

아스파민을 사용한 중온아스팔트혼합물의 실험적 평가와 포장설계 비교평가

An Experimental Evaluation and Comparative Evaluation on Pavement Design of Warm-Mix Asphalt Mixture Using Aspha-min

진 명 섭 Jin, Myung Sub | 정희원 · 한남대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail : jinms@hnu.kr)

ABSTRACT

Warm-Mix Asphalt(WMA) mixtures, which meet environmental protection and have high energy efficiency, are emerging as an alternative to hot-mix asphalt mixtures. The objective of this study is to evaluate WMA made with Aspha-min in the laboratory and to compare the design results accomplished by new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide(MEPDG) with control mixture. An asphalt mixture with a nominal maximum size of 12.5mm and PG64-28 binder was used. Resilient modulus tests for a control mixture and WMA with 0.3% and 0.5% of Aspha-min were conducted. The results obtained by MEPDG after inputting the test output into the design indicated that the predicted rut depth of WMA using Aspha-min was much lower than that of control mixture, and showed that WMA was more resistant to rutting than control mixture.

KEYWORDS

warm-mix asphalt mixture, MEPDG, resilient modulus test, rut depth

요지

환경보호에 부응하고 고에너지효율성을 갖춘 중온아스팔트혼합물이 가열아스팔트혼합물의 대안으로 부각되고 있다. 본 연구의 목적은 아스파민을 혼합하여 제조한 중온아스팔트혼합물을 실험적으로 평가하고, 역학적-경험적 포장설계법인 MEPDG를 이용하여 설계한 결과를 일반아스팔트혼합물 설계와 비교하는 것이다. 실험재료는 최대공칭치수 12.5mm인 골재와 PG64-28바인더가 사용되었으며, 기존 혼합물, 0.3%와 0.5%의 아스파민을 혼합한 중온아스팔트혼합물에 대한 회복탄성계수시험이 실시되었다. 실험결과를 MEPDG 설계의 입력변수로 하여 분석한 결과, 아스파민을 사용한 중온아스팔트혼합물의 소성변형량이 일반혼합물에 비해 훨씬 적어 소성변형에 대한 저항성이 향상됨을 알 수 있었다.

핵심용어

중온아스팔트혼합물, 역학적-경험적 포장설계, 회복탄성계수시험, 소성변형깊이

1. 서론

지난 수 년 동안 환경보호와 고에너지효율성에 대한 관심이 높아지면서 아스팔트생산업체에서도 이에 부응하는 아스팔트혼합물을 생산하려는 노력이 증대되고 있는 추세이다. 특히, 교토의정서의 채택으로 설정된 대기오염 감소목표를

맞추기 위해 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 가속화되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 중온아스팔트혼합물(Warm-Mix Asphalt; WMA, 이하 'WMA'로 명명함)생산이 새로운 대안으로 부각되고 있다. 전통적으로 생산되고 있는 고온아스팔트혼합물(Hot-Mix Asphalt; HMA, 이하

'HMA'로 명명함)은 생산시 배출온도가 약 130℃에서 160℃에 이른다. 이 때 골재와 아스팔트를 혼합온도에 이르도록 지속적으로 가열해야 하므로, 소비되는 연료량은 상당히 크고, 따라서 에너지 비용과 온실가스 배출의 증가를 유발한다.

WMA는 유럽에서 시작된 새로운 방식의 아스팔트혼합물 생산기술로써, 기존의 생산설비와 시방서기준을 그대로 사용하면서 혼합온도와 다짐온도를 상당히 낮출 수 있다. 기존의 HMA의 혼합온도가 약 130℃~160℃인 것에 비해, WMA는 약 110℃~140℃의 혼합온도에서 생산이 가능한 것으로 알려져 있다(Jones 2004). 다만, 낮은 온도에서 혼합이 가능하도록 하기 위해서 아스팔트의 점도를 낮추어 골재피복을 도와주는 첨가제가 필요하다. 본 연구에서는 WMA를 생산하기 위해 현재까지 개발된 기술과 방법, 그리고 첨가제의 종류를 알아보고, 이 중 대표적인 첨가제를 이용하여 WMA를 제조하고 실험을 통하여 WMA의 성능을 평가하고자 한다.

WMA를 사용함으로써 온실가스 배출과 에너지 비용은 각각 약 30%가 감소하는 것으로 알려져 있다. 이외에도 조기에 교통을 개방할 수 있고, 아스팔트의 노화현상도 줄어드는 효과도 볼 수 있다고 한다. 또한 WMA를 사용한 포장의 공용성을 HMA 포장의 공용성과 비교한 결과, 거의 비슷하거나 더 우수한 것으로 나타났다(Jones 2004).

본 연구에서는 기존혼합물과 WMA 혼합물에 대해 회복탄성계수실험을 실시하고, 이 결과를 새로운 포장설계방법인 역학적-경험적 설계방법, 즉 MEPDG(Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)의 설계변수로 하여 포장설계를 시행하여 예상소성변형을 비교해 보고자 한다.

