Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 35, No. 6: 1367-1375/ December, 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.6.1367

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Highway Engineering **도로공학**

슬래그 골재를 사용한 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재입도 기준 연구

조신행* · 김경남** · 김낙석***
Jo, Shin Haeng*, Kim, Kyungnam**, Kim, Nakseok***

A Study on Aggregate Gradation of 10 mm Dense-graded Asphalt Mixture using Slag Aggregate

ABSTRACT

The purpose of this paper is to suggest 10 mm aggregate specification for thin layer asphalt pavement using steel slag. Aggregate gradations of conventional dense-graded asphalt mixtures were made by fuller's model, whereas 10 mm dense-graded asphalt mixture was obtained tender mix due to close to the maximum density line. The proposed aggregate gradation specification was made to have enough VMA and well-interlocking refer to foreign standards. The correlation between the proposed aggregate gradation and the properties of mixtures were analyzed using Gradation Ratio (GR) and Compacted Aggregate Density (CAD). The CAD index has a high R^2 of 0.86-0.99 because the CAD index is able to reflect various aggregate properties. As the results of evaluation by CAD index the proposed aggregate gradation provides more reliable stability and VMA. The percent passing (%) of aggregate size smaller than 0.3 mm was limited 10% or more for improving crack resistance. This limitation increased for 15% of the asphalt mixture's toughness.

Key words : Steel slag, Aggregate gradation, Dense-graded asphalt mixture, Gradation ratio(GR), Compacted aggregate density(CAD)

초 록

제강슬래그 골재를 사용한 박층 아스팔트 포장공법을 위해 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재 입도기준을 제시하고자 하였다. 기존 WC-1, WC-3과 같은 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재 입도기준은 풀러모델에 의해 제시되었으나 10 mm 밀입도 아스팔트의 경우 최대밀도선과 유사한 입도를 얻게 되어 부드러운 혼합물이 되는 경향을 나타내었다. 국외 입도기준을 참고하여 골재 맞물림과 최소 골재간극률을 확보하기 유리한 입도를 제시하였다. 제시된 입도의 검증을 위해 골재 입도특성지표인 입도비(GR)와 골재다짐밀도(CAD)를 사용하여 혼합물 물성과의 상관관계를 분석하였다. 골재 입도 및 다양한 특성을 반영할 수 있는 CAD 지표의 R^2가 0.86~0.99로 매우 높게 나타났다. CAD 지표를 이용하여 다양한 골재 입도를 검토한 결과 제시 입도기준이 마샬안정도와 VMA 등 배합설계 인자에 보다 안정적인 것으로 나타났다. 또한 균열저항성 향상을 위해 0.3 mm 이하 골재의 통과중량백분율을 10% 이상으로 제한함으로서 터프니스가 약 15% 향상되어 효과적임을 확인 할 수 있었다.

검색어 : 제강슬래그, 골재 입도, 밀입도 아스팔트 혼합물, 입도비(GR), 골재다짐밀도(CAD)

* 종신회원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 공학박사 (Kyonggi University · roadcreator@gmail.com)
** 정회원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Kyonggi University · kimgoon000@gmail.com)
*** 종신회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · Kyonggi University · nskim1@kgu.ac.kr)

Received October 2, 2015/ **revised** November 3, 2015/ **accepted** November 9, 2015

Copyright ⓒ 2015 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

1. 서 론

도로포장을 위해 아스팔트 혼합물을 제조하는 과정에서 많은 양의 골재가 사용된다. 국토개발과정에서 도로포장이 증가하고 이미 공용중인 도로포장도 지속적인 유지보수를 필요로 함으로 이에 소요되는 골재의 수요도 계속되고 있다. 그러나 자원은 한정되어 있기 때문에 골재의 수급에 어려움을 겪고 있으며, 천연골재의 채취는 자연환경을 훼손시키기 때문에 강력한 환경 규제로 인해 원활한 골재 공급은 더욱 어려워지고 있다. 따라서 최근 천연골재를 대체하여 환경오염을 최소화 할 수 있는 방안으로 재활용 골재에 대한 관심이 커지고 있다. 제철소의 제강과정에서 발생하는 슬래그 골재 중 다양한 용도로 비교적 활발히 사용되고 있는 고로슬래그에 비해 제강슬래그는 용적팽창의 문제로 도로 기층재나 성토용 매립재 등 부가가치가 매우 낮은 용도로 한정되어 활용되고 있는 실정이다. 제강슬래그는 제철소에서 강을 제조하는 과정에서 쇳물에 녹아 있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 공정에서 발생한다. 제강슬래그는 크게 고로에서 제조된 쇳물에 고압의 산소를 불어넣어 정련하는 공정에서 생성되는 전로슬래그(BOF Slag)와 고철 등을 전기로에서 정련할 때 생성되는 전기로슬래그(EAF Slag)로 나눌 수 있다(Kim, 2012).

