

아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 특성

Properties of Rapidly-Cooled Steel Slag by Atomizing Process



김진만*
Jin-Man Kim



조성현**
Sung-Hyun Cho



오상윤***
Sang-Yoon Oh



곽은구****
Eun-Gu Kwak

1. 서 언

강(steel)의 생산시 발생하는 부산물 중 가장 많은 비율을 점유하고 있는 것이 슬래그이다. 슬래그는 고로슬래그와 제강 슬래그로 분류되며, 제강슬래그는 다시 전로슬래그와 전기로슬래그로 분류된다. 이 중에서 고로슬래그는 콘크리트용 골재 또는 혼화재료, 시멘트 첨가제 등으로, 전기로슬래그는 높은 철산화물 함유량을 이용하여 시멘트의 철질 원료로 활용되는 등 재 활용이 활발하지만, 전로슬래그는 체적 안정성이 낮기 때문에 건설재료로 활용되지 못하고 있는 실정이다.

전로슬래그의 낮은 체적 안정성은 결정화된 유리석회, 유리 마그네슘 및 결정성 산화철에 기인한다. 일반적으로 전로슬래그는 강을 추출한 후 야적지에 붓게 되며, 파쇄하기 전까지 외부에서 서서히 냉각되게 되는데, 이 서냉 과정에서 석회, 마그네슘이 유리되고, 준 안정성의 철 산화물이 생성된다. 유리된 석회와 마그네슘은 수분을 접할 경우 좀 더 큰 용적을 갖는 수산화물이 되며, 철은 지속적인 산화 과정을 통하여 용적이 성장하게 되기 때문에 전로슬래그는 건설 재료로써 적합하지 않게 되는 것이다. 전로슬래그는 이러한 팽창 메커니즘에도 불구하고 외부에 오랫동안 방치하는 에이징을 통하여 재활용되기도 하지만, 소요되는 에이징 기간이 매우 길뿐만 아니라 에이징을 거친 이후에도 품질의 신뢰성이 낮기 때문에 건설 재료로서 활발히 사용되지 못하고 있다.

그러나 최근 전로슬래그를 급냉시킴으로써 유리석회와 유리 마그네슘의 유리화 가능성을 매우 낮추고, 산화철을 유리질 상태로 고정하는 기술이 개발되었다¹⁾. 이 방법은 고온의 액상 슬

래그를 고압의 압축 공기로 분무함으로써 슬래그를 매우 작은 크기의 입자로 공기 중에 노출시킴으로써 급냉하는 방식이며, 냉각효율을 높이기 위해서 살수하기도 한다. 이 방법에 의해 만들어진 급냉 제강슬래그는 견경한 유리질 표면을 가진 잔골재 크기의 구형 입자로서, 기존의 서냉 제강슬래그에서 문제점으로 지적된 낮은 체적 안정성을 크게 개선하였을 뿐만 아니라 실적률과 화학적 안정성이 우수하다. 그러나 높은 비중 때문에 콘크리트에 적용할 경우 다른 재료로부터 쉽게 분리됨으로써 사용상의 제약점이 될 수 있다.

여기서는 급냉 제강슬래그의 물리·화학적 특성 및 체적안정성에 대한 연구 결과를 소개함으로써 향후 건설재료로 보다 적극적으로 재 활용될 수 있는 기회를 제공하고자 하였다.

2. 물리적 특성

2.1 입형과 내부구조

〈그림 1〉은 급냉 제강슬래그의 입형을 나타낸 것이다. 급냉 제강슬래그는 콘크리트용 잔골재의 크기이며, 점검색 색상을 띠고, 입형은 거의 완전한 구형에 가깝다. 급냉 제강슬래그는 용융 상태에서 급냉하였기 때문에 25배 확대한 그림과 같이 표면은 매끄러운 유리질 상태이며, 거시적으로 약간의 결합부를 가지고 있다.

〈그림 2〉는 급냉 제강슬래그의 표면부를 확대한 것이다. 급냉 제강슬래그는 국부적으로 10 μ m ~ 100 μ m 범위의 미세한 결합부를 가지고 있지만, 대부분 밀실한 표면을 가지고 있다. 결합부 내부 모양은 가는 섬유가 밀집되어 있는 모양을 보이고 있다.

