

강우강도에 따른 아스팔트 혼합물 종류의 수분민감도 평가

An Evaluation of Moisture Susceptibility on Asphalt Mixtures by Rainfall Intensity

정종석	Jung, Jong Suk	토지주택연구원(LHI) 수석연구원 (E-mail : pobyasu@lh.or.kr)
김용락	Kim, Yong Rak	정회원 · University of Nebraska 토목공학과 부교수 (E-mail : ykim3@unl.edu)
이상혁	Lee, Sang Hyeog	경희대학교 토목공학과 대학원 (E-mail : crownsand20@naver.com)
김호진	Kim, hyo Jin	정회원 · 토지주택연구원(LHI) 연구위원 · 교신저자 (E-mail : hyojin@lh.or.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to evaluate moisture susceptibility of a dense graded and an open graded asphalt mixtures by the method of AASHTO T-283.

METHODS : To simulate moisture damage of asphalt pavements with continuously rainfall during summer rainy season, the dense graded and the open graded asphalt mixtures were immersed in water for 15 days and were measured the weight and the change of strength. Also, the mixtures were performed five freeze-thaw cycles to simulate moisture damage of the mixtures by freeze-thaw during winter and were measured the change of strength. The degradation characteristics model was used to analyze the relationship between strength and moisture damage.

RESULTS : According to the results, the dense graded and the open graded asphalt mixtures were shown in the similar trends of the strength changes by immersion time and freeze-thaw cycle. However, the moisture damage reduction of open graded asphalt mixture was more sensitive in early phase than that of dense graded asphalt mixture.

Keywords

moisture susceptibility, AASHTO T-283, moisture damage, degradation characteristics

Corresponding Author : Kim, Hyo Jin
Land & Housing Institute,
539-99 Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon City, 305-731 Korea
Tel : +82.42.866.8441 Fax : +82.42.866.8431
E-mail : hyojin@lh.or.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Jun. 12, 2014 Revised Jun. 12, 2014 Accepted Aug. 4, 2014

1. 서론

우리나라는 우기인 6월에서 8월까지 약 3개월에 걸친 강수량이 연간 강수량의 약 2/3에 이르며, 이는 국민 생활에도 직·간접적으로 영향을 미치면서 매년 막대한 사유재산 피해와 함께 국가 기간시설물의 파손도 급속하게 증가하고 있는 실정이다. 특히, 기후변화로 인한 강우량 및 강설량의 급격한 증가로 인하여 최근 몇 년 사이에 아스팔트 포장의 포트홀로 인한 파손이 심각한 문제로 대두되고 있다.

아스팔트 포장에서 이러한 수분손상(moisture damage) 또는 박리(stripping) 현상은 강수에 의한 수분의 침투로 아스팔트 피막과 골재 사이의 부착력 및 점착력이 약화되면서 나타나는 강성과 내구성의 손실로 정의하고 있다. 아스팔트 포장의 수분손상은 우리나라 뿐만 아니라 미국 전지역 및 세계 여러 다른 지역들에 시공된 아스팔트 포장에 있어서도 주된 문제점으로 계속 지적되고 있다. 아스팔트 포장의 수분손상은 1) 포장의 배수불량, 2) 부적절한 다짐, 3) 골재표면의 이물질 피복, 4) 연질골재 사용 등의 원인에 의해서 발생되기도

한다. Kandhal(1992)은 박리는 전체공사에 걸쳐 일어나는 일반적인 사항이 아니고, 물이 과포화된 부분의 국부적인 현상이거나 혹은 표면 이하 배수조건 불량으로 물이 증발하는 경우라고 보고하였으며, Stuart(1990)에 의하면 골재 표면의 이물질 함유는 골재와 아스팔트 피막 사이의 부착을 저해할 수 있고, 물의 침투경로를 제공한다고 언급하였다. 또한 미립의 점토분은 아스팔트 피막이 물에 의해 점도가 약해지는 유화현상을 유발하여 부착력 및 점착력 손실에 의한 박리현상을 발생시키는 것으로 보고하였다. 이와 관련하여 Kandhal (1992)은 실제 도로의 포트홀 파손 발생구간에 대한 현장 조사를 통해 골재 표면의 이물질 피복을 포트홀 발생의 원인으로 지적하였으며, 석산의 골재 생산과정에서 충분한 세척을 시행한다면 박리현상 또는 포트홀 파손의 발생을 억제할 수 있다고 제안하였다. 국내에서는 여러 연구기관에서 아스팔트 포장의 수분손상 관련 연구를 수행한 바 있으나 기후변화에 따른 도로 및 도로시설물의 설계기준에 대한 연구보다는 단위 기술요소 연구 수행에 주로 집중하여 진행하였다(김형석 외 2010; 김병현 외 2012).

본 연구에서는 기후변화에 따른 강우강도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장에 대한 강도특성을 평가하기 위하여 아스팔트 혼합물의 수분민감도를 평가할 수 있는 방법 중, 현재 가장 널리 쓰이는 AASHTO T-283 (2000) 방법에 의거하여 실내실험을 수행하였다. 여름 장마철과 같이 지속적인 강우에 노출된 아스팔트 도로의 수분손상을 모사하기 위하여 아스팔트 혼합물을 15 일 간 수침시키는 동안 수침시간의 변화에 따른 혼합물 시료의 강도변화를 측정하였으며, 겨울철 동결-융해 과정을 통해 가속화되는 아스팔트 도로의 수분손상을 모사하기 위하여 동결-융해 횟수의 변화에 따른 아스팔트 혼합물 시료의 강도변화를 측정하였다. 또한, 겨울철 염화칼슘 사용과 관련하여 염화칼슘이 아스팔트 콘크리트 혼합물의 내구성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 염화칼슘의 농도를 변화시켜 강도측정 실험을 수행하였다.

