

아스팔트 혼합물의 물리적 특성을 이용한 간접인장강도의 특성 분석

The Analysis of Indirect Tensile Strength (ITS) Characteristic using Physical Properties of Asphalt Mixtures

이 문 섭 Lee, Moon Sup | 정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : truepath@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study was performed to evaluate the possibility of Indirect Tensile Strength (ITS) as a testing method that can predict cracking on pavement.

METHODS : Three asphalt binders and one kind of aggregate were used in this study, and all asphalt mixtures were produced using Gyratory Compactor followed asphalt mix design. The ITS test was performed for the mixture which are artificially short-term aged using the oven. The ITS properties were analyzed by air void, compaction temperature, asphalt content, and asphalt binder.

RESULTS : The results of this study indicated that (1) the compaction temperature did not show relationship with the ITS test; (2) there was no specific trend between the asphalt content and the ITS test; (3) the ITS could reveal the property of kinds of asphalt binders; (4) the asphalt mixture that were produced at optimum temperature suggested by manufacturer did not exhibit optimum result for all asphalt binder.

CONCLUSIONS : The possibility of ITS was confirmed from this study for replacement of the Marshall Stability method. However, it needs to perform in further studies of aggregate and compaction property to suggest a new ITS standard value.

Keywords

indirect tensile strength, compaction temperature, asphalt content, air void

Main Author : Lee, Moon Sup, Senior Researcher
Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro,
ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
Tel : +82.31.9100.690 Fax : +82.31.9100.161
E-mail : truepath@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Sep. 26, 2014 Revised Oct. 1, 2014 Accepted Nov. 18, 2014

1. 서론

마셜 안정도는 국내 뿐 아니라 많은 국가에서 아스팔트 혼합물의 배합설계 특성치 중 한 가지로 사용되고 있다. 마셜 안정도 시험법은 60여 년 전에 미국의 Bruce Marshall에 의해 개발된 시험법으로, 혼합물을 다진 후 하중에 대한 혼합물의 견고성으로서 배합설계에서 중요한 항목으로 되어 있다. 그러나 마셜 특성치는 시험장치가 간단하고 측정하기 쉽지만 대부분의 혼합물이

기준치를 모두 만족하여도 소성변형 및 피로균열 등 포장의 공용성과 관련된 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 혼합물의 마셜 안정도 값이 기준을 크게 상회하더라도 실제 포장에서 소성변형과 피로균열과 같이 포장성능을 저해하는 문제가 빈번히 발생하고 있다. 특히 마셜 안정도는 같은 개질재로 함량을 달리하여 제조한 같은 골재입도의 아스팔트 혼합물에서도 그 값의 차이가 별로 나타나지 않는다(이상범, 2001). 이와 같이 아스팔트 혼합물에서 마셜 안정도의

측정결과로 소성변형을 예측하는 것은 상관성이 떨어지는 것으로 나타났고, 다짐면과 차륜 재하 방향이 아닌 측면을 구속하여 하중을 재하하는 것은 현장에서 포장을 다지고 차량을 통행시키는 것과도 거리가 먼 시험법이라 할 수 있다. 따라서 아스팔트 혼합물의 배합설계와 공용성능과의 상관성을 향상시키려면 보다 합리적인 개념의 배합설계로의 진전이 있어야 한다.

