

바인더 강성이 아스팔트 콘크리트의 인장강도와 소성변형 특성에 미치는 영향 분석

Binder Stiffness Effect on Permanent Deformation and Tensile Strength of Asphalt Concretes

김 현 환	Hyun Hwan Kim	정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정 (E-mail : numgi@hanmail.net)
유 민 용	Min Yong Yoo	정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정 (E-mail : kmk2@hanmail.net)
김 진 철	Jin Chul Kim	정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정 (E-mail : cm002573@hanmail.net)
김 광 우	Kim, Kwang Woo	정희원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : asphalt@hanmail.net)

ABSTRACT

Since the relatively stiff binder shows a higher tensile strength as well as higher rutting resistance, it is believed that the binder stiffness is an important factor for rutting and tensile strength of asphalt mixtures. The typical tensile property is measured by indirect tensile strength (ITS) test at 25°C and the rutting resistance is most widely measured by wheel tracking (WT) test at 60°C. The deformation strength (S_D) is newly developed property to estimate rut resistance of asphalt concretes at 60°C. The ITS and S_D are very simple to measure by static test techniques, but the WT is measured by repeated loading procedure which requires relatively longer time and more efforts. Since these three properties are highly dependent upon the binder stiffness, it may be possible to estimate one property from another. Therefore, this study investigate the possibility of estimating the rutting characteristics (measured by WT test) by ITS or S_D test, and the ITS by S_D . Because of binder stiffness effect, in the WT estimation by ITS, a tendency was observed for the higher ITS mixture to have the lower rut depth, giving $R^2 \approx 0.6$, on the average. The ITS estimation by S_D showed $R^2 \approx 0.64$, and the WT estimation by S_D showed $R^2 \approx 0.84$, which is highest correlation among the three. Therefore, it was concluded that there is relatively good possibility of estimating WT result by S_D , and even though R^2 is somewhat low, there is some correlation between WT and ITS.

KEYWORDS

asphalt, recycled asphalt mixture, binder stiffness, rutting, indirect tensile strength, deformation strength (S_D), wheel tracking test, correlation analysis

요지

상대적으로 강성이 큰 바인더가 높은 소성변형 저항력과 인장강도를 보이므로 바인더 강성이 아스팔트 혼합물의 러팅과 인장강도에 대해 중요한 인자라 할 수 있다. 혼합물의 인장 특성은 25°C에서 간접인장강도(ITS) 시험으로, 그리고 소성변형 저항성은 가장 보편적으로 60°C에서 반복주행(WT) 시험에 의해 측정된다. 변형강도(S_D)는 60°C에서 아스팔트 콘크리트의 소성변형 저항성 추정을 위해 새롭게 개발된 특성이다. ITS와 S_D 는 정적재하 시험에 의해 측정되어 매우 간단하지만, WT는 상대적으로 긴 시간과 노력을 필요로 하는 반복 하중에 의해 얻어진다. 이 3가지 특성은 모두 바인더 강성에 의존하기 때문에, 한가지로부터 다른 하나의 특성을 추정하는 것이 가능할 것이다. 본 연구는 ITS 또는 S_D 시험에 의한 WT 소성변형 특성, 그리고 S_D 에 의한 ITS 추정의 가능성을 조사하였다. ITS에 의한 WT 추정결과 $R^2 \approx 0.6$ 으로 ITS가 높으면 WT 침하깊이가 낮은 경향을 보이는 것으로 관찰됐다. S_D 에 의한 ITS 추정은 $R^2 \approx 0.64$ 를, S_D 에 의한 WT 추정은 $R^2 \approx 0.84$ 를 보여 3가지 중에서 가장 높은 상관관계를 나타내었다. 결론적으로 S_D 에 의한 소성변형 저항성 추정 가능성이 상대적으로 높으며, 비록 R^2 이 다소 낮기는 하지만 WT와 ITS 결과 간에도 어느 정도의 상관성이 있다.

핵심용어

아스팔트, 재생아스팔트 혼합물, 바인더 강성, 러팅, 간접인장강도, 변형강도, 휠트래킹 시험, 상관성 분석

1. 서론

소성변형(Plastic deformation or rut)은 아스팔트 포장에 발생하는 가장 흔한 손상 형태이며 또 하나의 대표적 손상 형태는 균열(Crack)이다. 소성변형과 균열은 형태는 다르지만 모두 아스팔트의 stiffness 특성이 온도에 따라 변하는 현상 때문에 야기되는 손상으로 아스팔트 혼합물의 재료 특성을 측정하여 그 저항성을 어느 정도 추정할 수 있다. 고강도 재료들은 탄성이 크면 소성에 강하고 탄성이 낮으면 인장에 강하다. 하지만 아스팔트 콘크리트와 같이 저강도 재료는 상온 및 공용온도(25~60℃)에서 바인더 stiffness가 커서 혼합물의 탄성이 커지면 소성은 물론 인장에도 강한 특성을 보인다.

