

고로슬래그 기반 순환유동층 플라이애시 및 미분탄 플라이애시 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 특성

Properties of Cement Mortar According to Mixing of Circulating Fluidized Bed Fly Ash and Pulverized Coal Fly Ash based on Blast Furnace Slag

조 성 우¹

나 형 원²

형 원 길^{3*}

Cho, Seong-Woo¹

Na, Hyeong-Won²

Hyung, Won-Gil^{3*}

Master's Course, School of Architectural Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Korea¹

Ph.D course, School of Architectural Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Korea²

Professor, School of Architectural Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Korea³

Abstract

In this study, the characteristics of the cement mortar replaced with fly ash and ground granulated blast furnace slag generated during circulating fluidized bed combustion method and pulverized coal combustion process were investigated. As a result of the study, when mixed with circulating fluidized bed combustor fly ash and pulverized coal combustion fly ash, it is advantageous not only in terms of strength development but also in terms of durability. The circulating fluidized bed combustor fly ash contributes to the improvement of initial reactivity, and the pulverized coal combustion fly ash is involved in long-term strength development through pozzolanic reaction. Therefore, it can be seen that the mixed use of circulating fluidized bed combustor fly ash and pulverized coal combustion fly ash acts as a complementary factor for cement mortar substituted with ground granulated blast furnace slag.

Keywords : industrial by-products, fly ash, granulated blast furnace slag

1. 서 론

최근 건설 산업에서는 이산화탄소발생 저감을 위해 플라이 애시 및 고로슬래그 등과 같은 산업부산물의 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

국내 화력발전소는 대부분 미분탄 연소 방식의 보일러로 운영되어 왔으나, 재료의 영향이 적고, 다양한 가연성 물질을 연료로 활용 가능한 순환유동층 연소 방식의 화력발전소 설치

가 증가하는 추세이다. 이와 같은 과정에서 발생하는 순환유동층 플라이애시는 유리 CaO, SO₃ 등의 성분이 다량 함유되어 있어 고로슬래그 미분말에 혼입할 경우 다량의 CaO이 물과 반응하여 Ca(OH)₂을 생성하여 잠재수경성인 고로슬래그 미분말의 반응을 촉진시키는 효과가 있다[2-4]. 그러나 순환유동층 플라이애시 단독 사용 시에는 초기 반응 촉진으로 수화물에 의한 부피 팽창으로 균열을 유발할 수 있다. 따라서 「KS L 5405 플라이애시」에서는 제조 시 미분탄 플라이애시와 혼합사용을 권장하고 있다.

따라서 본 연구에서는 지구온난화의 주요한 원인이 되는 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해 시멘트 저감을 목표로 고로슬래그 미분말, 순환유동층 플라이애시, 미분탄 플라이애시를 일정 비율 치환하여 물리적 특성과 내구성을 분석하고 이를 토대로 최적의 비율을 제시하고자 한다.

Received : February 1, 2021

Revision received : March 18, 2021

Accepted : April 13, 2021

* Corresponding author : Hyung, Won-Gil

[Tel: 82-53-810-2597, E-mail: beda@yu.ac.kr]

©2021 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 실험에서의 실험계획은 Table 1에 실험에 사용된 배합표는 Table 2에 나타내었다. 결합재와 잔골재의 중량비(B:S)는 1:2.45로 설정하였으며, 물결합재비(W/B)는 0.45로 고정하였다. 고로슬래그 미분말의 치환율은 30%, 50%, 70%로 설정하였으며, 기초실험을 통해 도출한 결과에 기인하여 순환유동층 플라이애시의 치환비율을 설정하였다[5]. 이때 플라이애시의 혼합사용 및 단독사용 시의 특성을 확인하기 위해 최대 첨가량 20% 범위에서 순환유동층 플라이애시와 미분탄 플라이애시의 혼합비율을 3수준으로 설정하였다. 순환유동층 플라이애시의 CaO와 SO₃은 초기 반응성에 영향을 줄 수 있으며, 미분탄 플라이애시의 SiO₂는 포졸란 반응을 통해 장기 강도에 영향을 줄 수 있으므로 순환유동층 플라이애시와 미분탄 플라이애시의 혼합사용은 상호 보완적으로 작용할 것으로 판단된다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels	
Mixture	B : S	1	· 1 : 2.45
	W/B	1	· 0.45
	SCMs(%)	4	· BS · 0, 30, 50, 70
		3	· CFA · 0, 10, 20
Experiment		3	· FA · 0, 10, 20
			· Flow
	Physical Properties	3	· Compressive strength (3, 7, 28, 56, 91day)
			· XRD analysis (3, 7, 28, 56, 91day)
Durability		2	· Carbonation acceleration test
			· Chlorine ion penetration resistance test

