



## 초고강도 콘크리트에서 전기로 산화 슬래그 잔골재 사용에 의한 강도 증진 기구

이승헌<sup>1)\*</sup> · 임두섭<sup>1)</sup> · 이승훈<sup>2)</sup> · 이주하<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>군산대학교 신소재공학과 <sup>2)</sup>삼성물산(주) 건설부문 <sup>3)</sup>수원대학교 토목공학과

## Mechanism of Strength Development in Ultra High Strength Concrete Using the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag as Fine Aggregate

Seung-Heun Lee,<sup>1)\*</sup> Doo-Sub Lim,<sup>1)</sup> Seung-Hoon Lee,<sup>2)</sup> and Joo-Ha Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Materials Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

<sup>2)</sup>Samsung C&T Corporation Engineering & Construction Group, Seoul 137-956, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon, Hwaseong 445-741, Korea

**ABSTRACT** In ultra high strength concrete, when electric arc furnace oxidizing slag is substituted for sea sand as fine aggregate, compressive strength was improved about 15 MPa. To figure out the cause of the improvement in compressive strength, this study considered the dissolution characteristics of Ca component in fine aggregate and examined the microstructure, porosity, microhardness, and Ca/Si mole ratio on the interface of fine aggregate and paste. And to examine the mechanism of strength improvement resulted from the shape of fine aggregate, this study measured the surface roughness of fine aggregate with AFM. According to the result of this experiment, the mechanisms of strength improvement in ultra high strength concrete resulted from the use of electric arc furnace oxidizing slag as fine aggregate can be divided into chemical and physical mechanisms. In the chemical mechanism, the soluble Ca component contained in electric arc furnace oxidizing slag is dissolved and forms a hydrate between fine aggregate and paste to improve the interlocking strength of fine aggregate-paste. Also, it makes the microstructure around the fine aggregate. And in the physical mechanism, electric arc furnace oxidizing slag has a twice greater surface roughness than sea sand, so the interlocking strength between fine aggregate and paste increases, which contributes to the development of compressive strength.

**Keywords** : ultra high strength concrete, mechanism of strength development, fine aggregate, electric arc furnace oxidizing slag, sea sand

### 1. 서 론

콘크리트의 고강도화는 구조물의 고층화, 대형화, 장대화의 실현과 구조물의 단면 감소에 의한 공간의 효율적 이용이라는 관점에서 주목 받고 있다. 초고강도 콘크리트는 실리카 폼과 같은 초미분말의 혼화재와 고성능AE감수제를 이용하여 압축강도 100 MPa 이상, 물-결합재 비 25% 이하인 콘크리트로 일컬어지고 있으며, 최근에는 물-결합재비 20% 이하에서도 주입성형이 가능하고 압축강도가 150 MPa 정도인 초고강도 콘크리트가 실용화되고 있다.<sup>1,2)</sup>

이러한 기술의 기본 개념은 Bache가 제안한 DSP(densified

system containing homogeneously arranged ultra-fine particles) 기술이다.<sup>3)</sup> DSP 기술은 고성능AE감수제의 작용에 의해 물-시멘트 비를 저하시킴과 동시에 시멘트 입자의 분산성을 향상시키고, 더욱이 시멘트 입자 사이의 공극에 초미립자인 실리카 폼을 치밀하게 집어넣어, 분체의 충전성을 현저하게 향상시킨 것이다. 또한 잘 분산된 실리카 폼은 물과 같은 역할을 하여 유동성을 향상시켜 준다.<sup>4)</sup>

분체의 충전성을 향상시켜 물-시멘트의 비를 저하시키면, 모세관 공극이 감소되어 초고강도가 발현된다. 일반적으로 물-시멘트 비가 40%에서는 외부로부터 물의 공급이 없어도 시멘트를 완전히 수화시키는 것이 가능하다. 그러나 물-시멘트 비가 30% 이하, 특히 20% 정도까지 저하되면, 경화체 중에 미수화 시멘트가 다량으로 남아 있게 있다. 실제로 물-시멘트 비가 20%의 경우, 경화체 체적의 반 정도가 미수화 시멘트로 보고되고 있다.<sup>5)</sup> 그리고

\*Corresponding author E-mail : shlee@kunsan.ac.kr

Received January 30, 2012, Revised September 4, 2012,

Accepted September 13, 2012

©2013 by Korea Concrete Institute

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 결합재

이 실험에 사용한 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 실리카 폼, 고로 슬래그 미분말, 무수석고(태국산)로서 그들의 물리적 성질과 화학적 성질을 Table 1과 2에 나타냈다. 결합재의 충전율을 향상시키기 위해 OPC의 평균입경을 기준으로 평균입경이 1/2 정도인 고로 슬래그 미분말과 1/100인 정도인 실리카 폼을 선택하였다. 무수석고는 고로 슬래그의  $Al_2O_3$  성분에서 작용하여 수화반응을 촉진시키고 에트링자이트(ettringite)를 생성시켜 고강도화를 도모하므로 사용하였다. 결합재의 혼합비는 결합재의 충전율을 고려하여 결정하였으며, 무게비로 OPC 55%, 실리카 폼 20%, 고로 슬래그 미분말 20%, 무수석고 5%로 하였으며, 이때 충전율은 75.9%이었다. 또한 고품분이 25%인 폴리카르본산계 고성능AE감수제는 높은 슬럼프 플로우값과 공기량을 조정하기 위해 사용하였다.