균열은 피로균열과 온도균열로 구분할 수 있으나 모두 재료의 인장강도와 관련이 있다. 균열저항성을 나타내는 재료 특성치인 인장강도는 정하중 간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS)시험을 통해 측정할 수 있다. 균열은 저온에서 주로 발생하므로 ITS의 측정 온도도 5~25℃로 국가마다 다르나 국내에서는 25℃를 적용하고 있다(Kim et al. 2003, Judycki 2008).

소성변형은 그 저항성을 평가하기 위해 다양한 시험방법이 적용되나 재료 특성 치보다는 누적손상을 측정하는 반복주행(Wheel tracking : WT)이나 그와 유사한 시험법이 널리 사용된다. WT 시험은 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 상대적으로 비교하기 위한 시험법중 하나일 뿐 재료의 강도나 강성계수 등 특성치를 얻는 것이 아니다. 그럼에도 추정성이 우수하여 널리 사용되나 장비가 고가이고 비교적 시간이 많이 걸려 대형 연구기관 등을 제외하고는 장비가 제대로 보급되지 못하고 있다.

이론적으로 소성변형 특성을 잘 나타내는 것으로 알려진 재료 특성치는 회복탄성계수(M_R)라 할 수 있으나 WT과 같이 60℃ 고온에서는 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 40℃ 정도에서 많이 측정을 하지만 이 역시 고도의 숙련자가 아니면 M_R 값 이전에 푸아송비의 측정도 어렵다. 따라서 푸아송비의 가정 값을 사용하여 M_R 을 산정하지만 여전히 일관성을 얻기 어려운 특성치이며 장비가 고가이므로 역시 대형 연구기관에서만 사용된다.

따라서 이러한 문제점 때문에 고온 변형에 저항하는 강도 특성을 평가하기 위하여 변형강도(Deformation strength: S_D)가 개발되었다. 이는 최대하중과 그때 발생된 변형(침하깊이)의 함수로 강도치를 산정하므로 재료의 변형에 대한 저항성을 나타내는 새로운 개념의 강도특성치이다. S_D 는 그간 연구를 통해 WT나 그와 유사한 시험들과 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다 (김광우 등 2004a, Doh et al 2007, Kim et al. 2008). 특히, 골재의 종류와 입도를 고정할 경우

아스팔트의 rutting factor인 $G^*/\sin \delta$ 와 매우 상관성이 높아 바인더 특성에 영향을 받는 특성치임을 알 수 있었다(김광우 등 2005a). 이는 WT 시험시 PG 고온등급이 높은 바인더 혼합물이 우수한 결과를 보이는 것과 같은 맥락이다.

변형저항특성으로 인지되는 S_D 는 하중-변형 곡선에서 파괴 발생 이전의 정보만으로 계산이 된다. 하지만 일단 최대하중 이후에는 균열로 재료가 벌어지면서 파괴되므로 재료의 인장강도가 크면 S_D 값에도 어느 정도는 영향을 미치게 된다. 또한 ITS는 인장관련 시험이지만 이것 역시 바인더 stiffness가 그 값에 영향을 미치는 요인이다. 따라서 앞의 두 성질과 유사하게 PG 고온 등급이 높은 바인더를 사용하면 우수한 ITS를 보인다.

이 세 가지 특성(WT, ITS, S_D)은 측정방법이 다르고 용도도 다르나 바인더의 stiffness와 상당히 큰 관련이 있음은 주지의 사실이다. 이에 본 연구의 목적은 이들이 상호간에 어느 정도의 상관성을 가지고 있다는 가정하에 시험법이 간단한 두 특성으로 WT를 추정 가능한지를 확인하여 바인더 stiffness가 인장강도와 변형특성에 어느 정도 영향을 주는지 확인하고자하는 것이다. 이러한 관계 규명을 통해 WT, ITS, S_D 가 재료의 소성변형은 물론 인장특성과도 각각 어느 정도 관련된 특성인지를 파악함으로써 비록 시험온도는 달라도 각각의 성질을 상호 연관지어 이해하는데 도움이 될 것이다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 2가지 기본 아스팔트 (Pen 80-100, 60-80)와 상용화된 한 가지 PG 76-22 바인더, 2가지 골재 (편마암, 화강암) 그리고 다양한 개질첨가제와 한 가지 회수아스팔트 포장재료 (reclaimed asphalt pavement: RAP)가 사용되었다. 골재 입도는 13mm 밀입도와 수퍼페이브 입도 (본 연구에서는 일반 밀입도와 구분하기 위해 깎입도라 칭함)를 사용하였다. 사용된 개질제는 SBR latex, 저밀도폴리에틸렌 (low-density polyethylene: LDPE), 고밀도폴리에틸렌 (high-density polyethylene: HDPE), SBS (styrene-butadiene-styrene), 재생 LDPE, 재생 HDPE이다. SBR latex는 액상이고, LDPE와 HDPE는 분쇄하여 30번체에 거의 다 통과하는 고운입자, SBS는 이보다 굵어 8번체는 거의 다 통과하고 50번체에 대부분 남는 입자들이다. 재생 LDPE와 HDPE는 자원재생공사에서 생산한 펠렛을 분쇄하여 신생 LDPE, HDPE와 같은 크기의 분말로 만들어 사용하였다.

