

제강슬래그 잔골재를 사용한 모르타르 특성

Properties of Mortar Using Steel Slag Fine Aggregate

조 성 현* 한 기 석** 박 성 우*** 권 기 주**** 오 상 윤***** 김 진 만*****

Cho, Sung-Hyun Han, Ki-Suk Park, Sung-Woo Kwon, Ki-Joo Oh, Sang-Yoon Kim, Jin-Man

ABSTRACT

The steel slag, a by-product which is produced during the manufacture of steel by refining pig iron, is mainly used as road materials after aging it. It is necessary to age steel slag for long time in air because the reaction with water and free-CaO in steel slag could make the expansion of volume. This problem prevents steel slag from being used as aggregate for concrete. But steel slag used in this study was controled by an air-jet method which rapidly cools substance melted at a high temperature. Rapid cooling prevents from generation of free-CaO in steel slag.

In this study, properties of steel slag manufactured by air-jet method and mortar used it were investigated. As results of this study, free-CaO contents were controled under 1%. Mortar used this steel slag demanded to lower water contents, higher compressive strength and lower drying shrinkage than the basic mortar in the same condition.

1. 서 론

제강 공정에서 발생하는 슬래그는 일반적으로 공기 중에서 상온으로 냉각하여 굳힌 다음 분쇄하여 처리하게 된다. 이러한 공정으로 발생되는 제강슬래그에는 미반응 CaO(F-CaO)의 함량이 0.1%~20% 까지 다양하게 변화한다. F-CaO의 함량은 제강슬래그에서 매우 중요한데, 그 이유는 이것의 함량이 1% 이상이 되면 팽창성 반응의 발생에 의해 스스로 붕괴하게 되며, 이러한 경향은 F-CaO 함량이 증가할 수록 커지는 경향을 보인다¹⁾. 따라서 기존의 방식으로 부산되는 제강슬래그는 약 6개월에서 1년 간의 야적에 의해 에이징하거나 증기에 의한 촉진 에이징 과정을 거쳐 콘크리트를 골재로 활용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다²⁾. 그러나 이러한 공정은 오랜 시간과 넓은 야적장의 요구 및 부가적인 비용의 발생을 야기하게 된다.

본 연구에서 대상으로 한 제강슬래그는 기존의 방식과는 달리 전로에서 용융된 슬래그를 고속의 공기로 급냉하여 제조한 것으로, CaO는 화합물 상태에서 급속하게 경화함으로써 화합물로부터 유리되지 않도록 제어한 것이다. 본 연구에서는 이러한 공정으로 제조된 제강슬래그와 이를 사용한 모르타르의 물성을 검토한 것이다.

* 정회원, 공주대학교 자원재활용신소재 연구센터 전임연구원

** 정회원, 한국지질자원연구원 연구원

*** 정회원, 한전전력연구원 일반연구원

**** 정회원, 한전전력연구원 책임연구원

***** 정회원, (주) 에코마이스터 대표이사

***** 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

2. 고속공기로 급냉한 제강슬래그의 물성

전로에서 발생된 제강슬래그를 서냉할 때는 일반적인 경우에서와 같이 각기 이온들은 Fe_2O_3 , CaO 와 같은 분자로 각각 응고되면서 격자의 분자가 응집 결합하여 각 결정체가 고체 슬래그 중에 분산된다. 이와 같이 석출된 Fe_2O_3 와 CaO 등은 두 분자가 화합한 복합분자로 되지 않고 단독으로 풍화작용을 받아 분말 상태로 공기중에 비산된다.

그러나, 슬래그는 고온의 용융상태 중에서 고속의 공기와 물로 급냉하게 되면 $Ca \cdot Fe_2O_3$, $SiO_2 \cdot Fe_2O_3$, $Mg \cdot Fe_2O_3$ 형태의 복합 산화물로서 존재하게 되므로 F-CaO는 석출되지 않게 된다. 또한, 표면은 결정화될 시간이 없으므로 유리질 상태로 안정화된다³⁾.

그림 1은 고속 공기로 급냉시킨 제강슬래그의 XRD 분석 결과를 나타낸 것으로 CaO 의 화합물인 dicalcium ferrite ($2CaO \cdot Fe_2O_3$)와 Larnite ($\beta-2CaO \cdot SiO_2$)의 형성을 확인할 수 있다.

