

제강 슬래그 및 순환골재를 사용한 순환 아스팔트 혼합물의 장기 공용성 평가

Long-Term Performance Evaluation on the Recycled Asphalt Concrete Using the Steel Slag and Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates

박경원^{1*} · 장동복² · 이종민³ · 강병화⁴ · 김형배⁵Kyung-Won Park^{1*} · Dong-Bok Jang² · Jong-Min Lee³ · Byung-Hwa Kang⁴ · Hyung-Bae Kim⁵

(Received November 25, 2021 / Revised December 20, 2021 / Accepted December 20, 2021)

The study performed long-term performance evaluation on the hot mix asphalt using the steel slag aggregates and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The laboratory comparative evaluation was conducted between conventional Hot Mix Asphalt (HMA) which is entitled WC-2 and HMA containing steel slag and RAP which is entitled ES WC-2(R). Dynamic stability test, dynamic modulus test, and fatigue crack test were conducted during the comparative evaluation process. The dynamic stability test result showed that ES WC-2(R) was 140% higher than WC-2. It is noted that ES WC-2(R) showed no inflection point whereas WC-2 showed inflection point during the dynamic stability test which implies ES WC-2(R) has the higher moisture susceptibility than WC-2. The dynamic modulus of ES WC-2(R) were 342.3%, 486.7%, and 350.0% higher than WC-2 at medium temperature of 21°C, low temperature of -10°C, and high temperature of 38°C respectively. The test result showed that rutting resistance of ES WC-2(R) is higher than WC-2 at all temperature spectrum.

The fatigue resistance of ES WC-2(R) were 31.7%, 325.3%, 899.9% higher at low stress level, medium stress level, and high stress level, respectively. The test result showed that ES WC-2(R) is higher than WC-2 at all stress levels.

Based on the laboratory comparative evaluation, The in-situ scale Accelerated Pavement Test (APT) was conducted comparing WC-2 and WC-2(R). APT found that the rutting resistance of WC-2(R) was 45% higher than WC-2.

키워드 : 제강슬래그, 순환골재, 아스팔트 혼합물, 장기 공용성 평가

Keywords : Steel slag, Reclaimed asphalt pavement aggregates, Hot mix asphalt, Long-term performance evaluation.

1. 서론

슬래그는 철강산업 부산물로 제품 종류별 생산 공정에 따라 제강슬래그와 고로슬래그로 구분할 수 있다. 한국철강협회가 2019년도 국내 13개 제강사를 대상으로 슬래그 발생 및 재활용을 조사 결과에 따르면, 고로슬래그 약 16,562천톤, 제강슬래그 약 11,119천톤이 발생하였다. 슬래그의 재활용율은 선진국과 비슷한 수준으로, 목표 재활용율 95%를 상회하고 있다. 주로 시멘트원료(87%), 성토용(9%), 도로용(2%)로 활용되고 있는 고로슬래그와 달리 제강슬래그는 저부가가치 재료인 성토용골재(45%), 도로용골재(16%)

로 재활용되고 있으며, 도로포장의 보조기층용 골재로 사용되고 있는 실정이다. 제강슬래그는 강을 제조하는 과정에서 생긴 부산물로 여분의 조강성분을 회수하기 위해 로드밀(Rod Mill) 파쇄 공정을 거쳐 생산되며, 이때 발생한 제강슬래그는 미분이 많아 다양한 규격의 아스팔트 혼합물에 활용되기 어려운 단점이 있다.

최근 자연환경 보호를 위한 석산 개발에 대한 규제가 심해 천연골재 공급이 어려운 상황이며, Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2018)는 향후 20년 이내 천연골재 고갈 사태 발생 가능성이 높다고 제시하였다. 또한, Ministry of Environment (2020)는 그린뉴딜 정책의 일환으로 저탄소 녹색산업의 중요성을

* Corresponding author E-mail: pkw4425@naver.com

¹에스지이 주식회사 기술연구소 연구소장(The Institute of Technology, SG Co., Ltd., Incheon, 22794, Korea)

²에스지이 주식회사 기술연구소 선임연구원(The Institute of Technology, SG Co., Ltd., Incheon, 22794, Korea)

³현대제철주식회사 환경에너지 기술팀 책임매니저(Environment & Energy Engineering Team, HYUNDAI STEEL Co., Ltd., Chungnam, 31719, Korea)

⁴주식회사 효석 연구개발팀 실장(R&D Department, Hyoseok Co., Ltd., Jeonnam, 57812, Korea)

⁵한국도로공사 도로교통연구원 포장연구실 선임연구위원(Pavement Research Division, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi-do, 18489, Korea)

Copyright © 2021 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

Table 1. Results of aggregates X-Ray fluorescence analysis

| Type | Si | K | Al | Ca | Fe | Ti | Mg | Rb | Sr | Mn | Zr | Cr | Zn | Nb |
|---------|------|------|------|------|------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| Slag | 8.8 | 0.1 | 6.6 | 7.5 | 46.8 | 1.1 | 1.5 | N · D | 0.3 | 9.8 | 0.1 | 1.5 | 0.3 | 0.1 |
| Granite | 48.4 | 26.7 | 13.0 | 20.2 | 2.8 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | N · D | N · D | N · D |

강조하였다.