모든 폴리머는 건식혼합 방식으로 소정의 양을 골재, 바인더와 함께 믹서에 넣어 약 175℃ 온도로 가열 개질아스팔트 혼합물을 제조하였다. 배합설계는 마샬 다짐기로 직경

100mm공시체를 양면 50회 다짐하여 수행하였으며 얻어진 최적아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)으로 공시체를 제조하여 각종 시험에 사용하였다. 각각의 혼합물에 대해 수행한 시험 방법은 아래와 같다.

2.1. 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험

본 연구에서는 배합설계로부터 결정된 OAC로 혼합물을 제조하여 롤러 다짐기로 목표 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 의 크기 $305\text{mm} \times 305\text{mm} \times 62\text{mm}$ 의 슬래브 공시체를 제작하였다. 제작된 슬래브는 12시간 상온에서 식힌 후 몰드에서 탈형하여 그림 1과 같이 170, 130mm로 절단 한 후 25℃ 항온기에 24시간 양생하였다. 그 후 130mm 공시체는 60℃(시험온도) 챔버에 6시간 넣어서 공시체의 내부온도까지 완전히 60℃가 되게 한 후 WT 시험에 사용하였다.

WT 시험기는 접지압 100psi(700kPa)를 야기하는 윤하중 하에 왕복 40cycle/min의 속도로 90분간 3,600cycle(7,200pass) 주행하여 바퀴통과 횡수(pass)에 따른 누적침하 깊이를 측정하였다. 바퀴의 재질은 강재, 직경 200mm, 폭 50mm, 왕복거리는 200mm이고 강재와 공시체의 직접 접촉에 의한 골재 파손 및 아스팔트 점착 등을 방지하기 위해 폴리프로필렌 부직포를 표면에 덮고 그 위에 쇠바퀴가 구르도록 하였다(그림 2).

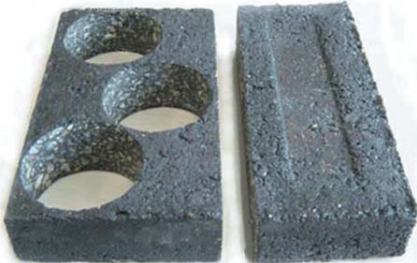


그림 1. 한 개 슬래브를 절단하여 WT 시험을 수행하고 S_D 시험용 코어공시체를 채취한 모습



그림 2. WT 시험을 위해 공시체를 세팅하고 부직포를 덮은 모습

2.2. 간접인장강도 시험

본 연구에서는 직경 100mm 공시체로 간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS) 측정을 위해 안쪽이 직경 100mm로 오목한 하중 스트립을 공시체 상하 중심에 대고 하중을 가하였다(그림 3). ITS는 공시체를 표준시험온도인 25℃ 항온조에 4시간 넣었다가 꺼내어 신속히 50mm/min 속도로 하중을 가하여 얻어진 최대 하중을 식 1에 넣어 구했다.

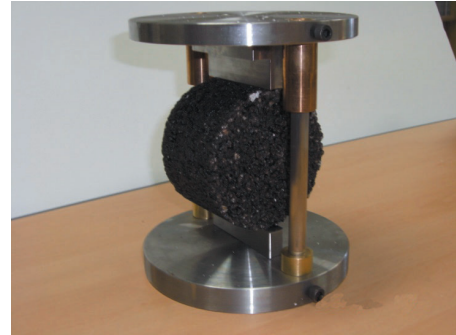


그림 3. ITS 시험용 공시체 세팅 모습

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

여기서, ITS = 간접인장강도(MPa), P = 최대하중(N), D = 공시체 직경(mm), t = 공시체 두께(mm)이다.

2.3. 변형강도 시험

변형강도 (S_D)는 공시체에 하중을 가하여 얻은 하중-변형 곡선에서 최대 하중과 이때 표면으로부터 y 만큼 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어간 수직변형을 읽어 식(2)로 계산하였다.

