 그래프를 보면 S50-CFBC10, S50-CFBC20의 경우 보다 S50-CFBC0 의 경우가 양생시간에 관계없이 탄성계수의 값은 크게 나타났다. 반면 S50-CFBC10과 S50-CFBC20의 경우에는 1일의 탄성계수는 거의 차이가 없 지만, 시간이 지나면서 S50-CFBC10의 탄성계수가 점차 증가하였다.





(c)의 그래프를 보면 S70-CFBC10, S70-CFBC20의 경우 보다 S70-CFBC0 의 경우가 약 9일까지는 탄성계수의 값이 크게 나왔지만, 그 이후로는 S70-CFBC20의 탄성계수보다 감소한다. 그러나 S70-CFBC10의 경우에는 양생시간에 관계없이 탄성계수가 작게 측정되었다. S70-CFBC10과 S70-C FBC20의 경우에는 1일의 탄성계수는 거의 차이가 없지만, 시간이 지나 면서 S70-CFBC20의 탄성계수가 S50의 배합과는 반대로 점차 증가하였 다.

탄성계수의 경우 모든 배합에서 CFBC 바텀애시를 치환하지 않은 배합 이 1일의 탄성계수는 더 높게 측정되었지만, 고르슬래그를 치환하지 않 은 배합과 70% 치환한 배합에서는 CFBC 바텀애시를 20% 치환한 배합이 치환하지 않은 배합보다 시간이 지나면서 탄성계수가 증가하였다. 그러 나 고로슬래그를 50% 치환한 경우에는 CFBC 바텀애시를 치환하지 않은 배합이 양생시간과 관계없이 탄성계수가 높게 측정되었다.



(a)

Collection @ chosun





(b)



[그림 5-6] 배합에 따른 직접인장실험 탄성계수 측정 결과 log 그래프





(3) 직접인장실험을 통한 균열시기 예측

[그림 5-7]은 고로슬래그를 혼입하지 않은 배합의 균열시기를 예측 한 그래프로 ε(t)×E(t)은 탄성계수로 구한 로그그래프에 수축으로 구 한 변형률과 시간을 대입하여 응력을 나타낸 그래프이고 δ은 직접인장 실험을 통해 구한 파단응력을 나타낸 그래프이다. ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하는 곳에서 균열이 발생하는 것으로 예측 가능하다.

(a)의 그래프는 SO-CFBCO의 배합으로 약 4.90Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 3일에서 4일 사이로 예측할 수 있다. (b)의 그래프는 SO-CFBC10의 배합으로 약 5.10Mpa에서 ε(t)×E (t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 6일에서 7일 사이로 예 측할 수 있다. (c)의 그래프는 SO-CFBC20의 배합으로 약 6.00Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 37일에서 40일 사이로 예측할 수 있다.







(a)



(b)







(c) [그림 5-7] SO의 균열시기 예측 그래프

[그림 5-8]은 고로슬래그를 시멘트 대비 50%를 치환한 배합의 균열시 기를 예측 한 그래프로 그래프를 보는 방법은 위에 고로슬래그를 치환 하지 않은 그래프와 동일하다.

(a)의 그래프는 S50-CFBCO의 배합으로 약 3.70Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 2일에서 3일 사이로 예측할 수 있다.
(b)의 그래프는 S50-CFBC10의 배합으로 약 3.00Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 3일에서 4일 사이로 예측할 수 있다.
(c)의 그래프는 S50-CFBC20의 배합으로 약 4.00Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 5일에서 6일 사이로 예측할 수 있다.






(a)



(b)

Collection @ chosun





(c) [그림 5-8] S50의 균열시기 예측 그래프

[그림 5-9]는 고로슬래그를 시멘트 대비 70%를 치환한 배합의 균열시 기를 예측 한 그래프로 그래프를 보는 방법은 위에 고로슬래그를 치환 하지 않은 그래프와 동일하다.

(a)의 그래프는 S70-CFBCO의 배합으로 약 3.40Mpa에서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 5일에서 6일 사이로 예측할 수 있다. (b)의 그래프는 S70-CFBC10의 배합으로 약 4.10Mpa에서 ε(t)× E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 12일에서 13일 사이로 예측할 수 있다. (c)의 그래프는 S50-CFBC20의 배합으로 약 4.50Mpa에 서 ε(t)×E(t)와 δ의 그래프가 일치하며 그 일자는 대략 19일에서 20 일 사이로 예측할 수 있다.







