

# 최대입경, 공극률, 온도가 다공성 아스팔트 혼합물의 균열저항성 및 수분민감성에 미치는 영향

유인균<sup>1\*</sup>, 이수형<sup>1</sup>, 박기수<sup>1</sup>, 윤강훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 인프라안전연구본부

<sup>2</sup>한국기술사회 연구위원회

## Effect of Maximum Aggregate, Porosity, and Temperature on Crack Resistance and Moisture Susceptibility of Porous Asphalt Mixtures

In-Kyoon Yoo<sup>1\*</sup>, Su-Hyung Lee<sup>1</sup>, Ki-Soo Park<sup>1</sup>, Kang-Hoon Yoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil and Building Technology

<sup>2</sup>Research Committee, Korea Professional Engineers Association

**요약** 다공성 아스팔트 포장에 혼합물 속에 포함된 20%정도의 공극으로 인해 도로의 수막현상을 억제하여 교통사고를 줄이고 교통소음을 획기적으로 줄이는 등 다양한 순기능을 갖는다. 그러나 다공성 아스팔트 혼합물은 혼합물 속에 포함된 20% 정도의 공극 때문에 혼합물의 내구성이 취약하게 되며, 이러한 취약한 내구성이 다공성 포장의 적용을 확장하는데 제약요인이 되고 있다. 본 연구의 목적은 다공성 포장의 내구성을 향상시키기 위해 최대입경, 온도 그리고 공극률의 변화가 혼합물의 균열저항성 및 수분민감성 등 혼합물의 내구성에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 다공성 아스팔트 혼합물의 내구성을 평가하기 위해 간접인장강도를 균열저항성 및 수분민감성의 척도로 설정하였다. 공극률이 20%로 동일하고 최대입경이 13mm, 10mm, 8mm인 혼합물에 대하여 상온과 동결융해를 경험한 시료에 대하여 간접인장강도 시험을 실시하였다. 그리고 최대입경 10mm인 동일한 재료로 공극이 20%와 22%인 혼합물에 대하여 동일한 시험을 실시하였다. 실험결과 공극률은 20%로 동일하고 최대입경의 변화와 온도의 변화에 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히 실험온도에 대해서는 상온과 저온에서 유의한 차이를 보였다. 최대입경의 변화에 대해서는 상온에서 8mm보다 13mm가 분명히 높은 강도를 보이고 저온에서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 그리고 공극률과 온도의 변화에 대한 실험에서는 온도에 대해서는 유의한 차이를 보였지만 20%와 22% 사이의 2% 공극 차이는 내구성에 유의한 차이를 보이지 못했으며 서로간의 교호작용도 없는 것으로 나타났다. 앞으로 다공성 아스팔트 혼합물의 내구성에 미치는 요소들의 정량적인 평가를 통해 보다 내구성 있는 다공성 아스팔트포장을 개발해 나갈 필요가 있다.

**Abstract** Porous asphalt pavement (PAP) has many functions, such as reducing accidents and decreasing noise. On the other hand, vulnerability is inevitable because PAP contains approximately 20% porosity. This study evaluated the effects of the maximum aggregate size (MAS), temperature, and porosity on the PAP durability. The indirect tensile strength measures durability. This study tested the samples that stayed dry and were moisturized by freezing and thawing for mixtures having the same porosity of 20% and MAS of 13mm, 10mm, and 8mm. The same test was performed on a mixture of 20% and 22% voids made of the same material with a MAS of 10mm. As a result, for 20% porosity, significant differences in the changes in MAS and temperature were found. A clear difference was observed between 8mm and 13mm under dry conditions, but there were no other significant differences in the MAS change. Furthermore, there was a clear difference in temperature for the change in porosity and temperature, but the gap in 2% porosity at 20% did not show a clear difference. Therefore, it is necessary to develop a more durable PAP through quantitative evaluations of the factors affecting the PAP durability.

**Keywords** : Porous Asphalt Mixture, Durability, Indirect Tensile Strength Test, Maximum Aggregate Size, Statistical Analysis

\*Corresponding Author : In-Kyoon Yoo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: [ikyoo@kict.re.kr](mailto:ikyoo@kict.re.kr)

Received September 16, 2020

Revised March 3, 2021

Accepted March 5, 2021

Published March 31, 2021

## 1. 서론

다공성 아스팔트 포장에 아스팔트 혼합물 속에 형성되는 20% 정도의 공극을 통해 다양한 순기능을 얻을 수 있다. 이 공극으로 빗물이 흡수됨으로써 노면에 물이 고이지 않아 물 튀김이나 난반사가 일어나지 않고 타이어와 노면사이의 미끄럼저항을 유지시켜 교통사고를 줄이는 기능을 한다. 또한 이 공극으로 인해 타이어와 노면사이의 공기의 압축으로 인한 펌핑음을 줄여 도로교통 소음을 현격하게 줄여주는 역할을 하게 된다.