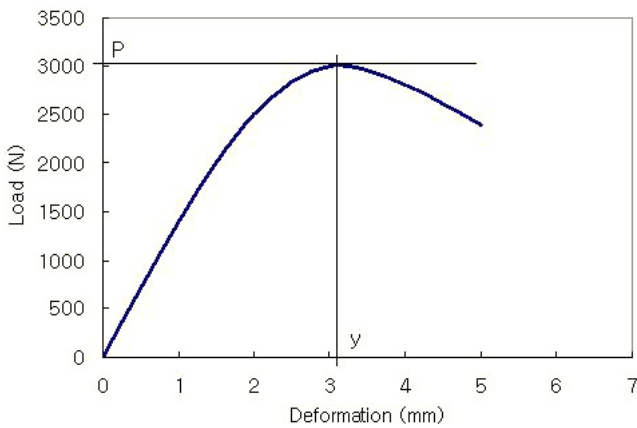
$$S_D = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \quad (2)$$

여기서, S_D = 변형강도 (MPa), P = 최대하중(N), y = 최대하중에서의 수직 변형 값(mm)이다.

시험온도는 WT 시험과 같은 60℃이며 이를 위해 공시체를 60℃ 항온 수조에서 30분간 수침 후에 꺼내어 신속히 그림 4(a)와 같은 Kim Test 어셈블리에 넣고 하중을 재하속도 30mm/min로 가하였다. 이때 그림 4(b)와 같이 최대하중(P)과 이 때의 수직변위(y)를 곡선으로부터 얻으며, 한 혼합물 당 3개 S_D 시험의 평균값을 표에 제시하였다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 변형강도 시험기에 공시체의 셋팅
(b) 시험에서 얻어진 하중 - 변위 곡선

3. 결과 및 고찰

표 1은 다양한 폴리머 개질아스팔트를 사용한 밀입도와 겹입도(Superpave 입도) 혼합물에 대한 시험 data이며 표 2는 재생혼합물의 data이다. 표에 사용된 혼합물에 대한 약자 등은 그림 5에 상세히 수록되어 있으며 R_D 는 rut depth의 약자이다.

같은 혼합물에 대해 각각의 슬래브 공시체 1개와 100mm 공시체 3개를 제조하였으며 슬래브는 그림 1과 같이 절단하여 WT와 S_D 측정에 사용하고 3개의 100mm 공시체는 ITS 측정에 사용하였다. 슬래브로부터 채취한 S_D 용 코어공시체의 직경은 공시체마다 다소 차이가 있으나 평균 89mm로 100mm보다 적었다. 이는 코어비트의 외경이 101.6mm, 내경이 93mm이어서 코어는 내경보다 다소 작게 채취되기 때문이었다.

표 1. 다양한 PMA의 밀입도 및 겹입도 혼합물 특성 (김광우 등 2004b, 2005a)

MIX	R_D (mm)	S_D (MPa)	ITS (MPa)	MIX	R_D (mm)	S_D (MPa)	ITS (MPa)
AD	15.77	2.326	0.810	AG	10.86	2.705	0.890
ADSR7	19.50	2.006	0.820	AGSR7	9.90	2.905	0.950
ADSB3	15.53	2.226	0.770	AGSB3	9.32	2.729	1.010
ADSB5	8.96	2.511	0.980	AGSB5	5.74	3.289	1.060
ADLD6	9.20	2.704	0.870	AGLD6	3.98	3.355	0.870
ADRH8	5.40	2.876	1.080	AGRH8	3.31	3.748	1.210
ADRL8	2.53	3.265	1.040	AGRL8	1.82	3.594	1.180
ADPG	4.06	3.031	1.060	AGPG	3.45	3.444	1.210
BD	19.43	2.438	1.030	BG	15.25	2.788	0.920
BDSR7	19.29	2.356	0.790	BGSR7	17.34	2.905	0.950
BDSB3	14.58	2.685	0.990	BGSB3	12.17	2.715	0.960
BDSB5	11.60	2.896	1.020	BGSB5	7.62	3.083	1.130
BDLD6	8.55	2.902	1.160	BGLD6	6.12	3.166	1.220
BDRH8	2.17	3.270	1.250	BGRH8	3.15	3.753	1.240
BDRL8	2.38	3.222	1.190	BGRL8	1.78	3.801	1.220
BDPG	4.80	3.203	1.040	BGPG	4.20	3.453	1.280

표 2. 다양한 재생 혼합물 특성(김광우 등 2005a,b)

MIX	R_D (mm)	S_D (MPa)	ITS(MPa)
AD	23.9	2.8	0.660
ADR15CNP	16.8	2.799	0.900
ADR15FNP	17.5	2.940	0.730
ADR30CNP	10.3	2.964	1.110
ADR30FNP	13.7	2.983	0.860
ADR15CL6	9.7	3.065	1.250
ADR15FL6	10.2	3.058	1.080
ADR30CL6	5.2	3.810	1.285
ADR30FL6	8.7	3.070	1.090
BD	19.4	2.800	0.940
BDR15CNP	15.3	2.806	0.990
BDR15FNP	16.1	2.752	0.780
BDR30CNP	11.4	3.214	1.000
BDR30FNP	11.5	3.013	0.940
BDR15CL6	8.3	3.451	1.280
BDR15FL6	9.7	3.209	1.130
BDR30CL6	6.0	3.843	1.280
BDR30FL6	7.3	3.357	1.260