〈그림 3〉은 급냉 제강슬래그의 단면을 나타낸 것이다. 단면의 중앙부는 작은 알갱이들이 군집을 이루고 있는 비교적 다공

* 정회원, 공주대학교 건축공학과 교수
jmkim@kongju.ac.kr

** 정회원, 한일시멘트 중앙연구소 선임연구원

*** 정회원, (주)에코마이스터 대표이사

**** 정회원, 공주대학교 건축공학과 박사과정

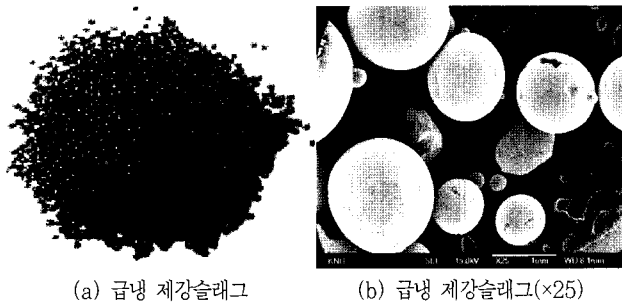


그림 1. 급냉 제강슬래그의 입형

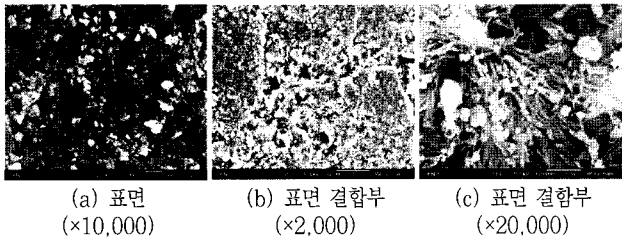


그림 2. 급냉 제강슬래그의 표면

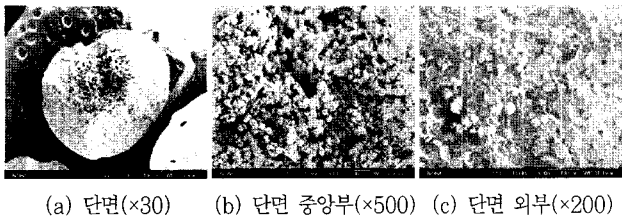


그림 3. 급냉 제강슬래그의 내부 단면

성 구조를 보이는 반면, 외부의 경우에는 전체적으로 치밀한 구조를 보이고 있다.

2.2 입도와 조립률

급냉 제강슬래그의 물리적 특성은 <표 1>과 같다. 급냉 제강슬래그의 최대 크기는 2.5mm이고, 조립률은 3.10으로 나타났

표 1. 급냉 제강슬래그의 물리적 특성

구분	KS, 잔골재	KS, 부순모래	급냉 제강슬래그
최대 크기(mm)	5.0	5.0	2.5
절건비중	2.5 이상	2.5 이상	3.56
흡수율(%)	3.0 이하	3.0 이하	0.42
단위용적중량(kg/m ³)	-	-	2,268
실적률 (%)	-	-	63.7
조립률	-	-	3.10
75 μ m 잔입자량(%)	5 이하	7 이하	0.45
안정성(%)	10 이하	10 이하	2.6

다. 급냉 제강슬래그의 입도분포 분석 결과 0.3mm 이하의 입자가 적어 콘크리트에 사용할 경우 거친 배합이 될 수 있다. 따라서 콘크리트용 잔골재로 사용할 경우 급냉 제강슬래그의 입도 분포 관리에 세심한 주의가 필요하다.

2.3 흡수율

골재의 흡수율이 크면 콘크리트의 강도 및 내구성에 악영향을 미치게 되므로 흡수율이 적은 골재를 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 KS 규격에서는 콘크리트용 골재의 흡수율을 대부분 3% 이하로 규정하고 있다. 급냉 제강슬래그의 흡수율은 0.42%로 기존 잔골재보다도 매우 낮다.

2.4 잔입자량 및 안정성

미분함량(80 μ m 이하)이 많은 잔골재를 사용하면, 콘크리트의 공기량 및 워커빌리티가 저하, 건조수축의 증가, 응결시간 단축을 초래한다. 미분함량이 적을 경우에는 콘크리트의 재료분리 및 블리딩 발생이 커진다. 그러므로 잔골재의 미분 함량은 3~5%가 가장 적절하다. 급냉 제강슬래그의 경우는 75 μ m 이하의 미분함량이 0.45%로 매우 적기 때문에 재료 분리 및 블리딩을 예방하기 위한 다른 미립분 재료와 같이 사용하는 것이 필요하다. 골재의 안정성에 관해서 KS 규격에서는 잔골재의 경우 10% 이하로 규정하고 있는데, 급냉 제강슬래그는 2.6으로 매우 안정적으로 나타났다.

