

## 제철 슬래그 골재를 이용한 SMA 혼합물의 역학적 특성

# The Mechanical Properties of SMA Concrete Mixture Using Steel Slag Aggregate

김혁중<sup>1</sup> · 나일호<sup>2\*</sup>

Hyeok-Jung Kim<sup>1</sup> · Il-Ho Na<sup>2\*</sup>

(Received February 26, 2021 / Revised March 23, 2021 / Accepted March 24, 2021)

In order to replace mineral aggregate used as road pavement materials with steel slag aggregate, this present study evaluated mechanical properties of SMA Concrete mixtures using steel slag aggregate as oxidized slag from electric furnace in iron works. The variables of this experiment are the aggregate type of mineral and steel slag and the sieve sized of 10mm and 13mm. The physical properties including the specific gravity and absorption rate etc. of the slag aggregate mixtures satisfied the KS standard as asphalt mixture. As a result of evaluating the mechanical properties of the asphalt mixtures, the optimum asphalt content of the slag aggregate mixtures were lower than that of the mineral aggregate mixtures, but other quality standards were all satisfied. In the deformation strength evaluation, the slag aggregate mixtures were measured slightly higher than that of the mineral aggregate mixtures, and the dynamic stability test satisfied the 2,000pass/mm standard value in all specimens. And, the moduli of resilient of the slag aggregate mixtures showed an improved value compared with the mineral aggregate mixtures. Therefore, as the resilient rate of the slag aggregate mixtures improved, it is speculated that there will be an effect of improving public performance according to the repeated traffic load of the vehicle.

**키워드** : 제철 슬래그 골재, SMA, 변형강도, 반복주행시험, 회복탄성계수

**Keywords** : Steel slag aggregate, Stone mastic asphalt, Deformation strength, Wheel tracking, Modulus of resilient

## 1. 서론

국토개발에 따라 도로 건설이 지속되고 있으며, 도로 포장 재료 중 가장 큰 비율을 차지하는 골재의 수요도 그만큼 증가하고 있다. 한정된 자원에서 일정수준의 품질을 갖춘 골재의 수요는 늘어나고 있으나 천연골재의 공급은 환경보호를 위한 규제로 원활한 공급이 어려운 실정이다(Jo et al, 2015). 이에 따라 자원의 효율적 사용과 환경보전을 목적으로 재활용 골재 및 산업부산물인 제철 슬래그 활용 연구가 진행되고 있다.

철강산업 부산물로서 철강슬래그는 철강 제조공정에서 철을 분리하고 남은 암석 성분을 의미하고, 철, 탄소 및 석회석 등은 건설과 제조산업 전반에 재활용되는 유효한 자원으로 사용되고 있다

(Ann 2016; Kim et al, 2018). 한국철강협회에 따르면 2020년 제철 공정에서 발생하는 제철 슬래그는 약 10,233천톤 발생하였고, 그 중 10,606천톤이 재활용되어 101.0%의 재활용이 되고 있으나, 성복토용 골재 재활용 비율이 47.6%로 고부가가치 활용 측면이 매우 미약함을 알 수 있다.

이러한 제철공정에서 발생하는 부산물은 철, 탄소, 석회석 등의 재활용이 가능한 유효자원을 다량 함유하고 있고, 천연 골재로의 건설재료로서 시멘트콘크리트 및 아스팔트콘크리트로서 활용 확대를 위한 연구가 본격화되고 있다. 일본과 유럽 및 미국 등은 제철 슬래그의 물리적 특성을 활용한 골재의 업사이클링 실증화와 제도 및 기준 제정으로 고부가가치 산업 Item으로 재생산되고 있는 추세이다.

제철 슬래그를 아스팔트 콘크리트용 골재로 사용하면 제철 슬

\* Corresponding author E-mail: ihna@koreapetroleum.com

<sup>1</sup>국립한경대학교 산학협력단 석좌교수 (Industry-Academic Cooperation Foundation, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea)

<sup>2</sup>한국석유공업 건자재사업본부 책임연구원 (Construction Materials Headquarters, Korea Petroleum Industries, Seoul, 04427, Korea)

래그의 물리/화학적 특성으로 인해 다양한 역학적 성능 증진 효과를 얻을 수 있다. Ali et al.(1991)은 제철 슬래그 골재의 사용은 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수 증가, 인장강도 증진, 소성변형 및 수분저항성 향상을 가져온다고 하였다. 또한 제철 슬래그를 골재로 사용한 아스팔트 포장은 제철 슬래그의 높은 강성과 불규칙한 골재 입형으로 포장의 미끄럼 저항을 향상시키며 골재 탈리, 손실 등의 포장 파손 발생우려가 적은 것으로 알려졌다(Kehagia 2009; Asi 2007).

