

# 전기로제강분진(EAF Dust)을 혼화재로 배합한 콘크리트 공시체의 재료특성

## Material Properties of Concrete Specimens with Electric Arc Furnace Dust as Admixture

김장호\*      김석호\*\*      김성훈\*\*      김동원\*\*  
Kim, Jang Ho   Kim, Seok Ho   Kim, Sung Hun   Kim, Dong Wan

### ABSTRACT

Electric Arc Furnace Dust (EAF Dust) is residual dust produced during the manufacturing of metal products from heavily heated electric arc furnace. Many researches have focused on recycling and reusing EAF Dust for industrial and construction purposes. However, most of these researches were aimed at obtaining useful heavy metal powders by treating toxic metallic materials in EAF Dust. Also, few researches dealt with using EAF Dust as admixture in concrete mixture (i.e., slag dust).

In this study, EAF Dust is used as admixture in concrete mixture content considering economical feasibility and construction applicability. The concrete specimens mixed with EAF Dust is then tested in compression and tension to study its strength and ductility as well as its failure mechanism. The compression and tension (by split cylinder test) test results are compared to the results from the specimens without EAF Dust to understand the chemical stability and mechanical characteristic of concrete specimens with EAF Dust. For the experiment, 6 types of admixture added concrete were studied: (1)Combination of EAF Dust and blast-furnace slag in 1 to 1 ratio, (2)Combination of EAF Dust and blast-furnace slag in 1 to 2 ratio, (3)EAF Dust only, (4)blast-furnace slag only, (5)fly ash only, and (6)no admixture. The experimental results show that the strength of EAF Dust added specimen has lower early age strength but higher 28 day strength when compared to other specimens. Also, the Elastic Modulus of EAF Dust is higher(28 days) than other specimens. The study results prove that EAF Dust can be used as an effective admixture in concrete for specific usages.

### 1. 서      론

전기로 제강 공정에서 고철의 용해시에 전체 조강량의 약 1~2%정도가 분진으로 발생하며 이것을 집진한 것을 전기로제강분진(EAF Dust : Electric Arc Furnace Dust)이라 한다. EAF Dust는 지정산

\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 전임강사  
\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

업폐기물이므로 이를 재활용하는 방안으로는 정련과정을 거쳐 아연과 같은 유용한 중금속을 추출하거나, 매립 또는 봉입저장하여 폐기하는 경우가 많다. 그러나 EAF Dust에는 납, 카드뮴 및 수은과 같은 유해 중금속 물질이 포함되어 있어서 폐기하는 경우 주위환경을 오염시키는 문제점이 발생하였다. 그러므로 현재 이러한 오염문제를 해결하며, 건축자재로써 EAF Dust의 재활용을 위해 문제의 중금속을 화학적으로 안정·고정화하는 연구들이 있다.

화학적 안정·고정화처리의 가장 일반적인 방법으로는 시멘트를 이용하여 중금속을 고정화하는 방법이 있다. 그러나 시멘트에 중금속이 첨가되면 수화반응을 지연시키고, 시멘트의 경화와 강도의 저하를 가져와 많은 개선이 필요한 실정이다.<sup>1), 2)</sup> 이를 보완하기 위한 연구로는 열처리로 인하여 포졸란화 된 왕겨(rice husks), 혈암점토(shale) 또는 규조토 등으로 중금속을 고정하는 방법이 있다.<sup>3), 4)</sup> 최근에는 초속경시멘트 또는 coal fly ash 등을 이용하여 고정화하는 방안들이 연구되었다.<sup>5), 6)</sup> 그러나 지금까지의 연구들은 환경보존의 측면에서 중금속의 안정·고정화 방안에 초점을 두어왔으며 건축자재로써의 재활용에 대한 연구는 아직도 미흡하다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 EAF Dust를 안정·고정화하는데 소요되는 경제성, 시공성 등을 고려하여 EAF Dust를 콘크리트 공시체에 배합하고, 더불어 다른 혼화재를 일정비율로 배합함으로써 압축 및 인장강도와 탄성비를 파악하고자 한다. 이것을 위해 일정 설계강도를 가진 일반 콘크리트 배합에 EAF Dust, 고로슬래그, fly ash를 첨가하여, 혼화재를 넣지 않은 일반콘크리트와 강도성능을 비교·검토하였다. EAF Dust의 고정화와 고로슬래그의 aging처리가 되진 않은 것 등을 감안하여, 첨가된 혼화재의 양은 전체 골재량의 5%로 정하였으며, EAF Dust와 고로슬래그를 1:1과 1:2로 배합한 콘크리트 공시체와 EAF Dust, 고로슬래그, fly ash 만을 첨가한 공시체를 각각 제작하여 혼화재를 넣지 않은 일반콘크리트와 함께 압축 및 인장강도를 측정하여 그 거동을 파악하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험개요

