

동제련 슬래그를 혼입한 모르타르의 강도 특성 연구

The Study on Properties of Mortar with Copper Smelting Slag

박 조 범* 지 석 원** 서 치 호***
Park, Cho Bum Ji, Suk Won Seo, Chee Ho

ABSTRACT

Recently, the recycling of the by-products was attempted to various fields. One of the major industry, the copper manufacturing industry produced a lot of slags. In this study, the copper smelting slag was used to use practically application for the aggregate of concrete. To find the optimum mixing ratio of mortar with the copper smelting slag as substitution for sand, the mixing ratio was increased 1:2 to 1:5 step by step and every mixture was contained 5 steps sand substitutive ratio. The substitutive ratio of sand was increased 25% step by step from 0% to 100%.

The result of this study was shown as follows.

1. In the every mixture, as the substitutive ratio was increased, the flow was decreased 3.64% from 18cm, and the unit content weight was increased 5.5% in average. 2. The property of the strength was judged that it was more affected W/C and mixing ratio than the copper smelting slag.

1. 서 론

산업부산물의 재활용은 환경문제와 자원의 효과적인 재활용 차원에서 어느 분야보다도 활발한 연구 활동이 이루어지고 있으며, 그 대상 역시 다양하다고 할 수 있다. 이에 따라 건설분야에서도 주요건설 재료인 콘크리트 원재료에 적용되는 경우에는 수요가 무한하며, 소비에 따른 처리가 가능하고, 여러 가지 공법과 기술을 바탕으로 응용할 수 있는 가능성이 있는 것으로 알려져 있다.

철강과 더불어 제조업의 근간이 되는 동제련에서는 60만톤에 이르는 동제련 슬래그가 생산되고 있으며, 대부분 시멘트 원료 및 샌드 블라스팅 재료로 이용되고 있다. 향후, 생산량 증가 등에 따라 활용 되지 못하고 적치되어지는 양은 늘어날 전망이다. 따라서 동제련 슬래그의 경우도 건설용 소재로서 활용하기 위한 기술적 검토가 필요하며, 이는 곧 환경보전과 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 사회적, 경제적으로 큰 의미를 갖는 일이라 할 수 있겠다. 동제련시 발생하는 동제련 슬래그는 각종 불순물이 없어, 그 취급과 이동이 용이하여 다량의 적치화 과정에서 발생하는 환경오염을 근원적으로 예방한다는 차원에서 다양한 기술개발과 다량 수요가 가능한 토건용 골재의 활용방안이 요구된다

이에 본 연구에서는 국내 L사 동제련 공정과정에서 발생하는 동제련 슬래그의 물리적 특성을 규명하고, 산업부산물의 재활용차원으로 콘크리트용 골재로서의 적용 가능성을 검토하기 위하여 동제련 슬래그를 혼입한 모르타르를 제조하여 그 특성을 분석하여, 향후 콘크리트용 골재로 사용시에 콘크리트

* 정희원, 건국대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

** 정희원, 건국대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

*** 정희원, 건국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

의 배합의 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 동제련 슬래그의 발생과정

동제련 슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위하여, 동제련 슬래그의 발생과정을 통하여 그 특징을 살펴 보면, 동제련 과정에서 동정광 중의 철분과 석회석, 규석이 결합하여 생성된 물질을 용융상태에서 고압수에 의해 급냉, 수쇄하여 세립화한 것을 말한다. 일반적으로 동정광은 황화광정광을 이용하며 주로 $CuFeS_2$ 로 Cu, Fe, S의 양이 비슷하다. 이러한 정광을 용제(flux)인 규사(SiO_2)와 혼합하여 고농도의 산소부화공기와 반응시키면 정광 중의 황(S)은 산소와 결합하여 가스상태인 SO_2 로 연소되고, 이 gas는 포집되어 황산(Sulfuric Acid)으로 제조된다. Fe는 산화물 형태인 FeO 로 역시 산화되어 용제인 SiO_2 와 반응하여 슬래그를 형성하고, Cu가 주성분인 매트와 비중차에 의해 분리, 제거되어진다.