### 2.2 골재

전기로 산화 슬래그 잔골재는 관련 품질 규격인 KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화 슬래그 골재를 만족하는 것을 사용하였으며, 크기는 5 mm이하, 밀도는  $3.58 \text{ g/cm}^3$ , 조립률은 3.06, 흡수율은 0.89%인 것을 사용하였다. 세척사는 밀도  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 조립률 2.9-3.2, 흡수율 1.18%의 것을 사용하였다. 사용한 잔골재의 물리적 성질 및 화학적

시멘트 수화에 의해 생성된 수산화칼슘은 실리카 폼과 포졸란 반응에 의해 C-S-H 수화물을 형성한다. 즉 경화체에서 시멘트는 내부 필러(filler)로 잔존하고 실리카 폼과 수산화칼슘의 반응에 의해 생성된 C-S-H가 필러들을 강하게 결합시켜 준다.

일반적으로 콘크리트는 시공성에 적합한 작업성을 확보하기 위해서 시멘트의 수화반응에 필요한 물량보다 더 많은 혼합수량이 사용된다. 이 여분의 물은 수화에 관여하지 않기 때문에 경화 후에 공극으로 남게 되어, 시멘트 경화체의 강도를 저하시키고, 골재와 시멘트 페이스트와의 계면에 천이대를 형성시켜 고강도화를 방해한다.<sup>6,7)</sup>

천이대가 생성되는 주된 원인은 골재 계면, 특히 밀면에 물이 머무르기 좋기 때문에 그 결과 수산화칼슘이 석출되기 쉽고, 일단 석출된 수산화칼슘은 골재와의 반응성이 없기 때문에 새로운 수화물을 형성하지 못하고 그대로 존재한다. 그리고 수산화칼슘은 C-S-H와 비교하여 큰 결정으로 비표면적이 작고 강도는 낮기 때문에 천이대는 벌크(bulk) 페이스트 부분과 비교하여 조직이 치밀하지 못하다. 일반적으로 천이대의 두께는 10-50  $\mu\text{m}$ 의 범위로 전체 페이스트 체적의 1/3을 점하고 있다고 보고되고 있다.<sup>8,9)</sup> 따라서 골재와 시멘트 페이스트의 계면에 생성되는 천이대의 개질은 고강도 발현에 매우 중요하다. 천이대는 페이스트보다 수산화칼슘의 생성량이 많고 공극도 많이 존재하여 페이스트와 골재의 부착력을 저하시킨다. 그러나 실리카 폼과 같은 포졸란 반응성을 갖는 혼화재를 첨가하면 골재 주변의 수산화칼슘이 혼화재와 반응하여 C-S-H 수화물이 생성되므로 천이대의 공극량은 감소되고, 골재와 매트릭스의 부착력은 향상된다.<sup>10)</sup> 또한 물-시멘트 비를 저감시키면 블리딩이나 자유수에 의한 수막이 골재 표면에 형성되기 어려우므로 천이대의 생성을 방해할 수 있다.

천이대를 개선하여 콘크리트의 강도를 증진시킬 수 있는 방안의 하나는 골재와 페이스트 사이의 부착력을 개선시키는 것이다. 예로서 Ca 성분을 함유한 골재를 사용하면 골재의 Ca 성분과 실리카 폼의 Si 성분이 반응하여 C-S-H 수화물이 골재 계면에 생성되어 골재와 페이스트의 부착력은 증진되어 천이대는 개선된다. 따라서 초고강도 콘크리트에서 압축강도를 일정 부분 증진시킬 수 있다. 저자들은 200 MPa급 압축강도를 갖는 초고강도 콘크리트를 개발하기 위해 잔골재로 Ca 성분을 함유하고 있지 않은 세척사와 Ca 성분을 함유하고 있는 전기로 슬래그를 사용하였다. 그 결과 전기로 산화 슬래그가 세척사보다 압축강도가 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 이 연구는 초고강도 콘크리트 잔골재로 전기로 산화 슬래그를 사용할 경우 세척사보다 압축강도가 큰 이유를 골재와 페이스트 계면에서의 미세조직 특성을 고찰하여 그 원인을 규명하고자 한다.

