



## 콘크리트용 골재로서 에이징처리한 제강슬래그의 활용

문한영<sup>1)\*</sup> · 유정훈<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 토목공학과

(2002년 3월 10일 원고접수, 2002년 6월 11일 심사완료)

### Utilization of Electric Arc Furnace Slag and Converter Slag after Aging for Concrete Aggregate

Han-Young Moon<sup>1)\*</sup> and Jung-Hoon Yoo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received March 10, 2002, Accepted June 11, 2002)

#### ABSTRACT

Electric arc furnace and converter slag are produced by about 6 millions tons in Korea at 2000 year. But compared with blast furnace slag, those are utilized only in unvalued material like landfill and road construction. There are unstable materials, like free CaO, in electric arc furnace and converter slag at steel-manufacturing process. This might cause volume expansion in concrete, if electric arc furnace and converter slag aggregates were used in concrete. This expansion may reach to crack or collapse of concrete. It is therefore settled by standard specification for concrete that electric arc furnace and converter slag aggregates have not to use in concrete. First of all, volume stability and stabilized process should be solved in electric arc furnace and converter slag aggregate to use in concrete. In this study, 6 types of aging are evaluated for effects of stabilization to reduce the expansion of electric arc furnace and converter slag. In converter slag aggregate, these types of aging are not good for volume stability for concrete aggregate, and even if converter slag aggregate is treated with aging, concrete with it has some problems that strength is reduced with curing days. But in electric arc furnace slag aggregate treated with hotwater and steam aging, the expansion of electric arc furnace slag aggregate is reduced about two times than that of converter slag aggregate, and electric arc furnace slag aggregate concrete has good results in strength compared with control concrete using crushed stone.

**Keywords :** electric arc furnace slag, converter slag, free CaO, aging, expansion

#### 1. 서 론

우리나라에서 2000년에 발생된 고로슬래그와 제강슬래그는 각각 820만 톤 정도와 약 656만 톤으로 합계 1,476만 톤 정도이며, 제강슬래그 중 전기로슬래그의 발생량은 223만 톤 정도, 전로슬래그는 약 387만 톤 정도라고 한다<sup>1)</sup>.

고로슬래그는 시멘트 원료, 도로 포장 및 콘크리트용 골재 등으로 사용할 수 있도록 한국산업규격에 제정되어 광범위하게 재활용되고 있는 반면, 제강슬래그는 제강과정에서 부원료로 사용되는 생석회가 충분히 슬래그화되지 않으면 불안정한 상태로 슬래그 내부에 잔존하기 때문에 건설교통부 제정 콘크리트 표준시방서에서는 콘크리트용 골재로 사용해서는 안 된다고 규정하는 등의 제약을 받고 있다<sup>2)</sup>. 그래서 지금까지 제강슬래그는 콘크리트용 골재로

사용된 실적은 없으나, "제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계시공지침"<sup>3)</sup>, "전기로슬래그를 사용한 도로포장설계·시공지침"<sup>4)</sup> 및 KS F 2535 "도로용 철강슬래그"를 제정하므로 도로포장재료 및 매립재 등과 같은 한정된 용도로 활용되고 있다. 그러나 한국표준협회에서는 "콘크리트용 동(銅)슬래그 골재"를 제정한 바 있으며, 외국에서는 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 움직임이 활발한 실정이다<sup>5~12)</sup>.

주지하는 바와 같이 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 제강슬래그 자체의 팽창성 억제 내지는 안정화 처리가 우선 해결되어야 할 과제임에도 불구하고 현재까지도 제강업계에서는 슬래그의 팽창억제 및 안정화에 소요되는 처리 비용 및 기술적인 문제 등으로 인하여 뚜렷한 해법을 찾지 못하고 숙제로 남아 있는 상태이다. 다시 말해서 일반적으로 제강업계에서는 제강슬래그를 대기 중에 방치한 후 출하하여 도로포장재료 등으로만 활용하고 있는 현실이나, 제강슬래그의 표면에 불안정한

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-0323 Fax : 02-2293-9977

E-mail : moon77@hanyang.ac.kr

성분이 존재할 경우, 제강슬래그를 대기 중에 방치하므로서 안정화의 효과를 기대할 수 있으나, 제강슬래그 내부 깊숙히 불안정한 성분이 존재할 경우에는 불안정한 성분의 일부가 잔존한다<sup>13-16)</sup>.

그러므로 제강슬래그를 대기 중에 방치하는 안정화 처리 방법은 불충분하므로, 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 활용할 경우, 제강슬래그 내부 깊숙히 존재하는 불안정한 성분이 콘크리트 구조물 내에서 팽창을 일으킬 가능성을 뿐만 아니라, 팽창이 심할 경우 구조물의 균열 내지는 붕괴까지도 야기시킬 수 있다고 한다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 연구의 일환으로 6종류로 안정화 처리한 전기로 및 전로슬래그 골재의 화학, 물리적 성질 및 팽창 억제 효과 등을 비교, 평가하였다. 또한 이들 안정화 처리한 전기로 및 전로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 기초물성을 측정된 실험결과에 대해서도 비교 고찰하였다.

## 2. 제강슬래그의 생성 및 재활용 현황

### 2.1 제강슬래그의 생성

철강산업의 부산물인 슬래그를 크게 고로슬래그와 제강슬래그(製鋼, steel slag)로 분류하며, 제강슬래그는 전기로슬래그(電氣爐, electric arc furnace slag)와 전로슬래그(轉爐, converter slag)로 구분된다. 슬래그의 성분과 생성량은 주입원료, 강의 재질, 조업 방법 등에 따라 다르다.

전로에서 사용되는 주원료는 용융선철, 부원료는 생석회(CaO), 석회석(CaCO<sub>3</sub>), 돌로마이트(CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub>) 등이 있는데, 이들은 주입원료 중의 불필요한 성분을 용선으로부터 분리하는데 사용한다. 전로에서는 용융선철에 산소(99.5%)를 불어넣어 강재 제조시 불필요한 성분을 산화,

연소시키고 생성된 산화물은 부원료와 함께 슬래그를 만들어 철과 분리된다<sup>4)</sup>.

전기로는 전로와는 달리 외부로부터 열을 공급받아 주원료인 철부스러기를 용해하고 정련하여 강을 만드는 것으로, 전기로의 특징은 정련과정에서 노(爐)내의 분위기를 산화 또는 환원성으로 바꿀 수 있다는 점이다. 용강 중에 산소를 불어넣어 강을 제조하는 산화과정과 용강 중에 생석회 등을 주입하여 산화물 등의 불필요한 성분과 결합시키는 환원정련과정 후 각각 피상의 산화슬래그와 분말상의 환원슬래그가 생성된다<sup>4)</sup>.

### 2.2 제강슬래그의 재활용 현황

2000년도 우리나라에서 발생된 슬래그의 주요 용도별 재활용 현황은 Table 1과 같다<sup>1)</sup>.

