

중온형 아스팔트 포장의 실내 및 현장 공용성 평가

Laboratory and Field Performance Evaluation of the Warm Mix Asphalt

이재현* · 신경엽** · 이현종***

Lee, Jae Hyun · Shin, Kyoung Yub · Lee, Hyun Jong

1. 서론

최근 국제적으로 관심이 고조되고 있는 환경문제에 관해 1997년 12월 일본 교토에서 개최된 지구온난화 방지조약 회의(COP3)를 통해 2012년까지 1990년의 CO₂ 배출량을 6%까지 저감하는 것을 내용으로 한 교토 의정서가 협약되면서, 온실가스 저감을 위한 화석에너지의 절감은 국가 경제의 새로운 패러다임이 되고 있다. 이에 건설업체들은 포장의 공용성, 작업성, 자원절약 등을 증가시키고 효율적인 환경관리를 위한 방법을 모색하고 있다.

이러한 흐름에 따라 도로 건설 산업분야에서도 정부의 저탄소 녹색 성장 정책에 대한 친환경 도로포장 기술의 개발이 새로운 화두가 되고 있다. 특히 일반 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 과정에서 필요한 온도의 유지를 위해 많은 양의 화석 연료를 소비하면서 다량의 CO₂ 및 유해물질이 발생하게 된다. 이에 유럽 및 선진국들은 CO₂ 발생 억제, 조기교통개방, 장기공용성의 확보 및 에너지 절약·자원절약을 위한 새로운 포장 재료로서 중온 아스팔트에 대한 기술개발이 이루어지고 있다.

중온 아스팔트 포장은 기존 아스팔트 혼합물의 생산온도를 약 30℃ 저하시키면서 생산 및 운반 후 시공단계에 걸쳐 기존재료와 동일한 다짐성, 작업성 및 역학적 성능을 확보하는 친환경 포장으로서 1960년대부터 개발되기 시작하여 해외에서 다양한 연구와 실험을 바탕으로 상용화되기 시작한 공법으로, 현재 혼합물 성능 향상을 위한 다양한 첨가제, 폼드 기술 등이 개발되어 있는 실정이다(황성도 외 2008).

유럽과 미국 등 도로포장 분야의 선진국에서는 중온 아스팔트 기술을 다양한 방법으로 연구 개발하여 최근에는 다양한 중온 아스팔트 기술을 도로현장에 활발히 적용하고 있지만, 국내에는 최근에서야 중온 아스팔트 포장 기술을 개발하거나 해외에서 도입하여 적용하려고 하고 있다. 표준 시방서 없이 미국에 시공된 몇몇 중온 아스팔트 포장에서 소성변형과 수분손상에 의한 포장파괴가 보고된 사례가 있다(이호신 외 2008).

중온 아스팔트 포장의 국내 도입 및 활용을 높이기 위해서는 중온 아스팔트 기술에 대한 심도 있는 평가가 선행되어야 하며 국내 도입이 가능한 기술의 선정 및 배합조건, 온도 관리 등에 대한 설계 및 시방기준을 제정하여 보다 과학적이고 체계적으로 관리해야 할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구의 주목적은 실내 시험 및 현장 시험시공을 통하여 국내외의 중온 아스팔트 혼합물의 물리역학적 특성을 평가하는데 있다.

2. 중온 아스팔트의 종류 및 특징

2.1 유기 첨가제

유기 첨가제는 대표적으로 Synthetic Waxes(Fischer-Tropsch wax, fatty amide wax), Montan Waxes 두

* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail : dlwogus1212@nate.com)

** 세종대학교 토목환경공학과 석사(E-mail : yub1982@nate.com)

*** 세종대학교 토목환경공학과 교수·공학박사(E-mail : hlee@sejong.ac.kr)



종류의 첨가제가 주로 사용되고 있다. 유기 첨가제는 바인더에 직접 첨가되거나 혼합할 때 첨가되는 형식으로 사용되며 바인더의 물성에 직접적으로 영향을 미친다.

