슬래그와 폐주물사를 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형특성에 관한 연구

Evaluation of Rutting Behavior of Hot Mix Asphalt using Slag and Waste Foundry Sand as Asphalt Paving Materials

이 관 호* · 조 재 윤** · 전 주 용***
Lee, Kwan Ho · Cho, Jae Yoon · Jeon, Joo Yong

Abstract

The objective of this research is to evaluate engineering properties of recycled aggregates, slag as coarse & fine aggregate and waste foundry sand(WFS) as fine aggregate, in hot mix asphalt(HMA). In this research, soundness, gradation and particle analysis, abrasion, specific gravity and absorption test were carried out. The optimum asphalt binder content(OAC) for various HMA combinations of recycled aggregate was determined by Marshall Mix Design. The ranges determined is between 7.2% and 7.5%. Indirect tensile test, resilient modulus test, creep test were carried out for characterization of rutting behavior of various combination of HMA. Judging from the limited tests, the HMA with recycled aggregates is not as good rutting resistance as the HMA with common aggregates. After finishing the Wheel tracking test, the application or feasibility for the use of recycled aggregate as asphalt paving material will be determined.

Key words : *slag, waste foundry sand, HMA, OAC, MR, Creep*

요 지

본 연구의 목적은 여러 가지의 폐자원중 슬래그 및 폐주물사의 도로포장용 골재로서의 특성을 평가하고, 이를 이용한 다양한 조합의 재활용 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 평가하는 것이다. 골재특성을 평가하기 위해 입도 및 입형분석, 비중 및 흡수성, 마모저항성, 골재안정성과 같은 시험을 수행하였다. 골재로서의 특성평가 시험 결과 고로슬래그는 비교적 강도 특성이 제강슬래그에 비해 작은 경향을 나타냈다. 마샬배합설계로서 최적 아스팔트 함량이 결정되었고, 그 범위는 7.2%에서 7.5%정도 였다. 재활용 골재를 이용한 조합의 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 평가하기 위해 간접인장강도시험, 회복탄성계수시험, 크리프 시험을 수행하였다. 재활용 골재를 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성이 일반골재를 이용한 아스팔트 혼합물에 비해 다소 떨어지는 경향을 나타내었다. 다만 현재진행중인 휠트래킹 시험 결과가 나오면 재활용 골재를 활용한 아스팔트 혼합물의 소성변형특성을 좀더 구체적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 슬래그, 폐주물사, 가열아스팔트 혼합물, 최적아스팔트 함량, 회복탄성계수, 크리프

* 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 조교수 khlee@ks.ac.kr
** 정회원 · 동의공업대학교 토목과 교수
*** 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 석사과정

1. 서 론

국민 문화 수준의 향상과 경제성장으로 인하여 근래 우리나라의 일반폐기물 배출량은 연 7-9%씩 증가하고 있으나, 그 처리실태는 기초 단계 수준을 벗어나지 못하고 있어 이에 따른 환경오염 문제, 특히 폐기물의 적정처리 및 처분은 심각한 사회문제를 일으키고 있다. 또한 폐기물의 최종 처분지인 매립지 확보, 혐오시설 설치에 대한 NIMBY(Not In My Back Yard)현상 등으로 인한 폐기물 처리가 어려운 실정이므로 폐기물에 대한 근본적인 대책이 어느 때보다 절실히 요구되고 있다(박태순, 이관호, 1997). 더불어 증가하고 있는 골재 수요량에 비해 골재의 공급량은 한정되어 있기 때문에 심각한 골재수급부족 현상이 초래되고 있다.

