

결합재의 물리적 성질을 이용한 샌드아스팔트 혼합물의 강도특성 추정

Estimation of Mechanical Properties of Sand Asphalt Concrete
based on Physical Properties of Binder

김 광 우* · 이 순 제** · 이 기 호*** · 이 성 훈**** · 이 병 덕*****
Kim, Kwang Woo · Lee, Soon Jae · Lee, Gi Ho · Lee, Sung Hoon · Lee, Byung Duck

Abstract

This study was performed to estimate the high-speed direct tensile strength(DTS1), low-speed direct tensile strength(DTS2), indirect tensile strength(ITS), resilient modulus(MR) and stiffness index(SI) of sand asphalt mixture based on the absolute viscosity, kinematic viscosity, penetration, softening point and PG grade of binder. DTS2 showed higher correlation with the physical properties than other properties of mixture, and the next was DTS1, ITS, SI and MR in order. Among binder properties, PG grade showed the highest relation with DTS2. Therefore, it was found that the high DTS mixture could be made when the binder with a high PG grade was used. However, since the individual physical property showed a relatively low correlation, various properties were used together in regression analysis. The estimation models of DTS and ITS were over 0.99, respectively. R2 of MR and SI estimation models were over 0.91 and 0.93, respectively. It was concluded that mechanical properties could be estimated with a high coefficient of determination from those physical properties.

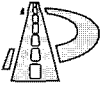
Keywords : sand asphalt mixture, direct tensile strength, indirect tensile strength, viscosity, resilient modulus, stiffness index, polymer-modification, regression analysis

요 지

본 연구에서는 아스팔트 바인더의 절대점도, 동점도, 침입도, 연화점, PG 고온등급을 이용하여 샌드 아스팔트 혼합물의 고속 직접인장강도(DTS1), 저속 직접인장강도(DTS2), 간접인장강도(ITS), 회복탄성계수(MR), 강성지수(SI)를 추정하기 위한 연구를 수행하였다. 여러 가지 혼합물의 특성 중 DTS2가 가장 상관성이 높게 나타났으며 그 다음이 DTS1, ITS, SI, MR 순인 것으로 나타났다. 바인더 성질 중에는 PG 등급이 DTS2와 가장 높은 상관 관계를 보여 PG 고온등급이 높은 바인더를 사용하면 직접인장강도가 어느 정도 우수한 혼합물을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 각각의 물리적 성질만으로는 신뢰도가 낮아 종합적으로 여러 물성을 이용하여 상관성을 분석하였다. 그 결과 직접 및 간접인장강도는 결정계수가 0.99 이상인 모델을 얻을 수 있었다. 그리고 MR, SI 값의 추정치 모델도 R2이 0.91 및 0.93 이상이어서 상당한 신뢰성을 가지고 물성으로부터 역학적 특성을 추정할 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 잔골재 아스팔트 혼합물, 직접인장강도, 간접인장강도, 점도, 회복탄성계수, 강성지수, 폴리머개질, 회귀분석

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수
** 정회원 · 강원대학교 석재신소재센터 연구원
*** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정
**** 정회원 · 대상엔지니어링 도로부 주임연구원
***** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원



1. 서론

국내 아스팔트 포장에 관한 연구는 선진국에 비하여 많이 뒤떨어져 있으며 개질 아스팔트를 사용한 혼합물의 특성 연구가 매우 미흡하다. 몇몇 연구자들^{10,12)}은 개질 아스팔트의 기본 물성 변화에 대한 연구를 통해 국내 여러 종류 아스팔트의 개질에 따른 특성을 파악·보고하였다. 또한 동점도, 절대점도, 연화점, GPC(gel permeation chromatograph), 침입도 시험 등을 통하여 아스팔트의 폴리머 개질 효과 및 노화 특성에 대한 연구를 수행하여 그 중 동점도가 아스팔트 바인더의 개질 효과를 가장 잘 나타내는 것으로 보고하였다.

한편 김 등^{3,7,8)}의 연구에 의하면 GPC에서 측정된 분자입도분포가 간접인장강도 및 MR과 어느 정도 상관관계가 있고, PG 고온 등급이 직접인장강도와 가장 상관관계가 높게 나타난다는 것을 발견하였다. 이와 같이 결합재인 아스팔트(개질 아스팔트 포함)의 물리적 성질이 혼합물의 특정 역학적 성질과 상관관계를 가지고 있어 이를 분석하면 혼합물의 특성을 결합재로부터 추정하는 것이 가능할 것으로 보여진다.

따라서 본 연구에서는 두 가지의 폴리머를 사용하여 4종류의 아스팔트를 개질하여 12가지 개질 아스팔트 혼합물을 제조하였다. 그리고 직접인장강도, 간접인장강도 및 회복탄성계수 시험을 수행하여 상관 분석을 통해 폴리머 개질에 따른 바인더 특성 변화가 혼합물 특성과 가지는 관계를 분석하는데 연구 목적이 있다. 이와 같이 결합재의 성질로부터 그것으로 제조될 혼합물의 역학적 특성을 추정할 수 있다면 사전에 바인더 특성만을 가지고도 필요한 혼합물의 특성을 예측할 수 있으므로 매우 유용한 연구가 될 것이다.