또한, 고속의 공기로 급냉시키면 그림 2와 같이 슬래그 입자가 구형의 형태로 제조가 가능하다. 골재의 입형이 구형이면 콘크리트 제조시 유동성 확보에 좋은 효과를 줄 수 있다.

이와 같이 고속으로 급냉시킨 제강슬래그 잔골재의 화학성분은 표 1와 같고, 물리적 성질은 표 2와 같다. 화학성분은 기존의 제강슬래그와 같이 CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 가 주성분으로 이루고 있으나, F-CaO는 붕괴 위험성이 존재하는 함량 1%보다 낮은 0.15%로 나타났는데, 이는 그림 1의 XRD 분석결과에서 알 수 있듯이 대

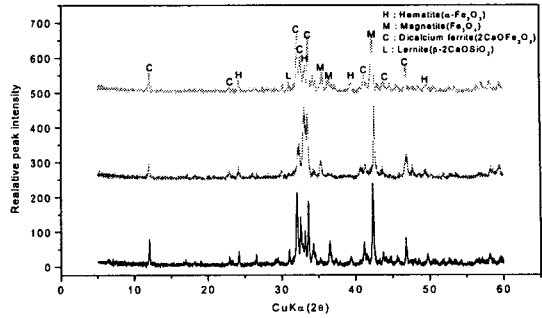


그림 1 고속 공기로 급냉시킨 제강슬래그의 XRD 분석 결과

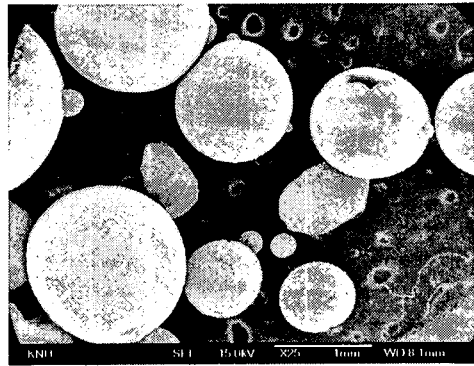


그림 2 고속 공기로 급냉된 제강슬래그 입자

표 1 고속 공기로 급냉한 제강슬래그 잔골재의 화학성분

화학성분 (%)								F-CaO (%)
SiO ₂	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Ig. loss	
13.0	9.6	30.2	39.9	8.0	0.03	0.1	-0.66	0.15

표 2 고속의 공기로 급냉시킨 제강슬래그 잔골재의 물리적 성질

구분	최대치수 (mm)	절건 비중	표건 비중	흡수율 (%)	조립율	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	공극율 (%)	잔입자량 (%)	안정성 (%)
제강슬래그 골재	4	3.56	3.57	0.42	3.10	2.263	63.75	36.25	0.45	2.6
KS기준	-	2.5이상	-	3 이하	-	-	-	-	3이하	10이하

부분의 CaO는 Fe_2O_3 , SiO_2 와 반응하여 $2CaO \cdot Fe_2O_3$ 와 $2CaO \cdot SiO_2$ 의 화합물 상태로 존재하기 때문이다.

물리적 성질을 살펴보면 제강슬래그는 $2CaO \cdot Fe_2O_3$, Fe_2O_3 및 Fe_2O_4 등에서 Fe의 성분을 포함하고 있어 비중이 3.56으로 높게 나타났으며, 흡수율, 잔입자량 및 안정성 등에서 모두 KS 규격에 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 흡수율은 천연 강모래 등이 1% 내외인 반면에 0.42%로 매우 낮게 나타났다. 이는 공기 급냉에 의해 제강슬래그 입자표면에 공극이 형성되지 않았기 때문으로 사료된다.

3. 실험계획 및 사용재료

3.1 실험계획

본 실험은 제강공정에서 발생하는 제강슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용 가능한지를 검토하기 위하여 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르 특성을 검토한 것이다. 본 실험에 사용된 제강슬래그 잔골재는 기존 골재보다 흡수율이 적고, 입형이 구형에 가까워 동일 유동성확보를 위한 요구수량이 감소된다. 따라서, 표준사와 강모래를 기준으로 제강슬래그 잔골재를 대체함으로써 변동되는 요구수량을 검토하고, 이에 따른 압축강도 및 길이변화율을 검토하였다.