제강슬래그 골재는 일반 천연골재 대비 약 1.4배 높은 겉보기 밀도(g/cm^3)의 특징을 보이며, 아스팔트 혼합물의 재료로 사용할 경우 다양한 물성 증진 효과를 갖는다.

Shen et al.(2018)은 제강슬래그 골재 표면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 다공성구조로 이루어진 것을 확인하였으며, 제강슬래그 골재와 아스팔트와의 결합성능 증진을 검증하였다. Kavussi et al.(2015)는 제강슬래그를 아스팔트 혼합물에 사용할 경우 거칠고 각진 형상을 하고 있어 맞물림 효과가 뛰어나 일반 골재 사용 대비 피로수명이 증가하는 것을 검증하였다. Wen et al.(2015)은 제강슬래그를 사용한 아스팔트 혼합물이 studded tire 마모저항, 피로균열, 소성변형 저항성이 우수함을 제시하였다. 외국의 선행연구사례 검토 결과 제강슬래그 골재를 사용할 경우 아스팔트 혼합물의 피로균열 저항성, 소성변형 저항성 등이 향상되는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 상기 언급한 천연골재 자원수급의 어려움을 해결하고 아스팔트 혼합물의 기초물성 및 공용성능을 향상시키기 위해 제강슬래그를 사용하였으며, 일반 아스팔트 혼합물 대비 우수한 성능의 슬래그 아스팔트 혼합물에 대한 기초물성 평가 및 장기 공용성능을 검증하였다.

2. 슬래그 아스팔트 혼합물 기초물성 평가

제강슬래그를 활용한 아스팔트 혼합물의 공용성능 평가에 앞서 배합설계에 사용된 골재 및 아스팔트 혼합물에 대한 기초물성평가를 수행하였으며, 표층용 아스팔트 혼합물 WC-2 규격에 맞는 골재 합성입도 도출 및 최적아스팔트 함량 결정을 통한 마찰배합설계를 수행하였다.

2.1 골재 기초물성 평가 결과

제강슬래그는 전로슬래그와 전기로슬래그로 분리할 수 있으며, 본 연구에서 사용된 전기로 슬래그는 사전에 전기로 환원슬래그를 분리 배출하여 생산된 골재로 Free-CaO 성분이 높은 전기로 환원슬래그를 배제한 전기로 산화 슬래그를 사용하였다. CaO(free-

CaO)성분이 높을 경우 물과 반응 후 부피팽창이 일어나 아스팔트 포장도로의 조기 결함이 발생할 수 있다. 제강슬래그의 경우 자체적으로 함유하고 있는 Cao 성분이 높아 수개월 이상 야적 및 에이징(aging) 과정이 필요하며, 본 연구에 사용된 전기로 산화 슬래그는 3개월 이상 에이징 과정을 거쳐 선별된 골재를 사용하였다.

Table 1은 슬래그 골재와 일반 골재에 대한 제강슬래그의 x선 형광분석(XRF) 결과로 환경부 지정 폐기물공정시험 및 토양오염 공정시험기준에서 제시하는 중금속 함량이 모두 기준치 이하로 측정되어 화학적 안정성을 검증하였다.

본 연구에서 사용된 골재의 기초물성 평가는 아래 Table 2와 같다. 제강슬래그 골재의 경우 Fe 함량이 높아 일반골재 대비 약 1.4배 높은 특징이 있으며, 수침팽창 시험 및 기초 물성평가 결과 모든 품질기준을 만족하였다.

Table 2. Aggregate characteristics(granite, slag, RAP)

| Property | Units | Specifications | Granite | Slag | RAP |
|-------------------------|----------|----------------|---------|------|------|
| Density | g/cm^3 | $2.5 \leq$ | 2.67 | 3.60 | - |
| Absorption | % | ≤ 3.0 | 0.62 | 1.23 | - |
| Soundness | % | ≤ 12 | 3.7 | 2.5 | - |
| Abrasion | % | ≤ 35 | 26.2 | 19.9 | - |
| Flat or elongated | % | - | 13 | 1 | - |
| Crushing value | % | $85 \leq$ | 100 | 100 | - |
| Bitumen coverage | % | $50 \leq$ | 55 | 52 | - |
| Immersion expansion | % | ≤ 2.0 | 0 | 0 | - |
| Old asphalt content | % | $3.8 \leq$ | - | - | 4.8 |
| Old asphalt penetration | - | $20 \leq$ | - | - | 23.0 |
| Washing test | % | ≤ 5 | - | - | 1.9 |
| Organic material | % | ≤ 1 | - | - | 0.53 |
| Inorganic material | % | ≤ 1 | - | - | 0.03 |
| Water supply ratio | % | ≤ 5 | - | - | 2.4 |

2.2 슬래그 아스팔트 혼합물 배합설계

기존 제강슬래그 생산 공정에 분류 선별 공정을 추가하여 생산된 아스팔트 콘크리트 표층용 입도에 적합한 ‘제강슬래그 골재’와 페아스팔트 콘크리트 파쇄를 통해 생산되는 ‘순환골재’를 사용하여 배합설계를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 아스팔트 혼합물

은 제강슬래그 골재 45%, 순환골재 30%, 잔골재 22%, 채움재 3%를 사용하였으며, 아스팔트 표준용 WC-2 규격의 합성입도를 만족하였다.

