



반복적인 수침이 아스팔트 혼합물의 재료물성에 미치는 영향

Effect of Repeated Immersion on Material Properties of Asphalt Mixtures

황 성 도* 이 석 근**

Hwang, Sung Do Rhee, Suk Keun

Abstract

Moisture damage of asphalt mixtures can occur because of a loss of bond between the asphalt binder and the fine and coarse aggregates. Therefore, moisture damage on asphalt pavements is the main cause of potholes, which is one of the main distress type of asphalt pavement. The purpose of this study is to evaluation effect moisture damage on material properties of asphalt mixtures through the laboratory performance test. The existing Modified Lottman test procedure was improved and the number of times that thermal cyclic conditioning can be added until the asphalt mixtures is damaged, was tested in order to exhibit the changes of the material properties because of moisture damage by immersion. Through the above experiments, it was found that the material properties of asphalt mixtures on room-temperature were rapidly decreased with loss of about 50% at initial stage of moisture damage caused by the amount of repeated immersion. Also, it was found that the property damage ratio using material properties of failure energy and DCSE_f by test temperature 25℃ were showed a high relationship to moisture damage of the asphalt mixtures caused by the amount of repeated immersion.

Keywords : asphalt mixture, moisture damage, material properties, indirect tensile test, modified lottman test

요 지

아스팔트 혼합물의 수분손상은 물의 침투로 인해 아스팔트 피막과 골재 사이의 부착력이 손실되면서 발생하는 현상으로서, 이는 아스팔트 포장의 주요 파손형태 중 하나인 포트홀의 주요원인으로 알려져 있다. 이에 본 연구는 반복적인 수침에 의한 수분손상이 일반 아스팔트 혼합물의 재료물성에 미치는 영향을 평가하고자 수행하였다. 이를 위해 기존의 수분손상 시험법인 수정 라트만 시험의 수분 동결-융해 방법을 반복적으로 적용한 일반 아스팔트 혼합물을 대상으로 간접인장시험에 의한 상온물성의 변화특성을 평가하였다. 이를 통해 일반 아스팔트 혼합물의 상온물성은 수침횟수의 증가에 따라 초기에는 급격하게 감소하다가 이후 완만한 감소추세를 나타내었으며, 초기 수분손상에서 물성값의 약 50% 이상이 손실되는 것으로 관측되었다. 또한 파괴시점을 고려한 아스팔트 혼합물의 초기 수분손상 특성을 파악하는데, 25℃의 파괴에너지와 크리프 변형에너지를 이용한 재료물성의 손상비가 가장 높은 상관성을 나타내는 것으로 평가되었다.

핵심용어: 아스팔트 혼합물, 수분손상, 재료 물성, 간접인장시험, 수정 라트만 시험

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 선임연구원 · 공학박사

** 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자



1. 서론

아스팔트 포장에서 발생하는 수분손상(moisture damage) 또는 박리(stripping) 현상은 강수에 의한 물의 침투로 아스팔트 혼합물에서 아스팔트 피막과 골재 사이의 부착력 및 점착력이 약화되면서 나타나는 강성과 내구성의 손실이라 정의하고 있다 (Little 등, 2003). Hick 등(2003)에 의하면 아스팔트 포장의 수분손상은 블리딩, 균열, 소성변형, 라벨링, 포트홀 등과 같은 다양한 공용특성과 직간접적으로 연관되어 있으며, 골재의 친수성, 교통하중, 포장설계, 시공품질, 아스팔트의 수분민감성 등의 다양한 요인들에 영향을 받는다고 하였다. 우리나라의 경우, 최근 하절기의 기후특성이라 할 수 있는 집중호우와 장기 강수일수가 아스팔트 포장의 포트홀 파손을 증가시키는 주요원인으로 지적되고 있다. 특히, 강수와 같이 물의 반복적인 유입이 반복되거나, 도로배수시설이 불량한 아스팔트 포장에서 수분손상 현상이 집중적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 최근 우리나라의 하절기 강수특성의 변화로 인해 아스팔트 포장에서 발생빈도가 증가하고 있는 수분손상특성을 실험적으로 규명하고자 한다. 이에 아스팔트 혼합물의 수분손상을 모사하기 위해 사용하고 있는 수정 라트만 시험법을 적용하여 반복적인 수침조건에서 아스팔트 혼합물의 재료물성의 변화를 실험적으로 분석하고, 이를 바탕으로 아스팔트 혼합물의 수분손상이 재료물성에 미치는 영향에 대해 평가한다.

2. 아스팔트 혼합물의 수분손상 원인 및 영향 인자

아스팔트 혼합물의 수분손상은 물의 침투로 인한 내구성과 강성의 손실로서 정의할 수 있으며, 재료 및 시공 등의 다양한 영향 인자에 의해 진전되는 특성을 가지고 있다. 기존의 아스팔트 혼합물의 수분손상에 관한 대부분의 연구들은 박리현상을 주로 다루

었으며, 아스팔트보다 수분에 더 친화성을 가진 친수성의 골재에서 주로 발생하는 아스팔트 피막과 골재 사이의 분리현상을 말한다. Petersen(1988)은 박리현상을 물의 작용으로부터 아스팔트 피막과 골재 사이의 부착력 손상 또는 파손이라 정의하였다. Kennedy 등(1984)에 의하면 박리는 아스팔트 혼합물 내에 잔존하는 물 또는 증기의 작용에 의해 골재와 아스팔트 피막의 부착력이 상실되면서 나타나는 물리적인 분리현상이라 정의하였다. 이 외에도 Tunncliff(1984)는 박리를 골재표면이 아스팔트보다는 물에 의해 쉽게 포화되는 친수성 특성에 의해 골재표면에서 아스팔트 피막이 쉽게 탈리되어 나타나는 현상으로 보고하였다. 또한 Kiggundu 등(1988)에 의하면 박리현상은 물의 작용에 의한 아스팔트내의 점착력 상실과 골재표면 및 아스팔트 피막 사이의 부착력 상실로 나타나는 아스팔트 혼합물의 기능적 파손이라 정의하였다. 이러한 박리현상의 원인에 대한 기존의 연구결과(Taylor 등 1983; Kiggundu 등 1988; Terrel 등, 1994)에서는 5가지의 주요 발생 메커니즘(골재이탈, 아스팔트 피막의 분리, 아스팔트의 유화작용, 간극수압, 수압박리)을 제안하였다. Kiggundu와 Roberts(1988)에 의하면 이러한 박리현상의 5가지 메커니즘에 추가적으로 재료원의 pH 불안정성 및 환경적 영향 등이 수분손상을 가속화시키는 메커니즘으로 제시하였다.

