

# 중온아스팔트 혼합물의 현장 적용성 및 실내 공용성 평가

## A Study on Field Application and Laboratory Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt

<p>양성린 Yang, Sung-Lin          백철민 Baek, Cheolmin          정규동 Jeong, Kyu Dong          김영민 Kim, Yeong Min          김용주 Kim, Yong Joo          황성도 Hwang, Sung Do</p>	<p>정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : siyang@kict.re.kr)          정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 교신저자 (E-mail : cmbaek@kict.re.kr)          정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : kdjeong@kict.re.kr)          정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : choozang@kict.re.kr)          정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 (E-mail : yongjook@kict.re.kr)          정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)</p>
---	---

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study evaluated the field applicability and laboratory performance of warm-mix asphalt (WMA) as an alternative technology in asphalt pavement.

**METHODS :** The pilot road using two different types of WMA mixture and one HMA mixture was constructed in Waegwan-Seokjeok road construction site and the mixtures were sampled at the asphalt plant for laboratory testings. The field applicability was assessed in environmental aspects, such as CO<sub>2</sub> emission, and in aspects of constructibility using the existing equipment and procedure, i.e., thickness and density measurement. The laboratory testings included the moisture susceptibility test by AASHTO T283, dynamic modulus test, triaxial repeated load permanent deformation test, and the fatigue test.

**RESULTS :** The temperatures for production and compaction of WMA were 20~30°C lower than those for HMA and therefore, the noxious gas emission were significantly reduced. The field density of WMA pavements was similar or better than that of HMA pavement. From the laboratory testings, it was found that WMA mixtures exhibit comparable performance to HMA mixture in moisture susceptibility, permanent deformation, and fatigue performance.

**CONCLUSIONS :** With these results, it would be concluded that WMA could replace the existing HMA technology without any significant issue. To support this conclusion, it is necessary to track the long-term performance of WMA in pilot road.

### Keywords

*warm-mix asphalt, field application, laboratory performance*

Main Author : Baek, Cheolmin, Senior Researcher  
 Highway Research Division, SOC Research Institute,  
 Korea Institute of Construction Technology, 283 Goyangdae-Ro,  
 Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, South Korea  
 Tel : +82.31.995.0853 Fax : +82.31.910.0161  
 email : cmbaek@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
<http://www.ksre.or.kr/>  
 ISSN 1738-7159 (Print)  
 ISSN 2287-3678 (Online)

## 1. 서론

전 세계적인 지구온난화와 이상기온 현상 등으로 환

경문제에 대한 관심이 고조되면서 기후변화는 1970년  
 대에 과학적인 검증을 시작하였으며, 1980년대에 수많

은 회의를 거쳐 기후변화를 인정하게 되었고, 1992년 리우회의에서 유엔기후변화협약(UNFCCC)을 채택하게 되었다. 그리고 1997년 교토에서는 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP3; Third Session of the Conference of Parties to the UNFCCC)를 통하여 교토의정서를 채택하였다. 여기에서 2012년까지 1990년의 CO<sub>2</sub> 배출량을 5.2%까지 저감하는 것을 합의하였다(D' Angelo et al., 2008). 그리고 교토의정서는 효율적으로 이산화탄소를 감축시키기 위해 배출권거래제, 공동이행제도와 청정개발체제를 도입했다. 이 중 배출권거래제는 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있으며 연간 1조 원 이상의 거래가 이루어지고 있다. 즉, 에너지 소비를 줄임으로써 경제적 효과도 얻을 수 있게 된 것이다. 중온아스팔트 기술은 1996년 독일에서 최초로 개발되었으며 미국에서는 2002년 도입되어 2004년부터 중온아스팔트 기술을 이용한 시험포장이 이루어졌다. 2008년부터 미국의 많은 주에서 시공 실적이 증가하는 등 중온아스팔트 포장에 가열아스팔트 포장을 대체하고 있는 추세이다(Acott 2009). 이러한 흐름에 맞추어 미국의 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)에서는 중온아스팔트 혼합물에 대한 배합설계법 개발 및 현장적용과 장기 공용성 평가에 대한 연구를 수행하고 있으며, 이러한 연구를 바탕으로 중온아스팔트 포장의 국가 표준화 작업을 진행하고 있다(AAT 2008; Anderson et al. 2008).

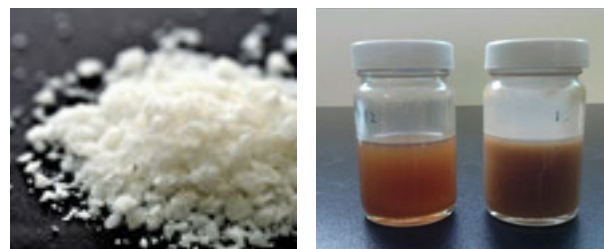
국내에서도 2006년부터 다양한 중온아스팔트 포장 기술 및 중온화 첨가제들이 개발되고 있으며 2008년에 국내 최초로 부산지방국토관리청 발주 '신령-고노도로포장 공사' 구간을 대상으로 시험시공이 수행되었다. 이후 중온아스팔트 포장에 대한 현장 적용성 및 국내 개발 첨가제들에 대한 다양한 평가를 수행하기 위해 전 국토를 대상으로 시험시공을 추진하고 있다. 또한 시험시공된 구간에 대한 지속적인 추적조사를 통해 공용성 평가를 수행하고 있으며 중온아스팔트 포장에 국내에 정착될 수 있도록 많은 노력을 기울이고 있다.