아스팔트 혼합물은 크게 골재와 아스팔트로 구성되어 있고 일반적인 아스팔트 혼합물의 경우 차량의 바퀴로부터 가해지는 수직 압축력에 대해 아스팔트 바인더의 골재 접착력, 골재 표면의 접촉에 의한 마찰력, 골재 간 맞물림에 의해서 분산 및 저항한다. 특히 SMA(Stone Mastic Asphalt) 혼합물은 크게 골재, 아스팔트, 섬유첨가제(Fiber)의 3종류로 구분할 수 있고 일반 밀입도 아스팔트 혼합물과 가장 대별되는 차이점으로는 골재의 사용 측면에서 굵은 골재가 상대적으로 다량 사용된다는 것이다. 이로 인해 압축과 전단 저항력이 모두 골재에 의해서 발생한다는 개념이기 때문에 높은 강성과 불규칙한 입형을 가진 제철 슬래그 골재의 전단변형 특성 및 내구성을 평가하기에 유리하다.

이에, 본 실험에서는 아스팔트 혼합물의 제조에 사용되는 천연 골재를 제철 슬래그 골재로 대체 시 일반 혼합물과의 품질과 차별성 및 내구공용성을 평가함으로써 제철 슬래그 골재의 아스팔트 도로포장용 재료로서 활용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 실험계획

PSMA(Polymer modified Stone Mastic Asphalt) 혼합물을 175°C의 오븐에 3시간 이상 가열하여 일정한 무게로 덜어내고, 155°C 오븐에서 1시간 동안 온도 조정 후 선화다짐기로 다짐하였다. 제조된 공시체의 아스팔트 기초 물성을 검토하기 위하여 이론 밀도, 높이, 건조무게, 수중무게, 표면건조포화상태무게 및 변형강도를 측정하였다.

국내에서 가장 많이 사용되는 천연골재는 화강암으로 보통 밀도가 2.7g/cm<sup>3</sup> 전후임으로 제철 슬래그 골재의 밀도가 약 20% 이상 높은 것으로 나타났다.

제철 슬래그 골재를 아스팔트 콘크리트에 사용하면 제철 슬래그 골재의 높은 밀도로 인해 동일한 무게의 공시체 제작 시 Fig. 1과 같이 천연골재를 사용한 아스팔트 콘크리트에 비해 부피가 작아지게 된다. 이는 실제 도로 포장 시공에 더 많은 아스팔트 혼합물을 사용하게 되는 것을 의미한다. 따라서 실험에 필요한 공시체의 크



Fig. 1. Volume comparison of specimens using steel slag aggregate and mineral aggregate

기로 제조하기 위해 밀도를 반영하여 공시체를 제작하였다.

## 2.1 사용재료

### 2.1.1 아스팔트 바인더

본 연구에서는 현장플랜트에서 생산된 SMA 혼합물을 사용하였다. PSMA 혼합물 제조에는 공용성 등급(performance grade) PG76-22 개질 아스팔트와 시인성 확보를 위해 주로 적용되는 적색 칼라 아스팔트를 사용하고, 골재는 일반 골재와 제철 슬래그 골재를 사용하였다.

본 실험에 사용된 골재의 입도는 입도분석으로 확인하였으며 (Fig. 2~3), SMA 혼합물의 제조 조건은 Table 1과 같다.

### 2.1.2 골재

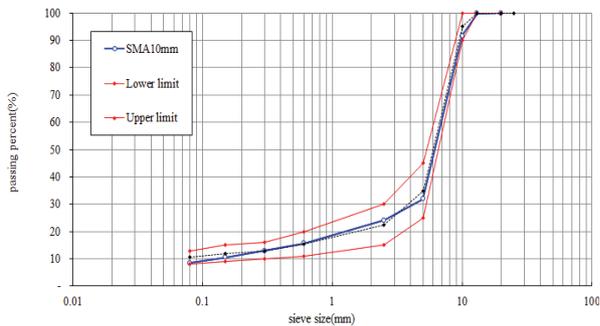
제철 슬래그 골재의 밀도는 금속성분이 함유되어 있고 조직이 치밀하기 때문에 일반 천연 골재에 비해 높다. 기초물성평가 결과는 Table 2와 같으며, 연구에 사용된 제철 슬래그는 당진 H제철소에서 생산된 것으로 밀도가 3.32g/cm<sup>3</sup>이고, 흡수율은 1.62%로 아스팔트 혼합물용 골재 품질기준을 만족하였다.

Table 1. Conditions of PSMA Mixture

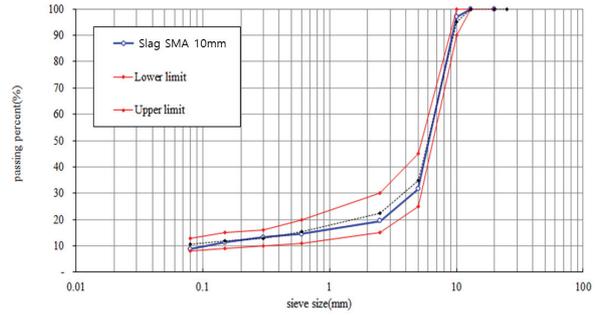
Type	Content
AP	PG 76-22
Heating temperature of aggregate(°C)	190
Heating temperature of asphalt(°C)	150
short term aging time(h)	1
Mix temperature(°C)	170±10
Compaction temperature(°C)	150±2

