

복합슬래그 잔골재를 사용한 건조시멘트 모르타르의 특성

Properties of Dry Cement Mortar Using Composite Slag Fine Aggregate



이용무 Yong-Mu Lee
한일시멘트(주) 제품개발팀
선임연구원
E-mail : supermu@hanil.com



서신석 Shin-Seok Seo
한일시멘트(주) 제품개발팀장
E-mail : ssseo@hanil.com



박홍서 Hong-Suh Park
한일현대시멘트(주) 상무
E-mail : jmpark@hanil.com



이형우 Hyoung-Woo Lee
한일시멘트(주) 상무
E-mail : woomi201@hanil.com



조봉석 Bong-Suk Cho
RIST 환경자원연구그룹
전문연구원
E-mail : chos8@rist.re.kr

1. 서론

최근 경제성장에 따른 건설수요는 증가되는 반면 국내의 천연골재는 대부분 고갈되어 부족한 골재원을 대체하기 위해 부순골재, 부순모래 및 바닷모래 등을 사용해 왔다. 정은혜 등(2008)의 이론에 따르면 이러한 골재원도 골재채취에 따른 산림훼손 및 바다 생태계 파괴 등을 방지하기 위하여 인허가 제한 등의 환경적인 규제가 강화되고 있는 실정이다. 특히, 국토해양부(2018) 및 해양수산부(2017)에서 발표한 것에 따르면 바닷모래로 사용되어오던 남해안 EEZ사의 채취중단으로 바닷모래의 공급이 감소되어 단가상승 및 수급불균형이 발생함에도 불구하고 정부는 환경문제를 중요하게 다루고 있어 2022년까지 바닷모래 사용비율을 낮춘다는 계획을 가지고 있다. 따라서 바닷모래 수급은 갈수록 어려워짐에 따라, 부족한 골재를 대체하기 위해 제철소에서 발생하는 산업부산물인 슬래그를 골재로 활용하는 연구가 진행되고 있다.

이에 본고에서는 국내에서 발생하는 고로수재슬래그와 페로니켈 슬래그를 잔골재로 활용 검토기 위해 슬래그골재의 품질특성을 확인하고, 건축용에 사용되는 건조시멘트 모르타르에 기존에 사용되는 건조사의 일부를 슬래그골재로 치환한 후 기초물성을 검토한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 슬래그골재의 품질특성 검토

2.1 화학성분

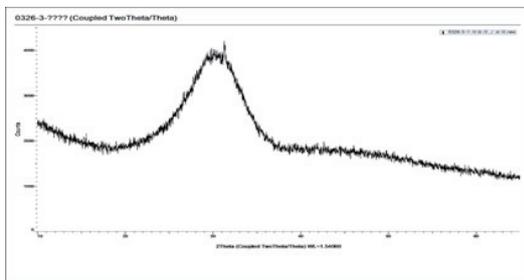
[표 1] 및 <그림1>은 슬래그골재의 XRF 및 XRD 분석결과를 나타

낸 것으로, 고로수재슬래그는 비정질 상태로 존재하고 있고, 주성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO이며 소량의 Fe₂O₃를 함유하고 있다. 한편, 페로니켈슬래그의 경우 MgO성분이 약 30%로 높게 함유하고 있으나, XRD분석결과 팽창반응성이 우려되는 Free-MgO로는 존재하지 않고, Forsterite(Mg₂(SiO₄)) 및 Enstatite(Mg(SiO₃))의 복합산화물 형태로 고용화 되어있어 안정할 것으로 판단된다.

