

연(鉛)슬래그 표준화 조사·연구

(Application and Standardiazation of Lead slag aggregate for concrete)

건설서비스과 화공사무관 박순덕
(02) 509-7401~2, sdpark@ats.go.kr

1. 연구개발의 필요성 및 목적

가. 연구의 필요성

본 연구는 연간 약 12만톤 정도 발생되고 있는 연슬래그에 대하여 폐자재의 재활용 극대화를 도모하고, 골재난 해소를 위하여 콘크리트 제품 등에 사용하는 골재로서의 활용 가능성 파악할 필요가 있었으며, 도출된 연구 결과 데이터를 토대로 표준화하여 공적 기준을 하고자 한다.

고려아연(주)은산제련소의 아연과 연제련 공정에서 발생하는 슬래그의 재활용 문제 대두와 최근 천연골재의 부족으로 인한 동소 주변 콘크리트 또는 시멘트 제품 생산업체의 애로사항을 해결하고, 야적, 폐기 또는 매립시 대두되는 환경문제와 활용에 따른 자원절약 등 연슬래그의 적정처리로 다양하고 복합적인 효과를 거둘 수 있게 된다. 이러한 각종 부산물의 재활용과 그에 따른 관련기술 개발이 다각적으로 추진되고 있으며, 이미 고로슬래그는 그 활용성이 대단히 높고 고부가가치를 창출하고 있으며, 동슬래그 또한 어느 정도의 안정적 사

용이 추진되고 있다. 동슬래그와 형태와 생산공정 면에서 유사한 연슬래그도 충분히 그 활용성이 있을 것으로 판단되어 그 가능성을 본 연구를 통하여 진단하고자 한다.

연슬래그의 재활용은 먼저 건축 및 토목분야의 기본 소재인 '골재'의 관점에서 연구할 필요가 있다. 또한 이것을 기본 재료로 하는 시멘트 2차가 공제품의 적용성을 검토하고 천연재료의 대체 정도 또는 효과를 연구할 필요에 기인하여 연슬래그 골재를 어떻게 활용할 것인가에 대한 기술적 접근과 검토방법이 상당히 중요하므로 효과적인 실용화 방안이 요구되는 것이다.

나. 연구의 목적

이 조사 연구는 국내 건설재료 산업 특성에 대한 이해를 바탕으로 연 제련공정 중 발생하는 슬래그를 골재 대체재로 활용하기 위한 기술 구축으로 계획되었으며, 본 연구를 통하여 동 부산물이 환경친화성을 유지하여야 하고 골재로서의 특성

유지 여부의 파악과 실제 적용 가능성을 실험적인 평가를 통하여 판단하고, 이러한 모든 가능성이 사용에 부합될 경우에는 그 사용의 극대화를 도모하기 위하여 국가표준으로 제정하여 공적 기준화를 도모하고자 하는 것과 국내 건설산업에 실질적으로 활용하기 위하여 이 연슬래그 골재 연구의 목적으로 추진하였다.

2. 연구개발의 내용 및 범위

연슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위하여 기술적 검토와 가능성을 파악하고자 하였으며 이를 위해서 다음과 같은 연구 내용과 범위로 수행되었다.

- 가. 환경친화성 관련 시험(중금속 용출시험)
- 나. 연슬래그 골재의 물리적 특성 및 화학적 조성 분석
- 다. 연슬래그 골재를 사용한 모르터 및 콘크리트의 특성 및 활용성 검토

- 라. 시멘트 2차 가공제품의 적용성을 검토하고 천연재료의 대체 정도를 연구
- 마. 콘크리트용 연슬래그 골재의 한국산업규격(안) 작성 및 제정 추진
- 바. 연슬래그 골재 재활용 가능분야 및 향후 기술개발 방안(Master Plan) 제시

3. 조사연구 결과

가. 환경친화성 관련 시험(중금속 용출시험)

연슬래그에 대한 용출은 폐기물관리법의 폐기물 공정시험법상의 기준 항목인 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 구리(Cu) 등을 분석한 결과 모든 시험 항목에서 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 동법에 의한 방법과 보다 가혹한 조건의 시험방법인 TCLP(Toxic Characteristic Leaching Procedure) 시험방법에 의한 시험도 실시하였는데 그 기준을 만족하고 있다.