마샬 안정도를 대체하여 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 평가할 수 있는 보다 진보한 시험방법으로 간접인장강도(IDT, Indirect Tension Strength test), 피로시험 등이 있다. 그러나, 피로시험은 동적재하시험이고, 고가이며, 시험방법이 비교적 어렵고 미숙련자의 경우 작은 환경변화에도 결과의 변동성이 크게 나타나게 되며 해석도 어려워 아스팔트 플랜트 등 현장에서의 실용성이 떨어진다. 따라서, 균열을 모사하는 시험으로 간접인장강도를 가장 많이 사용되고 있는 실정이다. 간접인장강도 시험은 교통하중 작용 시 또는 표층에서 온도 변화가 심한 지역의 아스팔트 콘크리트층 아래 부분 즉, 인장영역의 응력상태를 모사한 시험으로 피로균열과 저온균열에 대한 저항성을 평가할 수 있는 시험방법이다. T. W. Kennedy(ARRB Conference Proceeding, 1978)는 간접인장강도 시험은 아스팔트 혼합물의 탄성 및 점성 특성은 수축균열, 피로균열 및 소성변형과 관련이 있다고 하였다. 간접인장강도의 Stiffness값은 시험의 온도에 따라서 200~400kPa로 나타나기 때문에 South Australia에서는 간접인장강도 시험을 45℃에서 수행한다. 또한 이전의 연구에서는 간접인장강도가 포장 파괴요인 중 온도균열과 피로균열에 밀접한 관계가 있음을 제시하였다(Hrold L. Von Quintus, Thomas W. Kennedy; 1989). 한편 Frocht은 간접인장강도시험 시 마샬 공시체에 작용하는 응력분포곡선을 제시하였다. 국내의 연구에서도 간접인장강도의 배합설계 기준치 적용을 위한 연구들이 수행되었다. 유진명(2001) 등은 아스팔트 혼합물의 공용특성과 상관성이 없는 마샬 안정도를 대신하여 다른 역학적 특성을 배합설계 단계에서 도입하는 연구를 수행하였다. 압축강도, 간접인장강도, 전단강도 시험이 도입 가능하다는 결론을 도출하였으며 고철승(2002) 등은 선행연구의 결과를 이용하여 아스팔트 배합설계 단계에서 마샬 안정도, 전단강도, 간접인장강도 등의 역학적 시험을 도입하였다. 시험결과 적용한 역학적 시험들은 골재의 입도변화나 바인더의 변화에 유의한 수준으로 변화한다고 하였다. 최근에는 선회 다짐으로 다져진 현장 및 실험실의 공시체를 이용하여 아스팔트 함량과 공극률, 입도, 아스팔트 바인더 종류에 따른 간접인

장강도의 특성을 분석하였다. 실험결과 공극률이 증가할수록 간접인장강도는 감소하고, 아스팔트 바인더 또는 필러량이 증가할수록 간접인장강도는 증가된다고 하였다(Johnny Tran; 2009).

이와 같이 간접인장강도는 오랜 시간 동안 많은 연구자들이 시험을 수행하면서 아스팔트 혼합물의 균열을 평가하거나 배합설계에 적용하는 연구를 수행하고 있다. 이에 본 연구에서는 균열발생 가능성을 예측하기 위하여 널리 사용되는 간접인장강도 시험법과 이에 영향을 미치는 요인들을 분석하여 균열 예측 시험법으로서의 가능성을 평가하였다. Fig. 1은 본 연구의 진행절차를 보여준다.

