

# 소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도 측정법의 개발

## A deformation strength test method for improved correlation with rut properties of asphalt concrete

김광우· 이문섭\*\* 김중열\*\* 최선주\*\*

Kim, Kwang-Woo Lee, Moon-Sup Kim, Joog Yeol Choi, Sun Joo

### 1. 서 론

현재 아스팔트 혼합물 특성 측정방법중 하나인 마찰시험법은 시험장치가 간단하지만 여기서 얻어지는 안정도나 흐름은 혼합물의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못하며 특히 소성변형과 상관성이 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서 안정도나 흐름의 기준을 통과하는 배합으로 제조한 혼합물에서도 소성변형이 많이 발생하고 있어 간접인장강도 보다도 포장 손상과 상관성이 낮다 (Kim 등 1988, 이상범 2001).

따라서 본 연구에서는 비교적 손쉬운 시험방법으로 측정하면서도 소성변형과의 상관성이 높은 변형강도(變形強度: Deformation strength:  $K_D$ )를 개발하고 前 단계에서의 문제점을 보완하기 위한 2단계 연구결과를 제시하였다. 변형강도는 시험방법이 마찰 시험법과 유사하나 하중재하 메커니즘을 달리한 방법으로서 이에 대한 상세한 내용은 1단계 결과를 수록한 문헌(김광우 등 2002)에 소개되어있다. 따라서 본 연구의 목적은 변형강도가 다양한 혼합물의 소성변형 특성과 어느 정도 밀접한 관계를 가지는지를 2단계의 실험을 통하여 구체적으로 제시하는 것이다.

### 2. 변형강도

마살안정도의 재하 메커니즘은 실제 현장에서의 재하 형식과 다르다. 즉, 공시체를 축방향으로 다져놓고 하중은 옆 방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장에서 골재가 배열되어 있는 방향과 다르게 하중이 작용한다. 따라서 본 시험에서 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 혼합물의 소성변형을 측정하는 60°C에서 수행하고 재하시 하중봉과 골재와의 맞물림이 일어나므로 끝부분을 Figure 1과 같이 원형절삭해서 그 현상을 줄이고 Figure 2 같은 장치를 통해 수직으로 침하되도록 하였다.

Figure 1과 같이 직경  $D$ 인 봉의 양 하단을 반경  $r$ 만큼 원형절삭하고 하중에 의해 바닥으로부터  $y$ 만큼 하중봉이 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우를 고려하자. 그 깊이에서 원의 직경은 그림에서와 같이  $(H+2x)$ ,  $H=D-2r$ 이다.  $x$ 를 구하기 위해 Figure 1의 오른쪽 원의 3사분면에 대해 고려하면 삼각함수 법칙에 의하여,

