



바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 통한 김테스트 적용성 고찰

Correlation Analysis of Binder Stiffness with Deformation Strength and Dynamic Creep Property of Asphalt Mixtures for Evaluation of Kim Test Applicability

김 광 우* 도 영 수** 조 문 진***
 Kim, Kwang Woo Doh, Young Soo Cho, Mun Jin

Abstract

This study dealt with correlation analysis of binder stiffness with deformation strength and dynamic creep property of asphalt mixtures for evaluation of applicability of deformation strength (S_D). Two aggregates, with maximum size of 13mm and eight binders were used to produce 16 different mixtures. The stiffness of binder ($G^*/\sin\delta$) was measured using DSR at 64°C. Final deformation(FD) and dynamic stability(DS) were measured by dynamic creep (DC) test, and S_D was measured by Kim test for each mixture. Results of correlation analysis between $G^*/\sin\delta$, and S_D , FD and DS showed that correlation with binder stiffness and deformation strength was the highest ($R^2 > 0.88$). There was good correlation between DS, FD with S_D . The results indicated that rut-resistance property of mixture is better reflected in S_D test than FD or DS of dynamic creep test. Therefore, it is concluded that S_D can be possibly used for evaluation of rut resistance of asphalt concretes with a good reliability if the procedure is standardized.

Keywords : deformation strength, dynamic creep test, Kim test, DSR test, stiffness, correlation

요 지

아스팔트 바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 토대로 혼합물의 소성변형 저항성(내변형성) 추정을 위한 Kim test의 적용성을 고찰하였다. 본 연구는 골재 2종류, AC 60-80 및 이를 개질한 총 8종류의 바인더로 총 16가지 혼합물을 제조하였다. DSR로 각 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 를 측정하였으며 Kim test의 변형강도와 동적크리프 시험의 최종변위(FD)와 동적안정도(DS)를 각 혼합물로부터 측정하였다. 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 소성변형 관련 3가지 특성(S_D , FD, DS)과의 상관성 분석 결과, $G^*/\sin\delta$ 와 S_D 와 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다 ($R^2=0.88$). 이는 혼합물에 내재해 있는 내변형성의 차이를 Kim test가 더 잘 구분해 낼 수 있음을 의미한다. 또한 DS와 S_D 의 회귀분석 결과, R^2 이 약 0.84 이상을 보여 변형강도는 동적크리프 시험의 동적안정도와 좋은 상관성을 가짐을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통하여 아스팔트 혼합물의 내변형성 평가시 Kim test의 활용 가능성이 매우 높음을 확인하였다.

핵심용어 : 변형강도, 동적 크리프시험, 김테스트, 동적전단레오미터, 스티프니스

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사
 ** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 전임연구원 · 공학석사
 *** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 연구원 · 공학석사



1. 서론

국내 도로 포장의 약 85%를 차지하고 있는 아스팔트 콘크리트 포장에서 소성변형은 도로포장 손상 중 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 최근의 연구보고(소성변형.. 2002, 박태순 1999)에 따르면 국내 아스팔트 포장의 파손형태는 균열 등의 탄성적인 파손이 약 50%인 반면 소성변형은 약 91%로 가장 심각한 상태에 있음을 알 수 있다.

이렇게 심각한 국내의 상황에도 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성(내변형성: 耐變形性)을 플랜트에서 사전에 평가할 시험법은 미비한 상태이고 배합설계에서도 이것이 제대로 검토되지 못하고 있다. 미국의 SHRP 연구에서는 바인더의 등급을 유연학적 수준에 맞추어 여러 단계의 성능 등급(Performance grade, 또는 PG 등급)으로 개발하였다. PG 등급(엄밀히 PG 고온 등급)이 높으면 내변형성이 높게 나타난다. 하지만 같은 PG 등급의 바인더로 제조된 혼합물도 골재나 입도가 다르면 변형 특성이 달라지고 또한 바인더 등급이 달라도 역시 마찬가지다. 그러나 일반적으로 높은 PG 등급 바인더는 Stiffness가 커서 전단 유동에 대한 저항성이 높으므로 압축과 전단변형이 동시에 발생하는 소성변형에 강하다. 즉, 동적전단 레오미터(Dynamic shear rheometer: DSR)로 측정된 바인더의 스티프니스(Stiffness)인 $G^*/\sin\delta$ 가 큰 바인더는 소성변형에 강한 특성을 띠는 것이다.

하지만 이 차이를 기존 정하중 하에서의 아스팔트 혼합물 시험법으로는 제대로 구분해 내지 못한다. 만일 간단한 정하중 시험을 통해 이를 측정할 수 있다면 그 시험법은 혼합물의 내변형성의 차이를 판정하는 좋은 시험법이 될 수 있을 것이다. 현재 배합설계에서 쓰이는 마샬 안정도나 흐름은 그렇지 못하다(한국형....., 2004). 하지만 동하중 시험인 휠트래킹(Wheel tracking, WT) 시험이나 회복탄성계수(M_R) 시험 및 동적 크리프(Dynamic creep, DC) 시험 등은 소성변형 특성이 비교적 잘 반영된다

(Zhu and Fwa, 2005). 또한 최근에 국내에서 개발되고 있는 변형강도(Deformation strength, S_D)는 정하중 시험이면서도 WT 시험과의 상관성이 높아 소성변형 특성 추정에 좋은 새로운 시험법으로의 정립이 모색되고 있다(김광우 등 2002a,b,2003,2004a,b,c, 이문섭 등 2004, Kim et al, 2003, 2004, 2005).