기존의 대부분의 연구에서는 수분손상의 원인에 대해서 두 가지 측면에서 다루고 있다. 첫째, 아스팔트 혼합물의 부착력 손실에 따른 파손(adhesive failure)으로서 아스팔트 피막이 골재로부터 어떻게 박리되는지를 규명하는 연구이다. 둘째, 아스팔트 혼합물의 점착력 손실에 따른 파손(cohesive failure)으로서 아스팔트 피막의 흐름, 찢어짐 또는 강성 저하가 어떻게 생기는지를 규명하는 연구이다. 지금까지의 박리 및 수분손상에 대한 연구에서는 아스팔트 혼합물내로 침투한 수분이 어떻게 점착력과 부착력의 손실을 야기하면서 수분손상을 유발하는지는 대한 명확한 이론을 제시하지 못했다. 다만 아스팔트



포장에서 수분과 관련된 손상은 반복된 동결-융해 주기 과정중에 골재와 아스팔트 피막 사이의 강도저하에 나타나는 결과로만 알려져 있다. 이러한 아스팔트 혼합물의 물리적 성질변화 외에도 일반적으로 아스팔트 포장에서 나타나는 수분손상은 수분 함유가 높은 아스팔트 혼합물층의 하부 또는 두 개의 아스팔트 층 사이의 접촉면에서 시작하여 포장표면의 피로 균열 또는 소성변형을 발생시키거나, 국부적인 골재 탈리에 따른 포트홀 또는 라벨링을 발생시키기도 한다.

3. 실내 실험 방법

3.1 실험 재료

본 연구 실험에는 국내의 아스팔트 혼합물에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 화강암질의 쇄석골재와 침입도 60~80의 일반 아스팔트를 사용하였다.

이 중에서 골재는 체가름에 의해 각 치수별로 분류된 골재를 사용하였으며, 건설교통부의 20mm 밀입도 규격에 만족하는 합성입도를 선정하였다. 다음의 그림 1은 아스팔트 혼합물의 골재입도 분포곡선이다.

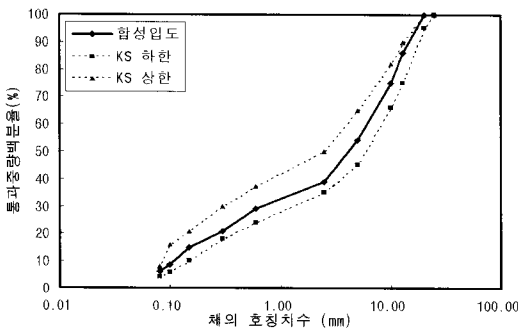


그림 1. 20mm 밀입도의 골재 합성입도

3.2 공시체 제작

본 연구에서는 마샬 배합설계방법을 사용하여 아

스팔트 혼합물의 골재입도와 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 실험공시체는 동일한 공극률을 확보하기 위해 슈퍼페이브 선화다짐기 (Superpave Gyrotory Compacter, SGC)를 사용하여 제작하였다. 그리고 본 실험에서는 일정기간 동안 공용한 아스팔트 포장의 혼합물 상태를 모사하기 위해 단기 및 장기노화시험을 실시하였으며, 공극률은 교통개방 후의 공용중의 포장 다짐밀도 등을 고려하여 4%로 정하였다.

3.2.1 아스팔트 혼합물의 배합설계

본 연구 실험에 사용할 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량과 골재입도를 결정하기 위해 건설교통부(2005)의 '가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 지침'에 따라 배합설계를 실시하였다. 다음 표 1은 아스팔트 혼합물의 배합설계 결과이다.

표 1. 마샬 배합설계 결과 (20mm 밀입도)

아스팔트 함량 (%)	공극률 (%)	밀도 (g/cm ³)	VMA (%)	VFA (%)	안정도 (kgf)	흐름값 (0.1mm)
5.0	4	2.468	15.58	75.9	1,492	29

3.2.2 아스팔트 혼합물의 실내 노화시험

아스팔트 포장의 공용중에 발생하는 아스팔트 혼합물의 노화특성을 모사하기 위해 2단계의 실내 노화시험을 실시하였다. 먼저, 다져지지 않은 아스팔트 혼합물의 단기노화는 생산과정에서 현장의 다짐 과정까지 발생한 노화상태를 모사한다. 장기노화는 교통개방후 약 5년 정도의 공용중에 발생한 노화상태를 모사하며, 단기노화를 거친 아스팔트 혼합물을 사용한 다짐 공시체에 대해 실시한다. 본 시험은 AASHTO PP2-94에 규정된 방법을 적용하였으며, 시험장비는 온도조절이 가능한 열풍건조기를 사용하였다. 먼저, 단기노화는 다져지지 않은 아스팔트 혼합물을 135℃에서 4시간 동안 거치시켜 실시하였으며, 장기노화는 단기노화를 거친 시료를 공시체로 제작하여 85℃에서 5일간 거치시켜 수행하였다.



