

# 수분에 의한 아스팔트 혼합물의 공용특성 분석에 관한 연구

## A Study on Performance Characteristics of Asphalt Mixtures with Moisture Effect

조성환\* · 이석근\*\* · 최진호\*\*\*

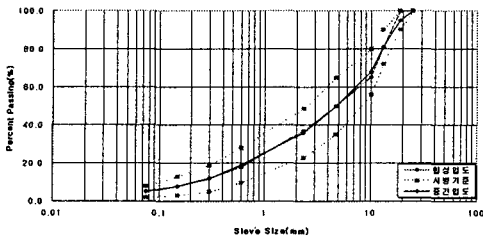
### 1. 서론

최근에는 수분 침투로 인한 포장 파손이 아스팔트 포장의 주요 파손 유형중의 하나로 부각되어지고 있다. 수분 침투에 의한 아스팔트 포장의 파손현상은 소성변형, 저온균열, 피로균열등과 같은 공용성 항목과 연관되어 발생하는 경우가 빈번하므로 본 연구에서는 수분의 영향에 따른 아스팔트 혼합물의 공용특성에 대한 분석을 토대로 공용특성과 수분민감성에 대한 관계를 규명하고, 적절한 재료를 선정하고자 한다. 국내 KS F 2349에 소개 되어있는 마찰 잔류 안정도 시험법의 수분처리 방법 및 평가방법을 개선하는 것이 본 연구의 목표이다. 그리하여 국내 실정에 맞고 현장에서도 손쉽게 사용할 수 있는 실용적인 수분민감도 측정 방법을 제시하고자 한다.

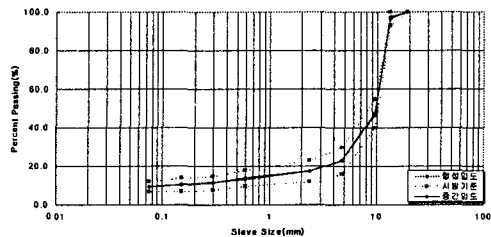
### 2. 사용재료와 배합설계

#### 2.1 사용재료

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용하는 일반 AP-5와 SBS 첨가제 및 아민계열의 박리방지제가 첨가된 SBS 개질 아스팔트를 사용하며, 본 연구에 사용된 골재는 전국적으로 분포되어 있고 화학적·물리적 성질이 우수하며 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 경기도 용인시 소재의 화강암을 선정하여 실험에 사용하였고, 채움재로는 국내에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 생석회와 박리방지제로 사용되는 소석회를 사용하였다. WC-3(밀입도 19mm 혼합물, 고속도로공사 전문시방서 참조) 입도와 SMA 13mm 입도에 대해 일반(생석회), 소석회, 개질1, 개질2, SMA 혼합물을 제작하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 WC-3입도를 나타내고, 그림 2는 SMA 13mm 입도를 나타낸다.



<그림 1> WC-3의 입도곡선



<그림 2> SMA 13mm의 입도곡선

\* 정희원 · 경희대학교 토목공학과 · 공학석사 · 031-201-2923 (E-mail : kapimax@lycos.co.kr)

\*\* 정희원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-201-2900 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · 031-201-2923 (E-mail : khutb97@hanmail.net)



## 2.2 배합설계

본 연구의 배합설계에서는 WC-3 입도에 대하여 설계입도와 AP-5 아스팔트, SBS 개질 아스팔트를 사용하였고, SMA 13mm 입도에 대해서는 설계입도와 AP-5 아스팔트를 사용하여 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 일반, 소석회, 개질1, 개질2 혼합물의 배합설계의 경우 아스팔트 함량을 골재 총 중량의 5.0%를 기준으로  $\pm 0.5\%$ 와  $\pm 1\%$ 씩 변화시켜 각 함량별 공시체를 각각 4개씩 제작하여 최적 아스팔트 함량 산출에 이용하였고, SMA 혼합물의 경우에는 아스팔트 함량을 골재 총 중량의 6.6%를 기준으로  $\pm 0.4\%$ 씩 변화시켜 최적 아스팔트 함량 산출에 이용하였으며 일반 혼합물의 경우 4.8%, 소석회 혼합물의 경우 4.7%, 개질1 혼합물과 개질2 혼합물의 경우 4.5%, SMA 혼합물의 경우 6.8%로 결정되었다. 공시체는 KS F 2337-95의 “마살 시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법”에 따라 제조하였다.