<폐기물관리법에 의한 유해물질 용출량 시험결과>

(단위 : mg/L)

성분	납(Pb)	동(Cu)	비소(As)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	크롬(Cr ⁶⁺)
용출량 기준	3.0 이하	3.0 이하	1.5 이하	0.005 이하	0.3 이하	1.5 이하
시험결과1	0.04	0.02	ND	ND	0.03	ND
시험결과2	0.015		0.026	0.0008	0.161	-

※ ND : 검출안됨(Not Detected)

<TCLP 시험방법에 의한 유해물질 용출량 시험결과>

(단위 : mg/L)

성분	납(Pb)	비소(As)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	크롬(Cr ⁶⁺)
용출량기준	5.0 이하	5.0 이하	0.2 이하	1.0 이하	5.0 이하
시험결과1-1	1.66	0.02	ND	0.04	-
시험결과1-2	5.0	0.14	ND	ND	-
시험결과2-1	4.0	0.146	0.002	0.236	
시험결과2-2	3.0	0.193	0.0003	0.189	

나. 연슬래그 골재의 물리적 특성 및
적 조성 분석
보통 대부분이 입상의 형태이며 극히 적은 량이
참상형태를 보이고 있다. 일반 천연골재보다 비중

이 44% 정도 높은 것이 특징적이다. 화학적 조성
으로는 철분과 산화규소가 전체의 약 70% 이상을
차지하고 있으며 제련 잔분인 아연과 납이 고형화
된 안정적 상으로 잔존하고 있다.

<연슬래그의 물리적 성질>

구 분	비 중	흡수율(%)	조립율(F.M)	단위용적중량(kg/m ³)	실적율(%)
연슬래그	3.73	0.9	3.2	1.83	48.7

<연슬래그의 화학조성>

(단위 : mg/L)

성분	이산화 규소 (SiO ₂)	산화 칼슘 (CaO)	철 (FeO 로서)	산화알 루미늄 (Al ₂ O ₃)	아연 (Zn)	산화마 그네슘 (MgO)	납(Pb)	안티몬 (Sb)	구리, 기타
조성	20~30	3~15	40~60	4~7	2~10	1~4	0.2~1.0	0.65	0.14

다. 콘크리트용 골재로서의 모르타르 시험

연슬래그를 배합에 따라 잔골재 대체로 하여 사

<배합계획에 따른 연슬래그의 골재 시험결과 종합데이터>

시험체 번호	배합비 (C : A)	슬래그 혼입율 (% <i>vol</i>)	플로 (<i>cm</i>)	압축강도(<i>Nmm</i> ²)				휨강도 (<i>Nmm</i> ²)
				7일	28일	56일	91일	
A-1	1 : 2	0	18.0	35.8	46.9	54.7	60.4	2.2
A-2		25	17.8	35.7	47.4	52.9	56.0	2.0
A-3		50	19.0	33.6	49.7	51.5	53.2	2.2
A-4		75	17.5	35.5	45.9	51.6	52.0	2.2
A-5		100	15.1	36.9	50.8	53.6	62.8	2.0
B-1	1 : 3	0	17.5	34.4	44.4	50.6	53.8	1.8
B-2		25	16.8	32.9	45.6	50.8	54.3	1.8
B-3		50	16.0	34.5	43.1	48.1	51.9	2.1
B-4		75	15.2	32.7	41.5	51.7	55.9	1.9
B-5		100	12.5	36.1	47.3	52.9	56.1	2.1
C-1	1 : 4	0	18.5	29.4	38.4	41.0	37.6	1.5
C-2		25	17.1	30.9	35.5	39.3	41.6	1.3
C-3		50	16.3	22.8	33.2	36.5	34.4	1.5
C-4		75	16.4	24.9	36.0	37.8	39.4	1.6
C-5		100	14.8	20.3	32.3	35.3	33.4	1.4
D-1	1 : 5	0	18.2	15.7	21.8	22.4	24.9	1.0
D-2		25	17.2	18.3	26.0	21.8	28.4	0.9
D-3		50	16.5	17.8	25.9	22.4	24.0	0.9
D-4		75	15.9	16.0	22.4	23.6	25.3	1.0
D-5		100	16.0	11.1	18.9	20.5	18.7	1.0