본 연구에서는 여러 가지의 폐자원중에 슬래그 및 폐주물사의 도로포장용 골재 및 아스팔트 혼합물로서의 각종 공학적 특성치를 평가하여, 도로포장용 골재로서의 활용가능성을 평가하고자 한다. 또한, 본 연구와 관련하여 향후 연구로는 슬래그와 폐주물사를 이용하여 국내 도로포장 파손의 원인인 영구변형 특성을 평가한 후, 도로포장설계 시 소성변형과 관련된 물성치를 제안하고, 이를 바탕으로 소성변형에 저항성이 큰 아스팔트 혼합물의 개발하고자 한다

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 아스팔트

국내에서 보편적으로 이용되고 있는 AP-3와 AP-5중 온화한 기후를 보이는 부산지역을 고려하여 국내 OO사의 AP-5를 선택하여 시험을 실시하였고 특성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of Asphalt Binder

Test	Density	R&B	Ductility	Flash Point	Penetration
Properties	1.034g/㎤	50℃	150cm	358℃	5.6mm

2.2 골재

굵은골재로 제강슬래그 및 고로슬래그를 이용하였고, 잔골재로 폐주물사, 제강슬래그 및 고로슬래그를 이용하였다. 골재의 특성 평가를 위해 입도시험을 수행하였고, 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 굵은 골재 및 잔골재의 비중값은 Table 2와 3에 나타내었고, 골재의 동결융해 특성평가를 위해 Soundness 시험을 수행하였고 이의 결과를 Table 4에 나타내었다. 사용된 모든 골재가 시방기준을 만족하였다. Table 5는 LA마모시험결과이고, 제강슬래그의 마모 저항성이 가장 좋은 것으로 나타났다.

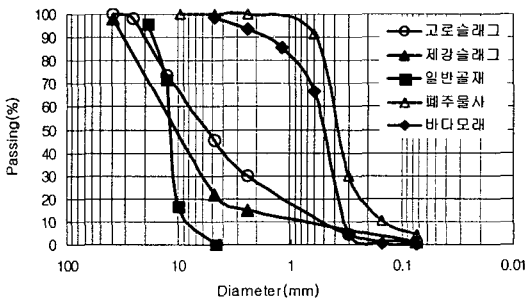

Fig. 1. Gradation of Each Aggregate

Table 2. Specific Gravity of Coarse Aggregate

Type	Bulk S.G.		SSD S.G.		Apparent S.G.		Absorption (%)	
	mean	std.	mean	std.	mean	std	mean	std
Common Agg.	2.556	0.004	2.583	0.001	2.626	0.001	1.04	0.074
Furnace Slag	2.382	0.016	2.517	0.016	2.753	0.020	5.66	0.134
Steel Slag	3.084	0.008	3.184	0.007	3.426	0.012	3.24	0.1
Spec. for Surface	>2.450		-		-		< 3.0	
Spec. for Base Course	-		-		-		< 3.5	

Table 3. Specific Gravity of Fine Aggregate

Type	Bulk S.G.		SSD S.G.		Apparent S.G.		Absorption (%)	
	mean	std.	mean	std.	mean	std.	mean	std.
Common Agg.	2.446	0.017	2.525	0.018	2.620	0.021	2.38	0.020
WFS	2.158	0.018	2.226	0.019	2.316	0.020	3.16	0.016
Furnace Slag	2.474	0.004	2.622	0.003	2.903	0.001	5.96	0.064
Steel Slag	2.951	0.001	3.097	0.0004	3.455	0.002	4.95	0.030

Table 4. Soundness Test

Test Method	Agg.	Coarse Aggregate			Fine Aggregate			
		Common	Furance	Steel	Sea Sand	WFS	Furnace	Steel
$NaSO_4$	test	6.39	8.74	6.66	4.35	-	7.24	5.44
	spec.	< 12.0 %			< 10.0 %			
$MgSO_4$	test	13.18	14.52	12.97	7.48	-	10.17	8.02
	spec.	< 18.0 %			< 15.0 %			

Table 5. The Los Angeles Abrasion Test

Test / Agg. / Type of Agg.	spec. (%)	Common Agg.		Furnace Slag		Steel Slag	
		mean	std.	mean	std.	mean	std.
Common Aggregate	40	22.7	0.29	39.4	0.56	17.4	0.68
HMA Coarse Agg.	35						
Subbase course Agg.	50						

