

아스팔트 혼합물의 수분민감도 측정방법에 관한 평가 연구

Evaluation of Moisture Susceptibility Test for Asphalt Mixtures

이석근* · 임정혁** · 권세용***

Rhee, Suk-Keun · Im, Jeong-Hyuk · Kwon, Se-Yong

1. 서 론

근래 들어 우리나라에서는 여름철 단기간에 걸쳐 국지적으로 발생하는 집중호우와 같은 기상 현상의 변화로 인해 침수 피해를 입는 도로가 증가함으로써 아스팔트 포장의 박리(Stripping)현상이 발생하게 되고 이로 인해 포트홀(Pothole) 등 다양한 형태의 도로 파손이 급격히 증가하고 있어 교통사고 유발은 물론 유지보수로 인한 막대한 비용손실을 초래하고 있다. 포트홀과 같은 수분에 의한 아스팔트 혼합물의 파손을 방지하기 위해서는 재료의 선정, 적절한 시공, 배수 및 방수 시설의 완비 등 종합적인 대책이 필요하며, 시공 이전에 사용재료에 대한 수분민감도를 파악하는 작업이 반드시 필요하다. 이를 위하여, 수많은 수분민감도 평가 방법이 제안되었으나, 아직까지 국내에는 이러한 평가 방법이 제대로 소개되어 있지 않기 때문에 국내 실정에 맞는 적절한 수분민감도 측정 방법의 선정이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 제안된 여러 수분민감도 측정 방법 중 Modified Lottman Test(AASHTO T-283)과 동적수침시험(Dynamic Immersion Test), Energy Ratio 등의 3가지를 선정하였고, 평가를 위한 공용성 지표로 삼기 위하여 수분처리 상태와 동결-융해 상태의 MVT 시험 결과를 사용하고자 한다. 각각의 측정방법에 대한 상대적인 분석·평가를 통해 국내 실정에 맞는 적절한 수분민감도 측정 방법을 찾아보고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 동일한 조건에서의 수분민감도 측정을 위하여 모든 시편에 동일한 골재를 사용하였다. 또한 채움재는 일반 채움재로 쓰이는 생석회(Lime)와 박리방지제인 소석회(Hydrated Lime)를 사용하였으며, 아스팔트 바인더는 AP-5와 SBS 개질아스팔트를 사용하였다. 이상의 재료들을 가지고 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 사용하여 실내 다짐을 하였으며, 사용된 채움재와 아스팔트에 따라 다음 표 2.1과 같이 시편에 기호를 사용하였다.

표 2.1 혼합물의 구분 기호

시편 기호	아스팔트	채움재
A	AP-5	생석회
B		소석회
C	SBS	생석회
D		소석회

* 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부정교수 공학박사 · 031-201-2900 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

** 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부 공학석사 · 031-201-2923 (E-mail : zzasha@hotmail.com)

*** 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부 공학석사과정 · 031-201-2923 (E-mail : k3330_kr@hotmail.com)



2.1.1 박리방지제

박리방지제는 본래 박리에 민감한 가열 아스팔트 혼합물의 방법론적인 조사와 기존의 수분민감도 평가 시험의 결과에 기초하여 평가한 후에 선정되었다. 본 연구에서는 국내에서 현재 액상 첨가제보다 많이 쓰이고 있는 석회 첨가제(소석회)를 사용하였다.

2.1.2 골재

본 연구에 사용된 골재는 우리나라에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 화강암질 쇄석(국내 S사 생산)을 사용하였다. 체가름 작업에 의해 각 치수별로 분류된 골재와 채움재를 혼합하여 건설교통부 밀입도 규격은 물론 SHRP에서 제안한 슈퍼 페이브의 입도규정에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 배합설계는 현재 아스팔트 포장에서 많이 사용하고 있는 19mm 밀입도로 실시하였고, 입도곡선은 다음 그림 2.1과 같다.