본 연구에서는 제강슬래그를 아스팔트 혼합물용 골재로 사용하여 제강슬래그의 활용성은 높이고 아스팔트 콘크리트 포장에 소요되는 자원을 절감하여 환경부하를 경감시키고자 한다. 제강슬래그는 활용상의 문제점인 팽창 붕괴를 막고 안정화시키기 위해 실외에 야적하여 교반하면서 에이징(Aging)을 3~6개월간 실시한다. 제강슬래그 골재를 아스팔트 혼합물에 적용할 경우 제강슬래그의 밀도가 3.0~4.0 ton/m^3으로 일반 골재에 비해 높기 때문에 동일한 부피의 골재 운반시 운반비용의 상승이 발생한다. 또한 제강슬래그 골재를 사용한 아스팔트 혼합물은 천연 골재를 사용한 아스팔트 혼합물에 비해 강성이 높아짐으로 이를 감안하여 투입 자원의 절약과 공사비용 절감을 위해 박층 포장으로의 적용이 보다 효과적이다(Sofilić, et al., 2007). 박층 포장은 기존 표층 포장의 두께 50 mm에 비해 얇은 20~30 mm 두께의 포장이다. 박층 포장은 품질확보가 가능하다면 일반 두께 포장에 비해 사용재료의 양이 줄어들어 경제성 확보에 유리한 장점을 갖는다.

아스팔트 혼합물의 골재 최대입경에 따른 포장두께는 약 2.5배 이상으로 하여야 한다(MLIT, 2014). 이는 아스팔트 혼합물 포설시 골재 끌림에 의한 포장면 파손을 방지하고 안정적인 골재구조를 형성하기 위함이다. 따라서 포장두께 30 mm 이하의 박층 포장을 위해서는 골재 최대입경 10 mm 이하의 아스팔트 혼합물을 사용하여야 한다. 그러나 국내 아스팔트 혼합물 품질규격은 가열 아스팔트 혼합물 기준(SPS-KAI0002-F2349)을 따르는데 이 기준에는 13 mm와 20 mm 밀입도 아스팔트 혼합물에 대한 기준은 있으나 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물에 대한 기준은 없다. 국내에서는 특수교면포장이나 저소음 배수성 포장 등에서 제한적으로 10 mm 아스팔트 혼합물이 사용된 사례는 있으나 일반적인 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 기준은 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제강슬래그 골재를 사용한 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재입도 기준을 제시하고 그 적용성을 검토하여 제강슬래그 골재의 박층 아스팔트 포장 재료로의 재활용 방안을 마련하고자 한다.

2. 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준 제시

골재 입도는 골재 입자의 크기에 따른 분포를 편의상 골재 크기별 통과중량의 백분율로 나타낸 것이다. 입도는 아스팔트 혼합물에 있어 가장 중요한 특성 중 하나이다. 입도는 강성, 안정도, 내구성, 투수성, 작업성, 피로저항성, 마찰저항성, 수분손상 저항성 등을 포함한 아스팔트 혼합물의 거의 모든 특성에 영향을 미친다. 아스팔트 혼합물의 최적입도는 아스팔트 바인더로 채워질 수 있는 공극의 확보와 블리딩 및 소성변형 저항성을 향상시키기 위해 소정의 공극을 가질 수 있어야 한다.

2.1 Fuller's Model에 의한 입도기준

현재 사용하는 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도는 Fuller와 Thompson이 제안한 퓰러모델에 기반을 두고 있다. 최초 Fuller는 최대밀도곡선식(Eq. (1))에 n=0.5를 적용하여 최대밀도선으로 얻었으나 이후 FHWA에서는 n=0.45일 때가 보다 최대밀도선에 근접한 것으로 파악하여 0.45승 입도를 기준으로 골재입도를 결정하였다(Roberts et al., 1996).

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{\max}}\right)^n \times 100 \quad (1)$$

p_i : Passing Wt. (%)
$D_{\max}$: Maximum size of aggregate
D_i : Diameter sieve
n : Shape factor

Sanchez-Leal (2007)의 연구에 따르면 최대밀도선은 밀입도의 개념인 가장 밀실한 입도를 얻을 수 있는 골재 입도상태이나 이럴 경우 아스팔트 혼합물의 블리딩 없이 최대한의 내구성을 가지는 적당한 아스팔트 바인더 피복두께를 확보할 수 있는 공극을 제공할 수 없다고 하였다. 따라서 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재 입도 기준은 최대밀도선을 참고하여 최대밀도선을 벗어나게 하여 골재

간극률(VMA)을 증가시키기 위한 입도를 제시한다. 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재입도 기준은 퓰러모델에 의해 제시되는데 이때 사용되는 형상계수(n)는 입자의 형상과 분포를 나타내며 통상적으로 밀입도 아스팔트 포장에 사용되는 값은 0.33~0.80의 범위의 값이 주로 사용된다.

Figs. 1 and 2에 나타난 바와 같이 국내 WC-1 (밀입도 13 mm)과 WC-3 (밀입도 20 mm) 아스팔트 혼합물의 입도 기준과 Eq. (1)의 퓰러모델에 형상계수 0.34와 0.6을 적용하였을 때를 비교하면 매우 유사한 것을 알 수 있다. 퓰러모델로 얻어진 입도와 WC-1 입도기준과의 R^2는 0.996, WC-3 입도기준과는 R^2가 0.998로 현재 국내에서 사용되고 있는 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준이 퓰러모델을 통해 얻어진 것임을 알 수 있다.

