

바텀애시를 잔골재로 사용한 콘크리트의 압축강도 증진에 대한 혼화제 개발

이원홍¹, 이승열^{1*}, 강육중², 안진희¹, 김홍준³
¹경상국립대학교 토목공학과, ²엔바이로테크, ³다인건설엔지니어링(주)

Development of admixture for improving compressive strength of concrete using bottom ash as fine aggregate

Won-Hong Lee¹, Seung-Yeol Lee^{1*}, Wook-Jung Kang², Jin-hee Ahn¹, Hong-Jun Kim³
¹Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University
²Enviro-tech
³Dain Construction Engineering Co.,LTD.

요약 화력발전소에서 발생하는 바텀애시는 대부분 매립되므로 매립지 부족, 주변 환경문제를 발생시키고 있다. 또한 건설현장에서는 모래의 품귀현상으로 건설 공정에 많은 차질이 일어나고 있다. 본 연구에서는 모래를 바텀애시로 치환한 콘크리트의 강도 발현을 위한 혼화제를 개발하고자 하였다. 본 연구에서 개발한 무기혼화제 B가 재령 7일과 재령 28일 압축강도를 만족하였으며, 콘크리트 2차 제품에 무기혼화제 B를 사용할 경우 모래와 바텀애시의 치환율 50%에서도 압축강도를 안정적으로 만족하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 혼화제 B는 바텀애시가 배합된 콘크리트의 단위수량 증가에 따른 조기 강도 및 설계강도 저하를 방지하여 바텀애시 재활용의 범위를 더욱 확대할 수 있을 것으로 평가된다.

Abstract Most of the bottom ash generated from thermal power plants is landfilled, resulting in a shortage of landfill sites and environmental problems. In addition, a shortage of sand is causing many setbacks in the construction process. Hence, this study developed an admixture to increase the strength of concrete by replacing sand with bottom ash. Inorganic admixture B developed in this study satisfied the compressive strength requirement with 7 and 28 days of aging. In addition, when inorganic admixture B was used for secondary concrete products, the compressive strength was stably satisfied even at a 50% replacement rate of sand and bottom ash. Admixture B developed is estimated to expand the scope of bottom ash recycling. This expansion is possible by preventing premature and design strength deteriorations due to increased water content per unit volume of concrete mixed with bottom ash.

Keywords : Bottom Ash, Concrete Admixture, Inorganic Admixture, Compressive Strength, Sand

이 논문은 2020~2021년도 경상국립대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Seung-Yeol Lee(Gyeongsang National Univ.)

email: Leeseongl@hanmail.net

Received November 25, 2021

Revised December 29, 2021

Accepted January 7, 2022

Published January 31, 2022

1. 서론

석탄회는 발생장소에 따라 플라이애시(Fly ash, 비회, 날림재), 신터애시(Cinder ash), 바텀애시(Bottom ash, 저회, 바닥재)로 구분되고 있으며, 이 중 바텀애시는 연소실 하부에서 발생하는 석탄회로 클링커애시(Clinker ash)라고도 하고 총석탄회 발생량 중 약 10-15%를 차지하고 있다. 그러나 발생량에 비해 이를 처리하기 위한 매립지나 처리시설 확보가 어려워 석탄회 매립으로 인한 환경영향 우려가 증가하고 있으며, 환경영향 최소화라는 측면에서 석탄회 재활용 및 유효이용이 향후 장기적으로 해결해야 할 문제로 인식되고 있다[1]. 국내 석탄회는 연간 약 800만 톤(플라이애시, 바텀애시 총량) 이상이 배출되고 있으며, 현재까지 매립된 석탄회는 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 석탄회 발생량과 더불어 석탄회 재활용은 플라이애시 기준으로 2010년 이후에는 500만 톤 이상 재활용되고 실질적으로는 발생량 대비 약 70%의 석탄회를 재활용하고 있으며, 재활용되는 석탄회를 제외한 물량은 발전소마다 각 회처리장에 매립하여 처리하고 있다[2]. 따라서 2007년 산업자원부 기술표준원에서는 바텀애시를 모래나 자갈 대용으로 사용하여 자원 낭비를 최소화하고 화력발전소의 매립문제를 원천적으로 해소할 수 있도록 KS F 4570에 품질기준을 제정 고시하였고, 바텀애시를 적용하여 경계블록, 호안블록과 도로용 골재(노반재, 보조기층재 등)로 사용하도록 하고 있다. 그리고 바텀애시를 콘크리트에 배합할 경우 단위수량이 증가하여 콘크리트의 강도 및 내구성을 저하시켜 사용의 제한이 많이 발생하였다. 또한 건설현장에서는 모래의 품귀현상으로 건설 공정에 많은 차질이 일어나고 있어서 모래 대체재로 산업부산물인 슬래그나 샌드밀 등을 사용하고 있는 실정이다. 따라서 산업부산물을 사용한 콘크리트나 콘크리트의 성능개선 및 향상을 위한 콘크리트 혼화제에 대한 연구가 많이 이루어져 왔고[3-5], 바텀애시를 골재로 사용하는 연구에서는 콘크리트의 조기강도 저하에 대한 문제보다는 바텀애시를 다른 물질과 결합시켜 설계강도를 발현하는 방향으로 연구가 많이 진행되었다[6-8].