Table 1 Physical properties of raw materials

	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Average particle size ( $\mu\text{m}$ )
OPC	3.2	3000	13.2
Blast furnace slag	2.9	6000	6.3
Silica fume	2.2	182000 (BET)	0.2
Anhydrite	2.6	3500	15.3

Table 2 Chemical compositions of raw materials

	Chemical composition (weight, %)						
	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>	Others
OPC	20.9	7.4	2.4	62.8	1.1	2.4	3.0
Blast furnace slag	33.1	17.8	0.4	40.3	4.1	2.8	1.5
Silica fume	92.6	1.3	2.7	0.6	1.8	0.1	0.9
Anhydrite	2.0	0.5	0.3	38.7	3.1	46.9	8.5

성분은 Table 3, 4와 같다. 굵은 골재는 철곡 화강암을 사용하였으며, 밀도는 2.7 g/cm<sup>3</sup>이며, 조립률은 6.35, 흡수율은 1.35%였다. 굵은 골재의 최대치수는 10 mm였다.

골재의 표면 형상이 부착성과 밀접한 관계가 있으므로 잔골재의 표면 조직을 AFM(atomic force microscope, NDMT)으로 측정하였다. 시료처리에는 잔골재 표면에 붙어 있는 입자를 제거하고 AFM 샘플 마운트에 장착하였다. 장착방법으로는 마운트에 양면 테이프로 시료가 움직이지 않도록 고정하였다. 분석 방법으로는 contact mode와 tapping mode(semi-contact)중 tapping mode를 이용하여 분석하였으며, scan speed는 4분으로 진행하였다.

### 2.3 콘크리트 배합 및 혼합

초고강도 콘크리트는 재령 91일 압축강도 200 MPa을 목표로 하였다. 물-결합재의 비는 12.5%로 하였고, 슬럼프 플로우값은 800±50 mm, 공기량은 1.75±0.25%, 물량은 150 kg/m<sup>3</sup>, S/a는 35.0%로 하였다. 실험에 사용한 초고강도 콘크리트의 배합은 Table 5와 같다.

초고강도 콘크리트의 혼합은 팬믹서(용량 100 L)를 사용하였으며, 실리카 폼의 고른 분산을 위하여 보통 강도

의 콘크리트보다 혼합 시간을 2배로 늘렸다. 1차로 굵은 골재와 결합재를 투입하여 1분간 건비빔을 한 후, 물과 고성능AE감수제를 투입하여 1분 30초간 혼합하였다. 그 후, 굵은 골재를 투입하여 1분 30초간 혼합한 후, 고성능 AE감수제의 활성화를 위해 1분간 휴지시킨 다음 1분간 재 믹싱을 함으로써 혼합을 완료하였다. 총 배합시간은 5분으로 하였다. 공시체는 압축강도 측정용과 미세조직을 관찰하기 위한 공시체로 나누어 제작하였다. 압축강도 공시체는  $\Phi 100 \times 200$  mm의 원형몰드를 사용하였다. 초고강도 콘크리트는 혼합수량이 매우 적고 조직이 치밀하므로 공시체는 기건(20±5℃)으로 91일간 양생하였다. 압축강도는 콘크리트 공시체 연마기를 사용하여 공시체를 연마한 후, 300 tf 용량의 UTM을 이용하여 측정하였으며, 3개 공시체의 평균값을 시험 결과로 채택하였다.

### 2.4 공극률, 미소경도 및 원소분석 측정용 시편 제조

재령 91일 초고강도 콘크리트 공시체를 중앙부분에서 잔골재와 매트릭스 경계면이 뚜렷한 부분을 10×10×10 mm로 절단하였다. 절단한 시편은 수화 정지를 위해 아세톤에 24시간 침적한 후 아스펠레이터에서 약 30분가량 여과하여 아세톤과 수분을 제거하였다. 수화 정지한 시편은 건조기에서 40℃에서 24시간 건조를 한 다음 진공 데시케이터에서 보관하였다. 건조된 시편은 낮은 점도의 에폭시 수지와 경화제를 5:1의 비율로 섞어 마운팅하고 40℃ 건조기에서 24시간 경화시켰다. 경화시킨 시편은 커팅기를 이용하여 단면을 약 1 mm정도로 절단한 후, SiC 연마지(#1000~#2000)를 이용하여 절단 시 생긴 스크래치를 없애고, 다이아몬드 미세입자의 크기순(6  $\mu$ m, 3  $\mu$ m, 1  $\mu$ m, 0.25  $\mu$ m)으로 순차적으로 폴리싱을 하였다. 폴리싱기의 속도는 150 rpm, 압력은 10 Pa로 하였다. 이렇게 연마한 시편을 공극률, 원소분석(EPMA-WDX) 및 미소경도 측정용 시험편으로 하였다.

