

밀도와 흡수율을 고려한 제강슬래그 아스팔트 콘크리트의 배합설계 방법 연구

A Study on a Steel Slag Asphalt Concrete Design Method Considering Density and Absorption

김경남	Kim, Kyungnam	경기대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : kyungnam248@gmail.com)
조신행	Jo, Shinheang	정회원 · 경기대학교 토목공학과 공학박사 (E-mail : roadcreator@gmail.com)
김낙석	Kim, Nakseok	정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 (E-mail : nskim1@kgu.ac.kr)
김현욱	Kim, Hyunwook	정회원 · 포스코건설 R&D CENTER P4 · 교신저자 (E-mail : hkim29@gmail.com)

ABSTRACT

PURPOSES : This paper presents a mix design method for using steel slag as an aggregate for asphalt mixtures.

METHODS : Steel slag has a different density and absorption rate than natural aggregates. The asphalt content was calculated according to the steel slag characteristics, and the formula for aggregate-gradation correction was presented.

RESULTS : The asphalt mix was designed using the proposed equations. Using the proposed mix design method, it was possible to design the asphalt mixture according to the target-usage amount of the recycled aggregate.

CONCLUSIONS : The suggested method can be used for asphalt mix design using aggregates with different densities and absorption rates. It is expected to contribute to quality improvement by ensuring accurate calculation of mixing ratios for steel slag asphalt mixtures.

Keywords

Steel slag, Density, Absorption rate, Mix design, Asphalt concrete

Corresponding Author : Kim, Hyunwook, Sr. manager
POSCO E&C Tower 1, 241, Incheon tower-daero,
Yeonsu-gu, Incheon, 22009, Korea
Tel : +82.32.748.1749 Fax : +82.32.748.4034
E-mail : hkim29@gmail.com

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Dec, 21, 2017 Revised Dec, 23, 2017 Accepted Jan, 30, 2018

1. 서론

1.1. 논문개요

슬래그는 철강 제조공정에서 철광석 등으로부터 철을 분리하고 남은 암석 성분을 말한다. 철을 생산하는 과정에서 다량의 부산물이 발생하는데 이들은 철, 탄소 및 석회석 등의 재활용이 가능한 유효한 자원을 다량 함유하고 있다(Ann, 2016). 국내 철강 생산량은 2009년 세계 경기악화로 인하여 잠시 주춤하였으나 2010년

60,000 천 톤으로 증가하였으며, 슬래그 발생량 역시 2010년 23,688 천 톤으로 증가하고 있는 것으로 나타났다(Kim, 2012).

슬래그는 크게 고로슬래그와 제강슬래그로 구분된다. 고로슬래그는 철광석으로부터 선철을 생산하는 과정에서 철광석의 불순물과 코크스의 재, 석회석이 반응하여 생긴 용융물이다. 고로슬래그는 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘과 황산염의 작용에 의해 경화 반응이 촉진

되어 압축강도를 향상시키는 특성이 있다. 제강슬래그는 철을 정련하여 강을 만들기 위해 쇠물에 녹아있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 공정에서 발생하며 전로슬래그와 전기로슬래그로 구분된다. 제강슬래그에는 미반응 유리석회 CaO(free-CaO 또는 F-CaO)가 포함되어 있어 도로용 골재로 이용 시 수개월 이상 야적 및 에이징(aging) 과정이 필요하다(Choi et al., 2007).

국내 슬래그의 재활용 현황을 살펴보면 고로슬래그는 시멘트의 혼합재료로 63.9%가 활용되어 고부가가치를 창출하는 반면 제강슬래그의 경우 비교적 저부가가치인 매립 및 성토용으로 78%가 활용되고 있는 실정이다(Kim, 2012).

제강슬래그는 고로슬래그에 비해 활용률이 낮으며 대부분 저부가가치로 사용되기 때문에 이를 고부가가치 자원으로 활용하기 위한 방안으로 아스팔트 콘크리트 포장용 골재로 사용하기 위한 노력이 지속되어 왔다. 제강슬래그를 아스팔트 콘크리트용 골재로 사용하면 제강슬래그의 물리/화학적 특성으로 인해 다양한 역학적 성능 증진 효과를 얻을 수 있다. Ali et al(1991)은 제강슬래그 골재의 사용은 아스팔트 콘크리트 포장의 탄성계수 증가, 인장강도 증진, 소성변형 및 수분저항성 향상을 가져온다고 하였다. 또한 Oregon DOT에서는 제강슬래그 아스팔트 포장이 시공 5년 후까지 소성변형이나 심각한 파손 없이 초기와 동등한 수준의 평탄성을 유지하는 것으로 조사되었다(Stroup&Wattenberg, 2013). 제강슬래그를 골재로 사용한 아스팔트 포장은 슬래그의 높은 강성과 불규칙한 골재 입형으로 포장의 미끄럼 저항을 향상시키며 골재 탈리, 손실 등의 포장 파손 발생우려가 적은 것으로 알려졌다(Kehagia, 2009; Asi, 2007; Lee Chaney, 2015).