$$r^2 = x^2 + (r-y)^2 \quad (1)$$

$$x = \sqrt{2ry - y^2} \quad (2)$$

바닥으로부터  $y$  높이에서 바닥에 투영한 원 면적을 구하면

$$A = \pi \left( \frac{D-2r}{2} + \sqrt{2ry - y^2} \right)^2 \quad (3)$$

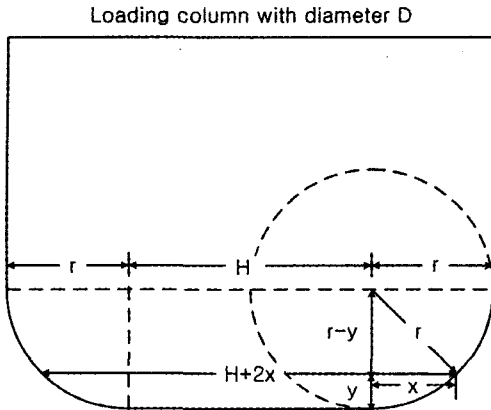


Figure 7. Configuration of round-cut and details at the bottom of loading column

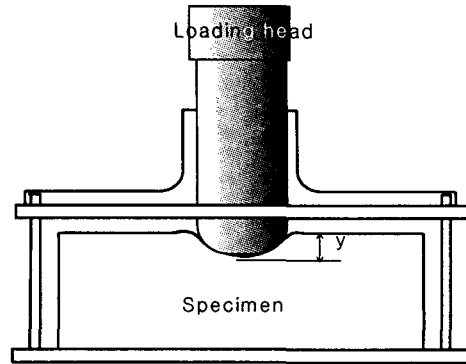


Figure 6. Schematic of Kim-test loading mechanism

파괴시 하중( $P_{max}$ )을 접지면에서 바닥에 투영한 원의 면적(A)으로 나눈뒤 정리하면 식 (4)가 되며, 이렇게 얻어진 강도를 변형강도, Deformation strength ( $K_D$ ), 라 정의하였다.

$$K_D = \frac{4P_{max}}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \quad (4)$$

여기서  $P_{max}$  = Maximum deformation load (kgf),  $D$  = Diameter of loading column (cm),  $r$  = radius of round cut (cm),  $y$  = vertical deformation (cm) 이고  $K_D$ 의 단위는 ( $kgf/cm^2$ ), 이다.

하중봉 직경 3cm에는 반경 5mm의, 하중봉 직경 4cm에는 반경 5, 10mm의 원형절삭을 하였다. 그리고 이 하중봉을 편심 없이 수직으로 재하하기 위하여 Figure 2에서와 같은 몰드를 개발하고 이를 김테스터(Kim tester)라 명명하고 이 시험법을 김테스트라 명명하였다. Figure 3은 이를 마샬안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 Figure 4와 같다.