제강슬래그 잔골재 대체율은 제강슬래그 잔골재의 비중이 높기 때문에 중량대체율을 하지 않고 용적대체율로 표 3과 같이 0, 25, 50, 75, 100%를 대체하였다. 시멘트와 모래의 중량비는 KS L 5105에서 제시한 1 : 2.45(시멘트 : 표준사)를 표준으로 실시하였고, 플로우는 110±5%를 목표 플로우치로 설정하였다. 플로우 시험, 압축강도용 공시체 제작 및 압축강도 실험도 KS L 5105에 준하여 실시하였으며, 압축강도의 측정 재령은 3, 7, 28일로 하였다. 모르타르의 길이변화 실험은 KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 실험방법에 준하여 실시하였으며, 재령 3개월까지 실시하였다.

표 3 실험계획 및 시험항목

구분	제강슬래그 잔골재 대체율 (%)	시험항목
표준사	0, 25, 50, 75, 100	· 플로우
강모래		· 압축강도(재령 3, 7, 28일) · 길이변화(재령 3개월)

3.2 사용재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 표준사는 KS 규격에 규정된 주문진산 표준사를 사용하였다. 제강슬래그 잔골재의 물리·화학적 성질은 앞에서 제시한 표 1, 2와 같다. 강모래는 물리적 성질이 표 4와 같은 공주산 강모래를 사용하였다.

표 4 강모래의 물리적 성질

최대 치수 (mm)	절건 비중	표건 비중	흡수율 (%)	조립율	단위용적 중량 (kg/m^3)	실적율 (%)	공극율 (%)
5	2.55	2.58	1.19	3.30	1.575	63.4	36.6

4. 실험결과

4.1 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 요구수량의 변동

표 5는 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 요구수량의 변동 및 압축강도 시험결과를 검토한 결과이다. 콘크리트의 유동특성은 콘크리트의 내구성, 압축강도에 영향을 미치기 때문에 배합설계시 가장 고

표 5 제강슬래그 잔골재 대체율에 따라 요구되는 단위수량 검토결과 및 압축강도 시험결과

구분	제강슬래그 잔골재 대체율 (%)	W/C (%)	단위수량 변화율 (%)	플로우		압축강도 (kgf/cm ²)			압축강도 증진율 (%)		
				cm	%	3일	7일	28일	3일	7일	28일
표준사	표100제강0	0	기준	210	110	184	211	227	기준	기준	기준
	표75제강25	25	-6.7	211	111	246	265	296	134	126	130
	표50제강50	50	-15.0	217	117	298	395	410	162	187	180
	표25제강75	75	-25.0	206	106	391	492	510	213	233	224
	표0제강100	100	44	-26.7	205	105	310	472	490	169	224
강모래	강100제강0	0	기준	205	105	227	278	310	기준	기준	기준
	강75제강25	25	-6.9	210	110	245	292	340	108	105	122
	강50제강50	50	-15.5	206	106	296	326	418	130	117	151
	강25제강75	75	-24.1	205	105	396	494	525	174	178	189
	강0제강100	100	44	-24.1	205	105	310	472	490	136	170

려되는 요소들 중의 하나이다. 따라서, 본 실험에서는 제강슬래그 잔골재의 대체율에 따른 유동성 변화를 고려하기 위하여 목표 플로우 110±5%에 적합한 요구수량을 검토하였다.

실험결과 그림 3에서 보는바와 같이 제강슬래그 잔골재의 대체율이 증가할수록 물시멘트비가 감소하는 것으로 나타났다.

그림 4는 표준사 100%와 강모래 100%를 기준으로 하여 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 단위수량 감소율을 나타낸 것이다. 표준사 및 강모래 모두 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 단위수량 감소율은 비슷한 수준으로 나타났으며, 제강슬래그 대체율 50% 이상 대체할 경우 단위수량이 약 15%이상 감소되는 것으로 나타났다.

이는 제강슬래그 잔골재의 낮은 흡수율, 입형의 구형, 골재 표면에 공극이 없는 구조의 형성으로 물의 내부 이동방지 등 때문에 강모래나 표준사보다 적정 유동성을 확보하기 위한 요구수량이 감소한 것으로 사료된다. 따라서 제강슬래그 잔골재를 콘크리트용 골재로 사용할 경우에는 사용량에 따라 요구되는 단위수량을 반드시 검토하는 것이 필요하다.

