

# 아스팔트 콘크리트의 소성변형저항성 평가를 위한 동적크리프시험과 변형강도의 적용성 연구

## Estimation of Rut Resistance of Asphalt Concretes using Dynamic Creep test and Deformation Strength

김광우\* · 이기호\*\* · 조문진\*\*\* · 고태영\*\*\*\*

Kim, Kwang Woo. · Lee, Gi Ho. · Cho, Mun Jin. · Ko, Tae Young.

### 1. 서 론

우리나라 도로포장의 약 90%를 차지하고 있는 아스팔트 포장에서 소성변형(Permanent deformation, Rutting)은 도로포장손상 중 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 소성변형은 고온에서 아스팔트포장에 발생하는 변형이 누적되어 나타나는 결과이므로, 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물의 고온(60°C) 변형저항성을 평가하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 혼합물에 대한 김테스트, 동적크리프(Dynamic Creep)시험을 수행하였다. 그리고 이들 시험 결과의 상관성 분석을 통하여 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성을 연구하고자 하였다.

김테스트에 의한 변형강도(變形強度; Deformation strength;  $S_D$ )는 기존 장비 등을 최대한 활용하기 위하여 마찰시험법과 유사하게 개발하였으나, 재하 메커니즘을 달리하여 소성변형과의 상관성을 높인 특성치이다. 본 연구에서는 김테스트를 수행하여 변형강도와 소성변형과의 상관성을 분석하였다.

그리고 동적 하중하에서의 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 동적크리프시험을 수행하였다. 동적크리프시험은 아직 국내에서 많이 사용되고 있지 않지만, 미국이나 유럽 등지에서 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 사용하고 있는 시험법이다. 동적시험법인 동적 크리프시험을 이용하여 아스팔트 혼합물의 변형 저항성을 김테스트의 변형강도와 동적 크리프시험의 최종침하깊이(Final deformation : FD)와 동적안정도(Dynamic stability : DS)와의 상관성을 분석하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 널리 사용되고 있는 AC 60-80 및 PG 76-22를 사용하였다. 골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 사용하였다. 굵은 골재 최대치수는 13mm로 각각 KS F에 규정된 방법에 따라 품질시험을 수행하였고, 건설교통부 13mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 혼합 조정하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 폴리머는 LDPE(Low-density-polyethylene), SBS(Styrene-butadiene-styrene), SBR(Styrene-butadiene-rubber), 폐비닐을 재생한 2종류(HDPE, LDPE)의 펠렛을 분말(체 No.8 ~ 체 No.30)형태로 분쇄하여 사용하였다. 그리고 이것을 Recycled HDPE (RHDPE)와 Recycled LDPE (RLDPE)라고 명칭하였다. 폴리머 첨가량은 아스팔트 양의 중량비로 LDPE 6%, SBS 3%, 5%, SBR 7%, 재생폴리머는 각각 8%로 AC 60-80 아스팔트에 혼합하여

\* 강원대학교 지역기반공학과 교수, 033-250-6467, e-mail : [asphalttech@hanmail.net](mailto:asphalttech@hanmail.net)

\*\* 강원대학교 지역기반공학과 박사과정, 033-250-7284, e-mail : [lgused@yahoo.co.kr](mailto:lgused@yahoo.co.kr)

\*\*\* 강원대학교 지역기반공학과 공학석사, 033-250-7284, e-mail : [cmi7710@hanmail.net](mailto:cmi7710@hanmail.net)

\*\*\*\* 강원대학교 지역기반공학과 석사과정, 033-250-7284, e-mail : [xoduddia@nate.com](mailto:xoduddia@nate.com)



개질 아스팔트를 제조하였다.

## 2.2 배합설계

본 연구에서는 일반 아스팔트(AC 60-80)외에 7종류 개질 아스팔트(Polymer-modified asphalt : PMA)를 두 종류 골재(편마암, 화강암)와 혼합하여 총 16가지 혼합물을 제조하였다. 배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적아스팔트 함량은 본 시험용 공시체 제작의 아스팔트 함량으로 이용되었다. Table 1은 본 연구에 사용된 혼합물의 종류를 보여준다.