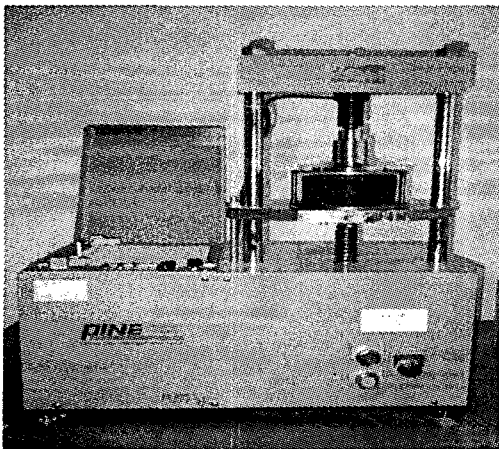


Figure 8. Kim tester setting on Marshall press

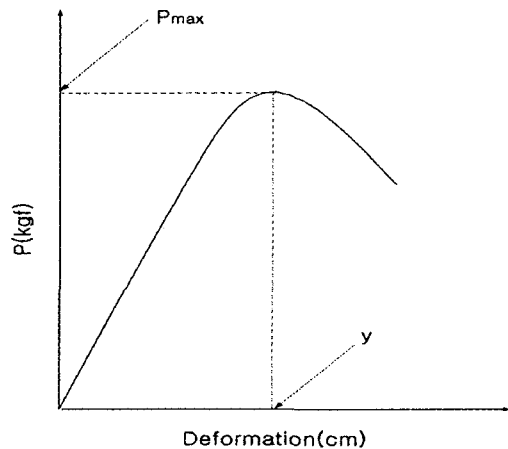


Figure 9. A typical load-deformation curve from Kim test



### 3. 적용 실험

#### 3.1 1단계 연구결과 요약 및 2 단계 개요

1단계 실험에서 Table 1과 같은 다양한 변수들에 대하여 실험을 하여 측정변수와 소성변형 침하깊이 또는 동적안정도와의 상관관계를 구하였다. 1 단계의 실험은 배합설계로 얻은 12가지 혼합물의 OAC로 각각 10cm 마살공시체 및 15cm 자이레토리 공시체를 제작하여 김테스트를 수행하고 같은 혼합물로 제조한 슬래브 공시체에 대한 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험 결과와 상관성을 비교하였다. 그 결과 하중봉의 직경(D)과 원형절삭 반경(r)이 결과에 유의차를 주는 변수로 확인되었고, 공시체 직경(S)은 유의차가 없었다. 즉, r=0보다는 r=0.5와 1.0cm가 R<sup>2</sup>이 월등히 높게나와 2단계에서 r=0은 제외하였고, 공시체 직경 10, 15cm 간에는 차이가 없어 2단계에서는 10cm만 사용하였다. 소성변형과의 상관성에서는 변형강도(K<sub>D</sub>)와 변형하중(P<sub>max</sub>)이 가장 높게 나타났다. 특히 K<sub>D</sub>의 R<sup>2</sup>은 평균 0.75가 나와 마살안정도 등과 비교해서 상관성이 매우 높은 강도치임을 발견하고 2단계 실험에 착수하였다.

Table 1. Results of 1st phase of Kim test evaluation study

구 분	내 용	결 과
공시체변수	공시체 종류 2종 (S=10cm, 15cm)	Not significant
장치변수	하중봉 직경 (D=3, 4cm)	Significant at α=0.01
	원형절삭반경 (r= 0, 0.5, 1cm)	Significant at α=0.01
측정변수	P <sub>max</sub> , P <sub>max</sub> /y, K <sub>D</sub> , K <sub>I</sub> (=K <sub>D</sub> /y)	R <sup>2</sup> for K <sub>D</sub> (0.75) >P <sub>max</sub> , >P <sub>max</sub> /y, >K <sub>I</sub>

하지만 1단계는 김테스트 공시체와 WT 공시체를 별도로 만들어 각각의 실험을 하므로 결과에 차이가 날 수 있다. 즉, WT 한번 측정된 결과를 기준으로 김테스트는 공시체 2 종류, 하중봉 직경 및 원형절삭반경 5가지 등 10 가지를 측정하여 WT 결과와의 상관성을 구하였던 것이다.

하지만 2 단계에서는 다양한 혼합물 (2골재×6바인더 = 12가지)로 슬래브 공시체를 제작하고 반복주행시험 후 직경 10cm 코어를 4개씩 채취하여 변형강도를 측정하였다. 따라서 매번 같은 슬래브 공시체로부터 4개 코어 공시체에 대한 김테스트 결과와 WT 시험 결과가 얻어지므로 1 단계보다 확실한 두 특성치의 상관성 여부를 확인할 수 있었다.

#### 3.2 사용재료

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 우리나라에서 널리 사용되고 있는 AC 80-100 및 AC 60-80 아스팔트이다. 골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 굵은 골재 최대치수는 19mm로 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질시험을 수행하고 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였으며 골재들의 입도분포 곡선은 Figure 5에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 폴리머는 LDPE(Low-density polyethylene)와 SBS(Styrene-butadiene-styrene) 및 PG76-22이다. 아스팔트 양의 중량비로 LDPE는 4%, 6%, SBS는 3%, 5% 비율로 AC 80-100 아스팔트에 혼합하여 개질 아스팔트를 제조하였고 PG76-22는 국내산 제품을 사용하였다. AC 60-80은 무개질 아스팔트 혼합물 제조에 사용하였다. 폴리머 첨가 비율은 문헌조사와 기존 연구 결과를 통하여 개질 효과가 조금씩 차이가 나도록 적절히 조절한 것이다.



### 3.3 시험 방법

본 연구에서는 두 종류 아스팔트, 두 종류 골재, 세 종류 폴리머를 첨가한 혼합물의 배합설계를 통해 각각의 최적아스팔트함량(OAC)을 결정하고 공시체 제작시 OAC로 이용하였다. Table 2는 사용된 각종 혼합물에 대한 설명이다.