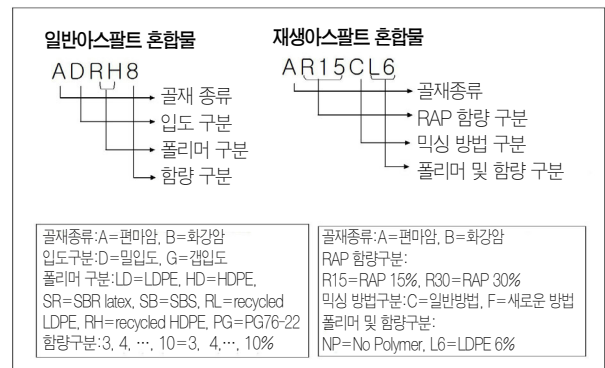


그림 5. 표 1과 2의 일반 및 재생 아스팔트 혼합물의 구분 설명

3.1. WT 특성 분석

그림 6은 혼합물의 골재별, 바인더, 폴리머 종류 및 함량별 배합설계를 통해 결정된 최적아스팔트 함량(OAC)으로 제조한 슬래브 공시체에 대해 WT를 수행한 결과를 재료별, 입도별로 비교하기 위한 것이다. 전체적으로 보면 갭입도 혼합물이 밀입도보다 같은 개질제와 같은 함량에서 더 소성변형에 강하고, 골재 간에는 편마암이 다소 강해보임을 알 수 있다. 또한 개질제별로 보면 SBR 7%는 두 골재에서 모두 거의 효과가 없으며 편마암(Gneiss)에서는 SBS 3%도 효과가 미약했다. 또한 RLDPE 8%가 가장 소성변형에 강하고 다음으로 RHDPE 8%, PG76-22 순이었다. 여기서 SBS가 약하게 나타난 것은 건식방법 때문인 것으로 추정된다.

재생혼합물에서는 재생비율이 높아짐에 따라 Rut depth가 낮게 나타나고 재생혼합물에도 LDPE의 첨가가 효과적임을 알 수 있었다. 신규혼합물(그림 6)에서는 두 골재 간에 다소 차이가 있어 보이나 재생혼합물(그림 7)에서는 차이가 거의 없었다. 믹싱방법에서는 새로운 방법(New)으로 제조한 혼합물이 소성변형에 더 약하게 나타났는데 이는 새로운 믹싱 방법이 노화된 바인더를 더 효과적으로 회생(Rejuvenation)시켜 전체적으로 바인더의 강성을 낮추기 때문이다. 이에 대한 자세한 설명은 기존문헌(김광우 등 2006, Kim et al. 2007, Doh et al. 2008)에 제시되어 있다.