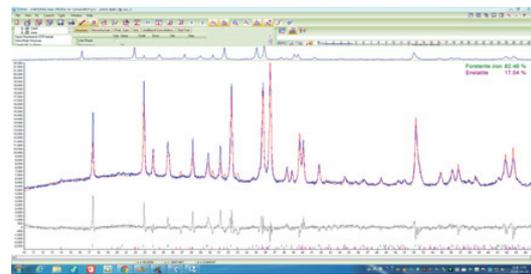
2.2 입도분석 및 물리적 특성

[표 1] 슬래그 골재의 화학성분

성분		[XRF 측정]					[XRD 측정]		
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Forsterite (Mg ₂ (SiO ₄))	Enstatite (Mg(SiO ₃))
고로수재슬래그	함량 (%)	3.50	13.3	29.80	48.5	—	0.93	—	—
페로니켈슬래그(17년)		33.10	2.64	50.00	1.09	1.34	10.08	93.65	5.35
페로니켈슬래그(18년)		30.90	2.18	48.7	0.58	1.58	15.0	82.46	17.54



고로수재슬래그



페로니켈슬래그

그림 1. 슬래그 골재의 XRD분석

[표 2] 슬래그 골재의 입도 및 조립율

구분	함량 (%)	입도분포 (%)						조립율	
		0.15 mm 이하	0.15~0.30 mm	0.30~0.60 mm	0.60~1.18 mm	1.18~2.36 mm	2.36~4.75 mm		4.75 mm 이상
고로수재슬래그	함량 (%)	7.7	9.7	30.8	43.0	8.6	0.3	0.0	2.36
페로니켈슬래그		2.3	2.8	8.8	24.6	50.8	10.7	0.0	3.51

[표 3] 슬래그 골재의 물리적 특성

구분	밀도 (g/cm ³)	단위용적질량 (kg/m ³)	함수율 (%)	흡수율 (%)	레미탈 적용 잔골재 사이즈 분류 (%)			
					Pan	S1(세사)	S2(중사)	S3(양사)
고로수재슬래그	2.79	1,441	2.0	2.5~2.9	6.8	47.1	45.0	1.1
페로니켈슬래그	3.03	1,800	1.5	0.58	2.9	11.6	52.4	33.2

[표 4] 건조사와 슬래그 골재의 마모저항성

구분	S1 건조사 및 수재슬래그 마모율(%)				구분	S2 건조사 및 수재, 페로니켈슬래그 마모율(%)				
	건조사			수재슬래그		건조사			수재슬래그	페로니켈슬래그
	S1	S1	S1	S1		S2	S2	S2	S2	S2
마모율	7.3	6.6	10.7	8.1	마모율	14.3	20.8	19.8	21.8	8.1

은 2%이내로 일반 잔골재 입고원사 평균 함유율 약7%보다 낮아 골재 건조비용 절감에 유리하며, 고로수재슬래그의 흡수율은 2.5~2.9%, 페로니켈슬래그는 약0.6%로 건조시멘트 모르타르에 사용되는 건조사 함유율 자체기준 3%이내에 만족하는 것으로 나타났다.

[표 4]는 로스엔젤리스 마모시험기로 고로수재슬래그와 페로니켈슬래그의 마모율을 나타낸 것으로, 2.0mm이하의 고로수재슬래그는 일반 건조사와 유사한 마모율을 보이고 있으며, 페로니켈슬래그의 경우 건조사보다 낮은 마모율을 보이고 있어 골재로서의 마모저항성이 우수함을 알 수 있다.

한편, 고로수재슬래그를 잔골재로 활용하기 위해서는 일부 함유된 침상결정이 콘크리트나 모르타르의 작업성을 저하시킬 뿐만 아니라 인체에 유해한 영향을 주므로 제거작업이 반드시 선행되어야 하며, 또한 급냉으로 분화되면서 모난형의 입자형상이고, 손으로 비비면 부서지므로 잔골재로 사용하기 위해서는 입형의 전처리 가공작업이 반드시 필요로 하게 된다. 따라서 본고에서 적용된 고로수재슬래그는 상기의 전처리 가공작업을 통해 침상결정을 제거하고 입형을 개선한 골재로 검토되었다.