본 연구에서는 2011년도 9월 부산지방국토관리청 발주 '왜관-석적 도로포장 공사' 구간을 대상으로 중온아스팔트 혼합물 2종과 가열아스팔트 혼합물 1종에 대한 현장 시험시공을 수행하였으며 이를 바탕으로 현장 적용성 및 환경영향 평가를 수행하였다. 또한 플랜트에서 생산된 각각의 아스팔트 혼합물을 채취하여 실내 공용성 평가를 수행하였다.

## 2. 현장 시험시공

### 2.1. 재료 및 방법

중온아스팔트 혼합물에 대한 현장 적용성 및 환경영향 평가를 위해, 가열아스팔트 혼합물(이하, HMA)과 Fig. 1과 같은 왁스 타입의 유기 첨가제를 첨가한 중온아스팔트 혼합물(이하, OA-WMA) 및 케미컬 타입의 액상형 중온 첨가제를 첨가한 중온아스팔트 혼합물(이하, CA-WMA) 총 3종에 대한 시험시공을 수행하였다.



(a) Organic Additive (b) Chemical Liquid Additive

Fig. 1 WMA Additives

아스팔트는 공용성 등급이 PG64-22인 것을 사용하였으며 골재의 합성입도는 WC-3 기준에 적합한 입도로서 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 결과에 준하여 동일하게 적용하였다. 단, 현장배합설계 및 시험생산을 통하여 시험시공 전에 최적 배합비율을 결정하였다.

현장배합설계는 아스팔트 플랜트에서 핫빈골재를 채취하여 중온화 첨가제를 포함한 아스팔트의 함량의 비율을 조절하였으며, 품질시험 결과를 평가하여 최적 배합비율을 결정하고, 시험생산을 통해 검증하였다.

시험시공을 위한 아스팔트 혼합물은 현장배합설계에 따라 생산하였으며, 생산 중에 아스팔트 플랜트의 굴뚝에서 배출가스 농도를 측정하였다. 시공방법은 일반 가열아스팔트 포장에 사용되는 다짐 횟수 및 다짐 패턴을 동일하게 중온 아스팔트 포장에 적용하였으며 혼합물 운반트럭 도착과 동시에 혼합물의 온도를 측정하고 포설 직후 열화상 카메라로 표면온도를 측정하였다.

또한, 생산된 각각의 종류별 아스팔트 혼합물을 채취하여 실내 공용성 평가에 사용하였다.

### 2.2. 아스팔트 혼합물의 배합설계 결과

아스팔트 혼합물의 입도는 Fig. 2와 같이 WC-3 기준을 만족하였으며, Table 1과 같이 설계공극률 및 최적 아스팔트 함량은 가열 아스팔트 혼합물과 중온 아스팔트 함량 모두 동일하였다. 단, 중온 아스팔트 혼합물 중온화

첨가제 사용량을 아스팔트량을 대체하여 사용하였으며, 왁스타입의 첨가제를 사용한 OA-WMA이 액상형 첨가제를 사용한 CA-WMA에 비하여 약 3배 사용되었다.

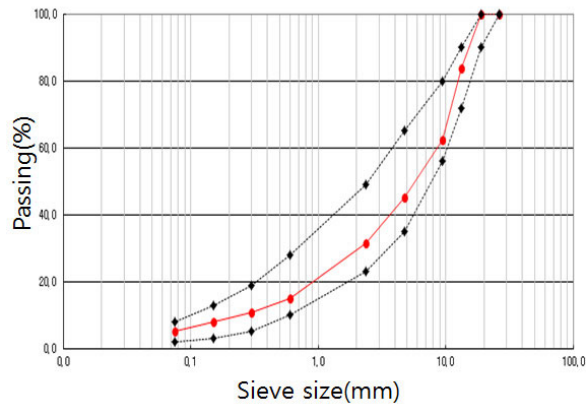


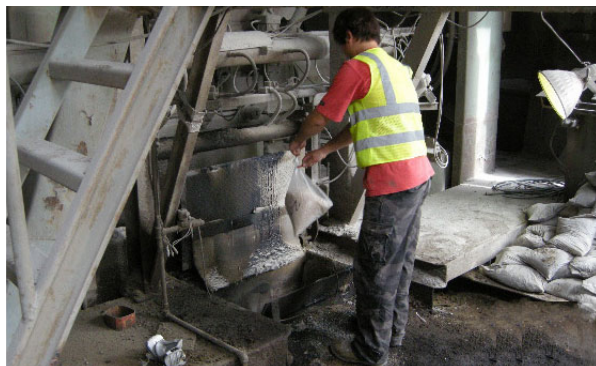
Fig. 2 Aggregate Gradation of Asphalt Mixtures

Table 1. Job Mix Formula(JMF) Results of Asphalt Mixtures

Mix Type	OAC (%)	Target Air void (%)	Amount of WMA Additive (%)
HMA	4.9	4.0%	-
OA-WMA	4.9	4.0%	1.5%(by weight)
CA-WMA	4.9	4.0%	0.5%(by weight)

### 2.3. 아스팔트 혼합물의 생산

중온화 첨가제의 투입방법은 OA-WMA의 경우 아스팔트 혼합물 생산 시 플랜트 믹서에 직접 투입하였고 CA-WMA의 경우 아스팔트 계량조에 동그랗게 절단하여 입구를 만들어 아스팔트가 배치마다 계량될 때 첨가하였다. Fig. 3은 OA-WMA와 CA-WMA의 생산공정에 따른 첨가제 투입을 나타내고 있다. 플랜트에서 혼합물 생산 시의 온도는 HMA의 경우  $155 \pm 3^\circ\text{C}$ 이고 이에 반해 중온아스팔트 혼합물은 2종 모두  $130 \pm 3^\circ\text{C}$ 에서 생산하였다.