### 2.5 공극률 측정

먼저 실체현미경을 이용하여 잔골재의 밑면의 평평한 부분을 선택한 후, EPMA(electron probe micro analysis, SHIMADZU-1610)를 사용하여 실체현미경에서 선택한

Table 3 Physical properties of fine aggregates

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	FM	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Electric arc furnace oxidizing slag	3.58	3.06	0.89	1978
Sand	2.65	2.9-3.2	1.18	1750

Table 4 Chemical compositions of fine aggregates

	Chemical composition (wt%)					
	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>
Electric arc furnace oxidizing slag	17.7	7.2	-	20.5	6.0	0.2
Sand	89.0	4.5	1.2	-	-	-

Table 5 Mix proportions of concrete

	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )							
		Water	OPC	Silica fume	Blast furnace slag	Anhydrite	Fine aggregate	Aggregate	Admixture
1	35.0	150	660	240	240	60	389	736	20.4
2	35.0	150	660	240	240	60	525	736	20.4

1 : Sea sand

2 : Electric arc furnace oxidizing slag

부분을 저배율( $\times 100$ )에서 고배율( $\times 2000$ )로 확대하면서 반사전자(backscattered electron) 이미지를 얻었다. EPMA의 가속전압은 15 kV, 전류는 20 mA, 빔 사이즈는 1  $\mu\text{m}$ 로 하였다. EPMA-BSE를 선택한 이유는 관찰하고자 하는 부분을 쉽게 찾을 수 있고, 시그널 밀도가 커서 선명한 상을 얻을 수 있기 때문이다.

EPMA-BSE로 얻은 500배, 1000배, 2000배의 이미지 중 1000배 이미지로 화상분석을 하였다. 1000배 이미지를 선택한 이유는 1000배 이미지가 잔골재 계면 영역을 분석하기에 적합하다고 판단되었기 때문이다. 화상분석에 사용된 프로그램은 image pro 6.0을 사용하였으며 공극률은 gray scale(255 scale)의 변곡점을 문지방값으로 결정하여 구했다. 잔골재와 페이스트 경계면 부근의 공극률은 잔골재 계면으로부터 10  $\mu\text{m}$ 까지의 공극률을 구했으며, 12개 위치에서 측정하여 평균값을 취했다.

### 2.6 미소경도의 측정

비커스 미소경도계(M사 HM-100)를 이용하여 잔골재와 페이스트 경계면의 미소경도를 측정하였다. 측정 조건은 시험하중을 0.01 N, 측정유지 시간을 10초로 하였다. 미소경도는 잔골재 계면으로부터 페이스트 쪽으로 5  $\mu\text{m}$  부근(기공률 측정 범위 10  $\mu\text{m}$ 의 중간)에서 구했으며, 12개 위치에서 측정하여 평균값을 취했다. 잔골재 계면으로부터 5  $\mu\text{m}$  부근의 곳을 측정하는 이유는 잔골재 부근에 너무 가까운 곳은 잔골재의 미소경도가 영향을 미치고 10  $\mu\text{m}$  이상이면 페이스트 부분의 미소경도가 영향을 주기 때문이다.

### 2.7 pH 및 Ca 용출량 측정

전기로 산화 슬래그 잔골재와 세척사에서 Ca성분의 용출 여부를 확인하기 위해 pH와 Ca 성분의 용출량을 측정하였다. pH 측정은 잔골재 20 g과 증류수 10 ml를 혼합하여 20°C에서 100 rpm으로 교반하면서 0분, 30분, 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간, 6시간 순으로 측정을 하였다. Ca 성분의 용출량은 30분 경과된 용액에 대해 ICP(P사)를 이용하여 측정하였다.

### 2.8 잔골재와 페이스트 경계면의 미세조직 및 원소분석

잔골재와 페이스트간의 부착력 즉 결합정도를 알아보기 위해 강제로 파쇄한 재령 91일 콘크리트 경화체 시편(약 10 mm)에 대해서 FE-SEM(HITACHI S-4800)을 사용하여 경계면에서의 미세조직을 분석하였다.

그리고 공극률 측정용 시편을 가지고 EPMA(electron probe micro analysis)의 WDX(wavelength dispersive X-ray spectrometer)를 통해 잔골재와 페이스트 계면에서의 Ca/Si 몰비를 측정하여 C-S-H 수화물의 생성 정도를 파악하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

재령 91일 초고강도 콘크리트 압축강도의 결과 값을 Table 6에 나타냈다. 압축강도는 전기로 산화 슬래그를 잔골재로 사용한 경우가 208 MPa, 세척사를 잔골재로 사용한 경우가 193 MPa로 전기로 산화 슬래그가 세척사보다 약 15 MPa 정도 높은 값을 나타냈다.