따라서 본 연구에서는 시험 방법이 비교적 간단한 Kim test의 S_D 를 바인더 스티프니스(Stiffness) 시험 결과와의 상관성 분석 변수로 사용하고 이를 동적 크리프 시험 결과와 함께 비교 분석하여 적용성을 검토하였다. 본 연구의 가설은 바인더 $G^*/\sin\delta$ 가 크면 혼합물의 동적크리프(DC) 시험에서 높은 내변형성을 보일 것이라는 것이다. 특히 DC 시험은 WT 시험과 함께 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 파악할 수 있는 중요 시험법(Zhu and Fwa, 2005)으로 인식되고 있으므로 같은 혼합물에 대한 S_D 와 DC 결과 비교는 S_D 의 적용성 연구에 중요한 근거가 될 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 측정을 위해 바인더 스티프니스(Stiffness)와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성을 분석하고 이를 토대로 변형강도의 적용성을 고찰하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 널리 사용되고 있는 침입도 등급 AC60~80(PG 64-22) 및 PG 76-22를 사용하였다. 골재는 전국적으로 분포가 많은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 사용하였다. 굵은골재 최대치수는 13mm로 각각 KS F 2503, 2504, 2508에 규정된 방법에 따라 품질시험을 수행하였고, 건설교통부 13mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 혼합 조정하여 사용하였다.

또한 사용된 폴리머 개질제는 LDPE(Low-density-

polyethylene), SBS(Styrene-butadiene-styrene), SBR(Styrene-butadiene-rubber), 페비닐을 재생한 2종류(HDPE, LDPE)의 펠렛을 분말(체 No.8 체 No.30) 형태로 분쇄하여 사용하였다. 이것을 재생 HDPE(RHDPE)와 재생 LDPE(RLDPE)라고 명명하였다. 폴리머 첨가량은 아스팔트 양의 중량비로 LDPE 6%, SBS 3%, 5%, SBR 7%, 재생폴리머는 각각 8%로 AC 60-80 아스팔트에 혼합하여 개질아스팔트를 제조하였다.

2.2 배합설계

본 연구에서는 일반 아스팔트(AC 60-80)외에 7종류 개질아스팔트(Polymer-modified asphalt : PMA)를 두 종류 골재(편마암, 화강암)와 혼합하여 총 16가지 혼합물을 제조하였다. 배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적아스팔트 함량(Optimum asphalt content; OAC)은 본 시험용 공시체 제작의 아스팔트 함량으로 이용되었다. 표 1은 본 연구에

사용된 아스팔트 혼합물의 종류를 보여준다.

공시체 제조시 일반 아스팔트 혼합물은 135~145℃에서, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물은 145~155℃에서 선회다짐기를 이용하여 직경 100mm의 공시체를 제작하였다. 선회다짐기를 사용한 이유는 우선 마샬 다짐 방식이 충격식으로 실제 도로포장의 다짐과 달라 제조된 공시체가 현장 혼합물 특성을 제대로 나타내지 못하므로 현장다짐과 유사한 선회다짐기를 이용하여 현장다짐을 모사하고자 하였다. 배합설계에 사용된 선회다짐횟수는 교통량 100만대 미만이고, 대기온도 39℃이하일 때인 N_{des} 76회를 선정하였다. 선회다짐 압력은 600kPa, 선회각은 1.25°를 사용하였다.

2.3 Kim test

마샬시험에서 마샬안정도는 공시체를 축방향으로 다지고 하중은 측면 방향에서 쥐어짜듯 가하므로, 현장에서 골재 배열 방향과 다르게 하중이 작용한다. 또한 파괴시의 변형의 형태도 실제 포장의 어떤 변형

표 1. 혼합물의 명칭

Designation	Description
ADO	Dense (D)-graded gneiss (A) agg. with AC 60-80 mix.
ADR7	D graded A agg. with AC 60-80 with SBR 7% mix.
ADS3	D graded A agg. with AC 60-80 with SBS 3% mix.
ADS5	D graded A agg. with AC 60-80 with SBS 5% mix.
ADL6	D graded A agg. with AC 60-80 with LDPE 6% mix.
ADPG76	D graded A agg. with PG76-22 mix.
ADRL8	D graded A agg. with AC 60-80 with RLDPE 8% mix.
ADRH8	D graded A agg. with AC 60-80 with RHDPE 8% mix.
BDO	Dense (D)-graded granite (B) agg. with AC 60-80 mix.
BDR7	D graded B agg. with AC 60-80 with SBR 7% mix.
BDS3	D graded B agg. with AC 60-80 with SBS 3% mix.
BDS5	D graded B agg. with AC 60-80 with SBS 5% mix.
BDL6	D graded B agg. with AC 60-80 with LDPE 6% mix.
BDPG76	D graded B agg. with PG76-22 mix.
BDRL8	D graded B agg. with AC 60-80 with RLDPE 8% mix.
BDRH8	D graded B agg. with AC 60-80 with RHDPE 8% mix.