Table 3. Aggregate gradations of asphalt mixtures

| Type | Percentage of quality pass(%) | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | 13 | 10 | 5 | 2.5 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.08 |
| Slag WC-2(R) | 99.1 | 90.3 | 65.0 | 45.6 | 25.5 | 18.7 | 12.5 | 6.6 |
| WC-2 | 99.4 | 91.1 | 66.0 | 42.0 | 22.0 | 15.6 | 11.3 | 5.8 |
| Gradation limit | 95~100 | 84~92 | 55~70 | 35~50 | 18~30 | 10~21 | 6~16 | 4~8 |

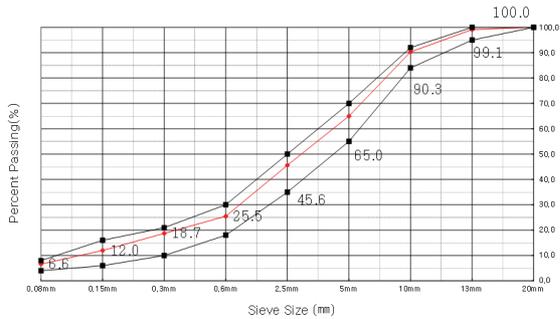


Fig. 1. Gradation of WC-2(R)

슬래그 아스팔트 혼합물 배합설계시 유의사항은 일반 골재대비 높은 슬래그 골재를 사용하여, 중량으로 결정되는 아스팔트 혼합물 합성입도 기준으로 합성입도를 산출할 경우, 일반적으로 제시하는 합성입도의 체적 구성비를 만족할 수 없다. 따라서 일반 골재의 밀도와 슬래그 골재의 밀도 차이를 고려해 슬래그 골재를 추가하고 아스팔트 혼합물의 체적특성을 분석할 필요가 있다.

2.3 아스팔트 혼합물 기초물성평가 결과

일반 WC-2 혼합물과 Slag WC-2(R) 혼합물에 대한 기초물성 평가를 GR F 4005에서 제시하는 기준으로 실시하였다.

시험결과 해당 기준을 모두 만족하였으며, 특히 소성변형 저항성을 나타내는 동적안정도가 1.4배가 증가한 것으로 조사되었다.

3. 아스팔트 혼합물 공용성 평가 방법

아스팔트 혼합물의 기초물성평가는 품질기준을 기반으로 수행하는 기초시험으로 아스팔트 포장도로 공용 이후 발생하는 피로

Table 4. Hot mix asphalt evaluation results

| Property | Units | Specifications | WC-2 | Slag WC-2(R) |
|----------------------------|-------------------|----------------|--------|--------------|
| Degree of bitumen coverage | - | 50 ≤ | 57 | 68 |
| Marshall stability | N | 5 000 ≤ | 11 613 | 17 100 |
| Flow | 1/100cm | 20~40 | 34 | 25 |
| Air voids | % | 3~6 | 4.1 | 4.0 |
| VFA | % | 65~80 | 76 | 78 |
| VMA | % | - | 17.3 | 17.7 |
| TSR | - | 0.80 ≤ | 0.80 | 0.89 |
| Indirect tensile strength | N/mm ² | 0.80 ≤ | 1.19 | 1.47 |
| Toughness | N · mm | 8 000 ≤ | 14 422 | 14 980 |
| Dynamic stability | Number/mm | 750 ≤ | 1 801 | 2 593 |

균열, 소성변형 등의 결함 영향에 대한 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 공용성을 평가 할 수 있는 동탄성계수, 피로균열, 함부르크 휠 트래킹 시험을 수행하여 일반 WC-2와 Slag WC-2(R) 혼합물의 성능을 비교 및 검증하였다.

3.1 동탄성계수 시험

여러 온도와 하중 주기에서 측정된 동탄성계수는 아스팔트 포장 두께 설계 및 성능 분석에 사용되는 중요한 설계변수로 활용된다. 아스팔트 혼합물은 저온에서 탄성의 성질, 고온에서는 점성의 성질을 가지고 있어 온도에 따라 점탄성의 특징을 동시에 나타낸다. 동탄성 계수는 휴지기가 없는 반정현파형 하중에서 최대 응력을 회축 축 방향 변형률로 나눈 값으로 복합계수의 절대값으로 표시되며 산출방식은 아래 식 (1)~(4)에 해당된다.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t - \phi) \tag{2}$$

$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} \tag{3}$$

$$| E^* | = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \tag{4}$$

동탄성계수는 비파괴시험이므로 같은 시편을 이용하여 일련의 시험을 순차적으로 수행하며, 시험시편의 손상을 최소화하기 위해 저온에서 고온으로, 높은 하중재하 속도에서 낮은 속도 순으로 시



Fig. 2. Test equipment and testing materials of dynamic modulus

험을 수행한다(KS F 2485). 시험 온도는 -10°C , 4°C , 21°C , 38°C , 54°C 의 5개의 온도에서 진행하며, 각 온도별 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz, 0.1Hz의 하중 재하 주기에서 측정된다.