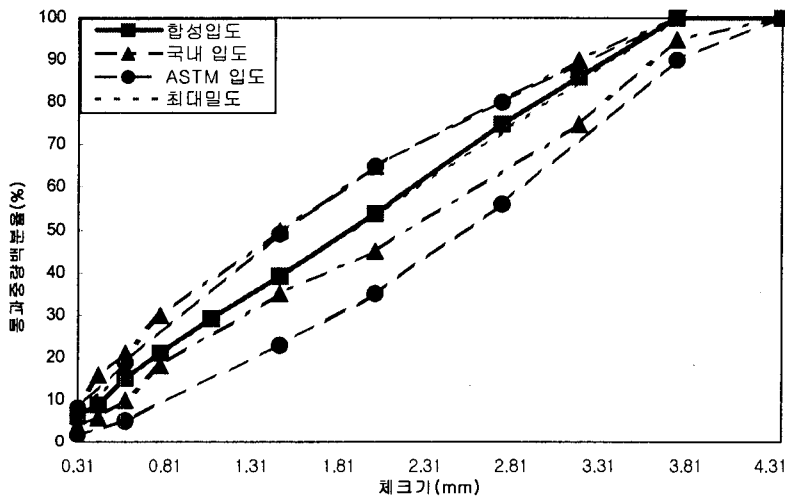


그림 3.1 19mm 밀입도 골재 합성입도

2.1.3 아스팔트

혼합물 A, B에는 KS M 2201(도로 포장용 아스팔트)에 의하여, 25℃에서 침입도가 73인 AP-5(PG 64-16) 아스팔트를 사용하였다. 혼합물 C, D에는 KS M 2201(도로 포장용 아스팔트)에 의하여, 25℃에서 침입도가 63인 SBS 개질아스팔트(PG 76-22)를 사용하였다. SBS 개질아스팔트(Styrene- Butadiene-Styrene Block Co-Polymer)는 열가소성 Elastomer를 사용하고 있기 때문에 고무나 수지와 같은 성상을 가지며, 특히 연화점, 점도, Toughness와 Tenacity 등은 타 개질재 보다 높은 성능을 가지고 있다. SBS 개질아스팔트는 국내에서 가장 많이 사용되는 개질아스팔트로 타 개질아스팔트에 비해 구입 및 사용이 용이하며 일반 아스팔트에 비해 변형과 균열에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 아스팔트의 감온성을 둔화시켜 저온에서의 연성과 고온에서의 유동저항을 크게 증가시킨다.

2.1.4 배합설계

본 연구의 혼합물 A, B 배합설계에서는 선정된 최적골재와 AP-5를 사용하였고, 혼합물 C, D의 배합설계에서는 SBS 개질아스팔트를 사용하여 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 공시체는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마찰식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 공시체 제작 후 마찰 시험 장비를 이용하여 안정도 및 흐름값을 측정하였으며, 이것을 아스팔트 함량(Asphalt Content)에 따른 물성별 곡선으로 표시한 후에 그래프 상에서 공극률(Air Void)과 안정도(Stability), 흐름값(Flow), 골재간극률(VMA), 포화도(VFA)의 기준을 만족하는 아스팔트 함량을 구하고 이로부터 최적 아스팔트 함량을 구하였다(KS F 2349). 다음의 표



2.2와 2.3은 혼합물 A, B, C, D의 배합설계 결과이다.

표 3.7 혼합물 A, B의 배합설계 결과

구분	AP (%)	공극률(%)	안정도(%)	흐름값(%)	포화도(%)	다짐횟수	
기준	4.5 ~ 7	3 ~ 6	750 이상	20 ~ 40	65 ~ 80	75	
OAC 및 결과	A	5.1	3.9	1,327	40	75.1	-
	B	통과	통과	통과	통과	통과	-
	C	4.9	4.0	1,725	38	74.2	-
	D	통과	통과	통과	통과	통과	-

2.2 실험 방법

2.2.1 수분처리 방법

아스팔트 혼합물의 내부 수분 상태에 따른 물성변화를 측정하기 위하여, 다음과 같은 5가지의 수분상태로 시편을 수분처리 하였으며, 이 중 AS is와 Wetted, F/T의 세 가지 수분처리 상태의 개략도를 다음 그림 2.2에 간략하게 나타내었다.