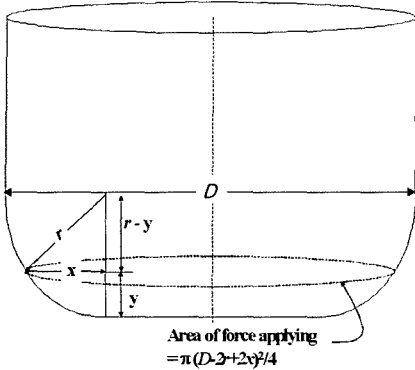


그림 1. D(r)의 하중봉의 개략도

형태와도 같지 않아 현장과 유사성이 없는 시험법이라 할 수 있다(Kim et al, 2004). 따라서 본 연구에서는 내변형성과 상관성이 높은 변형강도(Deformation strength, S_D)를 정하중 하에서 측정하는 Kim test(김광우 등 2002a,b,c, 2004, 2005a,b)를 사용하였다. 이 시험법은 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물이 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 바닥이 둥근 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 반복주행(Wheel tracking) 시험에서와 같은 온도인 60℃에서 수행하고, 그림 1과 같은

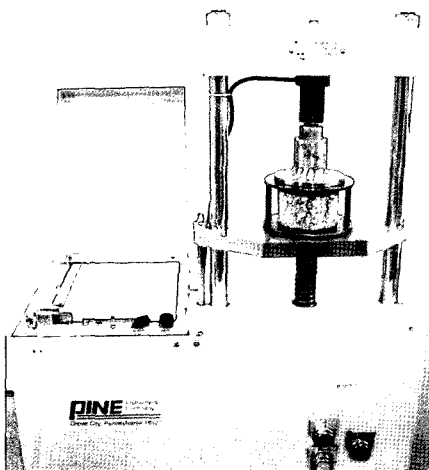
하중봉을 통해 수직으로 정하중을 가하도록 하였다.

변형강도는 아스팔트 혼합물이 고온에서 외력에 의한 변형에 저항하는 정도를 나타내는 특성치이다. 그림 1과 같은 하중봉 하단이 반경 r로 절삭되어 있는 경우 표면으로부터 y만큼 눌러 들어간 하중봉 하단은 혼합물과 사발 같은 모양으로 접하고 있다. 하지만 계산을 위해 이 사발의 수직 투영 면적을 구하면 이는 그림 1에서 공시체 표면과 하중봉이 접해있는 점선으로 나타낸 원이 되며 이것으로 최대하중(P)을 나누어 변형강도를 구한다. 이 원의 크기는 침하깊이 y에 따라 변하며 하중봉이 혼합물 표면과 접하고 있는 원의 평면적이다. 이는 D, r, x의 함수로서 $\pi(D-2r+2x)^2/4$ 이다. 여기서 x는 r과 y의 함수이므로 $\pi(D-2r+2\sqrt{r^2-(r-y)^2})^2/4$ 이며 선정된 하중봉의 D=40(mm), r=10(mm)를 대입하여 정리하면,

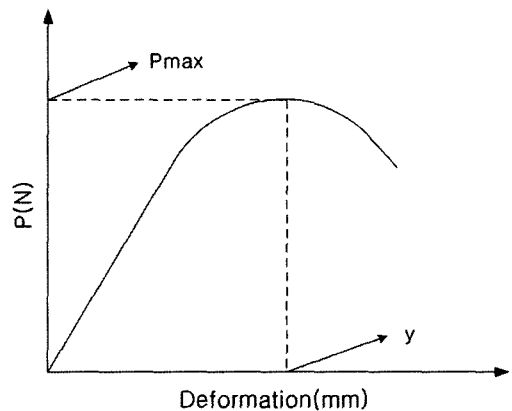
$$S_D = \frac{P}{\pi(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \quad (1)$$

여기서 P=최대하중(N), y=변형값(mm)이고, S_D 의 단위는 MPa이다.

그림 2(a)는 직경 100mm 마찰식 공시체와 Kim tester를 마찰시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습



(a)



(b)

그림 2. (a) 마찰 재하기에 Kim tester의 세팅 / (b) Kim test에 의해 얻어진 하중-변형 곡선



이며, 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 그림 2(b)와 같다.

2.4 동적크리프 시험

동적크리프(Dynamic creep) 시험은 아스팔트 포장의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험 방법 중에 하나이다. 본 연구에서는 배합설계에서 결정된 최적아스팔트 함량으로 100mm×62mm의 원형 공시체를 공극률 4±0.5%를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 시험온도에서 6시간 이상 저장 후 AMTM(Asphalt mechanical property testing machine) 시험기로 동적크리프 시험에 사용되었다.

시험 조건은 하중 재하주기 1Hz의 Harversine 파로 0.1초의 하중재하기와 0.9초의 휴지기를 주었으며 시험온도 60℃에서 총 3600cycle 동안 수행되었다. 윗하중 압력은 50psi(2.7kN)를 사용하였고, 그림 3과 같이 하중 재하판 양쪽에 LVDT를 설치하여 반복하중에 따른 수직 변위를 컴퓨터로 측정·기록하고 최종변위(Final deformation:

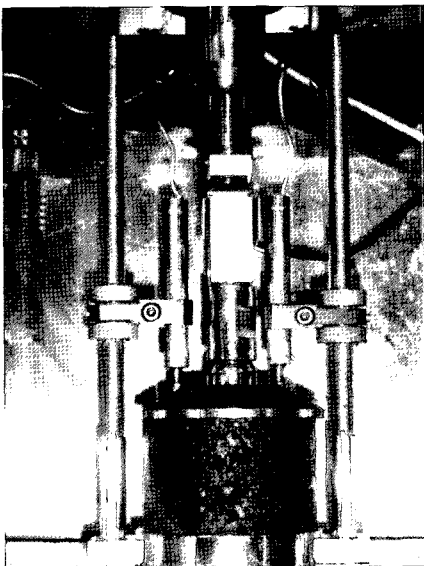


그림 3. 동적크리프 시험

FD)와 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 분석에 사용하였다. 여기서 동적안정도는 혼합물이 단위깊이 침하되는데 필요한 반복재하 회수(cycle)이다.