## 3. 시험 방법

### 3.1 시험 시편의 수분처리 방법

#### 3.1.1 마살 잔류 안정도 시편의 수분처리

마살 잔류 안정도 시험용 시편의 수분처리는 여름철 아스팔트 포장도로의 최고 온도인 60℃에서 기존의 수침시간인 30분과 48시간의에 포화도 실험을 통해 결정된 수침 시간을 적용하여 마살 안정도 시험을 수행하였다.

#### 3.1.2 AASHTO T-283 Modified Lottman에 의한 시편의 수분처리

수분에 의한 아스팔트 혼합물의 거동특성을 평가하기 위해 각 혼합물에 대해서 건조에 따른 내부 수분의 변화특성을 조사하였다. 이를 위해, 시편의 밀도를 이용하여 체적을 측정된 후, 진공 포화를 시키고 포화도를 측정하였다. 이때 포화도가 55~80%의 포화도를 만족하면 AASHTO T-283 규정에 의한 시편의 동결융해 과정을 수행하였고, 진공 수준은 AASHTO T-283 규정에 따른 수분 포화도 55~80% 및 진공수준 13~67kPa(100~500mmHg)를 만족하는 결과를 얻기 위해 모든 혼합물에 대해 일률적으로 65kPa를 적용하여 진공 포화시킨 후 포화도를 측정된 결과 일반, 개질1 혼합물의 경우는 포화도 55~80% 규정을 만족하였지만 소석회, 개질2, SMA 혼합물의 경우는 포화도 80%를 넘는 시편들이 발생하여 60kPa로 진공포화 시킨 후 포화도를 측정하였다. 그 결과 소석회, 개질2, SMA 혼합물의 포화도 또한 55~80%의 포화도 규정을 만족하였다.

### 3.2 실내 실험

#### 3.2.1 마살 잔류 안정도 시험(Marshall Residual Stability Test)

마살 안정도 시험(ASTM D 1559)의 목적은 표준 실험실 다짐도로 다져진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것이다. 또한, 이 시험법은 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위한 마살 배합설계의 일부 물성 항목으로 사용되며, 아스팔트 혼합물의 품질 관리에도 사용된다(아스팔트포장연구회, 1999). 이 시험의 평가 방법은 기준이 되는 시편을 60℃ 시험온도에서 30분 동안 수침하여 마살 안정도를 구하고, 수분의 영향을 받아야 하는 시편에 대해서는 60℃ 시험온도에서 48시간 동안 수침한 후 마살 안정도를 구한다. 그리고 여기서 얻어진 두 시편의 마살 안정도 값을 비율로 나타내면 이 값이 마살 잔류 안정도 값이 되고 잔류 안정도가 0.75이하이면 수분에 민감한 혼합물로 평가된다(KSA 한국표준 협회, 1998a). 본 연구에서는 S사의 마살 안정도 시험기를 이용하여 KS F 2337의 기준에 따라 시험을 실시하였다.