▶ As is 상태 ▶ Wetted 상태 ▶ F/T 상태 ▶ Oven Dry 상태 ▶ 표준 건조 환경

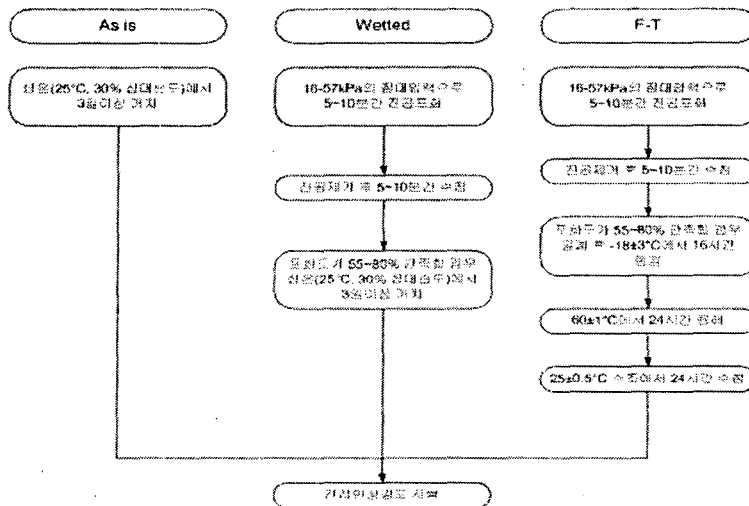


그림 2.2 혼합물의 수분처리 방법

2.2.2 시험 절차

본 연구의 시험을 위하여 직경 15cm, 높이 11.5cm의 MVT 시험용 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 절단하여 직경 15cm, 높이 4.5±0.5cm의 크기로 준비한 후 AASHTO T-283에 규정되어 있는 방법으로 AS is와 Wetted, F/T의 세 가지로 수분처리 하였다.

아스팔트 혼합물의 수분민감도에 대한 공용성 지표로 사용하기 위해 MVT 시험을 실시하였고, Modified Lottman Test와 Energy Ratio 분석을 위해 회복탄성계수 시험(Resilient Modulus Test)과 크리프 시험



(Creep Test) 및 강도 시험(Strength Test)을 실시하였다. 또한 본 연구에서 비교하는 수분민감도 측정방법 중 하나인 동적수침시험(Dynamic Immersion Test)을 위하여 다지지 않은(Loose Mix) 아스팔트 혼합물을 준비하여 시험을 실시하였다. 아래의 그림 2.3은 본 연구의 진행 과정을 간단하게 정리한 것이다.