본 연구에서는 결합재의 특성이 혼합물 특성에 미치는 영향을 보다 분명히 파악하기 위하여 직

접인장강도(direct tensile strength: DTS)를 간접인장강도와 병행하여 측정하였다. 간접인장강도(indirect tensile strength: ITS)는 시멘트 콘크리트나 아스팔트 혼합물과 같이 양단을 그립(grip)으로 잡기 어려운 재료를 직접인장으로 시험하기에 어려워 수행되는 우회적 시험방법이다^{1,2)}. 따라서 이를 위해 특수 그립을 제작하여 가운데가 잘록한 공시체를 별도의 집착·고착하지 않고 시험할 수 있는 새로운 기법을 개발하여 사용하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용 재료

2.1.1 아스팔트

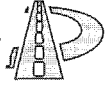
본 연구에서는 국내 3개 정유사(S, L, H)에서 생산되는 AP3(침입도 등급 85~100)와 국내 1개 정유사(S)에서 생산되는 AP5(침입도 등급 60~70)를 사용하였으며 각각 아스팔트의 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 1. Physical properties of asphalts

Property Binder	Penetration at 25°C (0.1mm)	Absolute viscosity (60°C, Poise)	Kinematic viscosity (135°C, cs)	Softening point (°C)
S3 (S-AP3)	95	1,110	285	44.0
L3 (L-AP3)	94	820	278	46.5
H3 (H-AP3)	99	1,390	296	47.0
S5 (S-AP5)	60	2,460	425	50.0

2.1.2 개질재 및 골재

사용된 아스팔트 개질재는 국내에서 생산되는 LDPE(P)와 SBS(S)를 사용하였다. P와 S에 대



한 기본 성질과 설명은 기존 문헌^{7,8,11,12)}에 자세히 나와있다.

본 연구에서 사용된 골재는 영서지방에서 생산되는 편마암(Gneiss)이며 굵은골재 사용시 골재의 다양성으로 인해 결합재의 특성이 불분명해지는 것을 최소화하기 위하여 잔골재만을 사용한 샌드 아스팔트 혼합물 입도(ASTM D 3515)로 조정하였다. 즉, 굵은골재를 포함하는 혼합물은 결합재의 특성변화가 혼합물 인장강도에 미치는 영향을 판단하는데 있어서 굵은골재의 존재 때문에 변동성이 커진다. 따라서 본 연구에서는 결과에서의 불확실성을 줄이기 위해 샌드아스팔트 혼합물을 사용하였다. KS 규정에 따라서 품질 시험을 수행하여 그 결과를 표 2에 나타내었다. 그림 1은 골재의 입도이다.

표 2. Physical properties of aggregate

Test items	Spec. limit	Measured value
Specific gravity	> 2.45	2.79
Absorption (%)	< 3.0	0.3
Fineness modulus	2.3 ~ 3.1	2.96

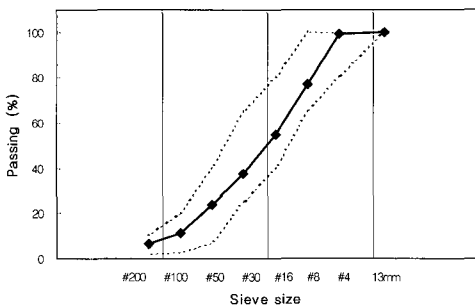


그림 1 Gradation of aggregate

2. 실험방법

2.1 개질 아스팔트 제조

아스팔트를 개질하기 위한 개질재의 양은 문헌 11)을 통하여 작업성을 고려하여 개질 효과가 뛰어난 폴리머 첨가량을 결정하여 AP3에는 P 6%, S 5%를 첨가하였고 AP5에는 P와 S를 각각 5%씩 첨가하였다. 이와 같이 함량에 차이를 둔 것은 두 폴리머의 특성차이로 같은 함량에서 작업성에 차이가 생기므로 S3 아스팔트를 기준으로 혼합물의 다짐온도(약 135℃) 수준에서 측정하는 동점도가 대등하게 얻어지는 함량으로 조절한 것이다. 첨가 방법은 문헌^{11,12)}에 상세히 제시되어 있다.

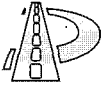
2.2 개질 아스팔트의 물리적 특성 시험

침입도 시험(KS M 2252), 연화점 시험(KS M 2250), 절대점도 시험(KS M 2247), 동점도 시험(KS M 2248), DSR 시험(AASHTO TP5)을 수행하여 아스팔트 바인더 별로 물리적 특성과 미국 슈퍼패이브 제 1단계 바인더시험에서 제시한 PG 고온등급을 측정하였다.

2.3 간접인장강도에 의한 배합설계

본 실험은 직접인장강도 시험에서 잘못된 공시체를 만들기 때문에 마샬 공시체의 안정도를 측정하지 않고 간접인장강도를 이용하여 배합설계를 수행하였다. 아스팔트 함량을 7~9%까지 0.5%씩 증가시키면서 배합설계를 수행하였으며 공시체의 제작은 마샬 다짐기를 이용하여 상하양면을 50회씩 다짐하여 공극률 4%를 기준으로 가장 높은 ITS에서 OAC를 구하였다.

간접인장강도 시험은 마샬 공시체를 제작하여 마샬가압 장비에 Lottman loading head를 이용해 50mm/min 재하속도로 하중을 가하여 수행하였다. 이 시험시 최대하중과 그때의 수직변위로부터 그림 2와 같이 강성지수(stiffness index: SI)를 구하였으며 이에 대한 자세한 설명은 문헌 7에 제시되어 있다. 제작한 공시체는 탈형 후 25℃ 온도



에서 24시간 양생시킨 후 동일 온도에서 시험하였다.