제강슬래그를 아스팔트 혼합물용 골재로 사용하면 다양한 성능 향상 효과를 갖게 된다. 그러나 제강슬래그는 천연골재에 비해 높은 밀도를 갖기 때문에 밀도차이가 큰 골재를 혼합하기 위한 별도의 배합방식이 필요하다. 본 연구에서는 제강슬래그를 아스팔트 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 배합설계 방안을 마련하고자 한다.

2. 제강슬래그 골재를 사용한 배합설계

2.1. 제강슬래그 골재의 기본 물성

제강슬래그 골재(이하 슬래그 골재)의 밀도는 금속성분이 함유되어 있고 조직이 치밀하기 때문에 일반천연골재에 비해 높다. 기초물성 평가 결과는 Table 1과 같

다. 연구에 사용된 제강슬래그는 광양 P제철소에서 생산된 것으로 밀도가 3.37g/cm³이었으며, 흡수율은 1.68%로 아스팔트 혼합물용 골재의 품질기준을 만족하였다.

Table 1. Properties of Steel Slag Aggregate

Item	Unit	Method	Specification	Result	
Density	Surface	g/cm ³	KS F 2503	≥2.45	3.37
	Absolute	g/cm ³	KS F 2511	≥2.5	3.31
Absorption	%		≤3.0/3.5	1.68	
Soundness (Na2So2) : 5times	%	KS F 2507	≤12	2.7	
Abrasion (C Method)	%	KS F 2508	≤35	20.1	
Crushing value	%	KS F 2541	≥85	100	
Flat or elongated (3:1)	%	KS F 2575	≤30	12.1	
Immersion expansion	%	KS F 2580	≤2.0	0.0	

*Lee et al., 2017

국내에서 가장 많이 사용되는 천연골재는 화강암으로 보통 밀도가 2.7g/cm³ 전후임으로 슬래그 골재의 밀도가 약 20% 이상 높은 것으로 나타났다. 슬래그 골재를 아스팔트 콘크리트에 사용하면 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.

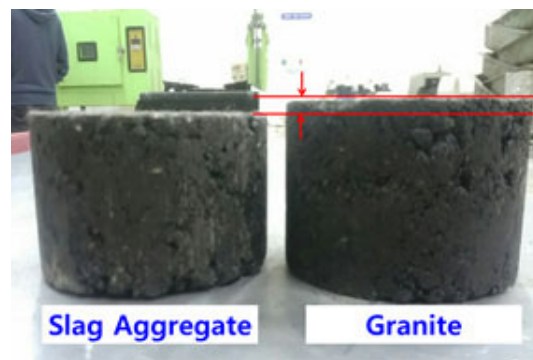


Fig. 1 Compared Specimen

2.2. 추정 아스팔트 함량 결정

일반적인 아스팔트 혼합물의 배합설계는 혼합입도의 결정 후 추정 아스팔트 함량을 계산하거나 기존 배합설계 결과를 통해 결정한 추정 아스팔트 함량을 기준으로 ±0.5%, ±1.0%의 아스팔트 함량으로 공시체를 제작하여 최적 아스팔트 함량을 정하게 된다.

슬래그 골재와 같은 순환골재를 사용할 경우에는 사

용비율이 특정되는 경우가 많으며 이를 감안하여 골재 합성입도를 결정하여야 한다. 골재 사용량은 아스팔트 함량에 영향을 받기 때문에 추정 아스팔트 함량을 먼저 결정한 후 골재 합성입도를 결정하는 순서로 배합설계를 진행하였다.

추정 아스팔트 함량은 골재 입도에 따른 골재 표면적에 대해 아스팔트 피복 두께를 확보하기 위한 아스팔트의 양을 대략적으로 계산하는 것으로 유사한 배합의 경우 기존의 배합설계 경험을 통해 알고 있는 최적 아스팔트 함량을 적용하는 것이 배합설계에서는 편리하다.

슬래그 아스팔트 혼합물은 아직 국내에서 활발히 적용되지 않았기 때문에 충분한 경험이 축적되지 못했으며, 슬래그 골재의 비중과 흡수율이 높아 기존 아스팔트 혼합물과는 최적 아스팔트 함량에서 차이가 발생한다. 국토교통부(2017) “아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침”의 추정 아스팔트 함량 계산식은 Eq. (1)과 같다.

$$Pb = 0.035a + 0.045b + Xc + F \quad (1)$$

여기서, Pb : 추정아스팔트 함량

a : 2.5mm체에 남은 골재의 질량비(%)

b : 2.5mm체 통과, 0.08mm체에 남은 골재의 질량비(%)

c : 0.08mm체를 통과 골재의 질량비(%)