3.2 피로 균열 시험

피로균열 시험은 반복되는 교통하중에 의해 발생하는 균열, 소성변형, 도로노면 평탄성 등 도로에서 발생하는 결함에 대한 잠재적 영향력을 평가할 수 있는 시험이다. 응력 집중부에 표면 결함 혹은 내부 결함이 집중적으로 발생할 경우 실제 도로 표면 및 하부층에 균열 및 소성변형이 발생하고 반복되는 교통하중 및 환경하중에 의해 심각한 도로파손으로 발전될 가능성이 높다. 시험조건은 아래 Table 5와 같이 시험항목별 구체적인 시험조건은 EN 12697-24E에 따라 수행하였으며, 150 000 하중주기, 수평 변형량 1mm 초과, Strain Ratio 50 이상의 세 가지 조건 중 먼저 도달할 때 시험을 종료하였다.

3.3 함부르크 휠 트래킹 시험

함부르크 휠 트래킹 시험은 다짐된 공시체를 수침상태에서 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 검증할 수 있는 시험 방법으로 최근 미국에서는 수분민감도와 소성변형 저항성을 동시에 측정 가능한 함부르크 휠 트래킹 시험(Hamburg Wheel Tracking Test)을 수행하고 있다.

미국의 교통국에서 20 000회의 차륜하중을 재하 하였을 경우, 박리발생지점이 최소 10 000회 이후 발생하고 20 000회에서 침하량이 20mm를 초과하지 않는 아스팔트 혼합물 사용을 제시하고 있으며, 국내 시험 기준인 아스팔트 혼합물의 휠 트래킹 시험방법(KS F 2374)은 도로의 소성변형 저항성을 시험으로 소성변형 1mm 발생하는 데 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수를 측정하는 방법과는 차이가 있다.

함부르크 휠 트래킹의 시험 방법은 AASHTO T324를 토대로



Fig. 3. Test equipment and testing materials of fatigue crack

Table 5. Test condition of fatigue crack test

| Type | Explanation |
|-------------------------|---|
| Test purpose | Analysis of the fatigue crack and fracture property of asphalt mixtures |
| Specimen size | 100mm x 50mm |
| Load mode | Stress control |
| Input stress | Fluctuation according to type of asphalt mixture |
| Cyclic load | Load cycle : 1Hz |
| Sitting load | 50N |
| Test temperature | 20°C |
| Temperature control | Using the thermocouple |
| End of test | Load Cycle 150 000, horizontal deformation 1mm<, Strain Ratio 50 |
| Deformation measurement | Horizontal deformation(mm) according to LVDT |



Fig. 4. Test equipment and testing materials of hamburg wheel tracking test

진행하였으며, 일정 온도($50 \pm 1^{\circ}\text{C}$) 유지 및 관리가 가능한 시험 수조에 시편을 거치하고 차륜 속도를 분당 52 ± 2 회 적용하여 각 2회 시험을 수행하였다.

4. 아스팔트 혼합물 장기공용성능 평가방법

아스팔트 혼합물은 고온(160°C 이상)에서 생산되며, 도로포장 시공 이후 성능을 발현하고 도로의 재령이 증가할수록 도로의 공용성능이 떨어지는 특징을 갖는다. 상기 이유로 실내에서 진행되

는 시험의 경우 장기적 관점에서 성능검증이 어려운 실정이다. 제강슬래그와 순환골재를 활용한 아스팔트 혼합물의 장기적 공용성 평가 평가를 위해 포장가속시험(APT, Accelerated Pavement Testing)을 수행하였다.

4.1 포장가속시험(APT) 개요

포장가속 시험은 단기간에 포장체의 공용성능을 평가할 수 있는 시험으로 차량 하중과 환경하중을 적용시켜 누적되는 손상을 평가하는 시험 방법이다. 하중의 크기는 8.2ton을 좌·우 2.5cm의 원더링(Wandering), 소성변형 저항성 시험을 위해 포장 온도를 평균 50°C(45~52°C)를 적용하였으며, 소성변형 13mm가 발생할 때까지 731,136ESALs를 재하 하였다.