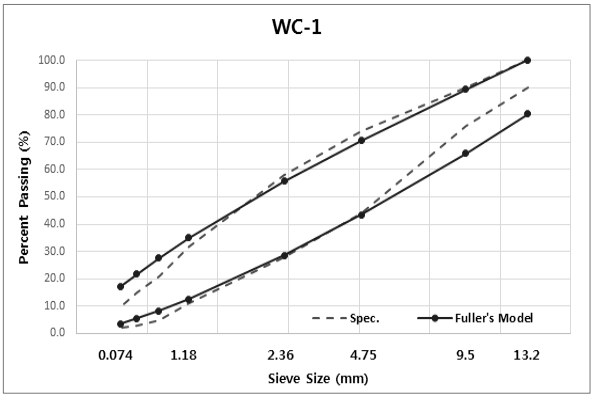

Fig. 1. Gradation of WC-1

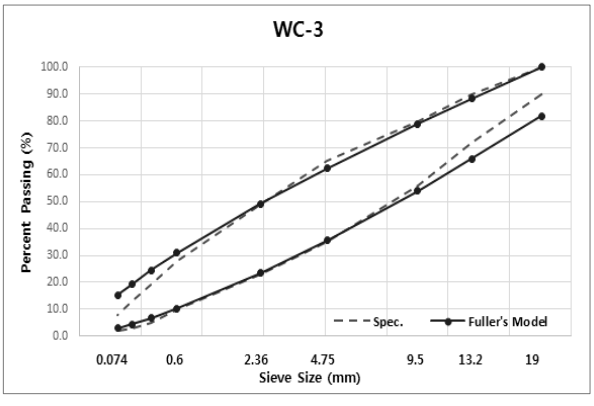

Fig. 2. Gradation of WC-3

아스팔트 포장을 박층(30 mm 이하)으로 포설하기 위해서는 골재 최대입경이 10 mm 이하가 되어야 하며, 따라서 국내 아스팔트 혼합물 규정에 없는 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준을 수립할 필요가 있다. SPS-KAI0002-F2349에 제시된 WC-1과 WC-3가 퓰러모델에 근거한 입도임으로 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준도 퓰러모델을 사용하여 하한기준은 n=0.34, 상한기준은 n=0.6으로 계산하면 Table 1과 같은 입도기준을 얻을 수 있다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 최대밀도선을 중심으로 대략 평행한 입도 범위를 가지게 됨을 알 수 있다.

퓰러모델에 의해 제시된 입도의 검증을 위해 천연 골재와 스트레이트 아스팔트 바인더(AC 60-80)를 사용하여 상한입도선, 하한입도선, 중앙입도 그리고 최대밀도선을 따라 골재를 합성한 후 각각의 입도에 대한 배합설계를 진행하여 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 최적아스팔트 함량의 결정은 공극률 4%를 기준으로 하였으며, 이에 따른 기본물성을 측정하고 마샬안정도 실험을 수행하였다. 결과는 Table 2에 나타난 것과 같이 골재간극률이 비교적 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 퓰러모델에 의한 입도범위가 최대밀도선에 근접하여 형성되기 때문이며 최대밀도선과 근접한 입도의 경우 아스팔트 혼합물이 부드러운(tender) 상태가 되기 쉽기 때문이다. SPS-KAI0002-F2349에 표층용 아스팔트 혼합물의 최소 VMA는 골재 최대치수 20 mm의 경우 13.0% 이상, 13 mm의 경우 14.0% 이상으로 골재 최대치수가 작아질수록

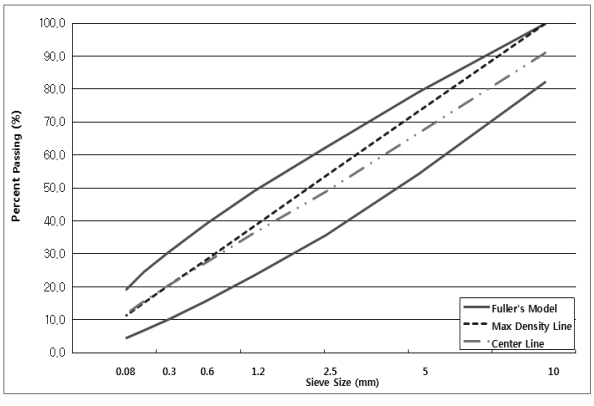

Fig. 3. Gradation Chart by Fuller's Model

Table 1. Gradation of 10 mm Asphalt mixture by Fuller's Model

Sieve Size (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
Upper Limit (%)	100.0	79.0	62.3	49.2	39.1	30.9	24.4	19.3
Lower Limit (%)	82.1	54.2	35.6	23.5	15.7	10.3	6.8	4.5
Center (%)	91.1	66.6	49.0	36.4	27.4	20.6	15.6	11.9
Maximum Density Line (%)	100.0	73.2	53.6	38.5	28.2	20.6	15.1	11.4

Table 2. Results of Mix Design due to Fuller's Model Gradation

Gradation	AP Content (%)	Density (ton/m^3)		AP Volume (%)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (N)	Flow (1/10 ㎜)
		Bulk	TMD						
Upper	7.1	2.286	2.387	15.7	4.2	18.3	78.9	9,163	39.82
Max Density	5.6	2.336	2.439	12.6	4.2	15.1	75.0	7,693	41.29
Center	5.2	2.349	2.453	11.9	4.2	14.4	73.6	7,722	41.63
Lower	3.6	2.407	2.512	8.5	4.1	10.8	67.2	8,987	35.63