그러나 다양한 입경의 골재가 아스팔트 바인더로 결합된 아스팔트 혼합물은 혼합물 속에 공극을 갖게 됨으로써 내구성이 약해지게 된다. 특히 아스팔트 포장에서는 반복되는 자동차 하중으로 인한 피로하중을 견디지 못하면 균열이 발생하고, 온도변화에 따른 신축으로 균열이 발생하기도 한다. 이렇게 발생한 균열은 혼합물에서 골재가 개별적으로 떨어져 나가게 되는 탈리현상을 촉발하게 되며 한 번 탈리 현상이 촉발되면 연속적으로 탈리되는 것이 다공성포장에서의 가장 큰 문제이다. 이러한 균열과 탈리현상을 막기 위해 고점도의 아스팔트 바인더를 사용하게 되며 내구성을 균열저항성, 탈리저항성 등의 기준을 만족하는 아스팔트혼합물을 설계하고 있다.

국내에서는 일본의 배수성혼합물에 대한 시방기준이 도입되어 적용되어 오다가 2011년 국토교통부에서 발간한 배수성 아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침에 따라 시행해 오고 있다. 국내에서 배수성 포장에 대한 적용은 2000년대 초반 도로의 배수를 주된 기능으로 일반국도에 도입되기 시작하였으나, 포장균열 등 내구성 부족으로 인한 조기파손으로 2009년 이후 도입량이 급격히 감소하였다.

혼합물 속에 일정량 이상의 공극을 갖아야 하는 기능성포장의 내구성에는 다양한 요소들이 영향을 미친다. 그리고 이러한 내구성을 향상시키기 위한 연구가 필요하지만 현재까지는 외국에서 사용하고 있는 시방기준을 도입하여 기준에 만족하는 배합설계방법에 따라 시공할 뿐, 이를 개선시키기 위한 연구는 없는 실정이다. 특히 아스팔트 포장의 균열저항성의 척도로 알려져 있는 간접인장강도시험을 활용하여 다공성 아스팔트 혼합물의 균열저항성에 영향을 미치는 다양한 요소에 대한 연구를 통해 다공성 포장의 내구성을 향상시키고 적용을 확대해 나갈 필요가 있다.

## 2. 관련연구

배수성 포장에 대한 연구로는 다공성 포장의 내구성을 증진시키는 연구보다는 아스팔트 바인더의 개발이나 시방기준에 만족하는 혼합물인가를 확인하고 평가하는 연구가 주종을 이루었다. Lee[1] 등은 국내 시방규격을 만족하는 배수성 아스팔트 혼합물에 대하여 배수성, 소성변형 저항성, 미끄럼 저항성 등이 일반포장보다 향상되는 것을 확인하고 소음은 최대 7dB 정도 저감되는 것을 확인하였다. 이 논문은 배수성 포장이 실제로 다양한 기능을 발휘하는 가를 확인한 논문으로서 의미가 있다. Lee[2] 등은 국내 고점도 아스팔트 바인더에 대하여 현장을 효율적으로 모사하는 선회다짐기로 시편을 제작하고 마찰안정도, 회복탄성계수, 간접인장강도, 소성변형특성 평가를 통해 배수성 아스팔트를 위한 혼합물의 구조 성능은 충분히 만족한다고 보고하였다. 이 논문은 새로 개발된 아스팔트 바인더가 배수성 포장의 아스팔트 바인더로서의 사용 적합성을 평가하였다.

아스팔트 포장의 파손유형으로는 골재의 탈리, 균열 그리고 소성변형을 들 수 있다. 특히 아스팔트 포장은 반복되는 자동차 하중에 대한 피로균열과 온도변화에 의한 신축균열이 주종을 이룬다. 아스팔트 혼합물에 대한 역학적 특성은 마찰안정도가 활용되었으나 마찰안정도는 장치가 간단하고 측정이 쉽지만 혼합물이 기준치를 만족하여도 포장의 공용성과 관련된 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. Lee[1] 등은 배수성 아스팔트 혼합물의 역학적 특성연구에서 배수성 포장에 대한 마찰안정도는 밀입도 보다, 그리고 SMA보다도 큰 값으로 나타났으나 간접인장강도는 상대적으로 가장 작은 값을 나타내었다고 보고하였다.