Table 2. Physical properties of steel slag aggregate

Item	Unit	Method	Specification	Result	
Density	Surface	g/cm <sup>3</sup>	KS F 2503	≥2.45	3.32
	Absolute	g/cm <sup>3</sup>	KS F 2511	≥2.5	3.28
Absorption	%			≤3.0/3.5	1.62
Soundness (Na2So2):5times	%	KS F 2507	≤12	2.5	
Abrasion (C Method)	%	KS F 2508	≤35	21.2	
Crushing value	%	KS F 2541	≥85	100	
Flat or elongated (3:1)	%	KS F 2575	≤30	12.5	
Immersion expansion	%	KS F 2580	≤2.0	0.0	



(a) 10mm aggregate



(b) 13mm aggregate

Fig. 3. Passing percent-sieve size curve of steel slag PSMA

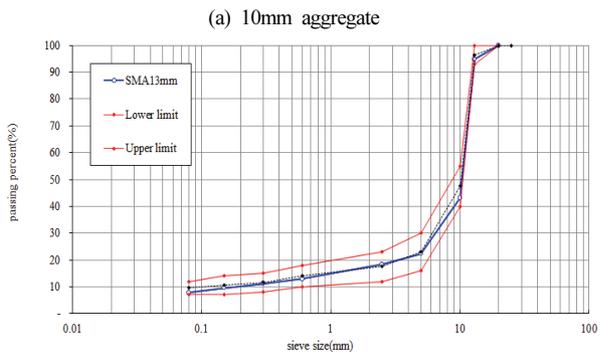
Table 3. Criteria of Mix design of SMA

Classification	Criteria		Standard	
	13mm	10mm		
Asphalt content(%)	6.2	6.6	MOLIT	
Air void(%)	2.0~4.0			
VMA*(%)	Air void 2~3%	≥17		≥18
	Air void 2~3%	≥18		≥19
Dynamic stability	≥2000			
VFA**	≥75			

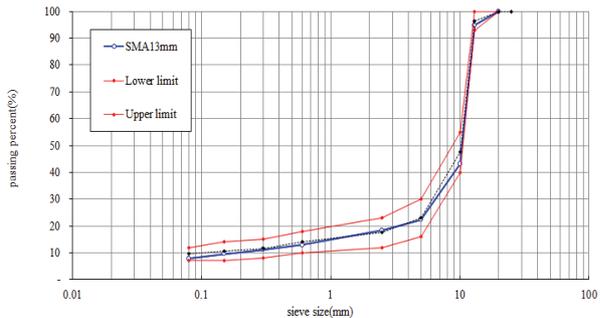
\* VMA : Voids in the Mineral Aggregate

\*\* VFA : Voids Filled with Asphalt binder

\*\*\* MOLIT : Ministry of Land, Infrastructure and Transport



(a) 10mm aggregate



(b) 13mm aggregate

Fig. 2. Passing percent-sieve size curve of mineral PSMA

## 2.2 실험방법

본 연구를 수행하기 위해 Table 3의 기준으로 배합설계를 실시하였고, 제철 슬래그 아스팔트 혼합물의 역학적 성능을 평가하고자 국토교통부의 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침 및 KS 시험방법에 따라 변형강도, 반복주행시험, 회복탄성계수 시험을 수행하여 Table 4와 같이 평가 지표들을 확인하였다.

Table 4. Evaluation method of SMA

Classification	Measuring indicator	Test methods
Kim test	S <sub>D</sub>	MOLIT
Wheel tracking	DS, RD	KS F 2374
Resilient of modulus	M <sub>RI</sub> , M <sub>RT</sub>	KS F 2376

### 2.2.1 변형강도 시험

변형강도(S<sub>D</sub>)는 60°C 온도에서 아스팔트 콘크리트에 하중을 가하여 얻어진 하중-변형 곡선에서 최대 하중(P)과 표면으로부터 늘

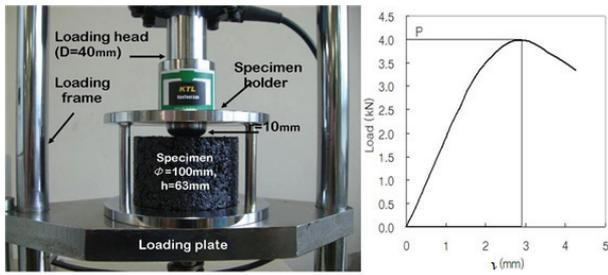


Fig. 4. Testing apparatus for deformation strength of asphalt and load-strain curve

려 들어간 수직변형( $v$ )으로부터 계산되는 소성변형 저항성 특성치이다.

이 시험법은 국토부 아스팔트 혼합물 배합설계 기준 시험법으로 Kim Test라 하며 얻어진 변형강도는 소성변형 저항성 시험인 wheel tracking 시험에서 얻어지는 동적안정도와 상관성이 매우 높다(Kim et al. 2004).