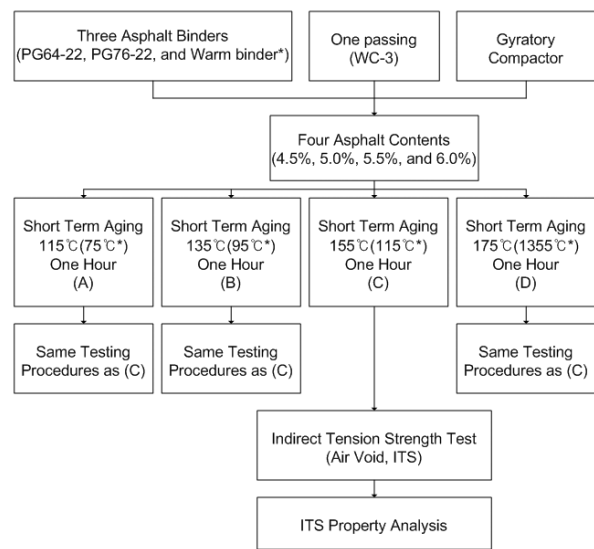


Fig. 1 Flow Chart of Experimental Design Procedures

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 비교실험에서는 3가지 아스팔트 바인더를 사용하여 혼합물을 각각 4가지 온도에서 혼합 및 다짐하여 직경 100mm 공시체를 제조하고 용적특성을 분석하였다. 3가지 바인더는 가열아스팔트 혼합물(Hot-Mix Asphalt: HMA)용 PG64-22와 PG76-22 한 가지 썩과, 중온아스팔트 혼합물(Warm-Mix Asphalt: WMA)용 PG70-22 한 가지이다.

골재품질에 따른 아스팔트 혼합물의 영향이 크므로, 골재의 영향을 최소화하기 위하여 편장석(flat and elongated particles) 비율이 낮은 1등급 골재를 선정하였다. Table 1은 선정된 골재의 물리적 성질을 보여주고 있다. 굵은골재 최대치수를 19mm와 잔골재, 채움

재와 혼합하여 각각 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 실험을 수행하였다(Fig. 2).

Table 1. Properties of Aggregates

Classification		Gravity	Absorptivity	Abrasion	Flat or elongated particle
Standard		≥ 2.5	$\leq 3.0\%$	$\leq 40\%$	$\leq 10\%$
Granite	Coarse aggregate	2.62	1.02	21.0	8.7
	Screenings	2.78	1.94	-	-
Filler		2.69	-	-	-

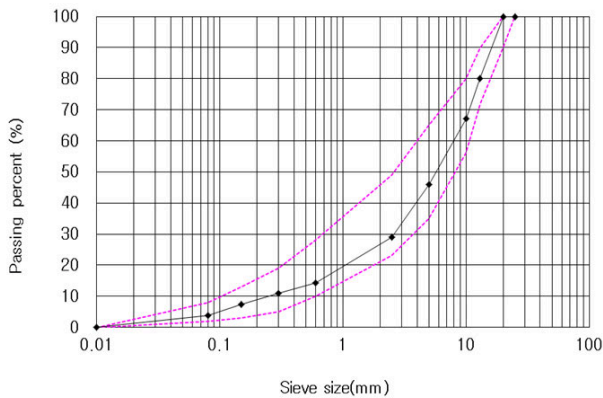


Fig. 2 Passing Gradation of 19mm Aggregate Used in This Study

아스팔트 혼합물의 작업온도를 30~50℃ 낮추어 중온에서 작업이 가능하게 하기 위해서는 상온에서는 고체 상태이면서 중온에서는 유체로 변하는 분자량 수백 정도로 낮은 물질로 바인더의 용점을 낮추기 위하여 Wax계의 컴파운드를 사용하였다. 또한, 개질제로는 가루 형태의 폴리머로 LDPE(Low-Density Polyethylene)를 사용하였다. 특히 LDPE는 종류에 따라 차이가 있지만 작업온도범위(110~130℃)에서 아스팔트 혼합물의 작업성에 지장을 주지 않는 대표적인 폴리머 중 하나이다. 그 외에 성형성의 강화, 스티프네스 강화 등을 위해 미량의 첨가제들이 추가로 투입되어 개발된 중온 고내구성 아스팔트(Durable Semi-hot-mix Asphalt: DSA)를 사용하였다.

2.2. 시험방법

Table 2는 각각의 아스팔트 바인더 생산자가 제시하고 있는 다짐온도를 보여준다. 간접인장강도의 다짐온도에 따른 특성을 분석하기 위해 HMA용 PG64-22와

76-22는 각각 135℃와 155℃를 현장 다짐온도로 보고 그 위 아래로 각각 20℃를 가감하여 혼합물을 제조하였다. 그리고 중온화 바인더인 PG70-22는 135℃를 최고의 다짐온도로 보고 그 밑으로 얼마나 낮은 온도에서의 다짐이 가능한지를 보기위해 20℃씩 3단계를 낮추어 제조하였다. 이와 같이 결정한 다짐온도를 Table 3에서 보여주고 있다. 또한, 각각의 다짐온도에서 제조된 공시체들은 용적특성을 측정하여 간접인장강도와의 상관성을 분석하였다.