고로슬래그의 경우에는 시멘트 원료 64.3%, 도로용 골재 17.5% 및 성토용 골재 9.7% 등으로 재활용되며, 전로슬래그의 경우 시멘트 원료 11.4%, 공정 재사용 24.8% 및 성토용 골재 63.7%인 반면, 전기로슬래그의 경우 도로용 골재 및 성토용 골재로 각각 43% 이상 재활용됨으로써, 전기로 및 전로슬래그는 고로슬래그와는 달리 부가가치가 높은 재료로 재활용되지 못하고 있는 실정으므로 고부가가치 재료로서의 재활용이 요망된다.

## 3. 실험개요

### 3.1 사용재료

#### 3.1.1 시멘트

보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Disposal of slag in Korea

	Blast furnace slag		Converter slag		Electric arc furnace slag	
	t	%	t	%	t	%
Raw material for cement	5,272,190	64.3	468,584	11.4	-	-
Aggregate for road construction	1,436,092	17.5	-	-	990,486	43.8
Aggregate for backfill	793,515	9.7	2,616,466	63.7	988,858	43.7
Soil conditioner	522,928	6.4	-	-	-	-
Siliceous manure	167,908	2.0	-	-	-	-
Recycled in steel management	6,000	0.1	1,017,646	24.8	106,579	4.7
Recovery of metal	-	-	-	-	20,052	0.9
Aggregate for brick	-	-	-	-	154,570	6.8
Aggregate for skid resistance in road	-	-	1,915	-	262	0.0
Total	8,198,633	100	4,104,611	100	2,260,807	100

Table 2 Chemical composition and physical properties of cement

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 (%)	Specific gravity	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)
20.30	6.20	3.20	62.40	3.00	2.00	1.90	3.14	3,265

### 3.1.2 골재

바닷모래를 세척한 잔골재와 굵은골재 최대치수 20 mm 인 부순 돌 골재를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 3 과 같다.

### 3.1.3 화학혼화제

사용된 리그닌계 AE감수제의 물성은 Table 4와 같다.

## 3.2 실험방법

### 3.2.1 안정화 처리 방법

전기로슬래그 골재(이하 EAFSA) 및 전로슬래그 골재(이하 CSA)를 1개월간 대기 중에 방치한 안정화 처리 방법(이하 공기중 에이징), 80 °C의 온수 중에서 1일과 3일간 침지시킨 안정화 처리 방법(이하 각각 1일 및 3일 온수중 에이징) 및 100 °C 증기 중에서 1일, 3일 및 5일간 처리한 안정화 처리 방법(이하 각각 1일, 3일 및 5일 증기중 에이징)을 채택하였다.

### 3.2.2 골재의 물성 시험방법

전기로 및 전로슬래그 골재의 비중 및 흡수율은 KS F 2503 및 2504, 단위용적질량은 KS F 2505, 마모감량은 KS F 2508에 의하여 각각 측정하였다.

### 3.2.3 pH 값 측정방법

에이징 처리 유, 무에 따른 전기로 및 전로슬래그 골재의 pH값을 비교하기 위하여 입도 5~10 mm인 전기로 및 전로슬래그 골재와 증류수의 중량비를 1 : 2로 정하였으며, 카로멜 전극을 사용하여 pH값을 측정하였다.

### 3.2.4 수침팽창비 측정방법

KS F 2535 "도로용 철강슬래그"의 부속서인 "수침팽창비 시험방법"에 의하여 전기로 및 전로슬래그 골재의 수침팽창비를 측정하였다.

### 3.2.5 Ca(OH)<sub>2</sub> 정량 분석방법

전기로 및 전로슬래그 골재 중에서 용출되는 Ca(OH)<sub>2</sub>

양을 분석하기 위한 수단으로 Ca(OH)<sub>2</sub>가 약 450°C에서 CaO와 H<sub>2</sub>O로 분해되는 점에 착안하여 일본시멘트협회의 유리칼슘정량방법 중 가열감량방법<sup>17)</sup>을 응용하여 550°C로 60분간 가열한 후 Ca(OH)<sub>2</sub> 양을 측정하였다.

### 3.2.6 압축 및 인장강도 측정방법

KS F 2403 "콘크리트 강도시험용 공시체 제작 방법"에 따라 에이징 처리한 전기로 및 전로슬래그 골재 사용 콘크리트를 사용하여 ø10×20 cm의 공시체를 제조하여 20±3 °C의 수중에서 표준양생한 후 재령별 압축강도를 KS F 2405에 의하여 측정하였으며, 인장강도는 재령 28일에서의 KS F 2423에 의하여 측정하였다.

## 3.3 콘크리트의 배합

에이징 처리 방법을 달리한 7종류의 전기로슬래그 골재 및 4종류 전로슬래그 골재 사용 콘크리트 11배합과 부순 돌 골재 사용 콘크리트(이하 보통콘크리트)의 배합은 Table 5와 같다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 제강슬래그 골재의 품질

#### 4.1.1 화학적 성질

에이징 처리하지 않은 전기로 및 전로슬래그 골재의 화학성분을 XRF로 측정한 결과가 Table 6으로서, 여기에서 알 수 있듯이 전기로 및 전로슬래그는 석회, 실리카가 주 성분이며 기타 산화마그네슘 및 산화철 등을 함유하고 있다. 이들 성분은 일반적인 천연암석의 구성성분과도 유사하므로 환경상 문제가 되는 중금속 등의 유해물은 없다.

그런데 석회는 Silicate 상, wustite 상 등을 구성하지만, 일부 미용용 상태의 Mg, Fe 등을 고용(固溶)한 석회상(유리석회라고 한다)를 형성한다<sup>18)</sup>. 이 유리석회는 물과 반응하여 다음의 식 (1)과 같이 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 생성되면서 체적팽창을 일으키기 때문에 전기로 및 전로슬래그가 팽창으로 인하여 안정성을 해치는 요인이 된다<sup>19~23)</sup>.