아스팔트 혼합물의 종류에 따른 수분민감도를 평가하기 위하여 본 연구에서는 일반 19mm 밀입도 혼합물과 기능성 포장에 주로 사용되는 13mm 배수성 혼합물을 선정하였으며 선정된 모든 혼합물은 마샬설계를 사용하여 배합설계를 수행하였고 실험에 앞서 배합설계에 사용될 아스팔트와 골재에 대한 기본물성실험을 수행하였다.

2. 아스팔트 혼합물의 배합설계 및 시편제작

2.1. 아스팔트 혼합물의 배합설계

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 수분민감도를 평가하기 위하여 2가지 종류의 아스팔트 혼합물을 제작하였다. 국내에서는 한국산업규격 “KS F 2337-95, 마샬 시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법”으로 규정하고 있다(아스팔트포장연구회 1998). 공시체는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마샬식 아스팔트 혼합물 제조방법에 따라 제조하였다.

아스팔트는 배합설계를 비롯한 공시체 제작을 위하여 항상 똑같은 조건으로 사용하기 위해 사용할 양 전체를 냉동실에 보관하고, 실험할 양만큼 꺼내서 사용하였다. 먼저 골재를 개량하여 약 3시간 동안 175±5℃로 가열하고, 아스팔트 바인더는 165℃에서 1시간 가열한 후 골재와 혼합하였다. 혼합물을 미리 가열된 몰드에 넣고 다짐온도인 135℃~145℃를 유지하여 마샬 다짐기를 이용하여 공시체를 다짐하였다. 다짐 후 공시체는 상온에서 약 24시간 동안 양생시킨 후 60±1℃의 수조에 약 30~40분간 수침시켰다. 수조로부터 공시체를 꺼내어 표면에 물기를 제거한 후 마샬 시험장비를 이용하여 안정도 및 흐름값을 측정하였다. Table 1, Table 2는 각각의 아스팔트 혼합물 마샬 배합설계 결과를 나타낸다.

Table 1. Mix Design of Dense-Graded Asphalt Mixture

Mixture type	Division	Asphalt content (%)	Porosity (%)	%VMA	%VFA
19mm dense grade asphalt mixture	standard	-	3~6	over 13	65~80
	results	4.8	4.0	15.3	73.9

Table 2. Mix Design of Permeable Asphalt Mixture

Mixture type	Division	Asphalt content (%)	Porosity (%)	Flow loss (%)	Cantabria loss (%; 20℃)	Dynamic stability
Permeable asphalt mixture	standard	-	20±0.3	below 0.3	below 20	over 3,000
	results	4.9	19.8	0.1	12	11,200

2.2. 아스팔트 혼합물의 시편제작

마샬 배합설계 방법을 통하여 결정된 아스팔트 혼합물의 골재입도와 최적 아스팔트 함량을 이용하여 실험에 사용할 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물 시편을 각각

제작하였다. 강우강도별 아스팔트 혼합물 수분손상 평가를 위한 실내실험을 위하여 다음과 같은 고려사항을 실험계획에 반영하였다.

- 국토해양부 설계기준으로 배합된 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물 포함(국토해양부 2009, 국토해양부 2011)
- 강우강도별 내구성 평가를 위한 동결-융해 회수 및 수침시간 변화 고려
- 겨울철 염화칼슘 사용에 따른 시료의 강도저하 고려
- 수분손상에 따른 내구성 및 강도특성 평가를 위한 시험 실시
- 시험자료를 통한 적절한 결과도출을 위한 충분한 시료 준비

실제 시간당 강수 및 강설량을 바탕으로 강우강도를 고려한 수분손상을 실내실험으로 정확히 반영하기에 다소 한계가 있으므로 본 연구에서는 여러 가지 수분손상 평가 시험방법 중 미국을 비롯하여 전 세계적으로 아스팔트 혼합물의 수분손상 평가를 위하여 가장 널리 사용되는 수침을 통한 수분손상과 동결-융해 과정을 통한 수분손상을 각각 고려함과 동시에 수분손상을 가한 시료와 그렇지 않은 시료간의 인장강도비(Tensile Strength Ratio: TSR)를 비교하는 방법에 의거하여 수분손상 평가를 수행하였다. 또한 겨울철 국내 아스팔트 도로에서 많이 사용하는 염화칼슘에 의한 아스팔트 혼합물의 강도특성을 평가하였다. 시험자료를 통한 적절한 결과를 도출하기 위하여 밀입도 혼합물의 경우 75회 다짐 시편을 여유분 포함하여 모두 162개 제작하였고, 배수성 혼합물은 50회 다짐시편을 모두 36개 제작하였다. Table 3은 각각의 혼합물에 대한 공극률이다.