본 연구에서는 모래를 바텀애시로 치환한 콘크리트의 조기강도 및 장기강도 발현을 위한 혼화제를 개발하고자 하였다. 바텀애시의 양과 개발된 혼화제의 양을 각각 고정하고 혼화제의 종류에 따른 재령 7일의 압축강도와 재령 28일의 압축강도를 만족하는 혼화제를 개발하기 위해 혼화제의 구성재료 배합이 변경될 때마다 여러 번의 반

복적으로 압축강도 실험을 실시하여 각 혼화제 배합과 제조공정을 개발하였다.

2. 콘크리트 혼화제에 따른 콘크리트 압축강도 실험

2.1 콘크리트 혼화제

화학혼화제가 콘크리트용 첨가제로 사용되기 시작한 것은 1930년 미국에서 콘크리트 동해를 조사하기 위해 콘크리트 강도 및 단위중량과 내구성 사이의 관계를 밝히는 과정에서 미세한 기포가 내구성을 개선한다는 것을 발견하면서이다[9]. 이러한 리그닌(Lignin)계 혼화제는 1930년도에 개발된 1세대 혼화제로 일반 콘크리트 제조 시 사용되며 제조가 쉽고 가격이 저렴하다. 사용량은 시멘트 분체중량의 0.2-0.5%이며 고강도 콘크리트의 제조는 어렵다. 나프탈렌(Naphtalene)계 혼화제는 1970년도에 개발된 2세대 혼화제로 고강도, 고유동성 콘크리트 제조에 사용된다. 가격은 중고가이며 사용량은 시멘트 분체중량의 0.8-3.0%로 분산성이 우수하나 슬럼프 손실이 크다. 멜라민(Melamine)계 혼화제는 1980년에 개발된 2세대 혼화제로 나프탈렌계 혼화제의 특성과 비슷하나 사용량이 시멘트 분체중량의 0.5-1.0%로 소량이 사용된다. 폴리 카보산(Poly carboxylic)계 혼화제는 2000년도에 개발된 3세대 혼화제로 고강도, 고유동성 콘크리트 제조에 사용되며, 가격은 고가이고, 사용량은 시멘트 분체중량의 0.8-3.0%이다. 이전의 혼화제보다 분산성이 우수하고 슬럼프 손실이 적다.