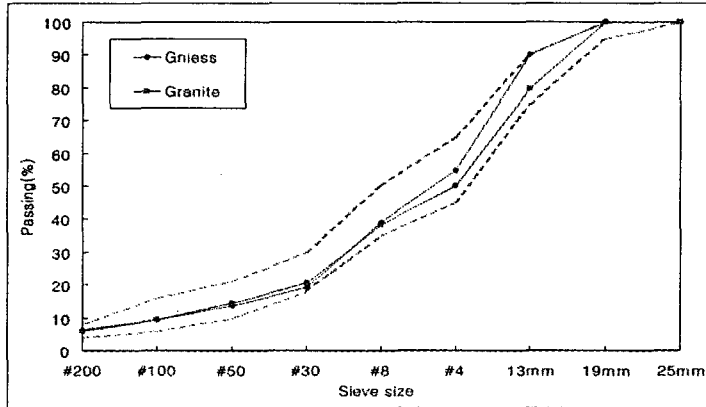


Figure 10. Gradation curves of aggregates

배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 305mm×305mm×70mm의 슬래브 공시체를 공극률 4±0.5%를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 시험온도 60℃에서 6시간 이상 저장 후 반복주행에 사용되었다. 반복주행시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 53mm로 하였으며 바퀴의 반복주행에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 또한 강재와 아스팔트 콘크리트의 직접 접촉에 의한 골재의 파손 등을 방지하기 위하여 폴리프로필렌 부직포를 공시체 표면에 덮었다. 차륜 축하중은 70kgf, 1회 주행거리는 200mm로 하고 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 변형량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하였다.

반복주행시험 수행후 슬래브 공시체로부터 10cm 코어를 4개씩 채취하여 24시간 25℃ 실내에 보관 후 Kim test를 수행하였다. 시험전 30분간 공시체를 60℃ 수조에 넣었다가 꺼내어 물기를 닦은 후 신속하게 Kim tester에 넣고 마찰시험기를 이용하여 Figure 4와 같은 하중과 수직 변형을 측정하였다. 각 공시체별로 D와 r에 따른 최대하중 및 수직변형을 구하고 K<sub>D</sub> 등을 계산하였다.

Table 2. Designation of mixtures

Designation	Description of mixture
ADOO	Gneiss(A) agg. dense(D)-graded AC60-80 mix.
ADL4	A agg. D graded AC80-100 with LDPE 4% mix.
ADL6	A agg. D graded AC80-100 with LDPE 6% mix.
ADS3	A agg. D graded AC80-100 with SBS 3% mix.
ADS5	A agg. D graded AC80-100 with SBS 5% mix.
ADPG	A agg. D graded PG76-22 mix.
BDOO	Granite(B) agg. dense(D)-graded AC60-80 mix.
BDL4	B agg. D graded AC80-100 with LDPE 4% mix.
BDL6	B agg. D graded AC80-100 with LDPE 6% mix.
BDS3	B agg. D graded AC80-100 with SBS 3% mix.
BDS5	B agg. D graded AC80-100 with SBS 5% mix.
BDPG	B agg. D graded PG76-22 mix.



4. 결과 및 고찰

4.1 김테스트 및 반복주행시험

슬래브 공시체를 제조하여 시험온도 60℃에서 70kgf 하중하에 왕복 횟수 2,700cycle로 WT 시험을 하여 얻어진 최종 침하깊이(Rut depth)와 동적안정도(Dynamic stability)는 본 연구에서 개발한 Kim-tester의 결과치와 비교·분석하는데 사용하였다.

Table 3~5는 Kim tester로 측정한 최대하중( $P_{max}$ ), 수직변위( $y$ ), 변형강도( $K_D$ ) 치를 나타내고 있다. 직경 10cm 코어 공시체에 대해 3가지 하중봉으로 실험을 하였다. 직경을 구분한 이유는 공시체와 봉 직경의 크기에 따른 결과를 비교하기 위해서이다. 혼합물의 종류에 따라 각 값들이 차이가 나고 있으며  $K_D$ 값은  $r$ 과  $y$ 에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