마찰안정도를 대체하여 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 평가할 수 있는 간접인장강도 시험이 권장되고 있으며 국내에서도 간접인장강도에 대한 연구논문이 발표되고 있다. Lee[3] 는 일반 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 예측할 수 있는 실험방법으로 간접인장강도 시험을 선정하고 하나의 골재입도와 세 개의 바인더에 대하여 간접인장강도 시험을 수행하였다. 이 연구에서 아스팔트의 다짐온도와 아스팔트 함량이 간접인장강도에 미치는 영향은 확인할 수 없었고 바인더의 종류에 따라 간접인장강도의 변화가 있었다고 보고하였다.

Ok[4] 등은 배수성 아스팔트 혼합물에서 공극률 21% 정도로 유지하면서 최대입경이 19mm, 13mm, 10mm 그리고 8mm로 서로 다르게 제작하여 다양한 시험을 시

도하였다. 소성변형에 대한 저항성은 8mm혼합물이 가장 크게 평가되었으며 10mm도 8mm와 비슷하나 13mm와 19mm는 현격하게 차이가 나는 것으로 평가되었다. 미끄럼저항도 8mm와 10mm에서 크게 평가되었으며 13mm와 19mm에서 상대적으로 작게 평가되었다. 타이어와 노면의 마찰 소음에 대해서도 최대입경이 작을수록 소음저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 이 논문은 배수성 포장에서 최대입경의 변화가 다양한 기능에 미치는 영향을 평가한 의미 있는 논문이지만 균열저항성을 나타내는 간접인장강도에 대한 시험결과가 없었다.

Cho[5,6] 등은 배합설계 및 실내실험을 수행한 결과 소입경 골재를 사용하면 골재간의 맞물림 면적이 증가하여 비산저항성이 향상되는 것으로 나타났다고 보고하였다. 13mm에 비해 10mm 최대입경의 배수성 아스팔트 혼합물이 소음저감 효과가 뛰어났으며 특히 저속에서의 소음저감 효과가 뛰어났다고 보고하였다. 그러나 최대입경이 작으면 작을수록 골재의 맞물림 면적이 증가하여 비산저항성이 증가한다는 실험결과는 보여주지 못했고 소음저감 효과에 대해서도 통계적으로 검증되지는 못했다.

Leel[7] 등은 저소음 포장체 개발을 위한 아스팔트 혼합물의 역학적 특성 연구에서 다공성 포장의 균열저항성 평가시험으로 간접인장강도 시험을 시행하였으며 시험온도를 5℃, 25℃, 그리고 40℃로 변화를 주면서 시험하고 온도가 낮아질수록 강도가 작아지는 결과를 얻었으나 통계적으로 검증하지는 못했다.

배수성 아스팔트 혼합물에 대한 연구는 초창기에는 외국의 시방서를 국내실정에 맞게 도입하고 배수성 포장의 국내에서 다양한 기능을 제대로 수행하는지 검증하는 연구가 진행되었고, 그 후로는 배수성 아스팔트 바인더가 개발되면서 개발된 바인더가 시방규격에 만족하는가를 검증하는 연구가 진행되었다. 그리고 배수성 아스팔트 혼합물을 위한 입도나 바인더의 변화에 대한 아스팔트 혼합물의 내구성이나 기능의 변화에 대한 연구가 수행되고 있다. 특히 배수성 혼합물의 내구성이나 기능에 미치는 영향요소를 평가하기 위해서는 통계적인 검증이 필요하다.

다공성 아스팔트 혼합물에 대한 균열저항성 증진시킬 수 있는 설계요인을 찾아내기 위하여 하나의 바인더를 이용한 다공성 아스팔트 혼합물에 대하여 최대입경, 공극률, 그리고 온도변화를 통한 조건변화를 주면서 간접인장강도 시험을 수행하고 그 결과를 통계적으로 검증한 연구는 없었다.

### 3. 간접인장강도시험

본 연구에서 국내 규격에 부합하는 아스팔트 바인더와 골재를 사용하여 마샬공시체를 제작하여 간접인장강도로 내구성을 평가하였다. 내구성의 척도인 간접인장강도에 영향을 미치는 요소로는 골재의 최대입경, 공극률, 그리고 시료의 상태를 설정하였다. 다공성 아스팔트 혼합물은 공극률이 20% 정도로 설정되어 최대입경에 따라 공극의 크기와 개수가 변하게 되어 내구성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 공극률을 20%로 설정하고 골재의 최대입경을 8mm, 10mm, 13mm로 설정하여 시료를 제작하고 시료의 상태를 건조상태와 동결융해 상태로 구분하여 간접인장강도를 측정함으로써 균열저항성과 수분민감성을 평가하고자 하였다. 또한 다공성 아스팔트 포장의 기능을 담당하는 공극률을 20%에서 22%로 증가시켰을 경우 이들이 내구성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 건조상태와 동결융해상태로 구분하여 간접인장강도 시험을 실시하였다.