2. 문헌연구

아스팔트혼합물의 생산온도를 낮추면서 기존 혼합물의 역학적 특성이나 공용성을 발휘하는 중온아스팔트혼합물(WMA) 생산기술은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

첫째, 아스팔트와 골재의 혼합과정에서 가열된 아스팔트에 물이 주입되면 혼합물에 거품, 소위 폼드효과(foamed effect)가 발생됨으로써 아스팔트의 점도가 낮아져 골재를 피복 가능케 하는 폼드화 기술이다. 폼드효과가 발생되도록 도와주는 대표적인 첨가제는 아스파민(Aspha-min)으로써, 이 첨가제는 비교적 큰 공극 안에 물을 포함한 상태로 존재하며 일정한 온도로 가열되면 이 물이 빠져나와 폼드효과를 유발하는 것이다. 폼드화 기술을 사용하는 또 다른 WMA 첨가제로는 LEA, LT Asphalt, WAM-Foam 등이 있다. 이 중 WAM-Foam은 점성인 낮은 소프트 바인더를 100~120℃에서 골재와 혼합한 후, 여기에 점성이 큰 하드 바인더를 투입하면서 물과 공기를 주입하여 폼드효과를 내도록 제조된다.

둘째, 낮은 용해점을 갖는 유기 화합물 첨가제로써, 아스팔트에 첨가하면 낮은 용해점 때문에 아스팔트의 점도를 낮추는 특성을 나타낸다. 이러한 기술을 이용하여 개발된 첨가제로는 파라핀 왁스를 주성분으로 하는 Sasobit, 저분자의 에스테르 계통의 왁스를 주성분으로 하는 Asphaltan B, emulsion을 주성분으로 하는 Evotherm 등이 있다.

두 가지의 WMA 생산기술을 이용하여 제조된 첨가제의 종류와 생산회사, 첨가 방법, 생산온도, 사용국가, 사용실적을 정리하면 표 1과 같다.

WMA에 이용되는 폼드화 기술로 제조된 대표적인 첨가제

표 1. 중온아스팔트 혼합물 제조기술의 분류

중온화 기술	종 류	생산회사	첨가방법	생산온도	사용국가	사용실적(2008. 2까지)
폼드화 (Foamed) 기술	Aspha-min (zeolite)	Eurovia & MHI (독일)	혼합물 무게의 약 3.0% 첨가	130~170℃	독일, 프랑스, 미국 등	> 360,000 톤
	LEA, EBA & EBT	LEWCO (프랑스)	바인더 무게의 약 0.2~0.5% 첨가	< 100℃	프랑스, 스페인, 이탈리아, 미국	> 100,000톤
	LT Asphalt	Nynas (스웨덴)	바인더 무게의 0.5~1.0% 첨가	약 90℃	네덜란드, 스웨덴	알려져 있지 않음
	WAM-Foam	Kolo사 (노르웨이)& Shell사(영국)	점성이 낮은 바인더로 골재 피복 후, 점도가 큰 바인더를 첨가하여 폼드효과 유발	약 110~120℃	영국, 프랑스, 노르웨이, 캐나다, 스웨덴, 이탈리아, 네덜란드 등	> 60,000톤
유기화합물 첨가 기술	Sasobit (Fisher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH (독일)	바인더 무게의 2.5% 첨가(독일) 또는 1.0~1.5% 첨가(미국)	130~170℃	독일을 비롯한 전세계 20여개국	> 10'톤
	Asphaltan-B (Montan wax)	Roman-ta GmbH (독일)	바인더 무게의 2.5% 첨가	130~170℃	독일	알려져 있지 않음
	Evotherm	Mead-West- vaco (미국)	emulsion을 가열된 골재에 피복할 정도로 첨가	85~115℃	미국, 프랑스, 캐나다, 중국, 남아공 등	> 17,000톤

인 아스파민(Aspha-min)은 독일의 Eurovia업체에서 생산된 것으로 일명 'Eurovia'로도 불리는 인공비석(synthetic zeolite)이며 상온에서 매우 입자가 가는 입자형태(평균 직경:380 μ m) 또는 하얀 분말가루 상태(평균 직경:3~5 μ m)로 공급된다(Von Devivere 2003). 아스파민 내에는 약 21%의 질량을 차지하는 물을 포함하고 있는데 약 85 $^{\circ}$ C~182 $^{\circ}$ C의 온도범위에서 이 물이 아스파민 밖으로 배출된다. 아스파민내의 silicates(zeolites)구조는 매우 큰 공극을 갖고 있어 분자량이 큰 이온 즉 나트륨, 인, 칼슘 그리고 물 이온 등을 포함할 수 있다. 이러한 공극은 다른 광물 이온들과 쉽게 접촉이 가능하도록 가늘고 긴 통로를 형성하며, 이러한 통로들을 통해 아스파민 내에 함유하고 있는 이온이나 분자들이 zeolite 구조를 쉽게 오갈 수 있다. 이러한 아스파민의 구조적 특징으로 어느 정도의 열을 가하면 물이 쉽게 빠져 나가거나 흡수될 수 있는 것이다. 이러한 특징을 이용해 아스파민을 골재에 아스팔트 바인더와 함께 혼합하면 일정온도에서 물이 수증기 형태로 배출되면서 아스팔트 바인더의 부피를 팽창시켜 아스팔트 거품을 만들어, 낮은 온도에서도 아스팔트가 골재에 잘 피복되도록 하는 것이다(FHWA 2007).

Eurovia는 아스파민을 총 혼합물무게의 약 0.3%비율로 첨가하도록 하고 있으며, 이는 HMA의 생산온도보다 약 30 $^{\circ}$ C 정도 낮출 수 있는 효과를 가져 온다. 이 온도감소가 연료 에너지의 30% 감소를 가져올 수 있다고 알려져 있다. 아스파민을 활용한 WMA는 일반아스팔트혼합물외에도 폴리머계 질아스팔트나 재활용아스팔트에도 효과가 있음이 밝혀져 있다(McKeon 2006).