### 3.2 잔골재로부터 Ca 성분의 용출 특성

전기로 산화슬래그 및 세척사의 시간에 따른 Ca 성분을 비롯한 알칼리 성분의 용출 정도를 조사하기 위해 pH를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 1에 나타냈다. Ca 성분을 비롯한 알칼리 성분이 용출되면 pH 값은 증가하게 되는데, 전기로 산화 슬래그 경우 약 30분까지 pH가 증가하여 약 알칼리성인 pH=9.2를 나타냈으며, 그 이후에는 일정한 값을 유지하였다. 세척사는 약 30분까지는 pH가 약간 증가하여 중성인 pH=7.3을 나타내었고, 그 이후에는 변화가 없었다.

pH가 일정하게 된 용출시간 30분에서 잔골재로부터 용출된 Ca성분을 알아보기 위해 ICP로 용액 중의 Ca 농도를 측정하였다. 전기로 산화 슬래그의 Ca 농도는 1.25 mmol이고, 세척사에서는 검출되지 않았다. Table 2의 잔골재의 화학조성에서 보듯이 CaO 성분은 전기로 산화 슬래그가 20.5%, 세척사는 함유되지 않아, 전기로 산화 슬래그는 가용성 칼슘염이 미량 용출되어 pH가 증가된 것으로

Table 6 Compressive strength at 91 days

Type	Compressive strength (MPa)
Electric arc furnace oxidizing slag	208
Sea sand	193

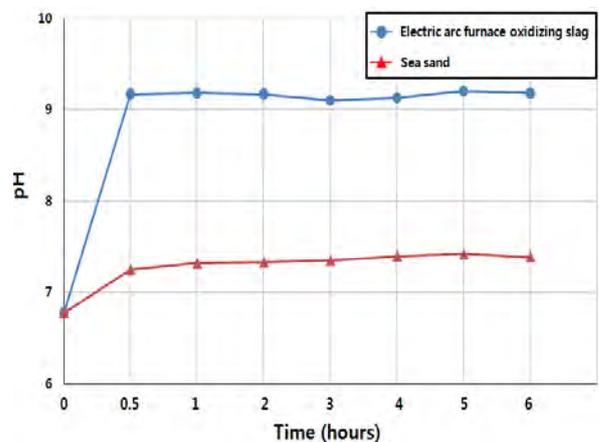


Fig. 1 Effect of time on the pH of fine aggregates

로 생각된다. 그러나 세척사는 CaO 성분이 없으므로 CaO 성분의 용출에 의한 pH 증가가 아니라 기타 알칼리 염에 의한 미량 용출로 pH가 약간 증가한 것으로 보여진다. CaO 성분에 의해 pH가 증가하게 되면 수화반응이 촉진되고 골재와 페이스트 계면에 C-S-H 수화물이 생성되어 골재-페이스트간의 부착력이 향상된다.<sup>11)</sup>

### 3.3 잔골재와 페이스트 계면에서의 미세조직 평가

잔골재로부터 Ca 성분 용출에 의한 잔골재와 페이스트간의 결합 정도를 알아보기 위해 SEM 이미지를 고찰하였다. Fig. 2는 재령 91일의 초고강도 콘크리트 경화체를 FE-SEM으로 관찰한 미세조직 사진이다. 전기로 산화 슬래그(Fig. 2(a))는 잔골재와 페이스트가 치밀하게 부착되어 있는 것이 보여 지나, 세척사(Fig. 2(b))는 골재와 페이스트가 분리되어 틈이 형성된 것을 볼 수 있다. 이 틈은 원래 시험편에서 형성된 것은 아니고 파편 형태인 SEM 시편 제조시 형성된 것으로 골재와 페이스트와의 부착력이 약해서 생긴 것이다. 즉 잔골재를 전기로 산화 슬래그로 사용했을 경우가 세척사로 사용 했을 때보다 골재와 페이스트 간의 부착성이 향상되어 잔골재와 계면 간의 분리가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