본 연구에서 사용된 아스팔트 바인더는 국토부 배수성 아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침에 제시된 바인더 등급인 PG 82-22을 사용하였으며 구체적인 내용은 Table 1과 같다.

Table 1. Characters of Asphalt Binder

Characters	Unit	Test	Value
Performance Grade	-	(1)	PG82-22
G*/sinδ at 82℃(Original)	kPa	(2)	1.34
G*/sinδ at 82℃(after RTFO)	kPa	(2)	2.28
G*/sinδ at 82℃ (after PAV)	kPa	(2)	1.020
Stiffness at -12℃	MPa	(3)	141
m-value	-	(3)	0.34
Flash Point	℃	(4)	329
Viscosity(135℃)	Pa.s	(5)	3.0
Mass Loss(after RTFO)	%	(6)	-0.11

Table 1에서 사용된 시험법은 다음과 같다.

- (1) KS F 2389:2019; 아스팔트의 공용성 등급[8]
- (2) KS F 2393:2019; 동적전단 유변물성 측정기를 이용한 아스팔트의 유변 특성 시험방법[9]
- (3) KS F 2390:2019; 보형상 유변물성 측정기를 이용한 아스팔트의 휨크리프 강성시험방법[10]
- (4) KS M ISO 2592:2018; 클리브랜드 개방컵 시험방법[11]
- (5) KS F 2392:2019; 회전 점도계를 이용한 아스팔트

트의 점도 시험방법[12]

(6) KS M 2259:1980: 아스팔트성 재료의 로울링 박막 가열 시험방법[13]

실험계획으로는 동일한 20% 공극률의 아스팔트 혼합물이지만 굵은 골재의 최대입경을 8mm, 10mm, 13mm 세 가지로 변화시키는 실험과 골재의 최대입경 10mm를 동일하게 하고 공극률을 20%와 22%로 변화시키는 실험을 실시하였으며 각 혼합물의 배합설계 특성은 Table 2와 같고 골재의 입도곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 2. Properties of Asphalt Mixtures

Classification	Content (%)		
	Agg.	Filler	Binder
8mm, 20%	91.90	2.84	5.26
10mm, 20%	92.44	2.86	4.70
13mm, 20%	92.15	2.85	5.00
10mm, 22%	92.64	2.86	4.50

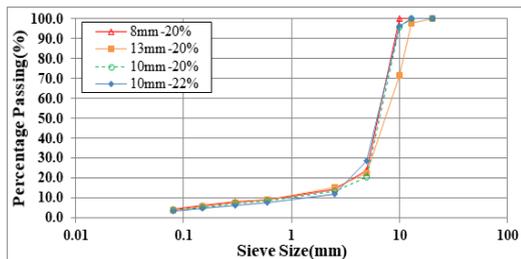


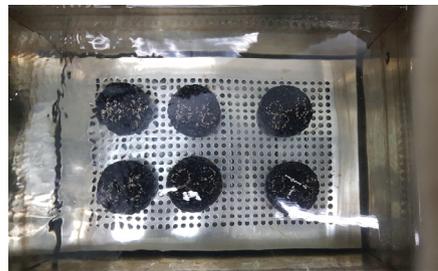
Fig. 1. Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures

마샬 배합설계 방법을 통해 주어진 입도에 해당 공극률을 얻을 수 있는 최적 아스팔트 함량을 이용하여 실험에 사용할 다공성 아스팔트 혼합물 시편을 제작하였다. 본 연구에서는 동결융해 처리과정은 미국의 수정 Lottman 시험법에서 규정한 수분처리방법을 적용하였다. 이의 절차를 아래에 제시하였고, Fig. 2는 시편에 대한 동결융해 처리과정과 간접인장강도 시험[14] 장면을 보여주고 있다.

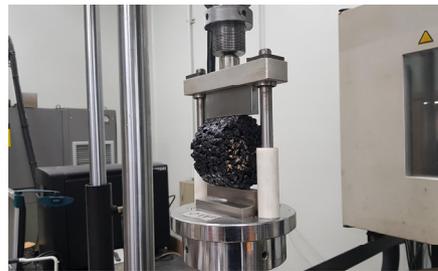
- 1) 혼합물물 시편을 진공 포화시킨다.
- 2) 진공상태를 제거하고 5~10분 동안 수침한 후 밀폐하여  $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 16시간 이상 동결한다.
- 3) 동결과정을 거친 혼합물 시편을  $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 동안 수침하여 용해시킨다.
- 4) 최종적으로  $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 수조에서 24시간 동안 수침시킨다.