Table 3 Physical properties of aggregates

Items Types	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of solids (%)	Fineness modulus	Abrasion (%)
Fine aggregate	2.59	0.80	1,633	63.1	2.80	-
Coarse aggregate	2.63	0.78	1,741	66.2	6.75	28.9

Table 4 Physical properties of AE water reducing admixture

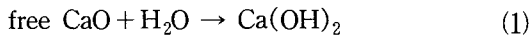
Main composition	Specific gravity	Type	Color
Calcium lignosulfonate compounds	1.09±0.02	Liquid	Dark brown

Table 5 Mixture proportion of concrete

Items Types	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					Aging method
					W	C	S	G	G <sub>slag</sub>	
Crushed stone	20	8±1.5	55	40	193	350	682	1,035	-	-
EAFFSA	20	8±1.5	55	40	193	350	682	-	1,287	Non aging
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,287	Air 1 month
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,263	Hotwater 1 day
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,260	Hotwater 3 days
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,266	Steam 1 day
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,252	Steam 3 days
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,252	Steam 5 days
CSA	20	8±1.5	55	40	193	350	682	-	1,334	Air 1 month
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,370	Hotwater 1 day
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,346	Hotwater 3 days
"	"	"	"	"	"	"	"	-	1,338	Steam 3 days

Table 6 Chemical composition of EAFFSA and CSA(wt., %)

Items Types	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total Fe	CaO	MgO
EAFFSA	22.26	10.65	17.94	21.35	12.35
CSA	14.41	5.30	12.49	36.31	8.6



그래서 전기로 및 전로슬래그 골재를 1일 온수중 에이징 한 후 3개월 이상 대기 중에 방치한 시료의 외관 상태를 촬영한 것이 Photo 1 및 2로서, 이들 사진에서 알 수 있듯이 전로슬래그 골재의 표면에 백색 결정이 전기로슬래그보다 많이 나타났다. 이 백색 결정은 에이징으로 생성된 수산화칼슘과 공기 중의 이산화탄소가 반응하여 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로 변환된 생성물이다.

전기로슬래그 골재의 표면에 생성된 백색 결정이 전로슬래그 골재보다 작은 이유는 전기로슬래그의 유리석회화 0.3 % 정도임에 비하여 전로슬래그의 유리석회화는 약 3.3 % 정도로 큰 차이가 있기 때문으로 생각된다<sup>18)</sup>.

그래서 에이징 처리 방법 4종류에 따른 전기로 및 전로슬래그 골재의 Ca(OH)<sub>2</sub> 양을 측정한 결과를 다음 식 (2)로 계산하여 정리한 것이 Fig. 1이다.

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{C}{H} \times \frac{(A - B)}{A} \times 100 \text{ (wt., \%)} \quad (2)$$

여기서, A : 350℃에서 10분 가열한 전기로 및 전로슬래그 골재 중량 (g)

B : 550℃에서 60분 가열한 전기로 및 전로슬래그 골재 중량 (g)

C : Ca(OH)<sub>2</sub>의 분자량

H : H<sub>2</sub>O의 분자량

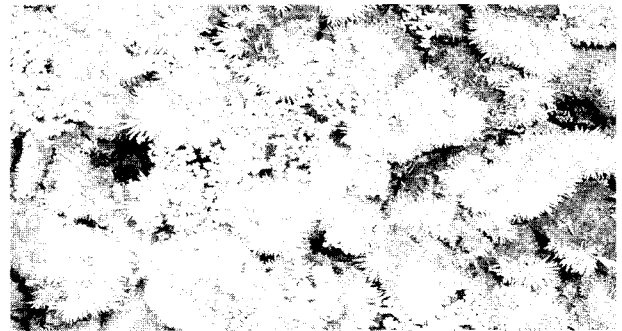


Photo 1 CSA after aging



Photo 2 EAFFSA after aging

이 그림에서 알 수 있듯이 전기로 및 전로슬래그 다 같이 Ca(OH)<sub>2</sub> 양은 5일 증기중 에이징 > 3일 온수중 에이징 > 3일 증기중 에이징 > 1일 온수중 에이징 > 1일 증기중 에이징 > 공기중 에이징 > 에이징 미처리 시료의

순으로 크게 나타났으며, 전로슬래그가 전기로슬래그보다 월등히 큰 값을 나타내었다.

이번에는 전기로 및 전로슬래그 골재를 증류수에 21일 간 침지한 후 경과시간별 pH값을 측정한 결과가 Fig. 2이다. 이 그림에서 에이징 처리하지 않은 전로슬래그 골재의 pH값이 2종류 에이징 처리한 전로슬래그 골재보다 1.0 이상의 높은 값을 나타내었으며, 이는 전로슬래그 골재에 잔존하고 있는 유리석회가  $\text{Ca(OH)}_2$ 로 변환되어 pH값이 높아졌다고 생각된다.

그러나 전기로슬래그 골재의 경우에는 전로슬래그 골재와 비교하여 pH값이 약 1.0 정도 낮은 값을 나타내었다.

또한 전기로 및 전로슬래그 골재의 pH값이 침지재령 2일 이후에 감소하는 경향을 나타내는 이유는 공기 중의 이산화탄소가  $\text{Ca(OH)}_2$ 와 반응하여  $\text{CaCO}_3$ 로 변환되었기 때문으로 생각된다.

따라서 전기로 및 전로슬래그 골재의 pH값을 낮추기 위해서는 증기중 에이징 방법이 효과적임을 알 수 있었다.

그래서 전기로 및 전로슬래그 골재에 생성된  $\text{Ca(OH)}_2$ 와 최대 pH값과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 3으로서, 이들 사이에는 골재 종류에 관계없이 반비례 관계를 나타내었다. 이는 전기로 및 전로슬래그 골재의 유리석회가 에이징에 의하여  $\text{Ca(OH)}_2$ 로 생성되었기 때문에  $\text{Ca(OH)}_2$  양이 증가하는 반면, 최대 pH값은 오히려 감소되는 결과를 나타내었다.

따라서 전기로 및 전로슬래그를 에이징 처리하는 방법에 따라 유리석회가  $\text{Ca(OH)}_2$ 로 변환되는 효율의 차이 탓으로 대기 중에 방치한 공기중 에이징보다 온수중 또는 증기중 에이징의 효과가 좋았다고 생각된다.

#### 4.1.2 물리적 성질

전기로 및 전로슬래그 골재의 비중, 흡수율, 단위중량, 실적률 및 마모감량을 각각 측정한 결과를 정리한 것이 Table 7이며, 비중과 흡수율과의 상관관계를 나타낸 것이 Fig. 4이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 전기로 및 전로슬래그 골재는 에이징 처리 유, 무에 관계없이 비중이 부순 돌 골재보다 월등히 큰 3.10~3.60 정도이며, 흡수율은 약 2배 정도 큰 값을 나타내었다.

전기로 및 전로슬래그 골재의 비중이 부순 돌 골재보다 큰 이유는 제강과정에서 산소주입에 의하여 산화된 철의 일부가 슬래그 중으로 들어가기 때문이다<sup>18)</sup>.

그러나 전기로 및 전로슬래그 골재의 흡수율이 부순 돌 골재보다 큰 이유는 슬래그의 냉각과정에서 발생하는 기포에 의해 전기로 및 전로슬래그 골재 자체의 공극이 많아졌기 때문으로 생각된다.

또한 전기로 및 전로슬래그 골재의 비중이 부순 돌 골재보다 큰 탓으로 단위용적질량이 컸으나, 실적률은 부순

돌 골재보다 오히려 5~10% 정도 작은 값을 나타내었다. 그래서 전기로 및 전로슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 입도 및 입형의 개선 내지는 AE감수제 등과 같은 혼화제의 사용이 요망된다.