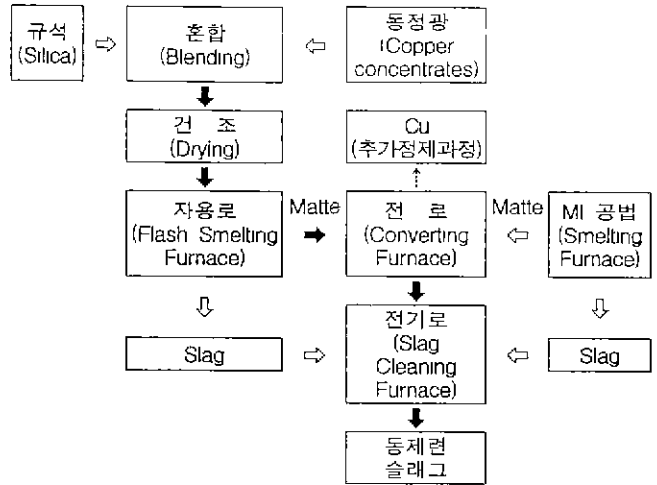


그림 1. 동제련 슬래그의 발생과정

3 실험방법

3.1. 실험재료

3.1.1. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 S사 제품인 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

3.1.2. 잔골재

(1) 모래

모래는 인천산 세척해사를 사용하였으며, 물리적 성질은 KS F 2504(잔골재의 비중 및 흡수량 시험방법)와 KS F 2505(골재의 단위용적 중량 시험방법)에 따라 물성 시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 잔골재의 물리적 성질

구분	비중	흡수율(%)	조립율	단위용적중량 (kg/m^3)	실직율(%)
인천산해사	2.59	0.90	2.62	1,816	63.6
동제련슬래그	3.74	0.52	3.40	2,400	66.5

(2) 동제련 슬래그

본 실험에 사용한 동제련 슬래그는 국내 L사에서 생산된 슬래그이며, 생산방식에 따라 연속동제련 공법과 자용로공법이 있으며, 본 실험에서는 자용로공법으로 생산된 동제련 슬래그를 사용하였다.

동제련 슬래그의 화학적 성분은 철분(Fe, 47%)과 규산질(SiO_2 , 30%)이 주성분이며, 그 외에 미량의 알루미늄(Al_2O_3),

표 2 동제련 슬래그의 화학적 성분

구분	Fe	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Cu	CaO
자용로 공법	46.39	30.65	6.93	4.10	1.04	0.97	0.95

석회(CaO), 마그네슘(MgO) 등을 함유하고 있다. 석회와 마그네슘이 규산과 결합되어 화학적으로 안정된 유리질 상태의 입자를 이루고 있으며, 염분은 없는 것으로 알려져 있다. 특히, 철분이 다량 함유되어 검은 색을 띄고 있으며, 이에 내화성능이 우수한 것으로 보고되고 있다.

동제련 슬래그는 관한 입도 규정이 국내에 제정된 것이 없기 때문에 일본의 규정을 참고로 하였으며, JIS A 5011-3(콘크리트용 슬래그 골재, 제 3부 : 동슬래그 골재, 1997)에 규정된 동제련 슬래그의 입도의 구분(5~0.3mm)에 대하여 본 실험에서 사용한 동제련 슬래그는 이의 규정을 만족하고 있다.