Table 3. Void Ratio of Two Asphalt Mixture

Division	Apparent density (g/cm ³)	Theoretical maximum density (g/cm ³)	Porosity (%)
Dense grade asphalt mixture	2.356	2.537	7.1
Permeable asphalt mixture	2.010	2.523	20.3

3. 시험방법, 결과 및 분석

3.1. 시험방법

앞서 설명한대로 시료의 수분손상을 모사하기 위하여 수침에 의한 수분손상과 동결-융해 방법에 의한 수분손상을 밀입도 및 배수성 혼합물 각각 따로 수행하였다. 수침에 의한 수분손상은 여름철 호우 및 장마철 지속적인 강우에 의하여 야기되는 수분손상을 모사하기 위하여 시도되었으며 동결-융해에 의한 수분손상은 겨울철 도로의 동결 및 융해주기가 반복됨에 따라 발생하는 아스팔트 혼합물의 강도 및 내구성 저하를 평가하기 위하여 시도되었다. 우선 동결-융해에 의한 수분손상 모사를 위하여 본 연구에서는 AASHTO T-283의 수정 Lottman 시험법에서 규정한 수분처리방법을 적용하였다. 이를 위하여 혼합물 시편을 우선 진공포수시킨 뒤, 진공상태를 제거하고 5~10분 동안 수침한 후 밀폐하여 $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 16시간 이상 동결하고, 동결과정을 거친 혼합물 시편을 $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 동안 수침하여 융해시킨 후, 최종적으로 $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 수조에서 24시간 동안 수침시킨다. 본 실험에서는 동결-융해 횟수에 의한 혼합물의 강도 저하 영향을 알아보기 위하여 동결-융해 횟수를 1회, 3회, 5회까지 확대 실시하였다.

동결-융해에 의한 수분손상 모사에 더하여 겨울철 도로의 융해를 촉진시키기 위하여 우리나라에서 통상적으로 사용하는 염화칼슘이 아스팔트 혼합물의 강도변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동결-융해 과정을 거친 시료를 염화칼슘의 농도를 달리한 용액에 수침시킨 후 강도를 측정하였다. 염화칼슘 용액의 농도에 따른 강도변화를 알아보기 위하여 세 가지 다른 농도(20%, 30%, 40%)의 염화칼슘 용액을 사용하였다.

겨울철 동결-융해 과정을 통한 수분손상 모사에 대응하여, 여름철 집중호우 및 수 주간 지속되는 장마철 기간 동안 아스팔트 도로가 겪게 되는 수분손상 또한 모사할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물에 대하여 수침시간의 변화에 따른 혼합물의 수분손상 민감도를 수침을 하지 않은 건조한 상태에서 시료의 인장강도와 15일까지 수침시간을 각각 달리한 시료의 인장강도를 비교하여 평가하였다. 수침시간 변화에 따른 시료의 무게변화 또한 측정하였다. 이는 수침시간이 지남에 따라 시료에 흡수되는 수분의 양을 측정함으로써 혼합물의 포화도를 결정하는데 사용된다. 수침시간 변화 및 동결-융해 횟수 변화에 따른 시료의 인장강도 측정을 위하여 AASHTO T-283에 규정된 절차에 따라 대상 공시체들의 간접인장강도 시

험을 실시하였다. 시험과정에서 공시체가 파괴될 때까지 지속적인 변위를 적용하였으며, 하중재하속도는 시방에서 규정한대로 25℃에서 50mm/min을 사용하였다.

3.2. 수침에 의한 수분손상 실험결과

아스팔트 혼합물이 수침상태에 있게 되면 물이 혼합물의 공극을 메우게 되고 점차 포화상태에 이르게 된다. 장시간 수침상태에 노출된 아스팔트 혼합물은 수분의 영향으로 혼합물 내부 재료 간 점착 및 부착력 감소에 의하여 강도 및 내구성에 손실이 있을 수 있다. 이는 우리나라 여름 장마철과 같이 지속적인 강우에 노출된 아스팔트 도로의 수분손상과 연관이 있을 것으로 사료된다. 이를 실험실에서(비록 간접적인 방법이지만) 모사하기 위하여 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물을 각각 15일 동안 수침시키면서 주기적으로(수침 전, 수침 6시간 후, 1일 후, 3일 후, 7일 후, 15일 후) 시료의 무게변화를 측정하였으며 또한 간접인장시험을 통한 인장강도를 측정하였다.

Fig. 1은 수침시간의 변화에 따른 시료의 무게변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 배수성 혼합물의 무게변화가 밀입도 혼합물의 무게변화에 비하여 수침 초기단계에서 매우 현저하며 3일 정도의 수침이 진행된 후에는 두 혼합물 모두 시료의 무게변화가 미미했다. 이는 배수성 혼합물의 공극률이 밀입도 혼합물에 비하여 매우 크기 때문으로 생각되며 3일 정도의 수침이 진행된다면 두 혼합물 모두 공극이 물로 거의 포화가 됨을 알 수 있다. Fig. 1에 나타난 실험자료를 바탕으로 400시간 수침상태를 최대 포화상태로 가정하여 각 혼합물의 시간에 따른 포화도 변화를 계산하였다. 계산결과를 Fig. 2에 표현하였으며, 그림에서 볼 수 있듯이 배수성 혼합물의 포화가 밀입도 혼합물에 비하여 조금 더 빨리 진행됨을 알 수 있다. 본 연구에서 가장한 400시간 수침 시 시료의 포화상태는 추가적 시험을 통하여 검증이 필요할 것으로 사료된다.