3.3 아스팔트 혼합물의 수분손상 모사 실내 실험

아스팔트 포장의 공용중의 수분영향에 의한 아스팔트 혼합물의 수분손상을 모사하기 위해 본 연구에서는 AASHTO T 283의 수정 라트만 시험법에서 규정한 수침방법을 적용하였다. 본 실험에서는 반복적인 수침에 의한 수분손상을 모사하기 위해 수분 동결-융해 횟수를 1회, 3회, 5회, 7회, 10회까지 반복하여 각 실험시료에 대해 적용하였다. 실험공시체는 각 수침과정중에 동일한 조건의 수분포화도를 유지하도록 하였다. 각 실험공시체의 수분포화도는 $60 \pm 5\%$ 를 적용하였으며, 공시체 내부의 수분방출을 방지하기 위해 비닐 랩을 씌워 각 공시체를 $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도에서 24시간 방치하고 $-(18 \pm 3)^\circ\text{C}$ 의 온도에서 15시간 동안 거치시키는 것을 1회 수침으로 설정하여 반복적인 수침을 실시하였다.

3.4 간접인장시험

본 연구에서는 수침 전후의 아스팔트 혼합물에 대한 재료물성을 측정하기 위해 간접인장시험(Indirect Tensile Test, 이하 IDT)을 실시하여 회복탄성계수, 간접인장강도, 파괴변형률, 파괴에너지 및 파괴시 소산된 크리프 변형에너지 등을 산출하였다. IDT는 다음의 표 2와 같이 3가지 시험방법으로 구성되어 있으며, 각 시험온도는 상온에 해당하는 10°C , 25°C , 40°C 를 선정하여 수행하였다.

표 2. 온도 영역별 시험법 및 측정재료물성

시험온도($^\circ\text{C}$)	시험법	재료물성
10, 25, 40	회복탄성계수 시험 간접인장강도 시험	회복탄성계수, 간접인장강도, 파괴에너지, 파괴변형률, 크리프 변형에너지

3.4.1 회복탄성계수(Resilient Modulus, M_R) 시험
회복탄성계수 시험은 AASHTO TP31-94의 방법에 따라 실시하였으며, 하중재하는 그림 2와 같은 0.1초의 재하기간(loading period)과 0.9초의 휴지

기간(rest period)을 갖는 반복정현파(haversine) 형태를 적용하였다.

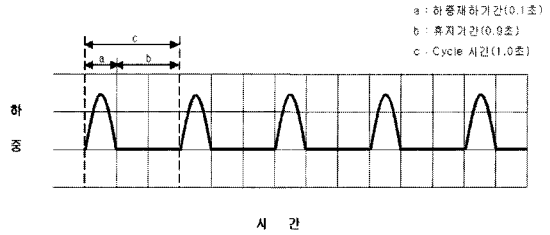


그림 2. 정현파 파형의 하중재하조건

3.4.2 간접인장강도 시험(Indirect Tensile Strength Test)

상온영역에서 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 평가하기 위하여 AASHTO TP 9-96에 규정된 절차에 따라 간접인장강도 시험을 실시하였다. 아스팔트 혼합물의 인장강도(S_t)는 파괴순간에서의 하중과 응력으로 계산할 수 있다. 또한 이러한 강도시험을 통해 파괴변형률, 파괴에너지와 같은 파손물성들이 얻어진다. 본 시험은 공시체가 파괴될 때까지 50mm/min의 지속적인 변위를 적용하는 변위조절 모드에 의해 실시한다.

3.4.3 아스팔트 혼합물의 파괴물성

지금까지의 수분민감성 또는 수분손상의 평가는 단일물성인자에 대한 수침 전후의 시험결과를 사용하여 인장강도비 또는 회복탄성계수비로 나타내고 있다. 그러나 Roque 등(2004)에 의하면 수분손상을 평가하기 위한 단일변수의 사용에 대해 신뢰성의 문제를 제기하면서 기존의 단일변수를 통한 수분손상의 평가보다는 주요 아스팔트 혼합물의 특성변화를 정량적으로 산정할 수 있는 하나의 통합된 체계를 적용하는 것이 수분손상의 영향을 효과적으로 평가할 수 있다고 제안하였다.

이에 플로리다 대학에서는 아스팔트 혼합물의 파괴역학에 근거한 새로운 방법론을 개발하였다. Roque 등(2004)에 의하면 수분손상이 아스팔트 혼합물의 파손저항력에 영향을 주며, 이는 혼합물의 파



파괴역학 모델의 기초적인 변수들에 의해 정확하게 파악될 수 있음을 연구결과를 통해 제시하였다. 이것은 아스팔트 혼합물의 파괴역학이 혼합물에 대한 수분 손상의 영향을 정량화하기 위해 사용될 수 있다는 것을 의미한다. Zhang 등(2000)은 아스팔트 혼합물의 소산된 크리프 변형에너지(DCSE) 한계와 파괴에너지(FE) 한계의 적절한 상한 및 하한값을 정의하였으며, 이러한 에너지 한계의 개념하에서 누적 손상의 비율은 아스팔트 혼합물의 크리프 특성에 의해 지배된다고 하였다. 이에 아스팔트 혼합물의 파괴 모델 및 그 개념에 기초한 DCSE한계 ($DCSE_f$, 파괴 시 까지 소산된 크리프 변형에너지) 변수는 아스팔트 혼합물의 균열공용성과 관련있다고 볼 수 있다. 이러한 에너지 한계는 Roque 및 Buttler(1992)에 의해 개발된 방법인 수퍼페이브 간접인장시험법을 사용한 인장강도시험 및 회복탄성계수 시험의 결과인 응력-변형률 곡선을 통해 결정될 수 있다.