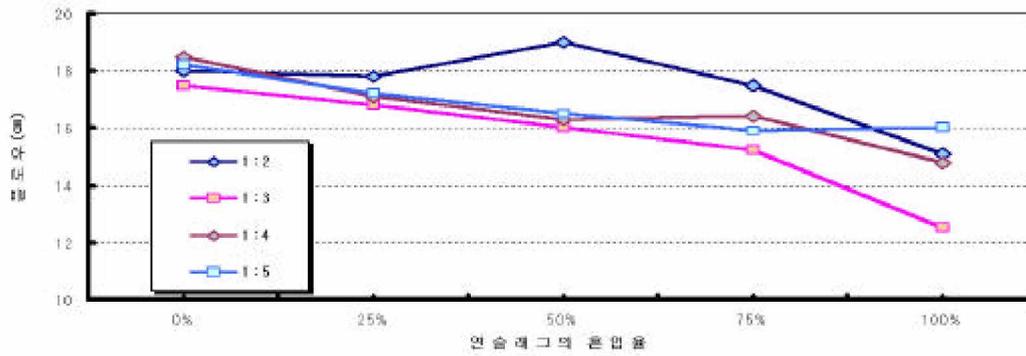
(1) 플로
본 실험에서는 세척 해시를 잔골재로 사용하고

용하였는데, 연슬래그는 잔골재와 조립율은 비슷하
나, 비중이 크기 때문에 혼입율이 증가 할 수록 플

연구보고

감소하였다.

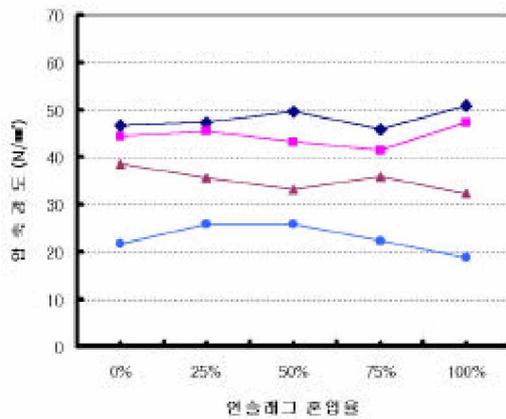
<연슬래그 혼입율에 따른 플로 측정결과>



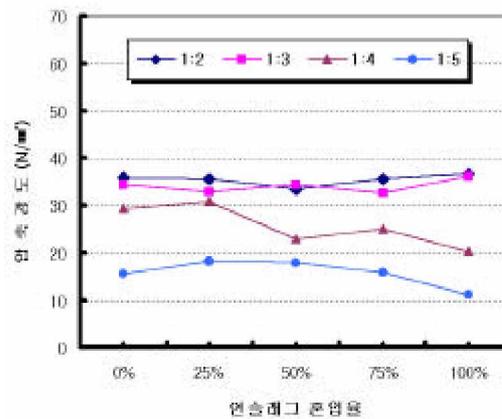
(2) 압축강도

연슬래그 혼입율에 따른 압축강도는 모든 배합에서 대체적으로 적은 쪽으로 변화하는 추세를 보였으며, 연슬래그의 혼입율은 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