2.5 DSR(Dynamic Shear Rheometer) 시험

동적전단 레오미터(DSR)는 바인더의 복합전단 계수(Complex shear modulus: G^*)와 위상각(Phase angle: δ)을 측정함으로써 아스팔트 바인더의 점성 및 탄성거동 특성을 분석하는데 사용된다. G^* 는 반복적으로 작용하는 전단에 대한 재료의 저항성을 측정한 것으로 두 가지 성질(탄성과 점성)로 구성되고, δ 는 탄성과 점성 변형의 상대적인 량을 나타낸다. 하지만 G^* 와 δ 중 어느 하나만으로 바인더의 특성을 평가하기에는 무리가 있어서 점탄성 특성치로 $G^*/\sin\delta$ 를 사용하는데, 일반적으로 탄성이 강한 바인더는 이 값이 높고, 점성이 강한 바인더는 낮다. 본 연구에서는 그림 4와 같이 B사의 DSR을 사용하였으며 노화전(Original) 바인더와 단기노화(RTFO) 처리 후 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 를 사용된 침입도 AC60-80의 PG 고온등급인 64℃에서 측정하였다.

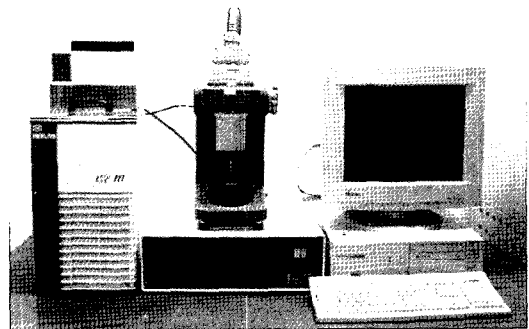


그림 4. Dynamic shear rheometer 시험장치



3. 결과 및 고찰

3.1 배합설계

본 연구에서는 두 종류의 골재(편마암, 화강암)에 8종류 바인더를 첨가한 총 16종류 혼합물의 배합설계 결과로부터 각각의 OAC를 결정하였다. 본 연구에서는 마샬배합설계시 사용되는 안정도와 흐름은 제외하였다. 서론에서도 언급하였듯이 안정도는 아스팔트 혼합물의 내변형성을 반영하지 못하기 때문이다. 대체 시험으로 소성변형과 상관성이 높은 Kim test를 배합설계에 적용하여, 공극(3~5%)과 포화도(70~85%)를 만족하면서 변형강도(S_D)가 가능한 높은 쪽에서 최적아스팔트 함량을 결정하였다.

위의 배합설계 결과로부터 결정된 각 혼합물의 최적 아스팔트 함량(OAC)으로 공시체를 제조한 혼합물의 체적 및 강도 특성은 표 2와 같다. OAC는 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 혼합물보다 다소 높게 나타

났고, 변형강도나 간접인장강도 역시 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 혼합물보다 높게 나타났다.

3.2 동적크리프 시험

이 시험은 각 혼합물별로 2회씩 수행되었고 공시체당 3600cycle동안 시험이 이루어졌다. 하지만 혼합물의 수직변위(침하)가 대략 4mm정도일 때부터 변위가 급속도로 증가하며 붕괴되므로 그때를 공시체의 파괴시점으로 보고 그 이후의 변형은 분석에서 제외하였다. 이 4mm 변위는 공시체 평균높이 62mm의 0.065에 해당하는 변형률이다. 혼합물 ADO 한 가지만이 3600cycle 전인 2,100cycle에서 수직변위가 4mm에 도달하여 최종변위(Final deformation: FD)를 4mm로 적고 이때의 cycle 수를 표에 나타내었다.

편마암의 경우 ADO를 제외한 모든 혼합물이 총 3,600cycle까지 진행되었다. 최종변위로 보면 편마

표 2. 각 혼합물의 체적 특성 및 인장강도 특성

Mixture types	OAC (%)	VMA (%)	VFA (%)	SI (N/mm)	ITS (kPa/cm ²)
ADO	5.5	16.61	75.73	5,280	990
ADR7	5.8	17.05	77.49	4,250	880
ADS3	5.5	16.44	76.60	5,770	1,110
ADS5	5.5	16.51	75.87	6,000	1,130
ADL6	5.3	16.06	75.52	7,280	1,130
ADPG76	5.3	16.17	74.92	4,550	1,170
ADRL8	6.0	16.26	76.69	6,000	1,020
ADRH8	5.8	16.14	77.62	7,470	1,210
Mean	5.59	16.41	76.31	5,825	1,080
BDO	4.8	14.83	76.51	7,270	1,020
BDR7	5.2	14.76	76.77	6,070	1,000
BDS3	5.3	14.79	76.39	6,820	1,290
BDS5	5.3	14.73	76.43	6,370	1,280
BDL6	5.3	14.55	77.71	5,640	1,150
BDPG76	5.0	14.98	75.53	6,310	1,520
BDRL8	5.4	14.83	75.76	7,510	1,500
BDRH8	5.5	14.75	76.14	7,830	1,470
Mean	5.22	14.78	76.41	6,728	1,279

암 중에서 ADRL8이 0.522mm로 가장 작은 값을 보였다. 반면 ADRH8은 동적안정도(DS)가 29,324로 가장 높은 값을 보여, ADRL8, ADRH8이 변형저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

화강암의 경우 모든 혼합물들의 동적크리프 시험을 총 3,600cycle까지 수행되었다. FD의 경우는 BDRH8이 0.429mm로 가장 낮게 나타났고, DS의

경우도 BDRH8이 99,206cycle/mm로 가장 높은 값을 보여 변형에 가장 강한 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 편마암과 화강암의 시험 결과, 화강암이 편마암보다 낮은 FD값과 높은 DS값을 보여 더 우수한 변형저항성을 보였다. 표 3은 전체 동적크리프 시험 결과를, 그림 5~6은 각 골재별 대표적 동적크리프 곡선을 보여 준다.