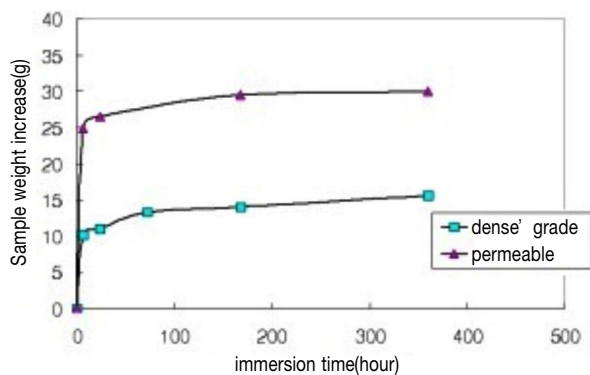


Fig. 1 Increase of Specimen Weight with Change of Immersion Time

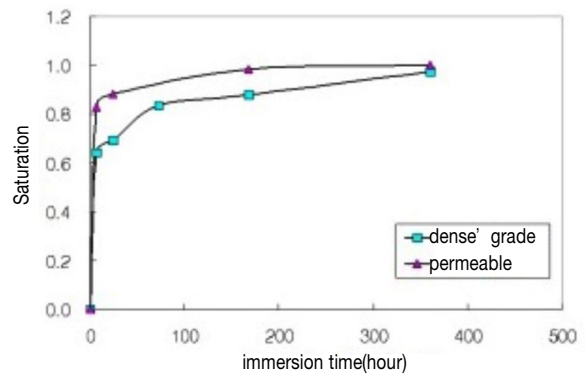


Fig. 2 Saturation of Specimen with Change of Immersion Time

Table 4는 수침시간을 달리하여 측정된 밀입도 혼합물 시료의 인장강도 시험결과를 보여준다. 표에서 볼 수 있듯이 각 수침시간에 따라 3개의 시료를 반복시험하였으며 3개 시료의 평균 값을 이용하여 인장강도비(수침 시료의 인장강도/건조시료의 인장강도)를 산정하였다.

permeable set No.1

permeable set No.2

Table 4와 유사하게 Table 5는 수침시간을 달리하여 측정된 배수성 혼합물의 인장강도 시험결과를 보여준다. 밀입도 혼합물의 경우와 마찬가지로 각 수침시간에 따라 3개의 시료를 반복시험하였으며 3개 시료의 평균 값을 이용하여 인장강도비를 계산하였다.

Table 4. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Immersion Time (Dense Grade Mixture)

Immersion time	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0.0	1.396	1.246	1.000
	1.247		
	1.094		
6.0	1.105	1.251	1.005
	1.235		
	1.414		
24.0	1.272	1.274	1.022
	1.331		
	1.218		
72.0	1.231	1.290	1.036
	1.276		
	1.364		
168.0	1.232	1.247	1.001
	1.216		
	1.294		
360.0	1.036	1.028	0.825
	0.944		
	1.104		

Table 5. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Immersion Time (Porous Asphalt Mixture)

Immersion time	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0.0	1.958	2.114	1.000
	2.171		
	2.212		
6.0	2.080	2.089	0.988
	2.000		
	2.186		
24.0	2.013	1.961	0.928
	1.924		
	1.948		
72.0	1.877	1.904	0.901
	1.849		
	1.987		
168.0	1.570	1.677	0.794
	1.745		
	1.717		
360.0	1.605	1.673	0.792
	1.854		
	1.560		

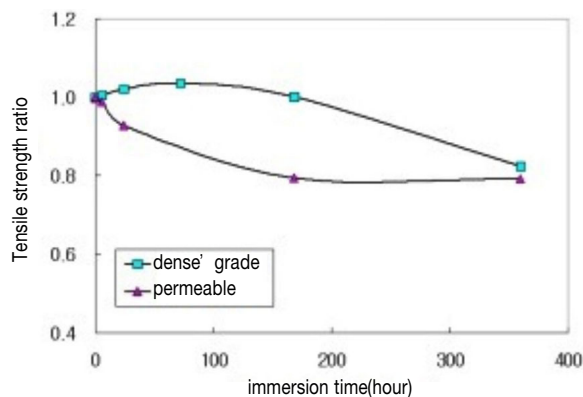


Fig. 3 Tensile Strength Ratio of each Mixture with Change of Immersion Time

수침시간에 따른 시료의 강도변화를 보다 더 명확히 보기 위하여 Table 4와 Table 5에 나타난 각 혼합물의 인장강도비 변화 추이를 Fig. 3에 그래프로 표현하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 밀입도 혼합물의 경우 수침 초기에는 뚜렷한 강도감소를 볼 수 없지만 168시간(7일) 수침 이후에 강도가 점차 약해지는 것을 알 수 있고, 배수성 혼합물은 밀입도 혼합물에 비하여 초기에 강도의 감소가 뚜렷하지만 7일 수침 이후에는 오히려 강도 감소가 거의 없음을 확인할 수 있다. 제한된 실험자료를 통하여 현 단계에서 확실한 결과를 도출하기는 다소 어렵지만 배수성 혼합물이 밀입도 혼합물에 비하여 수침 초기 단계에서 포화가 빨리 진행이 되는 현상이 초기 단

계의 강도 감소와 다소 연관이 있는 것으로 보이며 밀입도 혼합물의 경우는 공극의 양이 적기에 수침 초기단계에서는 강도의 변화가 별로 없지만 일단 포화가 상당부분 진행이 되면 혼합물 재료 상호간 손상 및 점착력/부착력 감소가 배수성 혼합물에 비하여 가속화됨을 암시한다.

3.3. 동결-융해에 의한 수분손상 실험결과

겨울철의 경우 도로포장의 아스팔트 혼합물은 동결과 융해를 반복하게 되며 이 과정에서 수분이 함유된 아스팔트 혼합물의 경우 혼합물 파괴변화를 포함한 재료의 손상에 의하여 강도 및 내구성을 잃게 된다. 이는 겨울철 강설 및 기온 감소로 인한 동결에 노출된 아스팔트 도로의 수분손상과 연관이 있으며 이를 실험실에서(역시 비록 간접적인 방법이지만) 평가하기 위하여 AASHTO T-283 방법에 의거하여 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물을 각각 동결-융해과정을 통하여 강도변화를 측정하였다. 동결-융해 횟수의 변화에 대한 영향을 보기 위하여 3가지 다른 동결-융해 횟수(1회, 3회, 5회)를 적용하였고 또한 겨울철 강설에 의한 동결을 단시간에 해소하기 위하여, 우리나라에서 많이 사용하는 염화칼슘이 아스팔트 혼합물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 밀입도 혼합물의 경우 동결-융해 과정을 마친 후 농도가 각기 다른 염화칼슘 용액에 시료를 수침시킨 후 인장강도를 측정하였다. 염화칼슘 농도는 세 가지 다른 농도 (20%, 30%, 40%)를 사용하였다. 실험결과는 다음의 Table 6부터 Table 12에서 확인할 수 있다. 표에서 볼 수 있듯이 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물의 경우 충분한 시험자료를 확보하기 위하여 전체 시험을 두 번 반복하였다.