Table 2. Mix proportion of mortar

Type	Mix proportion (%)				W/B	B:S
	BS	CFA	FA	OPC		
plain	0	0	0	100		
BS30-C		20	0			
BS30-CF	30	10	10	50		
BS30-F		0	20			
BS50-C		20	0		0.45	1:2.45
BS50-CF	50	10	10	30		
BS50-F		0	20			
BS70-C		20	0			
BS70-CF	70	10	10	10		
BS70-F		0	20			

원료와 배합비에 따른 모르타르의 결정상을 분석하기 위해 X선 회절 분석(X-ray Diffraction; 이하 XRD)을 실시하였고, 플라이애시의 특성을 비교하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; 이하 SEM) 관찰을 실시하였다.

2.2 사용재료

본 실험에서는 KS L 5201 기준을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement; 이하 OPC)와 KS F 2563 기준을 만족하는 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag; 이하 BS)을 사용하였다. 순환유동층 플라이애시(Circulating Fluidized Bed Combustor Fly Ash; 이하 CFA)와 미분탄 플라이애시(Pulverized Coal Combustion Fly Ash; 이하 FA)는 국내 J사에서 생산된 제품을 사용하였다. 플라이애시 재료특성을 비교하기 위해 실시한 XRD 및 SEM 관찰 결과는 Figure 1, 2에 나타내었으며 사용재료의 화학조성은 Table 3과 같다.

CFA의 주성분은 Lime(CaO)과 Anhydrite(CaSO₄)이며, FA의 주성분은 Quartz(SiO₂)와 Alumina(Al₂O₃)로 구성되어 있다. SEM으로 촬영한 입형을 살펴보면 FA는 구상의 입자의 형태이며 CFA는 거친 구성의 입자를 관찰할 수 있다.

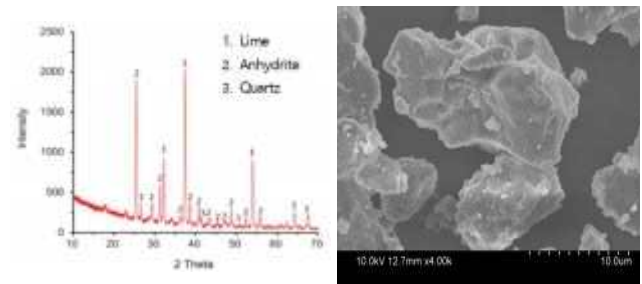


Figure 1. XRD pattern & SEM image of CFA

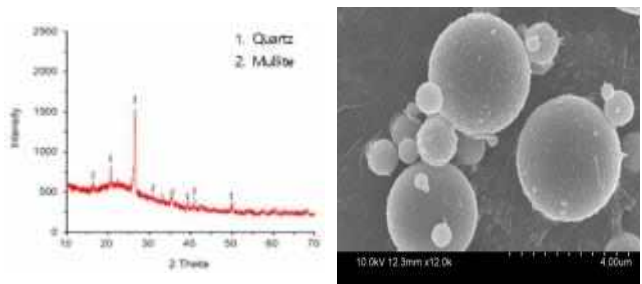


Figure 2. XRD pattern & SEM image of FA

Table 3. Chemical properties of material

Material	Component (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	15.1	4.1	3.9	67.5	3.6	3.2
BS	31.1	13.6	0.5	46.8	2.5	3.1
CFA	3.8	1.3	0.5	62.1	3.3	27.5
FA	66.48	19.2	5.1	3.8	1.49	0.4

2.3 실험 방법

본 연구의 유동성 실험은 KS L 5111의 규준에 부합하는 시멘트 시험용 플로우 테이블을 이용하여 실시하였다. 압축강도 시험은 KS L ISO 679 규준에 의거하여 공시체의 재령 3일, 7일, 28일, 56일, 91일의 강도를 측정하였다. 강도 측정 시, 채취한 파단면의 시편을 분쇄 후 1일간 아세트용액에 침지시킨 후 XRD를 이용하여 결정상을 분석하였다. 중성화 촉진시험은 28일 양생한 모르타르를 2주간 중성화 촉진 장치(30℃, 60%R.H, CO₂ 농도 5%)에서 방치한 후 공시체 중앙부를 절단하고 절단면에 0.1% 페놀프탈레인 용액을 분무하여 색상이 변하지 않는 부분을 중성화 깊이로 측정하였다. 염소이온 침투 깊이의 측정은 KS F 2737 규준을 참조하여 28일간 양생한 공시체를 10% NaCl용액에 14일간 침지시킨 후 공시체의 중앙부를 절단하고 절단면에 질산은(AgNO₃)용액을 분무하여 색상의 변화가 없는 부분을 염소이온 침투 깊이로 산정하였다.