한편, 전로슬래그 골재의 마모감량이 에이징 유, 무에

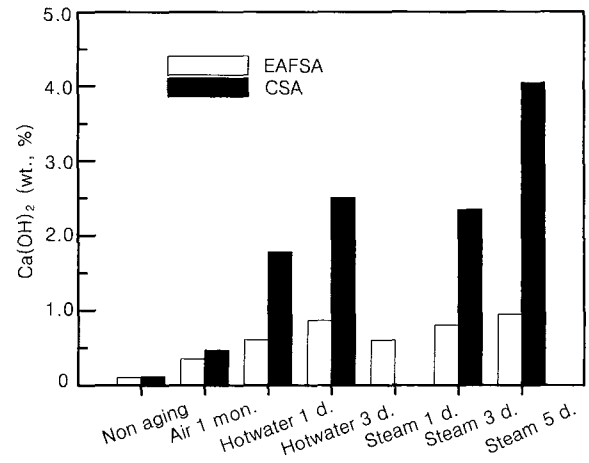


Fig. 1  $\text{Ca(OH)}_2$  in EAFSA and CSA (wt. %)

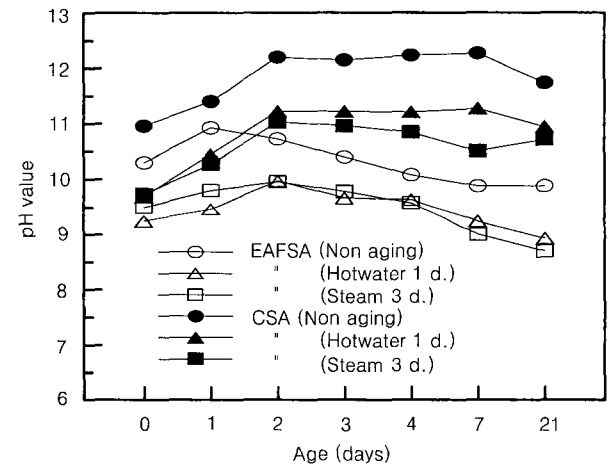


Fig. 2 pH value of EAFSA and CSA

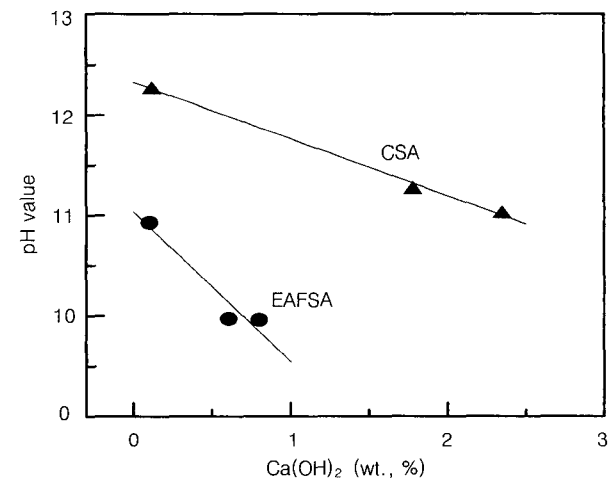


Fig. 3 Relationship between pH value and  $\text{Ca(OH)}_2$

관계없이 부순 돌 골재의 약 1/2 정도 작은 값을 나타내었으나, 전기로슬래그 골재는 부순 돌 골재와 비슷함을 알 수 있다. 그러나 전기로 및 전로슬래그 골재의 마모감량은 한국산업규격의 콘크리트용 골재 마모감량 35% 이하를 만족하는 값을 알 수 있다.

전기로 및 전로슬래그 골재의 물리적 성질에 대한 실험 결과를 검토해 볼 때, 한국산업규격에서 정하고 있는 콘크리트용 부순 돌 골재의 품질에 상응하는 좋은 결과임을 알 수 있었다.

#### 4.1.3 팽창특성

에이징 처리 방법에 따른 전기로 및 전로슬래그 골재의 80°C 수침팽창비를 나타낸 것이 각각 Fig. 5 및 6이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 유리석회가 많은 에이징 미처리 전로슬래그 골재 시료의 수침팽창비는 한국산업규격 도로용 철강슬래그의 수침팽창비 규정값인 1.5% 이하를 초과함을 알 수 있었다. 이는 슬래그에 잔존하고 있는 유

리석회가 골재를 팽창시키는 것으로서 그 팽창값은 에이징이 충분할수록 작게 나타남을 알 수 있다.

일반적으로 유리석화와 물과의 반응은 온도와 밀접한 관련이 있지만<sup>24)</sup>, 이 그림에서 알 수 있듯이 침지 재령과도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 80°C에서 1일 및 3일 온수중 에이징한 전기로슬래그 골재의 경우 팽창률이 약 23% 정도 차이를 보이고 있지만, 각각 1일 및 3일의 증기중 에이징과 온수중 에이징을 실시한 경우 팽창률에서 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 또한 1일 및 3일 증기중 에이징한 경우와는 달리, 3일 및 5일 증기중 에이징한 경우에는 별 차이가 없어 5일 이후 팽창률은 큰 변화가 없을 것으로 생각된다.

그런데 팽창률이 10배 정도 차이가 있던 전기로슬래그 골재와 전로슬래그 골재에 동일한 에이징을 실시한 경우를 비교해 보면, 전로슬래그 골재의 팽창이 약 1.5배 정도 크게 나타나고 있어, 에이징의 효율면에서 전기로슬래그 골재의 경우가 우수함을 알 수 있다.

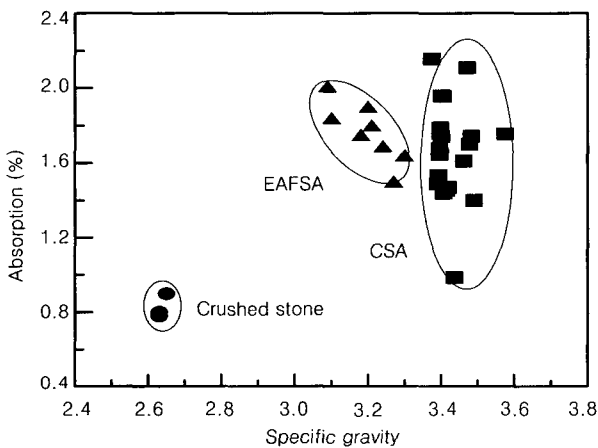


Fig. 4 Relationship between specific gravity and absorption

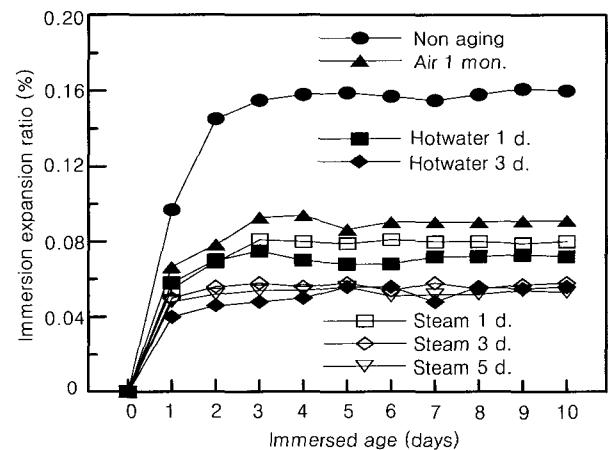


Fig. 5 Immersion expansion ratio (EAFSA)