본 연구에서는 인장강도시험 및 회복탄성계수 시험의 결과값을 이용하여 파괴에너지 및 크리프 변형에너지($DCSE_f$)를 구하였다. 파괴에너지는 공시체가 파괴될 때까지 작용된 총에너지를 나타내고, $DCSE_f$ (Dissipated Creep Strain Energy to failure)는 파괴 시까지 공시체에 흡수된 에너지를 나타낸다.

그림 3은 파괴에너지와 $DCSE_f$ 를 결정하는 방법을 나타내고, 다음 식 (1)에 의해 계산된다.

$$M_R = \frac{S_f}{\epsilon_f - \epsilon_0} \Rightarrow \epsilon_0 = \frac{M_R \epsilon_f - S_f}{M_R} \quad (1)$$

$$\text{Elastic Energy (EE)} = \frac{1}{2} S_f (\epsilon_f - \epsilon_0)$$

$$\text{Fracture Energy (FE)} = \int_0^{\epsilon_f} S_f(\epsilon) d\epsilon$$

$$\text{Dissipated Creep Strain Energy to failure (DCSE}_f) = \text{FE} - \text{EE}$$

여기서, S_f = 인장강도

ϵ_f = 파괴변형률

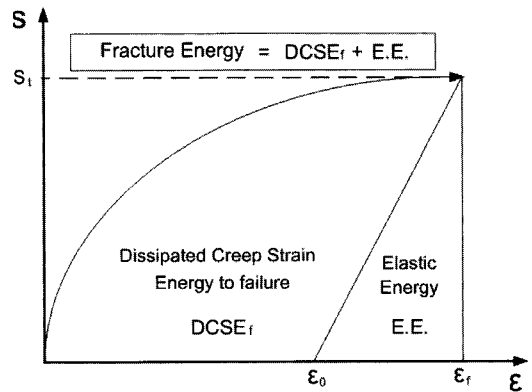


그림 3. 파괴에너지 및 $DCSE_f$ 결정

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 일반 아스팔트 혼합물에 대해 10회까지의 수분 동결-융해 방법을 적용하여 다음의 표 3에서 표 5와 같이, 각 온도영역별로 간접인장시험

표 3. 간접인장시험에 의한 재료물성의 시험결과(10℃)

노화 구분	수침 횟수 (Cycle)	회복탄성계수 (GPa)	간접인장강도 (MPa)	파괴변형률 (10 ⁻⁶)	파괴에너지 (KJ/m ²)	DCSE _f (KJ/m ²)
노화이전	0	4.24	3.82	3711.71	11.40	9.68
단/장기 노화	0	4.02	3.48	3442.31	9.90	8.39
	1	4.59	3.00	3449.76	8.50	7.52
	3	3.95	1.13	1654.21	1.73	1.57
	5	3.97	1.15	1646.47	1.50	1.33
	7	2.91	1.34	1360.87	1.50	1.19
	10	1.63	0.78	1311.16	0.85	0.66

표 4. 간접인장시험에 의한 재료물성의 시험결과(25℃)

노화 구분	수침 횟수 (Cycle)	회복탄성계수 (GPa)	간접인장강도 (MPa)	파괴변형률 (10 ⁻⁶)	파괴에너지 (KJ/m ²)	DCSE _f (KJ/m ²)
노화이전	0	2.87	1.44	4597.79	5.50	5.14
단/장기 노화	0	2.29	1.21	5764.23	6.05	5.73
	1	2.49	1.12	3365.13	5.70	5.45
	3	1.44	0.90	3052.80	2.40	2.12
	5	1.07	0.64	3049.45	1.70	1.51
	7	1.02	0.59	1724.46	0.90	0.73
	10	0.75	0.35	1858.46	0.60	0.52



에 의한 재료물성을 측정하였다. 표에서 정리한 각 물성값은 동일한 조건에서 제작된 3개의 공시체에서 측정된 시험결과를 평균한 값을 원칙적으로 사용하였다.

표 5. 간접인장시험에 의한 재료물성의 시험결과(40℃)

노화 구분	수침 횟수 (Cycle)	회복탄성계수 (GPa)	간접인장강도 (MPa)	파괴변형률 (10 ⁻⁴)	파괴에너지 (KJ/m ²)	DCSE _f (KJ/m ²)
노화이전	0	1.05	0.48	3033.90	1.25	1.14
단/장기 노화	0	0.61	0.44	5944.96	2.30	2.14
	1	0.94	0.45	6019.02	2.30	2.19
	3	0.52	0.32	5484.09	1.55	1.45
	5	0.29	0.30	5368.30	1.40	1.24
	7	0.31	0.22	4546.99	0.90	0.82
	10	0.35	0.19	7294.80	0.98	0.93

4.1 반복적인 수침에 의한 재료물성의 변화 특성

본 연구에서는 10℃~40℃의 온도영역별로 수분 동결-융해에 의한 반복적인 수침을 거친 일반 아스팔트 혼합물에 대해 간접인장시험을 실시하여, 수분 손상이 재료물성의 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 바탕으로 수분손상에 민감한 영향을 받는 재료물성인자를 파악하였다.

여기에서는 표 3에서 표 5의 물성시험결과를 활용하여 수분 동결-융해 횟수에 따른 재료물성의 변화 특성을 분석하였으며, Excell 프로그램을 사용하여 그래프의 회귀분석을 실시하였다. 다음 그림 4에서 그림 8은 간접인장시험에 의해 산출한 일반 아스팔트 혼합물의 파괴에너지(FE), 회복탄성계수(M_R), 파괴변형률(FS), 간접인장강도(S_t), 크리프 변형에너지(DCSE_f) 등의 재료물성이 수분 동결-융해 횟수가 증가함에 따라 변화하는 특성을 분석한 그래프이다. 여기에서 수분 동결-융해 횟수는 아스팔트 혼합물이 받는 수분손상으로 정의할 수 있다. 0 cycle은 수분 동결-융해를 거치지 않은 수분손상이 없는 상태이며, cycle의 증가는 반복적인 수분 동결-융해에 의해 수분손상이 진행된 상태이다.