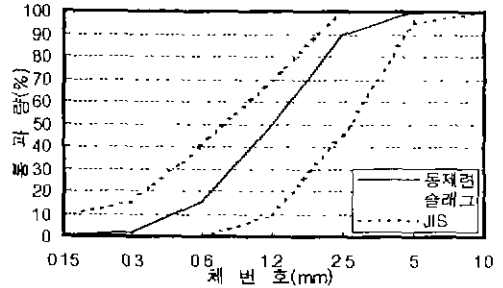


그림 2. 동제련 슬래그의 입도분포곡선

3.2. 실험계획 및 배합

동제련 슬래그를 콘크리트용 골재로서의 적용성을 평가하기 위하여 시멘트와 잔골재의 용적배합을 기준으로, 각 배합별로 물·시멘트비를 조정하여, 무혼입 배합에서 일반적으로 시공성이 양호한 플로우를 $18 \pm 0.5 \text{cm}$ 로 고정하여 인자로 하고, 배합비를 1:2에서 1:5까지 4수준으로 하였으며, 무혼입 배합에서 목표플로우를 나타낸 배합에 따라, 각 배합별로 동제련 슬래그를 잔골재 대체제로 하여 혼입율을 0%에서 100%까지 25%씩 늘려 5단계로 배합하였다.

표 4. 실험계획 및 인자

요 인	플로우	배 합 비	동제련슬래그 혼입율(%)
인 자	18cm	1:2, 1:3, 1:4, 1:5	0, 25, 50, 75, 100
수 준	1	4	5

3.3. 실험방법

시험체의 제작은 배합계획에 따라 각 재료의 양을 정밀계량하기 위해, 중량배합으로 실시하였으며, 잔골재(모래, 동제련 슬래그), 시멘트, 물의 순으로 투입하여 손비빔으로 제작하였다. 모르타르의 반죽질기는 KS L 5111(시멘트시험용 Flow Table)의 규정에 따라 플로우를 측정하였다. 배합된 모르타르의 압축강도용 시험체의 제작은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 의해 제작하였다. 인장강도용 시험체의 제작은 KS L 5104(수경성 시멘트 모르타르의 인장강도 시험방법)에 의해 각 배합별로 3개의 인장강도 시험체를 제작하였다. 휨강도용 시험체는 KS F 2407(단순보의 중앙점 하중법에 의한 휨강도 시험방법)에 의거하여 $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ 의 철제몰드를 사용하여 각 배합별로 3개를 제작하였다. 시험체의 제작 후, 양생은 24시간 동안 양생실에서 양생하고, 탈형과 동시에 $23 \pm 2^\circ \text{C}$ 의 항온수조에서 27일간 수중양생을 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1. 플로우

일반적으로 유동성의 척도인 플로우는 골재의 입형과 표면조직의 상태에 따라 영향을 받게 된다. 본 실험에서는 해사를 잔골재로 사용하고, 동제련 슬래그를 배합에 따라 잔골재 대체제로 하여 사용하였는데, 동제련 슬래그는 잔골재보다 조립율이 높고, 비중이 크기 때문에 혼입율이 증가할수록 플로우는 감소하였다. 동제련 슬래