WMA는 생산온도를 낮추어 에너지 절감효과와 환경보호라는 효과를 얻을 수 있는 장점이 있지만 현장에서 충분한 공용성을 확보할 수 있어야 HMA에 대한 대체 포장재료로서의 활용도가 높아질 것이다. 미국의 BAST사를 비롯한 WMA 분석팀이 2003년부터 2007년까지 5년간 유럽 국가에서 행한 WMA 공용성에 대한 현장 분석 자료에 의하면(FHWA 2008), HMA와 비교하여 비슷하거나 더 나은 공용성을 보여 주었다. 특히 유럽 내에서도 WMA의 사용실적이 가장 많은 독일의 경우, 1998년에서 2001년 사이에 건설된 아우토반 고속도로의 쾰른과 프랑크푸르트 사이의 7개 시험단면에 대해, 각각 Sasobit, Aspha-min, Asphaltan-B 첨가제를 이용하여 건설된 WMA 단면과 비교단면인 HMA 단면의 소성변형과 균열률을 조사한 결과 모든 구간에서 비슷하거나 WMA 단면이 오히려 더 나은 결과를 보여 주었다.

미국의 미주리주에서 행한 WMA와 HMA의 공용성 현장 조사에서도(Schroer 2006) 비슷한 결과를 나타내었다. 즉 HMA를 사용한 시험단면과 Aspha-min, Sasobit, Evotherm을 사용한 WMA 시험단면의 소성변형을 측정한

결과, HMA단면이 1.1mm, Aspha-min 단면이 0.3mm, Sasobit 단면이 0.8mm, Evotherm 단면이 1.1mm로써 Aspha-min을 사용한 WMA 단면이 가장 우수한 소성변형 저항성을 보여 주었다.

미국의 플로리다주에서 실시한 현장 공용성 분석 결과(FLDOT 2009), WMA의 소성변형은 HMA와 비슷하거나 우수한 것으로 나타났으나 다만 전단강도비로 판단하는 수분민감성은 다소 높은 것으로 나타났다. 미국 아스팔트기술센터(National Center for Asphalt Technology:NCAT)에서 행해진 수분민감성 시험결과에서도, WMA가 일반적인 HMA보다 더 수분민감성이 컸으며, 이는 WMA의 혼합온도와 다짐온도가 낮으므로 골재가 완전히 건조되지 않아 수분에 의한 전단강도저하가 발생하는 것으로, WMA의 특성을 잘 설명해 준다고 할 수 있다. 따라서 WMA의 사용시 수분에 저항할 수 있는 첨가제로 혼합할 것을 제안하고 있다(Hurley et al. 2006).

같은 연구에 의하면, WMA에 첨가하는 아스파민이 회복탄성계수나 소성변형가능성 등 역학적 거동에는 긍정적 효과를 가져 오는 것으로 밝혀졌다. NCAT의 시험도로에서 HMA와 WMA의 시공 구간에 43일간 52만여회의 ESAL을 가한 후 현장공용성을 측정한 결과(Prowell et al, 2007) 소성변형이 거의 발생하지 않았다.

Wasiuddin(Wasiuddin et al. 2007)은 아스파민과 또 다른 첨가제인 Sasobit을 첨가한 바인더에 대한 소성변형가능성과 유동학적인 특성을 연구한 결과, 두 첨가제 모두 혼합온도와 다짐온도를 낮추었을 때 소성변형가능성이 오히려 낮아짐을 밝혀냈다. 이는 일반적으로 혼합온도와 다짐온도를 낮추면 바인더의 노화가가능성이 줄어들어 소성변형가능성도 낮추는 것으로 판단된다.

현재까지의 문헌연구를 종합해 보면 WMA를 사용해도 혼합시 작업성이나 시료의 구조에 변화가 없었으며 혼합온도와 다짐온도를 낮춤으로써 오히려 소성변형가능성이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 그러나 WMA의 사용이 포장설계에 미치는 영향을 분석한 연구가 미비한 실정이므로, 본 연구에서는 폼드화 기술로 생산된 WMA 첨가제인 아스파민을 사용한 WMA혼합물에 대해, 대표적인 재료의 역학시험인 회복탄성계수시험을 실시하고, 이 결과를 새로운 포장설계법인 MEPDG의 입력변수로 포장설계를 수행하여 소성변형 결과를 분석하고자 한다.

3. 실험재료 및 실험설계

본 연구에서는 PG 64-28 바인더가 사용되었으며 최대공칭 치수 12.5mm의 같은 골재와 아스팔트함량을 사용하여 비교

용 HMA시료와 WMA시료를 제작하였다. WMA시료에 첨가되는 아스파민은 혼합물 전체 중량의 0.3%와 0.5% 비율로 비교용 HMA시료에 혼합하였다. 아스파민을 사용하여 WMA시료를 제작할 때 별도의 배합설계는 불필요하여 HMA의 배합설계로 제작된 시료에 무게만 측정하여 혼합하였다. 본 연구에서 사용한 아스파민은 분말가루 형태로 다음 그림 1과 같은 크기이며 25kg 포장으로 공급된 것을 사용하였다.