#### 2.1.1 전기로제강분진 (Electric Arc Furnace Dust : EAF Dust)

일반적으로 EAF Dust는 납, 카드뮴, 수은 등과 같은 유해한 금속을 포함하고 있으므로 이를 건설재료로써 재활용하기에 앞서 시멘트, 규조토 등 여러 재료 또는 방법을 사용하여 EAF Dust 속의 중금속을 고정화시켜 안정화 처리를 한다.

표 1 실험에 사용된 EAF Dust의 화학적 조성

	성 분 (%)									비 고
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO	
EAF Dust	0.68	3.14	2.1	3.16	2.00	8.56	42.1	0.08	26.73	Cl=3.65, MnO=0.9, PbO=2.16, SO <sub>3</sub> =0.85, CuO=0.34, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.31, P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.29, Br=0.13, CdO=0.09, NiO=0.03

표 1은 실험에 사용된 EAF Dust의 화학적 조성을 나타낸 것으로써 동국제강의 전기로에서 채집한 분진을 XRF 분석기기를 사용하여 화학성분을 조사한 것이다. 표 1에서 보듯이 EAF Dust 중에는 철 성분이 42.1%로 가장 높고, 아연과 납의 함유량은 각각 평균 26.73%와 2.16%이며, 염소 성분의 함유량이 3.65%로 나타났다.

#### 2.1.2 고로슬래그 (Blast-Furnace Slag)

고로슬래그는 1981년 '콘크리트용 고로 슬래그 굵은 골재'(KS F 2544)로 인증을 받은 이후 fly ash와 함께 일반적으로 많이 이용되는 혼화재이다.

고로슬래그는 시멘트와 성분이 유사하여 수경성이 있으며, 미분말 형태가 되면 포졸란 작용을 하여

재료분리와 블리딩을 감소시키고, 수화열이 낮아 Mass 콘크리트에 사용하는데 효과적이다. 그러나 제강슬래그(고로, 전기로슬래그 등)는 유리석회(free CaO)의 수화작용에 의하여 팽창붕괴가 발생하므로 사전에 aging(숙성)이 필요한 단점이 있다. 표 2는 동국제강에서 채집하여 실험에 사용된 고로슬래그의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

표 2 전기로슬래그의 화학적 조성

	성 분 (%)									비 고
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO	
Blast-furnace slag	11.94	26.38	10.68	27.36	0.11	0.26	12.61	0.93	0.04	MnO=7.66, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =1.05, SO <sub>3</sub> =0.45, BaO=0.16, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> =0.09, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> =0.09, ZnO=0.07

### 2.1.3 플라이애쉬 (Fly ash)

Fly ash 중의 가용성 SiO<sub>2</sub>는 시멘트의 수화작용시 생성되는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 화합하여 불용성의 안정된 규산칼슘을 생성시켜 콘크리트 수화열의 감소, 장기강도의 증진, 내구성 등을 향상시킨다. Fly ash를 혼화재로 사용하면 초기강도는 떨어지나 28일 이후부터 강도는 계속 증가하여 교량 건설에 적합하다. Fly ash는 하동화력발전소에서 채집된 것을 사용하였으며, KS L 5405의 분말도를 만족하는 시료로써 화학적 조성은 표 3에 나타낸 바와 같다.

표 3 플라이 애쉬의 화학적 조성

	성 분 (%)							밀 도
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig-loss	
Fly ash	68.0	25.0	2.9	2.0	0.9	-	3.5	2.15

## 2.2. 실험

### 2.2.1 실험방법

실험에 사용된 콘크리트는 국내에서 시판되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 굵은골재의 최대치수는 15mm이고, Ø10×20원주형 공시체를 사용하였다. 콘크리트의 설계기준강도는  $f_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ 로 설계하였으며, 28일 동안 수중양생하였다. 경제성과 시공성 및 고로슬래그, EAF Dust, fly ash 속의 중금속으로 인한 시멘트의 수화반응의 지연과 강도의 저하를 고려하여 콘크리트 배합시 모든 혼화재의 첨가 비율은 전체 골재량의 5%로 하였다. EAF Dust : 고로슬래그를 1 : 2와 1 : 1 비율로 배합한 콘크리트 공시체, fly ash, 고로슬래그, 그리고 혼화재 무첨가 콘크리트를 각각 제작하여 이를 비교, 검토하였다. 자세한 배합설계는 표 4에 나타나있다.

