# 중온화 첨가제를 사용한 중온 재생 아스팔트 혼합물 평가

## Evaluation of Warm-Recycled Asphalt Mixtures using Polyethylene Wax-Based Additive

이진욱	Lee, Jin Wook	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 전임연구원 · 교신저자(E-mail: wooks@kict.re.kr)
이문섭	Lee, Moon Sup	정회원·한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 수석연구원(E-mail:truepath@kict.re.kr)
김용주	Kim, Yong Joo	정회원·한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 수석연구원(E-mail:yongjook@gmail.com)
조동우	Cho, Dong Woo	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 수석연구원(E-mail:dongwoocho@kict.re.kr)
권수안	Kwon, Soo Ahn	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로포장연구실 선임연구위원 (E-mail: sakwon@kict.re.kr)

#### **ABSTRACT**

**PURPOSES:** The main purposes of this study are to examine the influences of polyethylene wax-based WMA additive on the optimum asphalt content of warm-recycled asphalt mixture based on the Marshall mix design and to evaluate performance of warm-recycled asphalt mixture containing 30% RAP with polyethylene wax-based WMA additive.

**METHODS:** Physical and rheological properties of the residual asphalt were evaluated in terms of penetration, softening point, ductility and performance grade (PG) in order to examine the effects of polyethylene wax-based WMA additive on the residual asphalt. Also, To evaluate performance characteristics of the warm-recycled asphalt mixtures using polyethylene wax-based WMA additive along with a control hot-recycled asphalt mixture, indirect tensile strength test, modified Lottman test, dynamic immersion test, wheel tracking test and dynamic modulus test were conduced in the laboratory.

**RESULTS:** Based on the limited laboratory test results, polyethylene wax-based WMA additive is effective to decrease mixing and compacting temperatures without compromising the volumetric characteristics of warm-recycled asphalt mixtures compared to hot-recycled asphalt mixture. Also, it doesn't affect the optimum asphalt content on recycled-asphalt mixture. All performance test results show that the performance of warm-recycled asphalt mixture using polyethylene wax-based WMA additive is similar to that of a control hot-recycled asphalt mixture.

**CONCLUSIONS:** Overall, the performance of warm-recycled asphalt mixture using polyethylene wax-based WMA additive is comparable to hot-recycled asphalt mixture.

#### Keywords

recycling, warm-mix asphalt, polyethylene wax-based WMA additive, optimum asphalt content

Corresponding Author: Lee, Jin Wook, Researcher Korea Institute of Construction Technology, (Daehwa-Dong) 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

Tel: 82.31.995.0860 Fax: +82.31.910.0161

E-mail: wooks@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering http://www.ijhe.or.kr/

ISSN 1738-7159 (Print) ISSN 2287-3678 (Online)

#### 1. 서론

우리나라의 폐아스팔트 콘크리트 발생량은 주거환경 개선, 재건축 등 건설공사의 수요 증가로 인해 매년 많 은 양이 증가하고 있으며, 『2009 전국폐기물발생 및 통 계』에 의하면 2005년 5백6십만 톤/년에서 2009년에는 1천2백만 톤/년으로 증가하였고 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상되고 있다. 또한, 폐아스팔트 콘크리트는 원유절감 및 천연골재를 대체할 수 있는 소중한 자원이고,

선진외국에서도 재생아스콘 생산원료 등 고부가가치의 재료로서 재활용되고 있음에도 불구하고 국내에서는 지금까지 대부분이 건설공사장에서 단순히 성·복토용으로 사용되어 토양오염 등 2차 환경오염을 유발하였다.

또한, 지구 온난화, 에너지 가격 상승, 온실가스 감축, 그리고 다양한 환경규제 때문에 세계적으로도 저탄소 중온 아스팔트에 관한 관심은 높아지고 있다. 현재 대부 분의 아스팔트 포장에 사용되는 가열 아스팔트 혼합물 은 석유 에너지를 다량으로 소비하는 높은 온도 (160~170℃)에서 생산되고 있으며, 또한 생산 시에 따 라 다양한 환경오염을 유발하는 온실가스를 배출한다. 가열 아스팔트 혼합물 생산에서 발생하는 이러한 문제 점들을 해결하기 위해 1996년 유럽은 처음으로 중온 아스팔트 기술을 도입했다. 중온 아스팔트 혼합물은 일 반적으로 가열 아스팔트 혼합물보다 약 30~50℃ 낮은 온도에서 생산되면서도 가열 아스팔트 혼합물과 유사 한 성능을 가진다. 중온 아스팔트 혼합물은 생산 및 다 짐 온도를 낮추어 에너지 소비를 줄이고 공장에서의 가 스 배출과 악취를 줄이는 다양한 환경적 장점을 가지고 있다. 2002년 미국은 유럽에서 중온 아스팔트 혼합물 기술을 도입하여 2008년에 중온 아스팔트 기술을 표 준화하기 위한 연구를 시작했다. 추가적으로 미국의 국 립 아스팔트 기술 연구원(NCAT)은 중온 아스팔트 혼 합물의 품질과 성능을 검증하기 위한 인증과정을 개발 하였다.