2.2 폼드 공법

폼드 기술은 물 또는 습윤성 골재 등을 가열된 아스팔트에 투입하면서 발생하는 증기에 의한 바인더의 순간적인 체적 팽창으로 점도가 감소하는 원리를 사용한다. 여기서 체적 팽창에 영향을 주는 요소는 첨가되는 물의 양과 바인더의 온도 등이다. 그러나 바인더의 물성에는 영향을 미치지 않는다.

2.3 화학 첨가제

화학 첨가제는 바인더에 직접 첨가되거나 혼합될 때 첨가되고 바인더의 물성에는 영향을 미치지 않으며, 표면활성물질로써 거품을 일으켜 바인더의 점성을 낮추고 작업성을 좋게 하는 역할을 한다.

3. 아스팔트 혼합물의 배합설계

새로운 혼합물을 개발함에 있어 최종 목표는 실제 현장에 새로운 혼합물을 시공하였을 때 만족할 만한 공용성을 가지는 혼합물을 개발하는데 있다. 따라서 현장 시험시공은 새로운 혼합물의 공용성을 평가하는데 있어 필수적인 과정이라 할 수 있다. 그러나 현장 시험시공의 경우 외부 환경조건이나 교통조건의 제약으로 시험시공을 실시하기가 어려우며, 공용성을 확인하기 위해서는 적어도 4년 내지 5년의 기간이 필요한 단점이 있다.

실내 시험을 통한 공용성 평가는 단기간에 가능하며, 시험조건을 동일하게 할 수 있는 장점이 있는 반면, 실제 현장의 교통 및 기후조건을 실내에서 완벽하게 모사할 수 없다는 문제점이 있다. 아스팔트 혼합물의 공용성을 평가하는데 있어 가장 기본적인 접근법으로는 실내시험을 통하여 다양한 종류의 혼합물에 대한 피로 손상과 소성변형 등에 대한 저항성 등을 비교 평가하고 현장시험시공을 통하여 실내 시험의 결과를 검증하는 것이 가장 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 포장에 적용하기 위하여 아스팔트 바인더 등급을 PG76-22로 제한을 두었다. 일반 개질 아스팔트로 배합설계를 실시하고, 그 것을 바탕으로 국산 중온 아스팔트, 외국 중온 아스팔트의 혼합물을 제작하여 실내시험을 통한 수분손상과 소성변형 등에 대한 저항성을 평가하고자 한다.

3.1 아스팔트 바인더

본 연구에서는 중온 개질 첨가제를 첨가하기 위한 베이스 바인더로 PG64-22인 바인더를 사용하였고, 비교 평가용으로 SBS 폴리머가 첨가된 PG76-22인 바인더를 사용하였다.

3.2 중온 개질제

바인더에 개질제를 첨가하는 방법으로 A, B, C 세 종류의 중온 개질제를 사용하였다. A 제품은 자체 개질 및 중온 기능이 있어 PG64-22 바인더에 첨가하여 PG76-22 중온 개질 아스팔트를 제조하였다. 반면 B, C 제품은 자체 중온 기능만 있어 PG64-22 바인더에 폴리머 개질제와 중온 첨가제를 첨가하여 중온 개질 아스팔트를 제조하였다. 중온 개질제의 첨가량은 제품마다 차이가 있다. 표 3.1에 제품별 첨가량을 나타내었다.

표 3.1 아스팔트 바인더의 중량 대비 중온 첨가제 및 폴리머 개질제 첨가량

구분	A	B	C	일반 개질
중온 첨가제명	A type	B type	C type	비교 평가용
개질제 첨가량(%)	·	0.5	3	Pre-mix
중온 개질제 첨가량(%)	3	3.5	1.5	

3.3 골재 입도

목표로 하는 골재의 입도를 얻기 위해서 일반적으로 사용되는 방법은 3~4종류의 최대입경 및 입도가 다른 골재를 합성하는 것이나 이러한 방법은 항상 동일한 골재입도를 얻기가 힘들다는 문제점이 있다. 이는 결국 혼합물의 생산 시 시편과 시편간의 물성변화를 초래할 우려가 있기 때문에 본 연구에서는 먼저 골재를 체크기별로 세분화하여 체가름을 실시한 다음, 이를 합성하여 사용하였다. 골재 입경의 최대치수가 19mm인 골재를 사용하여 배합설계를 실시하였다.