슬럼프 시험은 KS F 2402에 의하여 같은 유동성 조건 하에서 각각의 공시체에 대한 압축, 인장강도의 특성을 파악하기 위해 공시체의 슬럼프값은 8cm를 유지하도록 하였다. 압축강도측정은 KS F 2405에 규정에 의거하여 하중제어(Load Control)와 변위제어(Displacement Control)로 각 공시체의 압축강도를 측정하였다. 하중제하속도는 하중제어의 경우 0.15tonf/sec, 변위제어는 0.005mm/sec로 하중을 가하였다. 또한 KS F 2423에 의해 할렬인장시험(Split Cylinder Tensile Test)을 실행하여 횡방향 할렬인장하중을 측정하였다. 할렬인장시험의 하중제하속도는 0.005mm/sec이고, 공시체가 압축 및 인장 파괴를 일으킬 때까지 하중을 가하였다. 실험에 사용된 공시체는 각 재령 당 하중제어 3개, 변위 제어 1개, 할렬인장시험 3개로 (4+4+3)×6=총66개를 제작하였다. 공시체 표시기호는 2S 1D 28C를 예를 들면

S=고로슬래그, D=EAF Dust, 그 앞의 숫자는 배합비를 뜻하며, 28C는 재령 28일 압축을 뜻한다.

표 4 콘크리트 배합설계

	W/C(%)	배합비(%)	S/a(%)	단위 중량 (kgf/m <sup>3</sup> )				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화재
2S 1D	53	5	48	195	369	777	859	S : D = 70 : 35
1S 1D	53	5	48	195	369	777	859	S : D = 50 : 50
Slag only	53	5	48	195	369	777	859	106
Dust only	53	5	48	195	369	777	859	106
Fly ash only	53	5	48	195	369	777	859	106
Concrete only	50	-	48	195	390	819	904	-

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1. 재령 7일 공시체의 압축거동

각각의 혼화재를 배합한 재령 7일 공시체의 응력-변형률 곡선은 그림 1과 같다. Fly ash를 5% 혼합한 공시체의 압축강도는 설계강도 보다 37kgf/cm<sup>2</sup> 낮은 173kgf/cm<sup>2</sup>, 고로슬래그는 69kgf/cm<sup>2</sup> 낮은 141kgf/cm<sup>2</sup> 강도로 초기강도의 발현이 저하됨을 나타냈다. Fly ash에 비해 고로슬래그가 더 낮은 초기 강도를 나타내었다. 이것은 fly ash가 고로슬래그 보다 더 활발한 포졸란 반응을 일으켜 강도가 더 높게 측정되었으며, 고로슬래그는 유리석회에 의한 팽창성 붕괴가 일어나 fly ash보다 낮은 압축강도를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 혼화재를 혼합한 공시체가 146kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타낸 일반 콘크리트 공시체 보다 압축강도가 더 높은 것은 콘크리트의 수화열과 건조수축이 저감되었기 때문에 강도가 더 크게 발현된 것으로 판단된다.

EAF Dust를 혼합한 공시체는 초기강도가 극히 작아 배합비가 2:1인 것은 18kgf/cm<sup>2</sup>, 배합비가 1:1인 것은 12kgf/cm<sup>2</sup>, dust만을 혼합한 것은 7kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타냈다. 이것은 fly ash, 고로슬래그 혼화재의 초기강도 발현저하와 EAF Dust상의 증금속물질이 시멘트의 수화반응을 지연시키는 점이 맞물려 발생한 현상으로 판단된다. 특히 EAF Dust만 혼합한 콘크리트 공시체는 수화반응 지연과 Dust상의 유리석회(free CaO)가 물과 반응하여 팽창붕괴를 일으켜 가장 낮은 압축강도를 나타내는 것으로 판단된다.