(a) Wax Type Organic



(b) Chemical WMA Additive

Fig. 3 Putting WMA Additive into the Pugmill

중온아스팔트 혼합물은 Fig. 4와 같이 유증기나 불쾌한 냄새가 없이 생산되었으며 이 과정에서  $\text{CO}_2$ 를 비롯한 배출가스의 발생량을 플랜트의 배출가스 출구에서 측정하였다. Table 2는 배출가스 측정장비를 이용하여 아스팔트 혼합물 생산 시 측정한 배출가스의 결과를 나타낸다. 표에서와 같이  $\text{CO}_2$ 의 경우 가열아스팔트 혼합물에 비해 중온아스팔트 혼합물이 평균적으로 약 15% 감소되는 것으로 나타났다.



Fig. 4 Producing of Warm Mix Asphalt and Measurement of Emission Gas

Table 2. Emission Gas Measurements during Asphalt Mixture Production

Mix Type	CO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)
HMA	3.2	44	16
OA-WMA	2.8	36	13
CA-WMA	2.7	34	11

## 2.4. 아스팔트 혼합물의 현장 시공

중온아스팔트 포장의 시공은 일반 가열아스팔트 포장에 사용되는 다짐 횟수 및 다짐 패턴을 동일하게 적용하였으며 혼합물 운반트럭 도착과 동시에 혼합물의 온도를 측정하고 포설 직후 열화상 카메라로 표면온도를 측정하였다. 도착 시 온도는 대기온도에 따라 다소 차이가 있었으나 HMA의 경우에는 약  $150 \pm 3^\circ\text{C}$ 였으며 OA-WMA와 CA-WMA는  $125 \pm 3^\circ\text{C}$ 였다. Table 3은 현장에 도착한 운반트럭에 상차되어 있는 상태에서 직접 측정된 온도와 포설 직후의 내부온도를 측정된 결과를 나타내고 있다. 표에서와 같이 실질적으로 2종의 중온아스팔트 혼합물은 HMA보다 약  $20 \sim 30^\circ\text{C}$  정도 낮게 생산된 온도임을 알 수 있었다.

Table 3. Arrival and Laydown Temperature of Asphalt Mixtures on the Construction Site

Mix Type	Arrival Temperature(°C)	Laydown Temperature(°C)
HMA	148.0	139.3
OA-WMA	126.6	121.4
CA-WMA	122.0	122.5

본 시험 포장에서는 각 재료에 대한 다짐 특성을 평가하기 위해 국내에서 적용되고 있는 다짐도 기준을 적용하기 보다는 동일한 다짐횟수와 패턴을 모든 혼합물에 적용함에 따라 재료별 다짐 특성에 대한 상대적인 비교평가를 수행하였다. 밀도측정 방법으로는 현장밀도 측정장비를 이용하여 포설 및 다짐 과정별 포장의 밀도를 측정하였으며 시공이 끝난 후에 현장코어를 채취하여 실측밀도를 측정하였다. Fig. 5는 현장밀도 측정장비를 이용한 현장밀도와 현장코어를 이용한 실측밀도를 측정된 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 현장밀도의 경우 HMA와 중온아스팔트 혼합물이 거의 유사한 것으로 나타났다. 반면 실측밀도를 측정된 경우에는 CA-WMA와 OA-WMA는 HMA에 비해 각각 약  $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$  정도 높은 다짐밀도를 나타내었으며 공극률은 HMA보다 각각 0.5%, 1.5% 낮은 것으로 나타났다.

이는 중온 첨가제를 첨가한 아스팔트 혼합물이 약  $20 \sim 30^\circ\text{C}$  낮은 온도임에도 불구하고 HMA보다 다짐도 확보에 우수할 것으로 판단된다.

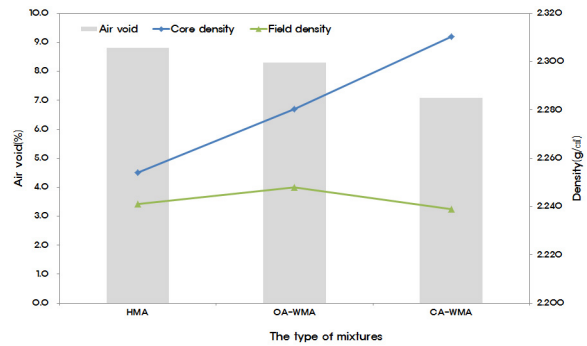


Fig. 5 Measurements of Field Density and Core Density

## 3. 실내 공용성 평가

본 연구에서는 시험시공에서 사용된 모든 혼합물을 채취하여 높이  $178\text{mm} \times 150\text{mm}$ 로 선회다짐기를 이용하여 시편을 제작하였다. 각 혼합물의 시편 제작 시 균일한 온도분포를 확보하기 위해 중온아스팔트 혼합물은 혼합온도인 약  $130^\circ\text{C}$ 까지 가열 후  $115 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 다짐을 수행하였으며 가열아스팔트 혼합물은 약  $150^\circ\text{C}$ 까지 가열한 후  $135 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 다짐을 수행하였다. 제작된 시편은 공극의 분포가 일정하도록 코어링하고 끝단을 절단하여 높이  $150\text{mm} \times$  지름  $100\text{mm}$ 의 크기로 제작하였다. 이때 공시체의 목표 공극률은 5.5%로 결정하였다.