X : c 값이 11-15%이면 0.15

c 값이 6-10%이면 0.18

c 값이 5% 이하면 0.2

F : 골재의 흡수율

Eq. (1)에서 흡수율의 차이가 큰 슬래그 골재가 혼합 사용될 경우 흡수율 F 는 슬래그 골재와 천연골재의 사용비율에 따라 흡수율을 조정하여야 한다. 천연 골재와 슬래그 골재와 같이 흡수율의 차이가 큰 혼합 골재는 Eq. (2)에 따라 흡수율(F_{SN})을 계산한다. 예를 들어 흡수율 0.7%의 화강암 골재 70%와 흡수율 1.68%의 슬래그 골재 30% 비율로 혼합할 경우 Eq. (2)에 의해 혼합 골재 흡수율은 0.994%가 된다.

$$F_{SN} = (F_1 \times P_1 + \dots + F_n \times P_n) / 100 \quad (2)$$

여기서, F_{SN} : 혼합골재 흡수율

F_n : 골재(n) 흡수율

P_n : 골재(n) 배합비율

추정 아스팔트 함량은 혼합된 골재를 아스팔트 바인더로 일정 두께 이상으로 코팅하기 위한 바인더의 필요 부피에 따른 계산이기 때문에 밀도가 높은 슬래그 골재 사용시 Fig. 1과 같은 아스팔트 콘크리트의 부피 차이를 감안하여 밀도에 따른 추정 아스팔트 함량을 Eq. (3)과 같이 수정하여야 한다.

추정 아스팔트 함량을 계산하기 위해서는 골재합성입도가 필요하며 따라서 슬래그 아스팔트 혼합물의 배합설계를 위해서는 대략적인 잠정 합성 입도를 먼저 결정하여야 한다. 슬래그 및 RAP의 목표사용량을 감안하여 잠정입도를 선정한 후 Eq. (3)을 이용해 천연 골재만 사용했을 때의 혼합물의 이론최대밀도(G_{mmN})와 슬래그 골재가 혼합된 혼합물의 이론최대밀도(G_{mmS})를 구하여 골재 밀도에 따른 혼합물의 밀도 변화를 예측하여야 한다.

밀도 2.70g/cm³의 화강암 골재 70%와 밀도 3.31g/cm³의 슬래그 골재 30%를 혼합하고, 잠정 입도로부터 Eq. (1)을 통해 계산한 추정 아스팔트 함량을 Eq. (3)에 대입하여 이론최대밀도를 계산하면 천연골재(화강암)만 사용하였을 경우 G_{mmN} 는 2.484g/cm³이며, 천연골재 70%, 슬래그 골재 30% 비율의 아스팔트 혼합물의 G_{mmS} 는 2.610g/cm³으로 밀도가 증가하는 것으로 계산된다.

$$G_{mmN,S} = \frac{100}{\frac{W_1}{D_1} + \frac{W_2}{D_2} + \dots + \frac{W_n}{D_n} + \frac{W_a}{D_a}} \quad (3)$$

여기서, $G_{mmN,S}$: 골재배합에 따른 이론 최대 밀도

W_n : 골재의 질량 백분율

D_n : 골재의 진밀도

W_a : 혼합물 중 아스팔트의 질량 백분율

D_a : 아스팔트의 밀도

Eq. (2)와 Eq. (3)을 통해 계산된 값을 사용하여 Eq. (4)로 슬래그 아스팔트 혼합물의 추정 아스팔트 함량을 계산하면 Table 2와 같다.

$$Pb_S = (0.035a + 0.045b + Xc + F_{SN}) \times \left(\frac{G_{mmN}}{G_{mmS}} \right) \quad (4)$$

여기서, P_{bS} : 슬래그 사용 추정 아스팔트 함량

a : 2.5mm체에 남은 골재의 질량비(%)

b : 2.5mm체 통과, 0.08mm체에 남은 골재의 질량비(%)

c : 0.08mm체 통과 골재의 질량비(%)

X : c 값이 11-15%이면 0.15

c 값이 6-10%이면 0.18

c 값이 5% 이하면 0.2

F_{SN} : 골재의 흡수율

G_{mmN} : 일반골재 사용 시 계산 이론최대 밀도

G_{mmS} : 슬래그골재 사용 시 계산 이론최대 밀도

Table 2. Computation of OAC

Use of steel slag aggregate ratio	Estimation of AC (Use granite aggregate)	Estimation of AC (Use steel slag aggregate)
30 %	5.36 %	5.38 %
50 %	5.36 %	5.38 %

흡수율이 높은 슬래그 골재로 인해 추정 아스팔트 함량이 늘어나야 하지만 슬래그 골재의 밀도 영향으로 아스팔트 혼합물의 밀도가 높아짐에 따라 단위 부피당 소요되는 아스팔트 함량이 줄어들어 천연골재와 유사한 추정 아스팔트 함량이 계산되었다. 다만 이 예시는 본 연구에서 사용된 슬래그 골재의 흡수율과 밀도를 적용한 것으로 슬래그 골재의 사용비율, 밀도, 흡수율에 따라 달라질 수 있다.