본 연구에서는 이러한 시대적 흐름에 맞추어 재생 아 스팔트 혼합물에 중온화 첨가제를 사용하여 중온화 첨 가제가 중온 재생 아스팔트와 혼합물에 미치는 영향을 평가하였다.

#### 2. 중온화 첨가제의 재생 아스팔트 적용사례

전 세계적으로 재활용 아스팔트 혼합물에 중온화 첨가제를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 김남호 (2010) 등은 RAP 20%와 30%, 준고온 아스팔트 첨가제(Sasobit, Evotherm), 그리고 LD(low-density polyethylene)을 복합적으로 사용한 준고온 재생 아스팔트 혼합물의 성능을 평가하였다. 변형강도는 재생 혼합물이 신규 혼합물보다 큰 값을 나타내었고, 재생 혼합물간에서는 RAP 20%보다 30%가 더 큰 값을 보여주었다. 간접인장강도(ITS)도 변형강도 결과와 비슷한 경향을 보여주었으며, LD 첨가 시 대부분의 혼합물에서 향상된 성능을 보여주었다. 수분민감성 시험에서도 준고

온 재생 아스팔트 혼합물이 신규 아스팔트 혼합물보다 높은 TSR 값을 보여주었다. Ramon Bonaquist (2011)는 중온 아스팔트의 배합설계에 RAP을 사용한 배합설계를 포함하는 AASHTO R35 초안인 "Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt (WMA)" 개발에 관한 연구를 수 행하였다. 중온 아스팔트 혼합물의 양생시간에 따른 성 능변화 결과로 인하여 단기노화와 양생시간 모두를 만 족하는 시간으로 2시간 오븐가열을 제안하였으며, 기본 적으로 가열 아스팔트와 중온 아스팔트의 부피특성은 매우 유사한 것으로 나타났다. 피로균열 저항성도 매우 유사한 것으로 평가되었다. Zhanping You(2011) 중온 아스팔트 첨가제 Sasobit, RAP(50%, 100%), RAS, 그 리고 Bioasphalt를 적용한 재료의 저온 특성을 평가하 기 위해 BBR과 ABCD(Asphalt Binder Cracking Device)를 사용한 연구를 수행하였다. Sasobit 중온화 첨가제를 적용할 때 적정량 이상을 사용하면 저온물성 을 저하시키는 것으로 나타났다. RAP 50%를 사용한 아스팔트 바인더의 BBR 시험결과는 Superpave 기준 을 만족하지 못하였으며, Biobinder는 아스팔트의 저 온물성 개선에 효과를 보여주었다. Jesse D. Doyle (2011)와 Geo-Frontiers(2011)는 0%, 50%, 100%의 RAP을 사용한 재생 아스팔트 혼합물의 미끄럼저항성 을 평가하기 위하여 재생 아스팔트 혼합물에 중온화 첨 가제를 사용하여 116℃에서 공시체를 제작하였다. RAP 을 사용한 중온 재활용 아스팔트 혼합물도 만족할만한 미끄럼저항성을 나타내는 것으로 확인하였다. Qazi Aurangzeb(2011)는 Bailey 방법을 사용한 배합설계로 RAP사용량 0%, 30%, 40% 50%의 TSR 시험을 수행 하였으며, RAP사용량이 증가할수록 TSR 값이 증가하 는 것으로 나타났다. 또한, 햄버거 휠트랙킹 시험에서는 Evotherm 중온화 첨가제와 Foamed 중온 아스팔트를 사용한 재생 아스팔트 혼합물의 소성변형이 가장 큰 것 으로 나타났다.

## 3. 재료 및 방법

중온화 첨가제를 첨가한 재생 아스팔트 혼합물의 성능을 평가하기 위하여 기본적인 아스팔트 바인더 시험은 침입도 시험(KS M 2252), 연화점 시험(KS M 2250), 신도 시험(KS M 2254), 회전점도 시험(KS F 2392) 및 PG 공용성 시험(KS F 2393, KS F 2390, KS F 2259, KS F 2391)을 수행하여 평가하였다. 또한, 아스팔트 혼합물 공용성 평가를 위하여 배합설계

(KS F 2337)를 수행하여 간접인장강도(KS F 2382). TSR 시험(AASHTO T 283). 동적수침시험(EN 12697-11), 휠트래킹 시험(KS F 2374), 동탄성계수 시 험(AASHTO TP62-03)을 수행하였다.