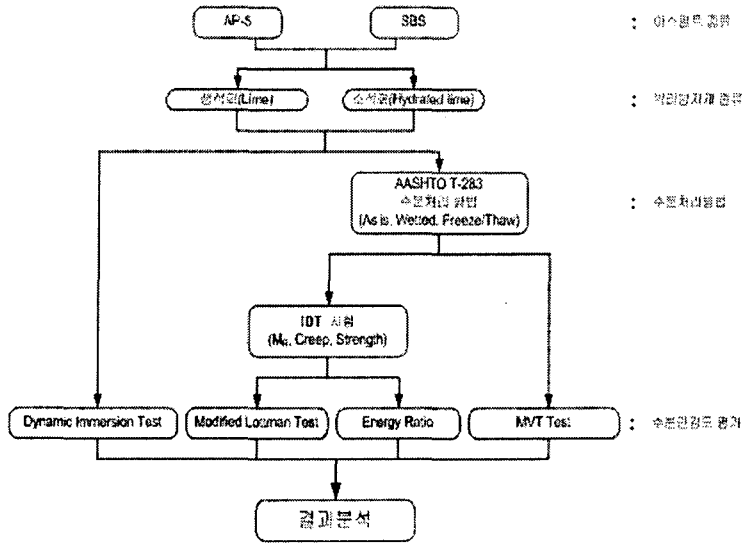


그림 2.2 시험 순서도

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과

3.1.1 Modified Lottman Test

본 시험은 포화된 공시체에 1회 동결-융해를 거쳐 기준 공시체와 비교를 통해 혼합물의 수분민감도를 평가하는 시험방법이며, 본 연구에서는 수분처리(Wetted) 상태에서의 수분민감도 평가를 추가하였다. 다음의 그림 3.1과 3.2는 시험 후 계산한 인장강도비(TSR)와 M_R Ratio 결과이다.

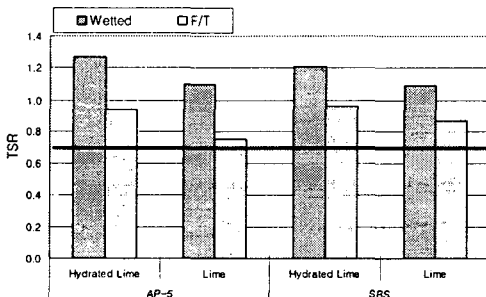


그림 3.1 인장강도비(TSR)

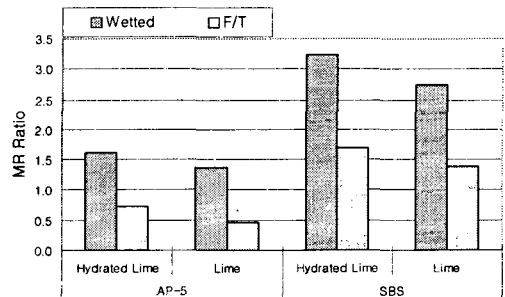


그림 3.2 M_R Ratio

본 실험 결과에서 인장강도비 값은 일반적으로 규정하는 인장강도비 값인 0.7을 모두 넘는 것으로 나타났으며, 이는 모든 혼합물이 수분에 안정하다는 것을 보여준다. M_R Ratio 값은 SBS 개질아스팔트의 값이 AP-5 값의 두 배정도 큰 값을 갖고, 박리방지제(소석회)를 첨가한 것이 첨가하지 않은 것보다 큰 값을 갖는 것으로



로 나타났다. 또한 수분처리한 후의 값이 동결-융해 처리 후의 값에 비해 두 배가량 큰 값을 갖는다.

3.1.2 동적수침시험

비다짐(Loose Mix) 아스팔트 혼합물의 수분민감도를 측정하기 위해 본 연구에서는 동적 수침 시험을 실시하였다. AP-5와 SBS 개질아스팔트 각각에 박리방지제(소석회)와 일반 채움재(생석회)를 첨가한 것과 어떠한 채움재도 첨가하지 않은 시료에 대한 시험 결과는 다음과 같다.

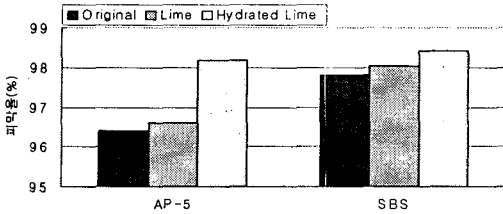


그림 3.3 피막비율(무계비, %)

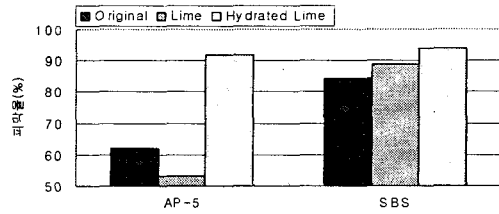


그림 3.4 피막비율(육안조사, %)

3.1.3 Energy Ratio

본 연구에서는 회복탄성계수시험, 크리프시험과 강도시험의 결과 값을 이용하여, 미국 플로리다 대학의 Roque에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념으로 혼합물의 수분민감도 특성을 평가하였다. 다음의 그림 3.5에는 Energy Ratio(ER) 계산 결과값, 그림 3.6에는 ER Ratio($ER_{conditioned}/ER_{as\ is}$) 계산 결과값을 나타내었다.