실내 공용성 평가로는 각 혼합물의 기본적인 재료 특성을 결정하기 위해 총 4개의 온도(5, 20, 40,  $54^\circ\text{C}$ )와 6개의 하중주기(25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz)를 통하여 동탄성계수실험(Dynamic Modulus Testing; DMT)을 수행하였으며 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위해  $54^\circ\text{C}$ 에서 삼축압축반복하중실험(Triaxial Repeated Load Permanent Deformation; TRLPD)을 수행하였다. 또한 피로균열에 대한 저항성을 평가하기 위해 직접인장반복실험(Cyclic Loading Test)을 수행하였으며 수분에 대한 저항성을 평가하기 위해 간접인장강도비(Tensile Strength Ratio; TSR)에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 시험시공을 통한 현장 적용성 및 실내 공용성 평가 방법에 대한 연구 흐름도를 나타낸다.

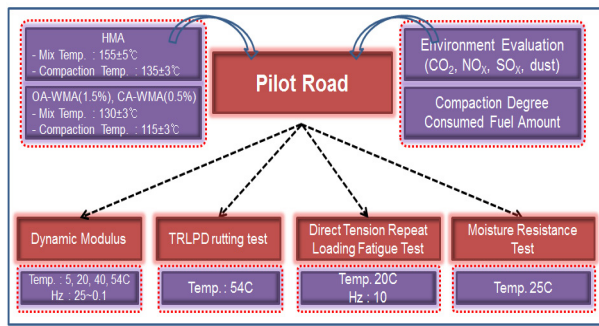


Fig. 6 Research Method

### 3.1. 수분저항성 평가

아스팔트 혼합물 총 3종에 대한 수분민감도를 평가하기 위한 인장강도비(TSR) 실험은 AASHTO T283(4)에 명시되어 있는 절차에 따라 수행되었으며 혼합물 종류에 따라 6개씩 총 18개의 아스팔트 시편을 제작하였다. 각 혼합물 당 기준공시체 3개를 25℃에서 인장강도 실험하고, 나머지 3개의 시편은 수분처리 후 25℃에서 인장강도 실험을 수행하였다. 모든 시편의 목표 공극률은  $7.0 \pm 0.5\%$ 였으며 기준공시체로 사용된 시편은 25℃ 수조에 2시간 동안 양생한 후 인장강도 실험을 수행하였으며 수분처리되는 공시체는 포화도가 70~80% 사이가 되도록 진공가압장치를 이용하여 물을 강제로 공시체 내부에 침투시켰다. 이렇게 제작된 공시체는 60℃ 수조에 24시간 동안 수침시킨 후 다시 25℃ 수조에서 2시간 동안 양생하고 인장강도 실험을 수행하였다. 인장강도비는 수분처리된 공시체 내부에 수분이 존재함에 따라 기준공시체보다 인장강도가 감소하게 되며 이때 발생하는 감소비율에 따라 각 혼합물의 수분민감도 평가를 수행하게 된다. Fig. 7은 각 혼합물에 대한 TSR 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 기준공시체(Control)의 인장강도는 HMA가 가장 높게 나타났으며 CA-WMA가 가장 낮은 결과를 나타내었다. 또한 수분처리 후 인장강도는 HMA와 OA-WMA가 거의 유사한 것으로 나타났으며 CA-WMA가 상대적으로 낮은 결과

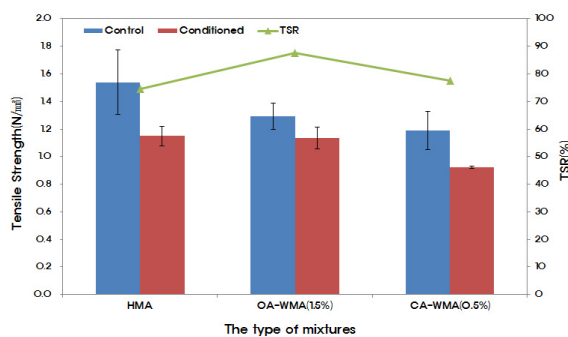


Fig. 7 Tensile Strength Ratio Test Results

를 나타내었다. TSR 결과를 보면 OA-WMA가 87%로 가장 높은 것으로 나타났으며 CA-WMA는 78%, HMA는 75%를 나타내어 모든 혼합물은 국내 기준인 75%를 다 만족하는 것으로 나타났다. 그리고, 중온 아스팔트 혼합물인 OA-WMA와 CA-WMA의 수분에 대한 저항성이 가열 아스팔트 혼합물인 HMA 보다 우수하며, 특히 OA-WMA는 HMA에 비하여 16% 증가하여 최근에 발생빈도가 높은 포트홀과 같은 포장 파손에 대한 저항성이 매우 높을 것으로 판단되었다.

### 3.2. 동탄성계수 실험(Dynamic Modulus Test)

본 연구에서의 동탄성계수( $E^*$ ) 실험은 MTS 810 장비를 이용하여 총 4개의 온도(5, 20, 40, 54℃)와 총 6개의 하중속도(20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz)로 AASHTO TP62(AASHTO, 2007) 절차를 따라서 수행되었다. 이 실험은 일축압축실험으로 높이 150mm×지름 100mm 시편에 85mm 변형률계(extensometer)를 120° 간격으로 설치하여 수직변위를 측정하였다. 본 실험에서 적용된 하중레벨은 변형률이 50~75 microstrain이 되도록 결정하였으며 Fig. 8은 MTS 810 시스템과 동탄성계수 실험을 위해 시편과 변위계가 장착된 모습을 보여준다.