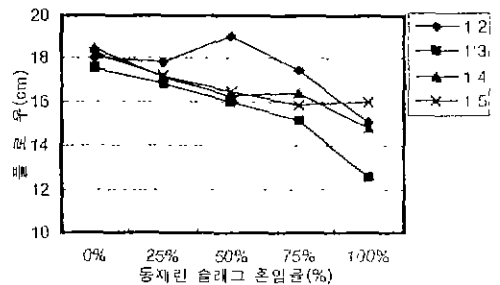


그림 3. 동제련 슬래그의 혼입율에 따른 플로우

표 5 실험결과표

시험체 번호	배합비 (C:S)	혼입율 (%)	중량 배합(kg/m ³)				W/C (%)	단위용적 중량 (t/m ³)	플로우 (cm)	압축강도 (kgf/cm ²)		인장강도 (kgf/cm ²)	휨강도 (kgf/cm ²)
			시멘트	모래	동슬래그	물				7일	28일		
A-1	1:2	0	710	1167	0	249	35.0	2.205	18.0	608	693	23	23
A-2		25	710	875	421	249		2.332	17.8	654	684	29	21
A-3		50	710	584	843	249		2.487	19.0	523	580	28	23
A-4		75	710	292	1264	249		2.624	17.5	603	694	26	23
A-5		100	710	0	1686	249		2.719	15.1	618	660	26	21
B-1	1:3	0	575	1418	0	259	45.0	2.192	17.5	472	548	32	19
B-2		25	575	1064	512	259		2.349	16.8	454	616	40	19
B-3		50	575	709	1024	259		2.547	16.0	503	592	27	22
B-4		75	575	355	1536	259		2.751	15.2	485	578	32	20
B-5		100	575	0	2048	259		2.888	12.5	435	634	32	22
C-1	1:4	0	483	1589	0	290	60.0	2.216	18.5	301	378	26	16
C-2		25	483	1192	574	290		2.355	17.1	256	390	21	14
C-3		50	483	794	1147	290		2.527	16.3	267	417	30	16
C-4		75	483	397	1721	290		2.720	16.4	261	441	32	17
C-5		100	483	0	2294	290		2.855	14.8	255	409	23	15
D-1	1:5	0	417	1712	0	313	75.0	2.147	18.2	129	243	21	11
D-2		25	417	1284	618	313		2.319	17.2	155	233	17	10
D-3		50	417	856	1236	313		2.317	16.5	179	261	18	10
D-4		75	417	428	1855	313		2.469	15.9	165	278	20	11
D-5		100	417	0	2473	313		2.713	16.0	126	203	22	11

그의 혼입율에 따른 각 배합의 플로우는 각 배합의 혼입율 0%에서 목표플로우 18±0.5cm에서 혼입율의 증가에 따라 전체적으로 플로우가 감소하였다. 그러나, 1:2배합에서는 시멘트량이 상대적으로 높음에 따라 동제련 슬래그의 비중이 플로우에 미칠 수 있는 영향에 대하여 시멘트 페이스트의 점성에 의한 유동체 내의 거동이 촉진되는 현상이 발생하여 혼입율 50%에서는 플로우가 다소 상승된 것으로 분석된다.

4.2. 단위용적중량

동제련 슬래그를 혼입하여 모르타르 실험을 한 결과, 동제련 슬래그를 혼입하지 않은 모르타르의 경우, 모든 배합에서 단위용적중량이 2.15~2.22t/m³의 값을 나타내고 있으나, 단계적으로 혼입율을 25%씩 높여 갔을 때는 단위용적중량은 평균 5.5%씩 증가하며, 100% 혼입시에는 2.71~2.89t/m³의 값을 나타내었다. 이는 동제련 슬래그의 특징에서 보면 실적이 66.5%로 잔골재의 63.6%보다 큰 차이는 없으나, 주성분인 철분을 47%를 함유하고 있어 비중이 3.74로 모래의 2.59보다 높으며, 조립율도 3.40으로 잔골재의 2.62보다 높은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 무혼입 모르타르에 비하여 22%나 중량이 높은 100%의 혼입율에서는 중량증가 문제에 대한 대책이 강구되어야 할 것이며, 동제련 슬래그를 중량콘크리트용 골재로서의 적용 등에 대한 연구가 필요할 것으로 본다.

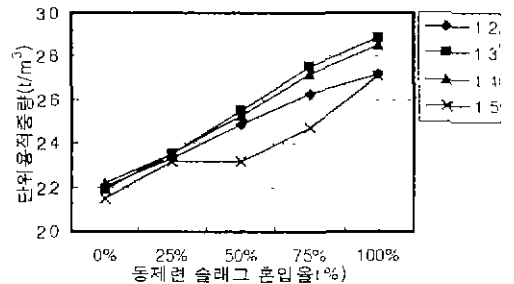


그림 4. 동제련 슬래그의 혼입율에 따른 단위용적중량

4.3. 압축강도

모르타르의 강도는 시멘트 페이스트의 강도, 물시멘트비 이외에도 골재의 강도, 종류, 공극율, 사용량 등에 따라 영향을 받는다. 본 실험에서는 $18 \pm 0.5\text{cm}$ 의 목표표로우를 설정하였기 때문에 시멘트양에 대한 골재의 비율이 증가하게 되면 물시멘트비가 점진적으로 높아지게 되어 압축강도가 감소하였다. 동제련 슬래그 혼입율에 따른 압축강도는 무혼입 배합에서 단계별로 혼입율을 증가시켰을 때, 모든 배합에서 대체적으로 적은 폭으로 변화하는 추세를 보였으며, 이에 따라 동제련 슬래그의 혼입율은 압축강도에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다.