(a) Specimen Freezing at  $-18^{\circ}\text{C}$  for 16hours



(b) Specimen Emerging at  $60^{\circ}\text{C}$  for 24hours



(c) Indirect Tensile Strength Test(50mm/min)

Fig. 2. Indirect Tensile Strength Test Process for Moisture Susceptibility of Porous Asphalt Mixtures

Fig. 3은 동결융해 후에 간접인장강도 시험을 실시한 각 시편의 단면을 보여주고 있다. 사진에서 왼쪽이 건조상태의 시료이며 오른쪽이 동결융해 후의 시료이다. 동결융해과정을 거치면서 골재에서 아스팔트가 벗겨지는 박리현상이 많이 발생한 것을 볼 수 있다.

Table 3은 최대입경 8mm, 10mm, 13mm의 변화에 따른 건조상태와 동결융해 과정을 거친 시료에 대하여 실시된 간접인장강도 시험결과이다. Table 4는 공극률 20%와 22%인 시료에 대해서 건조상태와 동결융해 과정을 거친 시료에 대한 간접인장강도 실험결과이다.



Fig. 3. Specimen Splitted after Indirect Tensile Strength Test

Table 3. Results of Indirect Strength Test for Porous Asphalt Mixtures by Maximum Aggregate Size

	8mm	10mm	13mm
Dry	0.76	0.69	0.84
	0.71	0.67	0.87
	0.62	0.81	0.83
Freeze	0.55	0.45	0.58
	0.47	0.51	0.75
	0.58	0.58	0.57

Table 4. Results of Indirect Strength Test for Porous Asphalt Mixtures by Air Void

	20%	22%
Dry	0.69	0.83
	0.67	0.73
	0.81	0.87
Freeze	0.45	0.55
	0.51	0.51
	0.58	0.52

#### 4. 시험결과의 통계적 분석

분산을 고려한 평균의 비교를 통해 두 종류의 실험값이 통계적으로 동일하다고 말할 수 없거나 통계적으로 다르다고 말할 수 없음을 증명하게 된다. 즉, 통계적으로 동일하다고 말할 수 없다는 의미는 서로 구분될 수 있다는 것을 의미하며, 통계적으로 다르다고 말할 수 없다는 의미는 서로 구분될 수 없다는 것을 의미한다. 여기서 공극률은 동일하게 하고 굵은 골재의 최대입경을 다르게 하는 경우, 이들은 균열저항성과 동결융해 저항성에 통계적으로 서로 다른 결과를 나타내는지, 통계적으로 차이가 없는 결과를 나타내는지 검증하게 된다. 또한 건조 상태의 시료와 동결융해를 거친 시료에서의 결과가 통계적으로 의미 있는 차이를 나타내는지 검증하고 공극률 20%와 22%에서의 결과가 통계적으로 의미 있는 차이를 나타내는지 검증하기로 한다.

골재의 최대입경과 실험조건에 따라 시험된 결과를 그림으로 보여주는 것이 Fig. 4이고 통계적 요약 보여주는 것이 Table 5이다. Fig. 4를 보면, 건조상태와 동결융해 시료의 결과는 수정내용을 원고에 붉은 색으로 표기하였습니다. 차이를 보이고 있다. 또한 건조상태의 시료에서는 최대입경이 커질수록 강도가 커지는 경향을 보이며 동결융해 상태에서는 10mm의 값이 8mm의 값보다 작아졌다가 13mm에서 다시 커지는 경향을 보이고 있다. Table 5에서는 건조상태와 동결융해 상태 모두 8mm와 10mm에서의 분산값이 유사하지만 13mm에서는 건조상태에서는 매우 작고 동결융해 상태에서는 상대적으로 크게 나타났다.

이 결과만 가지고 최대입경이 시료의 상태에 따라 영향을 미쳤는지를 파악하기는 어렵다. 이를 평가하기 위해서는 분산분석(ANOVA; Analysis of Variance)과 t-test가 필요하다.

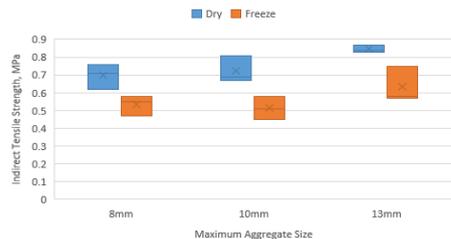


Fig. 4. Whisker Diagram for Indirect Tensile Strength Test by Condition and Aggregate Maximum Size

Table 5. Summary of Fit for Maximum Size and Condition

Class	Sum.	8mm	10mm	13mm	Total
Dry	Obs.	3	3	3	9
	Sum	2.09	2.17	2.54	6.8
	Mean	0.6966	0.7233	0.8466	0.7555
	Var	0.0050	0.0057	0.0004	0.0076
	Obs.	3	3	3	9
Freeze	Sum	1.6	1.54	1.9	5.04
	Mean	0.5333	0.5133	0.6333	0.56
	Var	0.0032	0.0042	0.0102	0.0075
	Obs.	6	6	6	18
	Sum	3.69	3.71	4.44	11.84
Total	Mean	0.615	0.6183	0.74	0.6428
	Var	0.0113	0.0172	0.0179	0.0141