Fig. 8 MTS 810 System and the Setup for Dynamic Modulus Test

Fig. 9~Fig. 12은 HMA, OA-WMA 그리고 CA-WMA의 동탄성계수 마스터커브 및 위상각(phase angle) 마스터커브를 나타내고 있으며 각 혼합물의 동탄성계수 마스터커브를 선정하기 위해 사용된 기준 온도는 5°C이다. 그림에서와 같이 동탄성계수 마스터커브는 semi-log(Fig. 9)와 log-log(Fig. 10) 그래프로 나타낼 수 있으며 semi-log 그래프는 낮은 온도에서의 거동을 비교하기 위해서 그리고 log-log 그래프는 고온에서의 거동을 분석하기 위해서 사용되었다.

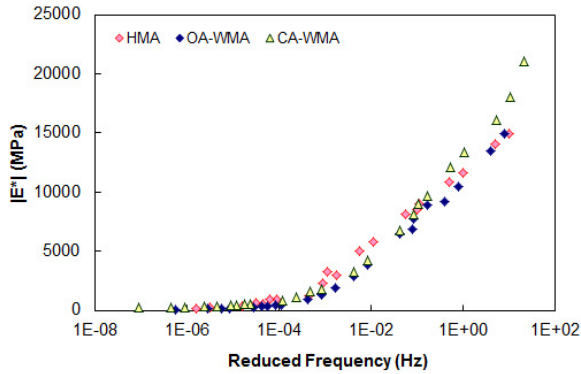


Fig. 9 Dynamic Modulus Mastercurves in Semi-log Scale

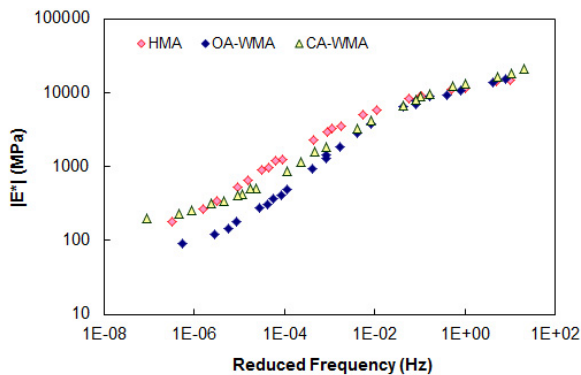


Fig. 10 Dynamic Modulus Mastercurves in Log-log Scale

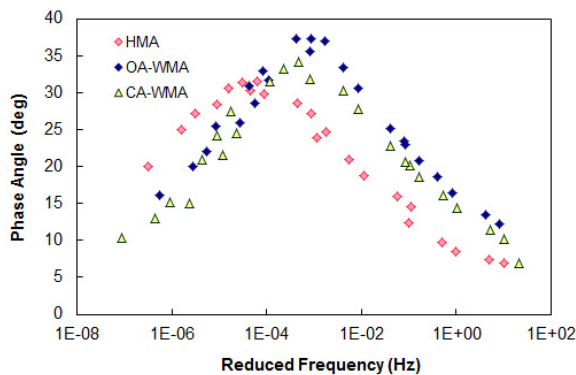


Fig. 11 Phase Angle Mastercurves

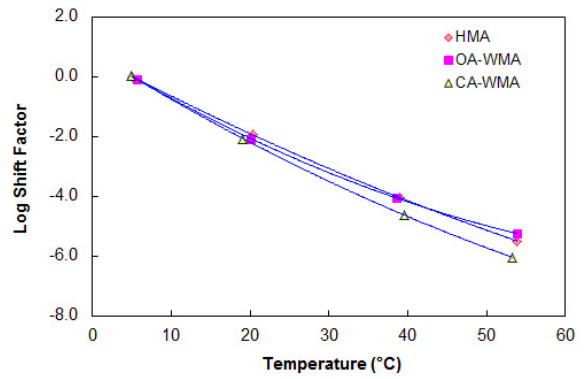


Fig. 12 Shift Factors for Dynamic Modulus and Phase Angle Mastercurve

그림에서와 같이 높은 하중주기에서 HMA와 OA-WMA의 선형점탄성 거동은 거의 유사한 것으로 나타났으며 CA-WMA는 다소 높은 동탄성계수를 가지는 것으로 나타났다. 반면 하중주기가 낮은 경우에는 OA-WMA가 상대적으로 가장 낮은 탄성계수를 가지며 HMA와 CA-WMA가 유사한 거동을 하는 것으로 나타났다. 일반적으로 하중주기가 낮은 경우에 동탄성계수는 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 반영하며 아스팔트 혼합물의 탄성거동특성은 위상각 마스터커브(phase angle mastercurve)를 측정하여 평가할 수 있다(Fig. 9). 다시 말해서, 위상각이 낮은 경우에는 혼합물의 거동 특성이 탄성적이며 반대로 위상각이 높은 경우에는 탄성 특성이 낮은 혼합물이라고 할 수 있다. Fig. 11와 Fig. 12은 위상각 마스터커브와 동탄성계수 및 위상각 마스터커브를 위한 전이함수(shift factor function)를 나타낸다. 위상각의 변화에 따른 점탄성 특성은 저온 또는 상온에서는 바인더에 의해서 지배되고 고온으로 올라가면서 바인더가 너무 약해져서 골재가 지배하게 되는데 골재는 탄성체이기 때문에 위상각이 작아 골재가 지배하는 고온에서는 혼합물의 위상각이 온도가 증가함에 따라 감소하게 되는 것이다. Fig. 11에서도 하중주기가 작아질수록 위상각이 증가되다가 다시 감소되는 것으로 나타나 실질적으로 감소되는 구간은 골재가 점탄성 특성을 지배하는 부분이라고 할 수 있다. 그림에서와 같이 HMA는 저온과 상온에서 OA-WMA와 CA-WMA 보다 좀 더 높은 탄성특성을 가지는 것으로 나타났지만 고온에서는 OA-WMA와 CA-WMA가 더 높은 탄성특성을 가지는 것으로 나타났다.