## 3.1. 중온화 첨가제

가열 재생 아스팔트 혼합물보다 20℃ 낮은 온도에서 중온 재생 아스팔트 혼합물을 생산하기 위해 접착 증진제 를 포함하고 있는 새로운 폴리에틸렌 왁스형 중온화 첨가 제를 선택하였다. 본 논문에서 사용한 중온화 첨가제는 Fig. 1에서 볼 수 있으며, LC라고 명하였다. 중온화 첨가 제 LC는 낮은 온도에서 왁스가 결정화되는 것을 조절하 는 결정화 조절제와 골재와 아스팔트 사이에서 접착을 도 와주는 접착 증진제를 포함하고 있다. 접착 증진제 분자 의 한쪽은 골재 친화성을 가지고 있고 다른 한쪽은 아스 팔트 친화성을 가지고 있다. 그래서 접착 증진제의 사용 에 의해 아스팔트와 골재의 접착성을 높여 수분침투를 억 제할 수 있을 만큼 완전하게 피복시켜주는 효과를 준다.





Fig. 1 Wax-based WMA Additive

#### 3.2. 순환 및 신규 골재

순환골재는 재활용 아스팔트 포장의 품질과 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 그러므로 도로포장 연구자들과 기술자들은 순환골재의 물성에 대한 완전한 이해가 필 요하다. 순환골재를 사용하여 재활용 아스팔트 혼합물

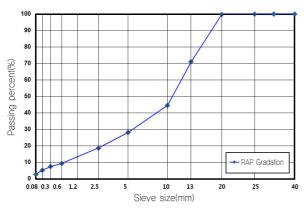


Fig. 2 Plots of Design Gradation for Warm-and Hot-Recycled Asphalt Mixtures

을 제조할 경우에 혼합물의 성능은 순환골재에 구 아스 팔트의 실제 특성에 의해 좌우된다. 따라서. 순환골재에 서 추출된 회수 아스팔트의 기본 물성을 평가하여 기준 값에 부합되는지 확인 후 연구에 적용하였으며, 사용된 순환골재의 입도는 Fig. 2와 같다.

또한, 신규 골재도 품질에 따른 아스팔트 혼합물의 영 향이 크므로, 골재의 영향을 최소화하기 위하여 편장석 (flat and elongated particles) 비율이 낮은 1등급 골 재를 선정하였다. Table 1은 선정된 골재의 물리적 성 질을 보여 주고 있다. 굵은골재 최대치수를 19mm와 13mm에 잔골재, 채움재와 혼합하여 각각 밀입도 규격 에 적합한 입도로 조정하여 실험을 수행하였다.

Table 1. Property of Aggregate

Clas	sification	Apparent specific gravity		Abrastion	Flat and elongated particles
Specif	ication limit	≥ 2.5	≤ 3.0%	≤ 40%	≤ 10%
Granite	Coarse Aggregate	2.743	0.84		
Granile	Fine Aggregate	2.730	1.8	-	_
Mine	eral filler	2.696	-	-	_

### 3.3. 시험방법

먼저, 수집한 순환골재로부터 잔류 아스팔트 함량을 결정하기 위해 전동식 원심분리기를 이용하는 "KS F 2354. 아스팔트 포장용 혼합물의 아스팔트 함유량 시험 방법』으로 순환골재의 아스팔트 함량을 측정한 결과 약 4.2%의 아스팔트 함량이 순환골재에 잔류하고 있는 것 으로 나타났으며, 이는 순환골재 품질기준인 3.8%를 만 족하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Table 2에 정

Table 2. Mixture Description

Type	Combination (%)								
Туре	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V				
HMA	100%	0.0%	25.2%*	25.2%*	25.2%*				
AP-3	0.0%	100%	74.8%	73.3%	71.8%				
WMA additive(LC)	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	3.0%				
SUM	100%	100%	100%	100%	100%				
Mix Name	RAP 100%	Virgin Asphalt 100%	LC 0%	LC 1.5%	LC 3.0%				

<sup>\* 2.25%</sup> of residual asphalt was selected to simulate a combination of 30%:70% (RAP material : virgin aggregate)

리한 것과 같이 순환골재에서 추출한 재생아스팔트 (Case I). 일반적으로 재생아스팔트 포장에 사용하는 AP-3 스트레이트 아스팔트(Case II), 재생아스팔트 +AP3(Case III). 재생아스팔트+AP3+1.5% 중온화 첨 가제(Case V), 재생아스팔트+AP3+3.0% 중온화 첨가 제(Case VI)에 대하여 아스팔트 바인더 시험을 각각 수 행하여 결과를 비교하였다. 순환골재 함량 30%는 일반 적으로 현장에서 가장 많이 사용되는 비율로 결정하여 적용하였다.