재령 28일에 대한 재령 7일의 초기 강도발현율은 배합에 따라 차이는 있지만, 1:2의 배합에서는 동제련 슬래그의 혼입율에 상관없이 초기에는 전반적으로 높은 강도발현율을 보였다. 1:3의 배합도 1:2의 배합과 마찬가지로 혼입율에 상관없이 높은 강도발현율을 보였으나, 100%의 혼입율에서는 다소 감소되었다. 따라서, 부배합에서는 초기에 높은 강도발현율을 보인 반면에 시멘트 양이 상대적으로 적은 빈배합에서는 이에 미치지 못하는 것으로 보였으며, 수화반응이 일어나지 않는 동제련 슬래그는 강도발현에는 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4.4. 인장강도

인장강도는 $17 \sim 40\text{kgf/cm}^2$ 의 값을 나타내고 있으며, 1:3의 배합에서는 전체적으로 다른 배합에 비하여 높은 값을 보였으며, 동제련 슬래그의 혼입율에 따른 변화폭은 다소 큰 차이를 나타냈다. 그 밖의 배합에서는 동제련 슬래그의 혼입율에 따라 압축강도와 마찬가지로 적은 변화 폭을 보였다. 강도특성 면에서 볼 때, 인장강도는 압축강도와 비례관계에 있으며, 인장강도는 W/C 45%에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 동제련 슬래그 혼입율 증가에 따라 강도가 저하하는 경향을 나타냈다.

압축강도와 인장강도의 관계는 전체적으로 비례관계를 나타내었으며, 동제련 슬래그 혼입율에 따른 상호연관성은 각 배합의 25%의 혼입율에서 가장 높은 상관관계를 나타내었으며, 강도측면에서 고려한 동제련 슬래그의 적정 혼입율은 25% 내외라고 판단된다.