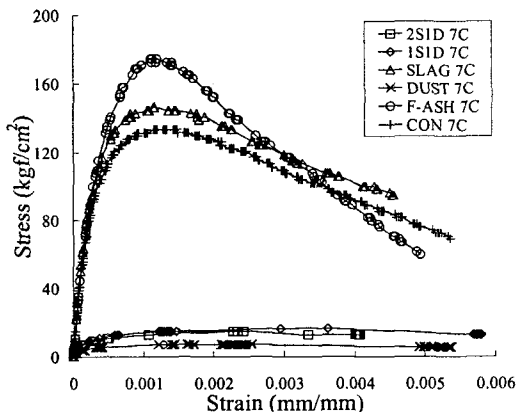


그림 1 응력-변형률 곡선(재령 7일)

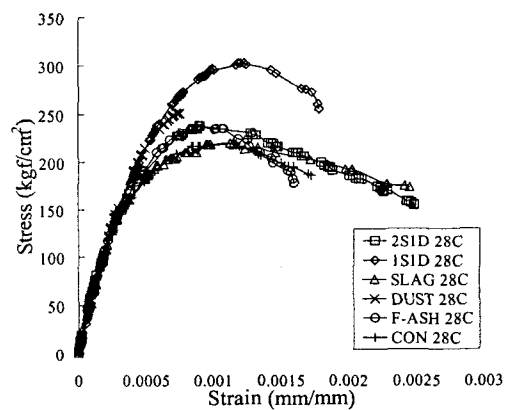


그림 2 응력-변형률 곡선 (재령 28일)

### 3.2. 재령 28일 공시체의 압축거동

재령이 28일 콘크리트 공시체의 응력-변형률 곡선은 그림 2와 같이 나타났다. 혼화재를 첨가하지 않은 콘크리트의 압축강도는 240kgf/cm<sup>2</sup>으로 설계기준강도에 만족한 강도를 나타내었으며, fly ash와 고로슬래그를 혼합한 공시체의 압축강도는 각각 95kgf/cm<sup>2</sup>, 82kgf/cm<sup>2</sup>로 증가하여 초기재령 이후 강도가 증가하는 특성을 나타냈다. 그러나 고로슬래그와 EAF Dust를 1:1로 혼합한 공시체가 284kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타냈으며, Dust만을 혼합한 공시체는 이 보다는 작은 248kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타냈다. 또한 고로슬래그와 EAF Dust를 2:1로 배합한 공시체도 240kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 나타내어 EAF Dust를 혼합한 공시체의 압축강도가 초기재령일 때의 압축강도 보다 현저한 강도의 발현을 보였다. 이것은 fly ash와 고로슬래그를 포함한 공시체 보다 장기강도의 효과가 현저한 것으로써, EAF Dust 속의 중금속 이온이 알칼리성 시멘트 속에서 불용성의 carbonate와 hydroxides를 만들어 시멘트의 기공에 갇히거나 흡착되어 콘크리트의 공극을 매워주는 역할을 하여 높은 강도를 발현하는 것으로 판단된다. 또한 거친 표면을 가진 EAF Dust가 시멘트모르타르와 골재사이의 건조수축이나 수화열로 인한 미세균열 사이의 공극을 막아주어 높은 압축강도를 나타내는 것으로 판단된다.

표 5는 재령 28일 각 공시체의 탄성계수를 평균값으로 나타낸 것으로써 거의 비슷한 탄성거동을 보이거나 고로슬래그와 EAF Dust를 1:1로 혼합한 공시체와 EAF Dust만을 넣은 공시체의 탄성계수가  $3.06 \times 10^5$ 와  $3.41 \times 10^5$ 로 다른 공시체에 비해 높게 나타나 고강도 콘크리트의 특성을 보였다.

고로슬래그와 EAF Dust의 1:1 배합의 경우 위에서 언급한 Dust의 특성과 고로슬래그의 포졸란 반응이 맞물려 가장 높은 압축강도를 나타냈다. 그에 비해 2:1배합을 한 공시체는 더 낮은 압축강도를 나타냈다. EAF Dust와 고로슬래그를 1:1배합함으로써 EAF Dust와 고로슬래그가 잘 융합하여 높은 장기강도를 나타낸 반면, 2:1 배합의 경우는 과도한 고로슬래그의 혼합으로 이 균형이 깨져 수화열 등으로 인하여 약간 낮은 압축강도를 나타낸 것으로 판단된다.

