

기타 산업부산물의 특성과 활용

Characteristics and Application of Other Industrial By-Products



강수태 Su-Tae, Kang
대구대학교 토목공학과
조교수
E-mail : stkang@daegu.ac.kr

1. 서론

콘크리트 기술이 고도화, 복잡화 및 다양화되어 감에 따라 콘크리트의 성능에 대한 요구도 다양해져 콘크리트에 사용되는 혼화재료도 다양화 되어가고 있다. 현재 콘크리트용 혼화재료로는 환경을 고려한 산업부산물의 적용이 증가하고 있다. 이와 같은 산업 부산물 중 고강도 콘크리트에 적용되고 있는 실리카 폼은 국내에서는 생산되지 않는 재료이지만 실리카 폼에 대한 규격, 기준 등이 제정되어 콘크리트 혼화재료로서 널리 사용되고 있으며 사용량이 증가하고 있다.

동슬래그는 2000년에 KS F 2543(콘크리트용 동슬래그 골재)이 제정되고, 2004년에는 KS F 4009(레디 믹스트 콘크리트)를 개정할 때 동슬래그를 콘크리트용 골재로 사용할 수 있도록 하였다. 석회석 미분말은 아직까지 국내에서는 시멘트 또는 콘크리트 활용에 대한 표준규격이 마련되어 있지 않지만 국외에서는 다수의 국가에서 관련 규정을 두고 있다. 전세계 25개국 이상에서 포틀랜드 시멘트에 석회석 미분말을 1~5% 혼합사용하는 것을 허용하고 있다고 알려져 있으며, 여러 나라에서는 포틀랜드 혼합시멘트에서 35%까지 석회석 미분말을 치환하여 사용할 수 있도록 하고 있다. 이 외에도 콘크리트 산업에 사용되는 산업부산물로는 소각재, 왕겨재, 폐유리 등 다양하게 존재하며, 아직 콘크리트 산업에 활용되고 있지 않는 많은 산업부산물들에 대해 경제적·환경적 측면에서 콘크리트 산업으로의 활용을 모색하고 있다.

본 고에서는 상기와 같은 특성을 가지는 실리카 폼, 동슬래그, 석회석 미분말, 그리고 소각재와 같은 산업부산물들의 콘크리트 재료로서의 특성과 이를 적용한 콘크리트의 특성 등에 대하여 소개하고자 한다.

2. 실리카 폼

실리카 폼은 각종 실리콘이나 휘로실리콘 규소합금이나 실리콘 금속(크롬실리콘, 실리콘망간)을 약 2,000℃의 전기 아크식 노에서 제조할 때 발생하는 배기가스 중 떠다

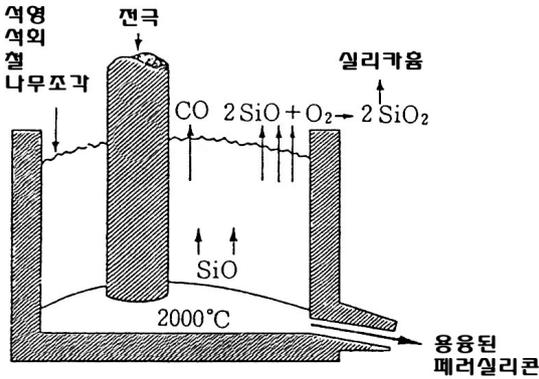


그림 1. 실리카 흄 생성 모식도

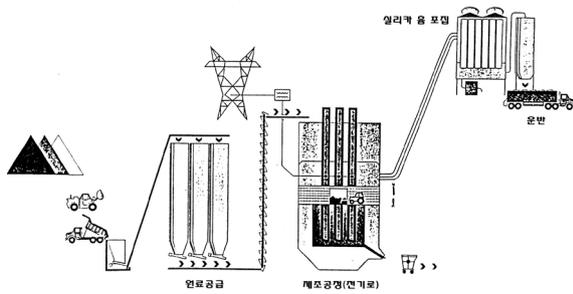


그림 2. 실리카 흄의 제조과정

니는 초미립분을 집진기로 포집한 것이다. <그림 1>과 <그림 2>는 아크식 전기로에서의 실리카 흄 생성 모식도와 실리카 흄의 제조공정을 간략히 나타낸 것이다.

실리카 흄은 국내에서는 생산되지 않는 제품으로 전량 수입에 의존하고 있다. 명칭으로는 silica fume, condensed silica fume, silica flour, silica dust, fumed silica, micro silica 등이 있지만 통칭은 실리카 흄으로 사용하고 있으며, 주요 생산국으로는 미국, 노르웨이 등 수력자원이 풍부한 나라들이 대부분이다.