Table 2. Asphalt Mixture Compaction Temperature Suggested by Manufacturer

Mixture	Performance grade of asphalt binder	Compaction temperature (°C)		Note
		Standard	Suggested temperature by manufacturer	
HMA	PG64-22	140±20		HMA 64-22
HMA	PG64-22	150±2	145-155	HMA 64-22
WMA	PG70-22	-	115±10	WMA 70-22

Table 3. Compaction Temperature Classification of Mixture for Maximum Aggregate Size

Maximum size	Mixture classification	Performance grade of binder	Test compaction temperature
19mm	HMA	PG64-22	115°C, 135°C, 155°C, 175°C
	HMA	PG76-22	115°C, 135°C, 155°C, 175°C
	WMA	PG70-22	75°C, 95°C, 115°C, 135°C

2.3. 배합설계

배합설계는 상기 각각의 온도로 아스팔트 함량을 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%까지 4단계로 변화시켜가며 선화다짐 횟수 100회, 마샬다짐 횟수 75회로 혼합물을 다짐하였다. 비빈 혼합물(loose-mix)은 다짐 전 1시간 동안 오븐에 각각의 다짐온도에서 단기노화(short-term aging) 시켰으며 이때 몰드도 함께 넣어 같은 온도를 유지토록 하였다. PG64-22와 76-22 바인더의 HMA 다짐온도는 115, 135, 155, 175℃이며, PG70-22의 중온아스팔트 혼합물(WMA)의 다짐온도는 75, 95, 115, 135℃이다. 이 온도는 혼합물을 1시간 단기노화 시킨 온도이므로 실제 다짐온도는 약간 낮을 수 있으나 신속한 다짐으로 그 차이는 미미하였다. 또한 다짐 초기와 다짐 후기에 다소의 온도차이도 있을 수 있으나

그 변화를 일일이 측정하기란 쉽지 않으므로 혼합물이 다짐몰드에 들어가는 온도인 상기 온도를 다짐온도로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 다짐온도에 따른 간접인장강도

Fig. 3~5는 다짐온도별 간접인장강도의 특성을 분석하였다. 각각의 다짐온도는 각각의 아스팔트 바인더의 다짐온도를 기준으로 $\pm 20^{\circ}\text{C}$, $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 씩 선정하여 3개씩 공시체를 제작하여 평가하였다.

Fig. 3은 PG64-22 아스팔트 바인더의 다짐온도별 간접인장강도의 특성을 보여주고 있다. 아스팔트 함량 4.5%에서는 다짐온도가 올라가면 강도값이 감소하는 아래쪽이 볼록한 2차원 곡선으로 나타났다. 하지만, 5.5%는 다짐온도가 올라갈수록 강도값은 증가하다가 감소하는 위쪽이 볼록한 2차원 곡선으로 나타났다. 그리고 5.0%와 6.0%는 일정한 경향이 없는 것으로 나타났다.

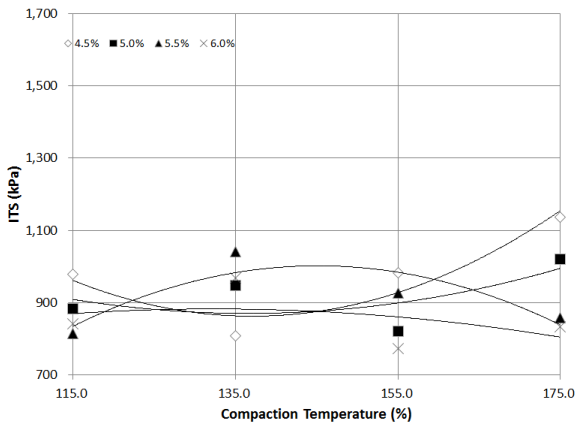


Fig. 3 ITS Result by the Compaction Temperature (HMA PG64-22)