3 배합설계

마샬 시험방법은 ASTM 표준시험법에 채택되어 있고, 시험절차는 ASTM D 1559, "마샬 시험장치를 이용한 역청 혼합물의 소성흐름 저항"으로 규정하고 있다(ASTM, 1994). 본 시험에서는 아스팔트혼합물의 표준배합에서 규정하고 있는 골재 입도인 밀입도 아스팔트 콘크리트(19F)의 입도를 기준으로 하였고 다짐시 양면 50회를 선택하였다. 아스팔트 혼합물 특성평가를 위한 골재배합을 아래와 같이 5개의 조합을 이용하였고, 이중 Mix 1은 일반골재를 이용한 것으로 재활용 골재 혼합물과의 비교를 위해 선정되었다.

- Mix 1 : 일반굵은골재 + 바다모래 + 슬래그분진
- Mix 2 : 제강슬래그 굵은골재 + 제강슬래그 잔골재 + 폐주물사 + 슬래그 분진
- Mix 3 : 제강슬래그 굵은골재 + 바다모래 + 폐주물사 + 슬래그 분진
- Mix 4 : 고로슬래그 굵은골재 + 고로슬래그 잔골재 + 폐주물사 + 슬래그 분진
- Mix 5 : 고로슬래그 굵은골재 + 바다모래 + 폐주물사 + 슬래그 분진

마샬배합설계 및 최적 아스팔트 함량은 Table 6과 7에 나타내었다.

Table 6. Marshall Mix Design

Type of HMA	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Dense-Graded Hot Mix Asphalt (19F)
Compaction, No. of blows/side	50	50	50	50	50	50
Stability (kg)	955	1426	983	1775	1046	minimum 500
Flow (1/100cm)	39	37	30	35	27	20~40
Air Voids (%)	3.65	3.38	3.16	3.48	2.76	3~5
VFA, %	74.67	79.31	75.42	76.26	78.57	75~85

Table 7. Determined Optimum Asphalt Content

Mix No.	1	2	3	4	5
OAC(%)	7.4	7.3	7.2	7.5	7.2

4. 소성변형 특성평가

5가지의 배합종류 별로 간접인장강도, 회복탄성계수, 정적, 동적 크리프 계수를 산출한 결과는 다음과 같다.

Table 8 Indirect Tensile Strength

	Indirect tensile strength (kg/㎠)		
	5℃	25℃	40℃
mix 1	37.56	7.73	2.56
mix 2	36.84	10.12	3.49
mix 3	37.86	8.01	2.69
mix 4	35.20	10.67	4.29
mix 5	35.15	9.64	3.06

Table. 9 Resilient Modulus

	Temperature	Frequency	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
M_{RT} (MPa)	5℃	0.5Hz	4041	4255	3817	3874	3605
		1Hz	4901	5100	4670	4995	4557
	25℃	0.5Hz	575	950	659	877	946
		1Hz	961	1254	1589	1584	1278
	40℃	0.5Hz	262	503	373	593	401
		1Hz	450	632	487	728	576

Table. 11 Dynamic Creep Modulus

Mixture	Creep modulus (Mpa)	unconfined				confined			
		37.8 ℃		54.4 ℃		37.8 ℃		54.4 ℃	
		1.41 kg/㎠	4.23 kg/㎠	0.71 kg/㎠	1.41 kg/㎠	4.23 kg/㎠	8.46 kg/㎠	4.23 kg/㎠	8.46 kg/㎠
Mixing 1	et (3600sec.)	0.009	0.042	0.008	0.016	0.029	0.035	0.040	
	Smix(T,t)	16	10	9	8	14	24	10	
Mixing 2	et (3600sec.)	0.008	0.022	0.006	0.012	0.013	0.021	0.012	
	Smix(T,t)	16	19	12	11	32	39	34	
Mixing 3	et (3600sec.)	0.010	0.050	0.009		0.031			
	Smix(T,t)	13	8	8		14			
Mixing 4	et (3600sec.)	0.008	0.017	0.006	0.007	0.012			
	Smix(T,t)	17	24	12	19	35			
Mixing 5	et (3600sec.)	0.004		0.010					
	Smix(T,t)	32		7					