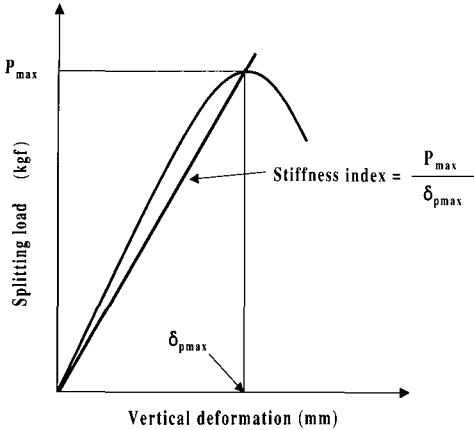


그림 2. Schematic illustration of stiffness index

2.4 직접인장강도 시험

직접인장강도시험(direct tensile strength: DTS)은 그림 3에서와 같이 가운데 부분이 잘록한 공시체(slender specimen)를 제작하여 노치(Notch)를 만들지 않고도 잘록한 목 부분에서 파괴가 일어나도록 하였다. 이 시험을 위하여 특수한 그림을 제작하였으며 Instron 만능 재료 시험기를 사용하여 하중을 재하하였다. 공시체를 그림에 설치한 장면을 그림 3에서 보여주며 공시체 제조 방법 등 보다 상세한 사항은 기존 문헌^{8,11)}에 상세히 제시되어 있다.

상하 그림 간격을 일정(80mm)하게 설정하고 재하속도는 간접인장강도와 같이 빠른 속도인 50mm/min와 아주 저속인 0.5mm/min 두 가지로 하였다. 이와 같이 두 가지 속도로 실험을 한 이유는, 첫째 50mm/min는 간접인장강도와 같은 속도로서 실험 후 그 값을 비교하기 위한 것이고, 0.5mm/min인 초 저속은 속도에 의한 충격이 최소화된 상태에서 결합재의 결합력(binding force)

만으로 혼합물이 인장응력에 저항하도록 하기 위해서이다. 이 두 가지를 각각 DTS1(고속), DTS2(저속)라 명명하였고 모든 공시체는 1조에 3개씩 제작하였으며 탈형 후 24시간 동안 25℃에서 양생시킨 후 동일 온도에서 시험을 수행하였다.

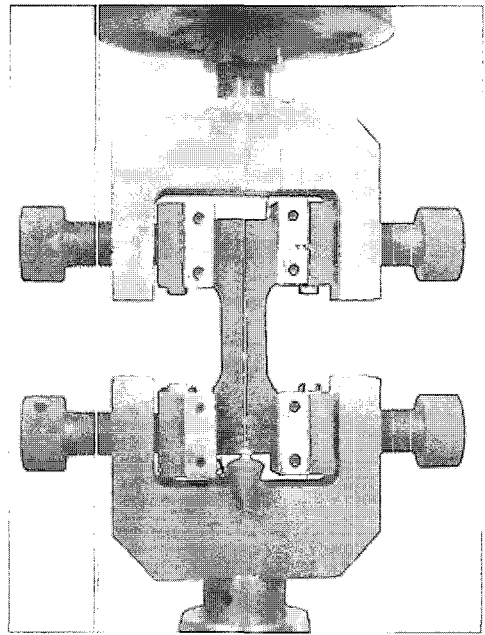


그림 3. Direct tensile strength test setup

2.5 회복탄성계수 시험

본 연구에서는 바인더의 물성과 회복탄성계수(M_R)의 상관성을 비교하기 위하여 Instron 만능 시험기를 이용하여 ASTM D 4123의 규정에 따라 마살공시체로 25℃에서 수행하였다. 하중 재하시 수직변위는 시험기 자체의 position을 이용하여 구하였으며 수평변위 측정을 위해서는 공시체 양면에 LVDT를 설치하였다(그림 4).

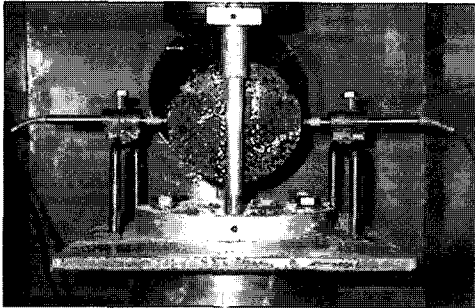
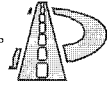


그림 4. Resilient modulus test setup

하중은 동적 반복하중(cyclic load, 100kgf)과 지속적으로 유지되는 일정한 정적 지속하중(sustained load, 10kgf)으로 구분된다. 하중의 시간변화는 하중이 작용하는 재하기간(loading period, 0.1sec)과 다음의 하중이 재하되기 직전까지 휴지기간(relaxation period, 0.9sec)으로 구분되며 재하시간과 휴지기간의 합은 1초로서 반복횟수(frequency)는 1Hz이었다. 상기의 방법으로 구한 수직변위와 수평변위를 이용하여 포아손 비를 측정하였으며 수직변위와 수평변위가 모두 안정화된 100사이클 후 5 사이클(101~105)을 채택하여 평균값을 사용하였다.