2.2 바텀애시의 특징

2.2.1 바텀애시 입도분석



(a) Bottom ash powder (b) Bottom ash site loading

Fig. 1. Bottom Ash used in the Experiment

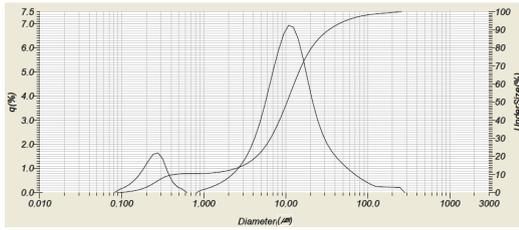


Fig. 2. Bottom ash Particle Size Analysis

본 연구에 사용된 바텀애시는 00화력발전소에서 배출된 것으로 입도 종류에 따라 다양하게 보관되어 있었으나 입도가 클 경우 압축강도 저하가 발생하므로 미립 상태의 것을 시료로 채택하였다. 바텀애시의 입도 분석을 위해서 LA-950 Laser Scattering Particle Distribution Analyzer를 이용하였으며, 측정의 대기 조건은 온도 23℃, 습도 31%이었다. Fig. 2의 좌측 축은 해당 입도의 양을 퍼센트로 나타내며 아래 축은 입도를 마이크로미터로 나타내고 우측 축은 측정된 누적 바텀애시의 양을 퍼센트로 나타내었다. Fig. 2에서 나타난 것과 같이 바텀애시의 입경 분포는 0.100μm ~ 262.376μm으로 분석되었다. 두 번의 꼭지점을 가진 그래프 중 좌측 첫 번째 꼭지점은 직경 0.296μm이며 양은 1.647%이고, 두 번째 꼭지점은 직경 11.565μm이며 양은 6.934%로 분석되었다. 배출되는 매립회 속에는 바텀애시 다량과 플라이 애시와 토양 미립분들이 포함되어 있다[10,11]. 따라서 그래프의 첫 번째 꼭지점은 플라이 애시와 토양 미립분일 가능성이 있으며, 두 번째 꼭지점은 바텀애시일 것으로 평가하였다. Fig. 2의 다른 곡선은 분석된 바텀애시의 누적

양을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에 사용되는 바텀애시를 잔골재 대체재로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다.

2.2.2 바텀애시 성분분석

바텀애시의 성분을 분석하기 위해서 KS L 1614(2016) 규정에 따라 실시하였으며, 사용된 분석기법은 유도 결합 플라즈마 발광 분석법(ICP-OES)을 이용하였고 사용된 장비로는 Optima 8300을 사용하였다. 분석결과는 Table 1과 같다.

2.3 나프탈렌 고성능 감수제를 이용한 콘크리트 조기재령 압축강도 실험

일반적인 콘크리트 배합에 첨가되는 혼화제인 나프탈렌 계열 혼화제를 사용하고 모래를 바텀애시로 일정 비율 치환하여 공시체를 제작하였다. 공시체는 바텀애시가 배합되지 않은 Plain과 모래와 바텀애시의 치환율이 각각 30%, 50% 그리고 70%로 한 공시체를 각각 N-1, N-2 그리고 N-3으로 하여 압축강도를 측정하였다. Table 2는 각 공시체의 배합을 나타내고 있다. Table 2의 배합조건에 따라 각 종류의 공시체를 3개씩 제작하고 재령 7일에 대해 일축압축 실험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 사용된 시멘트(1종 포틀랜드 시멘트), 모래, 자갈의 물리적 특성값은 Table 3, Table 4, Table 5와 같이 나타내었다. 공시체 제형은 φ100×200이며 수온 20℃±3℃의 수중양생을 하였고 재령은 압축실험일까지 실시하였다. Fig. 3은 공시체의 압축강도 측정과 파괴 후 양상을 각각 나타내고 있다.

Table 1. Chemical and Physical Composition of Bottom Ash

compo.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
quantity (%)	60.5	24.0	4.59	1.16	1.71	0.90	0.97	0.79	0.21	0.06
compo.	V ₂ O ₅	SrO	ZrO ₂	BaO	Li ₂ O	Cr ₂ O ₃	CeO ₂	SO ₃	LOI	Sum
quantity (%)	0.04	0.09	0.07	0.11	0.02	0.01	0.02	0.27	4.41	99.93

Table 2. Mix Proportion of Concrete

Item	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	W/C Rate (%)	Slump (mm)	Substitution Rate (%)
Plain	320	880	0	935	0.0	170	53.12	220	-
N-1	320	616	264	935	4.8	170	53.12	195	30
N-2	320	440	440	935	4.8	170	53.12	160	50
N-3	320	264	616	935	4.8	170	53.12	140	70

Table 3. Physical properties of ordinary portland cement

Density (g/cm ³)	fineness (cm ² /g)	Setting time		Stability (%)	Compressive strength (MPa)		
		Initial (min)	final (hr)		3 (day)	7 (day)	28 (day)
3.15	2,800	60	10	0.8	12.5	22.5	42.5