Table 7 Physical properties of EAFSA and CSA

Items Types	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of solids (%)	Fineness modulus	Abrasion (%)	Aging methods
EAFSA	3.30	1.64	2,006	60.8	6.75	25.9	Non
	3.27	1.50	1,998	61.1	6.75	25.0	Air 1 month
	3.21	1.80	2,011	62.6	6.75	27.6	Hotwater 1 day
	3.20	1.90	2,006	62.7	6.75	26.5	Hotwater 3 days
	3.22	1.90	2,005	62.3	6.75	26.8	Steam 1 day
	3.18	1.75	2,001	62.9	6.75	27.2	Steam 3 days
	3.18	1.74	2,000	62.9	6.75	27.0	Steam 5 days
CSA	3.54	1.99	1,954	55.2	6.75	16.9	Non
	3.39	1.96	1,922	56.7	6.75	16.8	Air 1 month
	3.48	1.57	1,961	56.4	6.75	13.3	Hotwater 1 day
	3.42	1.65	1,973	57.7	6.75	13.4	Hotwater 3 days
	3.40	1.69	1,969	57.9	6.75	13.1	Steam 3 days

전기로 및 전로슬래그 골재의 수침팽창비와 pH값 및  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  양과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 7이다.

이 그림에서 수침팽창비가 높아질수록 pH값이 증가하는 비례 관계를 나타내고 있지만, 수침팽창비와  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  양과의 관계는 반비례를 나타내고 있다.

전기로 및 전로슬래그 골재의 유리석회는 에이징 처리에 의해  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 변환되므로  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 양이 증가되고 따라서 골재의 유리석회가 감소되므로 팽창성이 감소되는 것을 알 수 있다.

그러므로 전기로 및 전로슬래그를 충분히 에이징 처리하지 못할 경우, 잔존 유리석회에 의해 팽창이 증가될 뿐만 아니라 pH값도 증가되기 때문에 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 충분한 에이징 처리가 요망된다.

#### 4.2 제강슬래그 골재 사용 콘크리트의 강도

에이징 처리한 6종류와 에이징 미처리 전기로슬래그 골

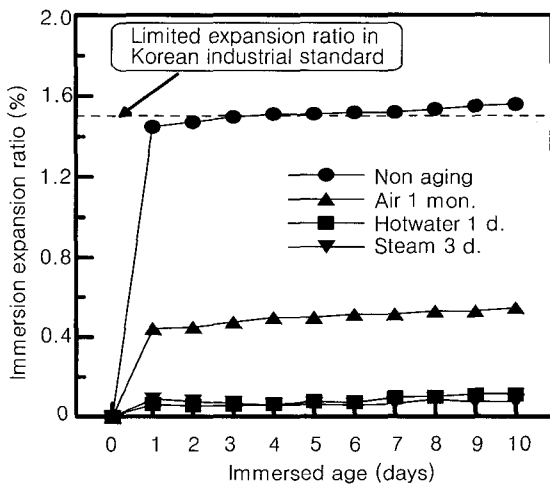


Fig. 6 Immersion expansion ratio (CSA)

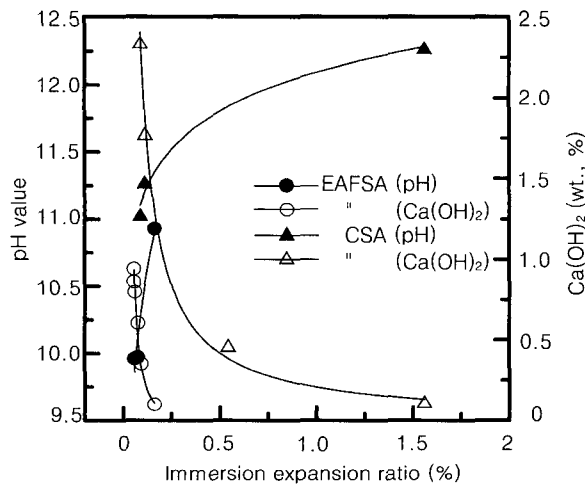


Fig. 7 Relationship between immersion expansion, pH and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

재 및 에이징 처리한 4종류 전로슬래그 골재를 사용하여 제조한 콘크리트의 압축강도를 각각 재령별로 정리한 것이 Fig. 8이며, 동일재령 보통콘크리트의 압축강도 100에 대한 전기로 및 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 압축강도비를 각각 재령별로 정리한 것이 Fig. 9이다.

이들 그림에서 알 수 있듯이 전기로 및 전로슬래그 골재의 에이징 방법 및 재령에 따라 콘크리트의 압축강도가 상이하였으며, 전로슬래그의 경우 압축강도의 차이가 더욱 크게 나타났다.

그런데 에이징 미처리 및 공기중 에이징한 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트의 압축강도는 재령 7일에서 보통콘크리트보다 컸으나, 재령이 증가할수록 압축강도의 발현이 크게 둔화되었음을 알 수 있다. 이는 초기 재령에서 전기로슬래그 골재의 팽창으로 인하여 시멘트 페이스트와 전기로슬래그 골재와의 계면에서 부착력이 오히려 증대된 탓으로 생각되지만, 재령이 증가할수록 압축강도가 둔화된 이유는 상온에서 전기로슬래그 골재의 지속적인 팽창<sup>19)</sup>에