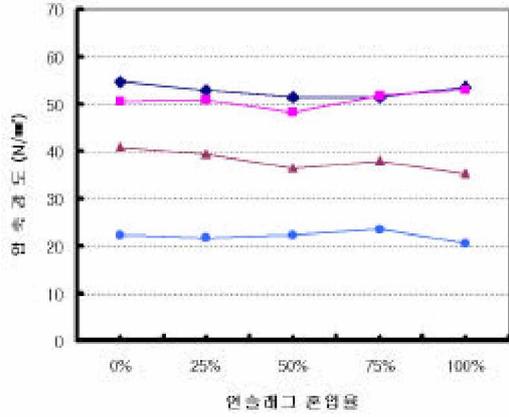
<연슬래그 혼입율에 따른 압축강도 측정결과>



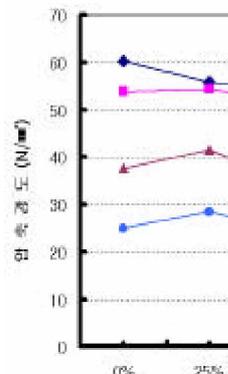
① 재령 7일



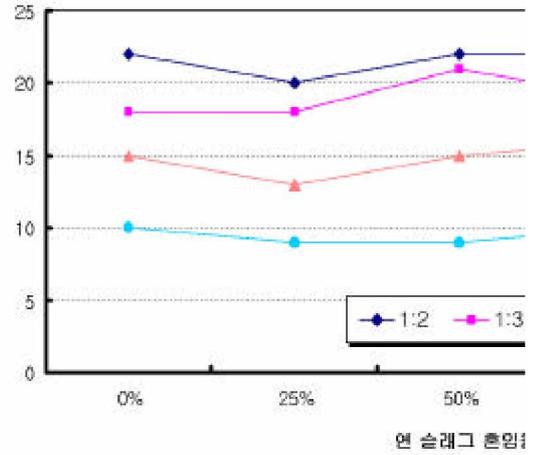
② 재령 28일



③ 재령 56일



④ 재령 91일



(3) 휨강도

연슬래그 혼입율에 따른 휨강도는 재령 28일에서 0.9~2.2N/mm²의 값을 나타냈다. 휨강도 역시 강도 특성에 따라 배합비가 높아질수록 강도가 저하되는 경향을 나타내었으며, 압축강도와 유사한 결과를 나타냈다.

<연슬래그 혼입율에 따른 휨강도 측정결과>

라. 연슬래그 골재를 활용한 콘크리트 제품

아직 국내에서 연슬래그를 이용한 콘크리트벽돌, 인터로킹블록 등과 같은 콘크리트 2차 제품의 적용사례가 없어 기존의 천연골재를 사용하여 콘크리트벽돌과 인터로킹블록을 제작하고 있는 K사의 배합을 기준으로 제품의 제조와 활용을 검토하였다.

(1) 콘크리트 벽돌(KS F 4004)

본 실험에서 표의 배합으로써 콘크리트 벽돌을 제조하였다.

<콘크리트 벽돌 제조 배합비>

재료	시멘트	모래	슬래그	석분	lbatch
제품	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	총중량(kg)
콘크리트 벽돌	150	660	300	540	1,650

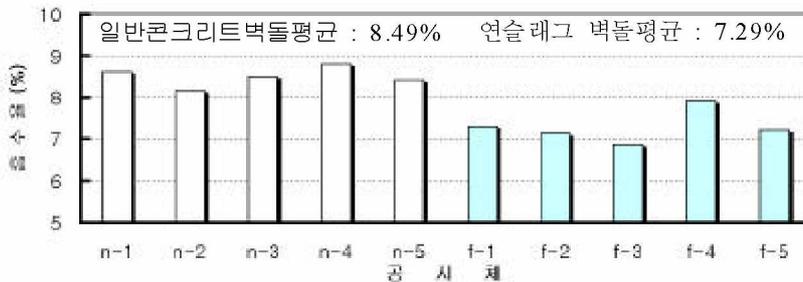
(가) 치수 및 허용오차

연슬래그를 함유한 제품의 경우에도 일반 벽돌과 동일한 수준의 치수 안정성을 나타냈다.

(나) 흡수율

일반콘크리트벽돌평균 흡수율 : 8.5%, 연슬래그 벽돌평균 흡수율 : 7.3%

<콘크리트 벽돌의 흡수율 측정결과>



(다) 압축강도

실험결과 연슬래그를 혼입한 벽돌의 압축강도는 9.5~10.2N/mm²의 값을 보여 일반벽돌의 압축강도 9.2~9.6N/mm²과 비슷한 강도를 나타냈다.

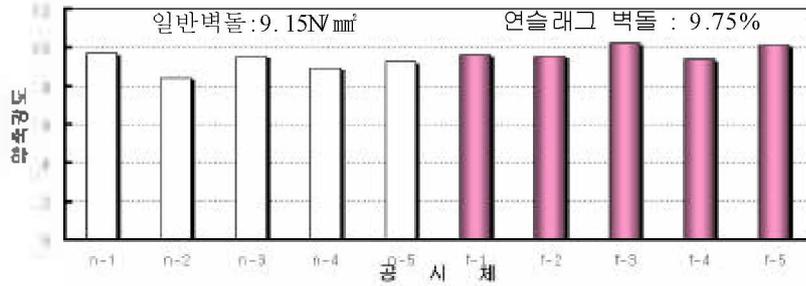
(2) 보차도용 인터로킹블록(KS F 4419)

(가) 치수 및 허용오차

연슬래그를 활용한 인터로킹블록의 경우도 가로는 -2~+1mm, 세로는 -0.4~+0.1mm, 두께는 -1mm의 허용차를 보이고 있어 KS F 4419의 품질기

· 만족하고 있는 것으로 나타났다.