Fig. 4는 중온 아스팔트 혼합물의 다짐온도에 따른 간접인장강도의 변화를 보여주고 있다. 아스팔트 함량 4.5%는 다짐온도가 증가하면 강도는 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 5.0, 5.5, 6.0%는 일정한 경향을 나타내지 못하였다.

Fig. 5는 개질 아스팔트 바인더의 간접인장강도의 변화를 보여주고 있다. 4.5%는 아래쪽으로 볼록한 2차원 곡선을 보였으며, 5.0%는 다짐량이 증가할수록 간접인장강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 5.5, 6.0%는 다짐량이 증가할수록 강도가 증가하다가 감소하는 위쪽으

로 볼록한 2차원곡선을 보였다.

일반적으로 동일한 아스팔트 함량에서 다짐온도가 올라갈수록 다짐도가 높아져서 공극률이 낮아진다. John T. Harvey(1995) 등은 공극률이 증가할수록 피로균열은 점차 감소한다고 하였다. 또한, 이상범(2001)은 공극률이 증가할수록 소성변형은 증가하다가 일정 공극률에서 다시 감소하는 2차원 곡선을 보인다고 하였다. 하지만, 실험결과 다짐량과 간접인장강도 사이에는 일정한 경향이 없는 것으로 나타났다.

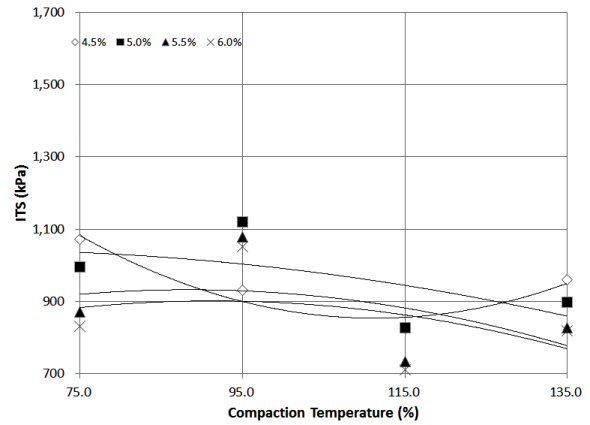


Fig. 4 ITS Result by the Compaction Temperature (HMA PG70-22)

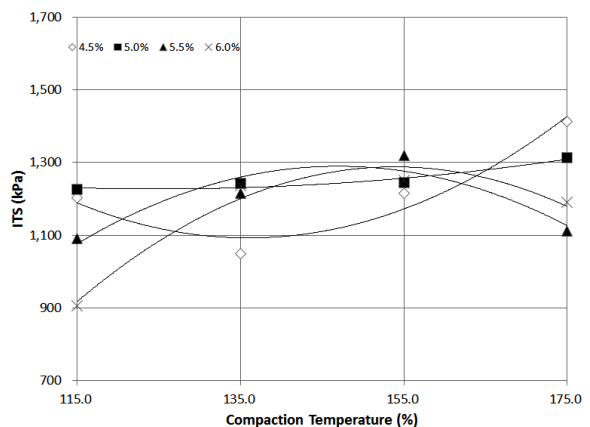


Fig. 5 ITS Result by the Compaction Temperature (HMA PG76-22)

3.2. 아스팔트 함량에 따른 간접인장강도

Fig. 6~8는 아스팔트 함량별 간접인장강도의 특성을 분석하였다. 각각의 다짐온도는 아스팔트 함량 4.0%에서부터 0.5%씩 증가하여 6.0%까지 아스팔트 함량별로 3개씩 공시체를 제작하여 평가하였다.