3. 실험 결과

3.1 유동성 실험

Figure 3은 CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 유동

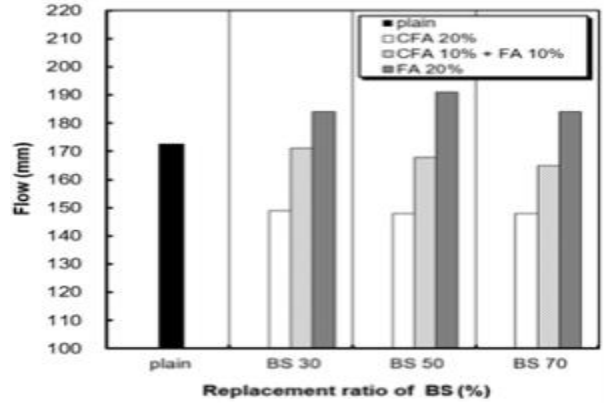


Figure 3. Flow Test of Mortar

성 실험 결과를 나타낸 그래프이며, plain 모르타르의 플로우 값 172.5mm를 기준으로 각 배합의 유동성을 파악하였다.

유동성 실험 결과, CFA의 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 플로우 값은 CFA-FA치환 비율에 따라 일정하게 나타나는 경향이 있다. 따라서 BS 치환비율은 유동성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

FA20% 치환한 경우 플로우 값은 가장 높고 CFA20% 치환한 경우에는 유동성이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. FA 치환비율이 20%인 모르타르의 경우 둥근 입자의 FA가 모르타르 내부에서 볼베어링(ball bearing) 작용을 함으로 인해 유동성 증가에 기인한 것으로 판단된다. CFA를 20% 치환한 경우에는 CFA내 다량의 CaO로 인해 초기 수화반응이 빠르게 진행되어 유동성이 감소된 것으로 보인다.

치환비율 CFA10%+FA10% 조건에서 plain 모르타르와 가장 유사한 경향을 나타내는데, 재령 초기 CFA의 빠른 수화반응(CaO+H₂O → Ca(OH)₂)에 의한 유동성 감소현상은 구