#### 3.2.2 간접 인장 강도시험(Indirect Tensile Strength Test)

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 저온과 상온에 대한 균열 저항성 평가 및 수분의 영향에 따른 특성을





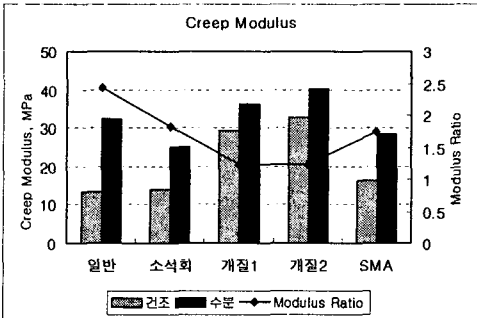
<표 1> 시험에 따른 혼합물 종류별 수분민감도 특성

시험 결과		혼합물 종류				
		일반	소석회	개질1	개질2	SMA
Creep Modulus, MPa	건조	13.30	13.91	29.42	32.75	16.34
	수분	32.38	25.29	36.32	40.28	28.49
Modulus Ratio		2.435	1.819	1.235	1.230	1.744
ITS(5℃), kg/cm <sup>2</sup>	건조	38.42	37.11	46.39	47.64	34.34
	수분	29.41	30.44	39.43	42.83	28.78
TSR(5℃)		0.765	0.820	0.849	0.898	0.838
Toughness(5℃), kg · cm	건조	610.92	623.06	477.25	654.50	806.98
	수분	451.17	458.77	420.07	523.85	608.23
Toughness Ratio		0.740	0.740	0.880	0.800	0.750
ITS(25℃), kg/cm <sup>2</sup>	건조	16.25	16.47	17.14	23.76	10.48
	수분	12.79	13.37	13.63	21.12	8.29
TSR(25℃)		0.787	0.812	0.796	0.889	0.791
Toughness(25℃), kg · cm	건조	439.29	451.66	369.72	466.88	320.78
	수분	540.80	525.10	422.11	523.84	361.29
Toughness Ratio		1.230	1.160	1.140	1.120	1.130
Marshall Stability, kg	수침 30분	1378.2	1422.8	1452.8	1980.5	978.1
	수침 48시간	1173.3	1233.3	1235.8	1821.2	868.2
Marshall Residual Stability		0.851	0.867	0.851	0.920	0.888

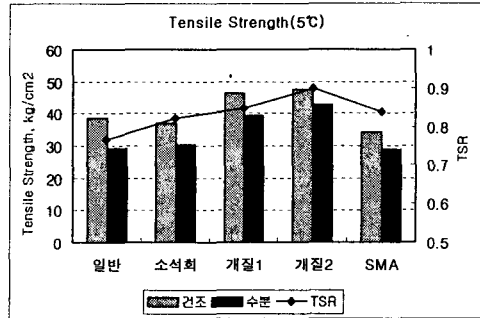
모든 혼합물에 대해서 TSR이 0.75를 넘는 결과를 보였다. 이때 개질2 혼합물이 5℃ 저온과 25℃ 상온에서 각각 0.898과 0.889의 TSR을 가지면서 수분에 대한 저항성이 가장 큰 혼합물이라는 결과를 나타내었고, 박리 방지제로 널리 쓰이는 소석회가 첨가된 혼합물이 일반 혼합물에 비해 수분에 대한 저항성이 우수하였다. 하지만 개질1 혼합물의 경우 25℃ 상온 결과에서는 TSR 값이 다소 낮은 결과를 보였다. 또한 SMA 입도를 사용한 혼합물은 5℃ 저온이나 25℃ 상온에서 WC-3 입도의 일반 혼합물 보다 수분에 대한 저항성이 우수하다는 결과를 보였다.

개질1, 개질2, SMA 혼합물은 저온과 상온에서 모두 Toughness Ratio가 우수하게 나타났다. 이로 미루어 보아 이 세 가지 혼합물은 수분의 영향을 받았을 때 균열 저항성면에서 우수하다고 판단된다. 마찰 안정도 시험에서는 잔류 안정도가 0.920으로 개질2 혼합물이 가장 우수하였고, 그 다음으로 SMA, 소석회 혼합물이었다. 또한 개질1 혼합물의 경우 0.851의 잔류 안정도 값을 가지면서 일반 혼합물과 같은 결과를 보였다.