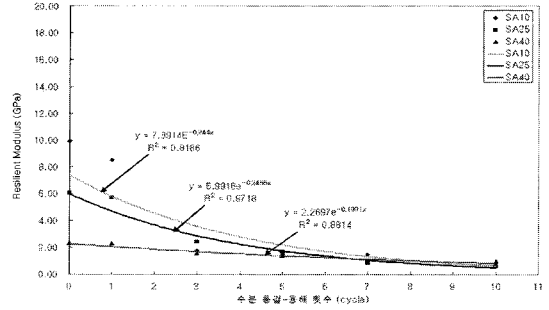


그림 4. 수분 동결-융해 횟수에 따른 온도별 파괴에너지(FE)의 변화

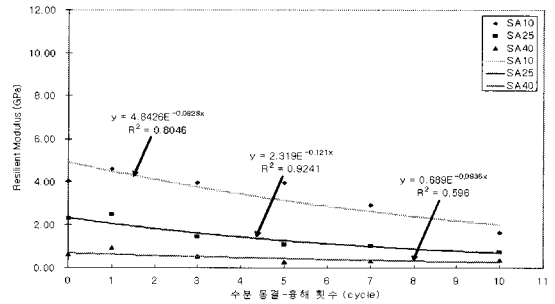


그림 5. 수분 동결-융해 횟수에 따른 온도별 회복탄성계수(M_R)의 변화

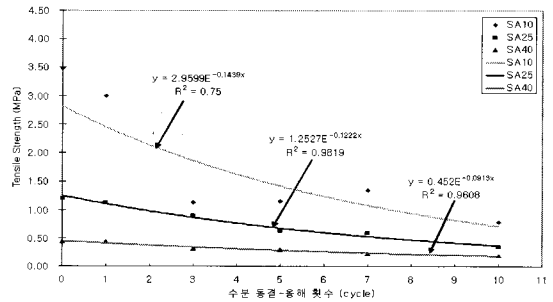


그림 6. 수분 동결-융해 횟수에 따른 온도별 간접인장강도(S_t)의 변화

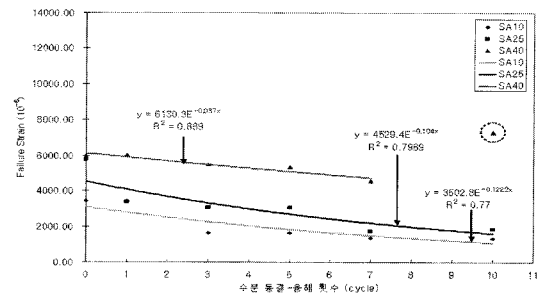


그림 7. 수분 동결-융해 횟수에 따른 온도별 파괴변형률(FS)의 변화

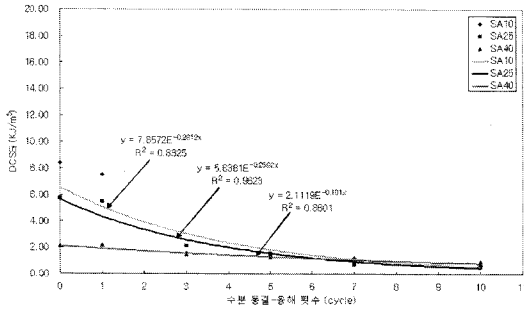


그림 8. 수분 동결-융해 횟수에 따른 온도별 크리프 변형에너지 ($DCSE_f$)의 변화

본 연구에서는 각 재료물성별로 수분 동결-융해 횟수에 따른 변화특성을 분석하기 위해 회귀분석에 의한 추세선을 사용하였다. 먼저, 추세선의 함수를 선정하기 위해 선형, 로그, 지수함수에 대해 선형회귀분석을 실시하였다. 이를 통해 일반 아스팔트 혼합물의 경우, 모든 물성의 시험결과에서 대부분의 추세선의 R^2 가 0.8 정도를 보인 지수함수곡선에 의한 추세선이 가장 높은 상관관계를 나타내어 이를 분석에 사용하였다. 아래 식 (2)는 회귀분석에 적용한 추세곡선의 관계식을 나타낸 것이다.

$$S_p = a \times \text{EXP}(b X) \quad (2)$$

여기서, S_p : 간접인장시험에 의해 산출된 재료물성의 결과값

X : 수분 동결-융해 횟수, 수분손상 (cycle)

a, b : 회귀분석을 통한 재료상수

그림의 추세곡선은 수분 동결-융해 횟수의 변화에 따른 재료물성을 시험온도별로 보여주고 있다. 여기에서 40°C의 파괴변형률(FS)을 제외한 모든 재료물성은 수분손상이 증가할수록 추세곡선은 지수함수 형태로 감소되는 변화를 보였다. 즉 0 cycle에서 3 cycle까지는 온도영역별로 뚜렷한 재료 물성의 감소 추세를 나타내었다. 온도영역별로는 25°C와 40°C에 비해 10°C의 재료물성이 수분손상이 진행됨에 따라 급격한 감소추세를 보이다가 5 cycle 이상에서는 완만한 기울기를 나타내어 감소추세가 낮아지는 것으

로 나타났다. 이는 5 cycle을 변곡점으로 파손상태에 해당하는 물성으로 감소하여 수분의 영향에 민감하게 반응하지 않은 결과로 판단된다. 또한 온도 영역별로 재료물성 변화와 수분손상과의 유의성을 의미하는 추세선의 결정계수인 R^2 는 10°C와 40°C 보다 25°C의 물성에서 상대적으로 크게 나타나 수분손상과의 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 각 물성별로는 $DCSE_f$ 의 추세선 기울기가 0.2592로 수분손상에 가장 민감한 영향을 받았다. 그 외의 나머지 물성의 추세선 기울기는 0.1210~0.1222로서 거의 유사한 영향을 받는 것으로 보인다.