추정 아스팔트 함량 계산식은 실제 일반 천연 골재만 사용하는 배합설계에서도 배합설계 결과로 나타나는 최적 아스팔트 함량(OAC)과 차이를 보이기 때문에 배합설계의 참고자료로 활용되는 것이 바람직하다. 하지만 슬래그 골재 사용시 흡수율 및 밀도에 따른 최적 아스팔트 함량 변화를 예측할 수 있으며, 충분한 경험이 쌓이지 못한 슬래그 아스팔트 혼합물의 배합설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2.3. 슬래그 골재가 혼합된 합성입도 결정

순환골재 사용을 장려하는 정부정책에 따라 아스팔트 혼합물에 사용되는 순환골재의 최소량을 제시하거나 품질 확보를 위해 사용량을 제한하기도 하는데 이를 감안한 골재 합성비율의 결정이 필요하다.

골재 합성입도 결정을 위해서는 골재별 입도가 필요

하며 이를 위해 체가름 시험을 수행한다. 골재별 입도로 골재간의 합성비율을 통해 입도범위 기준을 만족하는 골재합성입도를 결정하게 된다. 일반적인 천연 골재의 경우 굵은 골재와 잔골재, 채움재간의 밀도 차이가 있으나 그 차이가 크지 않기 때문에 굵은 골재와 잔골재의 비중차이는 무시하고 진행한다.

골재 체가름 실험을 통해 얻어진 골재입도는 골재의 입자 크기에 따른 비율을 각 체를 통과하는 중량비율로서 표현하는 것이다. 배합에 사용되는 골재간의 밀도차이가 크지 않을 경우는 합성된 배합비율이 실제 골재의 크기별 분포를 나타낼 수 있으나 골재간의 밀도차이가 크면 원하는 크기의 골재가 적절한 비율로 혼합되지 못하고 수치상의 합성입도와 다른 골재크기 분포(입도)를 가지게 된다.

슬래그 골재와 천연골재를 혼합하여 배합설계를 실시할 때 골재간의 비중차이를 고려하지 않으면 부적절한 혼합입도와 이로 인한 재료 분리가 Fig. 2와 같이 나타날 수 있으며 이는 아스팔트 콘크리트의 품질저하로 이어진다.

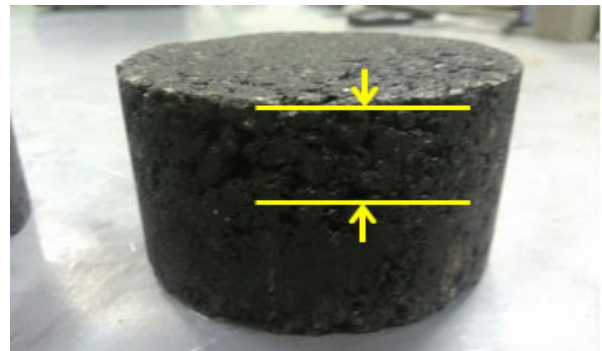


Fig. 2 Aggregate Segregation

합성입도 결정 과정은 슬래그 골재와 천연골재의 체가름 결과로 합성입도를 구한 뒤 실제 골재 크기별 분포를 합성입도와 동일하게 만들기 위한 밀도에 따른 배합비율 보정을 하여야 한다. 이 과정에서 합성입도상의 골재 배합비율과 최종 골재배합비율의 차이가 발생한다. 따라서 합성입도 산정시 목표 골재배합비율을 만족시킬 수 있는 배합비율을 우선 계산할 필요가 있다. Eq. (5)는 골재의 밀도와 아스팔트 함량에 따른 목표 사용 슬래그 골재량을 계산하는 식이다. 예를 들어 30% 이상의 슬래그 골재를 사용하고자 하는 아스팔트 혼합물을 배합설계 할 때, 슬래그 골재의 밀도(ex, 슬래그 3.31g/cm³, 천연골재 2.70g/cm³)와 설계 아스팔트 함량(ex, 5.5%)으로 Eq. (5)에 의해 계산하면 합성입도 산정시 슬래그 골재를 27.4% 이상 사용하여야 최종 혼합물 배합설계 결과에서 30% 이상의 슬래그 골재를 사용한 아스팔트 혼합물을

얻을 수 있다.

$$Q_{St} = \frac{100 Q_{St}}{100 A G - A G Q_{St} + A Q_{St}} \quad (5)$$

여기서, Q_{St} : 골재 합성입도용 슬래그 골재량

Q_{St} : 골재 합성입도용 슬래그 골재량

$$A : \frac{100 - A_d}{100}$$

$$G : \frac{G_S}{G_N}$$

A_d : 설계 아스팔트 함량(%)

G_S : 슬래그 밀도

G_N : 천연골재 밀도

폐아스콘(RAP)의 활용을 높이기 위한 재생 아스콘의 의무사용 권장에 따라 폐아스콘의 사용을 고려하였다. 폐아스콘 사용은 신규 골재에 비해 가격이 저렴하고 잔류 아스팔트 바인더로 인해 신재 아스팔트 바인더의 사용량을 감소시킬 수 있어 아스팔트 혼합물의 경제성을 높일 수 있는 장점이 있다. 슬래그 아스팔트 콘크리트는 밀도가 높기 때문에 Fig. 1과 같이 동일 면적에 동일 두께의 포장을 위해 더 많은 아스팔트 혼합물을 필요로 하며 이는 공사비용의 상승을 초래할 수 있다. 따라서 순환골재의 사용비율을 높이고 재료비의 절감을 위해 슬래그 골재와 함께 폐아스콘의 활용을 검토하였다.