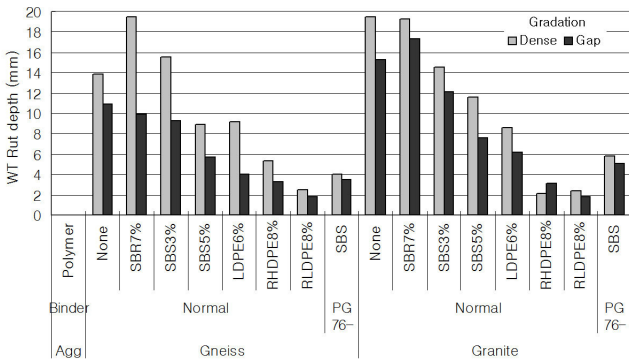


그림 6. Comparison of WT rut depth by polymer modifier and gradation

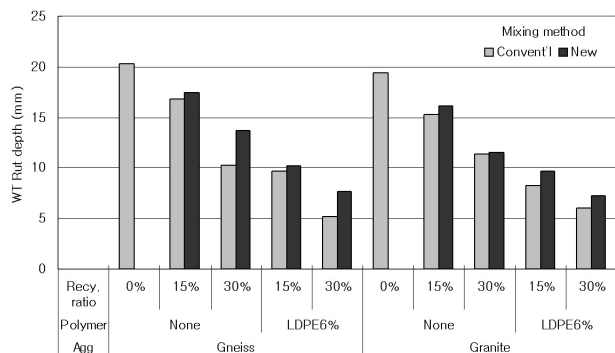
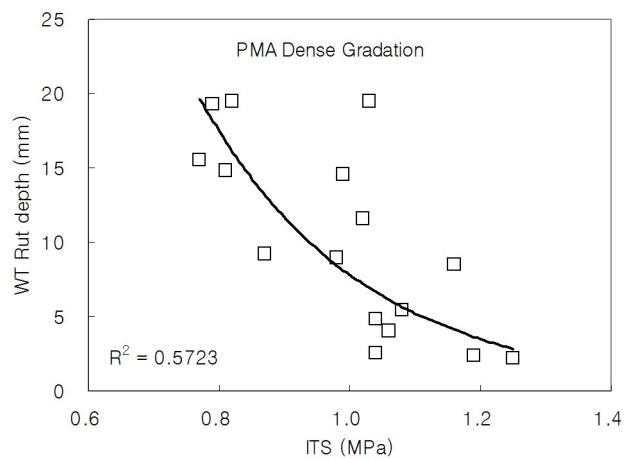


그림 7. Comparison of WT rut depth by recycle ratio

3.2. 상관성 분석

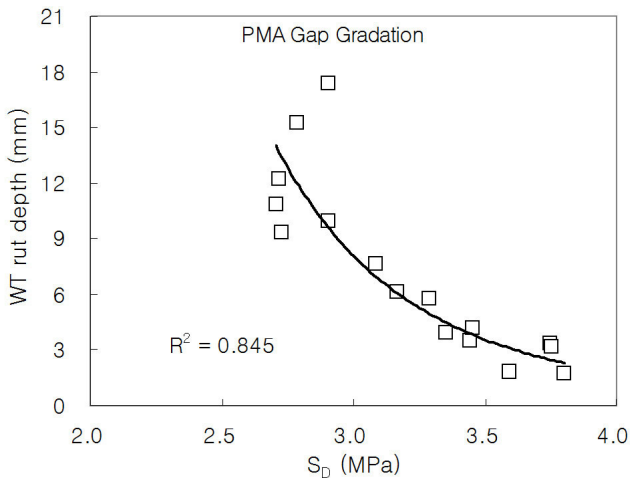
그림 8은 회귀분석 결과중 대표적인 것을 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 혼합물의 WT 최종침하 깊이를 ITS로 추정하기 위해, 그림 8(b)는 WT 최종침하 깊이를 S_D 로 추정하기 위해 회귀분석을 수행한 결과중 대표적인 그림이다. 이 그림에서 WT와 ITS 회귀분석 결과는 $R^2 = 0.5723$ 으로 어느 정도 상관관계를 보이기는 하나 낮은 편이며, 표 3에서 그룹 평균도 $R^2 = 0.5983$ 으로 이와 비슷하다. 즉, WT와 ITS는 바인더 stiffness와 관련 특성이므로 ITS가 커지면 WT 침하깊이도 낮아지는 경향을 나타내기는 하나 각각의 재하메커니즘이 달라 R^2 이 비교적 낮게 나타나는 것으로 추정된다. WT는 혼합물 공시체를 눌러 압축과 전단유동을 유발하는 시험인데 비해서 ITS는 공시체 상하를 좁은 하중 띠(strip)로 눌러 인장을 유발하기 때문에 재료가 저항하는 메커니즘이 다르다. 따라서 ITS나 WT 공히 바인더 stiffness가 크면 강하게 나타나는 성질이기는 하지만 상관성이 낮아 ITS를 통해 소성변형 특성을 직접 추정하기에는 신중해야 할 것으로 보인다.

반면, WT와 S_D 회귀분석 결과는 표 3에서 평균 $R^2 = 0.8357$ 로 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 그림 8(b)의 WT 침하깊이와 S_D 의 회귀분석 역시 평균 $R^2 = 0.845$ 로 우수한 상관성을 보여주고 있다. 이는 S_D 도 WT와 마찬가지로 바인더의 stiffness와 관련이 큰 특성임을 의미한다. 따라서 S_D 가 커지면 WT 침하깊이가 낮아지는 경향을 보이는 것인데 R^2 이 "WT vs. ITS"에 비해 매우 높아 두 특성 간에 상관관계가 매우 크다는 것을 알 수 있다. WT는 혼합물을 눌러 압축과 전단유동을 유발하는 동하중 시험인데 비해 S_D 도 유사하게 공시체에 압축 전단을 유발하지만 단순 정하중을 이용하는 메커니즘이 다르다(Kim et al. 2008). 하지만 재료가 저항하는 거동이 유사하므로 상관성이 높게 나타나며 이를 통해 소성변형 특성을 어느 정도 추정 가능함을 보인다.