실리카 흄의 색깔은 일반적으로 회색이며 흑색과 백색의 것도 있다. 색의 차이는 철분의 함유량에 따른 영향도 있지만 주로 탄소량에 따라서 결정된다. 실리카 흄의 물리적 성질을 살펴보면 약 90% 이상이 구형으로 구성되어 있으며, 입경이 약 0.1 μ m 정도, 비표면적이 약 20m²/g이며

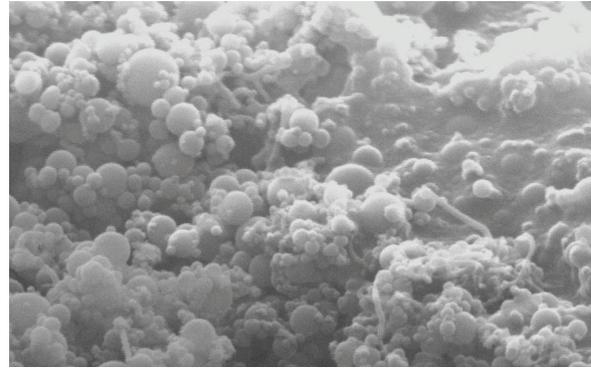


그림 3. 실리카 흄의 SEM 사진(×50,000)

밀도가 종류에 따라 다르지만, 일반적으로 약 2.1~2.2g/mm³이고 단위중량은 150~300kg/m³이다.

실리카 흄의 입자 크기는 시멘트 입자의 1/100 정도로 미세하기 때문에 시멘트 입자의 공극을 충전하는 마이크로 필러 효과가 있다. <그림 3>에서 알 수 있듯이 입자 모양이 구형으로 되어 있어서 볼 베어링 역할을 하기도 한다. 한편, 실리카 흄은 매우 미세한 비정질의 실리카로 되어 있어서 수화 초기부터 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응을 하여 미세한 공극을 감소시켜 시멘트 경화체의 공극을 보다 치밀하게 하여 강도의 증진과 투수성, 투기성을 감소시키는 데에도 기여한다.

KS F 2567에서는 콘크리트 및 모르타르 혼화재로 사용되는 실리카 흄에 대하여 규정하고 있는데, [표 1]의 규정을 만족해야 한다고 명시하고 있다.

[표 1] 실리카 흄의 품질에 대한 요구조건

품질	요구조건
비표면적(BET)	≥ 15 (m ² /g)
활성도 지수(%)	≥ 95
이산화규소(SiO ₂) (%)	≥ 85
산화마그네슘(MgO) (%)	≤ 5.0
삼산화황(SO ₃) (%)	≤ 3.0
염화물 이온(Cl ⁻) (%)	≤ 0.3
감열 감량(%)	≤ 5.0
45 μ m 체에 남는 양(%)	≤ 5.0

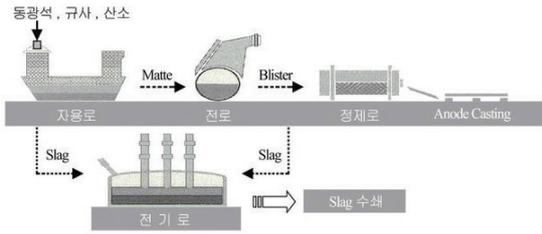


그림 4. 자용로 공정¹⁾

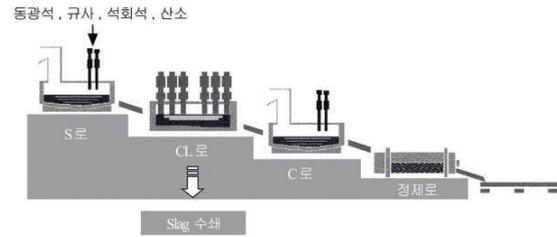


그림 5. 연속 동제련 공정¹⁾

3. 동슬래그

동제련 과정에서 생산되는 동슬래그는 2000년 기준으로 약 70만 톤 정도가 발생하는 산업 폐기물이며 국내에서는 시멘트 제조용 가철제 및 수리 조선소에서 선박의 녹을 제거하는 샌드 블래스팅 재료 그리고 시멘트 벽돌, 경계석, 인터로킹 블록, 적벽돌, 레미콘용, 콘크리트 제품용 지반 개량재 등으로 사용하고 있다.