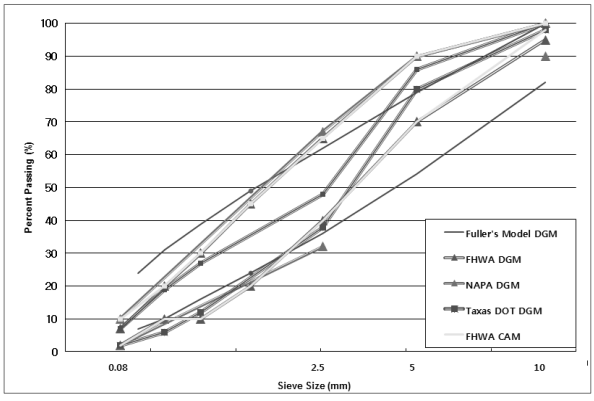

Fig. 4. Comparison of Gradation Spec

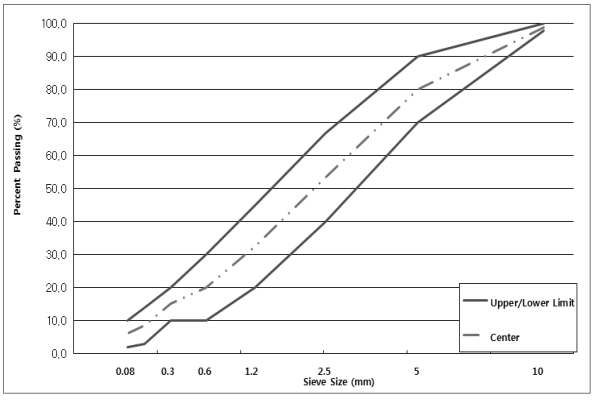

Fig. 5. Proposed Gradation Chart

Table 3. Proposed Gradation Spec. of 10MM Asphalt Mixture

Sieve Size (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
Upper Limit (%)	100.0	90.0	67.0	45.0	30.0	20.0	14.0	10.0
Lower Limit (%)	98.0	70.0	40.0	20.0	10.0	10.0	3.0	2.0
Center (%)	99.0	80.0	53.5	32.5	20.0	15.0	8.5	6.0

높아지게 된다. 따라서 상한입도의 경우를 제외한 나머지 입도의 경우는 최소 VMA를 확보하기 어려운 것으로 판단할 수 있다. 또한 흐름값이 최대밀도선과 중앙입도의 경우 40 (1/10 mm)을 초과하여 풀러모델에 의한 입도 기준이 부드러운 아스팔트 혼합물이 되는 것을 알 수 있었다.

2.2 해외 기준을 통한 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준 수정

기존 풀러모델에 의한 입도기준의 적용시 아스팔트 혼합물이 부드러운 경향을 갖게 됨으로 국외 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 골재입도 기준을 살펴보았다. SUPERPAVE로 알려진 NAPA (National Asphalt Pavement Association)의 입도(Newcomb, 2009)와 Texas 도로국의 입도 및 박층 포장에 따른 균열저감용 입도(CAM, Crack Attenuating Mixture)를 살펴보았다(Wilson et al., 2013). 조사된 입도와 풀러모델을 통해 계산된 입도를 비교하면 Fig. 4와 같다. 풀러모델에 의한 모델의 경우 최대밀도선을 기준으로 수평적인 범위를 갖는 반면 해외 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도는 S자 곡선을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 최대입경 10 mm의 아스팔트 혼합물은 골재 최대입경이 작기 때문에 골재 맞물림에 의한 변형 저항성이 낮아지기 때문이며, 또한 골재간의 공극의 크기가 작아 충분한 아스팔트 바인더 피복두께를 확보하기 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 국외 입도기준의 중복범위가 포함될 수 있는 입도를 제시하고자 하였다. 또한 슬래그 골재는 일반 골재에 비해 아스팔트 혼합물의 강성이 증가함으로 박층 포장에 따른 균열저항성을 감안하여 0.3 mm 이하 골재를 더 포함할 수 있도록 슬래그 골재를 사용한 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도를 Table 3과 같이 제시하였으며, 도식화하면 Fig. 5와 같다.

3. 제시된 골재 입도의 적합성 평가

해외기준을 바탕으로 제시된 Table 3의 입도기준이 아스팔트

Fig. 6. Steel Slag Aggregate

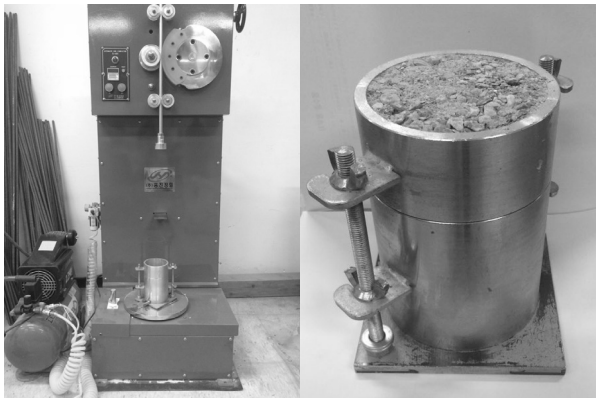

Fig. 7. Compaction Tester

혼합물의 품질확보에 적절한지 검증이 필요하다. 특히, 기존 입도 기준의 경우 일반 천연골재를 대상으로 한 입도임으로 제강슬래그 골재와는 골재의 입형, 골재의 분포 등 특성차이로 인해 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제강슬래그 골재를 사용하여 혼합입도를 구성하고 입도의 변화에 따른 아스팔트 혼합물의 물성을 평가하여 제시된 골재입도의 적정성을 평가하고자 하였으며, 실험에 사용한 골재는 Fig. 6과 같다.