3. 화학적 특성

3.1 원소 구성

<그림 4>는 급냉 제강슬래그의 단면 외부를 SEM으로 관찰한 것이다. 급냉 제강슬래그의 단면 외부는 보다 밝은 부분과

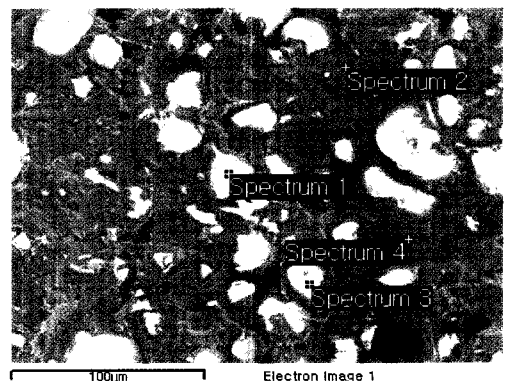


그림 4. 급냉 제강슬래그의 단면 외부

보다 어두운 부분으로 이루어진 2개의 상으로 구분된다. 두 부분에 대하여 EDS(energy dispersive spectroscopy)를 통하여 구성 원소 분석을 행한 결과는 <표 2>과 같다. 분석 결과 급냉 제강슬래그는 주로 Ca, Fe, Si의 산화물로 추정된다. 구성 원소 중에서 Ca를 가장 많이 함유하고 그 분포도 전체적으로 비교적 균질하지만, Fe 및 Si의 분포는 균질하지 않은 것으로 나타났다. Fe가 많은 곳은 Si가 적고 짙은 색을 띠며, 반대로 Fe가 적은 곳은 Si가 매우 많고 밝은 색을 띠는 것으로 나타났다. 또한 Fe가 많은 곳은 소량의 Ti 및 Mn 등의 금속물질이 상대적으로 많이 존재하며, Si가 많은 곳은 C 및 P가 상대적으로 많이 존재하는 것으로 나타났다.

3.2 산화물 구성

<표 3>은 급냉 제강슬래그의 산화물 분포를 나타낸 것으로 CaO, Fe₂O₃, SiO₂, MgO, Al₂O₃가 주 구성 성분이며, 특히 CaO와 Fe₂O₃가 70%의 점유율을 보이고, 여기에 SiO₂를 추가하면 83%를 점유하는 것으로 나타났다. 따라서 급냉 제강슬래그는 CaO와 Fe₂O₃의 이성분계 또는 SiO₂가 추가된 삼성분계 혼합물로 취급하는 것이 적당할 것으로 사료된다. 주요 3성분 외에 상대적으로 많은 비율을 점유하고 있는 것은 MgO, Al₂O₃, Mn₂O₃, P₂O₅이며, 기타의 산화물은 그 점유비가 1% 미만으로 매우 낮게 나타났다. 급냉 제강슬래그의 산화물 조성에서 CaO, Fe₂O₃, SiO₂는 각각 39.83, 30.16, 12.96%를 점유하고 있는데, 이를 3성분계 혼합물에 한정하면, 각각 48.02, 36.36, 15.62%를 점유하게 된다.

<그림 5>는 1155°C 이상에서의 C-F-S 삼성분계의 생성 광물을 나타낸 것이며, 여기에서 C, F, S는 화학자들이 사용하는 간략화 표기법으로 각각 CaO, Fe₂O₃, SiO₂를 의미한다.

표 2. EDS에 의한 구성 원소 분석 결과

원소	스펙트럼				평균
	1	2	3	4	
C	3.0	0.7	1.7	1.2	1.6
O	47.8	13.2	42.4	20.2	30.9
Al	-	-	-	2.2	0.6
Si	10.8	1.1	11.0	1.2	6.0
P	2.0	-	1.9	-	1.0
Ca	34.4	41.8	41.7	36.5	38.6
Ti	0.4	1.7	-	1.7	0.9
Mn	-	2.2	-	2.0	1.0
Fe	1.2	39.6	1.0	35.0	19.2
합계	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

표 3. 급냉 제강슬래그의 산화물

	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Ig.loss	합계
산화물 구성비	39.83	30.16	12.96	3.64	8.00	0.03	-0.66	
	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	ZnO	Cr ₂ O ₃	F-CaO	100.6
	0.10	0.65	2.31	2.86	0.03	0.09	0.15	
구분	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	합계				
Total system	39.83	30.16	12.96	82.95				
C-F-S system	48.02	36.36	15.62	100.00				
C-F system	56.91	43.09	-	100.00				
C-F-C : CaO-Fe ₂ O ₃ -SiO ₂ , C-F : CaO-Fe ₂ O ₃								

<그림 5>에서 알 수 있는 바와 같이 고온의 용융상태의 C, F, S 삼성분계 혼합물은 주로 C₂S(2CaO·SiO₂), C₂F(2CaO·Fe₂O₃), CF(CaO·Fe₂O₃)의 상태이며, <그림 1>에서와 같은 국부적인 불균일성을 고려하면 C(CaO), CF₂(CaO·2Fe₂O₃) 및 Hematite(α-Fe₂O₃)의 상태로 존재할 가능성이 높을 것으로 예측된다.

그러나 상온까지 냉각된 급냉 제강슬래그를 대상으로 XRD 분석한 결과를 나타낸 <그림 6>에서 알 수 있는 바와 같이 제강슬래그의 주 생성 광물은 Hematite(α-Fe₂O₃), Magnetite(Fe₃O₄), C₂F, β-C₂S인 것으로 나타났다. 예측한 광물 중에서 C, CF, CF₂는 발견되지 않았고, Magnetite는 예측하지 않았는데도 불구하고 생성된 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상의 주원인은 위에서 검토한 바와 같이 제강슬래그가 명확히 Fe 함량이 높은 곳과 낮은 곳이 명확히 구분되기 때문인 것으로 사료된다. 즉, Fe가 많은 경우에는 CF와 CF₂가 생성되지 않고 Hematite 또는 Magnetite가 생성되고, Fe가 적은 경우에는 C₂F, β-C₂S가 생성된 것으로 보인다.