(a)



(b)





Collection @ chosun



(c) [그림 5-9] S70의 균열시기 예측 그래프

[그림 5-10]은 실형을 통해 예측해본 균열시기 결과 그래프이다. 모 든 배합에서 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 균열이 발생하는 시 기가 늦어지는 것으로 나타났다. 고로슬래그를 50%를 치환한 배합은 치 환하지 않은 배합보다 균열이 발생하는 시기가 빨라졌지만, 70%를 치환 한 배합은 치환하지 않은 배합보다 균열이 발생하는 시기가 늦어졌다. 따라서 다량의 고로슬래그를 치환하여 사용하는 경우 CFBC 바텀애시의 적절한 치환은 하이볼륨슬래그의 단점을 보완할수 있다고 판단되어진 다.









제6장 결론

본 논문에서는 기존 하이볼륨슬래그 시멘트의 단점을 보완하자고 순 환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 혼입하여 활용할 수 있는 배합을 제 안하고자 하였다. 하이볼륨슬래그 시멘트에 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시를 혼입한 배합의 성능을 확인하기 위해 각각의 화학적 성능과 물리적 성능을 분석하였고, 직접인장실험을 통하여 균열시기를 예측해 보았다.

(1) 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 경우 다른 재료들의 비해 입도는 큰 편이지만, 입도가 매우 작은 고로슬래그와 함께 사용되므로 전체 혼화재의 입도는 보통 포틀랜드 시멘트보다 작아지게 된다.

(2) 즉 초기 발열량은 SO 및 S70 모두 CFBC 바텀애시가 혼입된 경우 발열량이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. S70-CFBCO에서는 최종 누적 발열량이 30 J/g , 고로슬래그를 CFBC 바텀애시로 20% 치환한 S70-CFBC 20의 경우 최종 누적 발열량 35 J/g 으로 약간 증가하였다.

(3) 하이볼륨슬래그 시멘트의 공극량은 순환유동층 보일러(CFBC) 바 텀애시의 혼입에 따라 차이를 보이는 것으로 측정되었다.

(4) 압축강도의 경우 하이볼륨슬래그의 초기강도저하가 나타났다. 하 지만 장기강도의 경우 고로슬래그와 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시 의 치환율이 증가할수록 증가하였다.

(5) 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 치환율이 증가할수록 수축 은 저감하고 팽창은 증가하였다.





(6) 인장강도의 경우 고로슬래그 치환율에 따라 인장강도의 차이는 발생하였지만, 순환유동층 보일러(CFBC) 바텀애시의 치환율에 따라 차 이는 발생하지 않았다.

(7) 탄성계수의 경우 모든 배합에서 CFBC 바텀애시를 치환하지 않은 배합이 1일의 탄성계수는 더 높게 측정되었지만, 고로슬래그를 치환하 지 않은 배합과 70% 치환한 배합에서는 CFBC 바텀애시를 30% 치환한 배 합이 치환하지 않은 배합보다 시간이 지나면서 탄성계수가 증가하였다. 그러나 고로슬래그를 50% 치환한 경우에는 CFBC 바텀애시를 치환하지 않은 배합이 양생시간과 관계없이 탄성계수가 높게 측정되었다.

(8) 균열 발생 시기를 예측해본 결과 SO의 배합의 경우 균열시기가 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 대략 3일에서 4일 사이에서 대략 6일에서 7일, 대략 37일에서 40일 사이로 증가하였다. S50의 배합의 경 우 균열시기가 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 대략 2일에서 3일 사이에서 대략 3일에서 4일, 대략 5일에서 6일 사이로 증가하였다. S70 의 배합의 경우 균열시기가 CFBC 바텀애시의 치환율이 증가할수록 대략 5일에서 6일 사이에서 대략 12일에서 13일, 대략 19일에서 20일 사이로 증가하였다.

9) 재료의 특성상 품질관리가 매우 중요하다고 생각되어지며, 편차를 줄이고 균일한 결과 조건을 만들 수 있는지에 대한 추후 연구가 더 필 요해보이며, 철근콘크리트에 적용할 경우 철근에 미치는 영향이나, 대 량으로 사용할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다고 생각하였다.