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 하중봉의 직경은 40mm, 공시체와 접하는 부분의 양 끝단 절삭 반경은 10mm이며 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$S_D = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20v - v^2})} \quad (1)$$

여기서,  $S_D$ 는 변형강도(MPa),  $P$ 는 최대하중(N),  $v$ 는 최대 하중에서의 수직변형(mm)이다.

### 2.2.2 반복주행 시험

6종 SMA 혼합물(일반, 제철 슬래그 골재를 사용한 혼합물)을 사용하여 반복주행(wheel tracking: WT) 시험을 수행하기 위하여 305×305×50mm의 슬래브 몰드에 혼합물을 담아 롤러 압축 다짐기로 다짐하여 슬래브 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 60°C에 6시간 보관 후 시험에 사용되었다. 시험은 60°C에서 수행되었고, 재하 유효하중은 686N, 통과횟수 42회/min로 60분 동안 2,520회 반복주행에 따른 변형량을 측정하였다.

KS에 제시된 동적안정도(Dynamic stability of korean industrial standards:  $DS_{KS}$ )는 공시체의 변형이 1mm 발생하는데 필요한 통과 횟수로 나타내며, 변형속도는 분당 발생하는 변형량으로 나타낸다. 동적안정도와 변형속도(Rate of deformation: RD)를 다음의 식 (2), 식 (3)에 의해 구하였다.

$$DS_{KS} = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times c \quad (2)$$

여기서,  $DS$ 는 동적안정도이며,  $d_1$ 과  $d_2$ 은 각각  $t_1$ 과  $t_2$ 에서의 변형량(mm)이며,  $c$ 는 보정계수(1.0)이다.

$$RD = \frac{d_{60} - d_{45}}{15} \quad (3)$$

여기서,  $RD$ (Rut depth)는 분당 변형속도(mm/min)이며,  $d_{60}$ 와  $d_{45}$ 는 각각 60분과 45분에서의 변형량(mm)이다.

동적안정도의 변별력을 높이기 위해 기존의 KS 방법과 함께 초기, 중기, 말기의 변형 특성을 고려하여 동적안정도를 구하는 모델인  $DS_2$ (Cho et al. 2020)를 계산하였다. 계산식은 식 (4)와 같다.

$$DS_2 = m_1 + m_2 + m_3 = \frac{500}{D_{500}} + \frac{1,800}{D_{1,800}} + \frac{3,600}{D_{3,600}} \quad (4)$$

여기서,  $D_{500}$ 와  $D_{1,800}$ ,  $D_{3,600}$ 는 각각 500초, 1,800초, 3,600초에서의 변형깊이(mm)이다.

### 2.2.3 회복탄성계수 시험

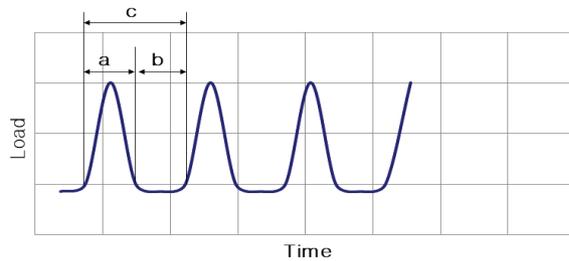
아스팔트 혼합물의 회복탄성계수(Resilient of modulus: MR) 시험은 공시체의 원주면에 하중을 간접인장강도시험 모드로 반복재하하며 일반적으로 나타나는 하중 변형 관계는 Fig. 5와 같다.

회복탄성계수 시험에서 직경 100mm공시체를 사용할 경우 반복재하 하중은 아스팔트 혼합물 극한강도의 10~50%범위 내에서 설정한다. 하중은 보통 0.1초 동안 재하 되고, 0.9초의 휴지기간을 갖는다. 하중재하 후 순간적으로 회복되는 변형을 순간회복 변형, 휴지 기간 내 회복되는 변형을 전체회복변형이라 하며 순간 회복 탄성계수와 전체회복 탄성계수는 아래의 식 (5)와 (6)에 의해 구한다.

$$M_{RT} = \frac{P}{t \cdot \Delta H_I} (\nu_{RT} + 0.27) \quad (5)$$

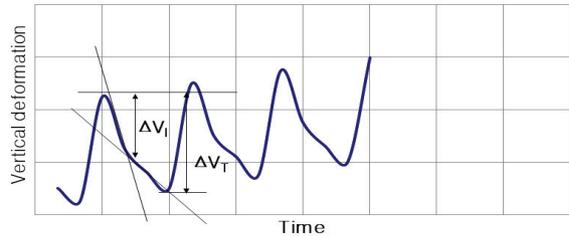
$$M_{RT} = \frac{P}{t \cdot \Delta H_T} (\nu_{RT} + 0.27) \quad (6)$$

여기서,  $M_{RT}$ 는 순간회복탄성계수(MPa)이며,  $M_{RT}$ 는 전체회복탄성계수(MPa)이며,  $\nu_{RT}$ 는 순간회복 포아송비(25°C 조건에서 0.35로