Table 1. Designation of mixtures

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.

공시체는 선회다짐기(Superpave gyratory compactor : SGC)를 이용하여 제조하였다. 먼저 혼합물의 제조는 준비된 골재를 오븐에 넣어 180℃로 최소 5시간 이상 충분히 가열하였다. 그리고 약 180±5℃의 온도에서 60~80분간 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 혼합하여 몰드에 넣고 다짐온도(일반 아스팔트 혼합물: 135~145℃, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물: 145~155℃)를 유지하면서 선회다짐기를 이용하여 직경 100mm의 공시체를 제작하였다. 마샬다짐기의 다짐방식은 충격식으로 실제 도로포장의 다짐을 모사하지 못하므로, 현장다짐과 유사한 선회다짐기를 이용하여 현장다짐을 모사하고자 하였다. 배합설계에 사용된 선회다짐횟수는 교통량 100만대 미만이고, 대기온도 39℃이하일 때 Ndes 76회를 선정하였다. 선회다짐압력은 600kPa, 선회각은 1.25° 를 사용하였다.

## 2.3 Kim test

마샬시험에서 마샬안정도는 공시체를 축방향으로 다지고 하중은 측면 방향에서 쪼어짜듯 가하므로, 현장에서 골재 배열 방향과 다르게 하중이 작용할 뿐만 아니라, 파괴시의 변형의 형태도 포장의 어떤 파손형태와도 다르다. 따라서 현장과 상당히 차이가 나는 시험법이라 할 수 있다(Kim et al 2004). 이에 김광우 등 (2002a,b,c)은 다양한 종류의 아스팔트 혼합물에서 소성변형 저항성과 밀접한 관계가 있는 변형강도(Deformation strength; SD)를 정하중하에서 측정하는 Kim test를 개발하였다. 이 시험법은 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물이 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 바닥이 둥근 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 소성변형 저항성을 측정하는 반복주행 (Wheel tracking) 시험에서와 같은 온도인 60℃에서 수행하고, Figure 1과 같은 하중봉을 통해 수직으로 정하중을 가하도록 하였다.

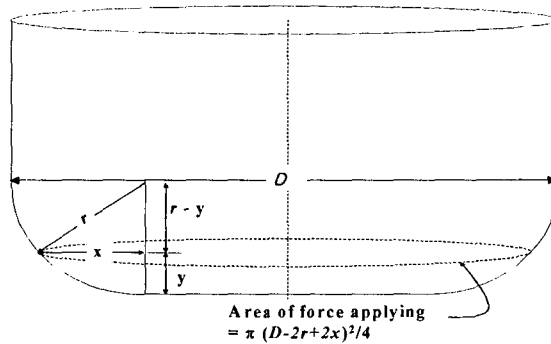


Figure 1. Schematic of Loading head with D(r)

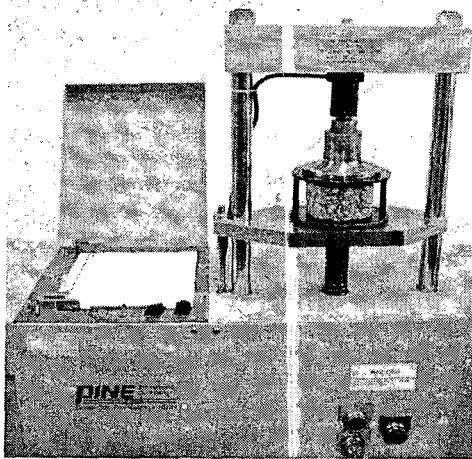
Kim test에서 일어나는 강도치는 아스팔트 혼합물이 고온에서 변형에 저항하는 정도를 나타내는 특성치로서 변형강도(SD)라 정의하였다. 변형강도의 계산은 Figure 1과 같은 한 D(r) 하중봉이 재하하중에 의해 표면으로부터 y만큼 아스팔트 혼합물로 눌러 들어갈 경우의 최대하중(P)을 D, r, y의 함수로 나타낸 면적 [그림의  $\frac{\pi(D-2r+2x)^2}{4} = \frac{\pi}{4}(D-2r+2\sqrt{r^2-(r-y)^2})^2$ ] 으로 나누어 정리한 식(1)로 계산하였다.