(a) PMA 밀입도 혼합물의 WT와 S_D 의 관계

<그림 계속>



(b) PMA 겹입도 혼합물의 WT와 ITS 관계

그림 8. 대표적인 회귀분석 결과

이를 통해 변형강도가 WT 소성변형 특성을 잘 대변하는 특성치임을 확인할 수 있었으며 또한 인장강도와도 어느 정도 관계가 있는 특성임을 짐작케 한다. 따라서 ITS와 S_D 를 회귀분석하여 두 특성간의 상관관계를 확인한 결과 R^2 평균이 0.6341(표 3)로 양호한 편이었다. 그림 9는 이에 대한 대표적인 회귀분석 결과를 보여준다.

각 혼합물 그룹별로 회귀분석을 수행한 결과로부터 얻어진 R^2 값을 표 3에 요약 정리하였다. 특성별로 R^2 평균을 보면 “WT vs. S_D ” 간에 가장 높고, 혼합물별로는 재생혼합물이, 두 입도 중에는 밀입도(Dense)가 더 높았다.

표 3. R^2 values from regression analysis

Mixture type	WT vs. ITS		WT vs. S_D		ITS vs. S_D	
	Dense	Gap	Dense	Gap	Dense	Gap
Normal	0.5723	0.5072	0.8073	0.8450	0.6946	0.5796
Recycle	0.8065		0.8453		0.6826	
Gradation mean	0.6894	0.5072	0.8263	0.8450	0.6886	0.5796
Group mean	0.5983		0.8357		0.6341	

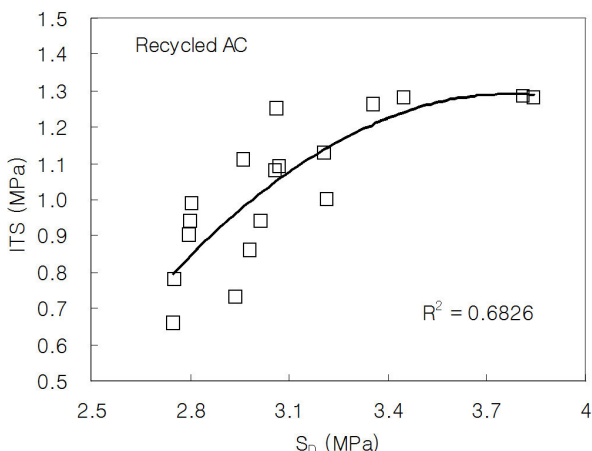


그림 9. 밀입도 재생혼합물의 ITS와 S_D 관계

두 특성치가 바인더의 stiffness에 영향을 받는 성질이기는 하지만 시험시 가해지는 재하 메커니즘이 다르고, 시험 온도도 달라 밀접한 상관성을 보이지는 못하나 S_D 가 큰 혼합물이 ITS도 크게 나타나는 경향을 어느 정도 보여준다. 즉, 바인더의 stiffness가 크면 인장특성도 좋고 변형저항성도 크게 나타나는 일반적인 경향을 어느 정도 뒷받침해주는 결과라 할 수 있다.

따라서 강성이 좋은 바인더를 사용하면 아스팔트 포장에서 인장균열에도 강하지만 소성변형에도 강하게 된다. 특히, 취성이 극대화되는 극저온이나 바인더가 연화되는 혹서기가 아닌 경우 이러한 현상은 사실이다. 본 연구에서의 ITS 시험 온도는 25℃이므로 아스팔트가 취성을 띠는 온도가 아니고 WT와 S_D 시험온도는 60℃로 고온이기는 하지만 열대지역 포장 표면온도(예 70~80℃ 이상)는 아니므로 변형특성과 인장특성 간에 어느 정도 상관성이 나타나는 것이라 할 수 있다.

이상에서 나타났듯이 전체적으로 변형강도와 반복주행시험 결과와의 상관성은 높게 나타났다. 이는 변형강도 시험이 소성변형 저항성을 측정하는 시험법으로 널리 사용되는 반복주행시험의 특성을 잘 대변할 수 있다는 의미이다. 시험이 오래 걸리며 복잡한 동적재하 반복주행시험을 간편한 변형강도 시험으로도 어느 정도 소성변형 저항성을 측정할 수 있음을 의미하며 이것이 S_D 가 국토해양부 배합설계지침에 포함된 근거이기도 하다.

일반적으로 소성변형과 간접인장강도는 별개의 특성인 것으로 인식되었으나 본 연구에서는 WT나 변형강도가 간접인장강도와 어느 정도 상관성을 보이는 것을 통해 반드시 그렇지만은 않음을 보여주었다. 극한의 기후에서 (-30℃ 이하) 바인더의 높은 stiffness는 인장강도 및 파괴인성의 저하를 유발하지만(Kim and Hussein, 1995, Kim et al. 2003) 상온 등의 공용온도(25~60℃)에서는 stiffness가 큰 바인더를 사용하면 인장강도는 물론 변형저항성도 향상된다. 따라서 한대 지역은 균열제어가 더 중요하여 stiffness가 낮고 무른 바인더를 쓰며, 열대지역은 소성변형제어가 중요하여 stiffness 큰 바인더를 쓰고 균열은 염려하지 않는다. 이에 비해 국내정도의 기후조건이라면 stiffness가 좋은 내변형성 바인더 사용이 인장과 변형을 동시에 제어하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