### 3.3. 피로균열 저항성 실험

아스팔트 혼합물의 피로균열에 대한 공용성 평가는 주

로 빔 피로실험(*beam fatigue test*)을 통하여 수행되어졌으며 현재까지도 많은 연구자들에 의해서 수행되어지고 있다. 그러나 빔 피로실험의 경우 반복하중의 횟수 및 실험 시간이 장기간 지속되어야 함으로 단시간에 아스팔트 혼합물의 피로 특성에 대한 평가가 어려운 것이 단점이다. 따라서 최근에 실험 시간을 단축시키고 쉽게 피로 특성을 파악할 수 있는 실험으로 직접인장피로 실험을 수행하고 있으며 이는 빔 피로실험과 거의 유사한 결과를 나타내고 있다(Underwood, B. s. et. al., 2010).

본 연구에서는 피로균열에 대한 저항성을 보다 직접적으로 평가하기 위해 직접인장반복하중실험(*cyclic fatigue test*)을 수행하였다. 일반적으로 반복인장하중 재하 실험에는 하중을 제어하는 방법과 변위를 제어하는 방법인 두 가지 실험방법이 주로 사용되는데 본 연구에서는 변위제어 크로스헤드 반복하중 실험(*controlled crosshead cyclic loading test*)을 수행하였다. 이는 시편에 혼합된 형태의 하중(응력제어 또는 변형률제어도 아닌)을 재하하여 실제 공용 시 발생하는 하중조건을 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다(Kutay, M. E. et. al., 2008). 변위제어 크로스헤드 반복하중실험은 20°C에서 10Hz의 속도로 재하하는 방법으로 수행되었다. 시편의 파괴시점은 Reese(2005)가 제안한 방법으로 위상각이 급격하게 변화될 때를 파괴시점으로 결정하였다. Fig. 13은 하중 횟수에 따른 동탄성계수와 위상각의 변화를 나타내는 것으로 일반적으로 하중 횟수가 증가함에 따라 동탄성계수는 점점 감소하고 위상각은 증가하게 된다. 어느 정도 하중이 재하된 후 위상각이 급격하게 감소되는데 이때가 시편이 파손된 것을 의미한다.

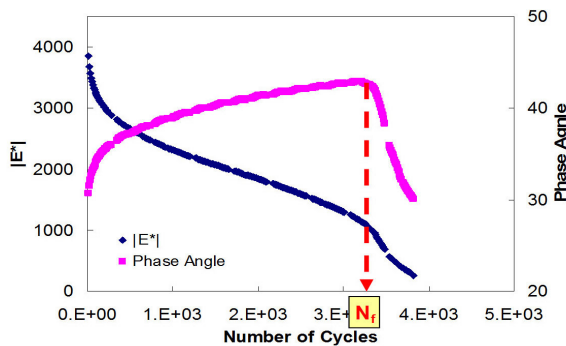


Fig. 13 Failure Definition according to the Change of Dynamic Modulus and Phase Angle

Table 4는 실험조건 및 실험결과( $N_f$ )를 나타낸 것이다. 여기서 CX input 값은 일정하게 적용된 하중 크기를 의미하는 것이다. 초기 응력과 변형률은 적용된

하중에 따른 초기 반응 상태를 나타낸 것이며 하중 적용 횟수가 50회 일 때를 기준으로 측정되어진다. 초기 응력과 변형률은 각 시편들의 강성이 서로 다르기 때문에 다양한 초기 반응 상태를 반영하기 위해 측정되어진다. Fig. 14에서와 같이 동일한 초기 변형률에서 HMA 혼합물과 OA-WMA 혼합물은 거의 비슷한 파괴횟수를 보여준다. 이에 반해 CA-WMA 혼합물은 상대적으로 피로 저항성이 높게 나타났다. 다시 말해서 인장변형률이 250마이크로스트레인일 때, HMA 혼합물과 OA-WMA 혼합물은 약 4,000회에서 파손이 발생되고 CA-WMA 혼합물은 약 11,100회에서 파손이 발생된다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 시험시공 시 채취한 시료의 부족으로 인하여 혼합물당 2개의 시편만을 이용하여 실험을 수행하였고 이에 따른 오차가 생길 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 대략적인 경향을 나타내고 각 혼합물에 대한 상대적인 평가는 가능하지만 실제 포장구조에서의 결과를 예측하기에는 무리가 있다. 궁극적으로 피로균열에 대한 공용성은 실제 포장구조에 대한 평가를 통해 강성 및 손상에 대한 저항성을 고려하여 평가해야만 한다.

Table 4. Fatigue Test Summary

Mix Type	CX Input (microstrain)	Initial Stress Amplitude in Tension (kPa)	Initial Peak-to-Peak Strain (microstrain)	$N_f$
HMA	2000	853	242	4,094
	2500	1,017	282	3,695
OA-WMA	1700	731	151	26,902
	2500	981	332	1,097
CA-WMA	1700	705	229	15,301
	2500	976	381	2,296

- The initial stress and strain are determined from 50<sup>th</sup> loading cycle.