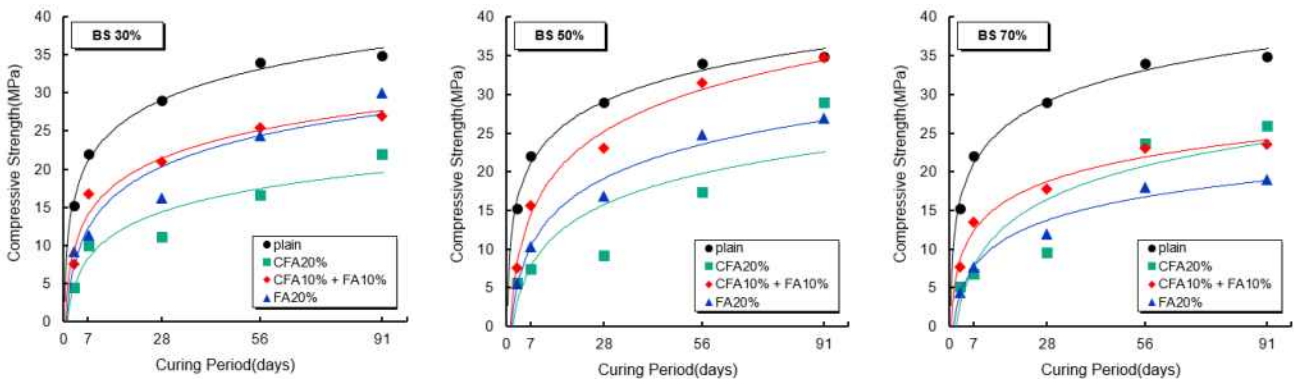


Figure 4. Compressive strength according to age

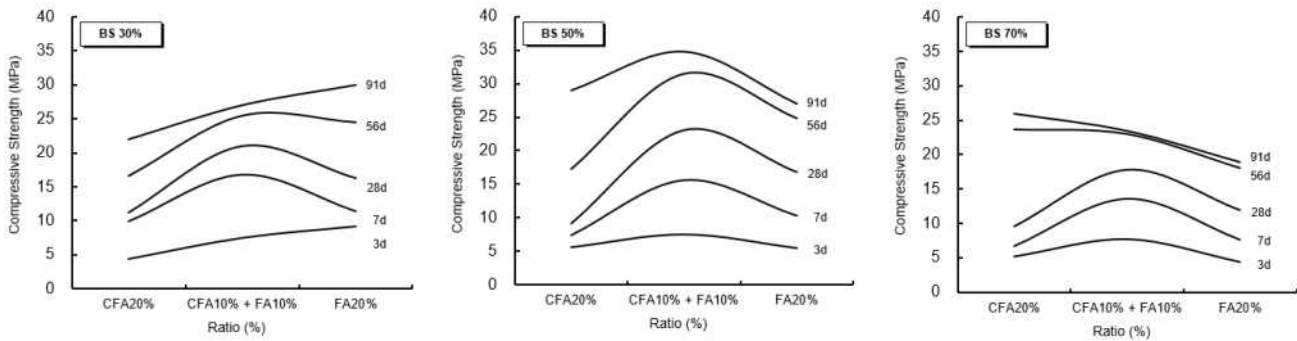


Figure 5. Compression strength trend line

형의 입자 형태를 가진 FA의 불베어링 효과로 유동성이 개선된 것으로 판단된다.

3.2 압축강도 실험

Figure 4는 CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 실험결과를 나타낸 그래프이다.

재령 28일을 기준으로 CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도는 치환비율 CFA10%+FA10% 조건에서 가장 높은 압축강도를 나타낸다. 특히 BS 치환비율이 50%일 때, 강도 발현율은 plain 모르타르의 80% 수준이며 재령 91일에서는 100% 가까운 수준에 도달하였다. CFA는 재령 초기에 BS의 수화반응을 촉진시키며 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같은 수화생성물을 형성하고, 이후 FA가 포졸란 활성으로 장기강도 발현에 기여한 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 발현에 유리한 배합비는 BS50-CF임을 알 수 있다.

CFA 치환비율이 20%인 경우, 압축강도의 발현은 BS 치환비율에 따라 다르게 나타나는 경향이 있다. 즉, BS30-C, BS50-C 배합은 CFA에 의한 다량의 CaO 함유로 생성된 팽창성 수화물에 의해 낮은 강도를 나타내는 반면 BS70-C 배합은 재령 28일 이후 급격한 강도 상승이 나타난다. 이를 통해 자극제로서 CFA의 역할은 BS 치환비율이 70%인 조건에서 더욱 증대되는 것으로 볼 수 있다.

FA 치환비율이 20%인 경우, CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 강도발현은 OPC에 의존하는 경향을 보인다. 즉, OPC의 치환비율이 높을수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타낸다.

Figure 5는 BS 치환비율에 따른 재령별 강도를 나타낸

그래프이다. BS 치환비율에 따라 장기강도에 미치는 CFA와 FA의 영향은 서로 상반된 형태를 나타낸다. BS치환비율이 30%일 때, 재령 28일 이후 강도 증가폭이 크게 나타나는 조건은 FA20%이며, BS 치환비율이 70%일 때는 CFA20% 조건에서 강도 증가폭이 크게 나타난다.

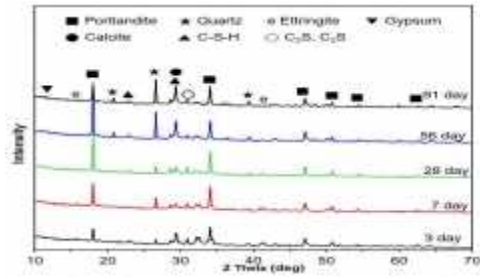
CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 실험 결과, CFA는 재령 초기에 BS의 수화반응을 촉진시키며 FA는 포졸란 활성으로 장기강도 발현에 기여하게 된다. 본 연구조건에서는 CFA 및 FA의 단독 사용보다 혼합하여 사용하는 것이 강도발현에 유리하고 BS 치환비율이 50%일 때 가장 높은 압축강도를 나타낸다. 따라서 적정 배합조건은 BS50-CF임을 알 수 있다.