$$S_D = \frac{4P}{\pi(D-2r+2\sqrt{r^2-(r-y)^2})^2} \dots\dots\dots(1)$$

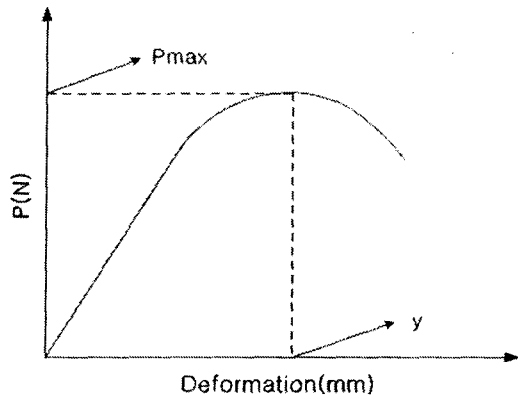
- 여기서 P = 최대하중 (N)
- D = 하중봉의 직경 (mm)
- r = 하중봉의 원형절삭반경 (mm)
- y = 변형값 (mm)

이고, S<sub>D</sub>의 단위는 MPa이다.

Figure 2(a)는 직경 100mm 마찰식 공시체와 Kim tester를 마찰시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며, 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 Figure 2(b)와 같다.



(a)



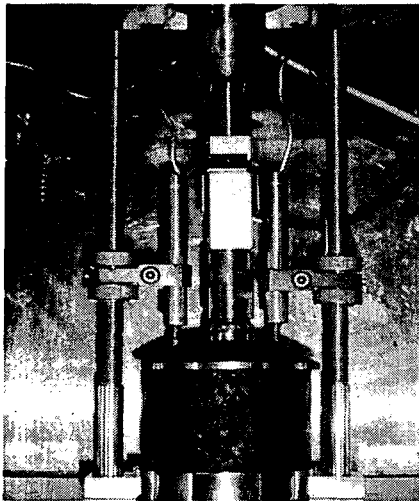
(b)

Figure 2. Illustration of (a) Kim tester setting on a Marshall press and (b) a typical load-deformation curve from Kim test

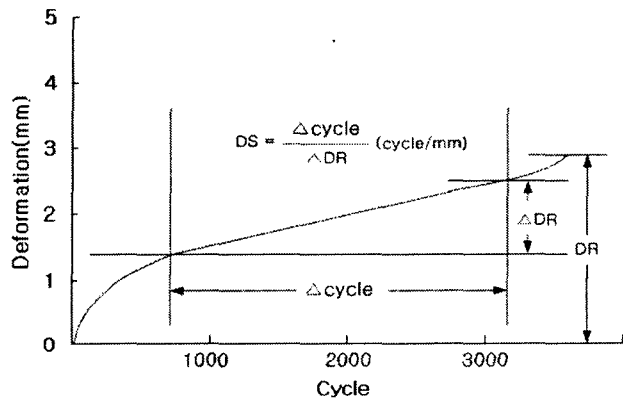
### 2.4 동적 크리프시험

아스팔트 콘크리트의 변형 발생 메커니즘을 모사한 시험방법이 동적크리프(Dynamic creep)시험이다. 본 연구에서는 배합설계에서 결정된 최적 아스팔트 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 동적 크리프시험을 수행하였다.

시험조건은 하중 재하주기 1Hz에 Haversine파를 사용하였고, 0.1초 하중재하기, 0.9초 휴지기를 주었으며, 60℃에서 3,600cycle 동안 수행되었다. 유효하중압력은 50psi(2.7kN)를 사용하였고, 하중재하판 양쪽에 LVDT를 설치하여 반복하중에 따른 수직침하량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하고 최종 침하 깊이(Final deformation: FD)와 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 분석에 사용하였다. 본 연구에서 사용한 동적안정도 측정방법은 Figure 3(b)와 같으며, 이는 동적크리프시험에서 혼합물이 단위깊이 침하하는데 필요한 반복주행 cycle 수를 나타내는 것이다. 동적크리프시험에 사용된 AMTM 시험기 내부에 시험을 하기 위하여, 공시체를 거치한 모습은 Figure 3(a)와 같다.