Table 4. Physical properties of used sand

Granularity 5~6mm Pass rate (%)	Assembly rate	Surface dry Density (g/cm ³)	Absorption rate (%)	Basicity (CaO/SiO ₂) (%)
97	2.38	3.28	1.18	1.79

Table 5. Physical properties of used gravel (Coarse Aggregate:25mm)

Granularity 25mm Pass rate (%)	Assembly rate	Surface dry Density (g/cm ³)	Absorption rate (%)	Basicity (CaO/SiO ₂) (%)
100	6.89	2.67	0.91	0.0



(a) compressive shape (b) failure shape

Fig. 3. Compressive Strength Test

Table 6. Average Compressive Strength according to Substitution Rate(curing age:7day, compressive strength:18.99MPa)

Plain (MPa)	N-1 (MPa)	N-2 (MPa)	N-3 (MPa)
1	1	1	1
19.9	16.6	14.4	10.9
2	2	2	2
18.8	16.8	14.3	10.1
3	3	3	3
19.9	17.4	15.1	12.2
Ave.	Ave.	Ave.	Ave.
19.5	16.9	14.6	11.1

Table 6은 각 공시체의 압축강도 실험 결과를 나타내었으며 각 종류의 공시체의 평균 압축강도를 비교하면 콘크리트의 조기강도 발현을 위해 사용한 상용 나프탈렌 계열의 혼화제는 모래에 대한 바텀애시의 치환율이 증가할수록 평균 압축강도가 낮아졌으며 바텀애시가 포함된 모든 공시체는 7일 압축강도를 만족하지 못하였다. 또한 각 공시체별 압축강도와 모래와 바텀애시의 치환율의 관계를 아래의 Fig. 4에 나타내었다.

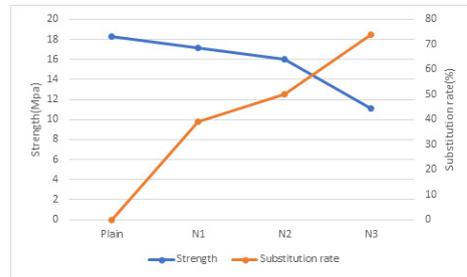


Fig. 4. Comparison of Compressive Strength according to the Substitution rate of Fine Aggregate of Specimens

따라서 나프탈렌 고성능 감수제는 바텀애시 증가에 따른 콘크리트 조기강도 증진에 효과가 없음을 알 수 있었으며 설계기준 강도인 재령 28일 강도로부터 7일 재령 강도를 ACI Committee 209에서 제시한 아래 식(1)과 Table 7에 의해 계산하였다[12,13].

$$(f'_c)_t = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} (f'_c)_{28} \quad (1)$$

여기서, t 는 콘크리트 재령(일), α 와 β 는 콘크리트 양생조건과 시멘트 종류에 따른 상수, $(f'_c)_t$ 는 재령이 t 일 때의 콘크리트 압축강도, $(f'_c)_{28}$ 재령이 28일 때의 콘크리트 압축강도이다.

Table 7. Values of Constants from Eqs.(1)

Type of curing	Cement Type	Constants	
		α	β
Moist cured	I	4.0	0.85
	III	2.3	0.92
Steam cured	I	1.0	0.95
	III	0.70	0.98

식 (1)과 Table 7을 이용하여 7일 재령의 콘크리트 압축강도를 계산하면 아래와 같다.

$$(f'_c)_7 = \frac{7}{4.0 + 0.85 \cdot 7} (27MPa) = 18.99MPa$$

따라서 7일 재령 콘크리트는 18.99MPa로 계산되었다. 본 연구에서 측정된 재령 7일 콘크리트 압축강도는 조기강도 뿐만 아니라 재령 27일 콘크리트 압축강도 예측에 활용하였다.