표 3. 바인더 및 혼합물 특성 시험 결과

Binder types	Binder 스티프니스(Stiffness) ($G' / \sin \theta$) in kPa		Aggregate	Mixture property		
	Original	RTFO		S_b (MPa)	FD(mm)	DS(cycle/mm)
O	1.6133	3.6700	Gneiss	3.296	4(2,100)*	572(2100)*
			Granite	3.746	2.060	2,469
R7	1.6130	3.7200	Gneiss	3.162	2.268	2,122
			Granite	3.966	0.766	11,903
S3	3.4249	4.4996	Gneiss	3.208	2.221	2,198
			Granite	4.237	0.648	16,410
S5	6.5849	7.9179	Gneiss	3.482	0.745	17,810
			Granite	4.532	0.571	25,934
L6	6.7699	7.9840	Gneiss	3.637	0.934	8,336
			Granite	5.274	0.623	20,554
PG76	5.4612	8.8005	Gneiss	3.653	0.632	19,865
			Granite	5.432	0.495	79,655
RL8	10.5101	13.6189	Gneiss	4.370	0.522	27,887
			Granite	5.576	0.468	55,390
RH8	10.9489	14.4248	Gneiss	4.916	0.571	39,324
			Granite	5.508	0.429	99,206

* () 안의 수치는 침하량이 4mm에 도달했을 때의 cycle수이며 상관성 분석에서 제외

Note: O: AC60-80, R7: SBR 7%, S3: SBS 3%, S5: SBS 5%, L6: LDPE 6%, RL8: RLDPE 8%, RH8: RHDPE 8%

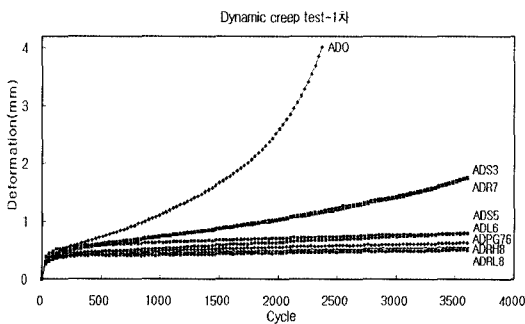


그림 5. 편마암 골재 혼합물의 1차 동적크리프 시험 결과

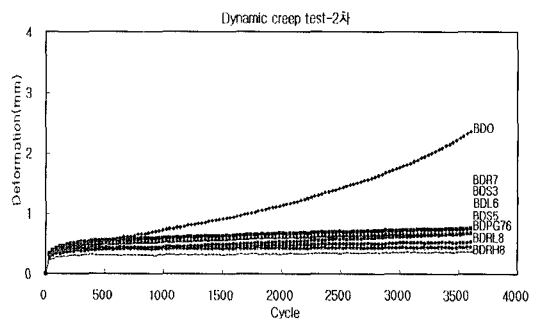


그림 6. 화강암 골재 혼합물의 2차 동적크리프 시험 결과



3.3 Kim test

본 연구에서는 총 16종류의 혼합물에 대하여 Kim test를 수행하였으며, 그 결과는 표 3과 같다. 편마암의 경우 변형강도(S_D)는 3.162~4.916MPa 사이에 분포하였으며, 변형강도가 가장 높은 혼합물과 가장 낮은 혼합물과 1.754MPa 차이를 보였다. 화강암의 경우는 다소 높아 변형강도가 3.67~5.58 MPa 사이에 분포하였고, 변형강도가 가장 높은 혼합물과 가장 낮은 혼합물과 1.91MPa 차이를 보였다. 이와 같이 화강암 혼합물의 변형강도가 높은 것은 내변형성이 좋을 것을 시사하는 것이며, 앞의 동적크리프 시험에서도 우수했던 화강암이 변형강도도 좋게 나타난 것으로 상호 상관성이 있음을 의미한다. 이는 표 2에서 바인더 함량, VMA, ITS 등에서도 차이를 보인 것과 같이 골재의 특성 차이 때문이라고 사료된다.

아스팔트 바인더에 따른 각 혼합물의 변형강도는 개질 아스팔트를 사용한 혼합물이 일반아스팔트를 사용한 혼합물보다 전반적으로 높았다. 이는 폴리머 개질이 바인더의 스티프니스를 향상시킨 결과라 보인다. 그러나 SBR을 개질제로 사용한 혼합물에서는 일반혼합물과 큰 차이를 보이지 않았다.

3.4 DSR 시험

본 연구에서는 시험에 사용된 총 8가지의 바인더에 대하여 DSR 시험을 수행하였다. 표 3은 DSR 시험결과를 보여준다. 개질에 따른 $G^*/\sin\delta$ 증진 효과는 RLDPE와 RHDPE 그룹에서 가장 크게 나타나고, 그 다음 LDPE6과 SBS5 그룹으로 이들은 PG 76-22보다 다소 높게 나타났다.