본 연구에서는 국내 혼합골재의 입도기준인 WC-3 (19mm) 골재입도를 모두 만족하는 범위 내에서 결정하였으며, 입도분포는 표 3.2와 같다.

표 3.2 시방입도 범위 및 사용입도

체크기		시방입도		사용입도(%)
		상한치(%)	하한치(%)	
통과 중량 백분 율 (%)	25mm	100	100	100
	19mm	100	90	95
	13mm	90	72	81
	10mm	80	56	68
	5mm	65	35	50
	2.5mm	49	23	36
	0.6mm	28	10	19
	0.3mm	19	5	12
	0.15mm	13	3	8
0.075mm	8	2	5	

3.4 배합설계 절차

중운 아스팔트 혼합물의 배합설계를 위하여 PG76-22 바인더의 함량을 0.5%씩 달리하여 각 함량별로 마샬공시체를 제작한다. 양면 75회의 다짐을 실시하여 목표 공극률 4%에 해당하는 바인더 함량을 결정하고, 중운 개질제의 함량은 제품별 시방규정에 따라 첨가하였다. 그림 3.1은 배합설계 순서를 나타낸 것이다.

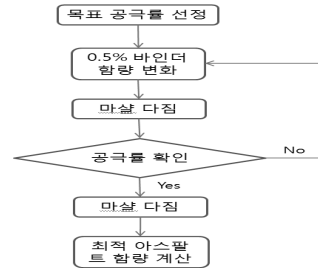


그림 3.1 배합설계 순서

4. 실내시험

앞서 언급한 바와 같이 중운 아스팔트 혼합물의 공용특성을 분석하기 위하여 다양한 실내시험을 수행하였다. 온도별 다짐도를 확인하기 위하여 온도별 다짐도 시험을 수행하였으며, 내유동 특성을 분석하기 위하여 휠트래킹 시험을 수행하였다. 또한 수분으로 인한 영향을 평가하기 위해 수분손상, 저온에서의 균열저항성 분석을 위한 저온 휨시험을 수행하였다.

본 연구의 실내 공용성 평가를 위한 공시체 제작에 사용되는 모든 아스팔트 혼합물은 표 4.1(a)와 같이 제품별 적정 혼합온도와 개질제 함량을 적용하였고 2시간의 단기 노화 후 제작하였다.

국산 및 외국 중운 아스팔트와 개질 아스팔트 콘크리트 시편을 이용하여 실내 공용성 시험을 실시하였다. 시험계획은 표 4.1(b)와 같다.

표 4.1 중온 아스팔트 혼합물 실내 시험계획

시편유형	개질제 함량(%)	혼합온도 (°C)	비고
A	3	130	-
B	4	140	-
C	4.5	140	-
일반 개질	Pre-mix 타입	170	(PMA)

(a) 중온 아스팔트 시편제작

시험명	시편	시험 변수
온도별 다짐도 시험	3	다짐 횟수 : 양면 75회 제품별 다짐온도
휠 트래킹 시험	3	시험온도 : 60 °C 윤하중 : 686N
수분손상 시험	6	시험온도 : 대기온도 하중재하속도 : 50mm/분
저온 휨 시험	6	시험 온도 : -10, 0 °C 하중재하속도 : 50mm/분

(b) 실내 시험계획

4.1 온도별 다짐도

중온 아스팔트의 작업성과 다짐도를 측정하기 위하여 각 제품별 온도별 다짐도 시험을 실시하였으며, 결과는 그림 4.1과 같다.