<콘크리트 벽들의 압축강도 측정결과>

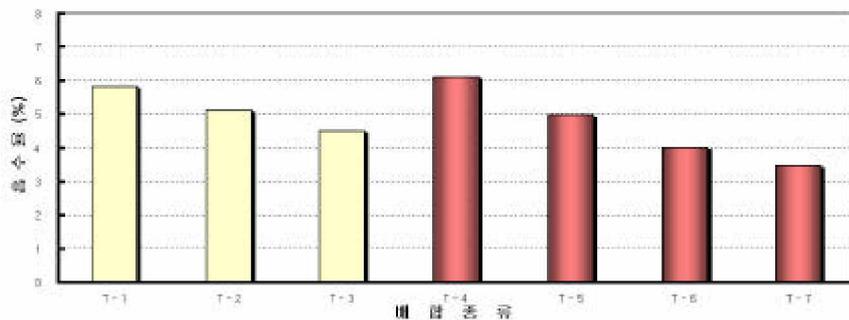


(나) 흡수율

인터로킹블록의 흡수율 실험결과, 무혼입 인터로킹블록은 6.1~8.0%의 흡수율을 가지는 것으로 나타났으며, 연슬래그를 함유한 인터로킹블록의 경우에는 연슬래그 함유율에 따라 3.5~6.1%의 까지의 흡수율을 나타내고 있어 KS F 4419(보차도용 인터로킹 블록)에서 규정하고 있는 흡수율 기준 10%를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 흡수율이 낮은 연슬래그가 양생이 완료된 이후에

도 지속적으로 결정질 재료로 남아있어 슬래그 자체가 흡수율이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 인터로킹블록은 보도용 바닥재로 사용되기 때문에 흡수율이 낮을수록 내구성이 증가되어 장기적인 사용상에 좋은 영향을 미친다. 또한 보도용 바닥재의 특성상 벽돌과 같이 건축물의 하중에 영향을 미치는 용도가 아니기 때문에 인터로킹블록의 재료로 매우 적합한 골재로 나타났다.

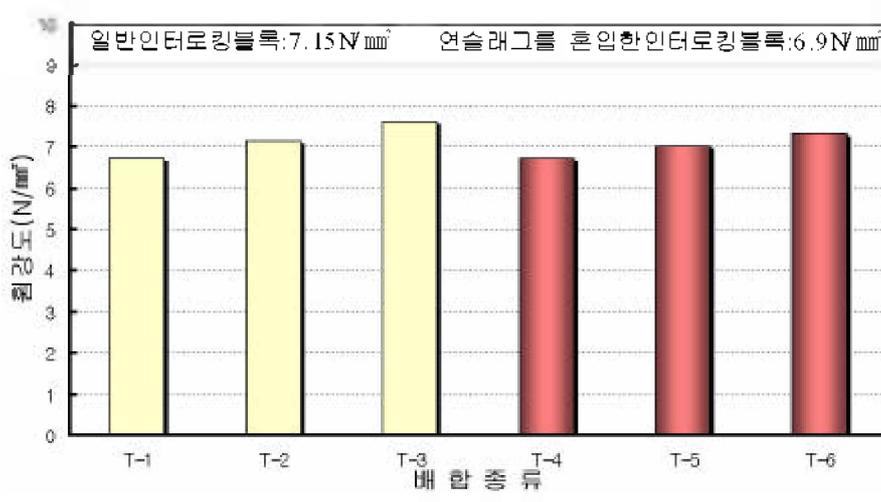
<인터로킹블록의 흡수율 측정결과>
 무혼입인터로킹블록: 5.14% 연슬래그를 혼입한 인터로킹블록: 4.63%



(다) 휨강도

KS F 4419에서 규정하고 있는 휨강도(보도용 4.9N/mm², 차도용 5.9N/mm²)를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

<인터로킹블록의 휨강도 측정결과>



(3) 콘크리트경계블록(KS F 4006)