3. 건조시멘트 모르타르 적용 물성검토

3.1 실험방법

고로수재 및 페로니켈슬래그를 105℃로 절건하여, 건조시멘트 모르타르 건조사 자체기준인 S1, S2 크기로 체분리 한 후, 기준 건조사 치환비율별(0, 20, 40, 60, 80, 100%)로 미장용 및 바닥용 모르타르 물성시험을 실시하였다. 실험방법은

KS L 5220에 의거 플로범위를 $100 \pm 5\%$ 에 만족하도록 단위수량을 조절하여 모르타르의 물리적 특성을 측정하였으며, 압축강도는 수중양생 및 기건양생을 실시하였다. 한편 모르타르의 길이변화율 및 응결시간은 바닥용으로 플로 200 ± 10 mm 범위를 기준하여 실험을 진행하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 고로수재슬래그골재 치환율별 모르타르 물성

<그림 2>는 고로수재슬래그 잔골재를 일반건조사 치환율에 따른 건조시멘트 모르타르의 단위수량 및 공기량 변화를 나타낸 것이다. 잔골재 치환율이 증가할수록 단위수량은 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 공기량의 경우 모든 치환율에서 KS L 5220의 기준인 27%이하를 만족하였고, 치환율 60%까지는 변동이 없었으나 80, 100%에서는 기준대비 각각 2.0~3.0%증가하였다. M. Valcuende 등(2015)의 이론에 따르면 고로수재슬래그 잔골재의 입형이 둥글고 유리질의 입자표면을 가지고 있어 단위수량이 감소된 것으로 판단되며, 공기량의 증가는 고로수재슬래그 내부의 미세공극에 의한 갭힌공기로 판단되어진다.

한편, 고로수재슬래그 잔골재 치환율에 따른 건조시멘트 모르타르의 재령, 양생조건별 압축강도비를 <그림 3>에 나타

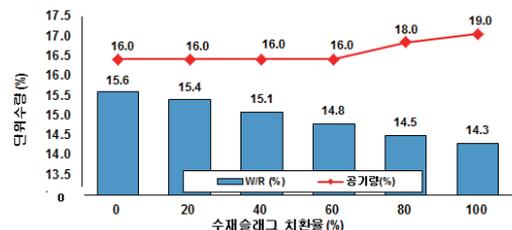


그림 2. 고로수재슬래그 잔골재 치환율에 따른 미장용 모르타르의 단위수량 및 공기량 변화

내었다. 수중양생의 경우 기준 모르타르와 비교하여 치환율 100%를 제외하고 모든 치환율에서 재령 3, 7, 28일 압축강도가 약 10%정도 높게 나타났다. 기건양생의 경우에 있어서도 수중양생과 유사한 경향을 보이고 있으며, 압축강도는 약 30%정도 증가하는 결과를 보이고 있다. 이는 고로수재슬래그 골재 치환율에 따른 동일 반죽 질기에서의 단위수량 감소 요인으로 판단되며, 강도경향으로 살펴볼 때 최적 치환율이 존재함을 확인할 수 있었다.

한편, <그림 4>는 고로수재슬래그 잔골재 치환율에 따른 건조시멘트 모르타르의 응결시간 측정결과로 기준 모르타르와 비교하여 치환율 20%까지는 유사하나, 40%를 기점으로 초결 및 종결시간이 점진적으로 길어지는 경향을 보이고 있다.

<그림 5>는 고로수재슬래그 잔골재 치환율별 건조시멘트 모르타르의 길이변화율 측정결과로, 기준 모르타르 대비 건조수축 안정성에서 양호한 결과를 보이고 있으며, 치환율 60%

에서 가장 높은 균열저항성을 보이는 것으로 나타났다.

골재의 알칼리 잠재 반응은 모르타르봉 방법으로 시험하였고, 오토클레이브를 사용하여 200℃에서 15기압으로 고온고압증기양생 2회 실시 후 38±2℃에 3개월 보관 후 팽창율을 기준 모르타르와 비교하였다. [표 5]에 고로수재슬래그 잔골재 치환율별 알칼리 잠재 반응성 실험결과를 나타내었으며, 3개월 후 기준 모르타르의 팽창율은 0.1%였고, 고로수재슬래그 골재 치환 시 0.058~0.099%범위로 기준 모르타르 팽창율 내에 존재함에 따라, 알칼리골재반응에 안정적임을 간접적으로 확인할 수 있었다.