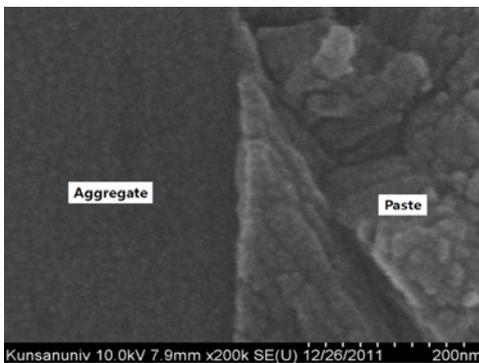
### 3.4 잔골재와 페이스트 계면에서의 공극률과 미소경도

초고강도 콘크리트에서 잔골재를 전기로 산화 슬래그

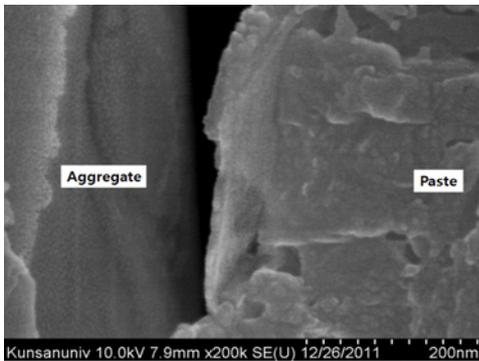
와 세척사로 사용한 경우, 잔골재 계면 부근에서의 공극률과 미소경도를 Fig. 3에 나타냈다. 공극률은 전기로 산화 슬래그를 사용한 잔골재의 계면 부근에서는 평균 0.2%, 세척사를 사용한 잔골재의 계면 부근은 평균 0.3%로 미소하지만 약 0.1% 정도의 차이를 나타냈다. 그리고 미소경도는 전기로 산화 슬래그를 사용한 경우 평균  $38.2 \times 10^{-7}$  MPa이며, 세척사를 사용한 경우 평균  $28.7 \times 10^{-7}$  MPa를 나타내어, 약  $10 \times 10^{-7}$  MPa 정도 전기로 산화 슬래그가 큰 값을 보였다. 따라서 전기로 산화 슬래그 계면 영역이 세척사 계면 영역보다 미세조직이 더 치밀한 것으로 나타났다.

### 3.5 잔골재 주위 미세조직의 Ca/Si 몰 비

Fig. 4는 초고강도 콘크리트에서 잔골재를 전기로 산화 슬래그와 세척사로 사용했을 때, 잔골재 계면으로부터 약  $2 \mu\text{m}$ 까지의 EPMA-WDX에 의한 Ca/Si 몰비의 변화를 나타낸 그림이다. 전기로 산화 슬래그를 보면(Fig. 4(a)), 잔골재 계면에서의 Ca/Si 몰비는 0.3으로 Ca/Si 몰비가 낮은 C-S-H 수화물이 잔골재와 페이스트 간에 생성된 것으로 볼 수 있다. 반면에 세척사(Fig. 5(b))는 잔골재 계면에서 Ca/Si 몰비는 거의 0에 가까워 세척사와 페이스트 간에 C-S-H 수화물에 의한 결합이 형성되지 않았다. 따라서 Ca 성분을 가지고 있으며, 팽창성에 영향을 미치지 않는 범위에서 Ca 성분을 용출할 수 있는 전기로 산화 슬래그 골재는 결합력에 의한 강도 증진을 기대할 수 있다.