다음의 표 6은 이러한 수분손상의 증가에 따른 각 재료물성의 회귀분석결과를 정리한 것이다. 여기에서 추세곡선식의 X 는 수분 동결-융해 횟수를 나타낸다.

표 6. 수분 동결-융해 횟수와 재료물성 인자와의 회귀분석결과

시험 온도(°C)	추세 곡선식	R^2
파괴에너지(FE)		
10	$EF = 7.3914E^{-0.2440X}$	0.8186
25	$EF = 5.9916E^{-0.2466X}$	0.9718
40	$EF = 2.2697E^{-0.1001X}$	0.8818
회복탄성계수(M_R)		
10	$M_R = 4.8426E^{-0.0828X}$	0.8046
25	$M_R = 2.3190E^{-0.1210X}$	0.9241
40	$M_R = 0.6890E^{-0.0996X}$	0.5960
간접인장강도(S_t)		
10	$S_t = 2.9599E^{-0.1439X}$	0.7500
25	$S_t = 1.2527E^{-0.1222X}$	0.9819
40	$S_t = 0.4650E^{-0.0953X}$	0.9655
파괴변형률(FS)		
10	$FS = 3502.8E^{-0.1222X}$	0.7700
25	$FS = 4529.4E^{-0.1040X}$	0.7969
40	$FS = 6130.3E^{-0.0370X}$	0.8890
크리프 변형에너지($DCSE_f$)		
10	$DCSE_f = 7.8572E^{-0.2812X}$	0.8325
25	$DCSE_f = 5.6361E^{-0.2592X}$	0.9623
40	$DCSE_f = 2.1034E^{-0.1004X}$	0.8589

표 6에 나타난 바와 같이, 파괴변형률(FS)을 제외한 파괴에너지(FE), 회복탄성계수(M_R), 간접인장강



도(S_i), 크리프 변형에너지(DCSE_f)와 수분손상과의 추세선 결정계수(R²)는 0.80 이상의 값을 나타내어 수분손상과 재료물성의 변화가 유의성을 가지는 것으로 보인다. 또한 각 재료물성의 시험온도에서는 25℃의 R²가 대부분의 물성에서 0.924~0.9819 범위를 보여 다른 온도영역에 비해 통계적으로 가장 높은 유의수준을 나타냈다. 따라서 수분손상에 의한 아스팔트 혼합물의 재료물성의 변화 및 영향 정도를 평가하는데 25℃의 시험온도가 가장 적합한 것으로 판단된다. 특히 수분손상의 영향에 대한 통계적 유의성이 가장 높은 강성물성인자는 25℃의 간접인장강도 및 파괴에너지, 크리프 변형에너지인 것으로 파악되었다. 따라서 현행 아스팔트 혼합물의 수분손상 평가 기준으로 활용되고 있는 간접인장강도를 근거로 한 TSR은 초기 수분손상 특성과는 상관성을 가진 것으로 판단된다. 그러나 반복적인 수분손상의 영향을 고려하는 경우에는 에너지 개념에 근거한 재료물성이 높은 상관성을 나타내는 것으로 분석되어 이를 반영한 개선기준의 마련이 필요한 것으로 판단된다.

4.2 반복적인 수침이 재료물성의 손실에 미치는 영향

본 절에서는 10℃~40℃의 온도영역별로 반복적인 수분 동결-융해에 따른 수분손상이 아스팔트 혼합물의 재료물성의 손실에 미치는 영향과의 상관관계를 파악하였다. 이를 바탕으로 수분손상의 증가에 민감한 영향을 받는 물성 인자를 파악하였다. 이에 본 연구에서는 용이한 분석을 위해 수분 동결-융해 횟수의 반복에 따른 재료물성의 손실을 의미하는 물성 손상비(Property Damage Ratio, DR_p)를 식 (3)에서 식 (7)과 같이 정의하였다. 여기에서 각 물성인자의 기준값은 수분 동결-융해를 거치지 않은 0 cycle에서 아스팔트 혼합물의 시험결과값을 사용하였다. 이에 아스팔트 혼합물의 수분손상이 없는 0 cycle에서 DR_p = 1의 경우는 제외하고, 수분손상이 발생한 1 cycle을 초기값으로 설정하였다.

$$\bullet EF \text{ 손상비} : DR_{EF(i,0)} = EF_i / EF_0, i=1\sim10 \quad (3)$$

$$\bullet M_R \text{ 손상비} : DR_{MR(i,0)} = M_{Ri} / M_{R0}, i=1\sim10 \quad (4)$$

$$\bullet S_t \text{ 손상비} : DR_{St(i,0)} = S_{ti} / S_{t0}, i=1\sim10 \quad (5)$$

$$\bullet FS \text{ 손상비} : DR_{FS(i,0)} = FS_i / FS_0, i=1\sim10 \quad (6)$$

$$\bullet DCSE_f \text{ 손상비} : DR_{DCSEf(i,0)} = DCSEf_i / DCSEf_0, i=1\sim10 \quad (7)$$

여기에서 i 는 수분 동결-융해 횟수에 해당하며, 1은 1 cycle의 수분 동결-융해를 거친 후의 수분손상을 받은 상태를 나타낸다. 다음 그래프에서 X축의 수분 동결-융해 횟수는 0 cycle를 기준으로 해당 수분 동결-융해 횟수를 나타낸 것으로서, cycle 단위로 표시한다. 다음의 그림 9에서 그림 13은 상기의 수분 동결-융해 횟수에 따른 각 재료물성의 손상비의 변화 경향을 분석한 그래프이다.