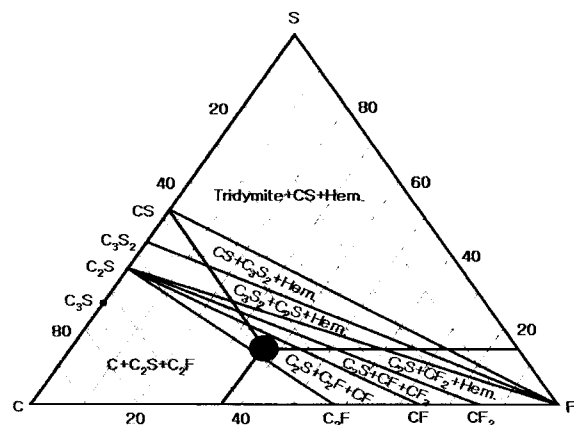


그림 5. 1,155°C 이상에서의 C-S-F system

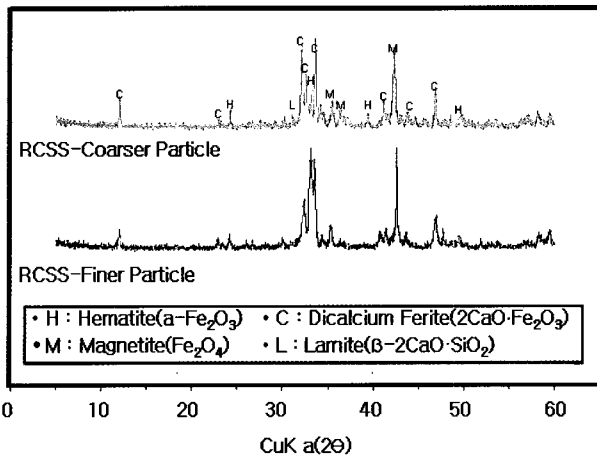


그림 6. 급냉 제강슬래그의 XRD 분석

3.3 결정질 CaO

고로에서 나온 용선을 장입하고, 생석회와 고압산소를 불어 넣어 용선에 포함된 탄소, 망간, 규소, 인, 황 등을 산화 연소시켜 강의 품질을 확보하는 것이 제강 공정이며, 이 제강 공정 부산물을 전로슬래그라고 한다. 이러한 배경에서 전로슬래그에는 본질적으로 석회(CaO)가 다량 존재하게 되는데, 석회의 광물상에 의해 그 유무해성이 결정된다.

서냉 제강슬래그에서 석회는 결정화된 상태로 독립적으로 존재하게 되는데, 이러한 유리석회(free-CaO)는 상온에서 수분을 접할 경우 Ca(OH)₂로 변화하면서 용적이 약 2배 증가하게 된다. 이러한 이유로 제강슬래그를 콘크리트와 같은 건설 재료로 사용하기 위해서는 유리 CaO의 함유량을 제한할 필요가 있다.

〈그림 7〉은 일본콘크리트공학협회(JCEA)에 의해 수행된 제강슬래그의 자체 붕괴에 관한 연구 결과이다²⁾. 제강슬래그를 6개월간 외기에 방치할 경우 유리석회 함유량이 1% 이상에서 붕괴하였고, 그 함유량이 높아질수록 붕괴도가 증가하고 있다.

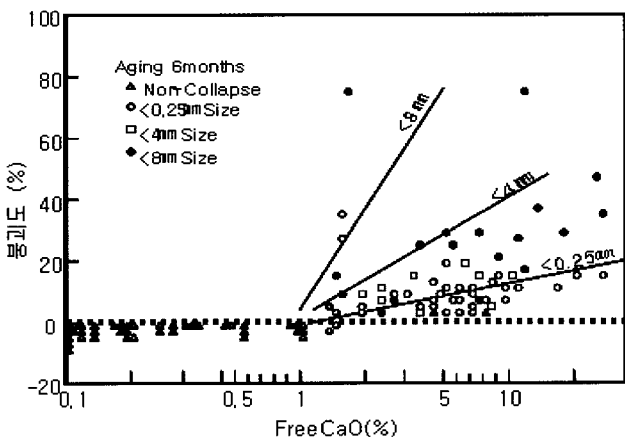


그림 7. 유리석회(free CaO)와 붕괴도

일본에서는 이러한 연구 결과와 추가적인 안전성을 고려하여 제강 슬래그를 콘크리트계 원료로 사용하기 위한 유리석회 함량의 최대치를 0.5%로 제한하고 있다.

그러나 제강슬래그의 유리석회 함유율은 0.1 ~ 20.0 %로 0.5%기준을 크게 상회하는 경우가 많은데, 이는 생석회를 투입한 후 F(Fe₂O₃) 및 S(SiO₃) 성분과 반응하지 못하고 미 용해 상태로 존재하는 것과 냉각 과정 중에 calcium ferrite 및 calcium silicate 광물상의 분해에 의한 것이라 할 수 있다.