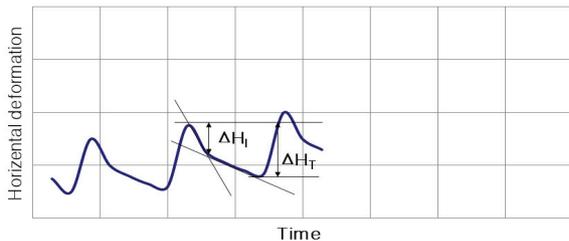


a = Duration of loading during one load cycle  
 b = Recovery time  
 c = Cycle time

(a) Load-time pulse



(b) Vertical deformation versus time



(c) Horizontal deformation versus time Damage diagnosis result

Fig. 5. Typical of the resilient of modulus

가정)이며,  $v_{RT}$ 는 전체회복 포아송비(25°C 조건에서 0.35로 가정)이며,  $P$ 는 반복하중(N)이며,  $t$ 는 공시체 두께(mm)이며,  $\Delta H_I$ 는 순간회복 수평변형(mm)이며,  $\Delta H_T$ 는 전체회복 수평변형(mm)이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

제철 슬래그 골재를 사용한 SMA 혼합물은 제철 슬래그 골재의 높은 밀도로 인하여 일반 혼합물보다 높은 밀도가 측정되었다. 제철 슬래그의 높은 밀도는 일반 혼합물과 같은 무게의 혼합물을 다짐할 때 보다 부피가 작음(높이가 낮아짐) 공시체로 제조되었다. 본 실험에서는 동일한 높이의 공시체를 제조하기 위해 일반 혼합물과의 밀도차이를 확인하여 1.2배 높은 무게(더 많은 양 제작)로 공시체를 제조하였다.

#### 3.1 체적 및 변형강도 특성

공시체 제조 결과 각각 PSMA 혼합물의 용적 특성은 Table 5에서 나타났다. 제철 슬래그를 사용한 PSMA 혼합물은 PSMA 일반 13mm 혼합물에 비하여 공극이 낮게 측정되었다. PSMA 일반 혼합물의 경우 품질기준을 모두 만족하였고, PSMA 제철 슬래그 혼합물의 경우 제철 슬래그 골재의 높은 밀도 및 낮은 흡수율로 최적아스팔트함량(Optimum asphalt content: OAC)은 일반 골재 혼합물보다 낮게 결정된 것을 알 수 있다. 아스팔트 함량을 제외한 공극률, 간극률, 포화도는 품질기준을 만족하였다.

일반 혼합물의 변형강도는 PSMA 10mm 3.76MPa, PSMA 13mm 3.45MPa로 국토교통부 일반 혼합물의 기준인 3.2MPa를 만족하는 값을 보였다. 제철 슬래그 골재 사용한 PSMA 혼합물은 일반 혼합물의 기준인 3.2MPa를 모두 상회하였으며, 각각의 골재 최대치수

Table 5. Mechanical properties of asphalt mixtures

Type		OAC*(%)	Thickness (mm)	Bulk specific gravity(g/cm <sup>3</sup> )	Max.specific gravity(g/cm <sup>3</sup> )	Air void (%)	VMA** (%)	VFA*** (%)	S <sub>D</sub> (MPa)
Aggregate	Mixtures type								
Mineral	PSMA 10mm	6.7	62.6	2.391	2.470	3.2	19.0	83.2	3.76
	PSMA 13mm	6.2	64.1	2.381	2.473	3.7	18.2	79.6	3.45
Slag	PSMA 10mm	5.7	59.5	3.112	3.184	2.3	19.6	88.4	3.91
	PSMA 13mm	5.3	61.0	3.065	3.158	3.0	18.8	84.3	3.48
	PSMA 10mm (Color : red)	5.7	58.9	3.083	3.184	3.2	20.4	84.4	4.48
	PSMA 13mm (Color : red)	5.3	60.1	3.090	3.158	2.2	18.2	88.1	4.29

\* Optimum asphalt content  
 \*\* Void in the mineral aggregate  
 \*\*\* Voids filled with asphalt

가 동일한 일반 골재 혼합물보다 높은 3,91MPa, 3,48MPa의 값을 보였다. 제철 슬래그 골재를 사용한 적색 칼라 PSMA 혼합물이 각각 4.48MPa, 4.29MPa로 가장 높게 측정되었다.

### 3.2 영구변형 저항성 평가

Wheel tracking 시험을 통한 최종변형깊이와 동적안정도를 DS<sub>KS</sub>와 새로이 개발된 DS<sub>2</sub> 방법으로 구하였다. 시험 결과는 Table 6에서 보여주듯이 각각의 혼합물은 PSMA 혼합물 품질기준인 2,000pass/mm 이상의 동적안정도(DS<sub>KS</sub>)를 보이며, 일반 PSMA 혼합물보다 제철 슬래그 PSMA 혼합물이 높은 값이 측정되어 변형강도와 경향이 유사함을 알 수 있다.