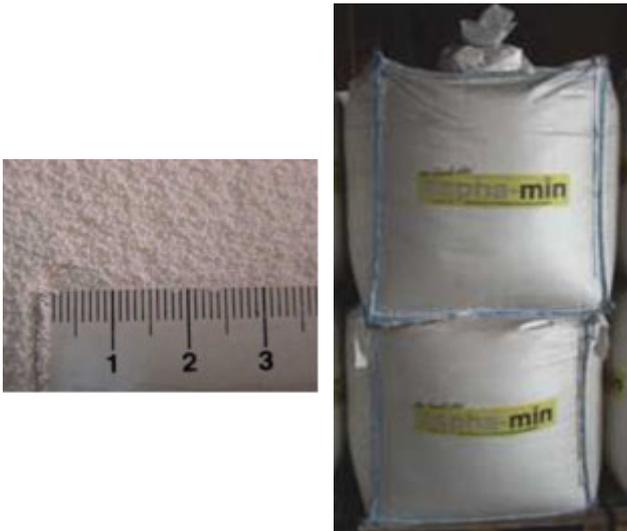


그림 1. WMA 제작에 사용된 아스파민

아스파민은 혼합온도로 가열된 골재에 아스팔트를 혼합하기 직전이나, 아스팔트와 함께 주입한다. 이 때 아스파민의 구성성분인 zeolite(비소)가 함유하고 있던 물이 방출되기 시작하면서 매우 가는 물 분무, 즉 폼드효과(foamed effect)가 유발된다. 이 폼드효과로 인해 아스팔트의 부피가 팽창하는데 이 과정이 약 6~7시간 지속된다. 혼합물이 충분한 워커빌리티를 발휘하는 100℃~120℃의 온도에 이르러 폼드작

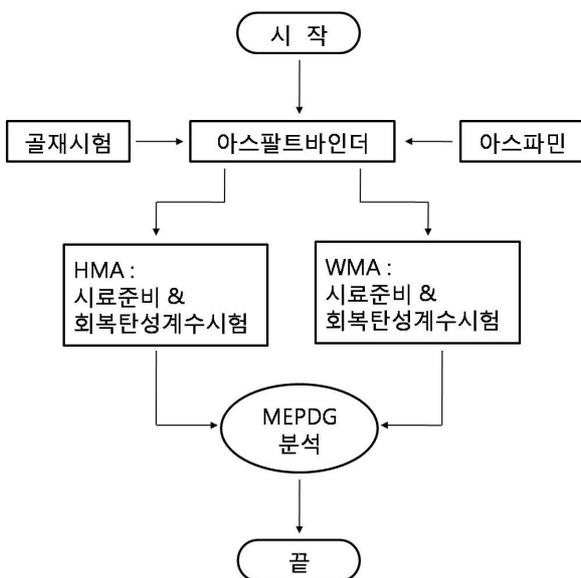


그림 2. 본 연구의 실험설계 흐름도

용이 거의 끝날 때 다짐작업이 수행된다. 따라서, 비교용 HMA시료는 142℃ 온도에서 자이러토리 다짐기로 다짐하였고, 0.3%의 아스파민혼합 WMA시료와 0.5%의 아스파민혼합 WMA시료는 각각 100℃와 120℃에서 다짐이 행해졌다. 이 시료들에 대한 회복탄성계수시험을 실시하여 MEPDG포장설계분석에 이용하였다. 그림 2는 본 연구의 실험설계 흐름도를 보여준다.

4. 회복탄성계수시험

4.1. 실험방법 및 실험결과

회복탄성계수는 동하중하에서의 축차응력과 회복수직변위의 비로써 MEPDG의 중요한 재료입력변수이다. 본 연구에서는, -5℃, 4℃, 21.1℃의 온도에서 각각 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz, 25Hz의 주파수를 갖는 동하중을 이용하여 실험이 행해졌다. 하중은 수직변위가 50~150με 발생하는 크기의 반사인파하중(sinusoidal loading)으로 가했고, 변위는 시료주변의 세 지점에 설치된 변위계를 이용하여 측정하였다. 사용된 혼합물은 5종류로, 비교용 시료, 0.3% 아스파민 첨가 혼합물로써 100℃에서 다진 시료와 120℃에서 다진 시료, 0.5% 아스파민 첨가 혼합물로써 100℃에서 다진 시료와 120℃에서 다진 시료이다. 이 시료들은 표 2와 같이 분류하였다.

표 2. 실험에 사용된 시료 분류

시료 종류와 호칭	시료 제작 방법
비교용	142℃에서 다진 비교용 HMA
0.3%-100C	100℃에서 다진 0.3% 아스파민 첨가 WMA
0.3%-120C	120℃에서 다진 0.3% 아스파민 첨가 WMA
0.5%-100C	100℃에서 다진 0.5% 아스파민 첨가 WMA
0.5%-120C	120℃에서 다진 0.5% 아스파민 첨가 WMA

실험결과는 아래의 그림 3~5에 나타내었다.