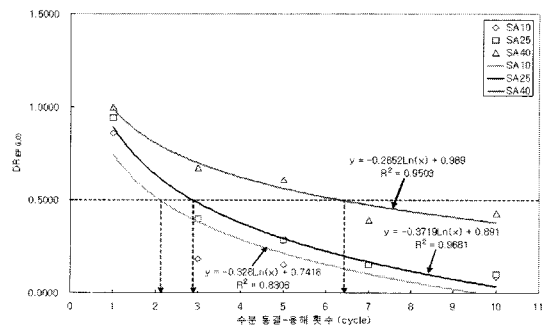


그림 9. 수분 동결-융해 횟수와 DR_{FE}의 관계 그래프

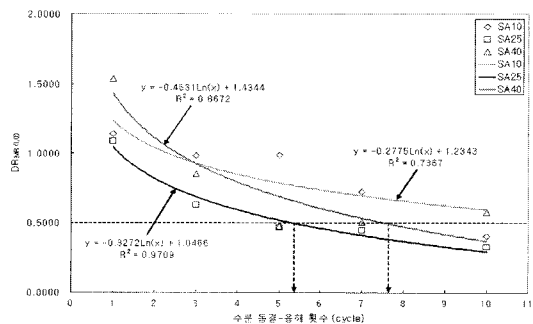


그림 10. 수분 동결-융해 횟수와 DR_{MR}의 관계 그래프

본 연구에서는 각 재료 물성별로 수분 동결-융해 횟수에 따른 손상비의 변화 특성을 분석하기 위해 회

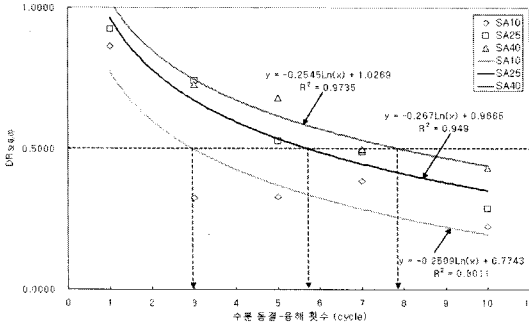


그림 11. 수분 동결-융해 횟수와 DR_{SF} 의 관계 그래프

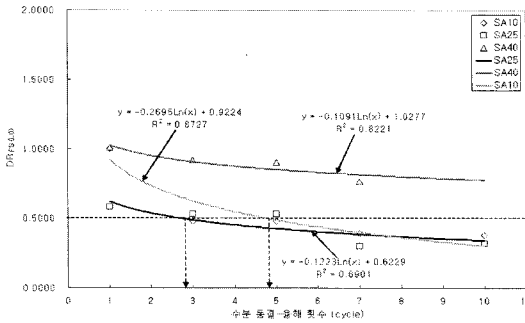


그림 12. 수분 동결-융해 횟수와 DR_{FS} 의 관계 그래프

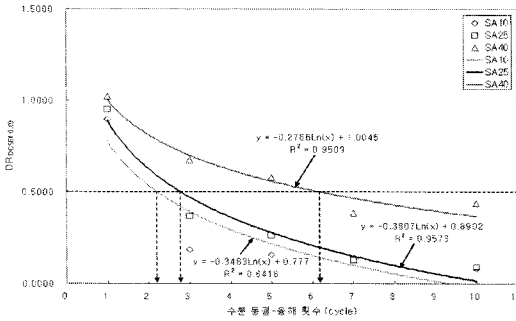


그림 13. 수분 동결-융해 횟수와 DR_{DCSEF} 의 관계 그래프

귀분석에 의한 추세선을 이용한 방법을 적용하였다. 이에 먼저 추세선의 함수를 선정하기 위해 선형, 로그, 지수함수를 사용한 선형회귀분석을 실시하였다. 여기에서 일반 아스팔트 혼합물의 경우, 모든 물성의 시험결과에 대해 추세선의 R^2 가 0.9 내외로 나타난 로그함수곡선에 의한 추세선이 가장 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 식 (8)은 회귀분석에 적

용한 추세곡선의 관계식을 나타낸 것이다.

$$DR_p = a' \times \ln(X) + b' \quad (8)$$

여기서, DR_p : 간접인장시험에 의한 산출된 재료물성의 손상비

(DR_{FE} , DR_{MR} , DR_{St} , DR_{FS} , DR_{DCSEF})

X : 수분 동결-융해 횟수 (cycle)

a' , b' : 회귀분석을 통한 재료상수

다음의 표 7은 수분 동결-융해 횟수와 재료물성의 손상비와의 회귀분석결과를 정리한 것이다.

표 7. 수분 동결-융해 횟수(X)와 DR_p 와의 회귀분석결과

시험온도 (°C)	추세 곡선식	R^2	$DR_p=0.5$ X(cycle*)
파괴에너지 (FE)			
10	$DR_{FE(i,0)} = -0.328Ln(X) + 0.742$	0.8306	2
25	$DR_{FE(i,0)} = -0.372Ln(X) + 0.891$	0.9681	3
40	$DR_{FE(i,0)} = -0.265Ln(X) + 0.989$	0.9503	6
회복탄성계수 (M_R)			
10	$DR_{MR(i,0)} = -0.278Ln(X) + 1.234$	0.7367	10 이상
25	$DR_{MR(i,0)} = -0.327Ln(X) + 1.047$	0.9709	5
40	$DR_{MR(i,0)} = -0.463Ln(X) + 1.434$	0.8672	8
간접인장강도 (S_t)			
10	$DR_{St(i,0)} = -0.251Ln(X) + 0.774$	0.8011	3
25	$DR_{St(i,0)} = -0.276Ln(X) + 0.967$	0.9490	6
40	$DR_{St(i,0)} = -0.255Ln(X) + 1.027$	0.9735	8
파괴변형률 (FS)			
10	$DR_{FS(i,0)} = -0.270Ln(X) + 0.922$	0.8727	5
25	$DR_{FS(i,0)} = -0.122Ln(X) + 0.623$	0.6901	3
40	$DR_{FS(i,0)} = -0.109Ln(X) + 1.028$	0.8221	10 이상
크리프 변형에너지 (DCSEF)			
10	$DR_{DCSEF(i,0)} = -0.348Ln(X) + 0.777$	0.8418	2
25	$DR_{DCSEF(i,0)} = -0.381Ln(X) + 0.890$	0.9573	3
40	$DR_{DCSEF(i,0)} = -0.277Ln(X) + 1.005$	0.9509	6