최대입경이 시료의 상태에 따라 간접인장강도에 미친 영향을 파악하기 위하여 분산분석을 실시한 결과가 Table 6이다. Table 6을 보면 시료의 상태를 의미하는 Factor A(row)의 p-Value가 6.44E-05로 유의한 차이를 보이고 있으며 최대입경의 변화를 나타내는 Factor B(column)의 P-Value는 0.013346으로 95% 신뢰도에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

그리고 이들 두 가지의 상호작용에 대해서는 P-Value 값이 0.78776으로 95% 신뢰도 수준에서 교호작용이 없는 것으로 나타났다.

시료의 상태에 따른 변화는 분산분석으로 유의한 차이를 나타냈지만 최대입경이 간접인장강도에 미치는 영향은 최대입경조건 3가지와 시료의 상태 조건 2가지가 모두 조합된 6가지 조건 모두가 차이가 없는 것은 아니라는 결과이다. 그러므로 이들 6가지 조건에 대해서 t-test를 통해 어느 조합이 통계적으로 유의한 차이를 보이는지 분석해야 한다.

이들 6가지 조건에 대한 t-test를 실시한 결과 건조 상태에서 8mm시료와 13mm시료의 관계를 제외한 나머지 조합에 대해서는 95% 신뢰도에서 유의한 차이를 보이지 않았다. Table 7이 건조상태의 8mm시료와

Table 7. t-test: between 8mm and 13mm

	8mm	13mm
Mean	0.81	0.526667
Variance	0.0052	0.000433
Observations	3	3
Pierson's Coeff.	0.002817	
Mean diff. Assumed	0	
Degree of Freedom	4	
t statistics	6.538462	
P(T<=t) One tail	0.001414	
t Rejection one tail	2.131847	
P(T<=t) Two tail	0.002827	
t Rejection two tail	2.776445	

13mm시료에 대해 T-test를 실시한 결과이다. 여기서 P-Value가 0.05이하인 0.001414로 산출되었고 나머지 조합에 대해서는 모두 P-Value가 0.05보다 큰 값이 산출되어 유의미한 결과를 얻지 못하였다. 따라서 시료의 상태를 변화시키는 조건인 건조상태와 동결융해 상태는 간접인장강도에 유의한 영향을 미친다.

즉, 시료가 동결융해과정을 거치면 건조상태의 시료보다 균열 및 수분에 대한 저항성이 저하된다고 말할 수 있다.

또한 다공성 아스팔트포장의 최대입경이 간접인장강도에 미치는 영향은 동결융해과정을 거친 시료에 대해서는 영향을 미친다고 말할 수 없으며 건조상태의 시료에 대해서는 8mm시료와 13mm시료 사이에 유의한 차이를 보이며 최대입경이 커질수록 간접인장강도가 커진다고 말할 수 있다.

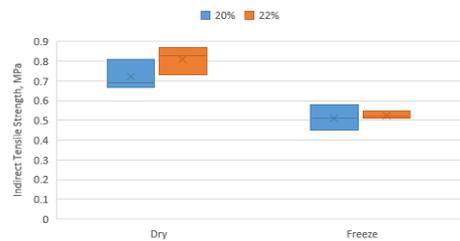


Fig. 5. Whisker Diagram for Indirect Tensile Strength Test by Condition and Air Void

Table 6. ANOVA for Maximum Size and Condition

Source	Sum of Square	DF	Mean Square	F Ratio	P-Value	F Rejection
Factor A(row)	0.172089	1	0.172089	35.7278	6.44E-05	4.747225
Factor B(column)	0.060878	2	0.030439	6.319493	0.013346	3.885294
Interaction	0.002344	2	0.001172	0.243368	0.78776	3.885294
Error	0.0578	12	0.004817			
Total	0.293111	17				

Table 8. Summary of Fit for Air voids and Condition

Class	Sum.	20%	22%	Total
Dry	Obs.	3	3	6
	Sum	2.17	2.43	4.6
	Mean	0.7233	0.81	0.7666
	Var	0.0057	0.0052	0.0066
Freeze	Obs.	3	3	6
	Sum	1.54	1.58	3.12
	Mean	0.5133	0.5266	0.52
	Var	0.0042	0.0004	0.0019
Total	Obs.	6	6	
	Sum	3.71	4.01	
	Mean	0.6183	0.6683	
	Var	0.0172	0.0263	