Table 2에 정리한 5가지의 경우 대하여 Fig. 3과 같 이 다양한 아스팔트 시험을 KS 규격에 따라 각각 실시 하였으며 중온화 첨가제(함량)가 재생아스팔트에 미치 는 물리적·유변학적 특성을 비교·분석하였다. Fig. 3에 서 볼 수 있듯이 일반적으로 사용하는 아스팔트 물리적 특성 평가 실험으로 침입도 시험, 연화점 시험, 신도 시 험, 회전점도 시험을 수행하였으며 온도와 하중변화, 노 화특성에 따른 아스팔트의 유변학적 특성을 평가하기 위해 공용성 (PG) 시험을 함께 수행하였다

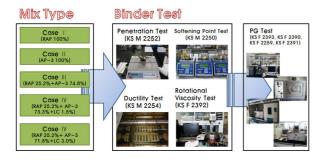


Fig. 3 Recycled Warm Mix Asphalt Binder Test Process

중온 재생 아스팔트 혼합물의 공용성을 평가하기 위 해 Fig. 5와 같이 다양한 실험을 시행하였다. 그림에서 보듯이 가열 재생 아스팔트 혼합물(이하 HRAP)와 중온 화 첨가제가 첨가된 중온 재생 아스팔트 혼합물 (WRAP)의 기초적인 성능 실험을 위해 2009년 국토해 양부에서 제정된 「가열 아스팔트 혼합물의 생산 및 시 공 지침,의 표층용 WC-3 기준에 따라 골재 합성입도 를 Fig. 4과 같이 선정하여 배합설계를 수행하였다. 가 열 및 중온 재생 아스팔트 혼합물 모두 마샬 다짐기를 이용하였으며 다짐횟수를 중교통도로 포장의 기준인 75회로 결정하였다.

또한, HRAP 및 WRAP의 혼합온도는 각각 155±3 °C. 130±3°C. 그리고 다짐온도는 각각 135±3°C. 115 ±3℃에서 수행되었으며 이때 WRAP는 중온화 첨가제 를 아스팔트 바인더 함량의 1.5%와 3.0%(무게비)로 치

환하여 사용하였다. 그리고 각각의 혼합물들을 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 아스팔트 혼합물의 공용성을 평가하 기 위하여 배합설계(KS F 2337)를 수행하여 간접인장 강도(KS F 2382), TSR 시험(AASHTO T 283), 동적 수침시험(EN 12697-11), 휠트래킹 시험(KS F 2374), 동탄성계수 시험(AASHTO TP62-03)을 수행하였다.

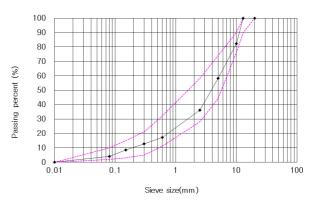


Fig. 4 Aggregate Gradation Chart for Dense-Grade 19mm Asphalt Mixtures

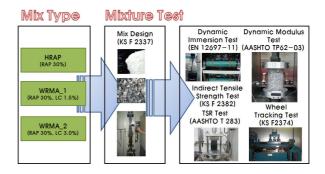


Fig. 5 Recycled Warm Mix Asphalt Mixture Test Process

## 4. 결과분석

#### 4.1. 침입도 시험

Table 3은 각 시료 조합의 침입도 시험결과를 보여주 고 있다. 국내 순환골재 사용지침에 의하면 구 아스팔트 바인더 사용을 위한 침입도 품질시험 기준은 20 이상이 되어야 한다. 하지만 본 연구는 포르투갈과의 공동연구 로써 비교 대상인 포르투갈의 순환골재의 침입도가 20 이 넘지 않는 결과를 보여주었다. 따라서 향후 포르투갈 과 연구 내용을 비교하기 위해서는 유사한 재료를 사용 해야 하므로 연구를 진행하기로 결정하였다. 또한, 재생 아스팔트 바인더의 국내 침입도 품질시험 기준은 40~60이며, LC 0%~3.0%까지 첨가한 아스팔트 바인 더의 침입도 시험결과를 살펴보면 모두 기준안에 만족 하는 것으로 나타났다.

Table 3. Penetration Test Results

Combination	Testing No.				
Combination	Individual	Average			
	10.0				
RAP 100%	11.0	11			
	11.1				
V.C. and a American	73.0				
Virgin Asphalt 100%	73.0	73			
	73.1				
	44.0				
LC 0%	44.0	44			
	44.1				
	48.2				
LC 1.5%	48.2	48			
	48.3				
	49.7				
LC 3.0%	49.9	50			
	50.1				

#### 4.2. 연화점 시험

Table 4는 각 시료 조합의 연화점 시험결과를 보여주 고 있으며, 재생 아스팔트 바인더의 국내 연화점 품질시 험 기준은 47~55이다. Table 4의 결과에서 보면 LC 0%와 1.5%는 품질기준을 만족하는 것으로 나타났으며. 두 바인더의 차이는 없는 것으로 나타났다. 하지만 LC 3.0%는 품질기준보다 높은 값을 보여 주었다.