제철 슬래그 PSMA 혼합물의 동적안정도는 10, 13mm 각각 4,854, 4,667pass/mm로 측정되어 일반 PSMA 혼합물과 비교하여 각각 1.22, 1.35배 높게 나타났다. 제철 슬래그 PSMA 적색 혼합물의 동적안정도는 10, 13mm 각각 6,600, 14,130pass/mm로 매우 높게 측정되었고 최종변형깊이는 모두 3mm 이하로 매우 낮은 변형 깊이를 보였으나 분당 변형깊이는 일반 골재 혼합물보다 제철 슬래그 골재 혼합물이 작게 나타났다.

일반 PSMA 10mm 혼합물에서 2.61mm의 값이 측정되었고, 제철 슬래그 PSMA 13mm 혼합물에서 1.11mm로 측정되었다. 결과값의 신뢰도 제고를 위해 DS<sub>2</sub>를 계산하였다. 각각의 입도별로 비교해보면 일반 PSMA 혼합물보다 제철 슬래그 PSMA 13mm를 제외한 모든 제철 슬래그 PSMA 혼합물이 높은 값을 나타내었다.

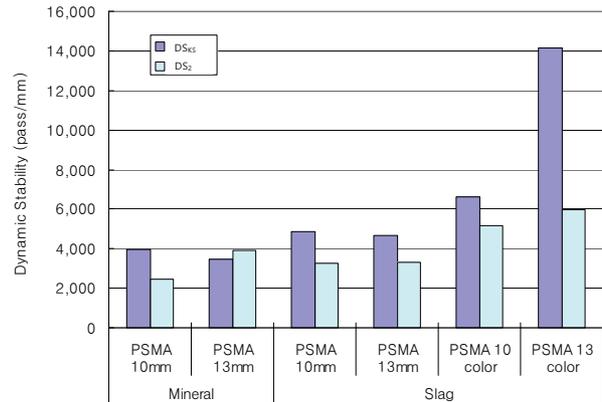
Fig. 6은 혼합물 별 동적안정도의 비교를 보여주며, Fig. 7은 두가지 동적안정도와 변형깊이의 관계를 보여준다.

**Table 6. Final rut depths and dynamic stability values of asphalt mixtures**

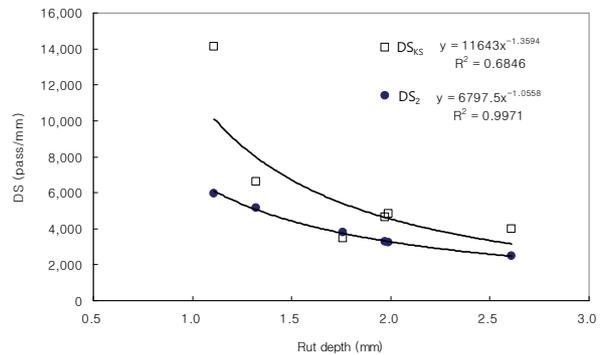
Type		RD	FD	DS <sub>KS</sub>	DS <sub>2</sub>
Aggregate	Mixtures	(mm/min)	(mm)	(pass/mm)	(pass/mm)
Mineral	PSMA 10mm	0.01053	2.61	3,987	2,468
	PSMA 13mm	0.01215	1.76	3,457	3,918
Slag	PSMA 10mm	0.00865	1.99	4,854	3,238
	PSMA 13mm	0.00900	1.97	4,667	3,299
	PSMA 10mm (red)	0.00636	1.32	6,600	5,180
	PSMA 13mm (red)	0.00297	1.11	14,130	5,972

동적안정도 실험 시 일반적으로 약 15분 측정 시점에서 초기 변형 깊이의 약 60~70%가 발생되며 이후 일정한 기울기를 형성하면서 변위가 발생된다. 이러한 실험의 특성으로 실험의 끝부분에서의 미세한(기울기 값이 크지 않는) 변위를 최종값으로 측정하게 되는 KS 방법으로 마지막 15분을 측정하고 평가하는 것은 실험의 초기, 중기의 변화 양상을 그대로 반영할 수 없는 계산상 오차가 있을 수 있다. 이에 DS<sub>2</sub> 실험 방법은 초기 15분에 발생하는 초기 변형과 15분 이후 부터 실험 끝부분까지 변형되는 측정값을 그대로 반영하여 동적안정도를 산출하지는 개념이다. DS<sub>2</sub>의 장점은 DS<sub>KS</sub>보다 실험의 전과정에 대한 측정값이 반영되기에 혼합물의 거동에 대한 신뢰도 제고 및 아스팔트 혼합물의 영구변형 저항성의 판단 오차를 줄일 수 있다는 측면이 있다. 즉, 변형 깊이와 동적안정도의 상관성을 높일 수 있는 방법이다.