Table. 12 Static Creep Modulus

Mixture	Creep modulus (Mpa)	unconfined				confined			
		37.8 ℃		54.4 ℃		37.8 ℃		54.4 ℃	
		1.41 kg/㎠	4.23 kg/㎠	0.71 kg/㎠	1.41 kg/㎠	4.23 kg/㎠	8.46 kg/㎠	4.23 kg/㎠	8.46 kg/㎠
Mixing 1	et (3600sec.)	0.009		0.006	0.010	0.012			
	Smix(T,t)	15		911	14	34			
Mixing 2	et (3600sec.)	0.008	0.014	0.008	0.008	0.012	0.018	0.015	
	Smix(T,t)	18	30	9	18	36	45	28	
Mixing 3	et (3600sec.)	0.008		0.004	0.015	0.016			
	Smix(T,t)	18		16	9	25			
Mixing 4	et (3600sec.)	0.006	0.013	0.003	0.006	0.008	0.012	0.006	0.015
	Smix(T,t)	25	32	125	25	55	69	74	54
Mixing 5	et (3600sec.)	0.007	0.018	0.004	0.009	0.017			
	Smix(T,t)	19	23	17	16	25			

Table. 12 Reference for Other Researchers

Researcher	year	Temp.	Loading Time	Stress Level (kPa)	Min Req. Creep Mod.
Viljeon and meadows	1981	40℃	100 min.	207	82.7 MPa
Khedr	1986	40℃	60 min.	207	137.9 MPa
Kronfuss et al.	1984	40℃	60 min.	103	max 45.3
Lee, Kwan Ho	1996	50℃	60 min.	827	70 MPa

연구에서 이용된 재생골재의 경우, 특히, 내구성, 마모 저항성, 동결 융해 및 건습에 대한 저항성이 일반골재에 비해 좋은 것으로 나타났다. 또한, 마샬배합설계를 통한 최적아스팔트 함량이 골재의 조합에 따라 다소 차이는 있지만, 약 7-7.5% 정도로 나타났다. 이는 기존의 일반골재(골재+모래)에 비해 약 1-2%정도 큰 값으로, 사용된 재생골재의 표면 특성과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 또한 간접인장강도, 회복탄성계수, Creep modulus값의 경우 일반적인 값에 비해 약 20~50%정도로 나왔는데 특히, 잔골재의 입형과 골재 맞물림에 의한 특성으로 생각되며 현재 진행중인 Incremental Creep 시험과 Wheel tracking 시험이 완료되면 재활용 골재를 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형특성을 좀더 상세히 파악할 수 있을 것으로 기대한다..

5. 결 론 및 향후 연구과제

슬래그와 폐주물사의 아스팔트 포장용 골재로서의 적부를 판별하기 위한 기본 물성 시험 및 마샬배합설계를 수행하였다. 재생골재로서 슬래그와 폐주물사의 경우 일부 항목에서 현재의 일반골재에 대한 시방기준을 벗어나기는 하나, 재생골재에 대한 전문 시방서가 없는 관계로 발생한 문제로 판단된다. 본

6. 참고문헌

(1) 박태순, 이관호 : 미연방도로국의 폐자원(Waste Material) 활용 실태, 대한토목학회지, 일반기사, pp. 76-86. (1997)

(2) 김재현, 이관호 (2001), "슬래그분진을 이용한 개질 아스팔트의 특성평가", 한국폐기물학회지, 제 18권 3호, pp. 243-248