4.2 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 압축강도 특성

그림 5는 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 재령별 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 제강슬래그 잔골재 대체율 75%까지는 대체율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경

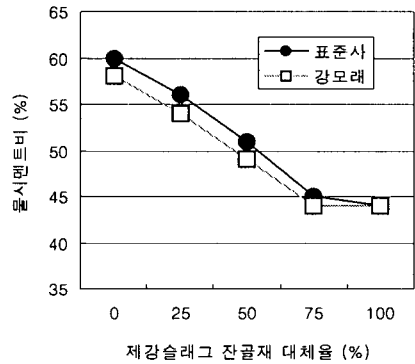


그림 3 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 물시멘트비의 변화

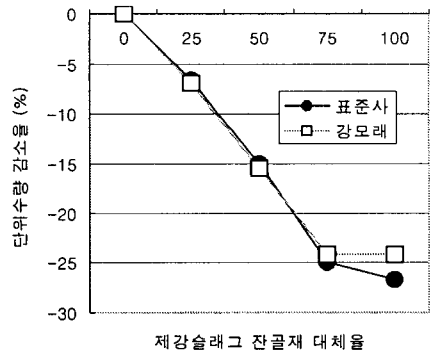


그림 4 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 단위수량 변화율

향을 보이고 있으며, 대체율 100%에서는 75%보다 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 6은 표준사와 강모래를 100%를 기준으로 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 압축강도 증진율을 검토한 것이다. 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 압축강도 증진율은 재령 28일에서 약 1.2~2.2배의 압축강도 증진이 나타났다.

이는 제강슬래그 잔골재의 단위수량 감소에 의한 압축강도 증진효과이며, 콘크리트용 골재로 활용한 경우 동일 시멘트량을 사용하고도 보다 우수한 강도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4.3 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 건조수축

표 6은 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 건조수축을 검토하기 위하여 재령 3개월(12 주)까지 모르타르의 길이 변화를 검토한 시험결과이다.

그림 7에 나타난 바와 같이 제강슬래그 잔골재의 대체율이 증가할수록 건조수축이 감소하는 것으로 나타났다. 재령 3개월에서 제강슬래그 잔골재의 대체율을 100%로 한 경우 표준사나 강모래보다 약 38, 40% 정도 건조수축량이 감소한 것으로 나타났다.