3.3 X선 회절 분석(XRD)

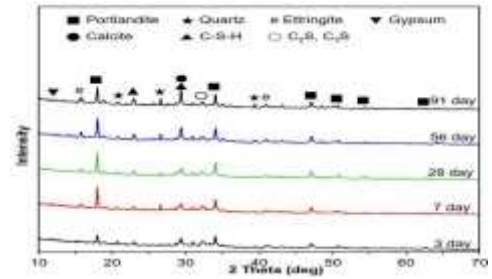
Figure 6은 CFA의 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 X선 회절 분석 결과를 나타낸 것이다. 각 배합의 주요 결정상은 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Quartz(SiO_2), Calcite(CaCO_3), Ettringite, C-S-H(Calcium Silicate Hydrate)임을 알 수 있다.

plain 모르타르는 재령 28일이 경과됨에 따라 Ettringite 및 Portlandite 피크가 미세하게 증가하다 재령 56일부터 점차 감소된다. 이때 29.3도 부근의 C-S-H 피크가 증가되는데, 이는 C-S-H 생성으로 인한 Portlandite의 피크 감소로 판단된다.

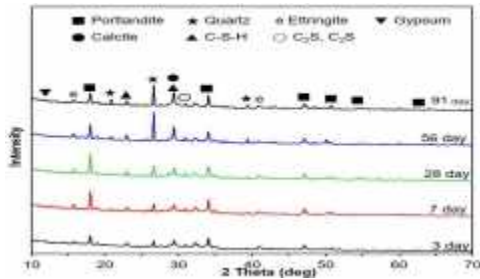
CFA의 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 X선 회절 분석 결과, 대부분의 시료에서 Quartz, C-S-H 및 Portlandite와 같은 수화생성물이 관측되었다. CFA20%에서는 25.5도 부근에서 CaSO_4 피크가 나타나는데 이는 용해도가 낮은 CaSO_4