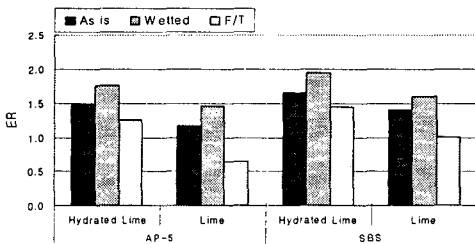


그림 3.5 Energy Ratio 값

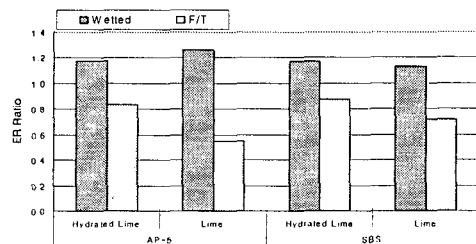


그림 3.6 ER Ratio($ER_{conditioned}/ER_{as\ is}$)

3.1.4 MVT 시험

본 연구에서 사용된 3종의 혼합물의 수분민감도 측정방법들을 평가하는 기준으로 삼기 위해 수분처리와 동결-융해의 두 가지 처리 환경에서 MVT 시험을 실시하였고, 여기서 얻어진 결과는 다음의 그림 3.7과 같다.

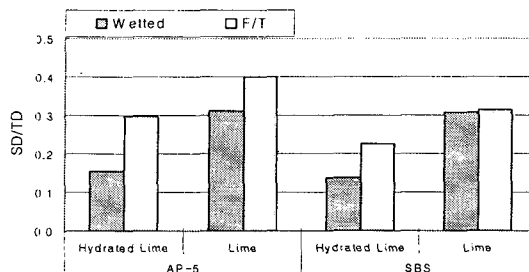


그림 3.7 MVT 시험 결과 값

3.2 비교 및 분석

본 연구에서 실시한 각각의 수분민감도 측정방법들의 비교를 위해, 각각의 시험 후 얻어질 결과를 수분에 안정한 순서로 표 3.1에 나열하였다.

표 3.1 각 시험별 결과 비교

안정 한 순서	MVT	ER Ratio	Modified Lottman Test		동적수침 시험	
			TSR	M _R Ratio	무게비	육안 조사
1	SHW	ALW	AHW	SHW	SH	SH
2	AHW	AHW	SHW	AHW	AH	AH
3	SLW	SHW	ALW	SLW	SL	SL
4	ALW	SLW	SLW	ALW	SO	SO
5	SHF	SHF	SHF	SHF	AL	AO
6	AHF	AHF	AHF	SLF	AO	AL
7	SLF	SLF	SLF	AHF	-	-
8	ALF	ALF	ALF	ALF	-	-

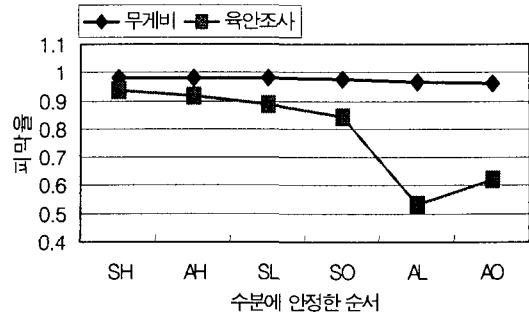


그림 3.8 동적 수침 시험 분석 결과

동적 수침 시험의 결과를 분석한 결과, 같은 시료에 대한 두 가지 평가 방법에 따른 수분민감도 순서가 서로 다르게 나타났고, 두 가지 평가에 따른 결과 값의 편차도 크게 나타났다. 또한 시험 후 시료 세척시 아스팔트 부스러기와 함께 골재 부스러기까지 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있었다. 때문에 동적 수침 시험의 결과 값은 신뢰할 수 없다고 판단하였다. 아래 그림 3.8은 동적 수침 시험의 분석 결과를 나타낸다.