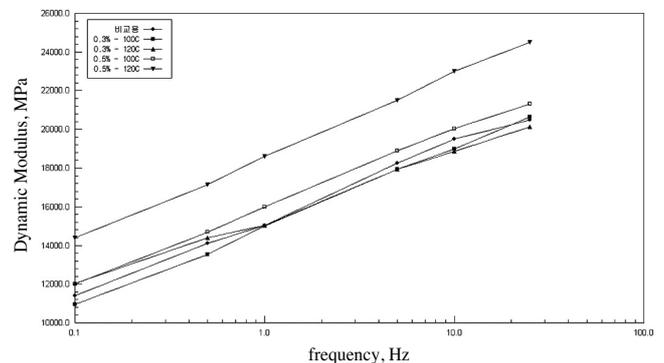


그림 3. -5℃에서의 각 시료별 회복탄성계수시험 결과

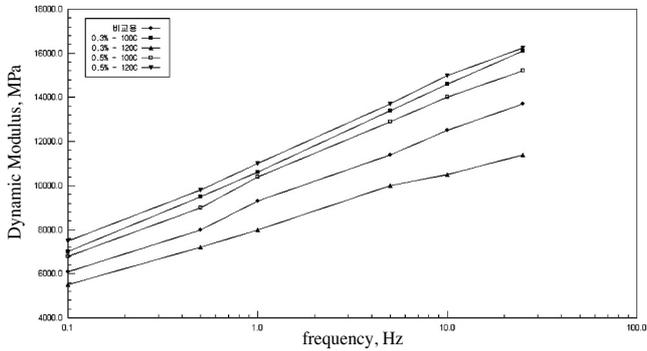


그림 4. 4°C에서의 각 시료별 회복탄성계수실험 결과

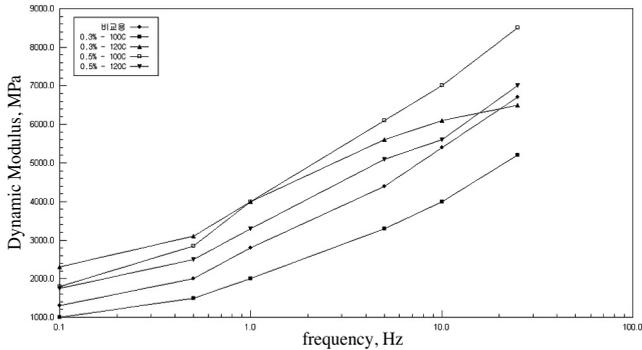


그림 5. 21.1°C에서의 각 시료별 회복탄성계수실험 결과

대부분의 아스파민 첨가 혼합물 즉 WMA시료는 회복탄성계수값이 비교용 시료와 비교하여 일부를 제외하고 더 큰 것을 알 수 있다. 0.5% 아스파민 첨가 혼합물을 120°C에서 다진 시료가 21.1°C를 제외하고 비교적 가장 큰 회복탄성계수값을 보여주는데, 이것이 포장의 파손결과에는 어떠한 영향을 미치는지 MEPDG분석을 통해 알아보았다.

4.2. 지배곡선(Master Curve)의 작성

회복탄성계수실험은 위에서 언급된 대로 3개의 다른 온도와 6개의 다른 주파수에서 행해진다. 따라서 위 그림 3~5에서와 같이 3가지의 온도에서 각각 주파수와 회복탄성계수와의 관계그래프를 얻을 수 있다. 이 값들은 기준온도에 맞추어 이동시켜 하나의 곡선 즉 지배곡선(Master Curve: 이하 지배곡선)으로 표현할 수 있다. 지배곡선을 얻기 위해서는 다음 식 (1)과 같은 주파수와 온도 사이의 이동계수를 통한 관계식을 이용해야 한다.

$$\log(f_r) - \log(f) = \log \alpha(T) \quad (1)$$

여기서, f_r = 온도별 변화된 주파수(Hz)

f = 기준온도에서의 주파수(Hz)

$\alpha(T)$ = 이동계수

지배곡선의 장점은 여러 온도와 다양한 주파수 하에서의 회복탄성계수값들의 비교가 용이하다는 것이다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 지배곡선을 그리기 위해서는 각 온도사이의 이동계수를 구해야 하는데, 이를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 직선 사이의 평행이동을 이용하여 다음과 같이 구했다.

먼저 각각의 다른 온도, 본 연구에서는 -5°C, 4°C, 21.1°C의 세 온도와 각각의 온도에서 6가지의 주파수별로 측정된 회복탄성계수를 log-log지에 그린다. 이 세 그래프를 기준 온도, 본 연구에서는 4°C에 맞추어 이동시켜 한 개의 지배곡선을 그리기 위해 다음과 같이 각 온도에서 회복탄성계수와 주파수와의 회귀직선식을 구한다.

$$y = ax + b \quad (2)$$

여기서, y = 회복탄성계수

x = 주파수

a, b = 상수

식 (2)로부터 다음 식 (3)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$x = \frac{y - b}{a} \quad (3)$$

-5°C의 6개 y 값으로부터 회귀직선식을 이용해 x 값을 구한 후, 동일한 y 값에 대해 4°C의 회귀직선식을 이용해 식 (3)으로부터 4°C에서의 x 값 즉, 이동된 새로운 주파수값을 찾을 수 있다. 새 주파수값들은 기준온도보다 낮은 온도에서 얻은 값들이므로 높은 주파수대, 즉 오른쪽 방향으로 수평 평행이동하게 된다. 이 6개의 새로운 x 값들의 -5°C와 4°C에서의 차이를 각각 구한 후 평균값을 취하여 이동계수 $\log \alpha(T)$ 로 정하는 것이다. 다음 그림 6은 0.3%-100C의 예를 그림으로 나타낸 것이다.

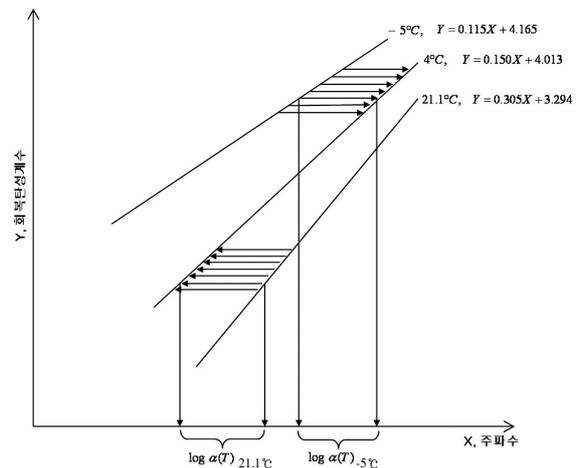


그림 6. 직선의 평행이동을 이용한 이동계수의 산정 예

이 과정을 표로 정리해 보면 다음의 표 3과 같다.