결과적으로는, 변형 강도와 동적안정도간의 경향이 유사하게 관찰되었고 제철 슬래그 혼합물에서 높은 값이 도출되어 영구변형과



**Fig. 6. Comparison of dynamic stability by type of aggregate and mixture**



**Fig. 7. Relationship between dynamic stability of DS<sub>KS</sub> and DS<sub>2</sub> and final rut depth**

강도 측면으로 제철 슬래그골재의 혼합물이 일반골재 혼합물 대비 내구공용성 측면으로 성능 향상이 되었음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 회복탄성계수

Table 7는 각 시험온도에서 혼합물 종류에 따른 회복탄성계수를 정리하였다.

Fig. 8은 각 혼합물의 온도에 따른 회복탄성계수를 비교한 그래프이며, 회복탄성계수 시험은 ASTM D 4123의 규정에 따라 온도조건을 다르게 즉, 저온(5°C), 상온(25°C), 고온(40°C)에서의 아스팔트 혼합물의 온도 변화에 따른 감온성을 측정하기 위한 시험으로 온도 변화에 대한 따라 회복탄성계수의 변화가 심하지 않을 경우 온도 변화에 대한 민감성이 낮기 때문에 우수한 혼합물로 평가하게 된다. 또한, 저온에서의 회복탄성계수가 낮은 혼합물이 높은 혼합물에 비하여 강성이 낮기 때문에 작용된 하중 제거 이후에

Table 7. Results of modulus of resilient

Aggregate	Type Mixtures type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Test temp.(°C)		
				5	25	40
Mineral	PSMA 10mm	2.412	2.3	4,835	1,744	351
	PSMA 13mm	2.408	2.6	4,049	991	152
Slag	PSMA 10mm	3.093	2.9	8,488	1,748	374
	PSMA 13mm	3.080	2.5	8,057	2,157	384
	PSMA 10mm (Color : red)	3.088	3.0	5,785	1,392	359
	PSMA 13mm (Color : red)	3.078	2.5	4,953	1,918	401

\* Optimum asphalt content  
 \*\* Void in the mineral aggregate  
 \*\*\* Voids filled with asphalt

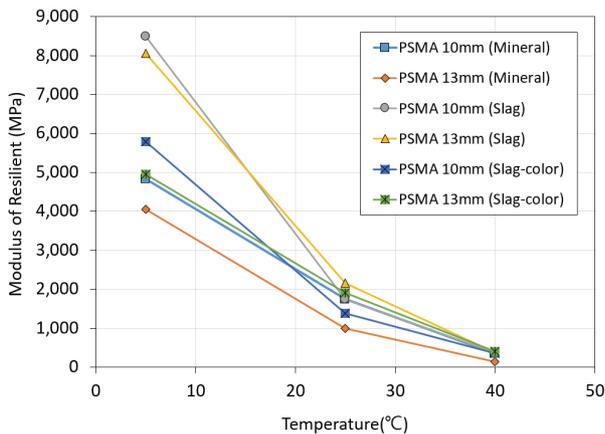


Fig. 8. Modulus of resilient of aggregate type according to temperature

회복 속도가 늦거나 회복 정도(양)가 작다는 것을 의미한다. 즉, 저온에서 균열 발생이 적은 혼합물로 평가하게 된다. 반대로 회복탄성계수가 높다는 것은 혼합물을 구성하는 재료가 다른 재료에 비하여 높은 강성을 갖는다는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구에서는 5°C에서 25°C, 40°C로 온도가 증가함에 따라 회복탄성계수는 크게 낮아지는 현상을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 아스팔트와 같은 점탄성 재료의 전형적인 특징이며, 각각의 시험 온도에서 제철 슬래그를 적용한 혼합물이 일반 골재 혼합물에 비하여 대체적으로 높은 값으로 측정되었다. 저온인 5°C에서 PSMA 10mm와 PSMA 13mm 제철 슬래그 혼합물은 다른 혼합물에 비해 회복탄성 계수가 약 1.7배 크게 나타났고, 5°C의 모든 혼합물의 평균은 6,028MPa이다. 40°C에서는 혼합물의 평균은 약 337MPa의 값으로 5°C와 40°C 온도간 약 17.9배로 큰 차이를 보였다.

또한, 온도에 따라 제철 슬래그 골재와 일반 골재를 비교시 5°C는 1.54배, 25°C는 1.32배, 40°C는 1.50배로 제철 슬래그 골재가 각 온도마다 모두 큰 값을 나타냈다.

### 4. 결론

본 연구에서는 SMA 혼합물에서 제철 슬래그의 영향을 분석하기 위해 제철 슬래그의 체적특성 및 연구변형, 온도별 강성변화를 평가하였다. SMA 혼합물의 역학적 평가 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제철 슬래그 골재를 사용시 높은 비중으로 인해 일반 골재를 사용시 보다 부피가 작게 나타났고 이로 인해 실내시험에서 공시체 제작시 더 많은 양으로 공시체 제작이 요구된다. 따라서, 현장적용시 포장면적이 일반 혼합물보다 작아질 수 있음에 따라 경제적, 제도적 측면에서의 현장 적용 실효성을 위해서는 그에 따른 경제적 보완점이 필요할 것으로 사료된다.
2. 제철 슬래그 골재가 가지는 높은 밀도 및 낮은 흡수율로 인해 최적아스팔트 함량(Optimum asphalt content : OAC)은 일반 골재 혼합물보다 낮게 결정되며 낮은 OAC에서도 공극률, 간극률, 포화도, 변형강도는 품질기준을 만족함에 따라 현장 적용에는 큰 문제가 되지 않을 것으로 사료되나 제철 슬래그 골재의 밀도 및 흡수율로 인한 낮은 최적아스팔트 함량의 기준 정립이 필요할 것으로 판단된다.
3. 동적안정도의 경우 각각의 혼합물은 PSMA 혼합물 품질기준인 2,000pass/mm 이상의 동적안정도(DS<sub>10</sub>)를 보이며 일반 PSMA 혼합물보다 제철 슬래그 PSMA 혼합물이 높은 값이