아스팔트 혼합물의 성능은 동일한 아스팔트 바인더를 사용할 경우 골재입도와 아스팔트 바인더의 함량에 의해 결정된다. 아스팔트 바인더의 함량이 공극률 4%를 기준으로 결정됨으로 결국 골재입도가 아스팔트 혼합물의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 된다. 제시된 골재입도 기준의 적합성을 검증하기 위해서는 다양한 골재입도에 대해 배합설계를 실시하여 실험결과에 따른 분석이 가장 확실한 방법이겠으나 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 골재입도 특성을 반영할 수 있는 지표를 사용하여 골재입도의 적합성을 검증하고자 한다.

3.1 Gradation Ratio(GR)

골재입도의 특성을 나타내는 지표로는 균등계수나 곡률계수와 같이 특정 통과중량백분율에 해당하는 골재크기의 비율로 나타내는 방법이 많이 사용된다(ASTM D2487). Banerji et al. (2014)의 연구에서는 골재입도의 특성지표인 Gradation Ratio (GR)를 사용하여 마샬배합설계의 설계인자들과의 상관관계를 분석하였다. GR은 골재입도의 특성을 나타내는 것으로 Eq. (2)와 같이 계산한다. Eq. (2)의 $D85, D50, D15$는 통과중량백분율이 85%, 50%, 15%에 해당하는 골재 크기를 의미한다.

$$G.R = \frac{D85 - D50}{D50 - D15} \quad (2)$$

3.2 골재 다짐실험

GR은 Eq. (2)에 나타난 바와 같이 골재의 입도 특성을 지수화한 것으로 골재의 입형이나 맞물림 특성 또는 세밀한 분포상태 등 다양한 골재의 특성을 반영하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 실험을 통해 골재입도의 특성을 평가함으로써 입도 뿐 아니라 복합적인 골재 특성을 반영한 인자를 찾고자 하였다. 또한 천연골재와는 다른 제강슬래그골재의 입형과 맞물림 특성을 직접적으로 반영하고자 하였다. 골재다짐실험은 체가름 된 골재를 목표로 하는 골재입도로 혼합한 후 흙의 다짐시험 방법(KS F 2312)에 따라 Fig. 7과 같은 자동 다짐장비를 사용하여 3층 다짐으로 각 층별 25회 다짐을 실시하였다. 정해진 부피의 몰드에 다져진 골재의 무게를 측정하여 골재다짐밀도(Compacted Aggregate Density, CAD)를 계산하였다.

3.3 골재 특성지표와 혼합물 물성과의 상관관계

GR과 CAD의 아스팔트 혼합물 물성과의 상관관계를 분석하기 위해 제시된 입도를 만족하는 Table 4와 같은 5종류의 입도에 대해 배합설계를 실시하였다. 사용된 골재는 기층용 제강 슬래그 골재를 파쇄한 것으로 목표 입도를 맞추기 위해 체가름 후 혼합하여 사용하였으며, 혼합물 제작에는 스트레이트 아스팔트 바인더(AC 60~80)를 사용하였다.

GR과 CAD의 실제 혼합물 물성과의 상관관계를 분석하기 위해 Table 4의 5종류의 입도에 대해 GR과 CAD를 구하였다. 각각의 골재입도에 대해 배합설계를 실시하였으며, 최종배합설계를 통해 얻어진 최적아스팔트 함량 및 기초물성 그리고 마샬안정도 실험결과는 Table 5와 같다.

골재 입도특성을 나타내는 지표와 아스팔트 혼합물의 물성과의 상관관계는 Banerji et al.의 연구에 의하면 Eq. (3)과 같은 2차함수의 형태를 갖는다. 상수 값 a, b, c를 회귀분석을 통해 결정하면 Table 6과 같다. Figs. 8 and 9에 나타난 것과 같이 골재지표

Table 4. Gradations for Mix Design

Gradation \ Sieve size	Passing Percent (%)							
	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.08 mm
# 1	100.0	90.0	67.0	45.0	30.0	20.0	14.0	10.0
# 2	99.5	85.0	60.3	38.8	25.0	17.5	11.3	8.0
# 3	99.0	80.0	53.5	32.5	20.0	15.0	8.5	6.0
# 4	98.5	75.0	46.8	26.3	15.0	12.5	5.8	4.0
# 5	98.0	70.0	40.0	20.0	10.0	10.0	3.0	2.0

Table 5. Results of GR, CAD, Mix Design

Gradation	OAC (%)	GR	CAD (ton/m^3)	Air Void (%)	Stability (kN)	Flow (1/10 mm)	VMA (%)	VFA (%)	Density (ton/m^3)
# 1	6.8	2.248	2.369	4.0	11.026	27.68	26.6	82.5	2.953
# 2	6.0	1.885	2.392	4.1	11.408	28.20	24.8	80.4	3.003
# 3	5.2	2.102	2.415	3.9	11.789	28.72	22.9	78.2	3.052
# 4	4.4	1.982	2.426	4.0	10.912	26.75	21.0	74.8	3.105
# 5	3.6	1.770	2.437	4.2	10.035	24.78	19.0	71.4	3.157