다음 그림 3.9는 각 시험 결과들을 MVT 결과와 비교한 것이다. MVT 결과를 수분에 안정된 순서로 나열하였고, 다른 시험 결과들을 MVT 결과와 같은 순서로 나열하여 비교하였다. 동적수침시험의 경우 다른 시험 결과들과 직접적인 비교가 어려워 혼합물의 이름을 괄호를 사용하여 따로 나타내었으며, 시각상 비교의 편의를 위하여 MVT 결과 그래프를 0.4 값을 기준으로 대칭시켜 나타내었다.

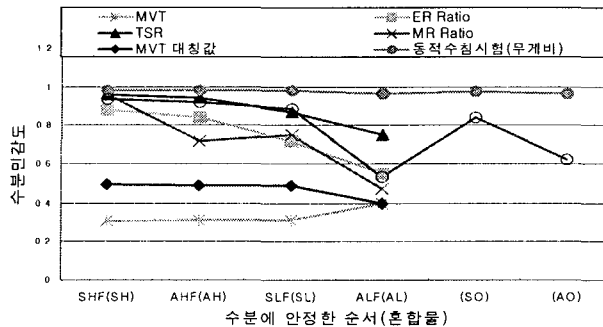


그림 3.9 각 시험별 결과 비교

위의 그림 3.9는 각 시험에 대한 정확한 수치비교가 아닌 대략적인 수분민감도 순서의 비교이다. 기준시험과 처리된 시험의 비로 수분민감도를 나타내는 시험들의 결과는 수분처리 상태에서의 강도 증가가 일정하지 않으며, 현재까지 명확한 강도 증가의 원인이 규명되지 않았기 때문에 1 이상의 값에서의 수분민감도의 순서를 판단하는 것이 무의미하다고 판단되었고, 1 이상의 값이 나타난 수분처리 상태에서의 결과는 고려하지 않았다. 본 연구에서는 1 이하의 결과 값을 보이는 동결-융해 상태의 값을 비교하였다. 그림 3.9에서 MVT



시험 결과를 기준으로 다른 시험의 결과를 비교한 결과, ER Ratio($ER_{conditioned}/ER_{as\ is}$) 분석 값과 Modified Lottman Test의 결과인 인장강도비(TSR)의 동결-융해 상태에서의 수분민감도 경향이 MVT 시험 결과와 동일한 수분민감도 경향을 나타남을 알 수 있다. 따라서 ER Ratio 분석과 Modified Lottman Test를 적절한 수분민감도 평가 시험으로 제안할 수 있다.

그러나 본 연구에서 얻어진 모든 인장강도비의 결과는 일반적인 수분민감도 평가 기준인 0.7을 넘는 것으로 나타났다. 실험한 모든 혼합물이 수분에 안정하다는 결과는 Modified Lottman Test의 변별력을 의심하게 한다. 미국의 일부 주에서 사용하는 평가 기준인 0.8이나 그 이상의 값을 사용하는 것이 Modified Lottman Test의 변별력을 향상 시킬 수 있을 것이라고 판단된다. 다음 그림 3.10에 평가 기준을 달리한 인장강도비를 나타내었다.