Bert Phillips and Arnuf Muan는 C와 F의 이성분계에서 광물상의 변화를 〈그림 8〉과 같이 제시하였다³⁾. 전술한 바와 같이 C와 F는 제강슬래그의 80% 정도를 점유하므로 제강슬래그를 이들의 이성분계로 고려할 수 있다. 제강슬래그의 C : F = 43 : 57이므로 〈그림 8〉에서 1216°C 이상에서는 액상 C₂F 상으로 존재하고 그 이하에서는 C₂F 및 CF상으로 존재하게 되며, 액상상태에서 고상으로 서서히 진입하게 되면 C₂F는 CF와 석회로 분화하고 조직은 결정질을 띠게 된다. 이것이 일반슬래그가 높은 유리석회 함량과 결정화되게 되는 주된 이유이다. 그러나 이 임계점을 빠르게 통과하게 되면 액상 상태의 조직과 상이 그대로 유지되어 유리석회의 함량이 낮고 유리질상(glass state)의 조직 구성을 갖는 상온 경화체를 얻을 수 있게 된다. 따라서 본 급냉 제강슬래그는 분무에 의해 급냉하였기 때문에 전술한 바와 같이 낮은 유리석회 함량을 보이는 유리질상 경화체가 된 것으로 판단된다.

급냉 제강슬래그의 유리석회의 존재를 확인하기 위하여 TEM(transparent electric microscope) 이미지를 관찰한 것을 〈그림 9〉에 나타내었다. 서냉슬래그의 경우 free-CaO가 매우 많지만, 급냉 제강슬래그의 경우에는 매우 적은 것을 알 수 있다. 또한 정량 분석 결과를 나타낸 〈표 3〉에서 알 수 있는 바와 같이 급냉 제강슬래그의 유리석회 함량은 0.15%로 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

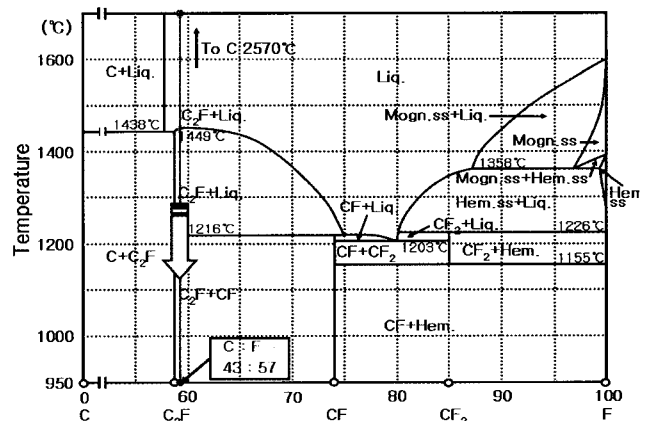


그림 8. C-F system

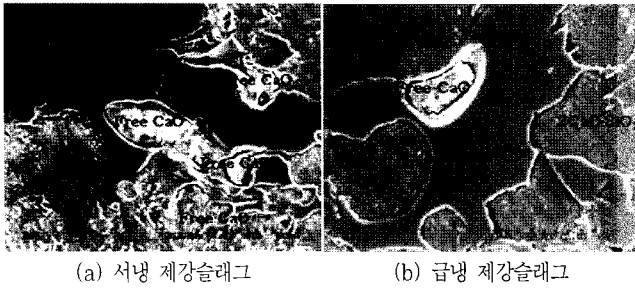


그림 9. 서냉 제강슬래그와 급냉 제강슬래그의 TEM 분석

전로슬래그의 MgO에 대해서는 장입된 dolomite 중의 magnesia가 MgO의 형태로 슬래그 중에 남아 있을 개연성이 높기 때문에 유리석회와 동일하게 중요하게 관찰하여야 하지만, 최근의 일본의 연구에 의하면 62개 제강슬래그의 유리마그네슘의 함량은 0.001% ~ 0.015%인 것으로 보고되고 있어 경화체의 팽창에 영향을 미칠 가능성이 매우 낮은 것으로 보이며, TEM 이미지 관찰에서도 유리마그네슘을 형성을 확인할 수 없었다¹⁾.

3.4 결정질 FeO

슬래그의 체적 안정성을 저해하는 또 다른 요인은 결정화된 철 산화물의 존재이다. 결정화된 철은 그 산화 단계에 따라 <그림 10>과 같이 용적이 변화하게 되는데, 최종 단계 산화물인 Fe(OH)₃·3H₂O는 철 이온보다 6배 이상의 용적을 갖게 된다. 철의 산화는 철 입자와 입자의 계면에서 출발하기 때문에 결정질과 같이 수많은 계면을 가질 경우 산화는 급격히 진행하지만, 유리질로 계면의 형성을 없애면 산화는 거의 정지하게 된다.