3.2.2 복합슬래그(고로수재슬래그+페로니켈슬래그) 잔골재 치환율별 모르타르 물성

<그림 6>은 고로수재슬래그와 페로니켈슬래그를 일정비율 별로 혼합한 복합슬래그 잔골재 치환율별 건조시멘트 모르타

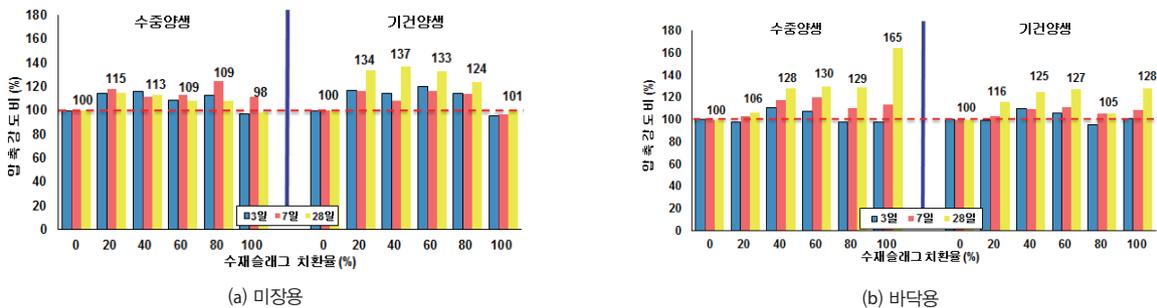


그림 3. 고로수재슬래그 잔골재 치환율에 따른 미장용, 바닥용 모르타르의 압축강도비

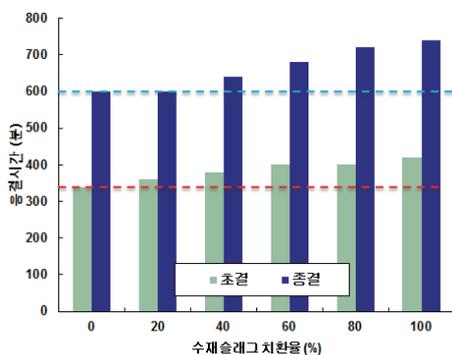


그림 4. 고로수재슬래그 잔골재 치환율에 따른 바닥용 모르타르의 응결시간

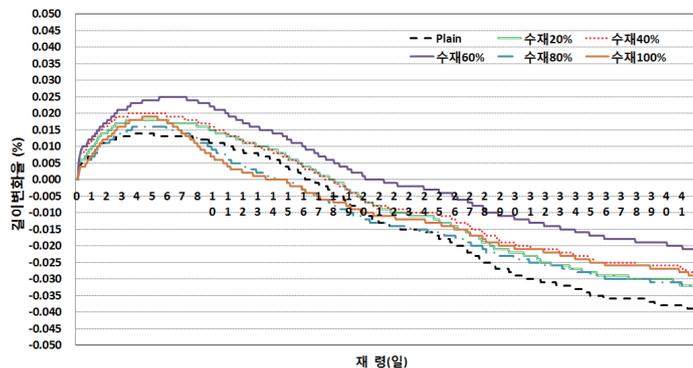


그림 5. 고로수재슬래그 잔골재 치환율별 바닥용 모르타르 길이변화율

[표 5] 알칼리잠재반응성 시험결과

구분	탈형직후 (mm)	오토클레이브 2회(mm)	오토클레이브 2회 팽창율(%)	3개월(mm)	3개월 팽창율(%)	외관	비고
Plain	160.197	160.337	0.087	160.357	0.100	양호	3개월 후 0.1% 미만 : 반응성 없음 0.1% 이상 : 반응성 있음 으로 판정코자 함.
수재-20%	160.161	160.316	0.097	160.315	0.096	양호	
수재-40%	160.131	160.266	0.084	160.290	0.099	양호	
수재-60%	160.132	160.245	0.071	160.288	0.097	양호	
수재-80%	160.234	160.322	0.055	160.327	0.058	양호	
수재-100%	160.233	160.315	0.051	160.327	0.059	양호	