(a)



(b)

Figure 3. Dynamic creep test(a) & Illustration of dynamic stability(DS) in a dynamic creep curve(b)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 배합설계

본 연구에서는 두 종류의 골재(편마암, 화강암)에 8종류 바인더를 첨가한 총 16종류 혼합물의 배합설계 결과로부터 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)을 결정하였다.

본 연구에서는 마샬배합설계시 사용되는 안정도와 흐름은 제외하였다. 왜냐하면, 마샬안정도는 아스팔트 혼합물의 역학적특성을 반영하지 못하기 때문이다. 대체시험으로 소성변형과 상관성이 높은 김테스트를 배합설계에 적용하여, 하중(P), 변형(y), 변형강도(SD)를 아스팔트함량에 따라 측정하였다.

### 3.2 Kim test

본 연구에서는 총 16종류의 혼합물에 대하여 Kim test를 수행하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 편마암의 경우 변형강도(SD)는 3.162 ~ 4.916MPa 사이에 분포하였으며, 변형강도가 가장 높은 혼합물과 가장 낮은 혼합물과 1.754 MPa 차이를 보였다. 혼합물중에서 ADR7의 변형강도가 가장 낮은 값을 보였으며, ADRH8이 가장 높은 값을 보였다.



화강암의 경우, 변형강도는 3.746 ~ 5.576MPa 사이에 분포하였고, 변형강도가 가장 높은 혼합물과 가장 낮은 혼합물과 1.84MPa 차이를 보였다. 혼합물중에서 일반 아스팔트를 사용한 ADO의 변형강도가 가장 낮았으며, ADRL8이 가장 높은 값을 보였다.

아스팔트 바인더에 따른 각 혼합물의 변형강도를 비교하면, 우선 개질 아스팔트를 사용한 혼합물이 일반 아스팔트를 사용한 혼합물보다 전반적으로 높은 변형강도 값을 보여 주었다. 이는 폴리머 개질이 바인더의 스티프니스를 향상시킨 결과라 보여진다. 그러나 SBR이 개질재로 이용된 혼합물에서는 일반혼합물과 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 2. Kim test results of each mixture at OAC

Mixture types	OAC (%)	P (N)	y (mm)	S <sub>D</sub> (MPa)
ADO	5.5	2,653	2.0	3.296
ADR7	5.8	2,467	1.8	3.162
ADS3	5.5	2,550	1.9	3.208
ADS5	5.5	2,975	2.4	3.482
ADL6	5.3	2,958	2.1	3.637
ADPG76	5.3	3,358	3.0	3.653
ADRL8	6.0	3,683	2.3	4.370
ADRH8	5.8	4,183	2.4	4.916
Mean	5.6	3,103	2.2	3.72
BDO	4.8	3,183	2.4	3.746
BDR7	5.2	3,333	2.3	3.966
BDS3	5.3	3,767	2.7	4.237
BDS5	5.3	4,050	2.7	4.532
BDL6	5.3	4,367	2.2	5.274
BDPG76	5.0	5,100	3.2	5.432
BDRL8	5.4	4,700	2.3	5.576
BDRH8	5.5	4,533	2.1	5.508
Mean	5.2	4,129	2.5	4.78

### 3.3 동적 크리프시험

동적 크리프시험은 각 혼합물별로 2회씩 수행하였고, 총 3,600cycle동안 시험이 이루어졌다. 그러나 ADO의 경우, 3,600cycle까지 진행되기 전에 공시체가 붕괴하는 경우가 발생하였다. 그 붕괴시점은 혼합물의 침하깊이가 대략 4mm정도일 때 이었으며, 이는 공시체의 평균 높이 62mm의 경우 변형률 0.065에 해당하는 수치이다. 본 연구에서는 공시체의 높이가 거의 비슷하므로 같은 변형률 수준에 달했을 때(침하량이 4mm에 이르렀을 때)를 공시체의 붕괴시점으로 보고, 그 이후의 변형은 분석에서 제외하였다. 대신 4mm에 이르렀을 때의 cycle수를 표에 나타내었다.