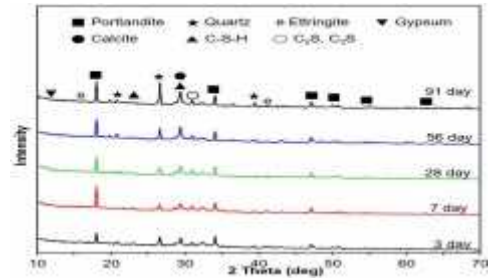
(a) plain



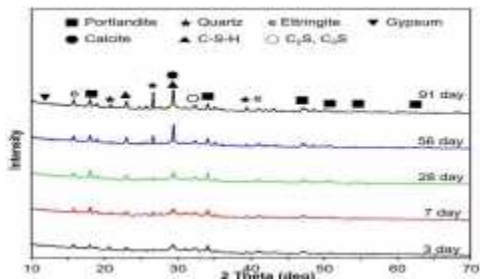
(b) BS30-C



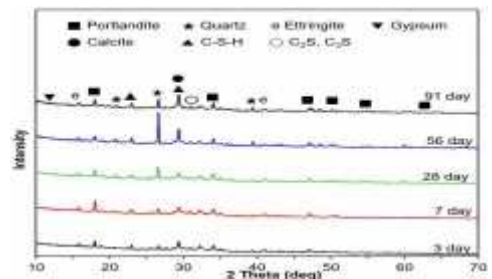
(c) BS30-CF



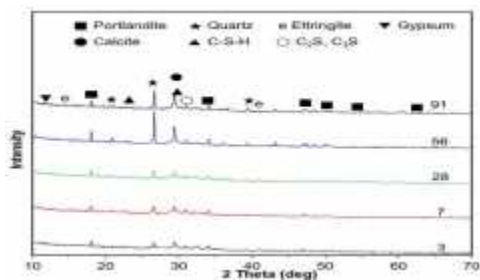
(d) BS30-F



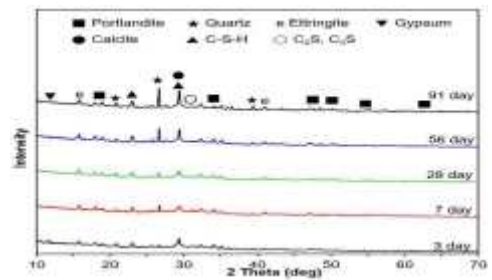
(e) BS50-C



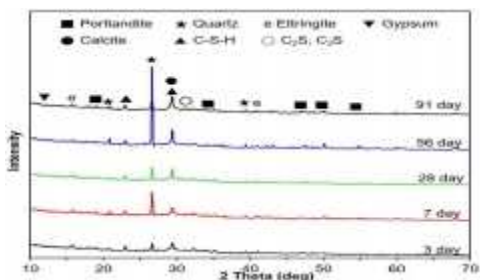
(f) BS50-CF



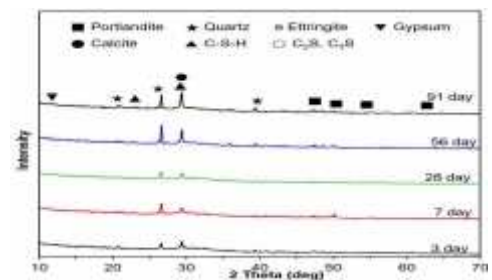
(g) BS50-F



(h) BS70-C



(i) BS70-CF



(j) BS70-F

Figure 6. X-ray diffraction analysis

가 반응하지 못하고 잔존한 것이라 판단된다[6].

BS 치환비율이 증가됨에 따라 18도 부근의 Portlandite 피크는 감소된다. 이는 OPC 사용 저감에 따른 결과로 판단된다. 가장 높은 압축강도를 발현하는 BS50-CF 배합은 재령 28일까지 Portlandite 및 Quartz의 피크가 증가하다 56일 이후 감소한 형태를 나타낸다. CFA내 다량의 CaO로 인해 Portlandite를 생성함으로써 초기강도에 관여하였으며, 간극수내에 Ca(OH)₂이 존재하는 한 FA는 지속적으로 Ca(OH)₂을 소모하고 C-S-H를 생성하여 장기강도를 증가시키는 것으로 판단된다. C-S-H는 CaO와 SiO₂ 성분이 반응하여 생성되는데, 이와 같은 반응으로 재령 56일 이후부터 Quartz의 피크는 감소하고 C-S-H 생성은 증가하여 29.3도 부근 C-S-H 피크가 높아진 것으로 판단된다.

BS30-C, BS50-C, BS70-C 배합의 경우 FA가 없으므로 다른 배합에 비해 FA로부터 기원하는 Quartz의 피크가 초기에 다소 낮게 나타났으며, BS 치환비율이 낮을수록 Portlandite의 피크가 높은 특징을 나타냈다. CFA 치환비율이 높을수록 CaO에 의한 Portlandite 피크가 높은 경향을 보이나 그 차이는 미소하며 BS 치환비율에 따라 더 큰 변화를 나타내므로 Portlandite 피크 증가에는 OPC의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

BS30-F, BS50-F, BS70-F 배합의 경우 대부분 Portlandite의 피크가 낮게 나타나며 BS 치환비율이 증가함에 따라 패턴은 단순하게 나타난다. 이러한 경향은 OPC의 비율이 상대적으로 줄어들어 따라 BS-FA를 자극할 수 있는 Ca(OH)₂의 생성이 제한적이므로 Portlandite의 피크가 낮고 단순한 패턴으로 나타나는 것으로 판단된다.

3.4 염소이온 침투 저항성 실험

Figure 7은 재령 28일 공시체를 10% NaCl 용액에 14일 동안 침지시킨 후 공시체 절단부에 0.1M 질산은(AgNO₃)용액을 분무하여 염소이온 침투 깊이를 나타낸 그래프이다. 실험 결과, plain 모르타르의 평균 침투 깊이는 4.9mm이며, CFA의 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 침투 깊이는 배합비에 따라 다르게 나타나는데 특히 CFA 단독사용 조건에서 그 차이는 가장 뚜렷하게 나타난다.

일반적으로 OPC에 존재하는 C₃A나 C₄AF와 같은 칼슘알루미네이트는 Aluminoferrite와 같은 물질을 생성하여 염소이온 고정화에 기여하게 된다[7]. 즉, OPC를 사용하는 결합재 내에 Al₂O₃ 성분을 함유하는 재료를 추가로 혼입하면