3.5 상관성 분석

3.5.1 $G^*/\sin\delta$ 와 동적크리프 시험 결과

본 분석의 가정은 비록 골재의 영향이 존재해도

바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 혼합물의 동적크리프(DC) 시험 결과는 상관성이 있으리라는 것이다. 그림 7~10에서는 바인더의 스티프니스(Stiffness)인 $G^*/\sin\delta$ 를 종속변수, 동적크리프 시험에서 얻어지는 두 가지 변수인 최종변위(Final deformation: FD)와 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 독립변수로 사용하여 회귀분석을 수행하였다. 단, 중간에 파괴된 공시체 ADO의 데이터는 분석에서 제외하였다. 바인더는 노화 전(Original)과 회전박막가열(RTFO) 노화 후의 $G^*/\sin\delta$ 값이 이용되었다. $G^*/\sin\delta$ 와 FD와의 회귀분석 결과 두 골재 혼합물에 대한 평균 결정계수(R^2)가 약 0.74 $G^*/\sin\delta$ 와 DS와의 회귀분석결과 평균 R^2 은 약 0.80으로 비교적 양호한 상관성이 얻어졌다(표 4). 즉, 바인더의 스티프니스(Stiffness)가 크면 반복하중 하에도 혼합물이 덜 변형되며 골재별로 다소 차이는 있으나 R^2 이 평균 약 0.77이 되어 그 상관성이 양호함을 확인할 수 있었다.

한 실험에서 얻어진 이 두 특성 간 큰 차이는 아니지만 DS의 R^2 이 다소 높아 동적크리프 시험에서 단순한 최종변위보다는 동적안정도가 바인더의 특성을 더 잘 반영하는 것으로 보여진다. 또한 Original 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 에 비해 RTFO의 $G^*/\sin\delta$ 가 다소 높은 R^2 을 보이는데 이는 혼합물 내의 바인더 상태가 이미 RTFO 처리를 거친 것과 유사한 상태이므로 나타난 현상이라 판단된다. 골재별로는 편마암(Gneiss)의 R^2 이 더 높아 골재에 따른 특성 차이가 존재함을 볼 수 있었다.

3.5.2 $G^*/\sin\delta$ 와 변형강도

앞에서와 같은 방식으로 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 변형강도(S_D)와의 상관성을 분석하는 것은 혼합물의 소성변형 추정에 S_D 가 얼마나 신뢰성이 있는지를 평가할 수 있는 방법 중 하나이다. 그림 11, 12의 회귀분석 결과 편마암의 경우 평균 $R^2=0.90$ 이상, 화강암의 경우 평균 0.86 이상을 보였으며 두 골재에 대한 평균은 0.88 이상으로 상당히 높았다(표

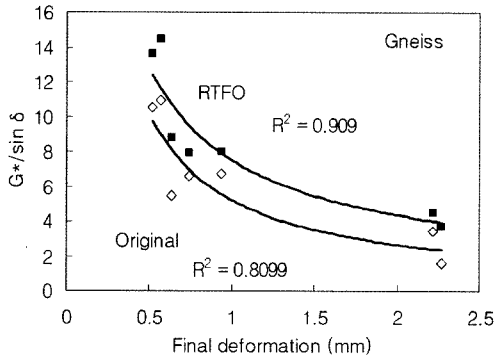


그림 7. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 편마암골재 혼합물 최종 변위와의 상관관계

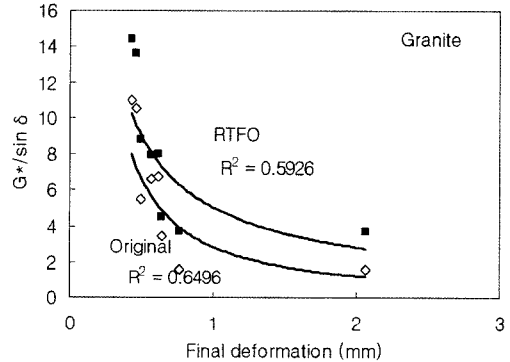


그림 8. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 최종 변위와의 상관관계

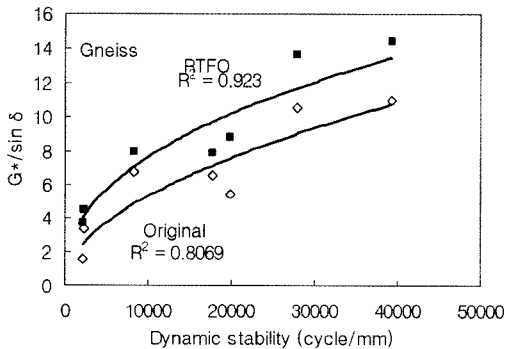


그림 9. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 동적안정도와의 상관관계

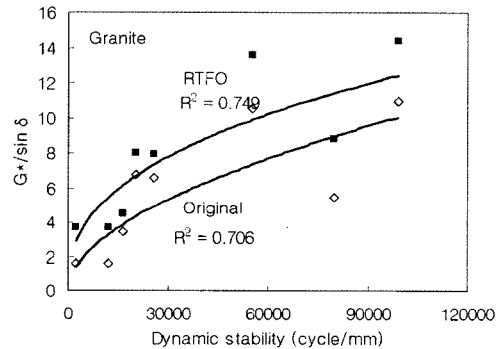


그림 10. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 동적안정도와의 상관관계

4). 이 회귀분석 결과의 R^2 평균은 앞에서 분석한 $G^*/\sin\delta$ 와 FD의 회귀분석 평균보다 0.14 정도 높고, $G^*/\sin\delta$ 와 DS와의 회귀분석 평균보다 약 0.09 정도 높은 것이다 (표 4). 이는 사용된 바인더의 스티프니스(Stiffness) 차이가 혼합물의 S_D 값에 보다 잘 반영되어 나타남을 의미한다. 즉, S_D 가 Rutting 저항 특성을 나타내는 $G^*/\sin\delta$ 와 매우 높은 상관성을 가짐을 보이며, 본 연구에서 조사된 혼합물의 변형저항 특성치 3가지와의 상관관계 중에서 가장 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이는 혼합물에 내재해있는 내변형성의 차이를 동적크리프 시험보다 Kim test가 더 잘 구분해 낼 수 있음을 시사하는 것이다