2.4 바텀애시가 배합된 콘크리트의 조기강도 증진을 위한 혼화제 개발

본 연구에서 개발하고자 하는 혼화제의 제작과정은 각각의 3개 반응조에서 해당 물질들을 조성하고, 각 물질들의 종류와 그 배합이 변경될 때마다 바텀애시가 배합된 콘크리트 공시체를 제작하여 압축강도를 측정하였다. 콘크리트의 압축강도가 발현되지 않을 경우, 이 과정을 지속적으로 반복하여 최종적인 혼화제의 구성물질과 배합량을 결정하여 아래의 Fig. 4에 나타내었다. 나프탈렌계나 폴리카본산계의 혼화제는 감수효과가 있어 콘크리트 강도증진에 영향을 발휘한다. 따라서 바텀애시가 배합된 콘크리트에서 두 종류의 혼화제의 영향이 비교된 자료가 부족하여 본 연구에서는 두 종류의 혼화제를 비교대상으로 하였다. 제1 반응조는 물 50kg과 메타카올린 2kg를 교반기에 넣고 온도가 80℃~85℃가 되도록 가열하고 온도가 다시 60℃~55℃가 되면 수산화리튬 5kg를 투입하고 110분~130분간 조성한다. 제2 반응조는 물 50kg과 실리카폼 2kg+촉매제 1g를 교반기에 넣고 온도가 80℃~85℃가 되도록 가열하고 온도가 다시 60℃~55℃가 되면 수산화칼륨 5kg를 투입하고 110분~130분간 조성한다. 제3 반응조는 물 50kg, 메탈실리콘 2kg과 촉매제 1g를 교반기에 넣고 온도가 80℃~85℃가 되도록 가열하고 온도가 다시 60℃~55℃가 되면 수산화나트륨 5kg를 투입하고 110분~130분간 조성한다. 각각 3개 반응조에서 조성된 혼화제 재료들의 일정량과 글루콘산나트륨 수용액과 나프탈렌 고성능 감수제를 혼합하여 무기혼화제 A를 제조하고, 폴리카본산 고성능 감수제와 AE제를 혼합하여 무기혼화제 B를 제조하였다. 혼화제 제조 공정은 Fig. 5에 도식화하였으며, 혼화제 재료, 반응조와 실험에 사용된 혼화제는 Fig. 6, Fig. 7에 제시하였다.

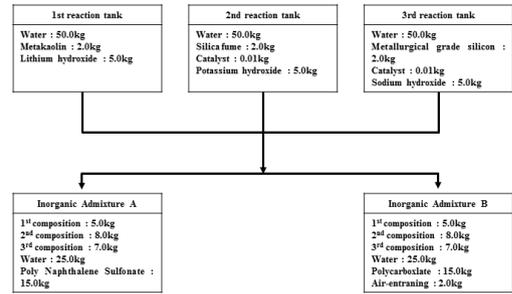


Fig. 5. Developed Admixture Manufacturing Process

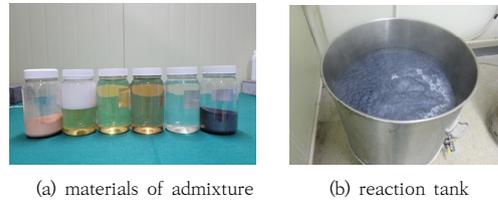


Fig. 6. Admixtures used in the Experiment (Naphthalene Series, Inorganic A(Melamine Series) and Inorganic B from Left Side)



Fig. 7. Admixtures used in the Experiment (Naphthalene Series, Inorganic A(Melamine Series) and Inorganic B from Left Side)

2.5 개발된 혼화제와 바텀애시가 배합된 콘크리트의 압축강도

공시체는 4가지 종류(Plain, NP, I-A, I-B)로 제작하였으며, Plain은 모래를 바텀애시와 치환하지 않았으며 혼화제도 사용하지 않았다. NP는 모래와 바텀애시의 치환율을 50%로 하고 상용 나프탈렌 계열의 혼화제를 사용하였고, I-A는 모래와 바텀애시의 치환율을 50%로 하고 개발된 무기혼화제 A를 사용하였으며, I-B는 모래와 바텀애시의 치환율을 50%로 하고 개발된 무기혼화제 B를 사용하였다. 각 공시체의 배합은 Table 8과 같다. 공시체의 7일 강도와 28일 강도를 측정할 수 있도록 배합 종류별 각각 \varnothing 100×200 공시체를 6개씩 제작하였다.