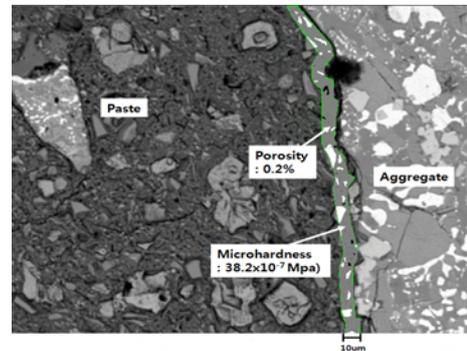


(a) Electric arc furnace oxidizing slag

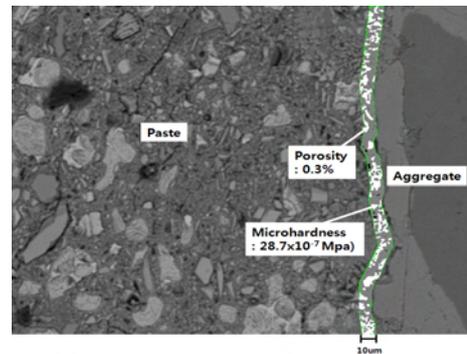


(b) Sea sand

Fig. 2 SEM images around fine aggregates at 91 days

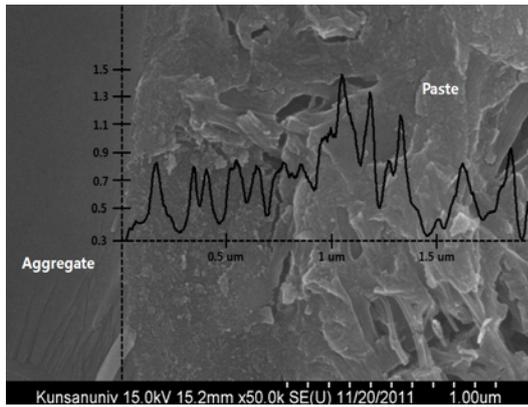


(a) Electric arc furnace oxidizing slag

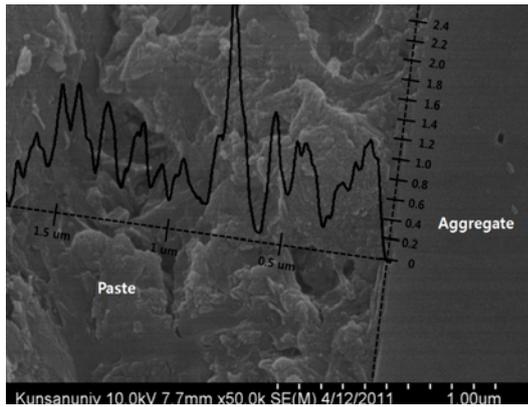


(b) Sea sand

Fig. 3 BSE images around fine aggregates at 91 days



(a) Electric arc furnace oxidizing slag



(b) Sea sand

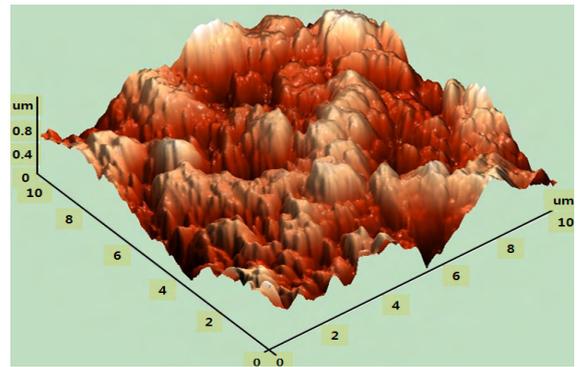
Fig. 4 Ca/Si mole ratio around fine aggregates at 91 days

한편 잔골재 계면에서 멀어질수록 Ca/Si 몰비가 증가하여 세골재 종류에 관계없이 0.6 정도의 평균값을 나타냈다. 이것은 기 보고<sup>5)</sup>된 초고강도 페이스트 경화체에서 반응 생성물인 C-S-H의 Ca/Si 몰비와 유사한 값을 나타냈다.

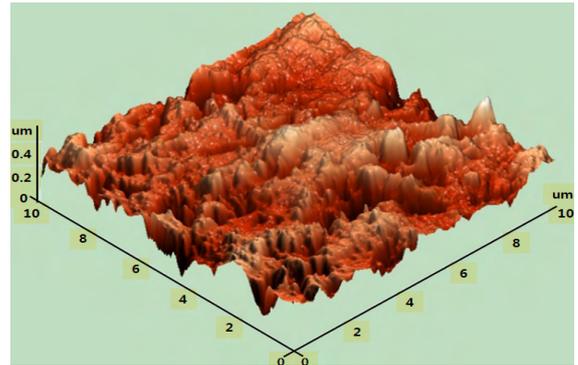
### 3.6 잔골재의 표면 조직 특성

골재와 페이스트 간의 부착 정도는 앞에서 언급한 화학적 결합에 의한 효과도 있지만, 물리적인 효과도 기대할 수 있다. 물리적인 효과로서는 골재의 형태(둥근 형태 혹은 각진 형태)와 골재의 표면 조직(매끈한 표면 혹은 거친 표면)을 들 수 있다. 골재의 형태가 불규칙하고 표면의 조직이 거칠면 골재와 페이스트 간의 interlocking strength가 증가되어 부착력을 향상시킬 수 있다.<sup>12)</sup>

전기로 산화 슬래그와 세척사는 정도의 차이는 있지만 양쪽 모두 각진 형태를 나타내고 있다. 표면 조직은 두 잔골재에서 차이가 있을 것으로 예상되어 AFM으로 표면 조직을 관찰하였다. Fig. 5를 보면, 전기로 산화 슬래그의 표면 굴곡도는 0-0.8  $\mu\text{m}$ 이고, 세척사는 0-0.4  $\mu\text{m}$  정도의 굴곡도를 나타내고 있다. 즉 전기로 산화 슬래그 세골재가 세척사에 비해 표면의 굴곡도가 약 2배 이상 큰 것을 볼 수 있다. 그러므로 물리적인 효과에 의한 부착력이 전기로 산화 슬래그 잔골재가 세척사보다 더 큰 것으로 판단된다.