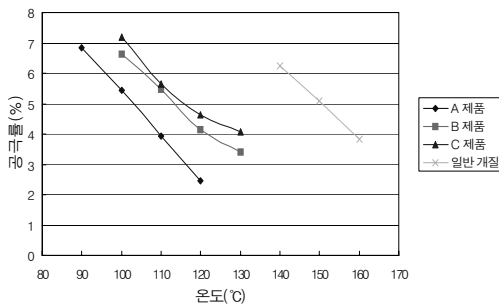


그림 4.1 온도별 공극률 변화

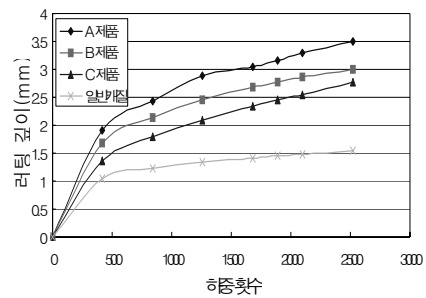


그림 4.2 각 제품별 휠트래킹 시험결과

그림 4.1에서 보는 바와 같이 중온 아스팔트인 A, B, C 제품이 일반 개질 아스팔트에 비해 30~40°C 낮은 온도에서 목표 공극률(4%)을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 일반 개질 아스팔트의 경우 공극률이 4%에서 7%로 변하는데 20°C의 차이가 있는 반면에 B, C 제품은 4%에서 7%로 변하는데 30°C의 차이가 있음을 알 수 있었고, 따라서 작업성 또한 중온 제품이 효과가 좋음을 알 수 있었다. 또한 A 제품이 B, C 제품에 비해 가장 낮은 온도에서 목표 공극률을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

4.2 소성변형

휠트래킹 시험은 소성변형을 실내에서 재현하여 평가하는 속성시험으로, 반복주행으로 인한 바퀴패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도(Dynamic Stability)를 결정할 수 있다. 소성변형에 대한 공용성을 분석하기 위하여 일반 및 중온 개질 아스팔트 혼합물에 대해 휠트래킹 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 접지압 100%를 가하였을 때의 일반적인 시험방법인 686N의 윤하중을 가하여 각각의 혼합물에 대하여 시험을 수행하였다. 그림 4.2는 제품별 휠트래킹 시험 측정 결과이다.

전반적으로 일반 개질 아스팔트에 비해 소성변형에 대한 저항성이 반 이상 감소한 것으로 나타났다.

휠트래킹 시험을 통해 각 혼합물에 대하여 동적안정도를 산정해 소성변형에 대한 저항성을 상대 비교하였으며, 결과는 표 4.2와 같다. 동적안정도에 있어서도 그림 4.2의 결과와 유사하게 일반 개질 아스팔트에 비해 중온 제품들의 소성변형 저항성이 상당히 감소함을 알 수 있다.



표 4.2 윤하중 686N에서의 동적안정도 비교

	A 제품	B 제품	C 제품	일반 개질
동적 안정도 (회/mm)	1924	2709	2002	7203

그러나 표 4.2에서 보는 바와 같이 A 제품을 제외한 중은 혼합물 B, C 모두 동적안정도가 한국 도로공사 SMA 표층의 기준치인 2,000(회/mm)을 상회하여 소성변형에 대한 저항성은 어느 정도 확보가 가능한 것으로 나타났다. 중은 제품의 특징은 점도를 낮추어 저감된 온도에서 다짐도를 확보하는데 있다. 이러한 특징 때문에 60℃에서 바인더의 점도가 낮아져 일반 개질 아스팔트에 비해 중은 아스팔트 A, B, C 제품의 소성변형에 대한 저항성이 낮아져 표 4.2와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

4.3 수분손상

표 4.3에서 보는 바와 같이 A 제품을 제외한 모든 제품의 시편들이 간접인장 강도비의 시방기준인 80%를 만족하는 것으로 나타났다. 국내 제품 B인 경우는 국외 제품인 C에 비해 수분에 대한 저항성이 손색이 없음을 알 수 있었다. 그러나 기존 혼합물에 비해서는 5~7% 감소하는 것으로 나타나 수분손상에 대한 저항성을 향상시킬 수 있는 방법을 모색할 필요가 있다.