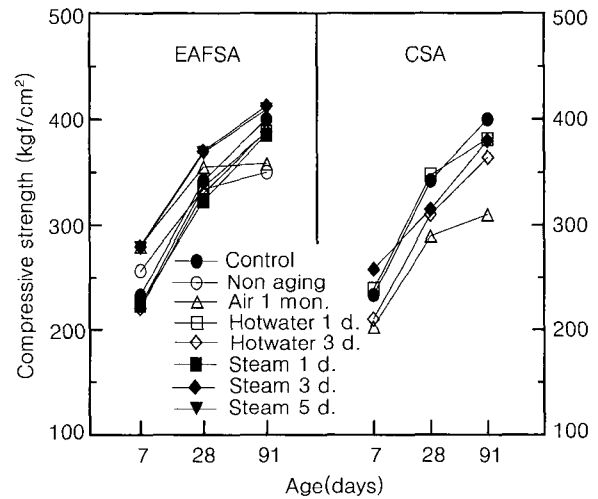


Fig. 8 Compressive strength of concrete

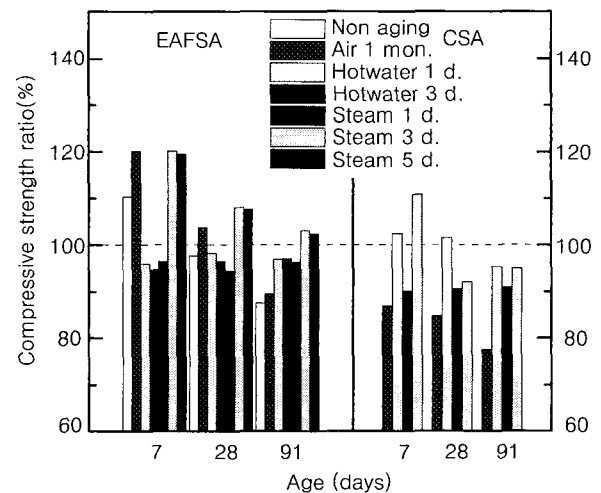


Fig. 9 Compressive strength ratio of concrete

의하여 과도한 응력이 콘크리트 중에 발생되었다고 하는 연구결과<sup>25)</sup>와도 잘 일치된다고 생각된다.

에이징 미처리 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트 공시체의 외관을 재령 28일에 촬영한 것이 Photo 3이다. 이 사진에서 알 수 있듯이 콘크리트 공시체 표면에 큰 흠(pop-out)이 발생되었음을 확인할 수 있으며, 전기로슬래그 골재 중의 유리석회가 물과 반응하여 팽창에 의한 과도한 응력으로 인하여 콘크리트의 표면에 이러한 흠이 나타난 것으로 판단된다<sup>9,26,27)</sup>.

그런데 1일 및 3일 온수중 에이징한 전기로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 보통콘크리트와 큰 차이가 없었으나, 증기중 에이징한 전기로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 경우에는 압축강도의 증진 효과가 큼을 알 수 있으며, 이는 전기로슬래그 골재의 품질 시험 결과와도 비교적 잘 일치된다고 생각된다.

한편, 공기중 에이징한 전로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 공기중 에이징한 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트와 달리 재령 7일부터 보통콘크리트보다도

작은 이유는 전기로슬래그 골재의 팽창률보다 약 6배 정도 크기 때문에 전로슬래그 골재의 팽창이 시멘트 페이스트와 전로슬래그 골재와의 계면에 팽창에 의한 유해 압력이 증가한 탓으로 생각된다.

이번에는 전기로 및 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 재령 28일 압축 및 인장강도 측정값을 정리한 것이 Table 8이다.

이 Table에서 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 인장강도가 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트보다 전반적으로 큰 이유는 전기로 및 전로슬래그 골재에 생성된 수산화칼슘이 전로슬래그가 월등히 많은 탓으로 전로슬래그 골재 표면의 많은 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 재결정화(recrystallization)함에 따라 부착력이 증진되고<sup>28)</sup>, 마모감량 값으로부터 전로슬래그 골재의 강도가 전기로슬래그보다 월등히 큰 결과로 생각된다. Montgomery에 의하면<sup>5)</sup> 전로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 인장강도가 보통콘크리트보다 증가된다는 연구성과와도 유사하다.

한편, 전기로 및 전로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축강도 값으로 인장강도를 추정하기 위하여 CEB-FIP 모델 코드<sup>29)</sup>의 식 (3)을 이용하여 계산한 허용 인장강도의 최대 및 최소값을 정리한 것이 Table 8의  $f_{ctk,max}$  및  $f_{ctk,min}$ 이다.

$$f_{ctk,min} = 0.95 \left( \frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \quad \text{and}$$

$$f_{ctk,max} = 1.85 \left( \frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

여기서,  $f_{cko} = 10 \text{ MPa}$ 이다.

이 Table에서 알 수 있듯이 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 추정 인장강도는 CEB-FIP 모델 코드에서 제안한 허용값을 비교적 잘 만족하고 있으나, 온수중 에이징한 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트의 경우, 허용값의 범위를 약간 벗어나는 결과를 나타내었다.



Photo 3 Pop-out of non aging EAFSA concrete (28 days)

Table 8 Splitting tensile strength and compressive strength of concrete (28 days)

Types	Items	Crushed stone	EAFSA					CSA				
			Air 1 month	Hotwater 1 day	Hotwater 3 days	Steam 1 day	Steam 3 days	Steam 5 days	Air 1 month	Hotwater 1 day	Hotwater 3 days	Steam 3 days
Compressive	Splitting tensile	13.1	13.1	15.7	16.0	15.6	14.91	15.0	10.1	10.9	10.5	10.9
Compressive(kgf/cm <sup>2</sup> )		342	355	336	330	323	370	368	290	351	310	315
Tensile(kgf/cm <sup>2</sup> )		26.02	27.20	21.43	20.59	20.71	24.76	24.51	28.75	32.17	29.64	28.79
$f_{ctk,min}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		21.71	22.26	21.46	21.20	20.89	22.88	22.80	19.45	22.09	20.33	20.55
$f_{ctk,max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		42.28	43.34	41.78	41.28	40.70	44.55	44.39	37.88	43.02	39.60	40.02
Remark		OK	OK	Poor	Poor	Poor	OK	OK	OK	OK	OK	OK



### 4.3 제강슬래그 골재의 사용성 평가

3종류 에이징 처리한 전로슬래그 골재의 팽창률과 이들 골재를 사용하여 제조한 콘크리트의 압축강도와와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 10이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 전로슬래그 골재의 팽창률이 클수록 재령에 관계없이 콘크리트의 압축강도가 작아지는 경향을 나타내었으며, 특히 공기중 에이징 처리한 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 재령 91일 압축강도는 보통콘크리트의 재령 28일 압축강도보다 작은 강도상의 문제점이 있었다.

이번에는 에이징 처리 및 미처리한 7종류 전기로슬래그 골재의 팽창률과 이들 골재를 사용하여 제조한 콘크리트의 압축강도와와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 11이다.

이 그림에서 전기로슬래그 골재의 팽창률과 재령 28 및 91일의 압축강도와 재령 7일의 압축강도와 사이에는 약간 상이한 경향을 나타내었으며, 공기중 에이징 및 에이징 미처리 전기로슬래그 골재의 팽창률이 큰 탓으로 이들 골재 사용 콘크리트의 압축강도는 재령이 증가할수록 작아지는 결과를 나타내었다. 이러한 결과에 대해서는 이미 앞에서 언급한 바와 같다.

이번에는 증기중 및 온수중 에이징 처리한 전기로 및 전로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도와 팽창률과의 관계를 정리한 것이 Fig. 12로서, 골재 종류 및 에이징 처리 방법에 관계없이 전기로 및 전로슬래그 골재의 팽창률이 증가할수록 압축강도가 감소함을 알 수 있다.