Table 4. Softening Point Test Results

Combination	Testing No.				
Combination	Individual	Average			
RAP 100%	70.4℃	70.6℃			
RAP 100%	70.8℃	70.6C			
Virgin Asphalt	50.4℃	50.1℃			
100%	49.7℃	50.10			
LC 0%	54.3℃	54.2℃			
LC 0%	54.1°C	54.2 C			
LC 1.5%	54.6℃	54.1℃			
LC 1.5 %	53.6℃	34.10			
LC 3.0%	57.2℃	E7.4°0			
LC 3.0%	57.6℃	57.4℃			

#### 4.3. 신도 시험

Table 5는 각 시료의 신도 시험 결과를 정리하였으며. 재활용 아스팔트 바인더의 국내 신도 품질시험 기준은 10 이상이다. Table 5의 결과에서 보면 LC 0%에서 LC 3.0% 까지 LC를 적용한 모든 WRAP 시료의 신도는 모두 10을 넘겨 국내 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5. Ductility Test Results

Combination	Tes	ting No.
Combination	Individual	Average
	3.0	
RAP 100%	3.0	3.1
	3.2	
	140	
Virgin Asphalt 100%	140	140
10070	140	
	14.0	
LC 0%	14.4	14.9
	16.4	
	22.0	
LC 1.5%	21.0	21.0
	22.0	
	22.0	
LC 3.0%	23.0	23.1
	24.2	

#### 4.4. 공용성 등급 시험

수퍼페이브 공용등급에 사용하는 시험 중에 회전 점 도 시험은 ASTM D 4402 시험방법. 동적 전단 유동시 험은 ASTM D 7175 시험방법, 그리고 BBR 시험은 ASTM D 6648 시험방법에 의해 수행하였다. Table 6 은 각 시료 조합의 수퍼페이브 공용등급 시험 결과를 정 리하였으며, LC의 사용량을 늘이면 고온등급이 증가하 는 경향을 확인할 수 있었다.

Table 6. Superpave Binder Test Results

		Combination						
Testing Method	Temp.	RAP 100%	Virgin Asphalt 100%	LC 0%	LC 1.5%	LC 3.0%		
	115℃	13,875.00	1,179.17	1,720.83	1,358.17	1,445.83		
	125℃	6,241.67	662.50	950.00	787.50	820.83		
Vicescity	135℃	3,114.29	400.00	554.17	466.67	491.67		
Viscosity	145℃	1,695.15	192.50	335.00	290.00	295.00		
	155℃	1,011.54	165.00	217.50	187.50	195.00		
	165℃	646.15	112.50	145.00	127.50	132.50		
DSR	58℃	65.84	2,393	6.67	4.11	5.592		
(G*/sinδ ≥1.0 kPa)	64℃	25.150	1.085	2.223	2.15	3.069		
	70℃	13.960	0.530	1.060	1.045	1.629		

⟨Table Continued⟩

	76℃	5.6	331	0.2	270	0.5	521	0.5	49	0.8	372
	82℃	2.7	'89	0.1	55	0.2	261	0.3	00	0.4	471
	RTFO aged										
	58℃	137.	000	5.2	80	10.	110	10.	110	11.9	910
DSR	64℃	77.0	670	2.2	273	4.0	)14	3.9	58	6.0	)68
(G*/sin∂	70℃	32.	910	1.067		1.772		1.8	83	2.9	979
≥2.2 kPa)	76℃	13.	150	0.5	53	0.8	387	0.9	907	1.4	53
	82℃	6.4	143	0.2	277	0.4	135	0.4	168	0.7	718
			РΑ	V aç	ged						
	31℃	11,7	800	1,73	7.00	1,38	6.00	1,65	1.00	1,41	6.00
DSR (G*sinð	28℃	17,0	010	2,53	6.00	2,18	5.00	2,53	7.00	2,24	3.00
(G Sirio ≤5MPa)	25℃	23,	140	3,86	9.00	3,50	4.00	3,95	1.00	3,62	4.00
	22°C	31,	170	5,87	1.00	5,58	9.00	5,99	8.00	5,62	6.00
BBR		S	m	S	m	S	m	S	m	S	m
(S(300, m>0.3)	-6℃	367.3	0.215	116.5	0.374	105.6	0.364	116.9	0.37	94.0	0.353
	-12℃	831,3	0.214	298,2	0.299	233.9	0,299	267.2	0.30	253.5	0.280
PG		PG 8	PG 82-12 PG 64-18		PG 6	64–18	PG 6	64–18	PG 7	70–18	

#### 4.5. 배합설계 결과

배합설계는 표층 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물 기준 으로 순환골재 30%와 신골재 70%를 사용하여 Marshall 배합설계 방법을 사용하였다. 그리고 Marshall 배합설계법을 통해 WRAP와 HRAP의 최적 아스팔트 함량을 결정하였다.