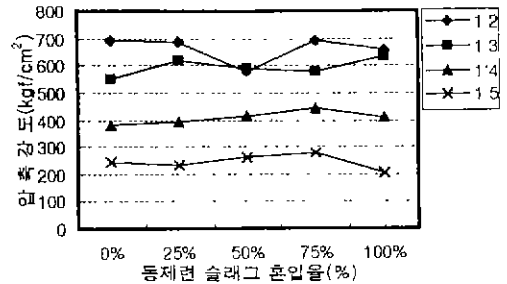


그림 5. 동제련 슬래그의 혼입율에 따른 28일 압축강도

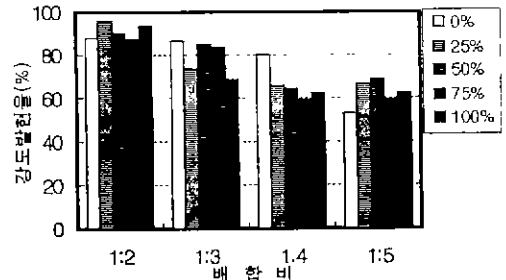


그림 6. 재령 28일에 대한 7일의 강도 발현율

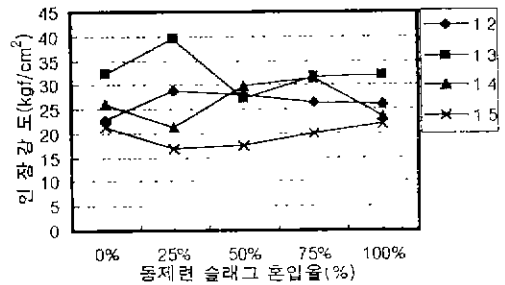


그림 7. 동제련 슬래그의 혼입율에 따른 인장강도

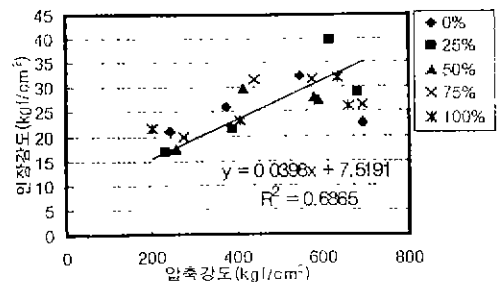


그림 8 인장강도와 압축강도

45. 휨강도

동제련 슬래그 혼입율에 따른 휨강도는 10~23 kgf/cm²의 값을 나타냈다. 휨강도 역시 강도특성에 따라 골재의 비율이 높아질수록 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 동제련 슬래그의 혼입율에 따라 큰 강도 저하는 보이지 않으나, 혼입율의 증가에 따라 강도가 적은 쪽으로 변화하는 것을 알 수가 있다. 물시멘트비가 낮은 1:2와 1:3의 배합에서는 강도의 변화폭이 물시멘트비가 높은 배합보다 크게 나타났다.

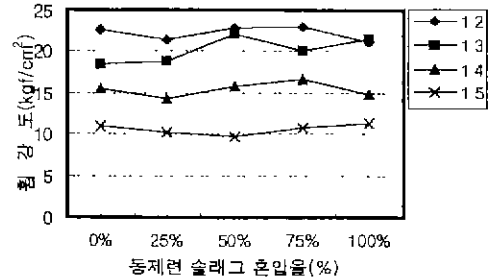


그림 9. 동제련 슬래그 혼입율에 따른 휨강도

5. 결 론

동제련 슬래그를 콘크리트 골재로서의 적용성 평가를 하기 위하여 모르타르를 제작하여 강도특성에 관하여 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 동제련 슬래그를 잔골재 대체제로 하여 단계적으로 혼입한 결과, 모든 배합에서 동제련 슬래그의 혼입율이 높아질수록 플로우는 감소하였으며, 100% 혼입시에는 평균 18.2%의 감소율을 보였다.

2. 일반적인 보통골재와 비교하여 높은 비중과 조립율을 나타내는 동제련 슬래그를 혼입한 모르타르의 단위용적중량은 모든 배합에서 2.15~2.88t/m³으로 나타났으며, 혼입율 0%에서부터 25%씩 단계적으로 혼입율이 증가함에 따라, 평균 5.5%의 단위용적중량의 증가율을 보였다.

3. 본 실험의 모든 배합에서 동제련 슬래그를 잔골재 대체제로 사용하였을 때, 혼입율이 증가함에 따라서 강도의 변화 폭은 크지 않아, 혼입율은 강도변화에 큰 영향을 미치지 않았으며, 중량에 대한 문제와 유동성을 고려한 입장에서 동제련 슬래그의 잔골재 대체율은 25% 내외가 적정한 것으로 판단된다.

향후, 본 연구에서 나타난 결과를 기초로 하여 내구성 등의 보다 넓은 범위에 대한 연구가 지속되어야 할 것이며, 산업부산물의 적극 활용을 위하여 경제성 문제만 해결된다면 동제련 슬래그의 콘크리트 골재 적용에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 동제련 슬래그를 활용한 중량콘크리트에 관한 적용성 연구 또한 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 이형우 외, 폐Copper Slag의 시멘트모르타르 잔골재 재활용, 한국폐기물학회지 제 15권 제 6호, 1998.
- H. J. Engell, 반봉찬 외 譯, 금속공학에서의 슬래그, 대광문화사, 1991. 5.
- Hojin Ryu 외, A Study on the Strength and Grindability of Granulated Copper Smelting Slag Produced by Water Quenching, 資源·素材學會誌, 107. No. 1, 1991
- 梶原 敏孝 외, 「JIS A 5011 콘크리트용 슬래그 骨材」의 改正にかかわる 主要點について, 月刊生コンクリート, Vol. 16, No. 7, 1997. 9.
- 梶原 敏孝 외, 銅슬래그 細骨材, 콘크리트工學 - 特輯 : 骨材問題を考える, Vol. 34, No. 7, 1996. 7.