이미 일본, 독일 등 선진 국가들은 콘크리트용 골재, 지반 개량재, 매립용 골재, 뒤채움재 등으로 활용하고 있을 뿐 아니라 건설용 골재로서 다양하게 활용하고 있다. 동제련은 일차적으로 동광석을 녹여 조동을 만들고 정련과정을 거쳐 전기동을 산화하는 공정인데, 일반적으로 동의 제련 공정은 핀란드 오토컴프사에서 개발한 자용로 공정과 일본 미쯔비사에서 개발한 연속 동제련 공정으로 제조할 수 있다.

동슬래그 골재의 밀도는 자용로인 경우 3.78t/m³, 연

속로인 경우 3.44t/m³으로서 화강 풍화토 2.67~2.68과 비교하여 매우 크다. 이는 동슬래그에 포함되어 있는 금속 성분의 함량이 높기 때문이며, 비중이 높은 반면에 흡수율이 낮다. 동슬래그 골재의 조립률은 자용로 동슬래그 3.45, 연속로 동슬래그 3.81로 천연모래 2.62에 비하여 다소 높다.

동슬래그 골재의 화학적 조성으로는 Fe와 SiO₂가 주성분이며, 소량의 Fe₃O₄, Al₂O₃ 등의 금속 산화물을 포함하고 있다. 동슬래그의 물리·화학적 특성은 [표 2] 및 [표 3]과 같다.

KS F 2453은 콘크리트에 사용하는 동슬래그 골재에 대하여 규정하고 있다. 동슬래그 골재는 노에서 동과 동시에 생성하는 용융 슬래그를 수쇄 또는 서랭하여 입도를 조정 한 것으로 정의하며, KS 표준에서는 CUS로 표시하며 입도 및 알칼리 실리카 반응성에 따라 구분하고 있으며, [표 4]과 같은 화학성분 및 물리·화학적 성질에 적합해야 한다고 규정하고 있다.

[표 2] 동슬래그의 물리적 특성

물리적 특성	단위중량 (kg/m ³)	미세분 함량(%)	밀도(t/m ³)	흡수율(%)	점토 함량(%)	0.08mm체 통과율(%)	조립률	골재의 안정성(%)
연속 동제련	2238	63.6	3.46	0.2	0.1	0.3	3.75	1.2
자용로	2400	66.5	3.81	0.52	0.6	0.4	3.31	7.1

[표 3] 동슬래그의 화학적 조성

화학적 성분	Fe	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Cu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	염기도
연속 동제련	38.13	4.17	33.46	0.91	4.67	0.98	4.74	0.31
자용로	46.39	6.93	30.65	0.97	0.95	1.04	4.10	0.20

[표 4] 동슬래그 골재의 화학성분 및 물리·화학적 성질

항목		동슬래그 골재	적용 시험 조항 ¹⁾
화학성분	산화칼슘(CaO) %	12.0 이하	5.2
	황(S) %	2.0 이하	
	삼산화황(SO ₃) %	0.5 이하	
	모든 철(FeO) %	70.0 이하	
염화물량(NaCl) %		0.03 이하	5.3
절대 건조 비중		3.2 이상	
흡수율 %		2.0 이하	
단위 응적 중량 kg/L		1.80 이상	5.4

주 1) KS F2543 콘크리트용 동슬래그 골재의 시험방법

4. 석회석 미분말

시멘트 제조 공정 중 클링커의 일부를 석회석 미분말로 치환하여 시멘트를 제조하는 방법이 시멘트 산업에서 최근 활발히 이루어지고 있다.

〈그림 6〉은 유럽에서 사용되고 있는 시멘트의 종류별 사용비율을 비교하여 나타낸 것이고, 〈그림 7〉은 CEM II 타입 시멘트에 대해 세부종류별 사용비율을 비교하여 나타낸 것이다. 석회석 미분말 시멘트의 사용량이 상당히 크며 지속적으로 사용비율이 증가하고 있음을 알 수 있다²⁾.

이와 같이 시멘트 제조 시 석회석 미분말을 사용할 경우 시멘트의 생산성 향상, 생산비용 절감, CO₂ 및 NO₂ 발생량 저감을 통한 환경부하 저감 등의 효과를 기대할 수 있다.

국내에서는 아직까지 석회석 미분말 혼합 시멘트에 대한 표준규격이 마련되어 있지 않지만 국외에서는 다수의 국가에서 관련 규정을 두고 있다. 1980년대 초반 캐나다 CAN/CSA-A5에서는 포틀랜드 시멘트에 석회석 미분말을 5%까지 사용할 수 있도록 허용하였다.