편마암의 경우 ADO를 제외한 모든 혼합물의 시험이 끝까지 수행되었다. ADO 혼합물은 대략 2,100cycle에서 붕괴에 이르렀다. 최종 침하량(Final deformation: FD)으로 보면 편마암중에서 ADRL8이 0.522mm로 가장 작은 값을 보였다. 반면 ADRH8은 동적안정도(DS)가 29,324로 가장 높은 값을 보여, ADRL8, ADRH8이 변형 저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

화강암의 경우 모든 혼합물들이 동적 크리프시험을 끝까지 수행하였다. FD의 경우는 BDRH8이 0.429mm로 가장 낮게 나타났고, DS의 경우도 BDRH8이 99,206 cycle/mm로 가장 높은 값을 보여 변형에 가장 강한 것으로 나타났다.

편마암과 화강암의 시험결과를 비교해보면, 화강암이 편마암보다 낮은 FD값과 높은 DS값을 보여, 화강암이 편마암보다 우수한 변형저항성을 보였다. 이 결과는 앞서의 변형강도가 더 좋았던 화강암이 본 시험에서도 더 우수하게 나타난 것이다. 따라서 이번 시험과 앞서 제시한 변형강도특성과의 상관관계 분석은 의미있는 결과를 제시하여 줄 것으로 보인다. Table 3과 Figure 4 ~ 7은 Dynamic creep test의 결과를 보여준다.



Table 3. Dynamic creep test results

Mixture types	FD(mm)			DS(cycle/mm)		
	1차	2차	Mean	1차	2차	Mean
ADO	4(2,370)	4(1,830)	4(2,100)	670	475	572
ADR7	1.757	2.780	2.268	2,723	1,521	2,122
ADS3	1.761	2.680	2.221	2,706	1,690	2,198
ADS5	0.803	0.687	0.745	14,792	20,828	17,810
ADL6	0.796	1.073	0.934	9,203	7,468	8,336
ADPG76	0.632	0.614	0.623	18,388	21,343	19,865
ADRL8	0.508	0.536	0.522	28,563	27,211	27,887
ADRH8	0.555	0.587	0.571	27,554	31,095	29,324
BDO	1.762	2.358	2.060	2,818	2,121	2,469
BDR7	0.771	0.760	0.766	9,770	14,036	11,903
BDS3	0.606	0.691	0.648	15,670	17,149	16,410
BDS5	0.601	0.540	0.571	19,363	32,505	25,934
BDL6	0.593	0.670	0.632	29,614	11,494	20,554
BDPG76	0.540	0.450	0.495	76,454	82,855	79,655
BDRL8	0.506	0.429	0.468	34,514	76,266	55,390
BDRH8	0.496	0.361	0.429	109,235	89,176	99,206