표 3. 이동계수 구하는 방법 (0.3%-100C의 경우 예)

y	x		차 이
4.315	-5°C	1.304	0.709
	4°C	2.013	
4.279	-5°C	0.991	0.782
	4°C	1.773	
4.254	-5°C	0.774	0.833
	4°C	1.607	
4.176	-5°C	0.096	0.991
	4°C	1.087	
4.132	-5°C	-0.287	1.080
	4°C	0.793	
4.039	-5°C	-1.096	1.269
	4°C	0.173	
$\log \alpha(T)$			평균 0.944

21.1°C의 경우도 마찬가지로 방법으로 기준온도인 4°C에 맞추어 데이터를 이동시켜 이동계수를 구할 수 있다. 다만 이 경우는 그림 5에서와 같이 기준온도보다 높으므로 낮은 주파수대로 수평 평행이동하게 된다.

이제 각 온도별 이동계수가 구해지면 식 (1)로부터 다음과 같이 지배곡선에 사용되는 새로운 주파수를 계산할 수 있다.

$$f_r = \alpha(T) \times f \quad (4)$$

따라서, 위 식 (4)를 이용해 -5°C를 기준온도인 4°C로 이동시킨 새로운 주파수 f_r 을 구한 예를 0.3%-100C시료에 대해 표로 정리해 보면 다음 표 4와 같다.

표 4. 새로운 주파수 f_r 을 구하는 예(0.3%-100C의 경우)

$\log f$	$\log \alpha(T)$	$\log f_r$	f_r
1.398	0.944	2.342	219.8
1		1.944	87.9
0.699		1.643	44.0
0		0.944	8.8
-0.301		0.643	4.4
-1		-0.056	0.9

이와 같은 과정으로 각 시료별로 지배곡선을 그려보면 다음 그림 7~11과 같다.