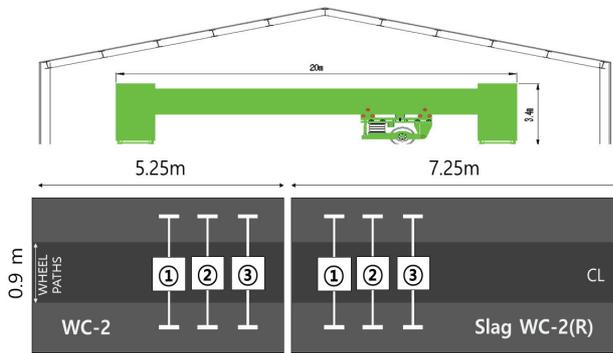


Fig. 5. Summary of accelerated pavement testing

소성변형 발생량은 표면 프로파일(Laser Profilometer)을 이용하여 반복하중에 따른 소성변형 발생량 추이를 분석하였으며, 소성변형 발생의 원인을 규명하기 위해 도로 표층에 Rutting Gauge를 매설하여 도로의 표층, 기층, 보조기층의 변형량을 측정하였다.



Fig. 6. Laser profilometer & rutting gauge

5. 시험결과 및 고찰

5.1 동탄성계수 시험

시험에서 조사된 동탄성계수 값을 설계의 입력변수로 사용하기 위해서 마스터곡선을 작성해야하며, 하중시간 및 온도의 재하 속도의 조합에 따라 조사된 데이터를 바탕으로 전이함수를 이용하여 마스터 곡선을 작성한다. Semi-Log 그래프는 낮은 온도에서의 거동을 비교할 수 있고, Log-Log 그래프는 고온에서의 거동을 분석하기 위해 사용되었다.

Fig. 7에서 보는바와 같이 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2에 비해 높은 하중재하 속도 영역(저온영역)에서의 동탄성계수 값이 큰 폭으로 상승된 결과를 보였다. Fig. 8에서의 Log-Log Master Curve 곡선에서 보는바와 같이 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2에 비해 낮은 하중재하 속도 영역(고온영역)에서의 동탄성계수 값이 큰 폭으로 상승된 결과를 보였다.

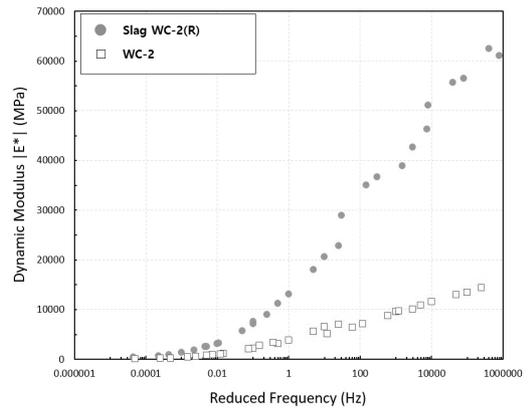


Fig. 7. Semi log master curves of dynamic modulus

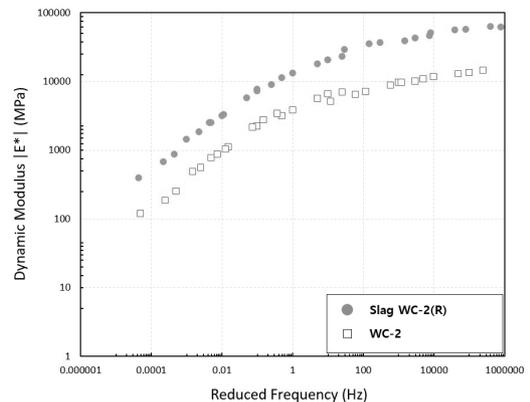


Fig. 8. Log-log master curves of dynamic modulus

동탄성계수 분석 결과 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2에 비해 21°C - 1Hz(선형구간) 기준으로 약 342.3% 높게 산정되었으며, 하중재하 속도가 높은 저온 영역(-10°C, 4°C)의 경우 -10°C-1Hz 기준으로 486.7% 높게 산정되었다. 하중재하 속도가 낮은 고온 영역(38°C, 54°C)에서의 동탄성계수는 54°C-1Hz 기준으로 350.0% 높게 산정되었다. Slag WC-2(R)은 하중재하 속도가 높은 저온구간에서 일반 WC-2보다 상승된 공용성을 보여줄 것으로 판단되고 주행속도가 빠르거나 기온이 낮은 지역에서도 공용성이 우수할 것으로 판단된다. 또한 하중재하 속도가 낮은 고온구간에서도 상승된 공용성을 보여줄 것으로 판단되어 전체적으로 Slag WC-2(R)이 일반 WC-2에 비해 우수한 공용성을 보여줄 것으로 판단된다.