동결-융해 횟수에 대한 시료의 수분손상 강도변화를 보다 더 명확히 보기 위하여 Table 6부터 Table 9에 나타난 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물의 실험자료를 Fig. 4에 그래프로 함께 표현하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 밀입도 혼합물은 반복된 두 번의 실험자료가 다소 다른 경향을 보였으나 배수성 혼합물은 매우 유사한 경향을 보였다. 두 번의 실험자료를 평균한 결과 또한 Fig. 4에 나타내었다. 이를 통하여 밀입도 혼합물은 배수성 혼합물에 비하여 동결-융해 횟수가 반복됨에 따라 초기에는 미미한 강도저하를 보이거나 횟수가 거듭될수록 강도저하의 속도가 다소 빨라짐을 알 수 있고 배수성 혼합물은 초기 강도저하가 밀입도 혼합물에 비하여 현저하지만 3회 이후의 동결-융해 횟수에서의 강도저하 변

화는 거의 없는 것으로 보인다. Fig. 4에서 보여주는 결과는 앞서 확인한 수침시간의 변화에 따른 혼합물의 강도저하 결과와 매우 유사한 것으로 보이며, 이는 혼합물의 배합특성이 수분손상 결과와 관련이 있는 것으로 사료된다. 실험결과를 통하여 알 수 있듯이 혼합물의 종류에 따라서 동결-융해 횟수에 대한 강도특성 민감도가 매우 다른 것을 감안하면 현재 AASHTO T-283에서 규정하고 있는 1회의 동결-융해 후 강도평가를 통한 혼합물의 수분손상 민감도 평가방법이 충분한지에 대한 조사 또한 향후 필요할 것으로 보인다.

Fig. 5는 염화칼슘의 사용에 따른 혼합물의 강도특성에 대한 영향을 보다 더 명확히 확인하기 위하여 Table 10, Table 11, Table 12에 나타난 실험자료를 이용하여 함께 그래프로 표현하였다. Fig. 5에서 보듯이 염화칼슘의 농도가 20%에서 40%로 변해도 시료의 강도변화에는 큰 영향이 없는 것으로 보인다. 또한 동결-융해 후 염화칼슘 수침을 행하지 않은 밀입도 혼합물 결과와 비교를 해보면, 밀입도 혼합물의 두 차례 반복시험 평균을 취했을 때의 결과와 비교 시 염화칼슘의 영향으로 인한 시료의 강도감도가 다소 있는 것으로 보이나, 밀입도 혼합물의 두 번째 세트 결과만 비교하면 그림에서 보듯이 염화칼슘의 효과가 그렇게 크게 나타나지 않는다. 두 번의 밀입도 혼합물 반복시험 결과가 다소 다른 거동을 보이는 것을 고려하면, 본 연구에서 얻은 실험자료만 이용하여 염화칼슘의 영향을 현 단계에서 정확히 규명하기는 다소 한계가 있는 것으로 판단된다.

Table 6. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Dense Grade Mixture Set 1)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	0.7	0.810	1.000
	0.841		
	0.888		
1	0.938	0.905	1.117
	0.688		
	1.088		
3	0.654	0.680	0.840
	0.84		
	0.547		
5	0.399	0.380	0.470
	0.369		
	0.373		

Table 7. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Dense Grade Mixture Set 2)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.980	1.878	1.000
	1.914		
	1.740		
1	1.550	1.536	0.820
	1.501		
	1.555		
3	1.379	1.355	0.720
	1.409		
	1.279		
5	0.774	0.805	0.430
	0.803		
	0.839		

Table 8. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Porous Asphalt Mixture Set 1)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.836	1.810	1.000
	1.889		
	1.706		
1	0.798	0.844	0.466
	0.812		
	0.923		
3	0.384	0.341	0.189
	0.336		
	0.304		
5	0.322	0.286	0.158
	0.272		
	0.265		

Table 9. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Porous Asphalt Mixture Set 2)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.940	1.994	1.000
	2.005		
	2.037		
1	0.682	0.733	0.370
	0.760		
	0.757		
3	0.287	0.349	0.180
	0.425		
	0.334		
5	0.237	0.274	0.140
	0.319		
	0.267		

Table 10. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Dense Grade+20% of Calcium Chloride)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.820	1.912	1.000
	1.936		
	1.980		
1	1.668	1.641	0.860
	1.632		
	1.625		
3	1.534	1.485	0.780
	1.448		
	1.473		
5	0.887	0.910	0.480
	0.871		
	0.973		

Table 11. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Dense Grade+30% of Calcium Chloride)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.978	1.905	1.000
	1.834		
	1.902		
1	1.733	1.635	0.860
	1.634		
	1.537		
3	1.549	1.494	0.780
	1.525		
	1.409		
5	0.863	0.873	0.460
	0.935		
	0.823		

Table 12. Result of Indirect Tensile Strength of Specimen with Freezing and Thawing (Dense Grade+40% of Calcium Chloride)