유럽 표준규격 EN 197에서는 두 가지 종류의 포틀랜드 석회석 미분말 시멘트(Portland Limestone Cement)를 정의하고 있다. Type II/A-L은 석회석 미분말 함유율 6~20%, Type II/B-L은 함유율 21~35% 사용가능하도록 하고 있다. 또한 포틀랜드 시멘트(CEM I)에 5%까지 석회석 미분말을 사용할 수 있도록 명시하고 있다. 미국에서는 2004년에 ASTM C150 규격을 보통 포틀랜드 시멘트에 5%까지 석회석 미분말 사용이 가능하도록 수정하였으며,

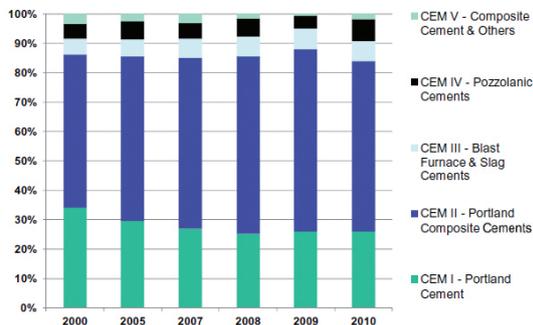


그림 6. EN 197-1에서 규정하고 있는 시멘트 종류별 사용비율 비교²⁾

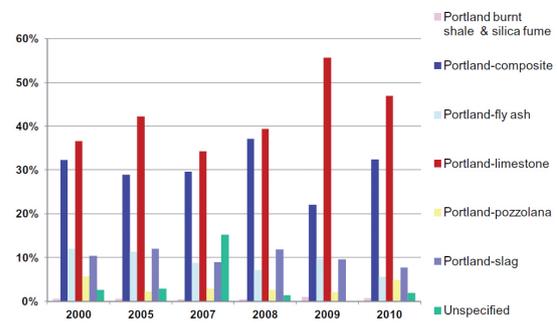


그림 7. EN 197-1에서 규정하고 있는 CEM II 종류별 사용비율 비교²⁾

[표 5] EN 197-1에서 규정하고 있는 포틀랜드 석회석 미분말 사용량

Name	Type	Range of limestone content, mass %	Notes
Portland limestone cement	CEM II/A-L	6~20	TOC*≤0.5%
	CEM II/A-LL	6~20	TOC≤0.2%
	CEM II/B-L	21~35	TOC≤0.5%
	CEM II/B-LL	21~35	TOC≤0.2%
Portland composite cement	CEM II/A-M	less than 20	
	CEM II/B-M	less than 35	

*TOC : 석회석 미분말에 포함된 총 유기물 함유량의 중량비를 의미한다.

ASTM C595 및 AASHTO M240 혼합시멘트와 관련하여 석회석 미분말 5~15%를 혼합사용한 석회석 미분말 시멘트를 Type II와 Type III로 분류하여 제시하고 있다. 현재 전세계 25개국 이상에서 포틀랜드 시멘트에 석회석 미분말을 1~5% 혼합사용하는 것을 허용하고 있다고 알려져 있으며, 여러 나라에서는 포틀랜드 혼합시멘트에서 35%까지 석회석 미분말을 치환하여 사용할 수 있도록 하고 있다³⁾.

5. 소각재

도시쓰레기의 처리 문제와 관련한 전 세계적 관심은 두 가지 관점에서 다루어지고 있다. 그 중 첫번째는 폐기물의 매립량을 줄이는 것이다. 미국, 일본, 영국과 같이 고도로 산업화된 국가나 인구밀집형 국가일수록 이에 대한 필요성은 더 부각되고 있다.

이와 같은 관점에서 볼 때, 도시쓰레기의 소각처리는 매우 효과적인 방법으로 폐기물의 원래 부피의 90%, 질량으로는 약 70%이상을 줄일 수 있다⁴⁾. 또 하나는 소각처리를 통한 폐기물의 에너지화이다. 그 중 적용가능한 한 분야가 소각재를 건설재료로 활용하는 것이다.

도시쓰레기의 소각재를 건설재료로 활용한 대표적인 사례가 에코시멘트이다. 에코시멘트란 'ecology'와 'cement'의 합성어로 도시쓰레기 소각재를 주원료로 하고, 필요에 따라 하수 오염물 등의 폐기물을 혼합해 시멘트 1ton당 폐기물 총량을 500kg 이상 사용해 제조하는 시멘트로 2002년 JIS R 5214(에코시멘트) 표준규격으로 반영되었다.