아스팔트 콘크리트용 ‘순환골재 재활용제품’은 순환골재를 원료로 사용하여 만든 제품으로 아스팔트 콘크리트 제조용 순환골재를 25%이상 이용하여 순환골재 비율이 일정수준 이상이어야 한다. 즉, 사용되는 폐아스콘은 일정비율 이상이어야 하는데 슬래그 골재와 함께 사용시 비중 보정에 따라 목표 폐아스콘 사용량을 만족하지 못할 수 있다. 일반적인 경우 폐아스콘 사용 배합설계에서는 폐아스콘의 잔류아스팔트 바인더를 감안하여 골재합성입도 산정 시 폐아스콘의 골재비율을 잔류아스팔트 바인더의 제한 값을 사용하고 있다.

슬래그 골재와 사용시 밀도 보정을 감안하여 설계 폐아스콘 사용량을 Eq. (6)과 같이 폐아스콘의 목표 사용량과 잔류아스팔트 바인더 함량, 설계 아스팔트 함량, 슬래그 골재 및 천연골재의 밀도를 사용하여 계산한다.

$$Q_{Rd} = Q_{Rt} \times \frac{100}{(100 + A_R)} \times \frac{100 + (Q_{St} A) \times (G - 1)}{100 - A_d} \quad (6)$$

여기서, Q_{Rd} : 골재 합성입도용 골재량

Q_{Rt} : 목표사용 골재량

$$A : \frac{100 - A_d}{100}$$

$$G : \frac{G_S}{G_N}$$

A_R : 잔류아스팔트 함량(%)

A_d : 설계아스팔트 함량(%)

G_S : 슬래그 골재 밀도

G_N : 천연골재 밀도

2.4. 배합설계

2.4.1. 재료

슬래그 골재와 RAP, 천연골재(화강암)를 혼합 사용한 아스팔트 혼합물의 배합설계를 실시하였다. Fig. 3, Fig. 4는 배합설계에 사용된 슬래그와 폐아스콘이다.



Fig. 3 Steel Slag



Fig. 4 RAP

슬래그 골재와 폐아스콘의 물성을 Table 3에 정리하였다. 배합설계에 사용된 골재와 채움재의 입도는 Table 4와 같다. 폐아스콘은 5mm를 기준으로 체가름하여 사용하였고 천연골재는 경기도 아스콘 플랜트에서 입수한 화강암 골재이며, 채움재는 석회석분을 사용하였다.

Table 3. Properties of Aggregate

Item	Value
Density of steel slag	3.31g/cm ³
Absorption of steel slag	1.68%
Density of natural agg.	2.70g/cm ³
Absorption of natural agg.	0.70%
Residue asphalt in RAP	4.0%

Table 4. Aggregate Gradation

Sieve size (mm)	Percent passing(%)					
	Steel slag (13mm)	Steel slag (Fine)	RAP 10-5mm	RAP 5-0mm	Granite (13mm)	Filler
20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	100.0
10	85.7	100.0	100.0	100.0	72.6	100.0
5	11.4	99.4	26.8	99.9	10.0	100.0
2.5	2.9	74.4	19.4	84.2	0.8	100.0
0.60	0.5	20.3	12.4	51.6	0.4	100.0
0.30	0.6	10.8	8.6	35.9	0.4	100.0
0.15	0.4	6.8	5.2	17.5	0.3	97.0
0.08	0.2	3.6	2.9	6.9	0.3	92.0

골재 표면에 잔류 아스팔트 바인더로 피복되어 있는 페아스콘의 사용은 포장체 강성을 증가시켜 균열에 취약할 가능성이 있다(Lee et al., 2017). 이에 따라 본 연구에서는 슬래그 골재와 페아스콘 사용을 위해 개발된 WMRA(Warm Mix Recycled Asphalt) 아스팔트 바인더를 사용하였다. WMRA 바인더는 Table 5와 같이

Table 5. Properties of Asphalt Binder

Test item	Method	WMRA	WMRA
		PG 64-22	PG 76-22
Original binder			
Flash point, COC, °C	KS M 2010	344	342
Rotational viscosity, 135°C, cP	KS F 2392	432	1,486
Dynamic shear (G*/Sinδ), kPa	KS F 2393	1.25 @64°C	1.28 @76°C
RTFOT residue			
Mass loss, %	KS F 2393	0.02	0.03
Dynamic shear (G*/Sinδ), kPa	KS F 2393	2.38 @64°C	2.22 @76°C
PAV residue			
Dynamic shear (G*/Sinδ), kPa	KS F 2393	2,860 @25°C	868 @31°C
Creep stiffness, S, MPa at -12°C	KS F 2390	203	98
m-Value at -12°C	KS F 2390	0.33	0.32

PG 64-22와 PG 76-22 두 종류가 있으며 본 연구의 배합설계에서는 PG 76-22 바인더를 사용하였다.