측정되어 변형강도와 경향이 유사함을 알 수 있다. 또한 DS<sub>KS</sub>에 비하여 DS<sub>2</sub>가 최종 변형 깊이와 크게 높은 상관관계를 보여, 윤하중에 의한 최종 변형깊이로 나타나는 소성변형 특성을 DS<sub>2</sub>가 더 정확히 반영함을 확인하였다.

- 4. 회복탄성계수(MR) 시험 결과 제철 슬래그 골재로 인한 저온 및 고온 모두에서 강성이 증가하였고, 이는 하중 재하 이후 회복하는 속도가 증진됨으로 차량의 반복적 통행하중에 의한 공용성능 개선에 효과가 있을 것으로 판단된다. 하지만 제강슬래그 일부 골재가 유독 저온(5°C)에서의 강성이 크게 나타나 저온 균열에 대한 우려가 있음으로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### Conflicts of interest

None.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: 21POQW-B152342-03).

### References

Ali, N., Chan, J.S., Theriault, E.G., Papagiannakis, A.T., Bergan, A.T. (1991). SYSCO electric arc furnace slag as an asphalt concrete aggregate, Proceedings of the 36th Annual of Canadian Technical Asphalt Association, Quebec, Canada, 26-44.

Ann, H.S. (2016). A Study on Decision Making System for Steel Making Slag Aggregate using the Economic Evaluation, Master's Thesis, Myongji University, Korea [in Korean].

Asi, I.M. (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes, Building and Environment, **42**, 325-329.

Cho, B.J., Park, T.W., Doh, Y.S. Kim, K.W. (2008). Determination of proper loading speed for deformation strength test of asphalt concretes, Journal of the Korean Society of Road Engineers, **10(4)**, 225-234 [in Korean].

Cho, G.T., Kim, Y.S., Kim, S.U., Kim, K.W. (2020). Problems in dynamic stability assessment of asphalt concrete in Korea and suggestion, Journal of the Korean Asphalt Institute, **10(1)**, 14-26 [in Korean].

Jo, S.H., Kim, K.N., Kim, N.S. (2015). A study on aggregate gradation of 10mm dense-graded asphalt mixture using slag aggregate, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **35(6)**, 1367-1375 [in Korean].

Kehagia, F. (2009). Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates, Waste Management & Research, **27(3)**, 288-294.

Kim, K.N., Jo, S.H., Kim, N.S., Kim, H.W. (2018). A study on a steel slag asphalt concrete design method considering density and absorption, Journal of the Korean Society of Road Engineers, **20(1)**, 59-67 [in Korean].

Kim, K.W., Kim, S.T., Kwon, O.S., Doh, Y.S. (2004). Correlation analysis between rut resistance and deformation strength for superpave mixtures, Journal of the Korean Society of Road Engineers, **6(4)**, 45-53 [in Korean].

Korea Iron & Steel Association (2021). Steel Slag Recycling Performance in 2020 and Plans for 2021, KISA Report.

#### 제철 슬래그 골재를 이용한 SMA 혼합물의 역학적 특성

본 연구에서는 제철소에서 발생하는 전기로 산화슬래그로써 제철 슬래그 골재를 사용한 SMA 혼합물에 대한 역학적 특성을 평가하였다. 실험 변수는 일반골재와 제철 슬래그 골재 10mm 및 13mm이다. 슬래그 골재의 기본 물성과 품질(비중, 흡수율등)은 KS기준을 만족하였다. 아스팔트콘크리트 혼합물의 역학적 실험을 수행한 결과, 슬래그 골재 혼합물은 최적아스팔트 함량이 일반 골재 혼합물 대비 낮게 도출되었으나 다른 품질 기준은 모두 만족하였다. 제철 슬래그 골재 혼합물이 일반 골재 혼합물 대비 다소 높은 값으로 측정되었고, 모든 시편에서 동적안정도 시험은 2,000pass/mm 기준을 만족하였다. 또한, 제철 슬래그 골재 혼합물의 회복탄성계수는 일반 골재를 사용한 혼합물에 비해 개선된 값을 나타내었다. 이에, 하중 재하 이후 회복하는 속도가 향상되어 차량의 반복적 통행하중에 따른 공용성능 개선 효과가 있을 것으로 판단된다.