중은 아스팔트 혼합물의 간접인장 강도비의 값이 낮은 이유는 일반 개질 아스팔트에 비해 가열 온도가 낮아 골재를 충분히 가열시키지 못하기 때문에 골재 내부에 포함되어 있는 수분까지 충분히 제거시키기가 어렵기 때문이다. 국내의 경우 골재 관리가 어렵기 때문에 이에 대한 방안을 모색할 필요가 있다.

표 4.3 수분손상시험에 의한 간접인장강도비

ID		강도(N/mm ²)	평균 강도(N/mm ²)	TSR(%)	
A 제품	건조	1	0.774	63.8	
		2	0.803		
		3	0.761		
	수침	1	0.543		0.497
		2	0.457		
		3	0.491		
B 제품	건조	1	1.021	85.3	
		2	0.916		
		3	0.784		
	수침	1	0.842		0.774
		2	0.647		
		3	0.832		
C 제품	건조	1	0.755	88.8	
		2	0.871		
		3	0.951		
	수침	1	0.753		0.763
		2	0.799		
		3	0.735		
일반 개질	건조	1	0.934	92.5	
		2	0.937		
		3	0.925		
	수침	1	0.883		0.862
		2	0.809		
		3	0.895		

4.4 저온 휨 시험

혼합물의 저온 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 -10°C , 0°C 에서 저온 휨 시험을 실시하였다. 파괴시 변형률은 공시체 파괴시의 처짐량을 구하고, 파괴시의 휨강도는 공시체 파괴시의 재하하중의 크기를 측정하여 산정하였다.

시험 결과를 살펴보면, 표 4.4에서 보는 것처럼 중은 혼합물 제품이 일반 개질 혼합물에 비해 저온에서의 균열에 다소 취약함을 알 수 있다.

표 4.4 각 혼합물에 대한 저온 휨강도와 변형율

혼합물 종류	시험온도($^{\circ}\text{C}$)	변형률 평균	평균 휨강도 (MPa)
A 제품	0	0.00517	5.38
	-10	0.00416	5.55
B 제품	0	0.00430	5.32
	-10	0.00445	6.09
C 제품	0	0.00515	5.99
	-10	0.00404	6.08
일반 개질	0	0.00698	9.04
	-10	0.00458	5.97

5. 현장 시험시공

실내시험을 통해 물리적 시험을 실시한 중은 아스팔트 포장의 공용성을 평가하기 위해서 2010년 11월 10일에 경부고속도로(부산방향) 안성IC부근에서 총연장 900m의 현장 시험시공을 실시하였다. 실내 시험 결과가 양호하지 못하게 나온 A제품은 제외하였다.

5.1 생산온도, 포설온도 및 다짐온도

플랜트에서 생산되는 각 제품별 혼합물 생산온도를 측정하였다. 측정된 값은 다음 표 5.1과 같다. 중은 아스팔트 혼합물의 생산 적정온도인 $130^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였다.

1차, 2차, 3차 다짐 온도는 각 제품별 시공지침서를 참조하여 적정온도에서 다짐을 실시하였다.

표 5.1 제품별 생산온도 및 포설온도

	B 제품	C 제품	일반개질
생산온도	145	140	185
포설온도	140	135	175
1차 다짐온도	111	113	143
2차 다짐온도	86	87	118
3차 다짐온도	66	66	99

5.2 연료소모량 비교

플랜트에서 아스팔트 혼합물을 생산할 때 소모되는 연료 소모량을 측정하였다.



표 5.2 제품별 연료 소모량

구분	단위	B 제품	C 제품	일반개질
병커C유사용량(1t 당)	ℓ	9	9.9	14.3
절감율	%	37.1	30.8	0

생산온도 저감으로 인하여 연료소모량도 일반 아스팔트 혼합물에 비해 30~40% 절감되는 것으로 나타났다.