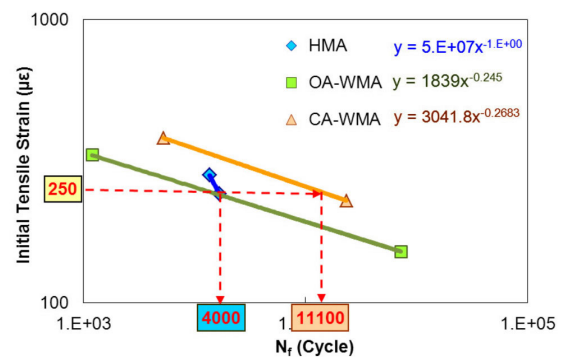


Fig. 14 The Initial Tensile Strain and Number of Cycle to Failure

### 3.4. 소성변형 저항성 평가

아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 평가는 삼축압축 반복하중 소성변형(Triaxial Repeated Load Permanent Deformation, TRLPD) 실험을 통하여 수행되었다. 이 실험은 0.1초의 반정현 하중과 0.9초의 회복기를 반복하여 수행되었다. 이 실험의 하중조건은 미국 NCHRP 9-30A 연구에서 추천하는 응력상태인 69MPa의 구속압력(Confining Pressure)과 483MPa의 유효응력(Deviatoric Stress)를 사용하였고 온도는  $54 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 실험하였다. 이러한 형태의 하중에 대하여 개발된 모형은 회복변형률비 모형(Resilient Strain Ratio Model)으로 이는 소성변형률을 회복 가능한 변형률의 평균값으로 표준화하기 때문이다. 이러한 모형은 NCHRP 1-37A 경험적-역학적 포장 설계법(Mechanistic empirical design guide)에 활용되고 있다(ARA, Inc., 2004). 전형적인 TRLPD 실험의 결과는 Fig. 15에서와 같이 총 누적 소성변형률과 하중재하수와의 관계를 대수공간에서 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 누적 소성변형률 곡선을 3개의 구간으로 나눌 수 있으며 세번째(Tertiary Flow) 구간이 발생하는 시점의 하중재하수를 흐름값(Flow Number)로 정의하고 공용성이 우수한 혼합물은 일반적인 실험조건에서

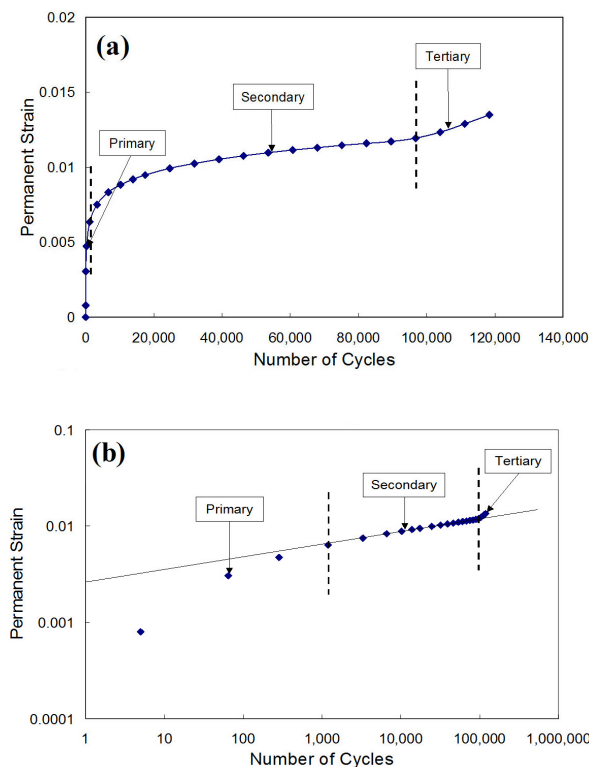


Fig. 15 Relationship between Number of Repeated Loading and Permanent Strain

세번째 구간이 발생하지 않는 것으로 나타난다 (Kaloush and Witczak 2002).

본 연구에서는 두번째 구간이 혼합물의 소성변형률을 표현하기 위하여 사용되었으며 앞절에서 언급한 것과 같이 고온  $54 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 에서 10,000회까지 수행하였다. 실험 결과에서 파손이 되는 세번째 구간까지는 수행되지는 않았지만 각 혼합물의 공용성은 10,000회까지의 소성변형률( $\epsilon_p$ )을 측정함으로써 평가될 수 있었다.

Fig. 16은 TRLPD 실험결과로 하중 횟수 증가에 따른 각 혼합물의 소성변형률 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이  $54^\circ\text{C}$ 에서 하중 증가에 따른 소성변형률을 보면 CA-WMA가 상대적으로 가장 낮은 소성변형률을 나타내고 있으며 HMA가 가장 높은 소성변형률을 가지는 것으로 나타났다. 또한 본 실험에서는 모든 혼합물이 세번째 구간까지 변형률 변화가 나타나지는 않았기 때문에 소성변형에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단되며 특히 CA-WMA의 경우 가장 낮은 소성변형률을 나타냈기 때문에 상대적으로 소성변형에 대한 저항성이 가장 우수할 것으로 판단된다.