(a) Electric arc furnace oxidizing slag



(b) Sea sand

Fig. 5 Surface roughness of fine aggregates

## 4. 결 론

초고강도 콘크리트에서 잔골재를 전기로 산화 슬래그로 사용했을 경우 세척사 보다 강도가 증진 되는 원인에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 잔골재로부터 Ca 성분의 용출 특성 및 잔골재와 페이스트 계면에서의 미세조직을 평가한 결과, 전기로 산화슬래그 잔골재는 세척사와 달리 Ca 성분이 용출되어 실리카 폼의 Si 성분과 포졸란 반응하여 Ca/Si 몰비가 0.3 정도인 C-S-H 수화물을 생성시켜 잔골재와 페이스트의 결합력을 증진 시키는 것으로 나타났다.
- 2) 잔골재 계면 부근에서의 미세조직 치밀도를 공극률과 미소경도로 평가한 결과, 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 경우 세척사와 비교하여 공극률은 0.1% 정도 작았으며 미소경도는 약  $10 \times 10^{-7}$  MPa 정도 큰 값을 보였다. 따라서 전기로 산화 슬래그 잔골재 계면 영역이 세척사 계면 영역보다 미세조직이 더 치밀한 것으로 나타났다.
- 3) 잔골재 표면 형상에 의한 부착력 향상 기구를 잔골재 표면 거칠기로 평가한 결과, 전기로 산화 슬래그의 표면 굴곡도는 세척사에 비해 약 2배 이상 큰 것으로 나타나 잔골재와 페이스트 간의 interlocking strength를 증가시켜 압축강도 발현에 기여하는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 (과제번호# 09 첨단도시A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., Cho, Y. G., and Lee, J. H., "Blast-Resistant Characteristics of Ultra-High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 28, Issue 1, 2012, pp. 694-707. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.014>)
2. Michael, S. and Ekkehard, F., "Ultra High Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe," *Proceedings of the 7th International Symposium on the Utilization of UHS/HPC*, Washington DC, 2005, pp. 51-77.
3. Bache, H. H., "Densified Cement/Ultra Fine Particles Based Materials," *The 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, 1981, pp. 1-35.
4. Matte, V. and Moranville, M., "Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, Issue 1, 1999, pp. 1-9. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00025-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00025-0))
5. Mino, I. and Sakai, E., "Engineering Concrete," *Proceedings of the MRS International Meeting on Advanced Materials*, Tokyo, Japan, Vol. 13, 1989, pp. 247-254.
6. Monteiro, P. J. M., Maso, J. C., and Ollivier, J. P., "The Aggregate-Mortar Interface," *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, Issue 6, 1985, pp. 953-958. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90084-5](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(85)90084-5))
7. Zimbelman, R. A. "Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond," *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, Issue 5, 1985, pp. 801-808. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90146-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(85)90146-2))
8. Scrivener, K. L. and Nematy, K. M., "The Percolation of Pore Space in the Cement Paste/Aggregate Interfacial Zone of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, Issue 1, 1996, pp. 35-40. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00185-9](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00185-9))
9. Diamond, S., "Consideration in Image Analysis as Applied to Investigations of the ITZ in Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, Issue 2-3, 2001, pp. 171-178. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00085-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00085-8))
10. Prokopski, G. and Halbiniaak, J., "Interfacial Transition Zone in Cementitious Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 4, 2000, pp. 579-583. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00210-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00210-6))
11. Tullin, A., Mustafa, T., and Tahir, C., "Effect of Coarse Aggregate Size and Matrix Quality on ITZ and Failure Behavior of Concrete under Uniaxial Compression," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 6, 2004, pp. 633-638. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00092-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00092-1))
12. Zimbelman, R., "A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond," *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, Issue 5, 1985, pp. 801-808. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90146-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(85)90146-2))

**요 약** 초고강도 콘크리트에서 잔골재로 세척사 대신에 전기로 산화 슬래그를 사용했을 경우, 재령 91일 압축강도가 약 15 MPa 정도 향상되었다. 압축강도가 향상된 원인을 규명하기 위해 잔골재의 Ca 성분 용출 특성을 고찰하였고, 잔골재와 페이스트 계면에서의 미세조직, 기공율, 미소경도 및 Ca/Si 몰비를 검토하였다. 그리고 잔골재 형상에 의한 강도 증진 효과를 알아보기 위해 잔골재의 표면 거칠기를 AFM으로 측정하였다. 실험 결과, 초고강도 콘크리트에서 전기로 산화 슬래그 잔골재 사용에 의한 강도 증진 기구는 화학적 기구와 물리적 기구로 구분할 수 있다. 화학적 기구로는, 전기로 산화 슬래그에서 함유되어 있는 가용성 Ca 성분이 용출되어 잔골재와 페이스트 사이에 반응생성물을 형성시켜 조직을 치밀화 시킴으로 잔골재-페이스트간의 부착력을 증진 시키는 것으로 나타났다. 그리고 물리적 기구로는, 전기로 산화 슬래그 잔골재는 세척사에 비해 표면의 굴곡도가 2배 정도 커서, 잔골재와 페이스트 간의 interlocking strength를 증가시킴으로서 압축강도 발현에 기여하는 것으로 판단했다.

**핵심용어** : 초고강도 콘크리트, 강도발현기구, 잔골재, 전기로 산화 슬래그, 세척사