Table 6. Results of WC-2 asphalt mixture dynamic modulus

| Test condition | | Value | |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------------|
| Temperature(°C) | Frequency (Hz) | $ E^* $ (MPa) | Phase angle(δ) |
| -10 | 25 | 14 392 | 7.47 |
| | 10 | 13 444 | 6.37 |
| | 5 | 13 022 | 6.99 |
| | 1 | 11 610 | 7.54 |
| | 0.5 | 10 845 | 7.88 |
| | 0.1 | 9 607 | 9.06 |
| | 21 | 25 | 6 953 |
| 10 | | 6 574 | 26.50 |
| 5 | | 5 605 | 26.33 |
| 1 | | 3 827 | 24.90 |
| 0.5 | | 3 146 | 27.75 |
| 0.1 | | 2 232 | 31.77 |
| 54 | 25 | 1 031 | 44.63 |
| | 10 | 768 | 31.88 |
| | 5 | 556 | 30.04 |
| | 1 | 250 | 33.03 |
| | 0.5 | 187 | 32.47 |
| | 0.1 | 119 | 27.71 |

5.2 피로균열 시험

아래 Fig. 9와 Fig. 10에서 보는바와 같이 일반 WC-2에 비해 Slag WC-2(R)이 동일한 Stress를 적용할 경우 전체적으로 더 높은 하중 재하 횟수에 대해 저항하는 것으로 분석 되었다. 시험 결과는 아래와 같으며, 각기 다른 품질을 보이기 때문에 동일한 Stress 값을 적용할 경우 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2 대비 저항성이 Low Stress Level에서는 31.7%, Middle Stress Level에서는

325.3%, High Stress Level에서는 899.9%가 증가하였다.

Table 7. Results of Slag WC-2(R) asphalt mixture dynamic modulus

| Test condition | | Results | |
|-----------------|----------------|---------------|-------------------------|
| Temperature(°C) | Frequency (Hz) | $ E^* $ (MPa) | Phase angle(δ) |
| -10 | 25 | 58 833 | 2.77 |
| | 10 | 61 046 | 6.07 |
| | 5 | 62 462 | 6.80 |
| | 1 | 56 510 | 6.94 |
| | 0.5 | 55 666 | 7.28 |
| | 0.1 | 51 134 | 9.06 |
| 21 | 25 | 22 846 | 15.71 |
| | 10 | 20 616 | 19.65 |
| | 5 | 18 058 | 21.28 |
| | 1 | 13 098 | 24.11 |
| | 0.5 | 11 289 | 25.61 |
| | 0.1 | 7 630 | 30.84 |
| 54 | 25 | 3 293 | 53.15 |
| | 10 | 2 510 | 44.32 |
| | 5 | 1 825 | 39.68 |
| | 1 | 875 | 38.43 |
| | 0.5 | 679 | 36.89 |
| | 0.1 | 397 | 33.79 |

Table 8. Results of fatigue resistance test

| Type | Indoor test results | | Stress conversion result | |
|--------------|---------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| | Stress | No of loading | Stress | No of loading |
| Slag WC-2(R) | 550 | 149 991 | 350 | 197 595 |
| | 950 | 51 891 | 450 | 173 786 |
| | 1 150 | 8 881 | 550 | 149 991 |
| WC-2 | 350 | 149 991 | 350 | 149 991 |
| | 450 | 40 861 | 450 | 40 861 |
| | 550 | 15 001 | 550 | 15 001 |

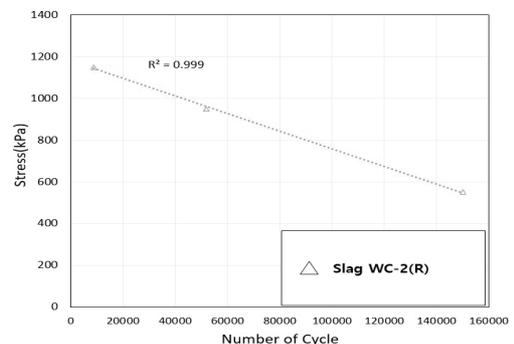


Fig. 9. Results of Slag WC-2(R) fatigue crack test

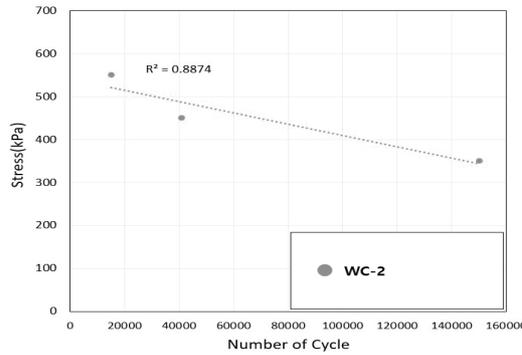


Fig. 10. Results of WC-2 fatigue crack test

5.3 함부르크 휠 트래킹 시험 결과

시험은 20 000회 주행을 적용하여 각 혼합물 당 2회 시험을 수행하였으며, Slag WC-2(R)의 경우 총 변위량은 각각 1회 4.78mm, 2회 3.43mm로 비교적 유사한 결과를 보이고 있으나, 일반 WC-2의 경우 1회 9.11mm, 2회 7.10mm로 슬래그를 사용한 WC-2에 비해 높은 변위량을 보인다. 일반 WC-2의 경우 변곡점이 발견되었지만 제하 횟수 10 000회 이후에 발생하였고 20 000회 이전에 변위량이 20mm를 초과하지 않아 수분에 대한 저항성 역시 우수한 것으로 판단된다. 하지만 Slag WC-2(R)은 변곡점이 발견되지 않고 변위량 또한 일반 WC-2에 비해 적게 발생하여 일반 WC-2 대비 수분에 대한 저항성이 우수한 것으로 조사되었다.