이때, 전기로슬래그 골재의 팽창률은 0.055~0.08% 정도로서, 이들 전기로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 재령에 관계없이 보통콘크리트의 압축강도에 상응하는 결과를 나타냄으로써 강도 면에서는 문제가 없을 것으로 판단되었다.

그러나 전로슬래그 골재의 팽창률은 0.085~0.115 정도로서 전기로슬래그 골재의 팽창률보다 다소 크며, 이를 사용한 콘크리트의 초기재령 강도는 약간 증가하나 장기재령에서 강도가 다소 크게 감소하는 현상을 나타내므로서 전로슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 전기로슬래그 골재보다 충분한 에이징 처리가 요망된다.

이상의 연구결과를 종합해 보면, 전로슬래그 골재의 경우 본 연구에서 실시한 4종류의 에이징 처리 방법으로는 콘크리트용 골재로 요구되는 팽창률을 저감시키는데 한계가 있으며, 에이징 처리한 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 강도가 재령과 더불어 감소하는 문제점이 있음을 확인하였다.

한편 전기로슬래그 골재를 온수중 및 증기중 에이징 처리할 경우, 팽창률이 전로슬래그 골재의 약 2/3 정도에 지나지 않는 효율을 나타내었을 뿐만 아니라 이를 사용한 콘크리트의 강도도 전로슬래그 골재 사용 콘크리트와는

달리 보통콘크리트의 강도에 상응하는 비교적 좋은 결과를 나타내었다.

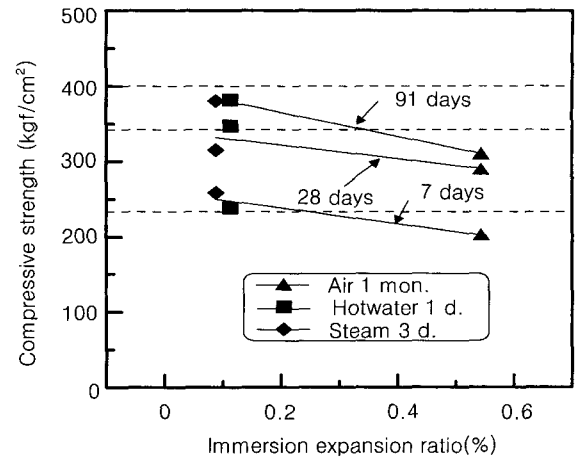


Fig. 10 Relationship between immersion expansion and compressive strength (CSA)

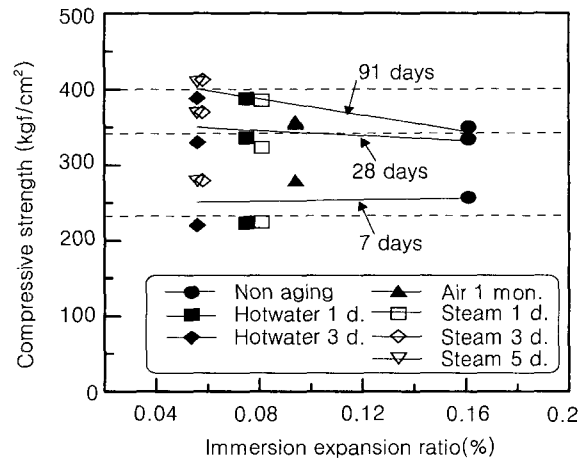


Fig. 11 Relationship between immersion expansion and compressive strength (EAFSA)

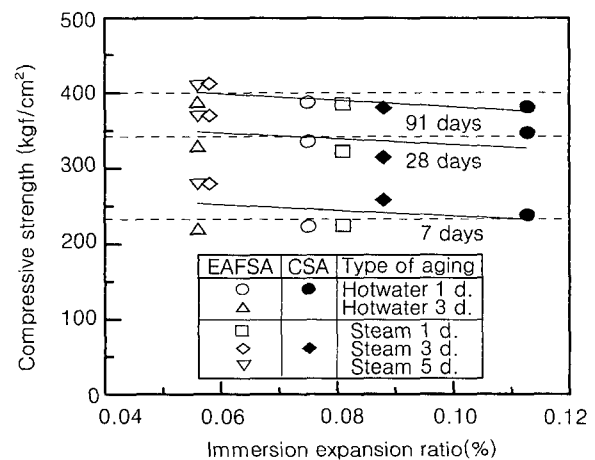


Fig. 12 Relationship between immersion expansion and strength (Hotwater and steam aging)

따라서 본 연구에서 실시한 에이징 처리 전기로슬래그 골재는 콘크리트용 골재로서의 팽창성 억제 및 물리적 성질을 비교적 잘 만족시키는 결과로 평가되었다.

그러나 전기로슬래그를 콘크리트용 골재로 실용화하기 위해서는 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트의 장기재령 강도, 체적변화, 크리프, 동결융해 저항성, 중성화 및 화학약품 저항성 등에 대한 종합적인 검토가 필수적이라 사료되므로 이들 관련 연구를 현재 수행 중에 있다.

## 5. 결 론

에이징 처리한 전기로 및 전로슬래그 골재의 화학, 물리적 성질 및 팽창 억제 효과를 평가하고, 전기로 및 전로슬래그 골재의 팽창률과 이들을 사용한 콘크리트의 기초물성에 대해 비교, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전기로 및 전로슬래그를 에이징 처리하는 방법에 따라 유리석회화  $Ca(OH)_2$ 로 변환되는 효율의 차이 탓으로  $Ca(OH)_2$  양은 5일 증기중 에이징 > 3일 온수중 에이징 > 3일 증기중 에이징 > 1일 온수중 에이징 > 1일 증기중 에이징 > 공기중 에이징 > 에이징 미처리 시료의 순으로 에이징의 효율이 크게 나타났다.

2) 전기로 및 전로슬래그 골재는 비중, 흡수율 및 단위용적질량이 부순 돌 골재보다 컸으며, 실적률은 오히려 작은 값을 나타내었다. 그러나 마모감량은 부순 돌 골재와 비슷한 35% 이하로서 이들 실험 결과를 검토해 볼 때, 한국산업규격에서 정하고 있는 콘크리트용 부순 돌 골재의 품질에 상응하는 결과임을 알 수 있었다.

3) 4종류의 에이징 방법으로 처리한 전로슬래그 골재의 경우 콘크리트용 골재로 요구되는 팽창률 이하로 저감시키는데는 한계가 있었다. 또한 이들 에이징 처리한 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 강도가 재령과 더불어 다소 감소하는 경향을 나타내므로 콘크리트용 골재로서 사용상의 문제점이 있음을 확인하였다.