2.4.2. 배합설계 순서

슬래그 골재의 입도 상태와 아스팔트 콘크리트의 종류에 따라 천연골재와 혼합하여 사용해야 하는 경우 골재의 비중에 따른 보정을 통한 배합설계를 진행하여야 한다. 슬래그 골재를 사용한 아스팔트 콘크리트(이하 슬래그 아스팔트 콘크리트)는 순환골재의 사용 비율을 정하고 배합설계를 진행하는 경우가 많다. 통상적인 배합설계와 달리 밀도에 따른 배합비 보정을 실시하면 처음 계획과 다른 배합비율을 얻기 때문에 미리 순환 골재 사용 비율에 따른 골재 합성입도 산정이 필요하다.

슬래그 골재와 천연골재 혼합사용 시 배합설계 순서는 다음과 같다.

- 1) 골재 체가름 실험 및 밀도, 흡수율 측정
- 2) 슬래그, 페아스콘 목표 사용량에 근접하도록 잠정 골재 합성입도 산정
- 3) 잠정 골재 합성입도에 따른 추정 아스팔트 함량 계산 및 설계 아스팔트 함량 결정
- 4) 슬래그 and/or RAP 사용목표비율을 감안한 최소 골재 사용량 계산
- 5) 골재별 체가름 입도를 사용한 합성입도 결정(최소 합성 골재량 반영)
- 6) 골재비중, 페아스콘 잔류 아스팔트 바인더에 따른 배합비율 보정

2.4.3. 배합설계 진행

배합설계는 국토교통부(MLIT, 2017)의 WC-1 입도의 아스팔트 혼합물을 기준으로 하였으며, 슬래그 골재 30% 이상, 페아스콘 30% 이상 사용을 목표하였다. 추정아스팔트 함량을 계산하기 위한 잠정 입도를 Table 6과 같이 결정하였다.

Table 6의 잠정합성입도를 기준으로 Eq. (1)로 추정 아스팔트 함량을 계산하고 슬래그 사용비율 30%와 Table 3의 골재 물성으로 Eq. (4)에 의해 추정 아스팔트 함량을 계산하면 5.38%이다. 따라서 배합설계는 5.4 ± 0.5 , $\pm 1.0\%$ 의 아스팔트 함량으로 공시체를 제작하고 배합설계를 진행하였다.

Eq. (5)에 의해 AP 함량 5.4%일 때, 골재 합성입도를 위한 최소 슬래그 골재 배합비율은 27.4%이다. 또한 Eq. (6)에 의한 최소 페아스콘 사용비율은 32.3%이

다. 이를 기준으로 AP 함량, 슬래그 골재의 밀도, 페아스콘의 잔류 아스팔트 함량을 고려하여 보정하면 Table 7과 같이 목표 사용량에 부합하는 배합비를 얻을 수 있다.

Table 7에 따라 슬래그 골재를 27.4%, RAP 32.3%, 화강암 골재 38.3%, 채움재 2.0%로 골재 합성입도를 산정하고 아스팔트 바인더 함량과 밀도, 잔류 아스팔트 바인더를 통해 보정한 최종 배합비는 Table 8과 같다. 이와 같은 보정을 하지 않고 일반적인 아스팔트 혼합물의 계량 배합비인 ② 단계의 비율로 재료를 배합할 경우 Table 9의 Case 1과 같이 목표한 합성입도와 3%가량 차이가 나는 입도의 혼합물을 얻게 된다.

Table 6. Gradation of Aggregates and Specification

Sieve size(mm)	Percent passing(%)	
	WC-1	Mix-gradation
20	100	100.0
13	90-100	99.8
10	76-90	88.9
5	44-74	57.5
2.5	28-58	43.1
0.60	11-32	20.8
0.30	5-21	14.3
0.15	3-15	8.4
0.08	2-10	4.7

Table 7. Correction of Aggregates Gradation

Classification	Steel slag	RAP	Granite	Filler	AP	Total
① With AP	27.4	32.3	38.3	2.0	5.4	105.4
② Converted to 100	25.9	30.5	36.3	1.9	5.4	100.0
③ Adjustment by slag density	31.8	30.5	36.3	1.9	5.4	105.9
④ Converted to 100	30.0	28.8	34.3	1.8	5.1	100.0
⑤ RAP AP 4%	30.0	30.0	34.3	1.8	3.9	100.0

Table 8. Correction of Mix-Design

Classification	Steel slag (13mm)	Steel slag (Fine)	RAP 10-5mm	RAP 5-0mm	Granite (13mm)	Filler	AP
Mixing ratio (%)	4.6	22.8	5.4	26.9	38.3	2.0	5.4
Correction of mixing ratio (%)	5.3	26.3	5.1	25.3	36.1	1.9	3.9