2.6 추정 모델 개발

이미 바인더의 분자입도분포가 그 물리적 성질과 상관성이 있음을 추정한 연구와 또한 일부 물성이 역학적 특성과 상관성을 어느 정도 가짐을 시사한 연구가 있었다^{3,4,5)}. 따라서 본 연구에서는 사용된 5가지 바인더의 물성을 통한 아스팔트 혼합물의 강도특성을 추정하기 위해 회귀 분석을 수행하여 가장 상관성이 높은 추정식을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 직접인장강도, 간접인장강도 및 회복탄성계수 값을 종속변수로 하고 아스팔트 바인더의 동점도, 절대점도, 연화점, 침입도 및 PG 고온등급을 독립(매개)변수로 하여 회

귀분석을 수행하였다. 회귀분석 방법은 linear, log, polynomial, power regression 중 최상의 R² 값이 얻어지는 모델을 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 아스팔트의 물리적 특성

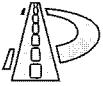
개질 아스팔트는 일반아스팔트에 비해 절대점도(AV), 동점도(KV), 연화점(SP)은 상승하였고 침입도(PN)는 감소하였으며 PG 고온등급도 한 두 단계 높아졌다. 표 3은 바인더의 개질에 따른 두가지 점도, 침입도와 연화점 및 PG 고온등급 변화를 보여준다.

표 3. Change of physical properties due to polymer modification

Asphalt	Polymer	AV (ps)	KV (cs)	PN (0.1mm)	SP (°C)	PG (°C)
S3	N	1,110	285	95	44.0	58
	P	5,230	1,047	63	59.0	70
	S	6,970	1,048	62	67.0	64
L3	N	820	278	94	46.5	58
	P	5,090	1,325	54	60.5	76
	S	16,820	1,458	60	62.5	70
H3	N	1,390	296	99	47.0	58
	P	3,940	975	65	58.5	70
	S	8,210	1,105	64	61.5	70
S5	N	2,460	425	60	50.0	64
	P	5,620	1,143	41	64.0	76
	S	11,810	1,680	40	66.5	76

3.2 직접인장강도

그림 5는 두가지 직접인장강도와 간접인장강도의 대표적인 하중-변위곡선을 비교하여 보여주고 있으며 모든 시험에서 곡선의 변화형태가 유사하게 나타났다. 두 가지 직접인장강도(DTS1: 고속, DTS2: 저속) 시험 결과를 표 4에 나타내었다.



혼합물의 OAC는 7.8~8.5%, 공극은 3.86~5.23% 선에서 결정되었다. 4가지 무개질 혼합물의 DTS1은 6.2~8.02kgf/cm²이었고, 8가지 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 DTS1은 7.6~9.37kgf/cm²로 무개질 혼합물에 비하여 상당히 향상된 것으로 나타났다. 또한 DTS2는 무개질이 2.26~2.85kgf/cm²였고, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물에서는 3.12~4.20kgf/cm²로 더욱 크게 향상된 것으로 나타났다. 전반적으로 DTS1은 DTS2에 비해 1.9~3.4배 가량 컸는데 이는 재하속도의 차이에 기인한 것이다.

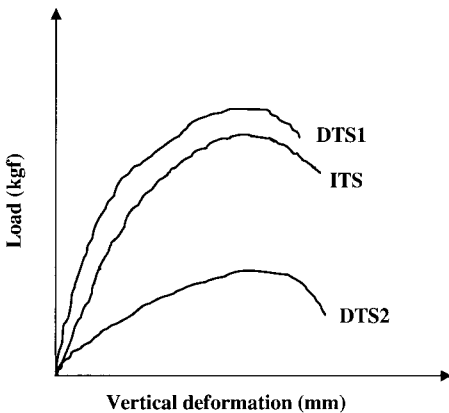


그림 5. Typical load-deformation curves of DTS1, DTS2 and ITS

3.3 간접인장강도

시험 결과 개질하지 않은 4가지 아스팔트 혼합물의 ITS는 4.9~5.6kgf/cm²이었고, 8가지 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 ITS는 5.3~7.3kgf/cm²로 나타났으며 혼합물 종류별 강성지수 측정결과도 표 4에 제시하였다. 표 4에서 같은 재하속도로 측정된 직접인장강도(DTS1)와 간접인장강도(ITS)의 비율은 전체적으로 DTS1 값이 ITS에 비해 더 크며 그 평균이 1.38 이었다. 따라서 같은 속도로 측정시 같은 혼합물의 직접인장강도가 간접

인장강도보다 약 38% 크게 나타날 것으로 사료된다.

표 4. Various strength test results

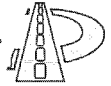
Asphalt	Polymer	OAC (%)	DTS1 (kgf/cm ²)	DTS2 (kgf/cm ²)	M _R (MPa)	ITS (kgf/cm ²)	SI (kgf/mm)
S3	N	8.0	7.69	2.26	1,049	5.4	263
	P	7.8	9.37	3.31	1,116	6.4	339
	S	8.5	8.48	3.12	1,080	5.9	247
L3	N	7.8	6.21	2.70	1,106	4.9	219
	P	7.8	9.29	4.00	1,239	5.3	317
	S	8.2	8.21	3.91	1,196	5.3	271
H3	N	8.0	6.20	2.29	963	5.3	169
	P	8.2	8.00	4.20	1,236	7.2	264
	S	8.0	7.60	3.99	1,083	6.5	305
S5	N	8.0	8.07	2.85	1,100	5.6	275
	P	7.8	9.02	3.89	1,413	7.3	419
	S	7.9	9.01	4.06	1,339	5.9	238

3.4 회복 탄성계수 시험

12가지 바인더로 제작한 혼합물의 시험 결과 개질하지 않은 4가지 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수는 963~1106 MPa였고, 8가지 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수는 1083~1413 MPa로 나타났다. H3 및 S5의 경우 P로 개질을 하면 약 28.5%의 회복탄성계수 향상을 가져왔으며 S3의 경우 회복탄성계수에 대한 개질 효과가 가장 미흡(3~6.4%)하였다. 또한 P가 S 보다 상대적으로 높은 향상율을 보였다. 전반적으로 개질에 따른 M_R 향상비율은 상기 세 가지 인장강도 향상 비율보다 약 10~50% 포인트 낮았다.