Table 8. Mix Proportion of Concrete

Item	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	W/C Rate (%)	Slump (mm)	Substitution Rate (%)
Plain	320	880	0	935	0.0	170	53.12	210	-
NP	320	440	440	935	4.8	170	53.12	165	50
I-A	320	440	440	935	4.8	170	53.12	185	50
I-B	320	440	440	935	4.8	170	53.12	200	50



Fig. 8. Production of 6 Specimens in Each Case

Table 9. Average Compressive Strength according to Substitution Rate(curing age:7day, compressive strength:18.99MPa)

Plain(MPa)	NP(MPa)	I-A(MPa)	I-B(MPa)
1	23.2	1	16.7
2	22.7	2	15.2
3	23.9	3	16.4
Ave.	23.3	Ave.	16.1
		Ave.	18.0
		Ave.	21.8

Table 9에서와 같이 재령 28일 압축강도 27MPa에 대한 재령 7일 강도 18.99MPa를 만족하는 공시체는 Plain과 I-B인 것으로 측정되었다. 아래의 Table 10은 각 공시체의 재령 28일 강도를 측정하여 나타내었다.

Table 10. Average Compressive Strength according to Substitution Rate

Plain (MPa)	NP (MPa)	I-A (MPa)	I-B (MPa)
1	38.5	1	21.9
2	35.5	2	21.4
3	37.3	3	28.8
Ave.	37.1	Ave.	24.0
		Ave.	29.8
		Ave.	32.5

재령 28일에 측정한 압축강도 결과는 공시체 NP가 설계강도를 만족하지 못하는 것으로 측정되었고 공시체 I-A는 재령 7일 압축강도는 만족하지 못하였으나 재령 28일 설계강도는 만족하였다. 따라서 무기혼화제 B가 무기혼화제 A보다 좀 더 안정적으로 압축강도를 발현하는 것으로 평가되어 무기혼화제 B를 바텀애시로 배합된 콘크리트 2차 제품에 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 개발된 혼화제와 바텀애시가 배합된 콘크리트 2차 제품에 대한 압축강도 실험

경남 밀양시 소재 콘크리트 2차 제품 생산업체의 생산 공정을 이용하여 개발된 무기혼화제 B와 모래와 바텀애시 치환율을 각각 0%, 50% 그리고 70%로 하여 Table 8과 같이 배합하여 콘크리트 2차 제품인 수로관을 제작하였다. 수로관 제작에 들어가는 콘크리트의 압축강도를 재령 7일과 재령 28일에 대해 평가하였다. 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. Table 11에 나타난 것과 같이 P-1 배합은 모래에 대한 바텀애시의 치환율이 50%이며, P-2 배합은 모래에 대한 바텀애시의 치환율이 70%이다. 또한 Plain 배합보다 P-1, P-2의 바텀애시의 치환율이 증가하므로 무기혼화제 B를 각각 5.4g/m³씩 배합하였다.



(a) Hopper Feeder

(b) Puring Concrete

Fig. 9. Concrete Product Manufacturing

Table 11. Mix Proportion of Concrete Products

Item	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Bottom Ash (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Crushed Sand (kg/m ³)	Admixture (g/m ³)	Water (kg/m ³)	W/C Rate (%)	Slump (mm)	Substitution Rate (%)
Plain	360	450	0.0	1.030	270	0.0	170	47.22	200	-
P-1	360	225	225	1.030	270	5.4	170	47.22	210	50
P-2	360	135	315	1.030	270	5.4	170	47.22	185	70



(a) Failure Shape of Specimen



(b) Concrete secondary finished product

Fig. 10. Test and Manufacturing of Concrete Product

콘크리트 2차 제품에 대한 배합설계는 Table 8과 같고, 각 콘크리트 배합에 대한 재령 7일과 28일 압축강도는 아래의 Table 12와 Table 13과 같다.