Table 6. Relations between Gradation Parameters and Mix Design Parameters

Mix Design Parameter (Y)	X	a	b	c	R2	Rating
Stability (kN)	GR	-55.135	64.368	-15.533	0.71	Good
Flow (1/10 mm)	GR	-102.95	125.16	-29.823	0.67	Fair
VMA (%)	GR	23.498	-12.484	6.0436	0.54	Fair
VFA (%)	GR	19.684	40.265	-5.6395	0.55	Fair
Bulk Density (ton/m^3)	GR	3.0529	0.3184	-0.1581	0.54	Fair
Stability (kN)	ACD	-5967.8	4988.1	-1040.3	0.86	Very Good
Flow (1/10 mm)	ACD	-12464	10434	-2178.5	0.89	Very Good
VMA (%)	ACD	-5754.7	4918.1	-1045.9	0.99	Excellent
VFA (%)	ACD	-12993	11036	-2328.8	0.98	Excellent
Bulk Density (ton/m^3)	ACD	159.46	-133.11	28.304	0.99	Excellent

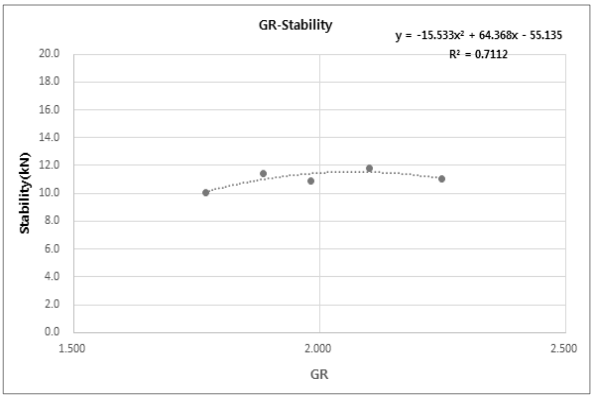

Fig. 8. Relation of GR with Stability

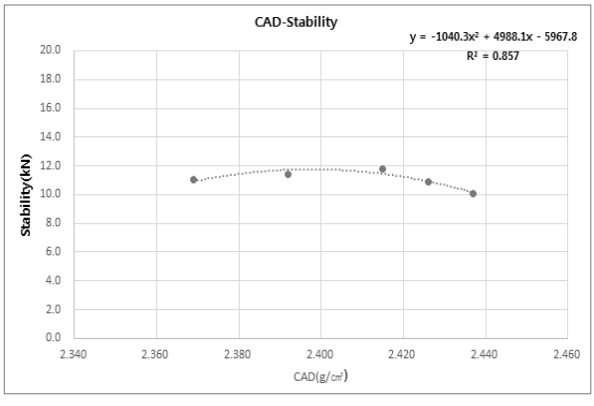

Fig. 9. Relation of CAD with Stability

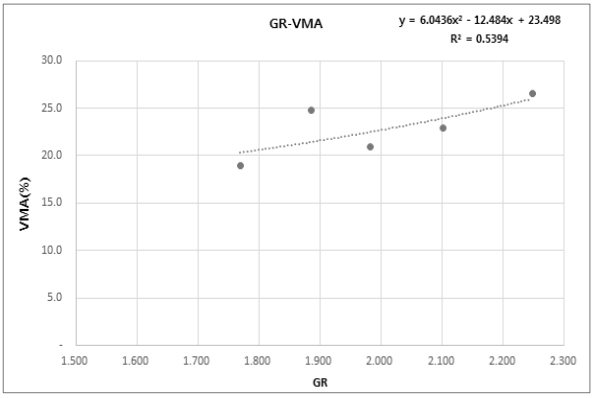

Fig. 10. Relation of GR with VMA

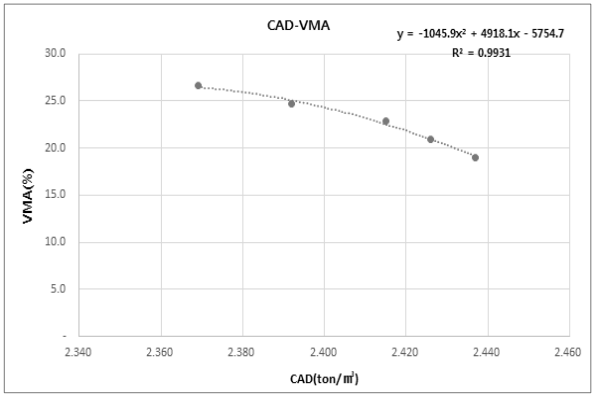

Fig. 11. Relation of CAD with VMA

Table 7. Gradations for Evaluation of Various Aggregate Mix

Sieve size (mm) / Gradation	Percent Passing (%)							
	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
# 1	99.0	78.0	58.0	40.0	28.0	18.0	10.0	6.0
# 2	99.0	80.0	53.5	32.5	20.0	15.0	8.5	6.0
# 3	99.0	72.0	50.0	30.0	20.0	12.0	8.0	5.0
# 4	100.0	90.0	67.0	45.0	30.0	20.0	14.0	10.0
# 5	98.0	70.0	40.0	20.0	10.0	10.0	3.0	2.0
# 6	95.5	72.8	55.6	42.8	33.3	25.8	20.0	15.6
# 7	100.0	79.0	62.3	49.2	39.1	30.9	24.4	19.3
# 8	82.1	54.2	35.6	23.5	15.7	10.3	6.8	4.5
# 9	86.6	60.4	42.3	29.9	21.6	15.5	11.2	8.2
# 10	91.1	66.6	49.0	36.4	27.4	20.6	15.6	11.9