Table 9. Correction of Aggregate Grading(WC-1)

Sieve size (mm)	Percent passing(%)			
	Case 1		Case 2	
	Target Mix-gradation	Mix-gradation without correction	Target Mix-gradation	Mix-gradation without correction
20	100.0	100.0	100.0	100.0
13	99.8	99.8	100.0	100.0
10	88.8	88.2	94.7	95.7
5	57.3	55.4	60.1	65.4
2.5	43.1	41.7	39.4	43.5
0.60	21.4	21.6	19.2	21.2
0.30	14.8	15.1	13.9	15.3
0.15	8.6	8.8	6.2	6.8
0.08	4.8	4.8	3.6	3.9

본 배합설계예시에서는 슬래그 골재와 페아스콘, 천연골재를 굵은 골재와 잔골재가 모두 사용하여 서로 유사한 입도를 가지고 있어 계량값 변화에 따른 입도 차이가 크지 않았지만 굵은 골재나 잔골재를 슬래그 골재로 사용하여 특정 골재 크기의 입도 구간만 사용할 경우 Table 7과 같은 보정을 하지 않으면 골재입도의 차이가 더 커지게 되는데 Table 9는 굵은골재는 슬래그 골재로 잔골재는 화강암 골재의 경우로 입도의 차이가 5% 이상 더 커지는 것으로 나타났다.

제시된 배합설계 방법에 따라 배합비율을 결정하고 공시체 제작 후 기초물성을 측정하여 배합설계를 진행한 결과 Table 10의 결과를 얻었다.

Table 10. Mix Properties for Range of Asphalt Contents

Classification	AP content (%)	Air voids (%)	VFA (%)	VMA (%)	Stability (N)	Flow (1/10mm)
13mm	4.4	6.2	63.5	16.9	13,986	36
	4.9	5.3	69.1	17.3	14,685	37
	5.4	4.5	74.7	17.7	14,969	38
	5.9	3.1	82.2	17.6	14,895	38
	6.4	2.9	84.4	18.6	14,685	38

Table 10에 의해 공극률 4%의 최적 아스팔트 함량은 5.6%로 결정되었다. RAP의 잔류 아스팔트 함량 4%를 고려하였을 때 실제 투입되는 신재 바인더는 4.1%이다.

결정된 배합비에 따른 최종 아스팔트 혼합물의 마찰안정도는 Table 11과 같이 14,950N으로 기준 7,500N을 만족하였으며, Table 12의 동적안정도는 개질 아스팔트 사용시 품질기준 3,000회/mm를 만족하는 3,380회/mm로 소성변형 저항성이 높게 측정되었다. RAP이 포함되

어 있으므로 간접인장강도 실험을 통한 Toughness 측정결과 18,114N·mm로 기준 8,000N·mm의 2배가 넘었으며, 수분민감성을 평가하는 TSR 실험결과 0.78로 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 11. Test Results of Mix Properties for Mix-design

Classification	AP content (%)	Air voids (%)	VFA (%)	VMA (%)	Stability (N)	Flow (1/10mm)
13mm	5.6	4.0	77.5	17.7	14,950	38

Table 12. Results of Lab Test

Classification	DS (no/mm)	ITS (MPa)	Disp.	Toughness (N·mm)	TSR
13mm	3,380	1.04	1.29	18,114	0.78

3. 시험포장

슬래그 골재를 아스팔트 혼합물용 골재로 활용하기 위한 배합설계 연구결과를 토대로 시험포장을 수행하였다. 시험포장에는 WC-1(13mm)과 박층포장을 위한 10mm 밀입도 슬래그 아스팔트 콘크리트를 적용하였다.

3.1. WC-1 슬래그 아스팔트 콘크리트 시험 포장

시험포장은 2016년 3월 인천의 아스콘 플랜트의 차량 진출입로에 실시하였으며, 표층 5cm 절삭 후 덧씌우기 포장을 실시하였다(Fig. 5). 시험포장에 사용된 바인더는 슬래그 아스팔트 콘크리트용으로 개발된 중온 개질 아스팔트 바인더(WMRA 76-22)를 사용하였으며, 슬래그 골재 70%와 페아스콘 30%를 사용하는 골재 배합을 사용하였다. 시험에 사용된 공시체의 배합설계 결과는 Table 13과 같다.



Fig. 5 Field Trial(13mm)

Table 13. Test Results of Mix Properties for Mix-design (13mm)

Classification	Air voids (%)	VFA (%)	VMA (%)	Stability (N)	Flow (1/10mm)
WMRA 76-22	4.9	76.1	17.4	18,775	36

시험포장 구간은 대형트럭 진출입로로 비산먼지 발생 방지를 위해 상시 살수를 하는 곳으로 통상적으로 2~3년에 한 번씩 재포장이 이루어지는 곳이다. 현재 공용 20개월이 지났으나 균열/소성변형 등 파손은 발생하지 않았으며 매우 양호한 포장 상태를 나타내고 있다.