Fig. 6은 HMA PG64-22 혼합물의 아스팔트 함량별

간접인장강도의 특성을 보여주고 있다. 다짐온도 135℃에서는 아스팔트 함량이 증가하면 강도도 증가하다가 감소하는 위쪽으로 볼록한 2차원 곡선을 보여주었다. 하지만, 115℃와 175℃는 아스팔트 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 155℃는 일정한 경향이 없는 것으로 나타났다.

일반적으로 아스팔트 혼합물의 작업성과 공용성능을 고려하여 다짐온도를 결정하며, PG64-22 아스팔트 바인더의 다짐온도는 135℃이다(가열 아스팔트, 2009). 하지만, Fig. 6에서도 보듯이 최적 다짐온도인 135℃의 간접인장강도는 다른 다짐온도와 비교하여 작거나 큰 값을 나타내었다.

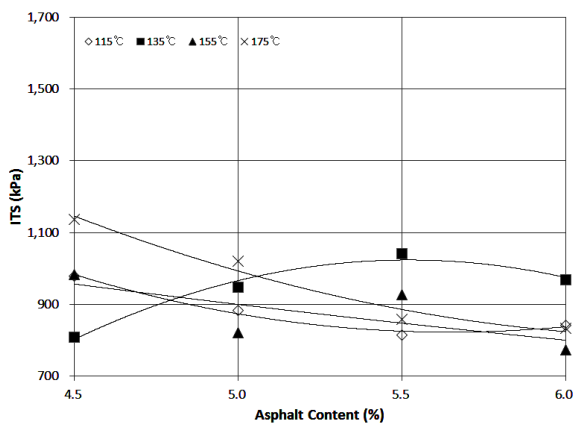


Fig. 6 ITS Result by the Asphalt Content (HMA PG64-22)

Fig. 7은 WMA PG70-22 혼합물의 아스팔트 함량별 간접인장강도의 변화를 보여주고 있다. 다짐온도 95℃에서는 아스팔트 함량이 증가하면 강도도 증가하다가 감소하는 위쪽으로 볼록한 2차원 곡선을 보여주었다. 하지

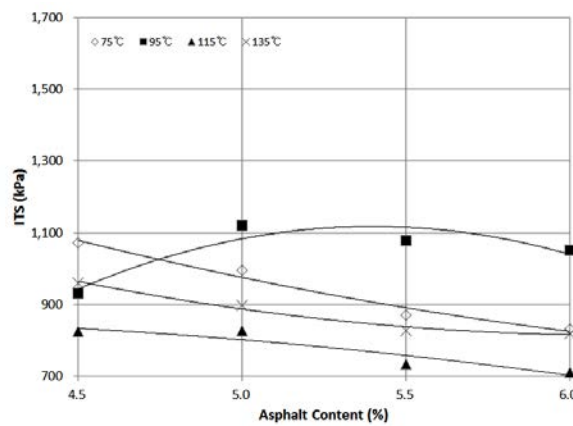


Fig. 7 ITS Result by the Asphalt Content (HMA PG70-22)

만, 다른 75℃, 115℃, 135℃에서는 아스팔트 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었다.

중온 아스팔트 혼합물 중에서 PG70-22 혼합물의 다짐온도는 120℃이다(저탄소 중온, 2010). 하지만, Fig. 7에서도 보듯이 최적 다짐온도와 유사한 다짐온도인 115℃의 간접인장강도는 아스팔트 함량 변화에 따라 감소하는 경향을 보여주었으며, 다른 다짐온도보다 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 8은 HMA PG76-22 아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량별 간접인장강도의 변화를 보여주고 있다. 다짐온도 135℃와 175℃에서는 아스팔트 함량이 증가하면 강도도 증가하다가 감소하는 위쪽으로 볼록한 2차원 곡선을 보여주었다. 하지만, 115℃와 155℃에서는 아스팔트 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었다.