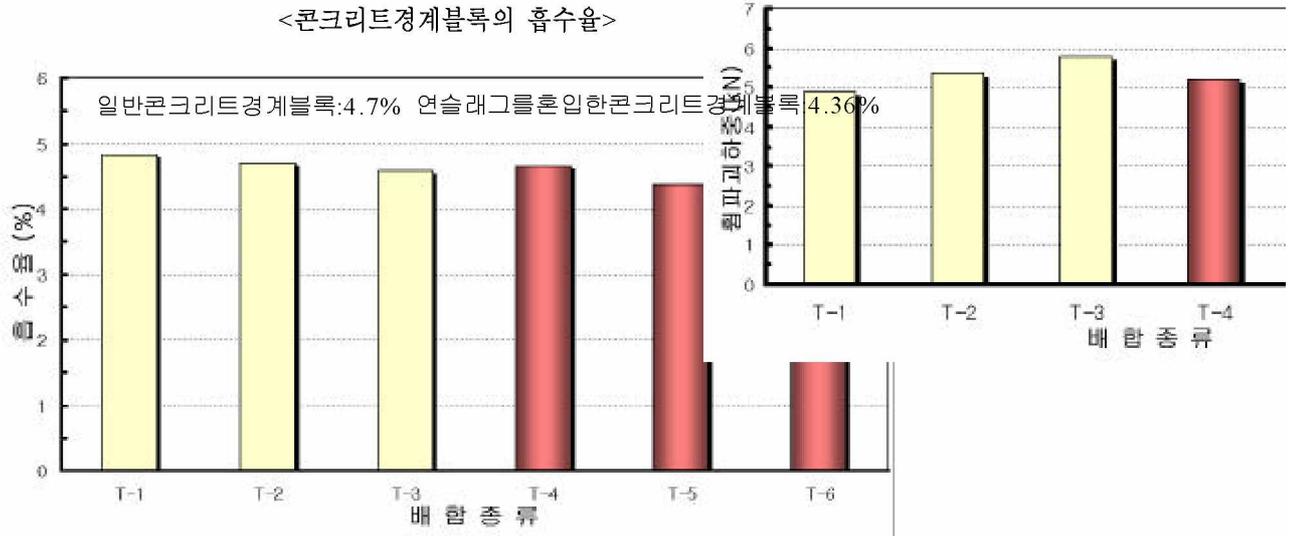
(가) 차수 및 허용오차

실험결과 일반 콘크리트경계블록의 경우 가로는 -1~+1mm, 세로는 -2~+1mm, 두께는 -1~+1mm의 허용차를 보이고 있어 KS F 4006(콘크리트경계블록)에서 규정하고 있으며, 연제련 슬래그를 활용한 콘크리트경계블록의 경우도 가로는 -2~+1mm, 세로는 -0.4~+0.1mm, 두께는 -1mm의 허용차를 보이고 있다.

(4) 흡수율

콘크리트경계블록의 흡수율 실험결과, 일반 콘크리트경계블록은 4.1~4.7%의 흡수율을 가지는 것으로 나타났으며, 연제련 슬래그를 함유한 콘크리트경계블록의 경우에는 연제련 슬래그 함유율에 따라 3.2~4.5%까지의 흡수율을 나타내고 있어 KS F 4006(콘크리트경계블록)에서 규정하고 있는 흡수율 기준 5%를 만족하는 것으로 나타났다. 전체적인 흡수율은 연제련 슬래그 골재의 함유량에 따라 일정하게 흡수율이 낮아지는 경향을 나타냈다.

<콘크리트경계블록의 흡수율>



(3) 휨과괴하중 (휨강도)

실험결과 일반 콘크리트경계블록에 실시한 배합의 경우 휨과괴하중은 4.9~5.8kN까지 나타났으며, 연제련 슬래그의 함유율이 높아질수록 강도는 감소되는 것으로 나타났다. 특히, 연제련 슬래그를

혼입한 20%의 배합은 콘크리트경계블록의 휨강도, 최소 4.9kN으로 KS F 4006에 규정하고 있는 휨강도를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그 외에 30% 이상의 배합은 성형성이 나빠 강도 측정을 실시하지 않았다.