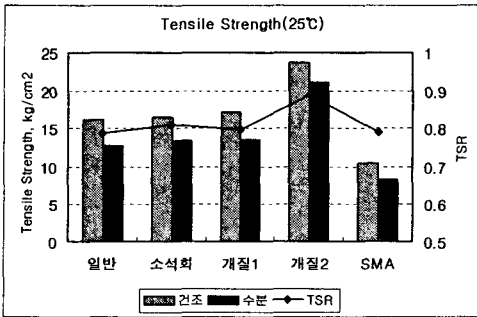
위의 결과들을 토대로 개질2 혼합물이 가장 수분에 대한 저항성이 우수하다고 판단되고, 수분의 영향을 받았을 때 균열 저항성면에서는 SMA 혼합물도 우수한 특성을 지녔다고 판단된다. 또한 개질제를 넣은 혼합물에서 수분에 대한 저항성이 다소 증가된 효과를 볼 수 있었으나 개질1 혼합물의 각 시험에서의 결과들을 놓고 볼 때 개질제의 특성, 혼합과정 및 혼합시간등도 고려해야 할 중요한 요인인 것으로 판단되어진다.



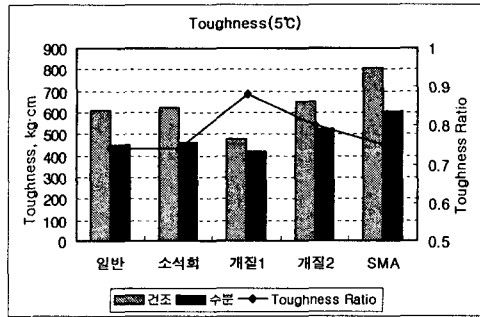
<그림 3> 크리프 시험에 따른 혼합물 종류별 수분민감도



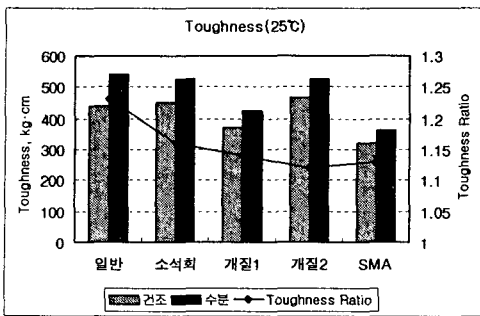
<그림 4> ITS(5°C) 시험에 따른 혼합물 종류별 수분민감도



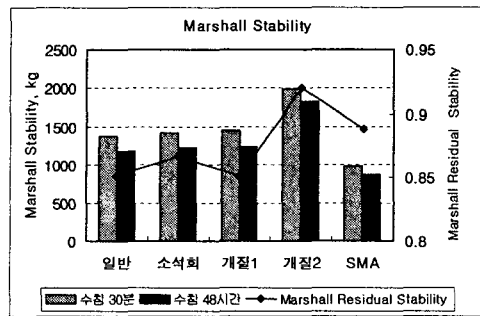
<그림 5> ITS(25°C) 시험에 따른 혼합물 종류별 수분민감도



<그림 6> 터프니스(5°C)에 따른 혼합물 종류별 수분민감도



<그림 7> 터프니스(25°C)에 따른 혼합물 종류별 수분민감도



<그림 8> 마샬 안정도 시험에 따른 혼합물 종류별 수분민감도

#### 4.4 공용특성과 수분민감성 관계 분석

본 연구에서는 공용특성과 수분민감성의 관계규명을 위해 혼합물별 수분민감도를 시험별로 구분하여 평균을 구하였는데, 크리프 시험이나 25°C 터프니스 결과에서 수분의 영향을 받은 시편이 건조 시편보다 큰 값을 보여 Modulus Ratio와 Toughness Ratio의 평균이 1을 넘었다. 그리하여 다른 시험 결과와 비교를 하기 위해선 보정이 필요했다. 공용특성과 수분민감성의 관계를 분석하기 위해서는 아스팔트 혼합물이 수분의 영향에 의해 물성이 향상 혹은 저하 되는 현상보다 물성 변화가 얼마나 발생했느냐에 초점을 두기 때문에 수



