

전기로 산화슬래그 골재를 이용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 특성에 관한 연구

A Study for Asphalt Concrete Mixture using EAF Steel Slag

남궁 연* · 한종민** · 이석홍*** · 서순일****

Namkoong, Youn · Han, Jong Min · Lee, Suck Hong · Suh, Soon Il

1. 서 론

국내의 전기로 산화슬래그 재활용 실적은 고로슬래그 미분말 및 도로용 노반재 등에 지나지 않아 외국에 비하여 그 사용 방법 및 활용도 측면에 있어서 상당히 미비한 실정이다. 이미 일본, 미국, 호주, 캐나다, 유럽 등에서는 제강 슬래그를 우수한 골재로 재가공하여 단순히 낮은 품질이 요구되는 노반재 처리 또는 뒷채움재로 사용에만 그치지 않고, 고부가가치의 양질의 콘크리트 및 아스팔트 골재로서 사용하고 있다.

현재 정부, 업계, 학계, 현장 등의 상황을 종합하여 보았을 때 국내의 전기로 산화 슬래그의 사용에 대한 인식 및 연구 등은 아직 관심 밖의 일이었으며, 따라서 정확히 현실을 직시하고 우수 제품으로 개발하고 발전하도록 신경이 미치지 못할 수 있는 실정이었다. 갈수록 천연골재의 부족과 무분별한 석산의 개발로 날로 골재의 품질은 저급골재가 유입되고 이러한 골재난의 심각함 속에서도 무방비한 상태로 기술력의 개발은 꺾이지도 않는다면 국가산업발전에 큰 타격으로 다가올 뿐만 아니라 외국과의 경쟁력에서도 뒤떨어져 국가경쟁력에 위신을 저해하게 될 수 있다.

본 연구는 전기로 산화슬래그를 양질의 아스콘 골재로 생산·관리하여 높은 품질의 제품을 제공할 수 있도록 품질을 시험하여 국내에 취약한 전기로슬래그 활용 여건을 개선할 수 있는 계기로 삼는데 그 주요 목적을 두고 있다.

2. 전기로 산화슬래그 골재의 물성시험

본 연구에서는 전기로 산화슬래그를 사용하여 아스팔트 콘크리트 포장 표층 및 기층에 적용하기 위한 실험적 연구결과에 대하여 정리하였다. 에이징을 실시한 전기로 산화 슬래그골재의 기본물성시험 결과 변화를 통하여 아스팔트 콘크리트 혼합물로서 적합성 평가를 실시하였고 배합설계를 통하여 최적아스팔트함량 (Optimum Asphalt Content ; OAC)을 결정하였으며 전기로 산화 슬래그 아스팔트 혼합물에 대한 혼합물 역학시험을 통하여 혼합물의 현장 적용 가능성을 평가하였다.

2.1 기본 물성시험 결과

일반 부순돌의 비중은 일반적으로 2.50~2.80인데 비하여 전기로 산화 슬래그 골재는 비중값이 3.0이상으로 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 전기로 산화 슬래그 골재는 일반 부순돌에 비하여 상대적으로 높은 흡수율을 보이거나 KS F 2535 규정 3.0% 이하의 조건에는 모두 만족하는 것으로 나타났다.

* 정회원 · 한국건설자재시험연구원 도로포장재기술센터 센터장 · 공학석사 · 031-544-3461(E-mail:namkung@kicm.re.kr)