3.5 바인더 물성에 의한 혼합물 특성 추정

본 연구에서는 아스팔트 바인더의 점도, 침입



도 등 물리적 성질을 이용하여 샌드 아스팔트 혼합물의 DTS1, DTS2, ITS, M_R, SI를 추정하기 위한 회귀분석을 수행하였다(그림 6~15). 그림 6~10은 혼합물의 특성과 바인더 물성간의 회귀 분석을 통해 인장강도를 각각의 물리적 성질로 추정한 것을 R²과 함께 보여준다. 또한 각 물성 별로 가장 R²이 높은 인장강도의 추정식도 그림에 보여준다.

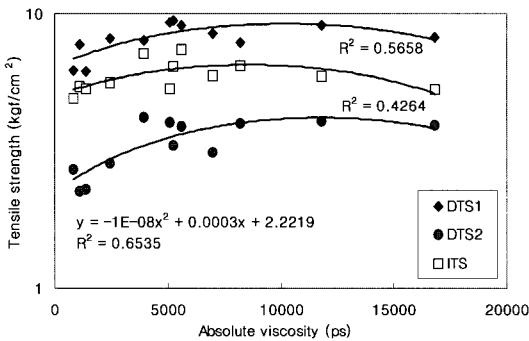


그림 6. DTS1, DTS2 and ITS vs. absolute viscosity

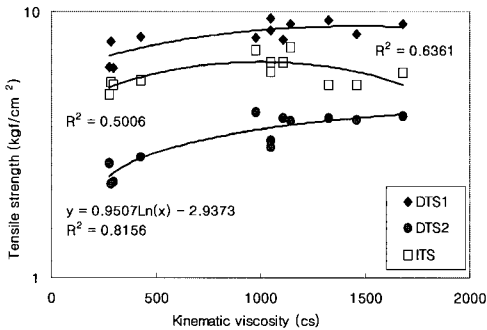


그림 7. DTS1, DTS2 and ITS vs. kinematic viscosity

그림에서 보듯이 각 혼합물의 강도특성(DTS1, DTS2, ITS, M_R, SI)을 회귀분석 모델의 종속변수(y)로 사용하고, 절대점도, 동점도, 침입도, 연화점, PG 고온등급 등 각각을 독립변수(x)로 사용하여 결정계수(R²)가 가장 높게 나타나는 모델로 회귀분석을 수행하였다. 그 결과 여러 가지 혼합물의 특성 중 DTS2가 침입도를 제외한 모든

물리적 성질과 가장 상관성이 높게 나타났으며 그 다음이 DTS1, ITS, SI, M_R인 것으로 나타났다.