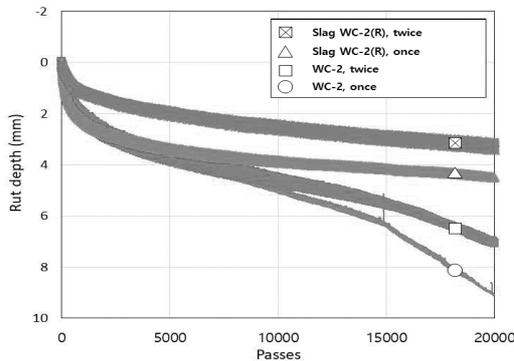


Fig. 11. Results of hamburg wheel tracking test

5.4 포장가속 시험 결과

고온(50°C)에서 731,136 ESALs의 하중을 재하 하는 동안 발생한 소성변형 발생량 측정 결과 일반 WC-2 대비 Slag WC-2(R) 포장도로서 소성변형 발생량이 약 6.5%적게 발생하였다. Laser Profiler 및 Rutting Gauge를 사용하여 포장가속 시험 이후 표층,

기층 및 하부층의 압축량을 분석한 결과 일반 WC-2 대비 Slage WC-2(R) 포장도로 표층의 소성변형 저항성이 약 45% 높게 조사되었다.

Table 9. Rutting depth(mm) according to loading

| Type | WC-2 | | | Slag WC-2(R) | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| | Section ① | Section ② | Section ③ | Section ① | Section ② | Section ③ |
| Rutting depth (mm) | 14.7 | 14.6 | 13.0 | 11.9 | 14.2 | 13.4 |
| Average | 14.1 | | | 13.2 | | |

Table 10. Compressibility of pavement layers

| Type | WC-2 | Slag WC-2(R) |
|-------------------------|------|--------------|
| Surface course | 5.8 | 3.2 |
| Base and subbase course | 5.8 | 7.4 |
| Total | 11.6 | 10.6 |

5.5 공용성 평가 결과 고찰

Slag WC-2(R)의 공용성평가가 일반 WC-2에 비해 높게 산출된 것은 골재 맞물림 효과와 연관이 있다. 제강슬래그 골재는 표면이 거칠고 공극이 많은 특징을 갖고, 골재의 각진 형상으로 맞물림 효과가 우수하다. Masad et al.(2007)은 아스팔트 혼합물에 사용되는 골재의 맞물림 효과가 높을 수록 소성변형 저항성 및 피로균열 저항성이 향상되는 것을 검증하였다.

실제로 골재 표면이 거칠고 높은 맞물림 효과를 나타내는 제강 슬래그의 맞물림 효과 검증을 위해 본 연구에서 사용된 아스팔트 혼합물의 선화다짐을 실시하여 Compaction Slope를 산출하였다. 다짐곡선은 아스팔트 혼합물의 다짐 용이성을 나타내는 특성으로 아래 식(5)와 같이 산출된다.

$$Compaction\ Slope = 100 \times \frac{C_{des} - C_{\epsilon_i}}{\log(N_{des}) - \log(N_{\epsilon_i})} \quad (5)$$

여기서,

C_{des} : 설계 다짐횟수에서 혼합물의 다짐도

C_{ini} : 초기 다짐횟수에서 혼합물의 다짐도

N_{des} : 설계 다짐횟수

N_{ini} : 초기 다짐횟수

Compaction Slope 산출 결과 일반 아스팔트 혼합물대비 다짐 기울기가 약 11% 완만하게 산출되었으며, 맞물림 효과가 높은 것으로 조사되었다.

Table 11. Compaction slope of asphalt mixtures

| Type | Design ESALs (million) | Ndes | Nini | Cdes | Cini | Compaction slope |
|--------------|------------------------|------|------|-------|-------|------------------|
| WC-2 | <0.3 | 50 | 6 | 94.7% | 84.5% | 11.15 |
| | 0.3to<3.0 | 75 | 7 | 96.1% | 85.3% | 10.44 |
| Slag WC-2(R) | <0.3 | 50 | 6 | 91.7% | 82.7% | 9.80 |
| | 0.3to<3.0 | 75 | 7 | 93.1% | 83.4% | 9.41 |