중 GR과 마샬안정도의 R^2가 0.71인데 비해 CAD의 R^2는 0.86으로 보다 상관성이 높은 것을 알 수 있다. 특히 공극확보 및 바인더의 피복두께 확보를 위한 중요한 인자인 VMA와의 R^2는 Figs. 10 and 11에 나타난 것과 같이 GR의 경우 0.54로 상관성이 낮은 반면 CAD의 경우 R^2가 0.99로 매우 높은 상관성을 보이고 있다. GR과 혼합물 물성과의 R^2는 0.54~0.71인데 비해 CAD의 R^2는 0.86~0.99로 매우 높은 상관성을 나타내었다. 이는 GR이 골재입도만을 나타내는 지표인데 반해 CAD는 골재의 입형, 표면상태, 세부적인 입도상태가 모두 반영되기 때문에 제강슬래그 골재의 특성을 보다 잘 반영할 수 있기 때문이다.

$$y = aX^2 + bX + c \quad (3)$$

y : Property of mixture
X : Gradation Parameter
a, b, c : Constants

3.4 10 mm 밀입도 골재입도기준의 평가

골재의 특성지표인 CAD를 통해 골재입도 변경에 따른 아스팔트 혼합물의 물성을 파악할 수 있음을 확인하였음으로 제시된 골재입도기준의 타당성을 검증하기 위해 Table 7과 같이 다양한 골재입도에 대해 아스팔트 혼합물의 물성을 예측하였다. 제시된 골재입도기준에 포함되는 #1~#5 입도와 풀러모델에 의한 입도기준에 해당하는 #6~#10에 대해 검토하였다. 검토결과는 Table 8과 같으며, Fig. 12에 나타난 것과 같이 제시된 입도기준을 만족하는 혼합물이 풀러모델에 의한 입도기준 혼합물에 비해 높은 안정도 값을 나타내었으며, Fig. 13과 같이 혼합물의 안정성을 확보하기 위한 VMA 확보에도 유리한 것으로 나타났다.

Table 3의 제안 입도에서 강성을 갖는 제강슬래그 골재의 특성과 박층 포장으로 포장두께가 얇아짐에 따라 균열발생 확률이 높아질 수 있기 때문에 균열저항성 향상을 위해 0.3 mm 이하 골재의 비율을 늘릴 수 있도록 입도를 조정하였다. 이와 같은 세립분의 증가가 균열저항성에 미치는 영향을 분석하기 위해 제안입도를

Table 8. Calculation Results of Mixture Property due to Gradations

Gradation	ACD (ton/m^3)	OAC (%)	Stability (kN)	Flow (1/10 mm)	VMA (%)	VFA (%)	Bulk Density (ton/m^3)
# 1	2.392	5.5	11.490	29.48	25.1	80.5	3.007
# 2	2.412	5.2	11.298	28.85	23.0	77.5	3.064
# 3	2.378	4.9	11.126	28.89	26.1	81.5	2.980
# 4	2.376	7.1	11.050	28.75	26.2	81.6	2.978
# 5	2.425	3.6	10.756	27.57	21.2	74.6	3.111
# 6	2.444	6.2	9.263	24.22	17.8	68.7	3.203
# 7	2.449	6.8	8.753	23.09	16.8	67.0	3.230
# 8	2.450	3.6	8.644	22.85	16.6	66.6	3.235
# 9	2.458	4.6	7.703	20.79	14.9	63.4	3.282
# 10	2.466	5.2	6.628	18.45	13.1	60.0	3.332