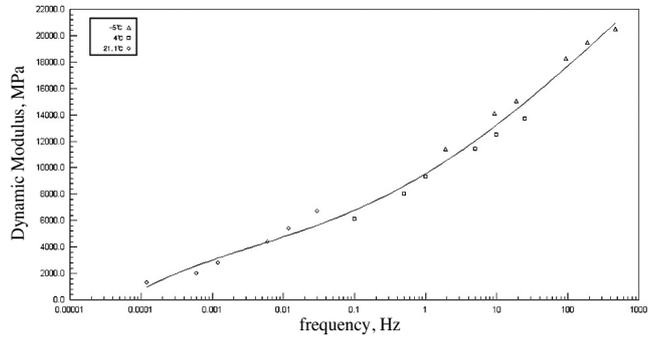


그림 7. 비교용 시료의 지배곡선

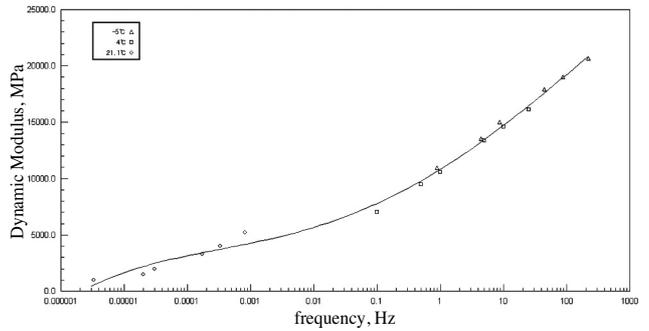


그림 8. 0.3%-100C시료의 지배곡선

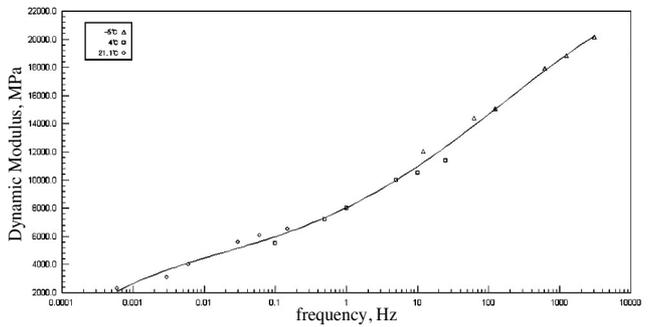


그림 9. 0.3%-120C시료의 지배곡선

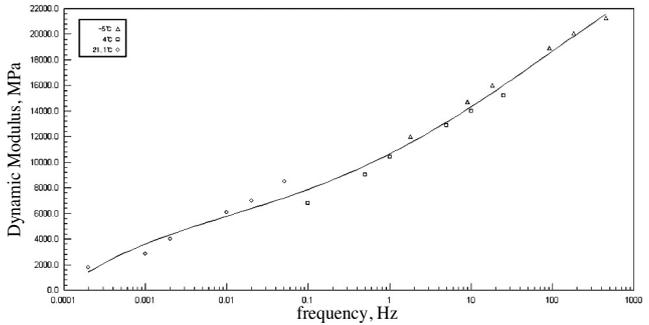


그림 10. 0.5%-100C시료의 지배곡선

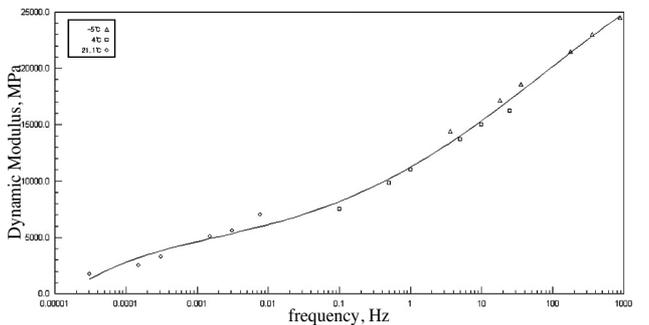


그림 11. 0.5%-120C시료의 지배곡선

5. MEPDG 분석

역학적-경험적 포장설계법(Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide : MEPDG, 이하 MEPDG로 명명함)은 기존의 경험적 설계방법인 AASHTO 설계법을 대체할 새로운 설계법으로써 포장재료의 역학적 실험값을 입력하여 예측되는 포장손상을 결과물로 출력할 수 있다. 먼저, 설정된 포장 단면에 대해 구조해석을 실시하여 각 지점에서의 응력, 변형률, 처짐 등을 계산한다. 입력된 설계기간 동안 교통량이나 환경 변수, 재료의 특성에 따라 포장 손상이 축적되며 이는 개발된 포장 손상 모델을 이용하여 소성변형, 균열, 요철량 등의 포장 손상 예상값을 출력할 수 있도록 한다. 예상 손상값을 설계자가 입력한 설계 허용치와 비교하여 설계허용치보다 크면 단면크기를 수정하여 프로그램을 반복 수행하고, 작으면 최종 설계 단면으로 결정한다. 이 과정을 그림으로 나타내면 다음 그림 12와 같다.

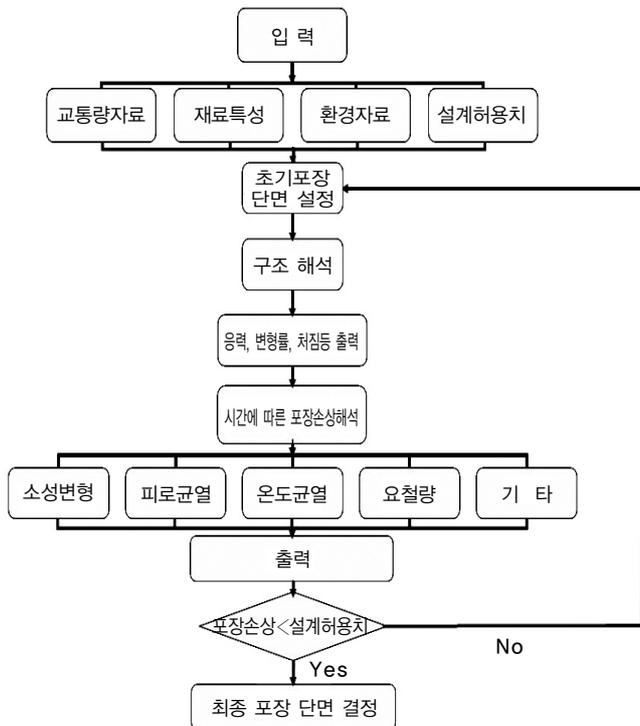


그림 12. MEPDG 설계방법의 흐름도

MEPDG는 Level 1, 2, 3로 나뉘는데, Level 1은 가장 신뢰성이 높은 설계 수준으로써 모든 재료의 특성값을 직접 실험한 결과값으로 입력하도록 되어 있다. 반면, Level 3는 프로그램에 저장되어 있는 기준값들을 사용하므로 재료에 대한 실험이 필요 없는 설계수준이고 Level 2는 입력을 위해 부분적인 실험이 필요한 중간 단계 수준의 설계이다. 본 연구에서는 소성변형값을 예측, 비교하기 위하여 본 연구에서 수행한 회복탄성계수의 실험값 입력은 Level 1 설계를 사용하였고,

그 외의 온도균열과 크리이프값의 예측에 필요한 입력값은 Level 3의 디폴트값을 사용하였다. 본 연구에서 수행한 4가지의 WMA시료와 비교시료인 WMA의 회복탄성계수값 외의 다른 변수들은 동일한 값을 사용하였다. 대표적인 주요 입력자료를 정리해 보면 다음 표 5와 같다.

표 5. MEPDG분석을 위한 주요 입력자료

표층의 두께(in.)	4
기층의 두께(in.)	6
보조기층의 두께(in.)	9
아스팔트혼합물의 기준온도(°F)	39.2(4°C)
유효아스팔트함량(%)	12
아스팔트혼합물의 공극률(%)	6.5
기층의 회복탄성계수(MPa)	12000
보조기층의 회복탄성계수(MPa)	7000
노상의 회복탄성계수(MPa)	3500

MEPDG의 또 다른 특징은 도로설계가 이루어지는 지역의 다양한 기후자료와 교통자료를 입력하여 환경적 요인이 포장설계에 미치는 영향을 반영한다는 것이다. 본 연구에서는 저자가 방문교수로 있던 미국 미시건주 랜싱시의 기후자료와 교통자료를 이용하였다. 아래의 표 6은 표층의 월평균기온, 표 7은 기층의 월평균기온 자료를 보여준다. 표 8과 9는 각각 MEPDG의 교통자료 입력값들과 MEPDG가 요구하는 각 교통류별 분포율을 보여준다.