일반콘크리트경계블록:5.35kN/mm² 연슬래그를혼입한콘크리트경계블록:5.05kN/mm²

4. 결론

- 연슬래그를 대상으로 건설용 골재로서 요구되는 물리적 특성시험 결과, 일반적인 모래와 비교하여 비슷한 입도 정도와 높은 비중을 지니며, 모래와 비교하여 약간 적은 0.2~0.5% 범위의 흡수율을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 단위용적중량은 연슬래그 골재의 종류에 따라 다소 차이가 있으나 1.83kg/m³의 범위를 보이며 천연모래에 비하여 20~30% 높은 수준을 보였다.
또한 점토 덩어리 등의 유해물과 유기물질이 거의 없으며, 안정성 있는 골재로서 천연모래와 비교하여 중량 이외에 제반 특성의 큰 차이가 없어 한국산업규격인콘크리트용 골재(KS F 2526)에서 규정한 제반 품질을 만족하고 있어 일반적인 잔골재인 모래를 대체하여 사용이 가능한 것으로 나타났다.
- 연슬래그를 대상으로 환경유해성 검토를 목적으로 폐기물공정시험법은 물론, TCLP법에 의한 용출시험을 실시한 결과 규정한 규제대상별 허용한도 이내로 나타나 환경유해성은 없는 것으로 나타났다.
- 연슬래그의 모르타르 제조용 골재로서 사용성에 대한 실험결과, 압축강도를 비롯한 제반 강도특성은 뚜렷한 특이성의 변화를 보이지 않아 일반적인 모래를 대체 사용하는 것이 가능하며,

에서의 압축강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 연슬래그 혼입율에 따라 인장강도 및 휨강도 등이 큰 변화는 없었다. 아울러 강도 및 유동성을 고려할 때, 모르타르 제조시 천연모래를 약 25~50% 대체 사용이 바람직한 것으로 나타났다.

- 연슬래그의 콘크리트 제조용 골재로서 사용성에 대한 실험결과, 천연모래에 비하여 비교적 높은 비중에 의한 재료분리가 심할 것으로 예상되었으나, 그다지 심한 재료분리가 일어나지 않았으며 천연모래를 대체한 연슬래그 혼입율 50%까지는 전체적으로 압축강도가 약간 증진되는 특성을 보였다.
또한 연슬래그를 사용하지 않은 경우에 비하여 중성화가 증가되는 것으로 나타났으나 물 시멘트비를 감소시켜 내구성 확보가 가능한 것으로 나타났다. 아울러 연슬래그를 사용한 콘크리트의 단위용적중량은 1.83t/m³의 범위를 보여 해양구조물, 중량콘크리트 또는 방화콘크리트 등의 제조에 더욱 유용할 것으로 판단된다.
- 연슬래그를 사용하여 콘크리트 2차 제품의 적용성 실험을 실시한 결과, 연슬래그를 사용한 콘크리트벽돌 및 인터로킹블럭의 경우 기존의 제품에 비하여 낮은 흡수율 및 강도 개선 등 특성을 보임으로서 연슬래그 골재를 사용할

경우 품질이 개선되는 것으로 나타났다.

연슬래그 골재를 사용한 각 제품별로 한국산업 규격에서 규정한 품질을 만족하는 것으로 나타나고 있으며, 연슬래그 골재의 콘크리트 벽돌 및 인터로킹블럭 생산에 활용이 가능하였다.

이상의 연구결과를 종합할 때, 현재 국내에서 생산되는 연슬래그는 일반적인 모래를 대체하여 사용할 수 있는 골재로서 인정되고 그 용도는 모르타르, 콘크리트 및 다양한 종류의 콘크리트 2차 제품(인터로킹블럭, 콘크리트벽돌 등)에 활용이 가능하다.

5. 연슬래그 골재 재활용 가능분야 및 향후 기술개발 방안(Mster Plan) 제시

- 슬래그의 강도면에서 고로슬래그 보다는 높기 때문에 미분말화가 다소 어려울 것으로 보여지지만, 고로슬래그와 같이 연슬래그도 고부가가치를 창출을 위한 미분말화의 연구가 필요하다.

- 점토벽돌과 같은 고온 소성벽돌의 재료로 활용할 수 있는 가능성도 있으며, 색상이 흑색이라는 점을 활용하여 소성벽돌 등의 표면에 연슬래그를 뿌려 다양한 색상효과나 질감을 유도할 수 있다.
- 연슬래그 자체의 비중이 큰 점을 활용하여 테트라포트와 같은 중량물 제작 콘크리트용 골재로도 좋은 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.
- 아울러 토목용으로는 도로의 보조기층 및 연약지반 개량제, 아스팔트 콘크리트, 매립용 및 채움재 등 다양한 용도로 적용이 가능한 것으로 판단된다. 따라서 각 용도별 합리적인 연슬래그 골재의 활용기술 개발에 대한 지속적인 노력이 요구된다.