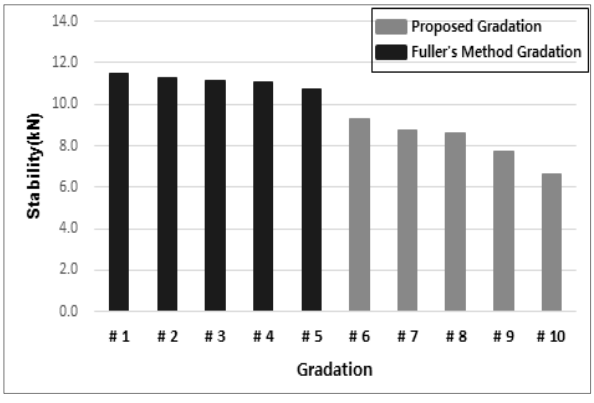

Fig. 12. Calculation Results of Stability

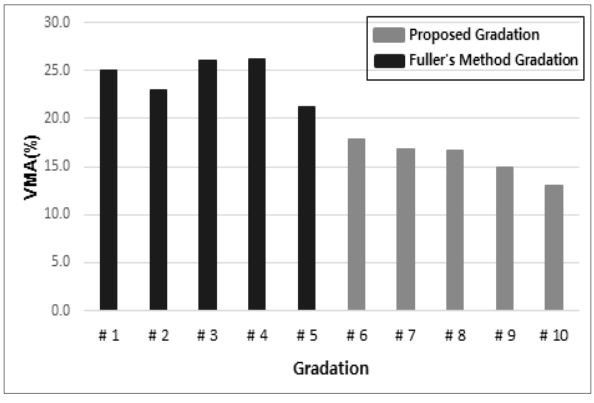

Fig. 13. Calculation Results of VMA

Table 9. Results of ITS Test

Gradation	ITS(MPa)	Disp. (mm)	Toughness (N·mm)
Center of Proposed Gradation	1.04	1.29	18,046
	1.05	1.32	19,209
	1.06	1.34	18,114
AVE.	1.05	1.32	18,456
Under of Lower Limit	0.91	1.30	15,540
	0.98	1.27	16,724
	0.94	1.34	15,844
AVE.	0.94	1.30	16,036

통과하는 경우와 0.3 mm 통과중량백분율이 10% 이하로 제안 입도를 벗어나도록 한 입도에 대해 아스팔트 혼합물을 제작하고 간접인장강도 실험을 수행하였다. 실험결과 Table 9와 같이 0.3 mm 이하 골재를 제안입도와 같이 충분히 포함할 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 간접인장강도는 약 11%, 터프니스는 약 15% 향상되어 균열저항성이 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

제강슬래그 골재 사용 박층 아스팔트 포장 공법용 10 mm 밀입도 아스팔트 혼합물을 위한 골재 입도기준을 제시하고 골재 입도와 물성에 따른 아스팔트 혼합물과의 상관관계를 통해 제시된 입도의 적합성을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도기준은 최대밀도선에 근거하여 제시되나 10 mm 입도기준의 경우 골재 최대크기가 작고 좁은 구간에 분포되어 있어 기존 풀러모델에 의한 기준 선정 시 부드러운 혼합물이 되어 적절하지 않다. 따라서 10 mm 밀입도 아스팔트의 입도는 국외 기준을 참고하여 골재 맞물림에 의한 내구력 증가와 아스팔트 바인더의 충분한 피복두께를 위한 골재 간극률 확보를 위해 최대밀도선을 벗어나는 입도를 제시하였다. 제시된 입도의 검증을 위해 골재 입도분포를 나타내는 지표인 GR과 CAD를 이용하여 골재 입도와 아스팔트 혼합물 물성과의 상관관계를 분석하였다. GR과 혼합물의 R^2가

0.54~0.71인데 비해 CAD의 R^2는 0.86~0.99로 매우 높은 상관성을 나타내었으며, 도출된 관계식을 통해 풀러모델에 의한 입도에 비해 제시된 입도가 보다 양호한 물성을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 슬래그 골재 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 강성화를 고려하여 균열저항성을 향상시키고자 0.3 mm 이하 골재 통과중량백분율을 10% 이상으로 제한하였으며 제시 입도는 간접인장강도 약 11%, 터프니스 약 15% 증가시켜 균열저항성 향상 효과를 얻을 수 있었다.

(3) 골재 특성지표인 CAD는 골재의 입도 뿐 아니라 복합적 특성을 반영할 수 있어 충분한 데이터가 축적된다면 아스팔트 혼합물 배합설계 시 실제 혼합물 제작과정 없이 최적 골재 배합입도 결정에 활용될 수 있다. 골재 합성입도 결정 시 입도기준 만족 유무와 현장기술자의 경험에 의존하고 있는 실정에서 CAD를 활용한 최적 골재 입도 결정은 아스팔트 포장 품질향상에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 교통물류연구사업(온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 도로 포장 기술 개발)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

본 연구는 2015학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

ASTM D 2487, Standard Practice for Classifcation of Soils for Engineering Purposes .

Banerji, A. K., Das, A., Mondal, A., Biswas, R. and Obaidullah, M. (2014). “A comparative evaluation on the properties of HMA with variations in aggregate gradationi of laboratory and field production mixes.” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 03, No. 09, pp. 441-448.

David, E. Newcomb (2009). *Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation*, Information Series 135, NAPA (National Asphalt Pavement Association), Lanham, Maryland.

Kim, J. M. (2012). “Present status on the manufacturing and application of steel slag aggregate.” *Review of Architecture and Building Science*, Architectural Institute of Korea, Vol. 56, No. 8, pp. 29-36 (in Korean).

KS F 2312, Standard Test Method for Soil Compaction using a Rammer (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014). “Asphalt Mixture Production and Construction Guidelines.” pp. 70-71 (in Korean).

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y. and Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.

Sanchez-Leal, F. J. (2007). “Gradation chart for asphalt mixes: Development, Journal of Materials in Civil Engineering.” *Journal of Materials in Civil Engineering., ASCE*, Vol. 19, No. 2, pp. 185-197.

Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Cosić, M., Merle, V., Mioč, B. and Sofilić, U. (2007). “EAF steel slag application possibilities in croatian asphalt mixture production.” *4th International Conference on Molten Slags and Fluxes, Sendai, Japan*, pp. 481-486.

SPS-KAI0002-F2349-5687, Hot Mix Asphalt Mixture, 2015 (in Korean).

Wilson, B., Scullion, T. and Estakhri, C. (2013). *Design and construction Recommendations for Thin Overlays in Texas*, Report FHWA/TX-13/0-6615-1, Texas A&M Transportation Institute, Austin, Texas.