제강슬래그에서 철의 존재상은 XRD에서 확인한 바와 같이 Hematite(α-Fe₂O₃), Magnetite(Fe₃O₄), C₂F로 나타났고, 여기에 <그림 5>의 C-F-S 삼성분계 및 <그림 8>의 C-F 2성 분계로부터 추정하면 CF 및 CF₂도 일부 존재할 것으로 사료된다. 이러한 물질 중에서 C₂F, CF, CF₂는 매우 안정된 철화

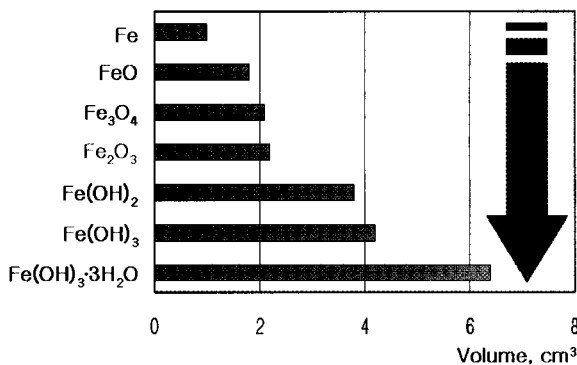


그림 10. 산화철의 용적 변화

합물이므로 체적 팽창의 가능성이 낮지만, Hematite와 Magnetite는 순수한 철 산화물로 적절한 물과 산소의 환경에서 산화가 더욱 진행되어 추가적인 용적 팽창을 야기할 가능성이 있다. 그러므로 서냉 제강슬래그에서는 추가적인 용적 팽창을 야기할 것이지만, 본 급냉 제강슬래그는 급냉에 의해 철산화물을 유리화하여 경화시켰기 때문에 부식의 가능성이 낮은 것으로 추정된다.

3.5 중금속과 pH 용출

<표 4>는 급냉 제강슬래그의 중금속 및 pH 용출 시험 결과를 나타낸 것이다. 급냉 제강슬래그는 아연을 비롯한 납, 구리, 카드뮴, 비소가 검출되지 않아 매우 안정적인 것으로 나타났다. 또한 급냉 제강슬래그의 pH는 진탕 후 12.5의 강알칼리성을 보이고 있다.

4. 급냉 제강슬래그의 체적 안정성

4.1 80℃ 수침팽창 시험

KS F 2535 「도로용 철강슬래그」에서는 슬래그 골재를 도로 또는 아스팔트 콘크리트용으로 사용할 경우 80℃의 수침팽창 실험을 실시하여 도로용의 경우 1.5%, 아스팔트 콘크리트의 경우 2.0%를 만족하는 것을 사용하도록 규정하고 있다¹⁾.

<그림 11>은 KS F 2580 「철강슬래그의 80℃ 수침팽창 시험 방법」에 의해 급냉 제강슬래그와 서냉 제강슬래그를 비교한 것이다. 급냉 제강슬래그의 팽창량은 재령 1일에 급격히 증가하고 있으나 이후에는 팽창량의 증가가 거의 없이 매우 안정적이었으며, 재령 10일의 최종 팽창량은 0.35%로 규정치에 비하여 매우 낮은 수준을 보이고 있다. 반면 에이징 하지 않은 서냉 제강슬래그는 재령 1일에 1.43%를 보이고 최종 팽창량도 1.5% 이상을 보이고 있어 규정치를 만족시키지 못하고 있다.

4.2 오토클레브의 팽창 시험

<그림 12>는 KS L 5107 「시멘트의 오토클레브 팽창도 시험 방법」를 이용하여 급냉 제강슬래그에 포함된 산화칼슘

표 4. 급냉 제강슬래그의 중금속 및 pH 용출

시료	중금속 용출 (mg/L)					pH		
	Pb	Cu	Cr	Cd	As	증류수	초기	교반 후
급냉 제강슬래그	ND	ND	ND	ND	ND	6.1	12.0	12.5