\* ( ) 안의 수치는 침하량이 4mm에 도달했을 때의 cycle수

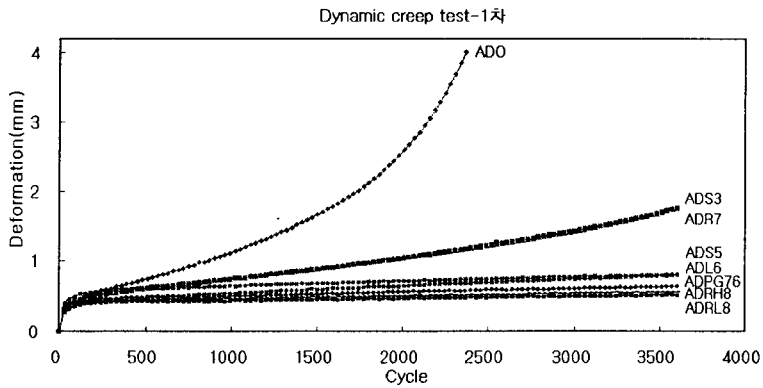


Figure 4. Comparison of deformation strength( $S_D$ ) for gneiss mixtures

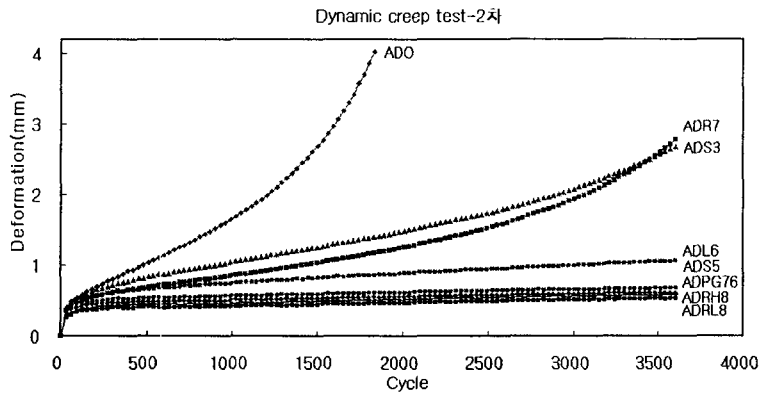


Figure 5. Comparison of deformation strength( $S_D$ ) for gneiss mixtures

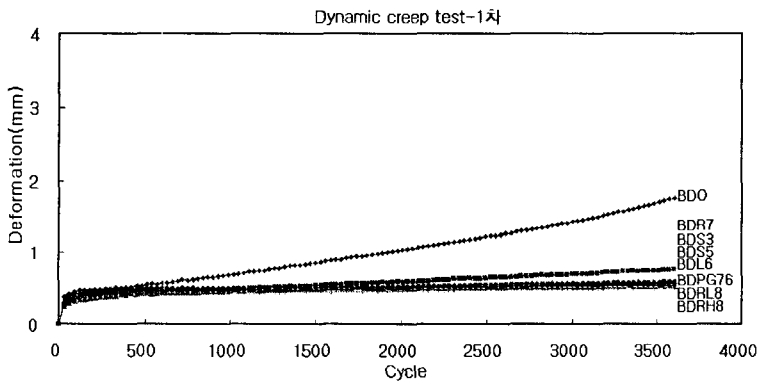


Figure 6. Comparison of deformation strength( $S_D$ ) for granite mixtures

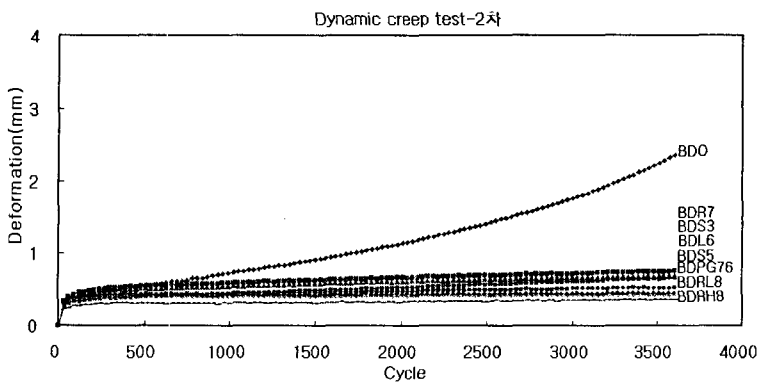


Figure 7. Comparison of deformation strength( $S_D$ ) for granite mixtures

### 3.4 변형강도와 동적크리프시험과의 상관성분석

본 논문에서는 회귀분석을 통하여 김테스트 결과와 동적크리프 시험결과와의 상관성을 분석하였다. 회귀분석의 독립변수로는 이제까지 소성변형 계수(Rut parameter)와의 R2값이 가장 높게 나타난 SD를, 종속변수는 동적크리프시험에서 얻어지는 두 가지 계수로서 최종 침하깊이(FD)와 동적안정도(DS)이다. FD 또는 DS를 종속 변수로 한 회귀분석에서 상기 각 특성별로 5가지 회귀분석 모델 중 결정계수(Coefficient of determination; R2)가 가장 높게 얻어지는 모델을 선정하였다. 사용된 5가지 모델은 선형(linear), 2차(2nd-degree curvilinear)함수, 지수(exponential) 함수, 대수(logarithm)함수 및 거듭제곱(power of x)함수 이다.