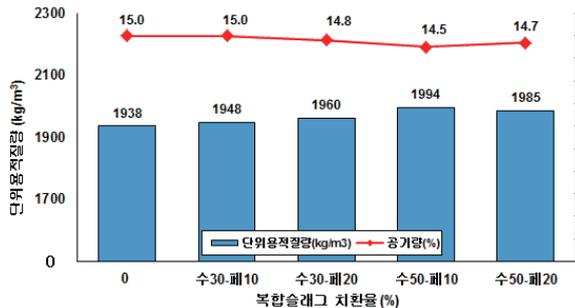


그림 6. 복합슬래그 잔골재 치환율별 미장용 모르타르의 단위용적질량 및 공기량 변화

르의 단위용적질량과 공기량 변화를 나타낸 것이다. 공기량은 본고에서 적용된 모든 치환율에서 KS L 5220의 기준인 27% 이하를 만족하였고, 기준 모르타르와 유사한 결과를 나타내었다. 한편, 복합슬래그 경우 일반 건조사에 비해 다소 높은 밀도로 인해 치환율이 증가할수록 단위용적질량은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 모르타르의 단위용적질량 증가는 미장작

업성에 영향을 줄 수 있으므로, 복합슬래그골재의 적정치환율은 50%이내로 적용됨이 바람직하며, 복합슬래그골재 구성비율에 있어서도 골재 밀도가 상대적으로 높은 페로니켈슬래그의 적정 치환율은 20%를 넘지 않는 범위로 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

<그림 7>은 복합슬래그 잔골재 치환율에 따른 건조시멘트 모르타르의 양생조건별 압축강도비를 나타낸 것이다. 미장용의 경우, 기준 모르타르와 비교하여 3일 강도는 다소 낮은 경향을 보이고 있으나, 재령7, 28일 강도는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 바닥용의 경우 전 재령에서 양호한 강도 증진 경향을 보이고 있다. 최연양 등(2010)의 이론에 따르면 복합슬래그 중 페로니켈슬래그의 매끄러운 표면과 둥근입형으로 인한 불 배어링 작용으로 동일 반죽질기에서 단위수량이 저감되기 때문인 것으로 판단된다.