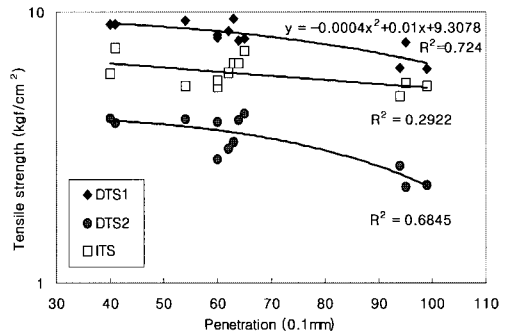


그림 8. DTS1, DTS2 and ITS vs. penetration

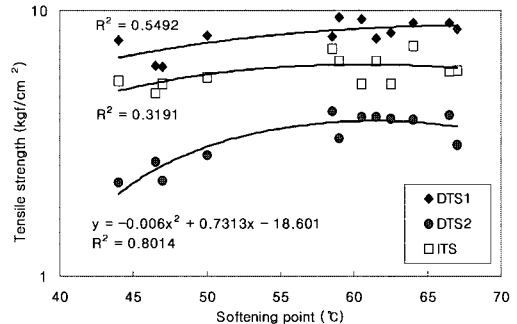


그림 9. DTS1, DTS2 and ITS vs. softening point

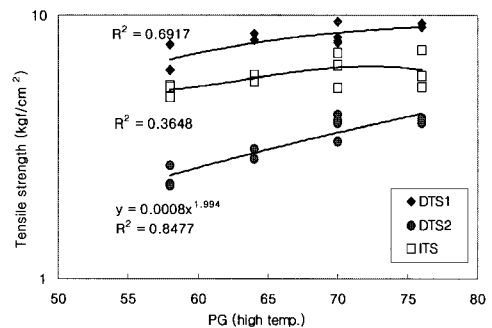


그림 10. DTS1, DTS2 and ITS vs. PG (high temp.) grade

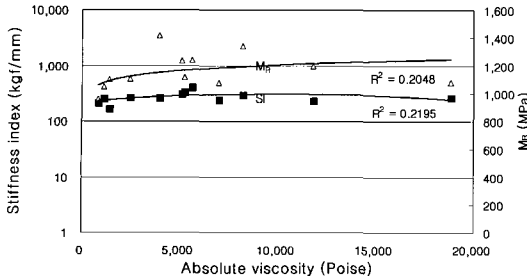


그림 11. SI and MR vs. absolute viscosity

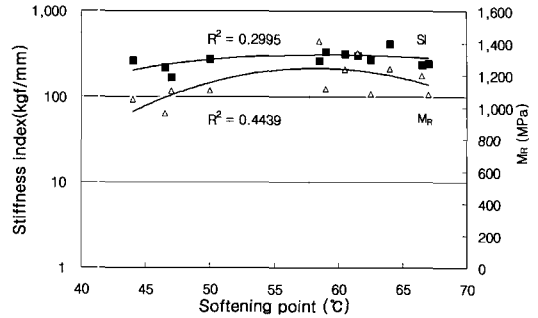


그림 14. SI and MR vs. softening point

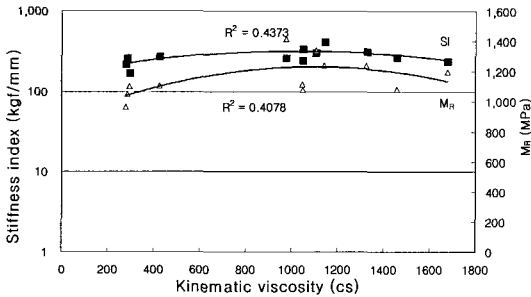


그림 12. SI and MR vs. kinematic viscosity

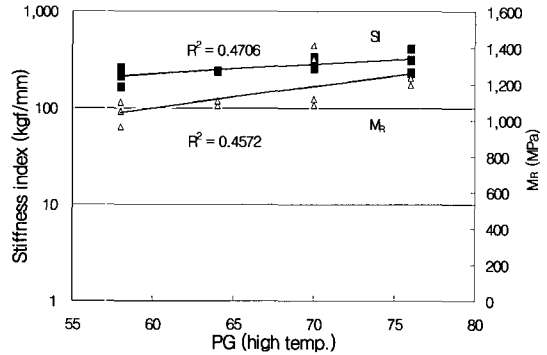


그림 15. SI and MR vs PG (high temp.)

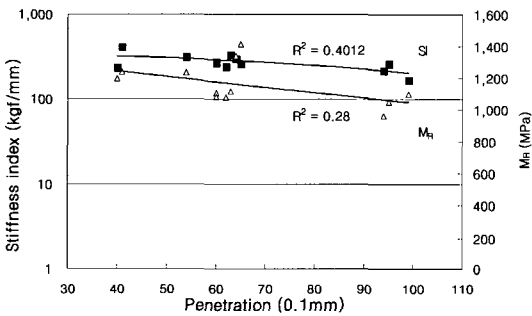
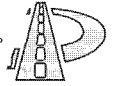


그림 13. SI and MR vs. penetration

대부분의 경우 DTS가 ITS보다는 R^2 가 더 높아 직접인장강도가 결합재의 물성을 통해 혼합물의 인장강도를 추정하는데 더 유리한 성질인 것으로 나타났는데 특히 DTS2가 가장 높아 앞서 가정한대로 저속 직접인장이 바인더의 특성에 더 지배되는 것으로 보인다.

그중 PG 고온등급은 혼합물의 DTS2와 R^2 가 0.85 정도의 높은 상관 관계를 보여 PG 고온등급이 높은 바인더를 사용하면 직접인장강도가 큰 혼합물을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 연화점과 동점도도 $R^2 > 0.8$ 이 얻어져 DTS2와 상당한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 반면 절대점도나 침입도는 DTS2와 상관관계가 낮았지만 그래도 R^2 가 0.7에 가까워 비교적 양호한 편이었다.

그림 11~15는 SI 및 MR과 물리적 성질과의 관계를 보여준다. 간접인장강도 시험시 얻어지는 강성지수인 SI가 모든 바인더(연화점 제외) 특성에 MR 보다 더 연관성이 큰 것으로 나타났으나 모두 $R^2 < 0.5$ 이어서 신뢰성은 떨어진다. 즉, 강성지수는 물론 회복탄성계수도 바인더의 여러 물성중 PG 고온등급과 동점도와 가장 상관성이 높았으



강성지수인 SI가 모든 바인더(연화점 제외) 특성에 M_R 보다 더 연관성이 큰 것으로 나타났으나 모두 $R^2 < 0.5$ 이어서 신뢰성은 떨어진다. 즉, 강성지수는 물론 회복탄성계수도 바인더의 여러 물성중 PG 고온등급과 동점도와 가장 상관성이 높았으나 R^2 이 모두 0.5 이하이어서 좋은 상관성이 있다고 볼 수는 없다.

강성지수는 정하중 하에서 재료의 변형에 저항하는 성질로서 동하중 특성인 M_R 과 다소 차이가 있으나 모두 PG와 동점도에 어느 정도 관련성을 보인다는 점이 비슷하다. 하지만 비록 샌드 아스팔트로 굵은골재에 의한 변동요인을 최소화하고자 하였으나 M_R 과 SI 어느 것도 결정계수가 낮아 바인더의 동점도나 PG 등급 하나씩만으로 추정하기에는 무리가 있어 보인다.

이상의 분석 결과 바인더의 물리적 성질들을 이용하여 어느 정도 인장강도 등을 추정할 수 있으나 각각의 물리적 성질만으로는 신뢰도가 낮게 나타났다. 따라서 단일 바인더 물성의 변화와 혼합물의 강도특성변화가 가지는 상관성보다는 종합적으로 여러 물성을 이용하여 상관성을 분석해 보기로 하였다.