4) 전기로슬래그 골재를 온수 및 증기중 에이징 처리할 경우, 팽창률이 전로슬래그 골재의 약 2/3 정도에 지나지 않는 효율을 나타내었을 뿐만 아니라 이들 에이징 처리한 전기로슬래그 골재 사용 콘크리트의 강도는 전로슬래그 골재 사용 콘크리트와는 달리 보통콘크리트의 강도에 상응하는 비교적 좋은 결과를 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2000-000-00368-0)의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

1. “철강슬래그 재활용실적(2000),” 한국철강협회, 2001.
2. “콘크리트표준시방서,” 한국콘크리트학회, 1999.
3. “製鋼슬래그를 사용한 아스팔트鋪裝 設計施工指針,” 社團法人 大韓土木學會, 1985.
4. “電氣爐슬래그를 사용한 道路鋪裝設計·施工指針,” 社團法人 大韓土木學會, 1997.
5. Montgomery, D. G. and Wang G., “Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete-Strength Related Properties,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, 1991, pp.1083~1091.
6. Ozkul, M. H., “Properties of Slag Aggregate Concrete,” *Concrete for Environment Enhancement and Protection*, 1996, pp.553~558.
7. 沼田晉一, “電氣爐酸化スラグの骨材への利用,” *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 7, 1996, pp.99~101.
8. 河内陸雄, 竹内崇男, 杉浦孝行, 太田福男, “コンクリート用粗骨材としての電氣爐スラグ碎石の適用性について,” *セ技年報*, Vol. 31, 1977, pp.176~180.
9. 河内陸雄, 椎名堅太郎, 太田福男, “電氣爐スラグコンクリートの自然崩壊性について,” *セ技年報*, Vol.33, 1979, pp.184~188.
10. 川村滿紀, 鳥居和之, 二町宣洋, “轉爐スラグのコンクリート用骨材として適用性,” *セ技年報*, Vol.36, 1982, pp.136~139.
11. 國府勝郎, “資源の有効利用とコンクリート-スラグ骨材を用いたコンクリート,” *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 3, 1996, pp.88~93.
12. 坂井正美, 宮本正友, “轉爐スラグのコンクリート用細骨材への適用性について,” *日本コンクリート工學年次講演會議講演論文集*, 1979, pp.185~188.
13. 内田一郎, 出光 隆, “轉爐スラグの路盤材への利用について,” *土木學會論文報告集*, 日本土木學會, No. 282, pp.101~113, 1979.
14. 西 勝, 河端 薫, “路盤材としての鐵鋼スラグの基礎的性質と力學的性質,” *土木學會論文集*, 日本土木學會, No. 414, 1990, pp.89~98.
15. 한기현, 김형석, 변태봉, “저 팽창성 전로슬래그 노반재 개발에 관한 연구,” *RIST 研究論文*, 포항산업과학연구소, Vol. 13, No. 3, 1999, pp.253~257.
16. 高山俊一, 出光隆, 會田憲義, 衫正法, “蒸氣エージングした轉爐スラグの上層路盤材としての利用に關する研究,” *土木學會論文集*, 日本土木學會, Vol. 32, No. 544, 199, pp.177~186.
17. CAJS I-01, “遊離カルシウムの定量方法,” *セメント協會標準試驗方法*, 1975.
18. “製鋼スラグ路盤設計施工指針,” *鐵鋼スラグ協會*, 製鋼スラグ共同研究委員會, 1985.

19. 佐佐木 稔, 新井田有文, 大槻 孝, 土屋 桂, “エージングによる轉爐スラグの安定化機構,” 鐵と鋼, 日本鐵鋼協會, No. 6, 1982, pp.97~104.
20. 成田貴一, 尾上俊雄, 高田仁輔, “轉爐スラグの風化崩壊機構について,” 鐵と鋼, 日本鐵鋼協會, No. 10, 1978, pp.68~77.
21. 井上豪, “轉爐スラグ中の晶出石灰相の水和反應,” 製鋼スラグの發生量低減と資源化, 日本鐵鋼協會, 1997, pp. 163~172.
22. 富房博幸, 松永久宏, 熊谷正人, 田口整司, “轉爐スラグの水和膨脹に及ぼす組織形態の影響,” 製鋼スラグの發生量低減と資源化, 日本鐵鋼協會, 1997, pp.173~181.
23. 水渡英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和, “轉爐滓中の遊離石灰の影響による風化崩壊,” 鐵と鋼, 日本鐵鋼協會, No. 14, 1977, pp.50~59.
24. 羽場健一, 岩瀬正則, “CaOの水和反應速度,” 製鋼スラグの發生量低減と資源化, 日本鐵鋼協會, 1997, pp.201~205.
25. Lerch, W. C., “Concrete Aggregate - Chemical Reactions,” *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Aggregates*, 1956.
26. Hansen, W. C., “Chemical Reactions,” *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*, ASTM STP 169 -A, 1966.
27. Highway Research Board, “*Properties of Concrete*,” Highway Research Record No. 43, 1963.
28. Mehta, P. K. and Paulo J. M. Monteiro, “Concrete-Structure, Properties and Materials,” 2nd edition, 1993.
29. CEB-FIP, “*Model Code for Concrete Structures*,” 1990.

## 요 약

우리나라에서 2000년도에 발생된 전기로 및 전로슬래그를 합하면 약 600만 톤 정도로서 주로 도로포장재료 및 매립재 등과 같은 한정된 용도로만 활용되어 왔다. 그 이유는 제강과정 중 유리석회화 슬래그화 되지 않고 불안정한 상태로 슬래그 내부에 잔존하기 때문에 콘크리트 구조물 내에서 팽창을 일으킬 가능성이 클 뿐만 아니라, 팽창이 심할 경우 구조물의 균열 내지는 붕괴까지도 야기 시킬 수 있으므로 콘크리트용 골재로 사용해서는 안 된다고 규정하고 있다. 따라서 제강슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 제강슬래그 자체의 팽창성 억제 내지는 안정화 처리가 우선 해결되어야 할 과제로 생각된다.

본 연구에서는 제강슬래그 골재의 팽창성을 저감시키기 위한 목적으로 6종류의 에이징 방법을 선정하여 안정화의 효율에 대하여 비교 검토하였다. 전로슬래그 골재의 경우, 본 연구에서 실시한 에이징 처리 방법으로는 콘크리트용 골재로서 요구되는 팽창률을 저감시키는데 한계가 있었을 뿐만 아니라, 에이징 처리한 전로슬래그 골재 사용 콘크리트의 강도도 재령과 더불어 감소하는 문제점이 있음을 확인하였다. 그러나 전기로슬래그 골재를 온수중 및 증기중 에이징 처리할 경우, 팽창률이 전로슬래그 골재의 약 2/3 정도에 지나지 않는 효율을 나타내었으며, 이를 사용한 콘크리트의 강도도 전로슬래그 골재 사용 콘크리트와는 달리 보통콘크리트의 강도에 상응하는 비교적 좋은 결과를 나타내므로 콘크리트용 골재로서 사용 가능성을 시사하였다.

**핵심용어 :** 전기로슬래그, 전로슬래그, free CaO, 에이징, 팽창성