5.3 CO₂ 저감효과

플랜트에서 아스팔트 혼합물을 생산할 때 발생하는 CO₂ 발생량을 측정하였다.

표 5.3 제품별 CO₂ 배출량 비교

구분	단위	B 제품	C 제품	일반개질
아스콘1톤당 CO ₂ 배출량	kg	27.0	30.3	43.3
CO ₂ 절감율	%	39.2	32.5	0

생산온도 저감으로 인하여 CO₂ 배출량도 일반 아스팔트 혼합물에 비해 30~40% 감소하는 것으로 나타났다.

5.4 다짐도

중온 아스팔트 포장의 현장 다짐도를 측정하여 일반개질 아스팔트와 다짐도를 비교하였다.

표 5.4 제품별 다짐도

	1차 다짐			2차 다짐			3차 다짐		
	휠패스	도로 센터	다짐 끝부분	휠패스	도로 센터	다짐 끝부분	휠패스	도로 센터	다짐 끝부분
B 제품	88.0	89.2	89.0	94.6	93.1	94.1	98.0	96.5	97.2
C 제품	89.9	91.7	92.3	98.5	96.7	96.2	97.7	97.3	96.1
일반개질	89.0	89.8	90.4	95.3	94.5	94.9	95.4	94.1	94.9

다짐도를 측정한 결과 표 5.4에서도 나타나듯이 목표다짐도인 96% 이상으로 나타나 일반개질 아스팔트에 비해서 다짐도를 1~2% 더 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

5.5 교통개방시간

아스팔트 혼합물 포설시 Thermocoupled을 매설하여 시간대별 온도 변화 추이를 조사하였다.

보통 교통 개방 온도를 40℃라고 했을 때, 중온 아스팔트 포장은 일반 아스팔트 포장에 비해서 교통개방시간이 약 40분 단축됨을 그림 5.1에서 알 수 있다.

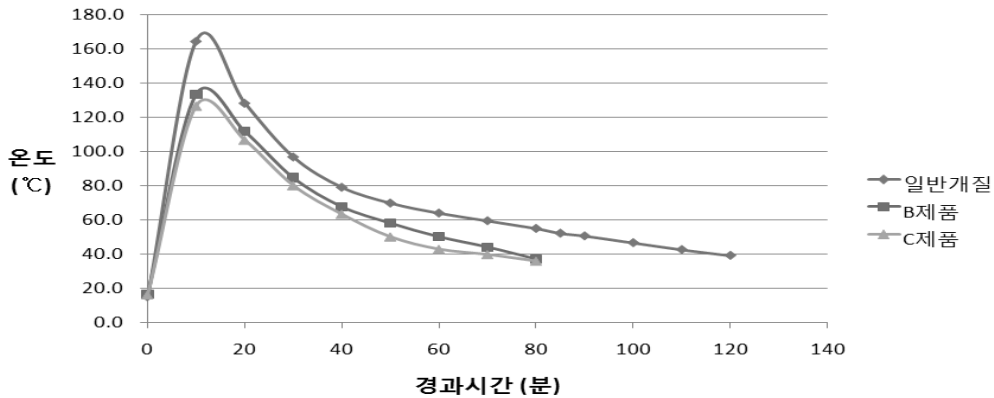


그림 5.1 포설 직후 시간대별 온도 변화 추이

6. 결 론

중온 아스팔트의 작업성과 다짐도를 측정하기 위하여 온도별 다짐도 시험을 실시하였으며, 개질 아스팔트에 비하여 중온 아스팔트인 A, B, C제품이 30~40℃ 낮은 온도에서 목표 공극률을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 개질 아스팔트의 경우 공극률이 4%에서 7%로 변하는데 20℃의 차이가 있는 반면에 B, C 제품은 4%에서 7%로 변하는데 30℃의 차이가 있음을 알 수 있었고, 따라서 작업성 또한 중온 제품인 A, B, C 제품이 효과가 좋음을 알 수 있었다.