분의 영향을 받았을때 수분의 영향이 없는 상태, 즉 건조에 대한 수분의 비가 1인 상태를 기준하여 보정을 실시하였다. 다음 <표 2>는 혼합물별 수분민감도를 시험별로 구분하여 나타낸 표이다.

<표 2>에서 볼 수 있듯이 수분민감도는 소성변형 특성을 파악하기 위해 실시한 크리프 시험, 저온균열 특성을 파악하기 위해 실시한 5℃ 터프니스, 피로특성을 파악하기 위해 실시한 25℃ 터프니스 순으로 나타났다. 이상의 결과를 토대로 공용특성 항목 중 소성변형 특성이 수분에 가장 민감한 것으로 판단되고, 피로 특성이 수분에 가장 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

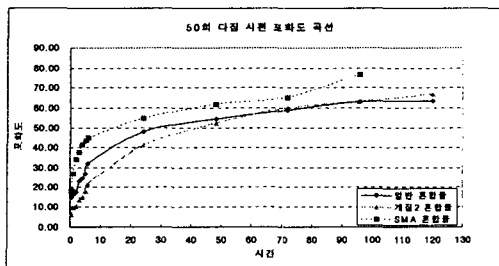
<표 2> 시험별 수분민감도

시험 항목	수분민감도	평균	표준편차	보정값
Creep	Modulus Ratio	1.693	0.498	0.693
ITS(5℃)	TSR(5℃)	0.834	0.048	0.166
Toughness(5℃)	Toughness Ratio(5℃)	0.782	0.060	0.218
ITS(25℃)	TSR(25℃)	0.815	0.042	0.185
Toughness(25℃)	Toughness Ratio(25℃)	1.156	0.044	0.156
Marshall stability	Marshall Residual Stability	0.875	0.029	0.125

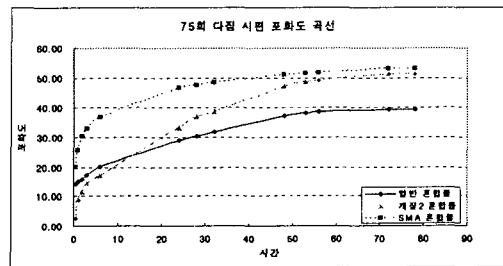
#### 4.5 마샬 잔류 안정도 시험 결과 분석

##### 4.5.1 포화도 실험 결과

본 연구에서는 마샬 잔류 안정도 시험의 수분처리를 수행하기 이전에 적절한 수침 시간을 결정하기 위한 예비 실험으로 일반, 개질2, SMA 혼합물에 대해서 50회 다짐 시편과 75회 다짐시편을 약 80~120시간 동안 수침 시키면서 시간대 별로 각 시편의 포화도를 여러 차례 측정한 후 이를 평균하여 포화도를 구하였다. <그림 9>와 <그림 10>은 다짐도에 따른 혼합물별 평균 포화도 결과이다. 포화도 측정시 사용한 시편들은 공극률 4.0%를 목표로 하고 제작된 시편으로 공극률이 3.8~4.3% 범위내에 존재하였다. <그림 9>에서 볼 수 있듯이 50회 다짐 시편의 경우는 포화도가 100시간 이후에서 수렴하는 혼합물도 있고 조금씩 증가하는 혼합물도 있었지만, 72시간대에서 60%정도의 포화도 결과를 보였고, SMA 혼합물의 경우 72~96시간 지점에서 균열이 대부분의 시편에 발생하면서 포화도가 급격하게 증가했다. 따라서 SMA 혼합물의 경우, 96시간 이후의 시간에 대해서는 이미 균열이 발생한 상태이므로 더 이상의 포화도 측정이 무의미하다고 판단하였고, 이상의 결과를 토대로 수침시간을 72시간으로 결정했다.