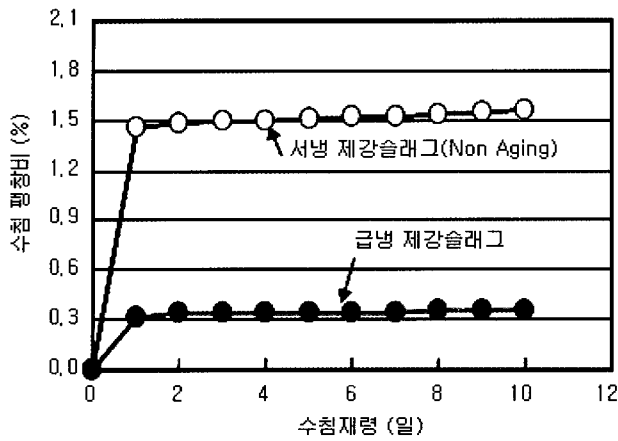


그림 11. 급냉 제강슬래그의 80°C 수침팽창비

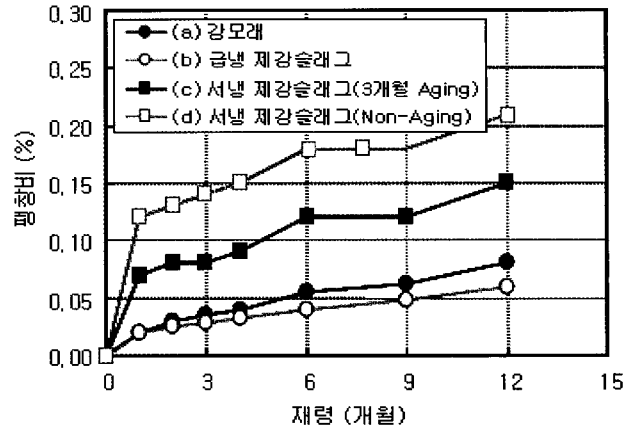


그림 13. 급냉 제강슬래그의 모르타르 붕 팽창비

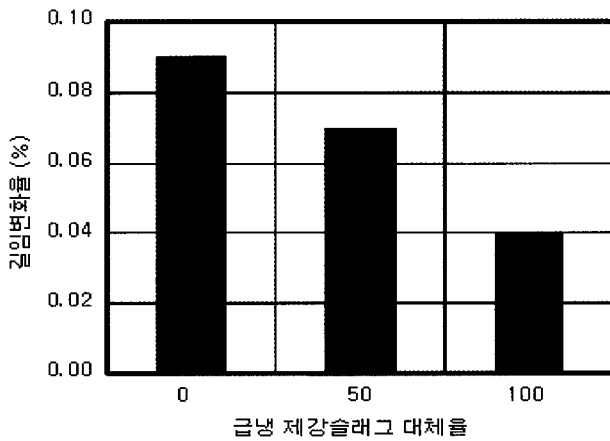


그림 12. 급냉 제강슬래그의 오토클레이브 팽창도 시험

(CaO), 산화마그네슘(MgO)의 잠재 팽창성을 검토한 것으로 강모래에 대하여 급냉 제강슬래그를 0, 50, 100% 대체하여 실험을 실시하였다. 실험 결과 강모래를 사용한 경우 0.09%의 팽창을 보임에도 불구하고, 급냉 제강슬래그를 50% 대체한 경우에는 0.07%, 급냉 제강슬래그를 사용한 경우에는 0.04%의 팽창도를 보이고 있어, 급냉 제강슬래그의 사용에 의해 팽창량이 크게 저감되었음을 알 수 있다.

4.3 모르타르 바 시험

〈그림 13〉은 KS F 2546 「골재의 알칼리 잠재 반응 시험 방법(모르타르 붕 방법)」을 이용하여 급냉 제강슬래그의 잠재 반응성을 검토한 것이다. 〈그림 13〉에 나타난 바와 같이 에이징하지 않은 서냉 제강슬래그가 예측한 바와 같이 가장 큰 길이변화율을 보이고 있으며, 3개월간 에이징한 서냉 제강슬래그도 에이징하지 않은 것의 70% 이상에 상당하는 길이변화율을 보이고 있다. 반면 급냉 제강슬래그의 경우에는 재령 12개월에

도 0.06%로 강모래 보다도 낮은 값을 보이고 있다.

또한 〈그림 14〉와 같이 시험을 종료한 후의 강모래와 급냉 제강슬래그를 사용한 시험체는 표면에 아무런 균열의 흔적이 보이지 않지만, 서냉 제강슬래그를 사용한 것은 에이징 유무에 관계없이 표면에 다수의 국부적인 결함부가 관찰되었다. 결함부를 건전부와 함께 근접 촬영한 〈그림 15〉에서 알 수 있는 바와 같이, 결함부는 석회화 기인한 것과 산화철에 기인한 것의 2가지 종류로 구분되었다.

이와 같이 기존의 서냉슬래그의 경우 석회화 산화철에 의하여 에이징의 유무에 관계없이 경화체가 손상되지만, 급냉 제강슬래그의 경우에는 전혀 문제가 발생하지 않았다. 이는 전술한 3.2 화합물의 구성에서 기술한 바와 같이 위의 두 가지 물질이 매우 안정적인 고체상을 형성하고 있기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

4.4 모르타르 길이 변화율

〈그림 16〉은 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법」에 따라 표준사에 대하여 급냉 제강슬래그 대체율에 따른 모르타르 길이변화율을 실험한 결과이다. 급냉 제강