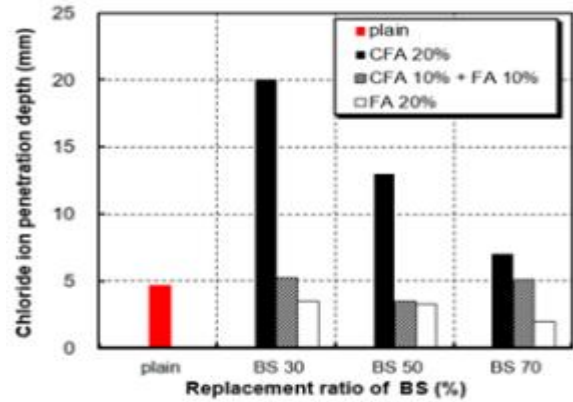


Figure 7. Chloride ion penetration depth

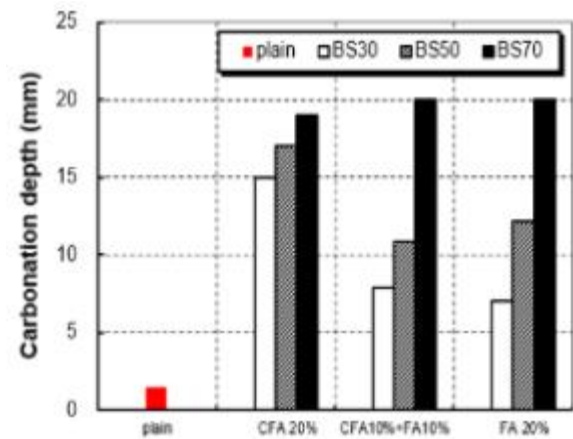


Figure 8. Carbonation depth

Aluminoferrite 생성을 촉진하여 염소이온 고정 및 침투 저항성은 향상된다[8,9].

따라서 BS 치환비율이 증가할수록 염소이온의 침투에 의해 생성된 고정 염화물이 증가하게 되고 수화물의 생성과 함께 내부구조는 점차 밀실하게 채워진다. 이와 같은 반응으로 염소이온 침투 저항성이 향상된 것으로 판단된다. 또한, 적정 이상의 CFA 첨가 시에는 전술한바와 같이 CFA내에 함유된 다량의 CaO가 부피팽창을 유발할 수 있으므로 염소이온 침투 깊이가 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다. CFA 단독 사용 시 염소이온 침투 저항성이 가장 낮았으며, FA의 치환비율이 증가할수록 침투저항성은 개선되는 경향을 보였다.

결론적으로 BS 및 FA의 치환비율이 증가할수록 염소이온 침투 저항성은 향상되며, 좀 더 치밀한 조직을 생성하는 것으로 유추할 수 있다. 특히, BS를 50%이상 치환하면 염분 침투 억제에 가능하여 충분한 내구성능의 확보가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 강도 성능을 고려하여 BS 치환율은 50%로

설정하는 것이 적정할 것으로 사료된다.

3.5 중성화 촉진 실험

Figure 8은 재령 28일 공시체를 중성화 촉진 장치에서 14일 동안 존치시킨 후 중앙부를 절단하고 절단면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 중성화 깊이를 나타낸 그래프이다.

실험 결과, plain 모르타르의 중성화 깊이는 평균 1.5mm이며, CFA의 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 중성화 깊이는 배합비에 따라 현저한 차이를 보인다. BS 치환비율이 증가함에 따라 중성화 깊이는 상승하므로 중성화 저항성은 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 이는 BS 치환비율이 증가함에 따라 OPC의 수화 반응으로 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 이 감소하기 때문이다. 따라서 BS70% 조건에서는 CFA-FA 치환비율에 상관없이 모두 높은 중성화 깊이를 나타낸다. 또한 CFA20% 조건에서도 중성화에 대한 저항성은 부족한 것으로 나타났다. BS30-C 배합의 경우, 상대적으로 OPC 사용량이 많음에도 불구하고 중성화 깊이가 높게 측정된 이유는 CFA 단독사용 시 염소이온 침투 깊이가 크게 나타나는 것과 같이 CaO 성분에 의한 결과로 판단할 수 있다.

따라서 CFA 사용 시에는 내구성 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 적정 혼입량에 대한 검토는 불가피한 것으로 보인다. BS를 70% 치환한 조건을 제외한 CFA10%+FA10% 및 FA20% 조건에서는 중성화 깊이가 유사한 경향이 있으므로 강도성을 고려하여 적정 치환비율을 도출할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서 CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 물리적 특성과 내구성을 분석한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 유동성 실험 결과, CFA-FA 혼합사용 시 plain 모르타르와 유사한 유동성을 나타낸다. BS 치환비율은 유동성에 큰 영향을 미치지 않지만 CFA와 FA 단독사용 시에는 각각 유동성 향상과 감소에 기여하는 역할을 한다.
- 2) CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 실험 결과, BS 치환비율이 50%인 조건에서 CFA-FA 혼합사용 시 가장 높은 강도를 발현하므로 적정 배합비는 BS50-CF로 도출할 수 있다.