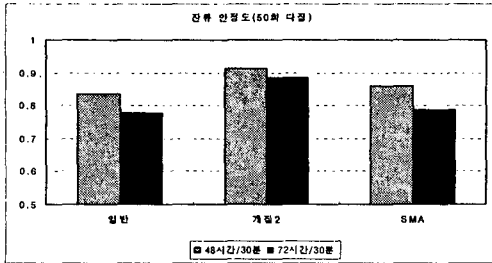
<그림 9> 50회 다짐 시편의 포화도 곡선



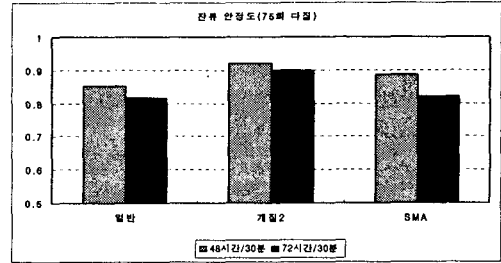
<그림 10> 75회 다짐 시편의 포화도 곡선

##### 4.5.2 잔류 안정도 결과

<그림 11>와 <그림 12>에서 볼 수 있듯이 개질2 혼합물이 가장 큰 잔류 안정도 값을 보였고, 수침 시간이 증가할수록 잔류 안정도는 감소하는 경향을 보였다.



<그림 11> 50회 다짐도에 따른 잔류 안정도



<그림 12> 75회 다짐도에 따른 잔류 안정도

본 연구에서는 다짐도와 수침시간에 대한 분석을 위해 <표 3>에 다짐횟수에 따른 잔류 안정도 변화를 나타내었고, <표 4>에 수침시간에 따른 잔류 안정도의 변동계수(Coefficient of Variation)를 구하였다. <표 3>에서 보듯이 개질2 혼합물이 다짐횟수에 영향을 적게 받는 결과를 나타내었고, SMA 혼합물이 다짐횟수의 영향을 많이 받았다. <표 4>에서는 수침 48시간 보다 수침 72시간의 변동계수가 적게 나와, 수침 72시간이 수침 48시간에 비해 더 타당한 수침시간이라고 판단된다.

<표 3> 다짐 횟수에 따른 잔류 안정도 변화

혼합물 종류	수침 48시간	수침 72시간	평균
일반	1.019	1.049	1.034
개질2	1.007	1.016	1.012
SMA	1.030	1.043	1.037

<표 4> 수침시간에 따른 잔류 안정도의 변동계수

변동계수	혼합물 종류		
	일반	개질2	SMA
수침 48시간	0.12	0.04	0.06
수침 72시간	0.07	0.03	0.01

## 5. 결론

본 연구는 수분에 의한 아스팔트 혼합물의 공용특성에 대한 분석을 토대로 공용특성과 수분민감성의 관계를 규명하고 적절한 재료 선정을 위해 공용성 관련 실험을 혼합물별로 건조 상태와 수분처리 상태에서 실시한 후 여기서 얻어진 수분민감도를 시험별로 구분하여 분석하였다. 또한 마샬 잔류 안정도 시험법의 수분처리 방법 및 평가방법을 개선하여 국내에 적용 가능한 수분민감도 측정 방법을 수립하고자 포화도 실험과 다짐도 및 수침시간을 달리한 마샬 안정도 시험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 소성변형 특성을 알아보기 위해 실시한 크리프 시험에서는 개질1 혼합물과 개질2 혼합물이 다른 혼합물에 비해 약 2배 정도 소성변형에 대한 저항성이 우수하다고 나타났다. 또한 SMA 혼합물은 WC-3 입도의 일반, 소석회 혼합물 보다 소성변형에 대한 저항성이 우수하였다.