* (수분 동결-융해 횟수)의 cycle은 근사치 적용

표에 보인 바와 같이, 파괴변형률의 손상비 (DR_{FS})를 제외한 재료물성의 손상비는 25°C와 40°C의 시험



온도에서 R^2 가 0.8670~0.9735 사이의 범위로 분석되어 10℃ 비례 높은 통계적인 유의수준을 가지는 것으로 나타났다. 특히 25℃ 온도에서 R^2 는 0.9490~0.9709 사이로서, 수분손상에 의한 아스팔트 혼합물의 재료물성의 손상정도를 평가하는데 가장 적합한 시험온도로 판단된다.

또한 아스팔트 혼합물의 파괴특성을 파악하기 위해, 초기 파손발생시점을 수분손상을 받지 않은 기준공시체의 재료물성값에서 50% 이하로 감소한 경우로 정의하여 재료물성의 손상비가 0.5를 기준으로 분석한 결과, 재료물성별로 뚜렷한 변화 특성을 파악할 수 있었다. 표에서 보인 바와 같이, 회복탄성계수를 제외한 재료물성은 10℃, 25℃, 40℃의 시험온도 순서로 손상비가 0.5에 도달하여 온도가 낮은 경우에 물성의 손실이 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 특히 파괴에너지와 크리프 변형에너지는 10℃ 및 25℃의 온도영역에서 수분 동결-융해 횟수가 3 cycle 이전에 손상비가 0.5 이하로 감소되어 에너지 개념에 근거한 재료물성이 조기에 파괴특성을 평가할 수 있는 물성인자인 것으로 나타났다. 따라서 이러한 재료물성의 손상비를 사용하면 조기에 수분손상에 의한 아스팔트 혼합물의 파손현상을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 반해 회복탄성계수의 손상비(DR_{MR})는 수분손상에 대한 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 즉, 10℃의 온도영역에서 수분 동결-융해 횟수 10 cycle에서 손상비가 0.5 이상의 값을 보여 수분손상에 민감하게 반응하지 않는 것으로 파악되었다. 이는 수분 동결-융해 과정에서 아스팔트 혼합물 내부에 잔존한 수분이 낮은 온도영역에서 탄성계수의 측정결과에 영향을 주어 나타난 것으로 판단된다. 따라서 온도영역별로 수분손상에 따른 회복탄성계수의 거동에 대한 민감성의 검증을 위해서는 다양한 재료를 사용한 추가적인 실험적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 수분손상에 따른 아스팔트 혼합물의 재료물성에 미치는 영향을 파악하기 위해 수분 동결-융해 횟수에 따른 각 재료물성결과를 측정하고 이의 물성변화 특성을 분석하였다. 이를 통해 일반 아스팔트 혼합물에서 파괴시점을 고려한 조기수분손상 특성을 파악하는데 가장 적합한 간접인장시험의 재료물성인자는 25℃의 파괴에너지와 크리프 변형 에너지를 이용한 물성손상비인 것으로 나타났다. 또한 기존연구에서는 수분손상에 따른 재료물성의 변화특성이 뚜렷이 나타나지 않은데 반해, 본 연구에서는 공용중 상태를 모사한 노화시험을 거친 이후의 10회에 걸친 반복적인 수침을 받은 아스팔트 혼합물에 대한 실내시험에서 재료의 물성의 변화경향이 뚜렷이 나타나는 것으로 파악되었다. 따라서 일반 아스팔트 혼합물의 경우, 반복적인 수분손상의 평가를 위해서는 공시체의 수침조건시험의 개선과 함께 현행의 25℃의 간접인장강도를 근거로 한 TSR 기준을 개선하여 파괴에너지 및 크리프 변형에너지의 도입방안과 본 연구결과에서 제시한 시험방안을 활용한 새로운 기준이 제시된다면 국내에 개선된 수분손상 평가방안의 마련이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Birgisson, B., Roque, R., and Page, G.C. (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*
- Dallas N. Little and David R. Jones IV (2003), "Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements", *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, Transportation Research Board*



- Hicks, R.G., Larry Santucci and Tim Aschenbrener (2003), "Introduction and Seminar Objectives", Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements : *A National Seminar, TRB*
- Kennedy, T.W., Roberts, F.L., and Lee, K.W. (1984), "Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using the Texas Boiling Test", *Transportation Research Record 968, TRB*
- Kiggundu, B.M., and Roberts, F.L. (1988), "The Success/Failure of Methods Used to Predict the Stripping Potential in the Performance of Bituminous Pavement Mixtures", *Submitted to TRB*
- Petersen, J.C. (1988), "Lime-Treated Pavements Offer Increased Durability", *Road & Bridges Magazine, Jan.*
- Roque, R. and Buttlar, W.G. (1992), "The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode", *Proceeding AAPT, Vol. 61*
- Taylor, M.A., and Khosal, N.P. (1983), "Stripping of Asphalt Pavement: State of Art. In Transportation Research Record 911". *TRB, National Research Council*
- Terrel, R.L., and Al-Swailmi, S. (1994), "Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection", *SHRP Report A-403, SHRP*
- Zhang, Zhiwang (2000), "Identification of cracking Growth Law for Asphalt Mixture Using The Superpave Indirect Tensile Test (IDT)", University of Florida.

접 수 일: 2007. 11. 19

심 사 일: 2007. 11. 26

심사완료일: 2008. 1. 7