Table 12. Average Compressive Strength according to Substitution Rate(curing age:7day, compressive strength:18.99MPa)

Plain (MPa)		P-1 (MPa)		P-2 (MPa)	
1	23.6	1	21.7	1	17.5
2	22.9	2	21.5	2	17.8
3	23.4	3	21.6	3	18.2
Ave.	23.3	Ave.	21.6	Ave.	17.8

Table 13. Average Compressive Strength according to Substitution Rate(curing age:28day)

Plain (MPa)		P-1 (MPa)		P-2 (MPa)	
1	33.2	1	31.0	1	26.7
2	36.0	2	32.3	2	26.6
3	37.2	3	31.9	3	28.1
Ave.	35.5	Ave.	31.7	Ave.	27.1

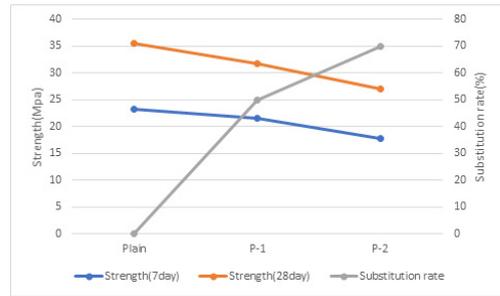


Fig. 11. Comparison of Compressive Strength according to the Replacement rate of Fine Aggregate of Specimens

Fig. 11에서 나타난 것과 같이 무기혼화제 B를 사용 하더라도 P-1(치환율 50%)인 경우, 재령 7일 압축강도와 재령 28일 압축강도를 모두 만족하였다. P-2(치환율 70%)인 경우, 재령 7일의 압축강도를 만족하지 못하였으나, 재령 28일 압축강도는 만족하였다. 따라서 P-1이 P-2보다 설계강도에 대해 높은 압축강도를 발휘하므로 압축강도 증진에 대해 신뢰성이 더 있는 것으로 평가되었다. 그리고 모래에 대한 바텀에서 치환율이 70%인 경우 무기혼화제 B의 양을 증가시키면서 압축강도의 변화를 평가해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 무기혼화제 B는 제1반응조에서 메타카올린 주성분인 SiO₂, Al₂O₃가 LiOH와 반응조에서 결합하여 Li₂SiO₃.H₂O가 형성되고, 제2반응조에서 실리카폼의 주성분인 SiO₂와 Ca(OH)₂가 반응조에서 결합하여 CaO.SiO₂.H₂O가 형성된다. 제3반응조에서 메탈실리콘의 주성분인 SiO₂, Al₂O₃와 NaOH가 반응조에서 소량의 Na₂SiO₃.H₂O가 형성된다. 제1~제3의 반응조에 형성된 물질들을 조합하면 규산칼슘 화합물의 수화 반응을 촉진시켜 콘크리트의 압축강도가 증가시키는 것으로 판단된다. 또한 나프탈렌 베이스 혼화제보다는 폴리카본산 혼화제의 최종 감수력이 뛰어나므로 콘크리트의 압축강도가 상대적으로 증가되는 반응 메커니즘을 나타내는 것으로 평가된다.

4. 결론

화력발전소 부산물인 바텀애시를 콘크리트 잔골재로 사용하기 위한 혼화제 개발 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 나프탈렌 고성능 감수제는 바텀애시를 콘크리트 잔골재로 사용할 경우 재령 28일 압축강도 27MPa에 대한 조기 강도 발현에 부적합한 것으로 평가되었다.
- 2) 무기혼화제 B는 모래와 바텀애시 치환율 50%에서 재령 28일 압축강도 27MPa에 대한 재령 7일 압축강도를 만족하였으며, 재령 28일 압축강도가 32.53MPa로 측정되어 설계강도를 충분히 만족하였다.
- 3) 콘크리트 2차 제품 배합 실험에서 모래와 바텀애시 치환율 50%, 개발된 무기혼화제 B를 사용할 경우 콘크리트의 압축강도에 대한 신뢰성이 있는 것으로 판단되었고, 모래와 바텀애시 치환율 50% 이상일 경우는 무기혼화제 B의 양을 증가시키면서 압축강도의 변화를 평가해야 할 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에서 개발된 혼화제 B는 바텀애시가 배합된 콘크리트의 단위수량 증가에 따른 조기 강도 및 설계강도 저하를 방지하여 바텀애시 재활용의 범위를 더욱 확대할 수 있을 것으로 평가된다.

