

제강슬래그 아스팔트혼합물의 도로포장 성능 평가

Performance evaluation of steel slags as aggregates for asphalt concrete test road



이종민 Jong-Min Lee
현대제철(주) 고로사업본부
환경에너지기술팀 책임매니저
E-mail : jmstar@hyundai-steel.com



이윤모 Yun-Mo Lee
현대제철(주) 연구개발 · 품질본부
제선공정연구팀 책임연구원
E-mail : thirdhand81@hyundai-steel.com



이진우 Jin-Woo Lee
현대제철(주) 고로사업본부
환경에너지기술팀 매니저
E-mail : pigonisgone@hyundai-steel.com

1. 머리글

철강제품 생산과정에서 발생하는 고로슬래그는 대부분 시멘트 혼화재로 사용하여 수요가 안정적이고 온실가스 감축에도 상당부분 기여하고 있다. 반면에, 제강슬래그는 천연골재와 동등 이상의 물성을 가지고 있음에도 불구하고 단순 토목성토용으로 주로 사용되고 있어 건설경기에 따라 수요 변동이 심하여 재고증가 등 자원이 낭비되고 있는 실정이다.

한편, 건설재료의 주요 공급원인 천연골재는 자원고갈 및 산림훼손 등 환경문제로 인하여 공급 부족 문제가 현실화되고 있기 때문에 콘크리트, 아스팔트 콘크리트 등의 건설재료에 제강슬래그는 천연골재의 대체재로서 훌륭한 대안이 될 수 있다.

이에 본 고에서는 제강슬래그를 아스팔트 콘크리트의 골재로 사용한 제품에 대하여 포장가속시험, 실내시험 및 실증 도로 품질평가 등 도로포장 성능 평가 결과를 소개하고자 한다.

2. 제강슬래그 골재 치환 아스팔트 혼합물

제강슬래그는 철광석을 원료로 생산한 선철을 강으로 제련하는 공정에서 생성되는 전로 슬래그와 고철을 원료로 하는 제련 공정에서 발생하는 전기로 슬래그로 구분할 수 있다.

제강슬래그를 아스팔트 콘크리트 골재로 사용하기 위해서는 용융 상태로 배출된 슬래그를 야드에서 서냉하여 파쇄, 자력 선별, 입도 선별 및 숙성공정을 거쳐 아스콘에서 요구하는 품질기준을 충족하여야 한다.

[표 1]은 아스콘에 사용한 제강슬래그와 천연골재의 품질평가 결과를 정리한 것이다. 여기서, 제강슬래그는 밀도가 천연골재에 비해 20% 이상 높은 특성이 있으나, 편장석률이 1등급 골재 수준으로 매우 양호하고, 기타 항목에

[표 1] 아스콘용 골재 품질 평가 결과

구분		품질기준	전기로 슬래그	전로 슬래그	천연골재
굵은 골재	절건밀도 (g/cm ³)	2.5 이상	3.71	3.21	2.66
	흡수율 (%)	3.0 이하	1.14	1.36	1.13
	동적수침후 피복율 (%)	50 이상	54	55	55
	편장석률 (%)	30 이하	1	1	13
	마모율 (%)	35 이하	16.9	13.0	13.9
	안정성 (%)	12 이하	1	2	1
	파쇄면 비율 (%)	85 이상	100	100	100
잔골재	절건밀도 (g/cm ³)	2.5 이상	3.70	3.01	2.63
	흡수율 (%)	3.0 이하	1.79	1.86	1.25
	안정성 (%)	15 이하	3	4	5
	모래당량 (%)	50 이상	77	80	71
	잔골재 공극률 (%)	45 이상	66	56	58

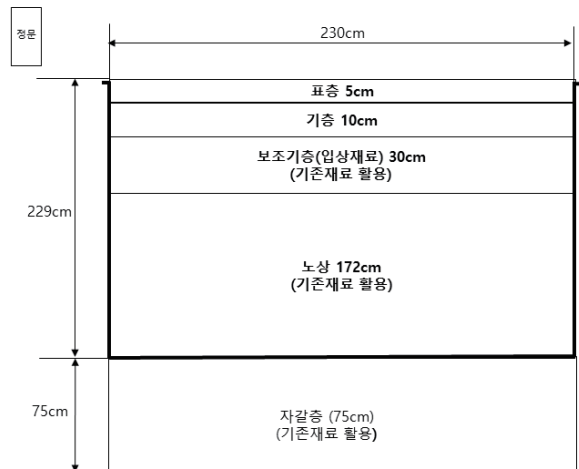


그림 1. 시험포장 단면도

서도 품질기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

슬래그 아스콘의 골재는 100% 제강슬래그를 사용하였고, 채움재, 아스팔트(AP) 등 기타 재료는 천연골재를 사용한 일반 아스콘과 동일한 재료를 사용하여 배합 설계를 하였으며, 플랜트의 운전 조건도 동일하게 생산하였다.