** 정회원 · 한국건설자재시험연구원 도로포장재기술센터 연구원 · 공학석사 · 031-544-3461(E-mail:jmhan@kicm.re.kr)

*** 정회원 · 현대건설 기술연구소 토목재료팀장 · 공학박사 · 031-280-7451(E-mail:2000hyundai@hanmail.net)

**** 인천선강(주) 대표이사 · 032-763-2705(E-mail:imdjun63@hotmail.com)



표 1. 전기로 산화슬래그 골재의 비중 및 흡수량 시험결과

시험항목 골재명	겉보기 비중	흡수율(%)	비 고
#57	3.28	2.47	
#78	3.35	2.33	
No.4	3.41	2.98	

표 2. 전기로 산화슬래그 골재의 수침팽창 시험결과

구 분	시험항목	수침팽창율(%)		
		에이징 미처리	에이징:3개월	시험기준 KS F 2535
전기로 산화 슬래그(#57:25mm)		0.53	0.02	2.0 이하
전기로 산화 슬래그(#78:13mm)		0.62	0.05	
전기로 산화 슬래그(NO.4:5mm)		0.58	0.03	
시험방법(KS F)		2580-02'		

표 3. 전기로 산화슬래그 골재의 LA마모 시험결과

구 분	전기로 산화슬래그 (에이징 미처리)	전기로 산화슬래그 (에이징:3개월)	시험기준
마모감량(%)	25.6	32.9	35 이하

표 4. 전기로 산화슬래그 골재의 안정성 시험결과

구 분	전기로 산화슬래그 (에이징 미처리)			전기로 산화슬래그 (에이징:3개월)		
	25mm	13mm	5mm	25mm	13mm	5mm
손실무게 백분율(%)	2.6	3.3	3.8	1.4	2.1	2.7
시험기준(KS F 2507)	12% 이하					

표 5. 전기로 산화슬래그 골재의 피막박리 시험결과

구 분	전기로 산화슬래그 (에이징 미처리)	전기로 산화슬래그 (에이징:3개월)
피복면적	95% 이상	95% 이상
시험기준(KS F 2355)	95% 이상	

표 6. 전기로 산화슬래그 골재의 편평·세장편 함유량 시험결과

구 분	전기로슬래그 (에이징 미처리)		전기로슬래그 (에이징:3개월)		시방기준 (도로공사시방서)
	25mm	13mm	25mm	13mm	
편평 및 세장편 함유량 (%)	7.2	2.5	6.0	1.7	20% 이하

2.2 화학분석시험 결과

전기로 산화슬래그 골재에서 가장 문제시되는 부분이 흑시나 발생하게 될지도 모르는 F-CaO 및 F-MgO의 함유에 의한 팽창에 대한 부분이다. 이러한 F-CaO 및 F-MgO는 전기로 슬래그에 CaO 또는 MgO의 형태로 잠재하여 수분과 접하였을 때 CaOH₂ 및 MgOH₂로 변환하여 혼합물의 팽창을 야기하여 망상균열(Net Crack)을 일으키는 원인이 된다. 그러나 KS E 3808 시험방법으로는 CaO와 MgO의 전량분석이 어려워 정확한 관리가 어렵기 때문에 환원기가 섞이지 않고 철저히 분리된 산화 슬래그에 대한 부분에 대하여 X



선 회절분석을 통한 전량분석을 실시하였다. KS M 0043에 의한 XRF(X선 회절 분석) 분석을 실시한 결과는 다음 표 7과 같다.

표 7. 전기로 산화슬래그 골재의 화학분석 시험결과

시험항목		결과	시험방법
화학분석 (%)	SiO ₂	20.4	KS M 0043 : 2004 (XRF 분석)
	Fe ₂ O ₃	38.2	
	Al ₂ O ₃	9.0	
	CaO	29.6	
	MgO	6.3	
	K ₂ O	0.16	

JIS A 5011-4:2003에 따르면 화학분석 결과에 따라 염기도를 측정하고 있다. 염기도란 CaO/SiO₂ 비로서 슬래그 골재중의 F-CaO의 함유율을 관리하는 값이다. 콘크리트용 전기로산화슬래그 골재에 대한 JIS A 5011-4의 규격에서는 염기도(CaO/SiO₂)를 2.0이하로 규정하고 있다. 아직 아스팔트콘크리트용 전기로산화슬래그 골재가 JIS 규격으로 제정되지 않았지만 콘크리트용 보다 팽창부피를 야기시키는 F-CaO 또는 F-MgO의 관리에 있어서 조금 더 완화된 값으로 관리하여야 할 것이다.