참고 문 헌

- 김종희, "알칼리 자극제 種類에 의한 高爐슬래그 微粉末 모르타르의 强 度 特性", 충남대학교 대학원, 석사학위논문, 2012
- 2) 이세범. "고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 경화특성", 충남대학교 산업대학원, 석사학위논문, 2013
- 김원종, "High Volume Slag를 사용한 저탄소 콘크리트의 역학 및 내구특 성", 한밭대학교 산업대학원, 석사학위논문, 2012
- 4) 이명호. "고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 유화처리 정제유지류 및 팽창 성 기포제에 의한 내구성 향상", 청주대학교 대학원, 석사학위논문, 2014
- 5) 홍성현, "양생방법에 따른 고로슬래그 다량치환 콘크리트 특성", 성균관 대학교 일반대학원, 석사학위논문, 2015
- 6) 김성환, "고로슬래그 미분말을 다량 사용한 콘크리트의 성능 향상", 청 주대학교 대학원, 박사학위논문, 2011
- 7) 최준석, "플라이 애시 배합방법에 따른 콘크리트의 염화물 확산 특성", 동의대학교 대학원, 석사학위논문, 2012
- 8) 전용수, "플라이애시 진동분쇄 효과에 의한 콘크리트 특성 개선 평가",경기대학교 일반대학원, 박사학위논문, 2016
- 9) 최판길, "초고분말도 플라이 애시를 사용한 초속경 LMC의 초기수축 및 공
 극구조 특성", 강원대학교 대학원, 박사학위논문, 2010
- 10) 엄태호, "순환유동층 보일러 fly ash의 특성에 관한 연구", 군산대학교 대학원, 석사학위논문, 2015
- 11) 진정언, "고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 굳기전과 굳은 후의 물성", 전남대학교 산업대학원, 석사학위논문, 2015
- 12) 양진철, "고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 특성과 적용성", 조선대학교 대학원, 박사학위논문, 20107
- 13) 우양이, "순환유동층 보일러 애시의 특성 및 적용성 평가", 군산대학교 대학원, 박사학위논문, 2015





감사의 글

지난 2년간의 노력이 결실을 맺을 수 있게 도와주신 분들에게 이 감 사의 글을 전합니다.

먼저, 2년간 저를 지도해주시고 많은 것을 가르쳐주신 김형기 교수님 감사드립니다. 교수님 덕분에 석사 졸업이라는 큰일을 해낼 수 있었습 니다. 교수님께 배운 지식과 베풀어 주신 은혜 잊지 않겠습니다. 항상 응원해주시고 따뜻하게 말씀해주신 황태연 교수님, 김태훈 교수님, 조 규만 교수님, 조창근 교수님, 최재혁 교수님 감사드립니다.

저에게 연구실생활은 두려움 이였지만 잘 적응 할 수 있게 도와준 임 민주 졸업생, 말은 안 통하지만 언제나 잘 도와주던 밀리언 박사님과 살라무 졸업생, 저와 함께 같이 고생하고 도와주며 힘이 되어주던 백정 진 석사생, 대학원 동기로써 언제나 힘이 되어주고 응원해주던 남형곤, 신동욱 석사생, 지금은 자신의 길을 가고 있는 양호열에게 감사의 말을 전합니다.

제가 힘들 때 방향을 제시해주던 선배이자 친구인 이진웅 박사님, 김 정우, 고범석, 언제나 좋은 이야기로 저를 편하게 해주었던 김재성 선 배님, 문형주 선배님, 장정현 선배님, 제 대학생활의 일부분이였으며, 항상 든든한 후원자이자 평생의 친구들인 최민수, 국승지, 박정은, 박 재영, 문한빈, 신지섭, 남성현, 이인혜, 이찬영, 최담, 마준호, 이인 홍, 최승우, 백금호, 문성환 학생에게도 감사하다고 전하고자합니다.

연구실 생활한지 얼마 되지는 않았지만, 많은 도움을 주었던 안재성, 김정은, 구서경 학생에게도 고맙다고 전합니다.





마지막으로 사랑하는 우리 어머니, 아버지 항상 응원해주시고 지원해 주셔서 정말 감사드립니다. 귀여운 우리 쌍둥이 동생들 따뜻한 말로 용 기 나게 해줘서 고맙습니다.

글씨로 감사의 말을 전해드려서 죄송합니다. 그리고 언급하지 못햇지 만 저를 아껴주시고 도와주셨던 모든 분들에게 다시한번 감사의 말을 전해드립니다.