Number of freeze-thaw	Tensile strength(MPa)	Average tensile strength(MPa)	Tensile strength ratio
0 cycle (Dry)	1.769	1.996	1.000
	2.092		
	2.128		
1	1.649	1.647	0.830
	1.602		
	1.688		
3	1.479	1.400	0.700
	1.373		
	1.349		
5	0.688	0.781	0.390
	0.897		
	0.759		

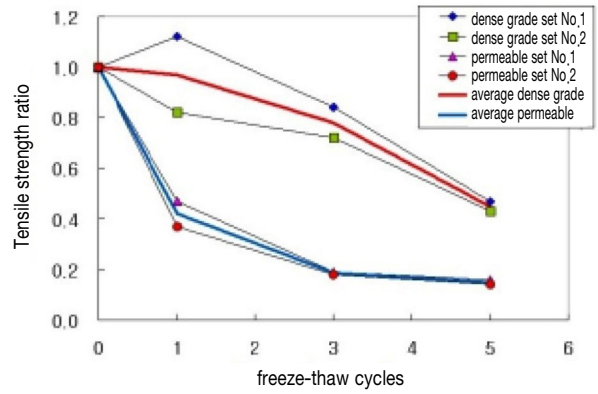


Fig. 4 Tensile Strength Ratio of Mixtures with Change of Freeze-Thaw Cycles

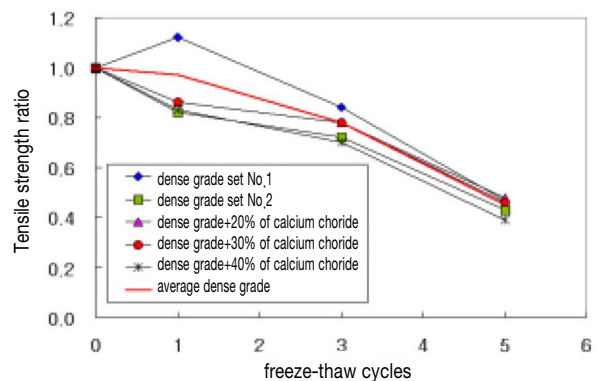


Fig. 5 Tensile Strength Ratio with Change of Freeze-Thaw Cycles and Calcium Chloride Concentration

3.4. 수분손상 실험결과 분석

수침 또는 동결-융해과정을 통한 아스팔트 혼합물의 수분손상이 미치는 강도 및 내구성의 손실을 분석하기 위하여 강도-수분손상 간 상관관계 모델을 도입하여 시험자료와 상호 비교하였다. 이 과정을 통하여 강도-수분손상 상관관계 모델식의 파라미터를 결정할 수 있으며 모델 파라미터는 각 혼합물의 수분손상에 대한 강도 (및 내구성)의 민감도를 정량화 하는데 사용될 수 있다. Ban and Kim(2012)와 Ban et al.(2013)은 최근 수분손상의 영향으로 인한 아스팔트 혼합물의 재료 물성치 (예: 강성, 파괴강도, 파괴 에너지) 변화를 다음과 같은 degradation characteristics(저하특성) 모델식을 이용하여 분석하였다.

$$\frac{\Omega_{wet}}{\Omega_{dry}} = \exp \left[-k \left(\frac{\phi}{\phi_o} \right)^n \right] \quad (1)$$

여기서, Ω_{wet} : 수분손상 상태의 재료 물성(예: 강성, 강도, 파괴 에너지 등),

- Ω_{dry} : 수분손상이 없는 건조상태의 재료 물성,
- ϕ : 수침 또는 동결-융해를 통한 임의 수준의 수분 손상,
- ϕ_o : 수침 또는 동결-융해를 통한 임계수준의 수분 손상,
- k, n : 저하특성 모델식 파라미터.

저하특성 모델식 파라미터 k 값은 수분손상이 임계수준에 도달했을 때 재료가 여전히 보유하고 있는 잔존 물성치를 나타낸다. 예를 들어 Fig. 6에서 보듯이 k 값이 1.0일 때 비록 재료는 임계수준의 수분손상 상태를 보임에도 불구하고, 대략 건조상태 물성치의 37%가 남아있음을 의미하며, k 값이 1.0에서 5.0으로 늘어나게 되면, 그림에서 보듯이 재료의 수분손상 수준이 증가함에 따라 재료가 임계상태에서 보유할 수 있는 물성치는 급격하게 감소하게 된다.

또 다른 저하특성 모델식 파라미터 n 값은 수분손상으로 인한 재료의 물성치 감소 경향의 모양을 결정한다. Fig. 6에서 역시 확인할 수 있듯이 재료의 n 값이 작을 경우 큰 n 값을 가지는 재료에 비하여 수분손상에 노출될 경우 수분손상의 초기단계에서 물성치를 빨리 잃게 됨을 알 수 있다. 그러므로 실험결과를 이용하여 재료 상호간 n 값을 결정하고 비교함으로써 혼합물의 수분손상에 대한 민감도를 정량적으로 비교·분석하는데 이용될 수 있다.