<그림 8>은 복합슬래그 잔골재 치환율에 따른 건조시멘트 모르타르의 길이변화율 시험 결과를 나타낸 것이다. 모든 치

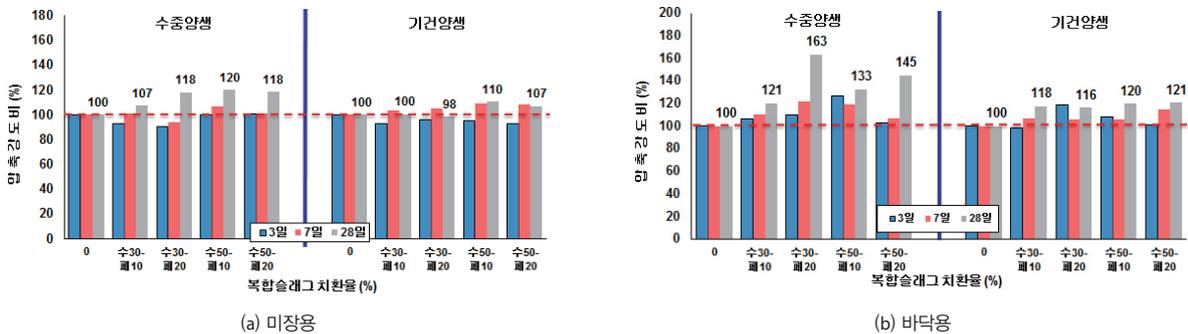


그림 7. 복합슬래그 잔골재 치환율에 따른 모르타르의 압축강도비

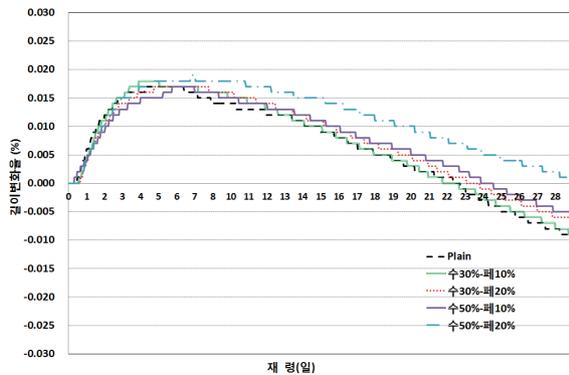


그림 8. 복합슬래그 잔골재 치환율에 따른 바닥용 모르타르의 길이변화율

환율에서 기준 모르타르대비 양호한 건조수축 변화율을 보여 주고 있으며, 이는 단위수량 저감효과에 의한 영향으로 판단되며, 현장시공 시 균열 저항성이 기존 대비 우수할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

철강산업의 부산물로 발생하는 고로수재슬래그와 페로니켈슬래그를 건축용 건조시멘트 모르타르용 잔골재로 적용 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고로수재슬래그 잔골재의 경우 밀도, 마모저항성 및 단위용적질량 등이 일반 잔골재의 품질수준과 유사하여 건조시멘트 모르타르 제조에 사용되는 건조사와 치환 적용이 가능

할 것으로 판단되며, 페로니켈슬래그의 경우 다소 높은 밀도와 단위용적질량 증가로 제한적 치환량이 요구되어진다.

2) 고로수재슬래그 잔골재를 단독 치환한 경우 단위수량이 감소하였고, 이에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 80% 이상의 치환율에서는 공기량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 공기량의 증가는 미장작업성을 향상시키지만 연행공기가 아닌 갇힌 공기량이 많아지면서 미장작업성을 저하시키므로 적정 치환율은 50% 이내가 바람직하다고 판단된다.

3) 고로수재슬래그골재와 페로니켈슬래그골재를 복합화한 복합슬래그 잔골재의 모르타르 적용 검토결과, 단위수량 저감 효과에 의해 강도증진 효과를 보이고 있으며, 골재로서의 안정성 확인을 위한 골재의 알칼리 잠재 반응성은 3개월 팽창율 0.1% 이내로 기존 일반잔골재보다 양호한 안정성을 보이고 있다. 길이변화율 역시 기준 모르타르 대비 단위수량 저감 효과에 의해 안정된 건조수축을 변화를 보이고 있어, 현장타설 시 균열저항성이 향상될 것으로 판단되어진다.

4) 한편, 복합슬래그 잔골재의 페로니켈슬래그는 골재 자체의 다소 높은 밀도로 모르타르의 단위용적질량을 증가시켜 미장작업성에 영향을 주게 되므로 적정 치환율은 20% 이내가 바람직하다고 판단된다.

이상의 결과는 향후 모르타르용 잔골재의 수급불안에 대응할 수 있는 대체골재로서의 역할이 충분히 가능할 것으로 판단되며, 복합슬래그골재로서의 KS규격 제도 마련에 기초가 될 수 있는 연구 자료로 활용되기를 기대해 본다.

참고문헌

1. 국토교통부 (2018), 2018년도 골재수급계획.
2. 국토교통부, 해양수산부 (2017) 골재수급 안정대책, 제22회 국정현안 점검조정 회의자료.
3. 정은혜, 이건호, 서신석, 노현승, 김정환 (2008), "순환골재를 적용한 건조모르타르의 기초적 물성에 관한연구", 2008 시멘트심포지엄, pp.159~166.
4. 최연왕, 박만석, 배수호, 이훈하, 조봉석. (2010), "콘크리트용 잔골재로서 수세 페로니켈슬래그의 품질특성", 2010 대한토목학회 학술발표논문집, pp.1462~1465.
5. M. Valcuende, F. Benito, C. Parra, I. Minano. (2015). Shrink of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate, Construction and Building Materials, 76, 1-9.

담당 편집위원 : 김원기(아세아시멘트)