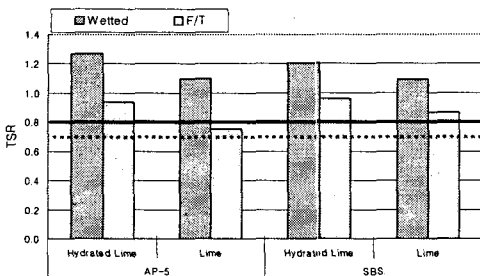


그림 3.10 평가 기준을 달리한 TSR

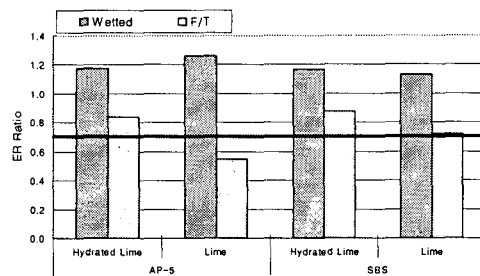


그림 3.11 ER Ratio의 평가 기준 제시

결과 분석으로 도출된 Modified Lottman Test와 ER Ratio($ER_{conditioned}/ER_{as\ is}$) 분석 결과는 서로 유사한 경향을 보이지만, 단일변수를 통한 수분손상을 평가하는 Modified Lottman Test 보다는 여러 가지 변수들을 연관 지어 하나의 시스템으로 분석하는 ER Ratio 분석의 결과가 더욱 정확할 것이라고 판단된다. ER Ratio 분석을 통한 아스팔트 혼합물의 수분민감도 평가를 더욱 명확히 하기 위해선 적절한 평가 기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다음 그림 3.11과 같은 하나의 평가 기준($ER\ Ratio > 0.7$)을 제시하고자 한다. 다음에 적용된 평가 기준은 인장강도비(TSR)에 쓰이는 기준인 0.7을 적용하여 보았고 본 실험결과와 부합한다는 판단을 하게 되어 연구 결과로 제시하고자 한다.

본 연구에서 제시된 평가 기준은 본 연구 결과에는 적절하다고 판단되지만, 다른 연구에서 사용된 모든 ER Ratio 분석 과정에 적용하기에는 아직 충분히 검증된 결과가 아니다. 따라서 추후 많은 실험과 분석을 통하여 더욱 합리적이고 명확한 평가 기준을 제시하는 작업이 반드시 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 지금까지 제안된 아스팔트 혼합물의 수분민감도를 평가할 수 있는 여러 시험법을 검토하였고, 그중 Modified Lottman Test(AASHTO T-283), 동적수침시험(Dynamic Immersion Test), Energy Ratio 개념의 대표적인 3종의 수분민감도 측정방법을 선정하여 이들에 대한 상대적 평가를 실시하였다. 또한 MVT 시험 결과를 혼합물의 수분민감도 평가 기준으로 삼아 다른 시험 결과들과 비교, 분석하였다. 이와 같은 과정을 통하여 다음과 같은 사항을 발견하였다.

- ▶ 동적 수침 시험은 동일한 시료에 대한 두 가지 평가 방법에 따른 결과 값이 서로 다르게 나왔고, 결과 값의 편차도 클 뿐만 아니라 시험 후 시료 세척시 아스팔트 부스러기와 함께 골재 부스러기까지 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 시험법은 다른 시험법에 비해 신뢰성이 떨어진다고 판단된다.
- ▶ Modified Lottman Test는 비교적 분석과정이 간단하고, 평가 기준이 명확하게 제시되어 있는 반면에, 단일변수를 통하여 수분민감도를 평가하기 때문에 정확한 공용성을 예측을 할 수 없는 단점이 있다. 또한 인장강도비의 평가 기준인 0.7 값을 신뢰할 수 없다고 판단되므로 이의 조정이 필요할 것이다.