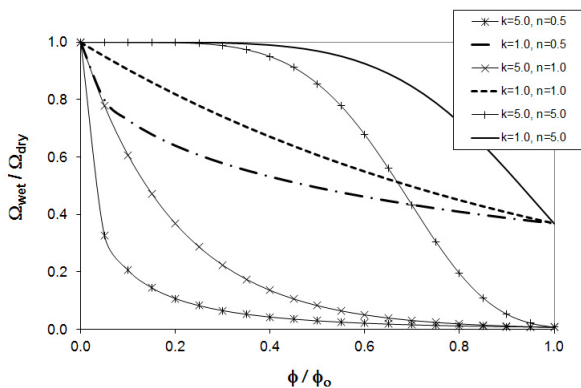


Fig. 6 Behavior of Degradation Characteristic Model for Analysis of Moisture Damage Characteristic of Mixtures

Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 수침시간의 변화에 따른 혼합물의 포화도 변화 및 강도특성 변화 시험결과를 저하특성 모델식과 연계하였다. 이를 위하여 우선 수침시간의 변화에 따른 각 혼합물의 포화도와 수침시간의 변화에 따른 인장강도비를 상호 연계하였고, 이를 저하특성

모델식, Eq (1)과 맞추어 최적곡선을 찾아 모델 파라미터를 결정하였다. Fig. 7은 밀입도 및 배수성 각 혼합물의 포화도-인장강도비 시험결과와 저하특성 모델식을 이용한 최적 맞춤 곡선을 상호 비교한 결과를 보여준다.

유사한 방법으로 동결-융해 횟수의 변화에 따른 혼합물의 강도특성 변화 시험결과를 저하특성 모델식과 연계하였다. 본 연구에서는 동결-융해 횟수를 5회까지 실시한 관계로, 비록 정확한 가정은 아니지만, 분석을 위하여 5회의 동결-융해 횟수를 임계수준의 수분손상으로 가정하였다. 혼합물 상호간 비교·분석을 위하여 앞서 Fig. 4와 Fig. 5에 소개된 시험결과 중 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물의 경우는 두 차례 시험결과와 평균 결과를 이용하였고 염화칼슘에 의한 수침을 추가로 수행한 밀입도 혼합물의 경우는 세 가지 염화칼슘 농도 중 40% 혼합물의 시험결과를 분석에 포함하였다. Fig. 8은 동결-융해 횟수가 반복됨에 따른 각 혼합물의 강도 변화 시험결과와 이를 저하특성 모델식, Eq. (1)과 맞추어 최적곡선을 찾아 비교한 결과를 보여준다.

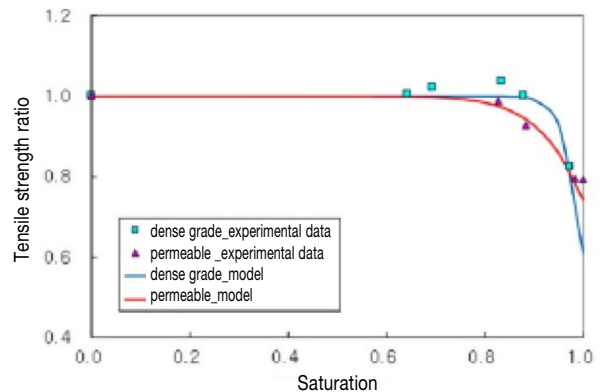


Fig. 7 Comparison between Result of Moisture Damage with Immersion and Degradation Characteristic Models

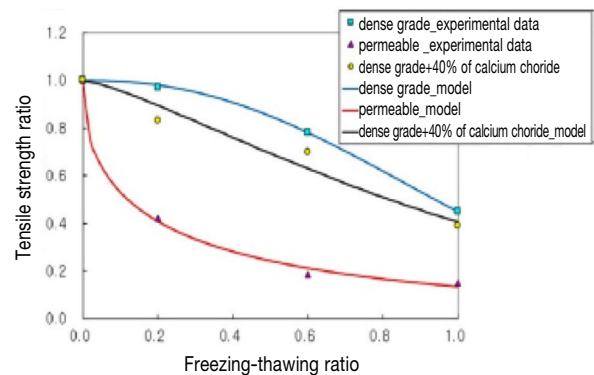


Fig. 8 Comparison between Result of Moisture Damage with Freezing-thawing and Degradation Characteristic Models

Fig. 7와 Fig. 8에서 찾은 각 혼합물의 지하특성 모델 곡선으로부터 결정된 모델 파라미터 (k 값과 n 값)을 Table 13에 정리하였다. 표에서 확인할 수 있듯이 우선 수침에 의한 수분손상의 경우 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물의 k 값은 큰 차이를 보이지 않으나 배수성 혼합물의 n 값이 밀입도 혼합물에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 배수성 혼합물의 수분손상에 의한 강도 및 내구성 저하가 초기단계에서 밀입도 혼합물에 비하여 민감하게 발현함을 암시한다.

Table 13. Parameter of Degradation Characteristic Model

	value k	value n
Moisture damage by immersion		
Dense grade	0.5	37
Permeable	0.3	13
Moisture damage caused by freezing-thawing		
Dense grade	0.8	2.3
Permeable	2.0	0.5
Dense grade+40% of CaCl ₂	0.9	1.3

동결-융해에 의한 수분손상의 경우 배수성 혼합물의 k 값은 밀입도 혼합물의 염화칼슘에 의한 수침 유무에 관계없이 밀입도 혼합물에 비하여 크며, n 값은 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 Fig. 6과 관련 설명에서 이미 밝힌 것처럼, 혼합물이 임계상태의 수분손상에 도달했을 때 배수성 혼합물이 밀입도 혼합물에 비하여 보유하고 있는 재료의 강도 및 내구능력이 훨씬 작으며 수분손상의 초기단계에서 물성치를 잃게 되는 경향 또한 밀입도 혼합물에 비하여 민감한 것을 의미한다. 배수성 혼합물이 보다 더 효율적인 수분의 배수에 도우며 될 수 있는 혼합물 임에도 불구하고, 분석결과를 통하여 배수성 혼합물의 수분손상에 대한 강도특성 및 내구성 능력은 일반 밀입도 혼합물에 비하여 열등한 것으로 판단된다.