중온 아스팔트의 소성변형을 측정하기 위하여 휠트래킹 시험을 실시하였으며 각 혼합물에 대하여 동적인 정도를 산정해 소성변형에 대한 저항성을 상대 비교하였다. A 제품을 제외한 혼합물 모두 동적 안정도가 한국도로공사 SMA 표층 기준치인 2000(회/mm)을 상회하여 소성변형에 대한 저항성은 확보할 것으로 나타났으나 전반적으로 중온 첨가제를 첨가할 경우 소성변형에 대한 저항성이 감소하므로 이에 대한 보완 연구가 시급함을 알 수 있다.

마찰 시편을 제작하여 60℃에서 24시간, 25℃에서 1시간 동안 수침시킨 마찰 시편과 건조 마찰 시편을 가지고 간접인장 강도를 측정하여 수분 저항성을 측정하였다. A 제품을 제외한 모든 제품의 시편들이 간접인장 강도비의 시방기준인 80%를 만족하는 것으로 나타났다.

혼합물의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 -10℃, 0℃에서 저온 휨 시험을 실시하였다. A, B, C 제품의 경우 온도가 감소함에 따라 휨강도는 증가하였지만, 일반 개질 아스팔트의 경우 온도가 감소함에 따라 휨강도가 감소하였다. 0℃에서는 일반 개질 아스팔트가 중온 아스팔트 혼합물보다 변형률 및 휨강도가 큰 것으로 나타났고, -10℃에서는 A, B, C 제품, 개질 아스팔트 모두 비슷한 휨강도와 변형률을 보임을 알 수 있었다.

실내 시험결과 중온 아스팔트의 공용성은 전반적으로 일반 개질 혼합물에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

현장 시험시공에서는 중온 아스팔트의 경우 일반 아스팔트 포장에 비해서 낮은 생산온도로 인한 연료소모량 절감, CO₂ 배출량 감소, 빠른 교통개방시간 확보를 할 수 있는 것으로 나타나 친환경적이고 경제적인 것으로 나타났으며, 다짐도도 일반 아스팔트 포장에 비해 전혀 뒤떨어지지 않는 것으로 나타났다. 그러나 이것은 시험시공 직후에 실시된 시험 및 측정값으로 공용성 확보에 대한 결과물은 시공 후 4~5년 후에나 나타날 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 황성도 등 (2008), “중온화 아스팔트 포장공법의 국내의 기술현황”, 한국도로학회 도로학회지, 한국도로학회
- [2] 황성도 등 (2009), “저탄소 아스팔트 포장 기술”, 한국도로학회 도로학회지, 한국도로학회
- [3] 문성호 (2009), “중온 아스팔트 첨가제 SASOBIT 성능평가”, 한국도로학회 도로학회지, 한국도로학회
- [4] 이호신 등 (2008), “미국의 중온아스팔트 기술 및 현장적용” 한국도로학회 학술대회논문집, 한국도로학회
- [5] 조동우 등 (2009), “유럽의 저탄소 중온아스팔트 포장(WMA)의 기술 현황” 한국도로학회 도로학회지, 한국도로학회
- [6] 권승준 등 (2001), “포아슨 비의 변화를 고려한 수정 ECM 모델 개발 및 아스팔트 콘크리트의 저온 특성 연구” 한국도로포장공학회지, 한국도로포장공학회
- [7] 국토해양부 (2010), “저탄소 중온 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 잠정지침” 국토해양부
- [8] 신경엽 (2011), “중온형 아스팔트 포장공법의 실내 공용성 평가” 세종대학교 대학원, 토목환경공학과
- [9] Powell, B., Hurley, G. Warm-Mix Asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD, 2007.
- [10] D'Angelo, D., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. Warm-Mix Asphalt European Practice. International Technology Scanning Program, Federal Highway Administration, 2008.
- [11] Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W., Mooney, K. Assessment of Workability/Compactability of Warm Mix Asphalt. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 89th Annual Meeting, No 10-2223, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2010.