즉, 본 연구에 사용된 모든 물성을 이용하여 혼합물의 직접 인장강도를 추정할 수 있는 모델(추정식)을 얻기 위하여 각 물성 값들 5가지와 그것의 자승 값들 5가지를 독립변수로, 그리고 인장강도 특성을 종속변수로 하여 모델을 설정하였다. 또한 비교적 실험이 어려운 회복탄성계수 값도 추정이 가능토록 같은 방법으로 모델을 설정하였다. 그리고 SAS⁶⁾의 stepwise procedure를 이용하여 선형 다중회귀분석(multiple linear regression analysis)을 수행하였다. 이 stepwise 과정은 주어진 10개의 변수 중 종속변수와 유의차가 낮은 변수들을 차례로 제거하여 필요한 최적의 모델을 설정하는 방법인데 그 결과 제시된 모델들은 다음과 같다.

$$DTS1 = 171.43 - 0.000000089AV^2 + 0.042KV - 0.000013KV^2 - 0.6PN + 0.0027PN^2 - 0.0065SP^2 - 3.22PG + 0.017PG^2 \quad (1)$$

$$DTS2 = -59.1 + 0.000034AV - 0.000000005AV^2 - 0.012KV - 0.0000034KV^2 - 0.249PN - 0.0012PN^2 - 0.54SP + 0.0068SP^2 + 1.52PG - 0.0077PG^2 \quad (2)$$

$$M_R = -41739 - 0.069AV + 0.000003AV^2 - 5.47KV + 0.0017KV^2 + 79.1PN - 0.295PN^2 - 425.6SP + 4.6SP^2 + 1339.9PG - 8.46PG^2 \quad (3)$$

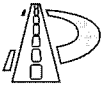
$$ITS = -182.5 - 0.00043V + 0.0000000155AV^2 - 0.0032KV - 0.257PN - 0.0024PN^2 - 1.9SP + 0.018SP^2 + 6.93PG - 0.048PG^2 \quad (4)$$

$$SI = -9618.4 - 0.0033AV + 0.0000011AV^2 - 1.52KV - 0.00068PN - 16.8PN^2 - 30.5SP + 0.039SP^2 - 216.6PG + 1.492PG^2 \quad (5)$$

모델에서 보면 DTS1의 경우는 AV와 SP항이, ITS에서는 KV² 항이 제거되었으며 나머지 식은 10개의 모든 항을 이용하여 최적의 모델이 이루어 졌다. 실험에서 얻어진 값과 이 수식 모델을 이용하여 계산한 추정치가 얼마나 정확한지를 보여주는 그림이 아래 제시되었다.

그림 16은 두 가지 직접인장강도를 한 그림에 나타난 것인데 결정계수가 0.99 이상으로 거의 완벽한 추정치를 얻을 수 있음을 보여준다. 그리고 근래에 많이 활용되는 ITS의 추정치에 대한 R²도 0.99 이상이 얻어져 그림 17에서 보듯이 추정 모델이 매우 정확함을 알 수 있었다.

그림 18, 19의 M_R , SI 값도 추정치와 실측치의



로 오차를 많이 수반할 수 있으므로 측정된 값들이 실제 재료의 특성을 정확히 반영치 못하기 때문이라고 보여진다. 또한 SI도 R^2 이 인장강도보다는 낮으나 0.93 이상이어서 추정치가 상당히 정확함을 알 수 있었으며 M_R 보다는 정확하고 인장강도 값들보다는 떨어지는 수준에 있다.