Table 7에서 보듯이 Marshall 배합설계로 수행된 본 결과에 의하면 중온화 첨가제 LC는 HRAP와 비교해 볼 때 다짐 특성에 영향을 주지 않고 혼합 및 다짐 온도 를 떨어뜨릴 수 있는 것으로 나타났다.

Table 7. Mix Design Result of Hot-Recycled Asphalt Mixture

	Asphalt	Mix Desig	Design Characteristics				
	Content (%)	Air Void (%)	VMA (%)	VFA (%)			
HRAP	5.1%	4.0	14.5	72.7			
WRAP (LC 1.5%)	5.2%	4.0	14.7	72.8			
WRAP (LC 3.0%)	5.1%	4.0	14.6	72.6			

#### 4.6. 간접인장강도 시험

하중의 응력 분포가 일정하게 되게 하려면 일정폭의 곡 률을 갖는 재하대가 사용되는데, 직경이 101.6mm인 공 시체를 사용할 경우에는 폭이 12.7mm인 재하대를 사용 하며, 직경이 152.4mm인 공시체를 사용할 경우에는 폭 이 19.1mm인 재하대를 사용한다. Fig. 6은 간접인장강 도 시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 간접인 장강도의 국내 품질기준은 0.8 이상이며, 가열 재생 아스 팔트와 LC 1.5%는 기준값을 만족하는 것으로 나타났다.

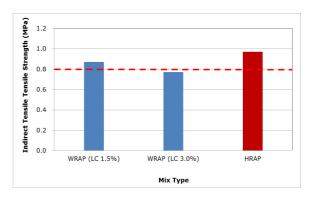


Fig. 6 Comparisons of Indirect Tensile Strength for Warm-and Hot-Recycled Asphalt Mixtures

## 4.7. 수분민감성 시험

혼합물의 수분 민감도 평가를 위해 AASHTO T 283 실험 방법에 따라 인장강도 비(Tensile Strength Ratio ; TSR) 시험을 수행하였다. 각 혼합물별 총 4개 의 공시체를 제작하였으며, 이때의 공극률은 7.0± 0.5%로 결정하였다. 여기서, 2개의 공시체는 수분처리 전 공시체로 기준 공시체로 적용되었으며 나머지 2개의 공시체는 수분처리 후 공시체로 적용되었다. 기준 공시 체는 25℃ 수조에 지퍼 백을 이용하여 수분이 침투되지 않도록 하여 약 2시간 동안 양생을 한 후 간접인장강도 시험을 수행하였다. 반면 수분처리 후 공시체는 부분 포 화도가 70~80%가 되도록 진공 압력을 가하여 강제 포 화를 시킨 후 동결 없이 60±1℃에서 24시간 동안 수침 시킨 후 다시 25℃ 수조에서 약 2시간 동안 양생하고 간접인장강도 시험을 수행하였다. 이때, 중요한 요소로 서는 2그룹(수분처리 전/후 공시체 그룹)의 평균 공극률

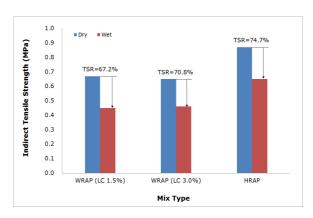


Fig. 7 Comparisons of Average Indirect Tensile Strength Values and TSR Values at Dry and Wet Conditions for Warm-and Hot-Recycled Asphalt Mixtures

을 유사하게 적용해야 인장강도 비의 신뢰성을 확보할 수 있다. Fig. 7은 수분민감성 시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 가열 재생 아스팔트 혼합물은 품질 기준값 0.75를 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 LC를 첨가한 중온 재생 아스팔트 혼합물은 기준값을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

## 4.8. 동적수침 시험

동적수침시험(DIT)은 다져지지 않은 혼합물의 박리 저항성을 평가하기 위한 시험으로 European Standard EN 12697-11에 따라 수행되었다. 아스팔트로 피복된 골재는 상온에서 24시간 동안 거치된 후 250mL 유리병에 100mL의 증류수를 넣고 피복된 골재 115g을 넣은 후 25℃에서 24시간 동안 40rpm으로 회전시킨다. 시험이완료된 후에 골재는 24시간 동안 60℃ 오븐에서 건조시킨 후 초기 무게와 시험 후 무게를 측정한다. 박리 저항성은 골재 입자를 육안으로 조사하고 무게비를 통한 피막 정도를 비율 계산한다. Fig. 8과 같이 중온화 첨가제 LC가 첨가된 혼합물은 박리가 거의 발생하지 않았으며, 가열 재생 아스팔트 혼합물 역시 박리가 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 육안 조사 결과에서도 손실률이 모든 혼합물에서 손실률이 거의 없는 것으로 나타났다.