Table 9. ANOVA for Air voids and Condition

Source	Sum of Square	DF	Mean Square	F Ratio	P-Value	F Rejection
Factor A(row)	0.182533	1	0.182533	46.80342	0.000132	5.317655
Factor B(col.)	0.0075	1	0.0075	1.923077	0.202934	5.317655
Interaction	0.004033	1	0.004033	1.034188	0.338943	5.317655
Error	0.0312	8	0.0039			
Total	0.225267	11				

Fig. 5는 시료의 상태와 공극률에 따른 간접인장강도의 분포를 보여주는 그림이다. 이 그림에서 보면 시료의 건조상태와 동결융해를 경험한 시료 사이에는 유의한 차이를 보여주고 있다. 한편 공극률에 따른 건조상태와 동결융해를 경험한 시료 사이에는 유의한 차이를 보여주지 못하고 있다. 이것을 수치적으로 표현한 것이 Table 8이다.

이 표에서 건조상태의 시료에 대한 간접인장강도의 분산은 비슷하며 서로 중복되는데 반하여 동결융해를 경험한 시료는 공극률 22%의 시료가 20%의 시료보다 더 적은 분산을 보여주고 있다. 이러한 영향요소가 간접인장강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 분산분석을 실시해야한다.

Table 9는 혼합물 시료상태를 주변수로 하고 공극률을 부변수로 설정하여 분산분석을 실시한 결과이다. Table 9에서 시료상태, Factor A(row)에 대한 P-value가 0.000132로 95% 신뢰도 수준에서 유의한 차이를 보였다. 그러나 공극률, Factor B(col.)은 P-value가 0.202934로서 95%의 신뢰도 수준에서 서로 차이를 보이지 못하고 있다. 그리고 두 변수 사이의 교호작용에 대한 P-value가 0.338943으로 95% 신뢰도 수준에서 의미 있는 차이가 있다고 말할 수 없다.

따라서 이번 결과에서도 시료의 상태를 건조 상태와 동결융해를 경험한 시료 사이에는 균열과 수분민감성을

대표하는 간접인장강도에 유의한 차이를 보여줬다. 동결융해가 예상되는 지역에서는 동결융해 조건에 강한 혼합물을 적용할 필요가 있다. 또한 다공성 아스팔트 혼합물에서 20%의 공극과 22%의 공극 사이의 2%는 기능면에서 큰 차이를 나타내지만 본 실험에서는 2%의 공극률 차이가 다공성 혼합물의 내구성 척도인 간접인장강도에 유의한 영향을 미치는 것으로 밝혀지지는 못했다. 이것은 공극률 2% 차이의 시료를 정확히 제작할 수 있는 실험실 여건과 관련이 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

배수성, 저소음, 투수성포장 등으로 다양하게 진화해 가고 있는 다공성 아스팔트포장 혼합물의 내구성에 영향을 미치는 요소에 대한 연구로서 혼합물의 최대입경, 공극률, 그리고 동결융해를 경험하는 시료의 조건이 다공성 포장의 내구성의 척도인 간접인장강도에 미치는 영향을 분석하는 실험과 분석을 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

첫째, 20%의 공극률이라는 공통조건을 갖고 골재의 최대입경을 8mm, 10mm, 13mm의 변화가 간접인장강도에 미치는 영향을 분석한 결과 건조상태의 시료에 대해서는 최대입경이 클수록 간접인장강도가 커지는 경향을 보였으며 8mm와 13mm 혼합물 사이에는 95% 신뢰 수준에서 유의한 차이를 보였다. 그러나 동결융해를 경험한 시료에 대해서는 95% 신뢰도 수준에서 골재의 최대입경 차이가 간접인장강도에 영향을 준다고 말할 수 없는 것으로 나타났다.

둘째, 동일한 아스팔트 바인터를 이용하고 공극률을 20%로 유지하면서 골재의 최대입경에 변화를 준 시료에 대하여 건조상태와 동결융해를 경험한 시료 사이에는 신뢰도 수준 99.9% 이상에서 평균의 차이가 유의한 것으로 나타났다. 또한 공극률을 20%와 22%로 차이를 두었을 때 건조시료와 동결융해를 경험한 시료는 유의한 차이

를 나타내었다. 따라서 추운 기후의 지역에서는 동결융해에 대한 실험결과에 유념할 필요가 있다.

셋째, 아스팔트 혼합물의 최대입경과 시료조건 사이에는 교호작용이 없는 것으로 나타났다. 또한 공극률의 차이와 시료조건 사이에도 교호작용은 없는 것으로 나타났다. 즉, 시료조건에 따라 간접인장강도의 최대값과 최소값을 갖는 최대입경 혼합물 또는 공극률이 서로 교차하지 않다는 것을 의미한다.