표 6. 표층의 월평균기온

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
평균(°F)	25.9	31.5	38.7	53.8	63.8	76.8	80.2	76.7	68.4	54.1	41.5	31.5

표 7. 기층의 월평균기온

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
평균(°F)	25.9	31.5	38.5	53.8	63.8	76.8	80.2	76.7	68.4	54.2	41.6	31.4

표 8. MEPDG의 교통자료 입력값

입력 변수	값
초기 양방향 AADT	1000
설계방향의 차로수	2
설계방향의 트럭의 백분율	50
설계차로의 트럭의 백분율	95
평균운행속도(mph)	60
설계차로폭(ft)	12
교통증가율	4%

표 9. 트럭 종류(Class)에 따른 AADT의 분포 백분율

트럭 종류(Class)	분포 백분율
Class 4	1.8%
Class 5	24.6%
Class 6	7.6%
Class 7	0.5%
Class 8	5.0%
Class 9	31.3%
Class 10	7.8%
Class 11	0.8%
Class 12	3.3%
Class 13	15.3%

MEPDG 프로그램 분석으로 소성변형, 피로균열과 같은 포장손상들의 예상값이 출력되는데, 본 연구에서는 MEPDG를 이용하여 얻어지는 예상 소성변형값을 비교용 포장손상값으로 사용하였다. 아래 그림 13은 본 연구에서 사용한 5가지 시료에 대한 포장수명 10년 동안의 예상 소성변형값을 나타낸다.

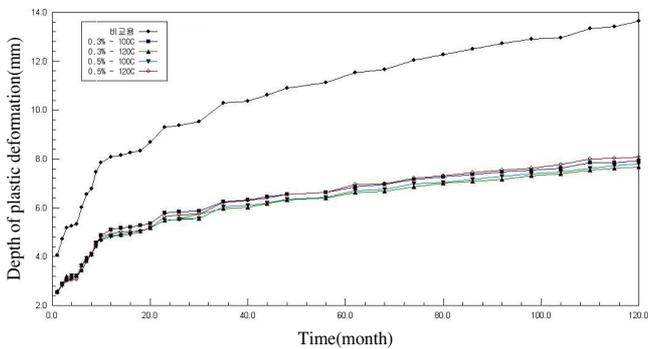


그림 13. 각 시료의 10년동안의 예상 소성변형값

이 결과로부터 WMA시료가 비교용 시료에 비해 소성변형값이 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 혼합온도와 다짐온도를 낮추면 바인더의 노화가능성이 줄어들어 소성변형 가능성도 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 아스파민을 첨가함으로써 중온에서 포설이 가능하도록 할 뿐만 아니라 소성변형에 대한 저항성도 향상시켜 준다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과는 예비시험결과이며, 향후 현장공용성을 평가하고 다양한 변수 조합을 통한 지속적 실험으로 WMA의 역학적 성능을 평가해야 할 것이다.

6. 결론

WMA는 고온혼합과 다짐할 때 발생하는 가스분출을 줄이면서 더 낮은 온도에서 혼합과 다짐을 시행할 수 있는 혼합물이다. 문헌 연구 결과 아스파민을 첨가한 WMA시료는 위커빌리티도 향상시키고, 혼합온도와 다짐온도를 낮출 수 있다

는 것이 밝혀졌다. 본 연구에서 비교용 시료와 WMA시료에 대해 동적회복탄성계수실험을 실시한 결과 아스파민을 첨가한 WMA시료의 회복탄성계수값이 비교용 시료에 비해 대체로 더 크다는 것을 알 수 있었다.

또한 MEPDG설계법으로 일반시료와 WMA시료에 대한 소성변형값을 비교한 결과, WMA시료의 소성변형값이 훨씬 더 낮음을 알 수 있었다. 이는 WMA를 이용한 포장의 소성변형에 대한 저항성을 향상시켜줌으로써 향후 이를 적극적으로 활용할 수 있는 가능성을 제시해 준 것이라고 할 수 있다. 문헌연구에서 언급한 바와 같이 독일의 WMA 단면의 소성변형과 균열율이 HMA와 비슷하거나 더 향상된 공용성 분석자료와도 일치하는 결과를 보여 준다. 그러나 본 연구의 결과는 실내 시험과 포장설계를 통해 얻은 제한된 결과물으로써, 실제 현장에서 WMA를 적용시 골재의 품질이나 낮은 생산온도로 인해 수분민감성이 증가할 수 있으므로 이에 대한 대비를 철저히 마련해야 할 것이다.

앞으로의 과제는 WMA포장의 장기공용성을 현장에서 확인하고 좀 더 다양한 변수를 활용한 실험과 MEPDG설계분석을 실시하는 것이다.

참고 문헌

FHWA.(2007), "Warm Mix Asphalt Technologies and Research", *USDOT FHWA*.

FHWA.(2008), "Warm-Mix Asphalt : European Practice", *NCHRP Report, FHWA-PL-08-007*.

FLDOT.(2009), "FLDOT's Experience with Warm Mix Asphalt", *FLDOT Research Report*.

Hurley, G.C., Prowell, B.D., and Reinke, G.(2006), "Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, pp. 41-90.

Jones, W.(2004), "Warm Mix Asphalt - A STATE-OF-THE-ART Review", *Australian Asphalt Pavement Association Advisory Note 17*.

McKeon, B.(2006), "Aspha-min in Warm Asphalt Mixes", *51st Annual Convention of the National Asphalt Pavement Association*, pp. 67-74.

Prowell, B.D., Hurley, G.C., and Crews, E.(2007), "Field Performance of Warm-Mix Asphalt at the NCAT Test Track", *TRB 86th Annual Meeting*.

Schroer J.(2006), "Warm Mix Asphalt - Missouri's Experience", *MoDOT Research Report*.

Von Devivere, M.(2003), "Warm Asphalt Mixers by Adding a Synthetic Zeolite", *World Road Association*, pp. 121-130.

Wasiuddin, N.M., Selvamohan, S., and Zaman, M.M.(2007), "A Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-min in Warm Mix Asphalt", *TRB 86th Annual Meeting*.

접 수 일 : 2010. 4. 14
 심 사 일 : 2010. 4. 19
 심사완료일 : 2011. 2. 28