Table 3. Kim-test and wheel tracking test results for D=3cm, r=0.5cm

Mixture	$P_{max}$ (kgf)	$y$ (cm)	$K_D$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rut depth (cm)	DS (cycle/cm)
ADOO	105	0.381	15.143	1.606	633.90
ADL4	206	0.254	31.829	0.588	1454.55
ADL6	187	0.260	28.760	0.534	1444.04
ADS3	221	0.351	32.234	0.697	1152.74
ADS5	204	0.313	30.308	0.451	2352.94
ADPG	298	0.387	42.895	0.140	4592.46
BDOO	193	0.378	27.862	1.970	398.31
BDL4	251	0.292	37.756	0.790	1334.97
BDL6	285	0.289	42.952	0.317	3209.22
BDS3	254	0.394	36.484	1.267	585.65
BDS5	246	0.387	35.410	0.953	881.06
BDPG	394	0.426	56.151	0.398	3703.70

Table 4. Kim-test and wheel tracking test results for D=4cm, r=0.5cm

Mixture	$P_{max}$ (kgf)	$y$ (cm)	$K_D$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rut depth (cm)	DS (cycle/cm)
ADOO	192	0.317	15.823	1.966	387.38
ADL4	307	0.286	25.649	1.077	654.10
ADL6	329	0.260	27.864	0.856	873.09
ADS3	281	0.394	22.617	2.143	343.97
ADS5	340	0.305	28.160	0.874	806.61
ADPG	427	0.368	34.590	0.378	2912.41
BDOO	227	0.397	18.259	2.243	456.52
BDL4	-	-	-	1.479	443.33
BDL6	352	0.238	30.209	1.023	740.26
BDS3	267	0.264	22.563	1.465	493.20
BDS5	329	0.286	27.487	1.096	809.33
BDPG	363	0.337	29.692	0.673	1176.99



Table 5. Kim-test and wheel tracking test results for D=4cm, r=1.0cm

Mixture	$P_{max}$ (kgf)	y (cm)	$K_D$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rut depth (cm)	DS (cycle/cm)
ADOO	134	0.400	13.164	2.210	372.77
ADL4	262	0.390	25.958	1.616	629.31
ADL6	299	0.318	31.750	1.023	892.06
ADS3	230	0.342	23.823	1.023	1273.65
ADS5	276	0.309	29.597	0.542	1510.35
ADPG	391	0.419	37.826	0.498	2433.33
BDOO	170	0.448	16.090	1.700	582.45
BDL4	278	0.298	30.185	0.872	867.33
BDL6	289	0.318	30.689	0.733	962.64
BDS3	224	0.330	23.487	1.089	767.08
BDS5	291	0.329	30.543	0.572	1569.89
BDPG	473	0.371	47.658	0.134	6190.14

기존의 연구에 의하면 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 인장강도 및 소성변형 저항성이 높다는 것을 알 수가 있다. 그리고 비율에 따라서도 LDPE 4%보다 LDPE 6%가 높고 SBS 3%가 SBS 5%보다 높다는 것도 알 수가 있다. 김테스트의 결과치를 살펴보면 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 측정치들이 높다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 상관성 연구

본 연구는 개발된 방법으로 실험을 하여 가장 소성변형과 상관성이 높은 혼합물을 선정하기 위한 특성치를 제시하는데 목적이 있다. 따라서 이제까지 실험 결과를 4가지 변수(공시체, 봉직경, r 및 골재)별로 분류하여 회귀분석을 수행하였으며 독립변수는 1단계에서 가장 상관성이 높게 나타난 Kim-test의  $P_{max}$ ,  $K_D$ 이며 종속변수는 반복주행시험의 최종 침하깊이와 동적안정도이다. 회귀분석 방법으로는 침하 깊이(Rut depth: RD) 또는 동적안정도(DS)를 종속변수로 하여 상기 각 특성별로 선형(Linear), 곡선(Curvilinear), 대수(Logarithm), 지수(Exponential), x의 거듭승(Power) 회귀분석을 통해 결정계수(Coefficient of determination:  $R^2$ )가 가장 높은 모델을 선정하였다.