밀입도 혼합물이 염화칼슘에 노출되었을 경우 지하특성 모델식 파라미터를 통하여 단순 비교해 보면, n 값이 다소 차이를 보이기는 하지만, 두 혼합물 상호간 매우 큰 차이를 발견하기는 어려웠다. 하지만 본 연구에서 얻은 실험 및 분석자료만 이용하여 염화칼슘의 영향을 현 단계에서 정확히 규명하기는 다소 한계가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 지금까지 제안된 아스팔트 혼합물의 수분민감도를 평가할 수 있는 방법 중, 현재 가장 널리 쓰이는 AASHTO T-283 방법에 의거하여 시험 및 자료분석을 수행하였다. 두 가지 다른 혼합물 (밀입도 혼합물 및 배수성 혼합물)을 고려하였으며 밀입도 혼합물의 경우는 염화칼슘의 영향 또한 고려하여 시험을 수행하였다. 여름 장마철과 같이 지속적인 강우에 노출된 아스팔트 도로의 수분손상을 모사하기 위하여 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물을 각각 15일 동안 수침시키는 동안 수침 시간의 변화에 따른 혼합물 시료의 무게 및 강도변화를 관찰하였으며, 겨울철 동결-융해과정을 통하여 발생하는 수분손상을 모사하기 위하여 동결-융해 횟수를 5회까지 확대하여 실시하였고, 염화칼슘 처리에 따른 혼합물 시료의 강도변화 또한 측정하였다. 시험결과는 또한 각 혼합물의 강도-수분손상 간 상관관계를 정량적으로 비교하기 위하여 degradation characteristics(지하특성) 모델식을 이용하여 분석하였다. 시험 및 자료 분석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 밀입도 혼합물의 경우 수침 초기에는 뚜렷한 강도감소를 볼 수 없지만 일정시간 (본 연구의 경우 7일) 수침 이후에 강도가 점차 약해지는 것을 볼 수 있었고, 배수성 혼합물의 수분손상에 의한 강도 및 내구성 저하는 수분손상 초기단계에서 밀입도 혼합물에 비하여 민감하게 발현함을 알 수 있었다.
2. 밀입도 혼합물은 배수성 혼합물에 비하여 동결-융해 횟수가 반복됨에 따라 초기에는 미미한 강도저하를 보이나 횟수가 거듭될수록 강도저하의 속도가 빨라짐을 알 수 있고, 배수성 혼합물은 초기 강도저하가 밀입도 혼합물에 비하여 현저하지만 동결-융해 횟수 3회와 5회 간 강도변화는 크게 없는 것으로 나타났다.
3. 밀입도 혼합물과 배수성 혼합물의 시험 및 분석결과를 통하여 수침시간의 변화에 따른 혼합물의 강도저하 추이와 동결-융해 횟수에 따른 혼합물의 강도저하 경향이 매우 유사한 것으로 보인다. 배수성 혼합물이 밀입도 혼합물에 비하여 수분손상의 초기단계에서 물성치를 잃게 되는 경향이 민감한 것으로 나타났다.
4. 염화칼슘의 농도 변화에 따른 혼합물 시료의 강도변화는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한 염화칼슘 수침을 행하지 않은 밀입도 혼합물 결과와 비교 시 염화칼슘이 아스팔트 혼합물에 장시간 노출되지

않는 상태라면 강도저하에 미치는 영향은 그렇게 지대하지 않은 것으로 보인다.

5. 본 연구에서 얻은 제한된 시험 및 분석자료를 통하여 현 단계에서 확실한 결과를 도출하기는 다소 무리가 있지만 혼합물의 배합특성이 수분손상 민감도와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 배수성 혼합물이 밀입도 혼합물에 비하여 포화가 빨리 진행이 되는 현상이 초기단계의 강도감소와 일정부분 연관이 있는 것으로 보이며 밀입도 혼합물의 경우 공극의 양이 적기 때문에 초기단계에서 강도변화는 작지만 포화가 상당부분 진행이 되면 혼합물 재료 상호간 손상 및 점착력/부착력 감소로 인하여 배수성 혼합물에 비하여 수분손상이 다소 가속화 되는 것으로 판단된다.
6. 본 연구에서 도출한 수분에 의한 각 혼합물의 강도저하 경향과 수분손상 특성 모델의 향후 검증을 위하여 추가시험 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

References

- AASHTO 2000. Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage, Standard Specification for Transportation and Testing Part II -Tests, Twentieth Edition, AASHTO Designation: T283-85
- Ban, H. and Kim, Y. 2012. Integrated experimental-numerical approach to model progressive moisture damage behavior of bituminous paving mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39, 323-333.
- Ban, H., Kim, Y., and Rhee, S. 2013. Computational microstructure modeling to estimate progressive moisture damage behavior of asphaltic paving mixtures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37, 2005-2020.
- Kandhal, P. S. 1992. Moisture susceptibility of HMA mixes - identification of problems and recommended solutions, NCAT Report 92-01.
- Kim, H. S., Lee, H. J., Lee, K. H., and Kim, H. B.(2010), Development of High Viscous Modified Asphalt Binder for Porous Asphalt Pavement, *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 2, pp.81-90.
- Kim, B. H., Baek, J. E., Lee, H. J., and Park, H. M.(2012), Evaluation of Physical and Mechanical Characteristics of Koeran Epoxy Asphalt Mixtures, *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 1, pp.17-24.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, Guide for Production and Construction of Hot Asphalt Mixture.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, Interim Guide for Production and Construction of Porous Asphalt Mixture.
- Research of Asphalt concrete pavement, 1998, The Principal of Asphalt pavement Engineering, Korean Pavement Engineering.
- Stuart, K. D. 1990. Moisture damage in asphalt mixtures - a state-of-the-art Report, FHWA Report No. FHWA-RD-90-019.