3.2. 10mm 슬래그 아스팔트 콘크리트 시험 포장

경기 파주시의 국도 77번선 당동 IC 부근에 10mm 밀입도 슬래그 아스팔트 콘크리트 시험 포장을 2016년 10월에 실시하였다(Fig. 6). 배합설계는 Jo et al.(2015)의 슬래그 아스팔트 콘크리트용 10mm 밀입도 배합 기준을 적용하였다. WMRA PG 76-22 등급의 바인더를 사용하였으며, 슬래그 골재 82%, 천연골재 18%를 사용하였다. 슬래그 아스팔트 혼합물의 배합비와 배합설계 결과는 Table 14와 같다.



Fig. 6 Field Trial(10mm)

Table 14. Test Results of Mix Properties for Mix-design (10mm)

Classification	Air voids (%)	VFA (%)	VMA (%)	Stability (N)	Flow (1/10mm)
WMRA 76-22	6.1	71.2	21.3	11,565	41

10mm 슬래그 아스팔트 콘크리트 포장은 박층 포장용으로 3cm 절삭 후 덧씌우기 포장을 실시하였으며, 현재 추적 조사를 계획 중에 있다. 시공 시 골재분리 등의 배합문제는 없었으며 포장면은 양호한 상태였다.

4. 결론

제강슬래그를 아스팔트 혼합물용 골재로 활용하기 위해 제강슬래그의 특성을 반영한 배합설계 방안을 도출하고자 연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

슬래그 골재의 밀도는 화강암 골재를 비롯한 천연골재에 비해 높기 때문에 슬래그 골재를 아스팔트 혼합물용 골재로 사용 시 슬래그 골재의 특성을 반영한 배합설계가 필요하다. 슬래그 골재의 밀도와 흡수율을 고려하여 추정 아스팔트 함량식을 제시하였으며, 순환골재의 경우 특정 사용 비율로 제한되는 경우가 많기 때문에 이를 감안하여 배합설계 시 합성입도 결정을 위한 최소 골재 사용량 산정식을 제시하였다. 제시된 식을 사용하면 목표로 하는 순환골재 사용량에 맞춰 배합설계를 수행할 수 있다.

슬래그 골재와 천연골재의 밀도 차이로 합성입도의 변화가 발생하므로 이를 보정하여 배합설계를 진행하였다. 골재 밀도 차이에 따른 보정을 실시하지 않을 경우 목표 입도와 실제 입도와는 약 3~5%의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 제시된 배합설계 방법에 따라 슬래그 아스팔트 혼합물을 생산하고 시험포장을 실시하였으며, 생산된 혼합물의 시험결과 양호한 것으로 나타났다.

향후 순환 자원의 활성화와 친환경 재료에 대한 수요가 늘 것으로 예상되는 만큼 슬래그 골재를 비롯한 다양한 재료가 아스팔트 혼합물용 골재로 사용될 것이며 골재의 밀도와 흡수율이 천연골재와 차이가 있을 경우 본 연구성과를 바탕으로 배합설계를 진행한다면 보다 안정적인 품질의 아스팔트 혼합물을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류사업인 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구”의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ali N., Chan J.S., Theriault E.G., Papagiannakis A.T., and Bergan A.T. (1991). “SYSCO Electric Arc Furnace Slag As an Asphalt Concrete Aggregate.”, *Proceedings of the 36th Annual of Canadian Technical Asphalt Association, Polyscience Publications, Morin Heights, Quebec, Canada*, pp.26-44.
- Ann H.S. (2016). *A study on Decision making system for steelmaking slag aggregate using the economic evaluation*, Master's Dissertation, Myongji University.
- Asi I.M. (2007). “Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes”, *Building and Environment*, 42, pp.325-329.
- Chaney S.L. (2015). *Optimizing Asphalt Pavement Performance for Climate Zones Within Washington State*, Master's Dissertation, Washington State University, Washington D.C., USA, p.31.
- Chol S.W., Kim V., Chang W.S., Kim E.Y. (2007). “The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries.”, *Magazine of Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.6, pp.28-33.
- 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*, Vol. 35, No. 6, pp.1367-1375.
- Kehagia F. (2009). “Skid Resistance Performance of Asphalt Wearing Courses with Electric Arc Furnace Slag Aggregate”, *Waste Management & Research, The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, ISWA, pp.288-294.
- Kim J.M. (2012). “Present Status on the Manufacturing and Application of Steel Slag Aggregate.”, *Review of Architecture and Building Science*, 56(8), pp.29-36.
- Lee H.J., Jang D.B., Kim H.W., Kim I.T., Kim K.B., Lee J.H. (2017). “Experimental and Numerical Analysis of Warm Mix Asphalt Pavement prepared using Steel Slag and RAP”, *International Journal of Highway Engineering*, Vol.19, No.2, pp.55-65.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). “*Asphalt Mixture Construction Guidelines*.”
- Stroup-Gardiner, M., Wattenberg-Komas T. (2013). *Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications, Slag Byproducts*, Volume 5, NCHRP Synthesis 435, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., USA.