바텀애시가 배합된 콘크리트의 강도 발현을 위한 혼화제 성분들과 콘크리트 경화 과정의 포졸란 반응 및 수화 반응에서 발생할 수도 있는 생성물질들에 대한 상호작용의 연구가 향후 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] J. H. Maeng, T. Y. Kim, H. N. Cho, E. Y. Kim, Minimizing Environmental Accordance with the Thermal Power Plant Ash Management(II), Research Trend Report, Korea Environment Institute, Korea.
- [2] J. H. Maeng, T. Y. Kim, D. H. Seo, Minimizing Environmental Accordance with the Thermal Power Plant Ash Management(I), Research Trend Report, Korea Environment Institute, Korea.
- [3] K. H. Kim, S. R. Oh, B. K. Choi, Y. W. Choi, "The Fundamental Study on Quality Properties of Binary Blended Concrete according to Water Reducing Performance of Chemical Admixture and Estimation Equation of Compressive Strength", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 1, pp.009-017, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.1.009>
- [4] J. S. Lee, S. K. Noh, J. I. Suh, H. C. Shin, "A Study on the Possibility of Using Cement Raw Material through Chemical Composition Analysis of Pond Ash", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 24, No. 6, pp.180-188., Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2020.24.6.180>
- [5] T. B. Min, I. S. Cho, H. S. Lee, "Experimental Study on the Early Strength Development Mechanism of Cement Paste Using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 1, pp.084-092., Jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.1.084>
- [6] S. C. Kim, S. K. Ahn, "Mix Design and Characteristics of Compressive Strengths for Foam Concrete Associated with the Application of Bottom Ash", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 3, pp. 283-290., Jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2009.21.3.283>
- [7] S. S. Kim, J. B. Lee, S. H. Park, "Bottom Ash on the Application for Use as Fine Aggregate of Concrete", *Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 2, No. 3, pp. 174-179., 2014. DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2014.2.3.173>
- [8] M. S. Kim, J. M. Cha, H. C. Kang, "The Characteristic Study on Bottom Ash Flotation of Vegetable Oil as a Collector", *Journal of Korean Inst of Resources Recycling*, Vol. 27, No. 2, pp. 55-62., Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.7844/kirr.2018.27.2.55>
- [9] G. B. Ji, J. H. Mun, K. H. Yang, "Evaluation of Reproducibility for Mechanical Properties of Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Foam", *Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 7, No. 3, pp. 202-209., Sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.3.202>
- [10] KCL, Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash, Technical Report, Korea Conformity Laboratories, Korea, R-2007-2-151.
- [11] S. H. Jung, J. H. Kim, S. J. Kwon, "Experimental Study on Evaluation of Material Properties in Cement Mortar with Pond Ash", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 17, No. 3, pp.108-117, May. 2013. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2013.17.3.108>
- [12] ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Manual of Concrete Practice, ACI 209R-92.
- [13] J. S. Mun, K. H. Yang, Y. S. Jeon, "Maturity-Based Model for Concrete Compressive Strength with Different Supplementary Cementitious Materials", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 6, pp.082-089., Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.6.082>

이 승 열(Seung-Yeol Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경상국립대학교 토목공학과대학원 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경상국립대학교 토목공학과대학원 (공학박사)
- 2007년 8월 ~ 2019년 2월 : 경남과학기술대학교 토목공학과 겸임 교수

• 2021년 2월 ~ 현재 : KHEN Corp. 기업부설연구소 소장

<관심분야>

구조역학, 구조물 유지 관리

안 진 희(Jin-Hee Ahn)

[정회원]



- 2004년 2월 : 연세대학교 토목공학과 대학원 (공학석사)
- 2008년 8월 : 연세대학교 토목공학과 대학원 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 경상국립대학교 토목공학과 조교수/부교수

<관심분야>

구조해석, 구조물 유지 관리

이 원 홍(Won-Hong Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학석사)
- 1995년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

합성구조, 콘크리트

김 흥 준(Hong-Jun Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2012년 8월 ~ 2020년 9월 : (주)진성이엔씨 과장
- 2020년 10월 ~ 현재 : 다인건설엔지니어링(중) 이사

<관심분야>

강구조, 철근콘크리트구조

강 욱 중(Wook-Jung Kang)

[정회원]



- 1974년 2월 : 국민대학교 경제학 학사
- 1979년 3월 ~ 2002년 10월 : 두산그룹 근무
- 2002년 12월 ~ 2004년 12월 : J&B Korea 대표이사
- 2011년 2월 ~ 현재 : 엔바이로테크 대표이사

<관심분야>

콘크리트 혼화제, 구조물 유지 관리