에코시멘트의 제조는 소성온도가 낮은 점 이외에 수경성 광물을 합성한다는 점에서 보통시멘트와 기본적으로 주요공정이 비슷하다. 단 원료에 포함되어 있는 염소 등에 의한 영향은 보통시멘트에서는 전혀 고려할 필요가 없는 요소이지만 에코시멘트 생산에서는 매우 중요한 고려사항이다. 에코시멘트의 주요공정은 <그림 8>과 같다. 에코시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 Al₂O₃가 많고 Cl성분을 많이 포함하고 있다. [표 6]은 에코시멘트의 화학조성 및 광물조성의 비율을 보통포틀랜드시멘트와 비교하여 나타낸 것이다.

6. 결론

이상과 같이 콘크리트에 활용되고 있는 실리카 폼, 동슬래그, 석회석미분말, 소각재에 대해 재료적 특성과 함께 관

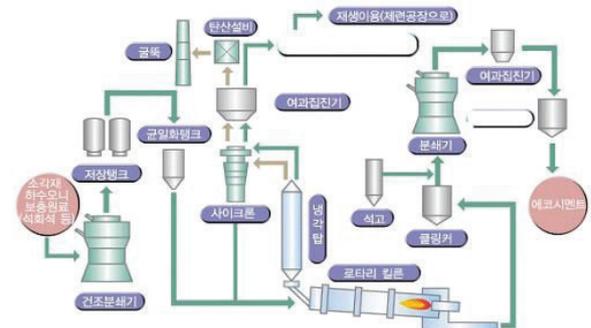


그림 8. 에코시멘트 제조의 주요공정⁵⁾

[표 6] 에코시멘트와 보통포틀랜드시멘트의 화학조성과 광물조성(일본)⁶⁾

종류	물성	화학조성(%)							SAT					
		lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	Cl	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄
에코시멘트		1.3	17.6	7.0	4.2	60.7	3.9	0.42	0.05	49	14	11	13	6.3
보통시멘트		2.0	20.5	5.0	3.0	64.4	2.0	0.60	0.01	54	21	9	9	3.4

[표 7] 에코시멘트와 보통포틀랜드시멘트의 규격과 실측치(일본)⁶⁾

종류	물성	에코시멘트		보통포틀랜드시멘트	
		실적치	규격치	실적치	규격치
밀도(g/cm ³)		3.17	-	3.16	-
비표면적(cm ² /g)		4230	2500 이상	3300	2500 이상
응결	초결(h:m)	2:30	1:00 이상	2:30	1:00 이상
	종결(h:m)	3:50	10:00 이하	3:30	10:00 이하
안정성	파트법	양호	양호	양호	양호
	르샤틀리에법	-	10 이하	-	10 이하
압축강도(MPa)	3일	31.7	12.5 이상	29.4	12.5 이상
	7일	43.8	22.5 이상	45.5	22.5 이상
	28일	54.6	42.5 이상	62.7	42.5 이상
MgO(%)		2.01	5.0 이하	1.28	5.0 이하
SO ₃ (%)		3.94	4.5 이하	2.09	3.0 이하
lg.loss(%)		1.22	3.0 이하	1.81	3.0 이하
Total Alkali(%)		0.47	0.75 이하	0.51	0.75 이하
Cl이온(%)		0.045	0.1 이하	0.017	0.035 이하

런 규격 및 콘크리트에 미치는 영향 등에 대해 살펴보았다. 현재 전세계적으로 환경부하 저감에 대한 중요성이 갈수록 부각되고 있는 상황에서 산업부산물의 활용기술은 나날이 관심이 증대되고 있다.

환경적 측면에서 곤란을 겪게 하는 산업부산물 처리문제를 해결함과 동시에 콘크리트 제조 시 CO₂ 발생량을 줄일 수 있는 일석이조의 효과가 있기 때문이다. 여전히 활용되고 있지 않는 많은 산업부산물이 존재하며 경제적·환경적 측면에서 콘크리트 산업으로의 활용을 지속적으로 모색할 필요가 있을 것이다.

참고문헌

1. 이문환, 이세현, 송태협, "동슬래그를 잔골재로 사용한 콘크리트의 물리·역학적 특성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol. 15 No. 3, 2003, pp. 361~368.
2. The European Cement Association, CEMBUREAU, Brussels, 2013, <http://www.cembureau.eu/cements-low-carbon-europe>.
3. CEMBUREAU, Cement Standards of the World 1991, CEMBUREAU, Brussels, 1991.
4. Ginés, O., Chimenosa, J. M., Vizcarro, A., Formosa, J., Rosell, J. R., "Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations", Journal of Hazardous Materials, Vol. 169, 2009, pp. 643-650.
5. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트 공학, 2007, pp. 55~57.
6. 황규장, 플라이 애쉬를 첨가한 에코 시멘트 콘크리트의 부착 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교, 2009, pp. 5~8.