XRF 화학분석을 통한 염기도의 계산값은 1.45로서 기준치에 만족하고 있다.

2.3 중금속용출시험 결과

전기로 산화 슬래그 골재의 사용상에 있어서 골재 자체의 중금속 등의 유해 물질이 용출될 우려를 판단하기 위하여 용출시험을 실시하였으며, 그 결과는 다음 표 8과 같다.

표 8. 전기로 산화슬래그 골재의 화학분석 시험결과

측정원소	시험법	TCLP(미국)	기준치(mg/L)	KOEP(한국)
	기준치(mg/L)	:EPA 1311	기준치(mg/L)	:폐기물공정시험법
Pb	5.0>	0.28	3.0>	불검출
Cd	1.0>	0.02	0.3>	불검출
Cr	5.0>	0.07	1.5>	0.02
Cu	-	0.02	3.0>	0.02
Hg	0.2>	불검출	0.005>	불검출
As	5.0>	불검출	1.5>	불검출
Zn	-	3.39	-	0.07
Ni	-	0.08	-	0.03

미국 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 시험방법은 미국 EPA의 시험 방법중 시험번호 1311번으로서 미국에서 환경에 관련하여 중금속류의 유해물질 용출시험에 사용되는 방법이다. KOEP는 우리나라 환경부에서 중금속류의 유해성분에 대한 함량을 관리하는데 사용되고 있는 폐기물공정시험방법에 따라 시험하였으며 토양 및 수질오염을 야기할 수 있는 유해물질에 대하여 제한하고 있다.

3. 전기로 산화슬래그 혼합물의 배합설계

아스팔트 혼합물의 배합설계는 골재와 아스팔트 바인더를 주어진 조건에서 최적의 합성비율을 결정토록 하는 것으로 본 시험에서는 마샬배합설계 방법을 적용하였다.

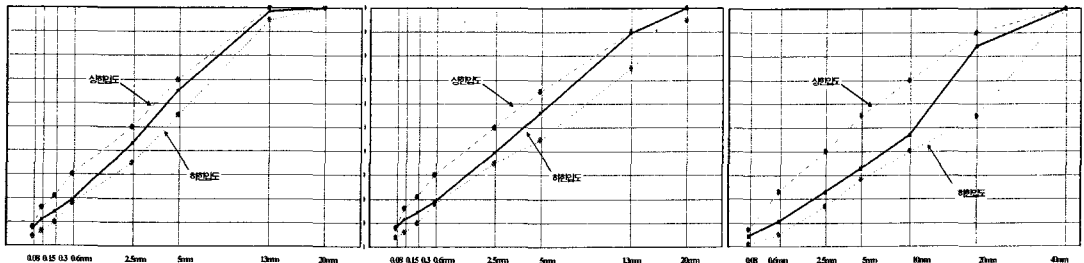


표 9. 배합설계에 사용된 골재의 입도분석 성과표

(단위 : %)