▶ Energy Ratio 분석 방법은 기존의 수분민감도 평가 방법들과 달리 여러 가지 변수들을 연관 지어 하나의 시스템으로 분석하여 평가하기 때문에 분석 결과를 다른 시험법 보다 신뢰할 수 있다. 또한 분석에 사용되는 IDT Test의 결과는 혼합물의 특성을 판단하기 위한 대부분의 시험에서 공통적으로 사용되는 시험 결과이므로 특별한 노력 없이 얻어진 결과에 간단한 계산을 통해 분석 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 하지만 균열에 대한 평가 기준은 이미 언급되어 있으나 아직까지 수분민감도에 대한 평가 기준이 없다.

▶ MVT 시험은 혼합물의 수분민감도에 대한 공용성을 평가할 수 있는 시험으로 생각되어 평가 기준으로 삼았으나, 실험 결과에 대한 객관적인 평가 기준 없이 상대 평가를 하며, 결과 분석시 평가자의 주관적인 판단이 포함되는 단점이 있다.

▶ 혼합물의 수분민감도에 대한 공용성 지표로 MVT 시험 결과를 이용하여 각각의 실험 결과를 비교한 결과, Modified Lottman Test와 Energy Ratio의 두 가지 평가 방법이 우수한 상관관계를 나타내었다.

이러한 발견을 토대로 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

▶ 본 연구에서 실시한 Modified Lottman Test, 동적 수침 시험, Energy Ratio 개념 등의 대표적인 3종의 수분민감도 평가 방법 중 Energy Ratio 분석 방법이 가장 우수한 수분민감도 평가 방법으로 판단되었다.

▶ 하지만, 아직까지 Energy Ratio 분석 방법의 명확한 수분민감도 평가 기준이 없는 실정이다. 때문에 Energy Ratio 분석 방법에 의하여 수분민감도에 대한 객관적인 평가를 할 수 없으며, 이러한 점을 해결하기 위하여 추후 다양한 실험과 결과 분석을 통해 명확한 수분민감도 평가 기준을 확립하는 것이 필요할 것이다.

▶ 아스팔트 혼합물의 동결-융해와 수분처리(Wetted) 이후의 Energy Ratio 값과 상온(As is) 상태의 Energy Ratio 값에 대한 비율을 이용하여 수분민감도에 대한 평가 기준을 설정하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 0.7의 ER Ratio ($ER_{conditioned}/ER_{as\ is}$) 값을 수분민감도에 대한 평가 기준으로 제시하였다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), “도로포장 장수명화를 위한 설계 및 시공기술 고도화”, 1차년도 중간보고서, 한국건설기술연구원
2. 아스팔트포장연구회 역(1999), “아스팔트 포장공학 원론”, 한국도로포장공학회, p.302~306
3. 안진형(2004), “수분에 의한 아스팔트 혼합물의 물성 변화 현상에 관한 연구”, 경희대학교 석사학위논문
4. KSA 한국표준협회(1998) “다져진 역청 혼합물의 부착에 대한 수분의 영향 시험 방법”, 한국산업규격 KS F 2352
5. AASHTO, AASHTO Designation : TP9-96, T283-85, T165-97, T283-85
6. ASTM(1988), “Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures”, ASTM Designation : D4867-88
7. Birgisson, B., R. Roque, and G. C. Page(2004), “The Use of a Performance-Based Fracture Criterion for the Evaluation of Moisture Susceptibility in Hot Mix Asphalt”, Transportation Research Board Record No. 04-3431
8. Bolzan, P. E.(1989), “Moisture susceptibility behavior of asphalt concrete and emulsified asphalt mixtures using the freeze-thaw pedestal test”, presented at the Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.
9. Kim, Nam ho, R. Roque and D. Hiltunen(1994), “Effect of Moisture on Low-Temperature Asphalt Mixture properties and Thermal Cracking Performance of Pavement,” Transportation Research Board Record No. 1454, p. 82-88
10. Ronald L. T. and J. W. Shute(1989), “Summary Report on Water Sensitivity,” SHRP-A/IR-89-003, November 1.
11. Roque, R.(2004), “Damage and Fracture in Asphalt Concrete : Principles of HMA Fracture Mechanics”, University of Florida