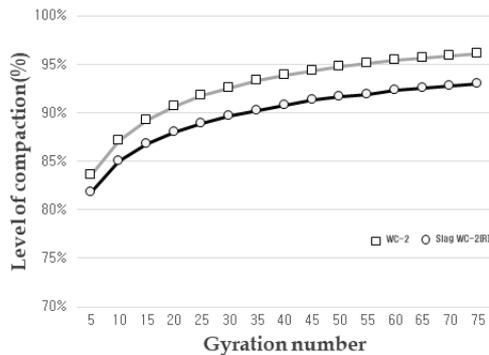


Fig. 12. Level of compaction by gyration compaction

6. 결론

본 연구에서는 철강산업 부산물인 제강슬래그와 폐아스팔트 콘크리트 파쇄물인 순환골재를 사용하여 아스팔트 혼합물의 기초물 성평가, 실내 공용성 평가 및 장기 공용성을 평가하였다. 아스팔트 혼합물의 규격은 WC-2로 동일한 조건에서 모든 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기초물성평가 결과 순환가열 아스팔트 혼합물 품질기준을 모두 만족하였으며, 특히 소성변형 저항성을 나타내는 동적안정도가 1.4배 증가한 것으로 조사되었다.
2. 동탄성계수 시험 결과 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2에 비해 21°C - 1Hz(선형구간) 기준으로 약 342.3% 높게 산정되었으며, 하중재하 속도가 높은 저온 영역(-10°C, 4°C)의 경우 -10°C-1Hz 기준으로 486.7% 높게 산정되었다. 하중재하 속도가 낮은 고온 영역(38°C, 54°C)에서의 동탄성계수는 54°C-1Hz 기준으로 350.0% 높게 산정되었다.

3. 피로균열 시험 결과 Slag WC-2(R)은 일반 WC-2 대비 Low Stress Level에서는 31.7%, Middle Stress Level 에서는 325.3%, High Stress Level 에서는 899.9%가 증가한 저항성을 보였다.
4. 함부르크 휠 트래킹 시험 결과 일반 WC-2와 Slag WC-2(R) 모두 수분저항성이 우수한 것으로 조사되었으나, Slag WC-2(R)의 경우 변곡점이 발생하지 않고 변위량 또한 일반 WC-2에 비해 적게 발생하여 Slag WC-2(R)이 수분에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다.
5. 장기공용성평가 결과 중 Laser Profiler로 측정된 소성변형 발생량은 일반 WC-2 포장 대비 Slag WC-2(R)포장이 약6.5% 적게 발생하였으며, Rutting Gauge로 측정된 표층, 기층 및 하부층의 압축량 분석 결과 Slag WC-2(R) 포장도로 표층의 소성변형 저항성이 약 45% 높게 조사되었다.

제강슬래그는 순환골재와 같이 사용하여 아스팔트 혼합물로 활용시 천연골재를 대체할 수 있으며, 일반 아스팔트 포장대비 공용성이 우수한 것으로 조사되었다. 하지만, 아스팔트 혼합물의 규격은 WC-2, 최대 골재 크기 13mm, 슬래그 배합비율 45%, 순환골재 배합비율 30%로 제한되어 아스팔트 혼합물의 규격 및 배합비율별 성능평가에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도로기술연구사업의 국가연구개발과제 “도로 미세먼지 저감기술 개발 및 실증연구” 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M., Hassani, A. (2015). Fatigue behavior analysis of asphalt mixes containing electric arc furnace(EAF) steel slag, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **3(1)**, 74-86.

Masad, E.A., Al-Rousan, T., Button, J.W., Little, D.N. (2007). Appendixes to NCHRP Report 555: Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity,

National Cooperative Highway Research Program
 Ministry of Environment, (2020). The Direction of the Green New Deal policy of the Ministry of Environment and Major Projects [in Korean].
 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018). Aggregate Supply and Demand Plan for 2018 [in Korean].
 Shen, A., Zhai, C., Guo, Y., Yang, X. (2018). Mechanism of adhesion

property between steel slag aggregate and rubber asphalt, Journal of Adhesion Science and Technology, **32(24)**, 2727–2740.
 Wen, H., Wu, S., Bhusal, S. (2015). Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear, Journal of Materials in Civil Engineering, **28(5)**, 04015191.

제강 슬래그 및 순환골재를 사용한 순환 아스팔트 혼합물의 장기 공용성 평가

본 연구에서는 철강산업 부산물인 제강슬래그 및 폐아스팔트 콘크리트포장 파쇄물인 순환골재를 사용하여 아스팔트 혼합물용 천연골재를 대체 가능성을 파악하고 제강슬래그를 활용한 아스팔트 혼합물의 공용성 평가를 수행하였다. 일반 WC-2와 Slag WC-2(R)에 대한 평가는 동일한 조건으로 수행하였으며, 수행기관은 국가 공인시험기관(KTR) 및 한국도로학회로 각 기관의 연구영역을 통해 평가되었다. 동적안정도, 동탄성계수, 피로균열 시험결과 슬래그 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 각각 140%, 저온·고온 487·350%, Low·Middle·High Stress Level 32·325·900% 증가하는 것으로 조사되었다. 함부르크 휠 트래킹 시험결과 두 가지 혼합물의 수분저항성이 우수한 것으로 조사되었으나, 슬래그 아스팔트 혼합물 시험결과에 변곡점이 없고 변위발생량이 낮아 일반 혼합물 대비 우수한 것으로 조사되었다. 장기공용성 평가(APT) 결과 슬래그 아스팔트 혼합물에서 소성변형 발생량이 6.5% 적게 발생하였으며, 표층, 기층 및 하부층의 압축량을 분석한 결과 슬래그 포장도로의 표층 소성변형 저항성이 45% 높게 조사되었다.