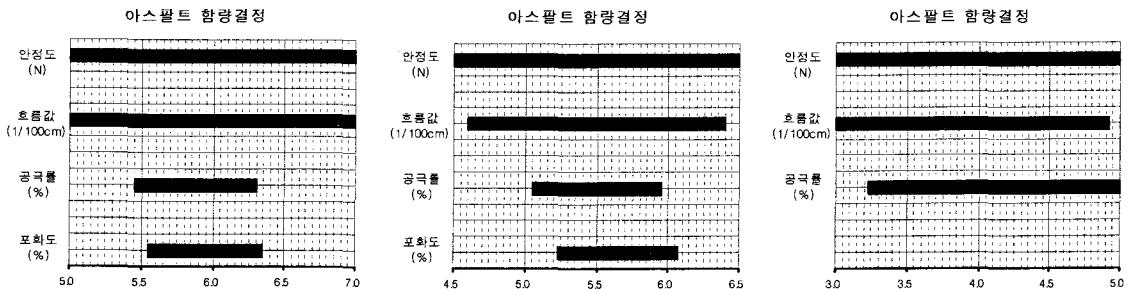
체크기 사료명	50mm	40mm	25mm	20mm	13mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.08mm
범위	100	95~100	-	35~70	-	10~30	0~5	-	-	-	-	-	-
467 호	100.0	100.0	68.6	53.0	16.4	11.0	0.4	-	-	-	-	-	-
범위	-	100	95~100	-	25~60	-	0~10	0~5	-	-	-	-	-
57 호	100.0	100.0	97.4	91.8	55.1	28.7	6.7	1.2	-	-	-	-	-
범위	-	-	100	90~100	-	20~55	0~10	0~5	-	-	-	-	-
67 호	100.0	100.0	100.0	99.7	61.6	32.5	2.0	0.5	-	-	-	-	-
범위	-	-	-	100	90~100	40~75	5~25	0~10	0~5	-	-	-	-
78 호	100.0	100.0	100.0	100.0	96.7	55.7	22.8	2.7	1.1	-	-	-	-
범위	-	-	-	-	-	100	80~100	65~100	40~80	20~65	7~40	2~20	0~10
No. 4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	71.7	43.4	29.6	18.3	11.7	4.0
범위	-	-	-	-	-	100	95~100	70~100	40~80	20~65	7~40	2~20	0~10
No. 1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	78.1	53.8	22.3	13.0	6.9	3.3
범위	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	mt 95	mt 90	mt 70
채움재	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.8	98.3	90.1

전기로 산화슬래그 골재는 표층 및 중간층 적용을 위해 밀입도 13mm 혼합물과 밀입도 20mm 혼합물에 적용하였으며, 기층에 적용하기 위하여 BB-2 혼합물에 적용하였다. 입도합성을 위해서는 #57, #78, No.4에 대하여 전기로 산화슬래그 골재를 사용하고, #467, #67, No.1에 대하여 일반쇄석골재를 사용하였다.



(a) 표층용 밀입도 13mm (b) 표층용 밀입도 20mm (c) 기층용 BB-2

그림 1. 전기로 산화슬래그 혼합골재의 합성입도 곡선



(a) 표층용 밀입도 13mm (b) 표층용 밀입도 20mm (c) 기층용 BB-2

그림 2. 전기로 산화슬래그 혼합물의 OAC 결정



표 10. 마살배합설계에 따른 혼합물 종류별 최적아스팔트 함량

혼합물 종류	표층 및 중간층용		기층용
	2-13	2-20	BB-2
최적 아스팔트 함량(OAC) (%)	5.9	5.6	4.1

4. 전기로 산화슬래그 혼합물의 역학시험결과

4.1 마살안정도 시험 결과

마살안정도시험은 현재까지 아스팔트 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력을 평가하는데 가장 널리 사용되는 시험으로 각 혼합물의 시험결과와 일반 혼합물의 마살안정도 및 수침 마살 잔류안정도시험을 실시하였다.

표 11. 각 혼합물의 OAC에서의 마살안정도 시험 결과

구 분	표층 및 중간층용				기층용		일반혼합물	
	2-13		2-20		BB-2		마살안정도 (N)	마살흐름값 (1/100cm)
	마살안정도 (N)	마살흐름값 (1/100cm)	마살안정도 (N)	마살흐름값 (1/100cm)	마살안정도 (N)	마살흐름값 (1/100cm)		
시험값	13,300	27	14,530	29	9,450	31	10,520	32

표 12. 각 혼합물의 OAC에서의 수침 마살 잔류안정도 시험 결과

구 분	표층 및 중간층용		기층용	일반혼합물
	2-13	2-20	BB-2	2-20
마살안정도(N)	11,320	11,970	8,210	8,610
잔류안정도(%)	85.11	82.38	86.87	81.84
품 질 기 준	75% 이상			

4.2 간접인장강도 시험 결과

간접인장강도시험은 원주면에 대하여 하중을 50mm/min 속도로 가하여 실시하였다.