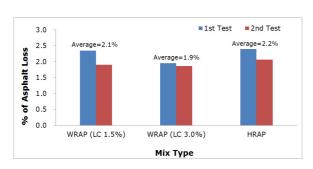


Fig. 8 Percentage of Weight Loss of Asphalt after Dynamic Immersion Test

## 4.9. 휠트래킹 시험

아스팔트 포장 표면 위를 통행하는 차륜으로 재하되는 포장체 내의 응력 상태는 매우 복잡하므로, 이를 아스팔트 혼합물의 시편에 대해 실내 시험으로 정확히 재현시키기는 거의 불가능하여, 외국의 경우에는 주로 다른 재료에 대한 거동의 상대적 비교를 위해 포장가속시험기(APT)를 통한 모사 시험을 사용하고 있다. 실내 시험인 휠트랙킹 시험은 동적 반복 크리이프 시험의 일종으로, 영국의 도로교통유수연구소(TRRL)에서 개발되

었으며, 실제 도로가 고온 환경 조건일 때 중차량 주행으로 인한 소성 변형이나 니딩 작용을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하는데 사용된다.

Fig. 9는 휠트래킹 시험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 RD는 모든 혼합물에서 동일한 값을 나타내었으며, 동적안정도는 기준값 750 이상 보다 3배 이상 높은 값을 보여주었다. LC 1.5%는 큰 차이는 아니지만, 가열 재생 아스팔트 혼합물보다 높은 값을 보여주고 있다.

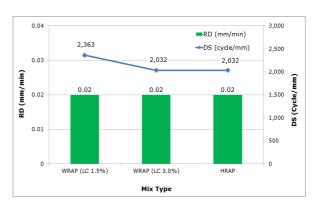


Fig. 9 Wheel Tracking Test Results of Warm-and Hot-Recycled Asphalt Mixtures

#### 4.10. 동탄성계수 시험

본 연구에서 사용된 HRAP와 LC 1.5%, 3.0%를 첨가한 WRAP에 대한 선형 동탄성 마스터 곡선 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 세미-로그 스케일의 동탄성계수 마스터 곡선은 빠른 하중 속도와 겨울철 아스팔트 재료의 선형 점탄성 특성 (그래프 오른쪽 상단)을 더 자세히 볼 수 있다.

동탄성계수의 마스터곡선 로그-로그 스케일은 아스 팔트 혼합물의 느린 교통 하중 속도와 고온에서의 선형 점탄성 특성 (그래프 왼쪽 하단)을 나타낸다. 그림에서 보듯이 낮은 감쇠 빈도에서는 수분 민감성에 변화가 없으나, LC 3.0%에서는 다른 혼합물보다 큰 변화를 보여주었다.

동탄성계수 실험을 통해 얻을 수 있는 위상각의 차이도 선형점탄성의 특성을 확인할 수 있는 좋은 방법이다. 모든 혼합물들의 위상각을 세미-로그 그래프로 나타내었다. 높은 감쇠 빈도 (저온, 빠른 교통 하중 속도)의 경우 LC 3.0% 혼합물에서 탄성적 변화가 있음을 보였고나머지 혼합물의 경우 탄성적 특성에 대한 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

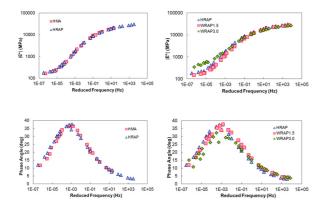


Fig. 10 Dynamic Modulus Test Results

## 4.11. 중온화 첨가제 최적 비율 결정

Table 8은 중온화 첨가제 LC 1.5%와 3.0%를 사용한 중온 아스팔트 바인더 및 혼합물의 모든 시험 결과를 보 여주고 있다. Table 8에서 보듯이 중온화 첨가제 3.0% 를 사용한 중온 재생 아스팔트 바인더의 물리적 특성은 1.5%를 사용한 것 보다 조금 높게 나타났다. 그리고 최 적 아스팔트 함량은 1.5%와 3.0%에서 각각 5.2%와 5.1%로 유사하게 나타났다. 최적 아스팔트 함량의 0.1%의 차이는 배합설계에서 발생하는 외적 요인 및 분 석에 따라서 동일한 함량으로 볼 수 있는 차이이다.