넷째, 동일한 아스팔트 바인더 사용하고 동일한 골재의 최대치수를 사용하고 공극률을 20%와 22%로 변화를 주고 시험하면 간접인장강도에 유의한 차이가 있을 것으로 가설을 세웠으나 95% 신뢰수준에서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉, 공극률 20%와 22%의 아스팔트 혼합물은 간접인장강도로 95% 신뢰수준에서 구분할 수 없다는 결론을 얻었다. 공극률 20%와 22%의 차이는 기능면에서 현격한 차이를 나타내므로 이 두 가지의 역학적 특성은 중요한 의미를 갖는다. 공극률을 보다 정밀하게 생산할 수 있는 실험실과 현장의 여건을 반영한 실험이 추가적으로 필요하다고 판단된다.

다공성 아스팔트 혼합물의 내구성을 높이기 위한 연구로서 간접인장강도라는 내구성에 대한 기준을 설정하고 골재의 최대치수, 시료조건 그리고 공극률에 변화를 주면서 계획적으로 실험하고 분석하였다. 앞으로 적용이 확대되고 다변화되는 다공성 아스팔트 포장의 내구성을 높이기 위한 체계적인 실험계획과 분석이 필요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] J. S. Lee, J. H. Jin, G. T. Cho, W. P. Son, Y. K. Nam, A Study of Mechanical Characteristics of Drainage Asphalt Mixtures, *Journal of the Korean Society of Highway Engineers*, Annual Conference, 2015 (in Korean)
- [2] K. H. Lee, S. M. Ham, Strength Characteristics of Mixtures for Drainage Asphalt Surface Layer, *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 7, 2011
- [3] M. S. Lee, The Analysis of Indirect Tensile Strength(ITS) Characteristic using Physical Properties of Asphalt Mixtures, *Journal of the Korea Society of Highway Engineers*, Vol.16, No. 6, pp.19-25, December 2014
- [4] C. K. Ock, J. H. Kim, J. S. Lee, Noise reduction of Asphalt Concrete Pavement: Techniques and their performance evaluation, *Journal of the Korean*

*Society of Highway Engineers*, Vol. 12, No. 1, 2010.3, pp.29-37 (in Korean)

- [5] S. H. Cho, Y. J. Bak, N. S. Kim, A study on Application of Warm-Mix Quiet Pavement Using Fine-Size Aggregate, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, 2013, pp.56-64 (in Korean)
- [6] S. H. Cho, N. S. Kim, W. S. Kim, S. H. Lee, Mix Design of Small-Size Quiet Pavement, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Annual Conference, 2011.2, pp.178-178 (in Korean)
- [7] S. K. Lee, S. M. Kim, S. M. Whang, J. M. Lee, Correlation Analysis Between Pay Adjustment factors of Asphalt Pavement and Fatigue Cracking using Indirect Tensile Test, *Journal of Korea Society of Highway Engineers*, 2008 Annual conference, 2008
- [8] KS F 2389:2019, Performance grade for asphalt binder, 2019.12
- [9] KS F 2393:2019, Standard test method for rheological properties of asphalt binder using dynamic shear rheometer, 2019.12
- [10] KS F 2390:2019, Standard Test Method for Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using Bending Beam Rheometer, 2019.12
- [11] KS M ISO 2592:2018, Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method, 2018.12
- [12] KS F 2392:2019, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt Binder using Rotational Viscometer, 2019.12
- [13] KS M 2259:1980, Testing Method for Rolling Thin-Film Oven of Asphalt (Effect of Heat and Air on Moving Film of Asphalt), 2015.7
- [14] KS F 2382, Standard test method for Indirect Tension of asphalt mixtures, 2018.12

유 인 균(In-Kyoon Yoo)

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 공대대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 고려대학교 공대대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 10월 : 도로 및 공항 기술사, 한국산업인력공단

• 1987년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

<관심분야>

도로공학, 교통소음

이 수 형(Su-Hyung Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경기대학교 공대대 학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 경기대학교 공대대 학원 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

<관심분야>

도로공학, 교통소음

---

박 기 수(Ki-Soo Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한양대학교 공학대 학원 교통공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 신진연구원

<관심분야>

도로공학

---

윤 강 훈(Kang Hoon Yoon)

[정회원]



- 1979년 9월 : 고려대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1997년 1월 : Texas A&M U. (Post.Doc)
- 2004년 7월 : 국민포장(대통령)
- 2010년 11월 : 수자원개발기술사

- 1984년 9월 ~ 2011년2월 : 한국건설기술연구원 수자원 연구실 연구위원
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국토코넷 회장
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술사회 연구위원회 위원장

<관심분야>

수자원개발, 국가방재시스템, 해안 및 항만