Figure 6, 7은 각 소성변형 특성과  $K_D$ 와의 관계를 회귀분석하여 얻어진 추정식과  $R^2$ 값의 대표적인 예를 보여준다. 그림과 같이 변형강도가 높은 혼합물은 소성변형 침하깊이가 낮은 경향을 보이고, 반면에 동적안정도는 높은 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 골재별로 그 경향이 다소 다른 것도 알 수 있다. 각 변수별로 최적 모델을 얻은 회귀분석법은 다르지만  $R^2$ 는 0.78~0.97로 매우 높았다. 이때 회귀식은 2차 함수, 로그함수, x의 거듭승 모델 등 다양하게 얻어졌다.

Table 6은 각 혼합물별로 공시체 크기, 골재, 하중봉의 직경과 r에 따른 Kim-test의 2가지 특성치와 소성변형 침하깊이 및 동적안정도와 회귀분석에서 얻어진 결정계수를 보여준다.

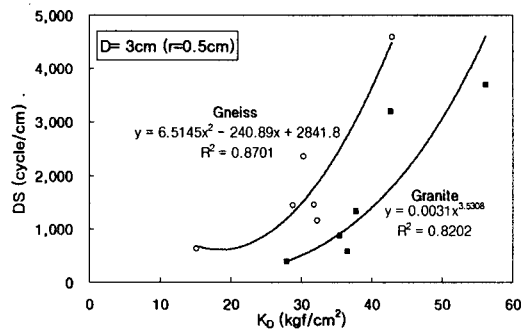
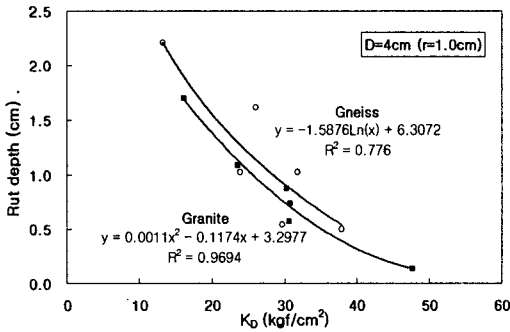


Figure 11. A typical relationship of rut depth with

Figure 12. A typical relationship of dynamic deformation strength stability with deformation strength

Table 6. Coefficient of determination ( $R^2$ ) between Kim test variables and rutting properties

Aggregate	Property	$R^2$ for rut depth (RD)			$R^2$ for dynamic stability (DS)			Mean
		D=3cm	D=4cm		D=3cm	D=4cm		
		r=0.5	r=0.5	r=1.0	r=0.5	r=0.5	r=1.0	
Gneiss	$P_{max}$	0.9174	0.8330	0.7263	0.8084	0.8055	0.7378	0.80
	$K_D$	0.9349	0.8479	0.7760	0.8701	0.7925	0.8289	0.84
Granite	$P_{max}$	0.6881	0.9380	0.9819	0.7681	0.8440	0.9332	0.86
	$K_D$	0.7667	0.9278	0.9694	0.8202	0.7512	0.9851	0.87
Mean		0.83	0.89	0.86	0.82	0.80	0.87	0.84

평균적으로 하중봉 직경 D와 r별로 보면 D=3cm 하중봉 하단을 r=0.5cm로 원형 처리한 경우가 가장 낮게 나타났고, 그 다음 D=4cm, r=0.5이고 r=1.0에서 가장 높게 나타났다. 특성치 별로 보면 최대하중보다는 변형강도  $K_D$ 가 소성변형 깊이(RD)와 동적안정도(DS) 모두에서 전반적으로  $R^2$  값이 높게 나타났다. 하지만 두 특성치의  $R^2$ 이 평균 0.82가 넘어 이 시험법이 소성변형 특성치인 소성변형 깊이나 동적안정도와 상관성이 큰 시험법임을 알 수 있다. 특히 변형강도의  $R^2$  평균은 0.85가 넘어 이는 단순히 가해진 힘만을 나타내는 변형하중 보다 혼합물의 소성변형을 보다 근사하게 추정할 수 있는 강도치임을 알 수 있다.