4. 결론

본 연구는 아스팔트 혼합물의 바인더 stiffness에 따라 영향이 크게 나타나는 Wheel tracking (WT), 간접인장강도 (ITS)와 변형강도(S_D) 시험을 통하여 상호간에 어떠한 관계가 있는지를 분석하였으며 바인더 stiffness가 인장강도와 변

형특성에 어느 정도 영향을 주는지 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바인더 stiffness가 높은 PMA 개질 혼합물 및 재생혼합물을 이용한 시험결과 WT와 ITS간에 어느 정도 상관성을 보였으며(평균 $R^2=0.6$), ITS와 S_D 간에도 평균 $R^2=0.64$ 를 보여 인장강도가 높은 혼합물에서 WT와 S_D 도 양호하게 나타나 상호간에 어느 정도 상관성이 있음을 알 수 있었다.
2. 한편 변형특성 측정방법인 WT와 S_D 는 비교적 높은 상관성을 보여(평균 $R^2=0.84$) S_D 가 Wheel tracking 시험 결과를 비교적 잘 대변할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 이러한 결과는 바인더의 stiffness가 60℃에서의 혼합물 변형뿐만 아니라 25℃ 인장에도 영향을 미치게 되므로 극한의 기후가 아닌 상태에서는 바인더의 stiffness를 높이면 인장강도와 변형저항성이 모두 향상되기 때문이다.
4. 소성변형특성과 인장특성은 상관성이 낮은 것으로 인식되었으나 본 연구에서는 WT나 S_D 가 ITS와 어느 정도 상관성을 보이는 것을 통해 반드시 그렇지만은 않다는 것을 알 수 있었다.
5. 이상의 결과를 통해 국내 기후 정도에서는 내 변형성 바인더 사용이 인장과 변형을 동시에 제어하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 추정되나, 본 연구는 한정된 재료에 근거한 것이므로 향후 보다 다양한 재료를 통해 일반화된 확인이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원의 자유공모과제의 지원으로 강원대학교 석재복합 건설신소재 연구소의 시설을 이용하여 이루어졌음.

참고 문헌

김광우, 권오선, 도영수 (2006), "바인더회생방식을 개선한 재생아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구," *한국도로학회논문집* 8(1), 1-13.

김광우, 김성태, 권오선, 도영수 (2004a), "수퍼페이브 혼합물의 소

성변형저항성과 변형강도와의 상관성 분석," *한국도로학회 논문집*, 6(4), 한국도로학회, 45-53.

김광우, 도영수, 조문진 (2005a), "바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 통한 김테스트 적용성 고찰," *한국도로학회 논문집*, 7(4), 91-100

김광우, 도영수, 권오선, 고태영 (2005b), "개선된 혼합방법으로 제작한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구," *한국도로학회 봄 학술발표대회 논문집*, 2005. 3.

김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 최선주 (2004b), "개질아스팔트 혼합물의 변형강도 측정 연구" *석재연논문집* 9, 191-206.

Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirhanian, S. N. and Kim, K. W. (2007), "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, 21(12).

Doh, Y. S., Serji N. Amirhanian and Kim, K. W. (2008), "Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC," *Construction and Building Materials*, 22(6), 1253-1260.

Jozef Judycki (2008), "Environmentally-safe cold recycling of asphalt pavement in Poland," *Proceedings, International Symposium, Advanced Technologies in Eco-friendly Asphalt Pavements, ATAP 2008*, 1-18.

Kim, H. H., Park, N. W., Doh, Y. S., K. Ahn, Lee, S. J. and Amirhanian, S. N., Kim, K. W. (2008), "Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength," *Paper presented at 2008 European Asphalt Technology Association Meeting*, Lyon, France.

Kim, K. W., Amirhanian, S. N., Doh, Y. S. and Jung, J. H. (2007), "Reducing Stiffness of Oxidized Binder in Recycled Asphalt Mixture by Stage Mixing," *Journal of AAPT*, Vol. 78.

Kim, K. W. and El Hussein, M. (1995), "Effect of differential thermal contraction on fracture properties of asphalt materials at low temperatures," *Journal of AAPT*, Vol. 64, 474-496.

Kim, K. W., Kweon, S. J., Doh, Y. S. and Park, T. S. (2003), "Fracture Toughness of Polymer-modified Asphalt Concrete at Low Temperatures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(2), 406-413.

접 수 일 : 2009. 9. 16
 심사 일 : 2009. 9. 17
 심사완료일 : 2010. 3. 31