변형강도와 침하깊이와의 상관성을 분석해 보면, 편마암이 R2 = 0.6319, 화강암 R2 = 0.6498로 평균 0.6409로 양호한 상관성을 보였다. 동적안정도와와의 상관성분석을 보면, 편마암이 R2가 0.8057, 화강암 R2 = 0.7917로 평균 0.7987로 높은 상관성을 보였다. Figure 8은 변형강도와 동적크리프시험 결과와의 상관성분석을 보여준다.

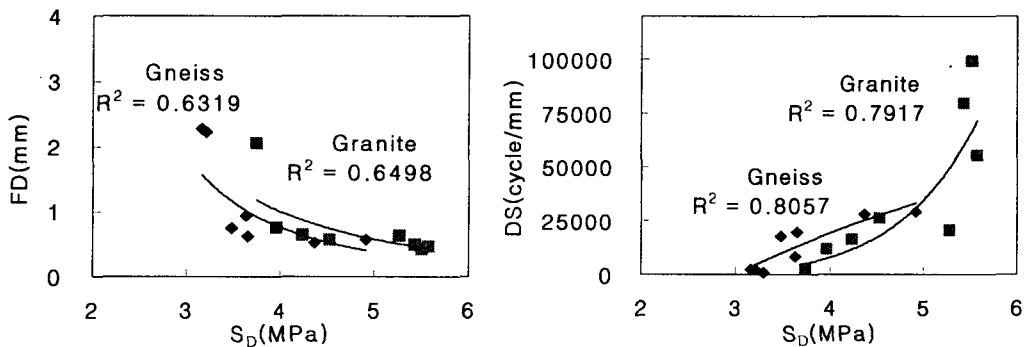


Figure 8. Relationship of FD, DS vs.  $S_D$  using 4(1.0) loading head

## 4. 결론

본 연구는 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성을 평가하기 위하여 총 16가지 혼합물에 대해 김테스트, 동적크리프시험을 수행하였다. 연구 결과 김테스트와 동적크리프시험은 소성변형저항성 평가에 적합한 시험방법임을 알 수 있었고, 향후 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 평가시 적용가능성을 본 연구를 통하여 알 수 있었다. 이와 관련된 구체적인 발견 사항은 다음과 같다.

1. 김테스트 결과 변형강도 값에서 전반적으로 화강암이 편마암보다 높게 나타났고, 동적크리프시험결과에서도 화강암이 편마암보다 변형저항성이 더 우수한 것으로 나타나 두 특성치 간에 상관성이 있음을 알 수 있었으며, 이를 상관성 분석을 통해 확인할 수 있었다.

2. 즉, 변형강도와 동적크리프시험과의 상관성분석을 통하여 아스팔트 혼합물의 변형저항성을 분석한 결과, R2이 침하깊이의 경우 0.63 이상, 동적안정도의 경우, 0.79 이상으로 양호한 상관성을 보여주었다. 이는 향후 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 평가시 동적크리프시험의 적용도 가능함을 의미한다.

3. 개질재에 따라 변형강도에 차이가 있었는데, 재생 LDPE와 HDPE 혼합물(RLDPE8과 RHDPE8)이 골재의 종류에 상관없이 변형에 가장 강함을 보여주었다. 이것은 소성변형제어목적의 개질재로 재생 LDPE와 재생 HDPE를 사용 가능함을 보여준 결과이다.





### 감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재 연구센터와 건설교통부 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구의 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, "한국형 포장 설계법 개발 및 포장 성능 개선 방안 수립을 위한 기본 계획," 최종보고서, 2004
2. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순계, (2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정 모델을 통한 변형강도 시험 장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 41-52.
3. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주, (2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 23-40.
4. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주, (2002c), "소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도측정법의 개발," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 67-74.
5. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amerkhanian, S. N. (2004), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," In-press, International Journal of Road Materials and Pavement Design.