한편 1단계에서의 연구는 변형강도의 평균  $R^2$ 이 r=0.5인 경우 0.70, r=1.0인 경우 0.74 이하였던 점을 고려하면 이번 단계에서의 연구가 상관성을 높이는데 더 효과적이었던 것으로 판단된다. 하지만 아직 WT 시험 후 코어채취시 바퀴자국 근처의 다소 움기된 부분이 있어 결과에 영향을 미치는 것으로 보이므로 향후 실험에서는 이러한 문제점들을 보완해야 한다. 나아가 본 연구를 보다 발전시켜 다양한 혼합물과 다양한 재료에 대하여 일반화된 결과를 도출하고 타당성을 확인하는 연구를 수행해야 할 것이다. 그리고 동적안정도가 일정 수치 이상 또는 소성변형 깊이가 얼마 이하 되는 변형강도치를 추정하여 그것을 기준치로 삼는 연구 등도 수행이 가능할 것이다.

5. 결론

1. 본 연구 단계에서 개발한 시험방법으로 측정된 김테스트의 변형강도(Deformation strength:  $K_D$ )는 소성변형 침하 깊이 및 동적 안정도와와의 결정계수( $R^2$ )가 r=1cm 원형 절삭한 직경 4cm 하중봉을 사용할 경우 평균 0.88(최저 0.77, 최고 0.98) 이상을 보여 전단계( $R^2=0.75$ )에서 보다 상관성이 높은 시험법임을 확인하였다.



2. 변형강도는 이제까지 개발된 정하중 하에서의 특성치 중 소성변형 특성치와 가장 높은 상관성을 가지는 것으로 인식되어 향후 마찰안정도를 대체할 특성치로 활용할 수 있을 것이다. 그리고 소성변형 저항성이 어떤 수준 이상이 되도록 기준 변형강도치를 설정하는 연구 등도 가능할 것으로 보인다.
3. 원형절삭반경  $r$ 에 따른 상관성 분석결과  $K_D$ 의 경우  $D=3\text{cm}$ ,  $D=4\text{cm}$ 를  $r=0.5$ 로 원형 처리한 측정값에서도 상당히 높은  $R^2(0.83 \text{ 이상})$ 가 얻어져 원형 처리 반경 및 하중봉 직경도 신중하게 결정해야 할 것으로 나타났다. 특히 봉의 굵기와 원형 절삭은 혼합물의 연경도에 따른 수직 변형에 예민하기 때문에 향후 보다 여러 종류의  $r$ 에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.
4. 개발된 실험 방법은 기존의 마찰시험기를 그대로 사용하고 또한 공시제도 기존의 방법대로 제조 및 처리토록 하므로 향후 계속적인 연구를 통해 시험법을 표준화한다면 적용이 빠르고 실용화 가능성이 매우 클 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교부설 석재복합신소재연구센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## 6. 참고문헌

1. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002) "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발," 석재연 논문집, 제 7 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터.
2. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순제 (2000), "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계구명," 석재연 논문집, 제 5 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, pp.63-74.
3. 이상범, (2001), "아스팔트 혼합물의 공극 및 강도 특성을 이용한 소성변형 추정 연구", 강원대학교 대학원 박사학위논문
4. Kim, K. W. and Burati, J. L., (1988), "Probabilistic Approach for Evaluating Critical Tensile Strength of Bituminous Surface Course," Transportation Research Record 1171, TRB, Washington, DC.
5. Kim, K. W., Burati, J. L. and Amirkhanian, S. N, (1993), "Relation of HP-GPC profile with mechanical properties of AC mixture," ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, No. 4, ASCE Materials Engineering Div.