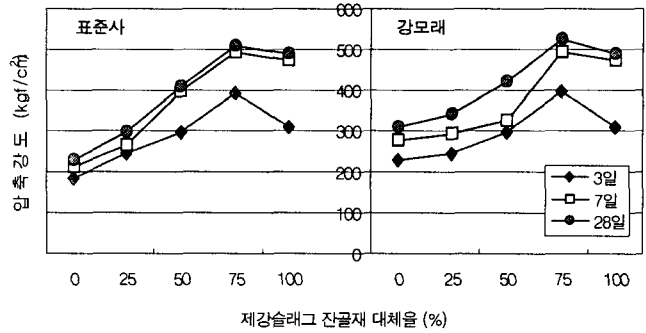


그림 5 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 재령별 압축강도 변화

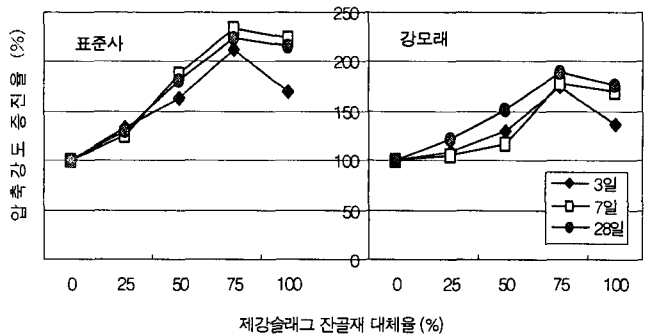


그림 6 제강슬래그 대체율에 따른 각 재령별 압축강도 증진율

표 6 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르의 길이변화 결과

구분	제강슬래그 잔골재 대체율 (%)	W/C (%)	단위수량 변화율 (%)	건조수축 (X 10 ⁻⁴)							
				수중 1주	대기 1주	대기 2주	대기 3주	대기 4주	대기 8주	대기 12주	
표준사	표100제강0	0	60	기준	0.00	-3.64	-6.40	-7.81	-8.74	-10.64	-13.78
	표75제강25	25	56	-6.7	0.00	-3.76	-5.69	-7.28	-8.52	-10.28	-12.70
	표50제강50	50	51	-15.0	0.00	-3.04	-4.71	-6.25	-7.08	-8.73	-11.25
	표25제강75	75	45	-25.0	0.00	-3.64	-4.69	-5.62	-6.38	-7.76	-10.07
	표0제강100	100	44	-26.7	0.00	-2.47	-4.47	-5.37	-5.87	-6.92	-8.51
강모래	강100제강0	0	58	기준	0.00	-4.21	-7.11	-9.02	-9.97	-11.78	-14.35
	강75제강25	25	54	-6.9	0.00	-3.23	-5.87	-7.78	-8.66	-10.70	-13.29
	강50제강50	50	49	-15.5	0.00	-2.36	-4.71	-5.99	-7.07	-8.54	-10.44
	강25제강75	75	44	-24.1	0.00	-3.10	-5.22	-6.00	-6.76	-8.19	-10.43
	강0제강100	100	44	-24.1	0.00	-2.47	-4.47	-5.37	-5.87	-6.92	-8.51

이와 같이 제강슬래그 잔골재의 대체에 따른 단위수량 감소는 압축강도 뿐 아니라 건조수축 감소에도 좋은 영향을 주는 것으로 나타났다.

5. 결 론

고속의 공기로 급냉시킨 제강슬래그 잔골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위하여 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고속의 공기로 급냉시킨 제강슬래그 잔골재는 F-CaO 함량이 1% 미만으로 안정적이었고, 골재의 표면조적이 공극이 없는 구조를 형성하여 흡수율을 낮았다. 또한, 입형이 구형이고, 안정성 및 잔입자량 등이 콘크리트용 골재로서 KS에 적합한 것으로 나타났다.
- 2) 슬래그 골재의 모양이 구형이어서 비표면적이 작으므로 강모래나 표준사보다 적정 유동성을 확보하기 위한 단위수량이 감소되는 것으로 나타났다.
- 3) 제강슬래그 잔골재의 사용량이 증가함에 따라 단위수량이 감소하고, 압축강도는 증가하며, 건조수축은 감소하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 (주)에코마이스터가 연구비를 지원하고, 한국전력연구원과 공주대학교 자원재활용신소재 연구센터(RRC/NMR)가 공동으로 수행한 연구의 일부로 관계기관에 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會九州支部, “各種産業廢棄物のコンクリート用材料としての適用性に関する講習會”, 2000. 11. pp.41~71.
2. 문한영, 유정훈, 천승환, 백우열, “에이징 처리한 콘크리트용 제강슬래그 골재의 품질”, 한국콘크리트학회, 2001년도 가을학술발표회 논문집, 2001. pp.105~109.
3. 오옥수의 2인, “제강슬래그 내의 지금 회수방법”, 특허등록번호 1000980620000
4. 광기주, 손순중, 김기성, “전로슬래그를 이용한 콘크리트의 강도에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, 제 6권4호, 1994. 9. pp.113~122.
5. KSA 한국표준협회, KS 핸드북, 2002.
6. R.L.Berger, A Study on the General character of Sreel Slag Aggregate, Cement and Concrete. Research, Vol.4, No.1, 1974, pp.99~112.

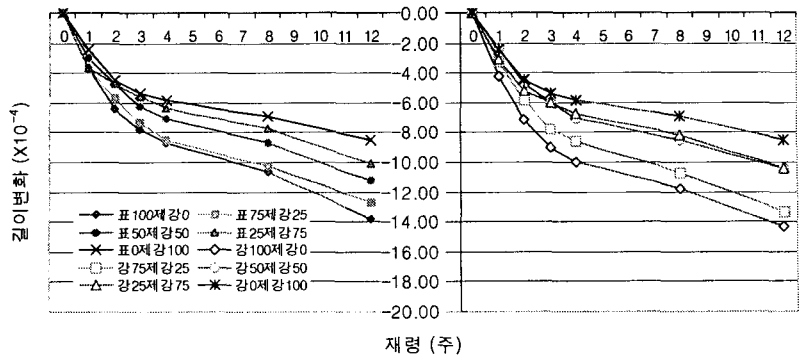


그림 7. 제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 길이변화