아스팔트 혼합물 공용성 시험에서는 1.5%의 간접인 장 강도와 동적 안정도는 3.0%보다 더 높은 값을 보여 준 반면에 TSR과 아스팔트 손실률은 3.0%가 더 낮은 값을 보여주었다. 즉. 전체적으로 1.5%와 3.0%는 거의

Table 8. Comparsons of Warm-Recycled Asphalt Binders and Mixtures Using 1.5% LEADCAP and 3.0% LEADCAP

	LC 1.5%		LC 3.0%
Binder Test			
Penetration	48	<	50
Softening Point	54.1℃	<	57.4℃
Ductility	21	<	23.1
PG Grade	PG 64(66)-18	<	PG 70-18
Mix Design			
Optimum AC	5.2%	=	5.1%
Mix Performance			
Indirect Tensile Strength Tensile Strength Ratio % of Asphalt Loss Dynamic Stability Dynamic Modulus	0.87MPa 67.2% 2.1% 2,363 -	> < < >	0.77MPa 70.8 1.9% 2,032 -

차이가 없는 것으로 나타났다. 그러므로 재료비용을 고 려하여 아스팔트 무게에 중온화 첨가제 1.5%를 사용하 는 것이 가장 좋을 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 국내에서 사용하는 순환골재에 중온화 첨 가제 LC를 적용하여 생산한 중온 재생 아스팔트와 아스 팔트 혼합물을 평가하는 내용을 다루고 있다. 이를 위하 여 아스팔트의 물리적 특성 및 유변학적 물성을 통해 중 온화 첨가제가 재생 아스팔트의 재료적 성능과 물리적 성능 개선에 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한, 소 성변형, 균열, 강성, 박리, 그리고 수분 민감성 등의 재 생 아스팔트 혼합물 물성 관련 시험을 통해 중온화 첨가 제가 순화골재 30%를 함유한 중온 재생 아스팔트 혼합 물의 성능을 평가한 결과 가열 재생 아스팔트 혼합물과 유사한 결과를 나타내었다.

- 1. 도로포장 분야에서는 중온 및 재생 아스팔트 포장 사 용을 정책적으로 유도하고 있으며 실용화와 활성화 가 급속하게 이루어지고 있다.
- 2. LC 중온화 첨가제는 아스팔트의 물리적 특성에는 큰 변화를 주지 않지만, 공용성 등급에서는 중온화 첨가 제 LC 함량이 증가할수록 고온특성을 향상시켜주는 것으로 나타났다.
- 3. 30% 순환골재를 사용하는 재활용 아스팔트 포장에 중온화 첨가제 LC을 적용할 경우, 중온 재생 아스팔 트 품질 확보를 위해서 재생 아스팔트의 점도 또는 공용등급 평가 후 이에 적합한 점도의 신 아스팔트를 사용해야 할 것으로 판단된다.
- 4. 가열 및 중온 재생 아스팔트 혼합물의 마샬 배합설계 결과. 각각의 최적아스팔트 함량에는 변화가 없는 것 으로 나타나 가열 재생 아스팔트 혼합물보다 낮은 온 도에서 중온화 첨가제가 중온 아스팔트 혼합물의 다 짐밀도를 확보할 수 있도록 도와주는 것으로 평가되 었다.
- 5. 가열 및 중온 재생 아스팔트 혼합물의 성능시험을 통 하여 중온화 첨가제 LC가 재생 중온 아스팔트 혼합 물의 성능에 미치는 영향을 평가한 결과 가열 재생 아스팔트 혼합물과 거의 유사하거나 일부 실내 시험 에서 약간 낮은 성능을 보여주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 '저비용 저탄 소 아스팔트 포장 공법 개발'의 연구 수행 결과입니다.

### References

국토해양부, 2009, "가열아스팔트 혼합물의 생산 및 시공지침"

- Kim. N. H., Kim, J. C., Hong, J. P., Kim, K. W., 2010, Evaluation of Fundamental Properties of Warm-mix Recycled Asphalt Concretes, Journal of the Korean Society Road Engineers, Vol. 12, No. 4, pp. 111~120.
- Ramon Bonaquist, NCHRP Report 691(2011), "Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt", Transportation Research Board

- Zhanping You et. al., (2011) ", Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS and Bioasphalt", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE
- Jesse D. Doyleet. al., (2011), Geo-Frontiers (2011), "Laboratory Assessment of Skid Resistance for Hig RAP Content Warm Mixed Asphalt", ASCE
- Qazi Aurangzeb, (2011), "Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt and Asphalt Mixtures with Recycled Materials", T& DI Congress 2011, ASCE

(접수일: 2013. 4. 22 / 심사일: 2013. 4. 23 / 심사완료일: 2013. 6. 26)