3.5.3 변형강도와 동적크리프 시험과의 상관성분석
 앞의 결과에서 혼합물의 내변형성이 변형강도와 동적크리프 두 시험에서 모두 유사하게 나타났다. 즉, 내변형성이 높은 바인더로 만들어진 혼합물은 S_D 나 DS가 높고 FD는 낮은 경향이 비교적 일관되게 나타났다. 따라서 본 절에서는 S_D 와 동적크리프 시험결과와의 회귀분석을 통하여 두 특성간의 상관성을 분석하였다. 회귀분석의 독립변수로는 S_D 를, 종속변수로는 동적크리프 시험의 FD와 DS로 하였다. 그림 13, 14는 변형강도와 동적크리프시험과의 상관성 분석 결과를 보여준다.

S_D 와 FD의 회귀분석 결과 평균 R^2 은 약 0.64, S_D 와 DS와의 회귀분석 결과 평균 R^2 은 약 0.84로 S_D 와 DS의 상관관계가 훨씬 더 높았다. 두 특성 (FD

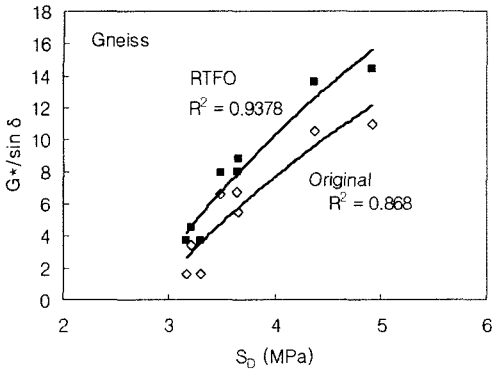


그림 11. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 편마암골재 혼합물 S_D 와의 상관관계

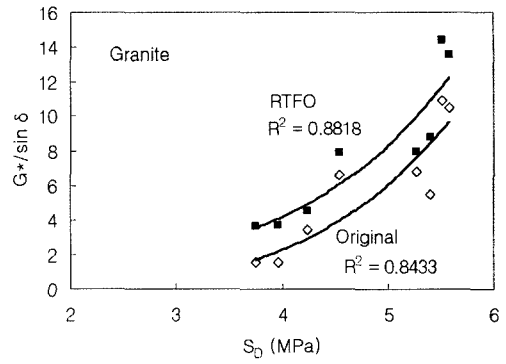
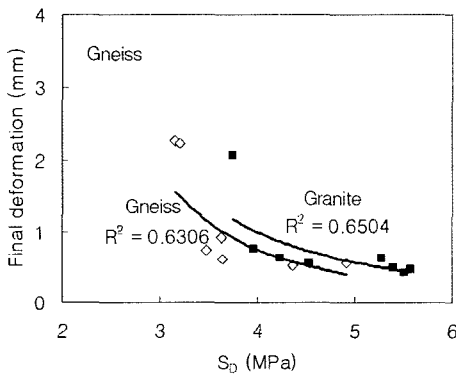


그림 12. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 S_D 와의 상관관계



13. 최종 변위와 S_D 의 상관관계

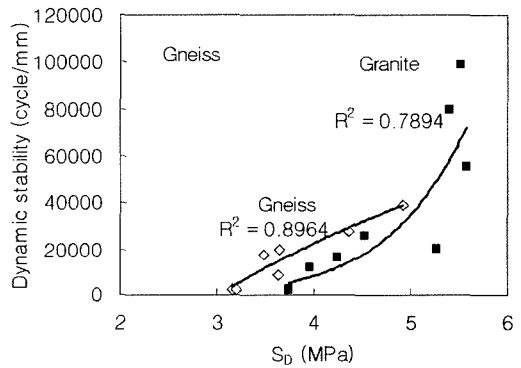


그림 14. 동적안정도와 S_D 의 상관관계

표 4. $G^*/\sin\delta$ 와 각종 혼합물 특성과의 회귀분석에서의 R^2 값

Aggregate	Property	Binder condition			Mean of S_D	Mean of FD	Mean of DS
		Original	RTFO	Mean			
Gneiss	SD	0.8680	0.9378	0.9029			
	FD	0.9090	0.8099	0.8595			
	DS	0.8069	0.9230	0.8850			
	Mean	0.8613	0.8902	0.8758			
Granite	SD	0.8433	0.8818	0.8626			
	FD	0.6496	0.5926	0.6211			
	DS	0.7060	0.7490	0.7275			
	Mean	0.7330	0.7411	0.7371			
Total Mean		0.7971	0.8157	0.8064	0.8827	0.7403	0.7962

와 DS) 중 DS가 S_D 와 더 높은 R^2 을 보이는 것은 바인더 스티프니스(Stiffness)와의 회귀분석에서도 나타난 것과 같은 경향이다. 따라서 동적크리프 시험에서 단순한 최종변위(FD)보다는 동적안정도가 바인더나 혼합물의 특성을 더 잘 반영한다고 판단된다.