- 인장강도 특성 분석 결과 개질1 혼합물과 개질2 혼합물의 인장강도가 5℃와 25℃ 두 온도 모두에서 다른 혼합물에 비해 크게 나타났고, 5℃ 일때의 인장강도가 25℃일 때에 비해 평균적으로 약 2.5배 더 크게 나타났다.



■ 균열 저항성을 알아보기 위한 터프니스 특성 분석 결과 5℃ 저온에서의 균열 저항성은 SMA 혼합물이 WC-3 입도를 사용한 일반, 소석회 혼합물에 비해 약 31%정도 우수했고, 25℃ 상온에서는 개질2 혼합물이 우수한 균열 저항성을 나타냈다. 또한 5℃ 저온에서의 터프니스가 25℃ 상온에 비해 평균적으로 약 1.5배 큰 값을 보였는데, 이는 상온에서 보다 저온에서 균열 저항성이 더 우수하다는 것으로 판단되어진다.

■ 수분민감 특성 분석 결과 개질2 혼합물이 가장 수분에 대한 저항성이 우수하다고 판단되고, 수분의 영향을 받았을때 균열 저항성면에서는 SMA 혼합물도 우수한 특성을 지녔다고 판단된다. 또한 개질제를 넣은 혼합물에서 수분에 대한 저항성이 다소 증가된 효과를 볼 수 있었으나, 개질1 혼합물의 각 시험에서의 결과들을 놓고 볼 때 개질제의 특성, 혼합과정 및 혼합시간 등도 고려해야 할 중요한 요인인 것으로 판단되어진다.

■ 공용특성과 수분민감성의 관계 분석 결과 수분민감도는 소성변형 특성을 파악하기 위해 실시한 크리프 시험, 저온균열 특성을 파악하기 위해 실시한 5℃ 터프니스, 피로 특성을 파악하기 위해 실시한 25℃ 터프니스 순으로 나타났다. 이상의 결과를 토대로 공용특성 항목 중 소성변형 특성이 수분에 가장 민감한 것으로 판단되고, 피로 특성이 수분에 가장 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

■ 이상의 결론을 토대로 소성변형과 균열 저항성 및 수분에 대한 저항성이 강한 개질2 혼합물과 SMA 혼합물의 특성을 적절히 이용한 PSMA 혼합물을 사용하면 소성변형과 균열 및 수분에 대한 저항성에서 큰 효과를 기대 할 수 있을 것으로 판단되어진다.

■ 마찰 잔류 안정도 시험 분석 결과 개질2 혼합물이 다짐횟수에 영향을 적게 받는 결과를 나타냈고, 수침 시간에 대한 분석에서는 포화도 실험에서 얻은 결과와 수침 48시간 보다 수침 72시간의 변동계수 값이 적게 나온 결과를 미루어 볼 때, 수침 72시간이 수침 48시간에 비해 더 타당한 수침시간이라 판단되어진다. 그러므로 현재의 수침 48시간을 수침 72시간으로 개정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. KSA 한국표준협회, "가열 혼합, 가열 포설 역청 포장용 혼합물", 한국산업규격 KS F 2349, 1998a
2. KSA 한국표준협회, "마찰 시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법", 한국산업규격 KS F 2337-95, 1998c
3. AASHTO, "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage", AASHTO Designation : T283-89, 1993
4. ASTM, "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures", ASTM Designation : D4867-88, 1988
5. Cross, S. A. and M. D. Voth and G. A. Fager, "Effects of Sample Preconditioning on Asphalt Pavement Analyzer Wet Rut Depths", Mid-Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings
6. Lottman, R. P. "Predicting Moisture-Induced Damage to Asphalt Concrete Field Evaluation Phase", National Cooperative Highway Research Program Report 246, 1982