표 13. 각 혼합물의 OAC에서의 간접인장강도 시험 결과

구 분	표층 및 중간층용				기층용		일반혼합물	
	2-13		2-20		BB-2		간접인장 강도 (kg/cm ²)	최대수직 변위 (mm)
	간접인장 강도 (kg/cm ²)	최대수직 변위 (mm)	간접인장 강도 (kg/cm ²)	최대수직 변위 (mm)	간접인장 강도 (kg/cm ²)	최대수직 변위 (mm)		
시험값	10.90	1.32	9.97	1.53	9.48	1.17	9.66	1.37

4.3 휠트래킹 시험 결과

본 시험은 공시체를 60℃에서 6시간 양생한 후 1시간 동안 폭 5cm의 차륜을 통과시켜 45-60분 사이의 바퀴패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도(Dynamic Stability)를 결정한다. 이 시험은 재료의 소성변형 특성에 대한 저항성을 가장 잘 묘사하고 있다.



표 14. 각 혼합물의 종류별 AP함량의 변화에 따른 휠트래킹 시험 결과

종 류	동적안정도 DS(회/mm)				
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
일반밀입도	756	865	1,000	568	184
전기로산화슬래그 13mm	1,644	1,921	2,032	1,223	806
전기로산화슬래그 20mm	1,825	1,922	2,161	1,635	822
전기로산화슬래그 BB-2	625	1,042	1,684	813	420

5. 결 론

전기로 산화슬래그 골재의 아스팔트 콘크리트 혼합물 적용에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기로 산화슬래그 골재의 물성시험결과 에이징의 유무에 관계없이 아스팔트 콘크리트 혼합물용 골재의 품질기준을 만족하였으며, 화학분석시험 결과 F-CaO, F-MgO의 영향도 미비한 것으로 나타났다. 또한 증감속 용출시험 결과에서 알 수 있듯이 환경유해물질은 기준치 미만이거나 검출되지 않았다.
- (2) 전기로 슬래그 아스팔트 혼합물은 마찰안정도 값이 일반혼합물보다 1.2~1.5배 정도 높게 나타났으며, 간접인장강도시험에서는 전기로 슬래그 아스팔트 혼합물이 다소 크게 측정되고 있었다.
- (3) 휠트래킹시험 결과 전기로 산화 슬래그의 동적안정도 값은 일반 혼합물보다 최소 2배 정도 큰 동적안정도를 나타내고 있으며, 이것은 전기로슬래그 아스팔트 혼합물이 소성변형에는 더욱 잘 저항하는 것을 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 2005년부터 한국건설자재시험연구원 기술용역사업으로 진행되고 있는 것으로 본 연구를 가능케한 인천선강(주) 대표이사께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Noureldin, A.S.; McDaniel, R.S., "Evaluation of Surface Mixture of Steel Slag and Asphalt", TRR No. 1269, 1990.
2. Gupta, J.D.; Kneller, W.A.; Tamirisa, R.; Skrzypczak-Jankun, E., "Characterization of Base and Subbase Iron and Steel Slag Aggregates causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains", TRR No. 1434, TRB, 1994.
3. Coomarasamy, A.; Walzak, T.L., "Effects of Moisture on Surface Chemistry of Steel Slags and Steel Slag-Asphalt Paving Mixes", TRR No.1492, TRB, 1995.
4. Farrand, B; Emery, J., "Recent Improvements in Quality of Steel Slag Aggregate", TRR No. 1486, TRB, 1995.
5. Buck, A.D., Recycled Concrete as Source of Aggregate, ACI Journal, Vol.74, No.5, 1977.
6. 도로연 96-46-17, "아스팔트 콘크리트 포장용 골재의 품질향상에 관한 연구(II)", 한국도로공사, 1996.
7. 남영국 · 최한중 공저, "도로공학총론", 청문각, 1997.
8. "도로공사 표준시방서", 건설부, 1996.
9. "아스팔트포장 설계 · 시공요령", 사단법인 한국도로교통협회 1997.