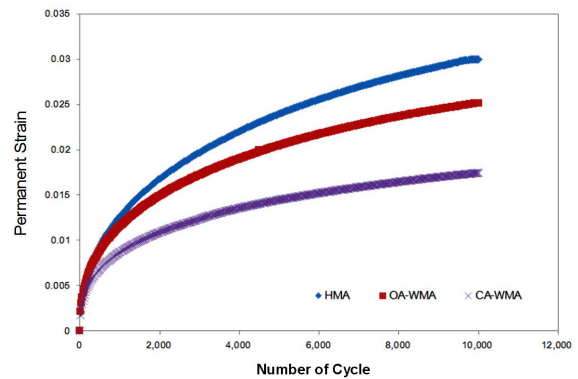


Fig. 16 TRLPD Test Results

### 4. 결론

본 연구에서는 기존 가열아스팔트 혼합물에 비해 약  $30 \sim 50^\circ\text{C}$  낮은 온도에서 생산 및 시공이 가능한 중온아스팔트 포장 공법에 대한 현장 적용성 평가 및 실내 공용성 평가를 통해 기존 가열아스팔트 혼합물 대체 공법으로서의 가능성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 중온아스팔트 혼합물은 기존 가열아스팔트 혼합물에 비해 약  $30^\circ\text{C}$  낮은 온도에서 생산 및 시공이 가능하



였으며 특히 CO<sub>2</sub> 등의 유해가스 방출이 현저히 감소되는 것으로 평가되었다. 또한 다짐도 및 공용성에 영향을 미치는 요소들도 기존 가열아스팔트 혼합물과 동등한 결과를 나타내거나 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 중온아스팔트 포장 기술은 잠정적으로 친환경 도로 포장 재료로서 기존 포장에 대한 대체 포장 기술로서 충분한 가능성이 있을 것으로 판단된다. 다만 시험 포장 구간의 지속적인 모니터링을 통하여 포장 상태 평가를 수행하여 발생하는 문제점을 파악하고 이에 따른 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

2. 수분에 대한 저항성 평가 결과, 모든 혼합물은 국내 TSR 기준인 75%를 만족하는 것으로 나타났으며 상대적으로 OA-WMA 혼합물이 수분에 대한 저항성이 가장 우수할 것으로 판단된다.
3. 동탄성계수 실험 결과, 저온에서의 OA-WMA와 HMA의 거동은 거의 유사한 것으로 나타났으며 CA-WMA는 높은 동탄성계수를 가지는 것으로 나타났다. 반면 고온에서는 OA-WMA가 가장 낮은 동탄성계수를 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 CA-WMA의 경우에는 온도균열에 취약할 것으로 예상된다.
4. 피로균열에 대한 저항성 평가 결과, OA-WMA와 CA-WMA는 HMA보다 우수한 피로균열 저항성을 나타낼 것으로 판단되지만 이러한 결과는 대략적인 경향을 나타내고 각 혼합물에 대한 상대적인 평가는 가능하지만 실제 포장 구조에서의 결과를 예측하기에는 무리가 있다. 궁극적으로 피로균열에 대한 공용성은 실제 포장 구조에 대한 평가를 통해 강성 및 손상에 대한 저항성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
5. 소성변형에 대한 저항성 평가 결과, OA-WMA와 CA-WMA는 HMA보다 낮은 소성변형률을 가지는 것으로 나타나 소성변형에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다. 그러나 이는 피로균열 저항성 평가와 마찬가지로 상대적인 평가이며 혼합물 자체의 측정 결과임으로 추가적인 포장 구조에 대한 평가를 통해 최종적인 결론을 내려야 할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 중온아스팔트 포장 기술의 현장 적용성 및 실내 공용성 평가 결과, 잠정적으로 중온 포장 기술은 친환경 재료로서 기존 가열아스팔트 포장을 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 국내에서는 2008년부터 실제 시공이 추진되어 추적조사 기간이 약 3년으

로 짧은 공용기간에 대한 포장상태 평가만 수행되어 장기 추적조사를 통한 지속적인 상태 평가를 수행하지 못하였다. 따라서 시험포장 구간의 지속적인 포장상태 조사를 수행하여 추후에 발생하는 파손형태를 파악하여 수정·보완해야 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(저비용 저탄소 아스팔트 포장공법 개발 ('09~'13))의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- AASHTO. *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt(HMA) to Moisture-Induced Damage*. AASHTO T283, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2007.
- AAHSTO. *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO TP62, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2007.
- Acott, M. *Testimony of Mike Acott, President of NAPA, Hearing on the Role of Research in Addressing Climate Change in Transportation Infrastructure before the Subcommittee on Technology and Innovation*. National Asphalt Pavement Association (NAPA), 2009.
- Advanced Asphalt Technologies, LLC. *NCHRP Report 9-43: Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. Interim Report*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2008.
- ARA, Inc. *ERES Consultants. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2004.
- D' Angelo, J., E. Harm, J. Bartoszk, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowser, T. Harman, M. Jamshidi, W. Jones, D. Newcomb, and B. Prowell. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation American Association of State Highway and Transportation Office, 2008.
- Kaloush, K. E. and M. W. Witzak. *Tertiary Flow Characteristics of Asphalt Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 71. 2002.
- Kutay, M. E., N. Gibson, and J. Youtcheff. *Conventional and Viscoelastic Continuum Damage (VECD) - Based Fatigue Analysis of Polymer Modified Asphalt Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 77, 2008, pp. 395-434.
- Reese, R. *Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life. Journal of the Association of Asphalt*

*Paving Technologists*, AAPT, Vol. 66, 1997, pp. 604-632.  
Underwood, B. S., Y. R. Kim, and M. N. Guddati. Improved  
Calculation Method of Damage Parameter in Viscoelastic

Continuum Damage Model. *International Journal of Pavement  
Engineering*, Vol. 11(6), 2010, pp. 459-476.  
(접수일 : 2012. 1. 31 / 심사일 : 2012. 2. 1 / 심사완료일 : 2012. 7. 30)