그림 2. APT(Accelerated Pavement Tester)

3. 포장 가속 시험

포장가속시험은 단기간에 포장체의 공용성능을 평가하고자 하는 것으로, 인위적인 방법에 의해 제어되는 차량하중 및 환경하중을 포장체에 작용시켜 누적되는 손상을 평가하는 것이다. 표층용 아스팔트의 소성변형 저항성 평가를 위해 <그림 1>과 같이 시험포장 단면을 계획하였고, 포장체는 폭 2.3m, 연장 12.5m의 2개 차로에 일반 아스콘과 슬래그 아스콘을 구역별로 시공하여 <그림 2>의 장비를 사용하여 시험하였다.

포장체에 적용한 하중의 축 구성은 주행부의 Dual Tire에

Half Axle로 타이어의 압력은 120psi(0.82MPa)이다. 하중의 크기는 4.1ton, 6.15ton, 8.2ton으로 점차 증가하여 적용하였고, 포장체의 온도는 소성변형 저항성을 시험하기 위해 45~52℃를 유지하였으며 평균 50℃를 유지하였다.

시험포장에 대해 고온(45~52℃)의 조건에서 전기로 슬래그 구간은 563,200 ESALs(Equivalent Single Axle Loads, 등가단축하중), 전로 슬래그 구간은 588,800 ESALs의 반복하중을 적용하였다.

하중적용 후의 포장체의 사진은 <그림 3>, <그림 4>와 같다. 전기로 슬래그 구간의 경우 변형량이 8.5mm인 반면, 일반 구간은 16.1mm로 슬래그가 확연히 우수함을 알 수 있었고, 전로 슬래그 구간의 변형량은 14.5mm로 일반 구간과 동일한 결과를 나타내어 동등 수준의 소성변형 저항성을 보이는 것을 확인하였다.

4. 실내 시험

슬래그 아스콘의 피로균열 저항성은 동탄성계수 및 직접인장 반복피로 시험 등 실내시험을 통해 평가하였다. 시험방법은 각각의 혼합물 시편을 제작하고, <그림 5>의 아스팔트 혼합물 공용성 평가시험기 AMPT(Asphalt Mixture Performance Tester)를 이용하여 시험하였다.

동탄성계수 시험은 다양한 온도 및 하중 재하시간에 대해 혼합물이 어떤 반응을 하는지를 알아봄으로써 중온 및 저온에서의 균열 가능성 및 고온에서의 소성변형 가능성도 가늠할 수 있다. 일반적으로 저온 및 상온에서의 파손은 균열로서, 탄성계수가 낮은 물성을 가지는 것이 유연하므로 균열 저항성이 높은 경향이 있으며, 고온에서 발생하는 파손은 소성변형으로서 탄성계수가 높을수록 소성변형 저항성이 높은 경향이 있다.

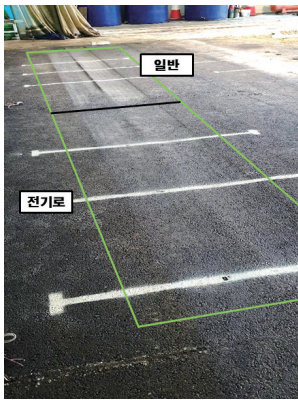


그림 3. 전기로구간 시험 종료 전경

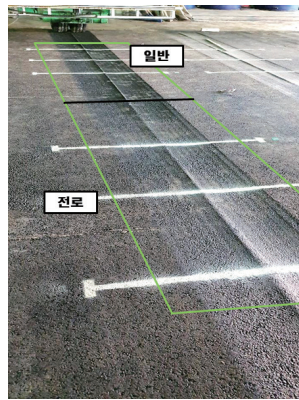


그림 4. 전로구간 시험 종료 전경

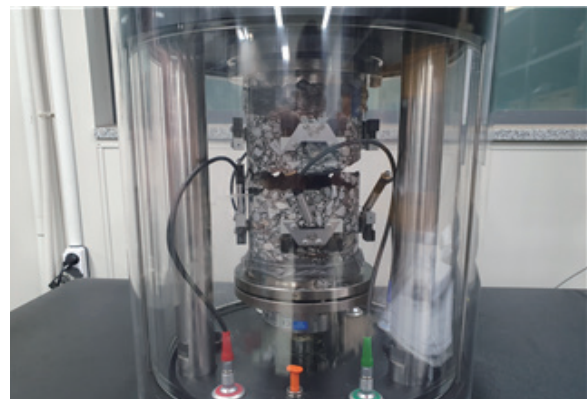


그림 5. AMPT를 이용한 피로균열 시험

[표 2] 상온 및 고온에서의 동탄성계수 비교

시험조건	HMA(일반)	전기로	전로
54℃, 10 Hz	846 MPa	1,302 MPa	739.9 MPa
비교	-	54% 증가	13% 감소
20℃, 10 Hz	9,412 MPa	8,493 MPa	8,137 MPa
비교	-	10% 감소	14% 감소