- 3) CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 X선 회절 분석 결과, 강도발현에 기여하는 주요 결정상은 Portlandite, Quartz이며 포졸란 반응으로 C-S-H를 생성하며 장기 강도 향상에 기여한다.
- 4) CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 염소이온 침투 저항성 실험 결과, BS 및 FA의 치환비율이 증가할수록 염소이온 침투저항성은 향상되지만 강도 성능을 고려하면 BS의 적정 치환비율은 50%임을 알 수 있다.
- 5) CFA 치환비율에 따른 시멘트 모르타르의 중성화 촉진 실험 결과, BS 치환비율이 증가함에 따라 중성화 저항성은 감소하게 된다. 그러나 강도 성능을 함께 고려할 필요가 있으므로 BS 치환비율을 50%이하로 조정할 필요가 있다.

요 약

본 연구에서는 산업부산물 중 순환유동층 연소방식과 미분탄 연소과정에서 발생하는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 치환한 시멘트 모르타르의 특성을 파악하였다. 연구 결과, 순환유동층 플라이애시 및 미분탄 플라이애시 혼합 사용 시 강도발현 뿐만 아니라 내구성 측면에서도 유리하게 나타난다. 순환유동층 플라이애시는 초기 반응성 향상에 기여하며, 미분탄 플라이애시는 포졸란 반응으로 장기 강도 발현에 관여하게 된다. 따라서 순환유동층 플라이애시와 미분탄 플라이애시의 혼합사용은 고로슬래그 미분말을 치환한 시멘트 모르타르의 상호 보완적인 요소로 작용함을 알 수 있다.

키워드 : 산업부산물, 플라이애시, 고로슬래그 미분말

Funding

This research was supported by the Technology development Program (2020R1F1A1048414) funded by the National Research Foundation of Korea.

ORCID

Seong-woo Cho, <https://orcid.org/0000-0002-8282-6986>
Hyeong-Won Na, <https://orcid.org/0000-0001-6367-5038>

Won-Gil Hyung, <https://orcid.org/0000-0003-2639-8929>

References

1. Ahn NS, Lee JH, Lee YH. Sulfate attack according to the quantity of composition of cement and mineral admixtures. *Journal of Korea Institute Building Construction*. 2011 Sep;11(6):547-56. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2011.11.6.547>
2. Hwang HJ, Kim HS, Jeon JY, Ryu DH, Park SJ, Park HC. The experimental study on the fundamental properties of high-calcium fly ash based non-cement inorganic binder. *Proceeding of The Korea Concrete Institute*; 2011 Oct 28-29; Gyeongsan, Korea. Seoul (Korea): The Korea Concrete Institute; 2011. p. 329-30.
3. Lee HY, Moon KJ, Song H, Bae SC, Hyung WG. A study on the chemical resistance of non-sintered cement mortar. *Journal of Construction and Environment Research Institute*. 2011 Dec;6(2):19-26.
4. Kang SP. A study on the effect of high-calcium fly ash on the compressive strength of the portland blast-furnace slag cement concrete. *Journal of Construction and Environment Research Institute*. 2012 Oct;7(1):22-30.
5. Cho SW, Mun KJ, Hyung WG. Properties of cement mortar according to substitution ratio of high calcium fly ash based on blast furnace slag. *Journal of Korea Institute Building Construction*. 2020 Jan;20(1):27-34. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.1.027>
6. Kang YH, Lim GH, Kim SJ, Choi YC. Feasibility study on the use of cfb ash as non-sintered binder. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2018 Nov;22(5):119-26. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.5.119>
7. Glasser FP, Kindness A, Stronach SA. Stability and solubility relationships in afm phases: Part I. Chloride, Sulfate and Hydroxide. *Cement and Concrete Research*. 1999 Jun;29(6):861-6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00055-1)
8. Shinsugi M, Atarashi D, Higuchi T, Sakai E. Hydrated products in low heat portland cement-CaO · 2Al₂O₃-expansive additive system and the properties of its surface carbonated samples. *Cement Science and Concrete Technology*. 2016 Jan;70(1):162-8. <https://doi.org/10.14250/cement.70.162>
9. Lee YS, Kim MY, Chen Z, Lee HS, Lim SM. Chloride-binding capacity of portland cement paste blended with synthesized CA₂(CaO · 2Al₂O₃). *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018 Mar;2018:1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/5418930>