일반적으로 아스팔트 혼합물의 작업성과 공용성능을 고려하여 다짐온도를 결정하며, PG76-22 아스팔트 바인더의 다짐온도는 150℃이다(가열 아스팔트, 2009). 하지만, Fig. 9에서도 보듯이 최적 다짐온도와 유사한 다짐온도인 155℃의 간접인장강도는 아스팔트 함량 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 다른 다짐온도와 유사하거나 큰 값을 보여주었다.

유진명(2001)은 아스팔트 함량이 증가할수록 인장강도는 증가하다가 감소하는 경향인 위쪽이 볼록한 2차원 곡선을 나타낸다고 하였다. 또한, 고철승(2002)은 간접인장도, 마찰안정도, 압축강도, 전단강도 등의 역학적 시험은 아스팔트 함량이 증가할수록 강도값이 증가하다가 감소하는 경향을 보인다고 하였다. 하지만, 본 연구에서는 기존문헌과 다른 결과값을 보여주었다.

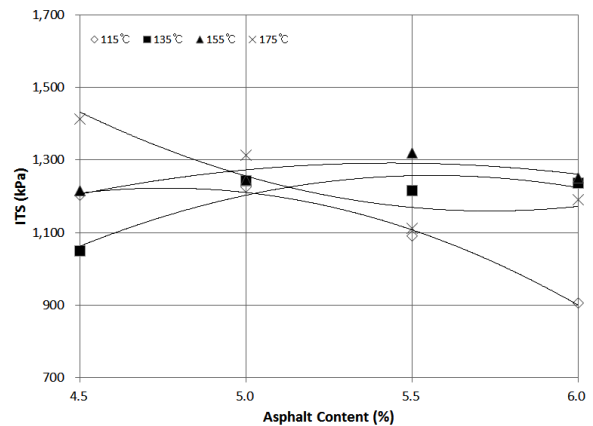


Fig. 8 ITS Result by the Asphalt Content (HMA PG76-22)

Fig. 9는 각각의 아스팔트 혼합물 별로 제조사에서

제시한 다짐온도에서 제조된 혼합물의 간접인장강도의 변화를 보여주고 있다. 앞서 언급했듯이 제조사에서 제시한 다짐온도로 제조된 혼합물은 아스팔트 함량이 증가할수록 강도가 증가하다가 감소하는 경향을 보여주었다.

HMA PG76-22 혼합물은 최소 1,100kPa 이상으로 높은 강도를 보여주었으며, HMA PG64-22, WMA PG70-22순으로 간접인장강도값을 나타내었다. 일반적으로 바인더 시험에서는 PG64-22 아스팔트 바인더보다 PG70-22바인더가 역학적 특성이 좋게 나타난다. 하지만, 혼합물 시험에서는 중온이라는 특성으로 인하여 PG70-22 혼합물이 가장 낮은 강도값을 보여주는 것으로 판단된다.

아스팔트 바인더의 다짐온도, 함량 등의 용적특성 변화는 간접인장강도의 특성에 어떠한 영향도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 하지만, 아스팔트 바인더 종류별 특성을 파악할 수 있는 시험법으로 선정이 가능한 것으로 나타났다.