표 5 재령 28일 공시체의 탄성계수(E<sub>c</sub>)

실험공시체	2S1D 28C	1S1D 28C	SLAG 28C	DUST 28C	F-ASH 28C	CON 28C
탄성계수 E <sub>c</sub> (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	2.47	3.06	2.10	3.41	2.51	2.12

### 3.3. 재령 28일 공시체의 압축 및 인장강도

표 6은 각 공시체를 할렬인장시험(Split cylinder tensile test)한 결과와 압축강도를 비교한 것이며, 실험값은 공시체의 평균치를 사용하였다. 각 공시체의 인장강도는 26kgf/cm<sup>2</sup>~36kgf/cm<sup>2</sup>으로 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 재령 28일 압축실험 결과에서 알 수 있듯이 인장강도 또한 고로슬래그와 EAF Dust가 1:1로 혼합된 공시체의 인장강도가 가장 높은 것으로 나타났다.

표 6 압축 및 인장강도 비교 (재령 28일)

실험공시체	2S 1D	1S 1D	SLAG	DUST	F-ASH	CON
강도						
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	240	284	223	248	268	240
인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	33	35	31	27	28	26

## 4. 결 론

설계기준강도를 210kgf/cm<sup>2</sup>로 배합설계하여 EAF Dust, 고로슬래그, fly ash를 혼합한 콘크리트 공시

체 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) EAF Dust를 혼합한 공시체는 fly ash, 고로슬래그를 혼합 공시체에 비해 초기강도 발현이 4~12%정도로 매우 낮으나, 재령 28일 압축강도의 증가율은 다른 공시체 보다 대략 58% 정도 높게 나타났다. 초기재령시 EAF Dust 상의 중금속으로 인하여 시멘트의 수화반응이 지연되어 압축강도가 낮았으나, 시간의 경과 이후 시멘트로 인한 중금속의 고정화와 EAF Dust의 거친 표면으로 인하여 압축강도가 매우 높게 증가한 것으로 판단된다. 이로써 EAF Dust상의 중금속으로 인한 환경오염방지를 위한 연구가 많이 진행되고 있지만 이와 더불어 시멘트의 초기강도발현을 위한 연구가 지속된다면 EAF Dust를 장기강도 발현을 위한 혼화제로써의 활용 가능성이 더욱 높아질 것으로 판단된다.
- (2) 고로슬래그와 EAF Dust를 1:1로 혼합한 공시체의 28일 압축 및 인장강도가 기타 공시체 또는 2:1로 배합한 공시체와 EAF Dust만을 5% 배합한 공시체 보다 대략 6~21% 정도 높은 압축 및 인장 강도를 나타내었다. 이것으로 미루어 볼 때 EAF Dust와 기타 혼화제의 균형 있는 배합으로 인해 장기강도 발현이 매우 우수한 콘크리트의 개발가능성을 판단할 수 있다.
- (3) 수화열, 건조수축, 슬럼프손실 등을 방지하기 위해 혼화제를 혼합하여 고유동, 고강도, 고내구성의 콘크리트를 개발하기 위한 연구가 많이 진행되어왔다. 초기강도 발현이 미흡한 단점을 보완하기 위하여 혼화제의 배합비 또는 다른 물성을 가진 물질을 혼합하여 이를 해결하려는 연구 또한 많이 진행되고 있다. 이와 더불어 초기강도의 발현에 있어서는 아직 미흡하지만 장기강도의 발현이 타 혼화제에 비해 높을 가능성이 있는 EAF Dust의 연구가 많이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 류한길, 임남웅, 박종욱, "전기로 분진(EAF Dust)상의 중금속 고정에 있어서 포졸란 효과," 한국폐기물학회, 춘계연구발표회, 1996.
2. Sollars C. J. and Perry R., "Optimization of Cement Based Stabilization/Solidification of Organic Containing Industrial Waste Using Organophilic Clay," Waste Management and Research, 1991.
3. 추호선, "Rice Husk Ash를 이용한 제철소 집진 Dust중의 중금속 고정화 공정에 관한 연구," 석사학위논문, 중앙대학교, pp.25-41, 1994.
4. 류한길, 임남웅, 박종욱, "EAF Dust상의 중금속을 함침한 활성규조토가 혼합된 시멘트 모르타르의 내화학성에 관한 연구," 한국콘크리트학회, Vol.9, No.1, 1997.
5. 양숙경, 염희남, 임남웅, "EAF Dust상의 중금속고정화에 있어서 초속경 시멘트와 포졸란 효과," 한국폐기물학회, 춘계연구발표회, 1998.
6. Constantino F. P., Miguel R. P. and Jose, V., "Solidification/Stabilization of Electric Arc Furnace Dust Using Coal Fly Ash Analysis of the Stabilization process," Journal of Hazardous Materials, Vol.82, pp.183-195, 2001.