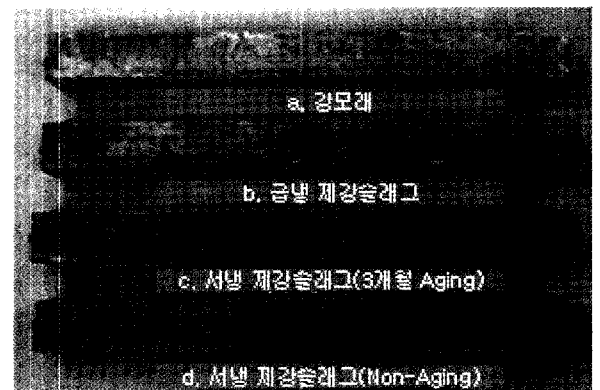


그림 14. 12주 후의 시험체 상태

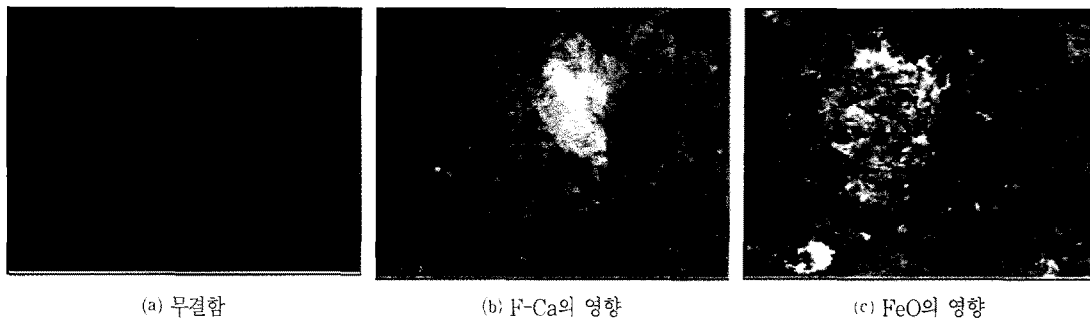


그림 15. 결합부의 상태

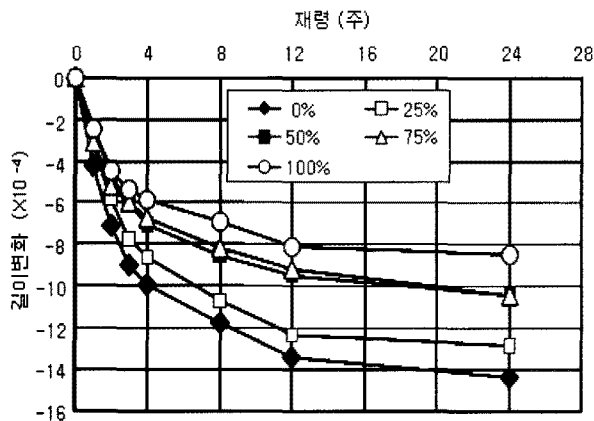


그림 16. 급냉 제강슬래그 대체율에 따른 길이 변화율

슬래그 대체율이 증가할수록 길이변화율은 감소하는 것으로 나타났다. 급냉 제강슬래그의 사용에 의해 낮은 길이변화율을 보이는 현상은 시험재령 초기부터 재령 24주까지도 동일한 경향을 보이고 있다. 급냉 제강슬래그를 사용한 모르타르의 길이 변화율은 급냉 제강슬래그를 사용하지 않고 표준사만을 사용한 것에 비하여 재령 24주의 최종 길이 변화율은 약 55% 정도를 보이고 있다.

이와 같이 급냉 제강슬래그의 사용에 의해 체적 안정성이 증가하는 이유는 급냉 제강슬래그의 형상이 구형이고 실적률이 높기 때문에 골재가 시멘트페이스트의 수축을 효과적으로 억제한 결과로 판단된다.

5. 결론

이상과 같이 아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 물리·화학적 특성과 체적 안정성에 대하여 살펴보았다. 아토마이징 공정에 의해 제조된 급냉 제강슬래그는 기존의 서냉 제강슬래그의 문제점인 F-CaO, FeO 등에 의한 팽창 붕괴성에 대하여 매우 안정적인 것으로 판단된다.

급냉 제강슬래그는 기존 콘크리트용 골재와 비교하여 입형은 구형에 가깝고, 흡수율은 낮으며, 비중은 높은 특징을 가지고 있다. 일본의 경우에는 급냉 제강슬래그 특성을 활용하여 해양용 소파블록용 골재, 차폐콘크리트용 골재, 강관충전 고유동콘크리트용 골재로 활용 등 다양한 연구와 시공 사례 등이 발표되었다. 국내에서는 아직 급냉 제강슬래그에 대한 기초적인 연구에 머물러 있는 수준이지만, 향후 연구 활성화를 통하여 국내에서도 콘크리트용 골재로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. □

참고문헌

- Oh, Oksoo et al., *Recovery Method of Ingot Gold in Steel Slag*, Patent Registration No.1000980620000.
- Branch, Kyushu, *Workshop for Usability of Industrial Waste as Material for Concrete*, Japan Concrete Engineering Association, Nov. 2000, pp.41~71.
- Bert Phillips and Arnuf Muan, *J. Am. Ceram Soc.*, Vol.41, No.11, 1958, 448pp.
- Korea Standard Association, KS F 2535 Steel Slag for Road, KS Handbook, 2002.
- 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.
- Montgomery, D.G. and Wang, G., "Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete-Fracture Related Properties", *Cement and Concrete Research*, Vol.22, 1992, pp.755~760.
- Keiji, Morino et al., "Characteristics of Concrete with Electric Furnace Oxidized Slag Aggregate", *Annual Paper for Concrete Engineering*, Vol.16, No.1, 1994, pp.319~324.
- Takahashi Tatsuto, "Steel Slag Carbonic Acidic Solid as New Material", *Concrete Engineering*, Vol.38, No.2, 2000, pp.3~9.