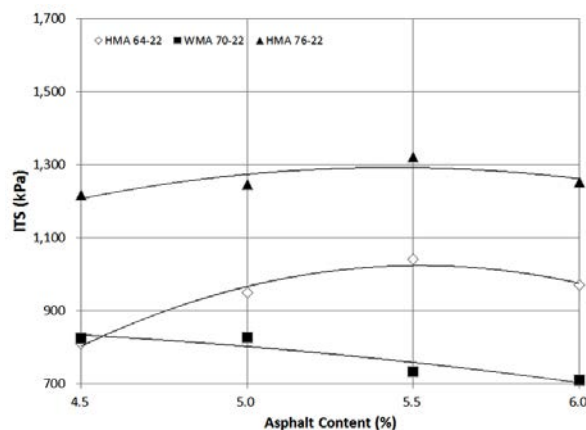


Fig. 9 ITS Result by the Asphalt Content of Three Asphalt Binders

4. 결론

본 연구는 균열발생 가능성을 예측할 수 있는 간접인장강도 시험법(IDT, Indirect Tension strength test)에 대한 특성을 분석하기 위하여 바인더 종류 별로 배합설계에 따라 혼합물을 제작하고 간접인장강도 값을 측정하여 아스팔트 함량 및 다짐온도에 따른 영향을 분석하였다. 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 아스팔트 혼합물의 다짐온도를 기준으로 $\pm 20 \sim 40^\circ\text{C}$ 를 변화시켜 간접인장강도 시험을 수행한 결과, 일정한 경향을 보이지 못함으로써 다짐온도는 간접인장

강도 특성에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

2. 아스팔트 함량을 4.5%부터 0.5% 증가시켜 6.0%까지 4가지 변화를 주어 시험한 결과, 아스팔트 함량 역시 함량에 따른 경향을 보이지 못하면서 아스팔트 함량이 간접인장강도에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.
3. 아스팔트 바인더 종류별 간접인장강도의 특성을 분석한 결과, 바인더 종류에 따라 일정한 경향을 갖는 간접인장강도 결과를 보였으며 이는 간접인장강도 시험이 아스팔트 바인더의 종류별 특성을 반영할 수 있는 시험법임을 나타낸다.
4. 가열 아스팔트 혼합물은 제시한 다짐온도 및 최적 아스팔트 함량 근처에서 가장 높은 간접인장강도를 보여줌으로써 제시된 다짐온도 및 최적 아스팔트 함량의 적합성을 확인할 수 있었다.
5. 반면, 중온 아스팔트 혼합물은 제시된 다짐온도와 최적 아스팔트 함량 근처에서 가장 낮은 간접인장강도를 나타내었으며, 아스팔트 공용성 등급과도 다른 결과값을 보여주었다. 환경문제와 더불어 이슈화되고 있는 중온 아스팔트 혼합물은 균열 및 피로특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.
6. 본 연구는 간접인장강도 시험이 마찰 안정도 시험을 대체하여 혼합물의 균열저항성을 측정함으로써 그 특성을 평가할 수 있는 정적재하시험인지를 가늠하고자 수행하였다. 하지만, 골재 및 다짐 특성에 따른 연구를 추가적으로 수행하여 간접인장강도의 기준값을 제시하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “탄소섬유복합재를 활용한 고기능성 도로포장시스템 개발”로 수행되었습니다.

References

Li Xian Fan(2001), Estimation of Permanent Deformation based on Volumetric and Stiffness Properties of Asphalt Concrete, Kangwon National University, Graduate School, Doctoral Dissertation

Asphalt Mixture Production and Construction(2009), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

Yu Jin Myoung(2001), Analysis of Strength Characteristics for the Kinds of Hot Mix Asphalt, Incheon National University, Graduate School, Master's thesis

Ko Chul Seung(2002), “Correlation Analysis of Mechanical Strengths for Hot Mix Asphalt”, Incheon National University,

Graduate School, Master's thesis

Kennedy, T. W. (1978). "Practical Use of the Indirect Tensile Test for the Characterisation of Pavement Materials". ARRB Proceedings, Volume 9, Part 3.

Harold, L. Von Quintus. and Thomas, W. Kennedy. (1989), AAMAS "Mixture Properties Related to Pavement Performance Proceedings Association of Asphalt of Asphalt Paving Technologists", vol. 5.

Hohn T. Harvey, John A. Deacon, Bor-Wen Tsai, Carl L. Monismith, (1995), "Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and ITS Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California", California Department of Transportation, 1995.

Johnny Tran, Hugo Val Loon, "Indirect Tensile Strength of Asphalt Mixes in South Australia", Transportation research Board.