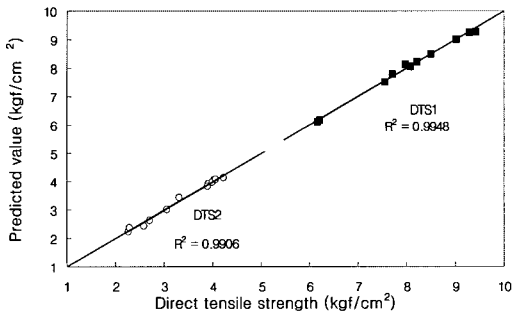


그림 16. Predicted vs. measured direct tensile strengths

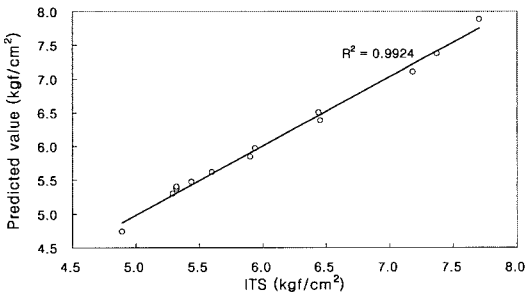


그림 17. Predicted vs. measured ITS

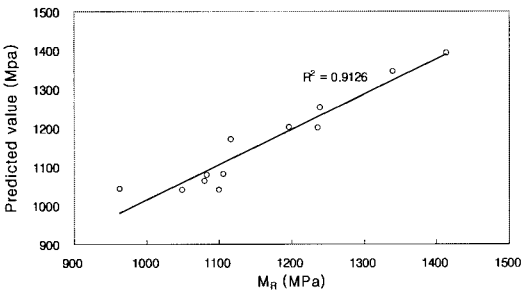


그림 18. Predicted vs. measured M_R

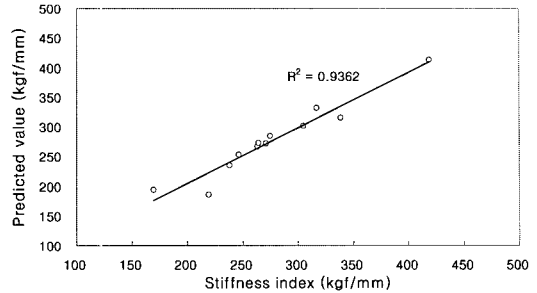


그림 19. Predicted vs. measured SI

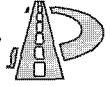
4. 결론

본 연구에서는 아스팔트 바인더의 5가지 물리적 성질을 이용하여 샌드아스팔트 혼합물의 직접인장강도, 간접인장강도, 회복탄성계수 등 역학적 특성을 추정하기 위한 연구를 수행한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아스팔트 혼합물의 성질을 바인더의 단일 물성으로 추정하기 위하여 여러 가지 방법으로 회귀분석을 수행한 결과 직접인장강도 중에서도 저속(0.5mm/min)으로 측정된 값(DTS2)이 동점도, 연화점, PG 고온등급으로 추정시 R^2 이 0.8 이상으로 나타나 단일 물성으로 가장 상관성이 높은 역학적 특성임을 알 수 있었다.

2) 5가지 물성을 모두 이용하여 각각의 역학적 특성을 추정한 결과 인장강도, 회복탄성계수, 강성지수 모두 매우 신뢰성이 높게 추정이 가능함을 알 수 있었다($R^2 > 0.9$). 그중 직접인장 및 간접인장강도는 R^2 이 0.99 이상으로 추정식이 매우 정확했으며, 회복탄성계수와 강성지수는 R^2 이 각각 0.91, 0.93 이상이어서 비교적 신뢰성이 높은 추정식을 얻을 수 있었다.

3) 회복탄성계수 및 강성지수의 경우 직접 및 간접인장강도보다 R^2 가 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 회복탄성계수의 R^2 가 0.91로 가장 낮게



도, 연화점, PG 고온등급으로 추정시 R^2 이 0.8 이상으로 나타나 단일 물성으로 가장 상관성이 높은 역학적 특성임을 알 수 있었다.

2) 5가지 물성을 모두 이용하여 각각의 역학적 특성을 추정된 결과 인장강도, 회복탄성계수, 강성지수 모두 매우 신뢰성이 높게 추정이 가능함을 알 수 있었다($R^2 > 0.9$). 그중 직접인장 및 간접인장강도는 R^2 이 0.99 이상으로 추정식이 매우 정확했으며, 회복탄성계수와 강성지수는 R^2 이 각각 0.91, 0.93 이상이어서 비교적 신뢰성이 높은 추정식을 얻을 수 있었다.

3) 회복탄성계수 및 강성지수의 경우 직접 및 간접인장강도보다 R^2 가 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 회복탄성계수의 R^2 가 0.91로 가장 낮게 나타났는데, 이는 역시 M_R 의 측정이 어렵고 인장강도에 비하여 상대적으로 오차를 많이 수반할 여지가 있다는 것을 보여주는 한 예이라고 보여진다.

4) 본 연구에서는 제한된 숫자의 공시체를 가지고 시험을 수행하였으나 보다 많은 종류의 혼합물과 많은 숫자의 공시체에 대한 시험을 수행하면 좀더 일반화된 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 직접인장 반복 하중 시험 및 소성변형 실험도 수행하여 일반 아스팔트 혼합물의 피로 및 변형 특성에 대한 상관성을 분석하는 것도 값어치 있는 연구가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참고 문헌

1. Akazawa, T., (1953), "Tension test method for concrete."

International Association of Testing and Research Laboratory for Materials and Structures, *Bulletin No. 16*, Paris.

2. Anagnos N. and Kennedy W., (1983), "Procedures for the static and repeated load indirect tensile test," Tensile characterization of highway pavement materials, *Research Project 3-9-72-183, Report No. 183-14*.

3. Kim, K. W. and Burati, J. L. Jr. (1993), "Use of GPC chromatograms to characterize aged asphalt cements," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE 5(1), 41-52*.

4. Kim, K. W., Burati, J. L. Jr., and Amirhanian, S. N., (1993), "Relation of HP-GPC profile with mechanical properties of AC mixture," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE 5(4), 447-459*.

5. Kim, K. W., Burati, J. L. Jr., and Park, J. S., (1995), "Methodology for defining LMS portion in asphalt chromatogram," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE 7(1), 31-40*.

6. *SAS User's Guide, Statistics*, (1994), Release 6.04 Ed., SAS Institute Inc., Cary, N. C.

7. 김광우, 조희원, 도영수, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), "폴리머(LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성 연구, '97 국제심포지엄 -아스팔트포장의 첨단기술- 논문집, 강원대학교 석재복합신소재 연구센터.

8. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순재, (2000), "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계 구명," 석재연 논문집 5권.

9. 김광우, 이성훈, 이상범, 이문섭, (2001), "인장강도 및 MR에 의한 샌드 아스팔트 혼합물의 개질효과 분석", 한국도로포장공학회 논문집 제출 논문.

10. 김남호, 황성도, 박용철, (1997), "비용절감을 위한 도로재료 연구사업, 1-1-B 단계," 연구보고서 97-094, 한국건설기술연구원.

11. 이성훈, (2001), "샌드 아스팔트 혼합물의 역학적 특성을 통한 폴리머의 개질 효과 분석", 석사학위논문, 강원대학교 대학원

12. 정일권, (2000), "국내 아스팔트의 폴리머 개질 및 노화에 따른 물성 변화 연구," 석사학위논문, 강원대학교 대학원.

13. 김광우, 권승준, 도영수, 이상범, (1999), "폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 푸아송비에 관한 실험적 연구," 한국농공학회 논문집 제 41권 5호, pp. 104~111

(접수 : 2001. 9. 3)