현재 국내 아스팔트 혼합물 배합설계 기준으로 이용되는 마샬시험법의 안정도나 흐름치는 소성변형과 상관성이 아주 낮아 이를 어느 정도 반영할 수 있는 대체 특성치(Surrogate property)의 개발이 필요하다(Huber et al, 1987). 본 연구 결과를 보면 S_D 에 바인더의 스티프니스(Stiffness) 특성이 잘 반영됨은 물론 DC 시험과도 좋은 상관관계를 보이고, 기존 연구에서 WT와도 상관성이 높게 (R^2)0.95) 나타났으므로 새로운 특성치로 활용 가능성이 매우 높음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 8가지 바인더를 제조하여 DSR 시험에서 $G^*/\sin\delta$ 를 측정하고 각 바인더를 2가지 골재로 총 16가지 혼합물을 제조하여 동적크리프(DC) 시험과 Kim test를 수행하였다. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 Kim test의 변형강도(S_D), DC의 최종변위(FD) 및 동적안정도(DS)와의 회귀분석을 통해 바인더와 혼합물 간의 소성변형 저항성(내변형성)의 상관관계를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 혼합물의 3가지 내변형 특성 (S_D , FD, DS)간의 회귀분석 결과, $G^*/\sin\delta$ 와 S_D 간에 가장 밀접한 상관관계 ($R^2 > 0.88$)가 얻어졌다. 이는 혼합물의 내변형성의 차이를 동적크리프 시험보다 Kim test가 더 잘 구분해 낼 수 있음을 시사하는 것이다.
2. 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 혼합물의 FD 및 DS간의 회귀분석 결과, $G^*/\sin\delta$ 와 이 두 특성 간에 양호한 상관관계(평균 $R^2=0.77$)가 얻어졌다. 이는 비록 S_D 보다는 낮지만 그래도 혼합물에 내재해있는 내

변형성의 차이가 동적크리프 시험에 잘 반영됨을 의미한다.

3. 바인더의 노화 전(Original) 상태에서 얻은 $G^*/\sin\delta$ 보다는 단기노화(RTFO) 처리 후의 $G^*/\sin\delta$ 가 상기의 모든 혼합물 특성들과 더 높은 상관관계를 보였다. 이는 혼합물 내의 바인더 상태가 이미 단기노화를 거친 것과 유사한 상태이므로 나타난 결과라 판단된다.
4. 동적크리프 시험과 Kim test 간의 측정치에 대한 상관관계를 분석한 결과, DS와 S_D 간에 R^2 은 약 0.84, FD와 S_D 간에는 R^2 이 0.64 이상이 얻어졌다. 따라서 두 시험 간에는 양호한 상관관계가 존재하며, S_D 는 동적크리프 시험의 DS와 더 좋은 상관성을 가짐을 확인하였다.
5. 이상의 결과, S_D 는 바인더의 스티프니스(Stiffness) 특성을 잘 반영함은 물론 동적안정도 시험과도 좋은 상관관계를 보이며, 기존 연구에서 휠트랙킹 시험과도 상관성이 높게 (R^2)0.95) 나타나므로 혼합물의 내변형성과 상관성이 큰 특성 치임을 알 수 있었다. 특히 현재 배합설계 기준으로 이용되는 마샬안정도나 흐름치가 소성변형과 상관성이 아주 낮아 이를 대체할 특성치의 개발이 필요한 시점에서 향후 체계적인 연구를 수행한다면 S_D 의 활용 가능성은 매우 높다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재 연구센터의 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp.. 41-52
2. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002b), "소성변형



과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구,” 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 23-39

3. 김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제 (2003) “개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성 변형특성 연구,” 석재연 논문집, 제 8권, pp. 71-88.
4. 김광우, 김성태, 권오선, 도영수 (2004a), “수퍼페이브 혼합물의 소성변형저항성과 변형 강도와의 상관성 분석,” 한국도로학회 논문집, 제6권, 4호, 45-53
5. 김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 권오선, 고대영 (2004b), “변형강도에 의한 다양한 입도의 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 추정,” 2004 아스팔트 포장공학의 첨단기술 국제 심포지엄 논문집, pp. 57-82
6. 김광우, 최선주, 이기호, 도영수(2004c), “온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성 변형과의 상관성 연구,” 대한토목학회 논문집, 제 24권 5D호, pp.743-748.
7. 박태순, 고석범, 김수삼, “국내 아스팔트 포장의 소성 변형으로 인한 유지보수비용 및 문제점 조사에 관한 연구” 한국도로포장공학회 창립기념 ‘99학술발표회 논문집’ pp.69-74.
8. “소성변형 저감을 위한 시방지침개발” 한국도로공사, 2002
9. 이문섭, 최선주, 도영수, 김광우(2004d), “공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향,” 한국도로학회 논문집, 제 6권 2호, pp. 1-13.
10. “한국형 포장설계법 개발 및 포장 성능 개선 방안 수립

을 위한 기본 계획,” (2004), 최종보고서, 건설교통부

11. Huber, G. H., and Heiman (1987), “Effect of asphalt concrete parameters on rutting performance:A field investigation”, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologist*, Volume 56
12. Kim, K. W. Choi, S. J. Lee, G. H. and Lee, M. S.(2003), “Correlation of Deformation Strength with Permanent Deformation of Polymer-Modified Asphalt Concretes,” *The 4th ASPIC*, Chuncheon, Korea.
13. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N.(2004), “Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete,” *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, No. 3., pp. 303-322.
14. Kim, K. W., Cho. M. J., Ko, T. Y., Doh, Y. S. (2005), “Kim Test for Measure of Rut Resistance of Asphalt Concretes,” *Proceedings, 5th ICPT*, Ed. by Kim, May 2005.
15. Zhu, L. Y. and Fwa, T. F.(2005) “Rutting Potential Evaluation of Asphalt Mixtures by Repeated Load Creep Test,” *Proceedings, 5th ICPT*, Ed. by Kim, May 2005.

(접수 : 2005. 8. 12)