[표 3] 피로균열 시험을 통한 세 가지 혼합물의 피로 수명 비교

혼합물 종류	HMA(일반)	전기로 아스콘	전로 아스콘
피로 파괴 시 반복 하중 횟수	2,100	1,840	2,230
비교	-	12.4% 낮음	6.2% 높음

동탄성계수 시험결과는 [표 2]와 같이 상온(20℃)에서는 전로가 HMA(일반)나 전기로보다 낮은 탄성계수를 보여 피로 균열 저항성 측면에서 유리한 것으로 예측되었고, 고온(54℃)에서는 전기로가 HMA 및 전로 아스콘보다 높은 탄성계수를 나타내어 소성변형 저항성이 유리한 것으로 나타났다.

직접인장 반복피로 시험은 시편에 실제 반복 하중을 주어 피로에 의한 인장파괴를 유도하여 각 혼합물이 어느 정도의 반복하중을 견딜 수 있는지를 시험하는 방법으로서 실제 포장에서 균열저항성을 평가할 수 있는 좋은 방법이다.

직접인장 반복피로 시험결과는 [표 3]에서 보는 바와 같이 세 가지 혼합물 중 피로균열 저항성이 높은 순서로 나열하면 전로 아스콘(2,230회), HMA(2,100회), 전기로 아스콘(1,840회)의 순서였다. 즉, 전로 아스콘의 피로 수명은 HMA(일반)에 비해 6.2% 높게 나타났고, 전기로 아스콘의 피로 수명은 HMA에 비해 12.4% 낮은 것으로 나타났다. 전로 아스콘의 피로 수명이 HMA보다 높은 것은 부피로 환산한 아스팔트 함량이 HMA보다 많고, 거친 전로 슬래그 골재의 표면이 아스팔트 바인더와의 접착을 증가시키기 때문인 것으로 설명된다. 반면 전기로의 경우 아스팔트 함량을 약간 상향시키는 등의 노력을 통해 피로균열 저항성을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 실증 도로 품질 평가

슬래그 아스콘의 공용성 평가를 위해 실제 도로에 시험 시공하여 장기간 품질 평가를 수행하고 있으며, 그 중에서 당진시에 시공한 구간의 사례를 소개하고자 한다.

<그림 6>과 같이 동일한 일자에 일반 구간과 슬래그 구간을 구분 시공하고 재령 1년 시점에서 정밀포장평가 장비를 활용하여 균열율과 소성변형량을 평가하였다.



그림 6. 당진시서해로 실증도로 평가구간



그림 7. 구간별 정밀포장평가 결과

평가 결과는 <그림 7>에 보이는 것처럼 소성변형량이 슬래그 구간에서 7.4mm인 반면, 일반 구간에서는 30.2mm로 육안으로도 확연한 차이를 보였다. 슬래그는 교차로 부근에 시공되어 정지하중 및 저속하중의 영향을 받는 조건임에도 불구하고 일반 아스콘에 비해 소성변형량이 현저히 적어 소성변형 저항성이 확연히 우수한 것을 알 수 있었다.

6. 맺음말

도로 포장재료인 아스팔트 콘크리트의 장기 공용성을 검증

하기 위하여 포장가속시험, 실내시험, 실증도로 품질평가를 실시한 결과, 천연골재를 100% 제강슬래그로 대체하여 생산한 슬래그 아스콘의 품질은 천연골재를 사용한 일반 아스콘에 비해 손색이 없었고, 특히 소성변형 저항성 측면에서는 상당히 우수한 결과를 확인하였다. 다만, 제강슬래그의 특성상 혼합물의 밀도가 높아 시공물량이 증가하는 문제가 있지만, 천연골재에 비해 저렴한 유통가격은 제품 톤당 가격을 낮출 수 있기 때문에 충분히 극복이 가능하리라 생각된다.

현재 연간 740만 톤에 달하는 막대한 양의 제강슬래그가 원

거리 이송을 통해 단순 토목성토용으로 사용되고 있다. 이것을 아스콘용 골재로 활용할 수 있다면 천연골재 채취에 의한 산림훼손을 저감하고 골재자원 고갈을 늦출 수 있을 뿐만 아니라 온실가스 저감에도 기여할 것으로 기대한다.

이를 위해서는 제강슬래그의 고부가가치 건설재료로서의 활용 및 응용기술 확대를 통한 지속가능한 친환경 업사이클링 산업화를 위해 법제도 개선과 더불어 국책연구사업을 기반으로 Total solution 연구 수행을 통한 객관적이고 신뢰도 높은 연구 성과 도출이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. (사)한국도로학회, "철강 슬래그 아스콘 제품의 공용성능 평가를 통한 품질 검증에 관한 연구", (2020)
2. (주)로드텍, "현대제철 내·외부도로 포장상태 조사 및 분석", (2016)

담당 편집위원 : 김혁중(한경대학교)

● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하오니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진 포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 차장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel. : 02-552-4728)