

실험오차를 최소화한 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형의 상관성 연구

Correlation Analysis between Deformation Strength and Rut Parameters of Asphalt Concrete with Minimized Experimental Error

김광우* · 최선주** · 권오선** · 이순재***

Kim, Kwang-Woo · Choi, Sun-Ju · Kwon, Ou-Sun · Lee, Soon-Jae

1. 서론

정하중 하에서 측정된 아스팔트 혼합물의 특성치는 모두 소성변형과 상관성이 낮아 조기 소성변형이 우려될 경우 배합설계 후 해당 혼합물에 대해 별도의 소성변형 측정 실험을 수행해야 한다. 비록 회복탄성계수 시험이 있기는 하지만 이는 동하중이고 시험방법이 쉽지 않아 국내의 경우 특정기관을 제외하고는 거의 실험을 못한다. 따라서 최적 아스팔트함량으로 제조된 혼합물로 포설한 도로포장에서 소성변형이 많이 발생하고 있다 (Kim 등 1988, 이상범 2001). 이러한 실정을 감안하여 김광우 등(2002)은 다양한 종류의 아스팔트 혼합물을 사용하여 소성변형 저항성과의 상관성이 높은 방법을 찾고자 Kim test를 개발하여 현재 적용 연구를 하고 있다. 본 논문은 개발된 김테스트에 의한 변형강도(變形強度; Deformation strength; K_D)를 구하는데 있어서 前 단계에서의 문제점을 보완하고 발생하는 실험오차를 최소화하기 위한 3단계 연구결과를 제시하였다. 즉, 현재까지 본 연구는 3단계가 진행되었으며 1, 2 단계에서는 각각 실험방법상에 피할 수 없는 오차가 발생할 소지를 알고있어 3단계에서는 이를 개선하고자 새로운 방법으로 시험을 수행하였다.

변형강도는 시험방법이 마샬 시험법과 유사하나 하중 재하 메커니즘을 달리하여 실제 소성변형과 유사하게 혼합물에 손상이 발생하게 함으로써 현재까지 소성변형 특성치와 높은 상관성이 있는 변수임을 확인할 수 있었다. 이 방법에 대한 상세한 내용은 1, 2단계 결과를 수록한 문헌(김광우 등 2002a,b,c,d)에 상세히 소개되어있다. 본 연구의 목적은 변형강도가 다양한 혼합물의 소성변형 특성과 어느 정도 밀접한 관계를 가지는지를 확인함에 있어서 실험오차를 최소화하기 위해 고안한 3단계의 실험 방법이 얼마나 더 효과적인지를 결정계수(R^2)를 통하여 구체적으로 제시하는 것이다.

2. KIM TEST

마샬안정도는 공시체를 축 방향으로 다져놓고 하중은 옆 방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장에서 골재가 배열되어 있는 방향과 다르게 하중이 작용할 뿐만 아니라 파괴시 변형의 형태도 어떤 종류의 현장 포장 파손형태와 다른 시험방법이다. 따라서 본 시험에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 가해진 하중에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 반복주행(Wheel tracking) 시험에서와 같은 60℃에서 수행하고 그림 1과 같은 장치를 통해 수직으로 하중을 가하도록 하였다. 하중봉 직경과 원형절삭 반경비 (r/D)는 0.25가 가장 우수한 결과를 나타내므로(김광우 등 2002a,b) $D=3\text{cm}$ 에는 $r=7.5\text{mm}$ 의, $D=4\text{cm}$ 에는 $r=10\text{mm}$ 의 원형절삭을 하였다. 그리고 이 하중봉을 편심 없이 수직으로 재하하기 위하여 그림 1에서와 같은 물드를 개발하고 이를 김테스터(Kim tester)라 명명하고 이 시험법을 김테스트라 하였다. 변형강도의 계산은 반경 r 만큼 원형절삭 한 직경 D 의 하중봉이 바닥으로부터 y 만큼 아스팔트 콘크리트에 눌러 들어갈 경우의 최대하중(P)과 그때의 변형(y)을 구하여 식 (1)로 계산한다. Figure 2는 이를 마샬안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 안정도나 간접인장강도 측정시와 유사한 곡선이 얻어진다.

$$K_D = \frac{4P}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \text{ ----- (1)}$$

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)

** 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284

*** 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-7283

여기서 P = maximum deformation load (kgf), D = diameter of loading head (cm), r = radius of round cut (cm), y = vertical deformation (cm) 이고 K_D 의 단위는 kgf/cm^2 이다.

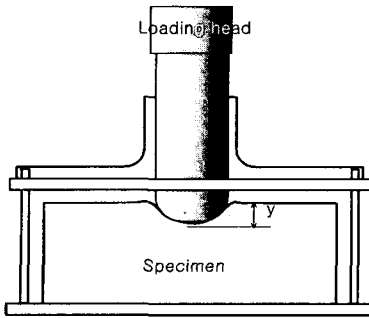


Figure 1. Schematic of Kim tester and its loading mechanism

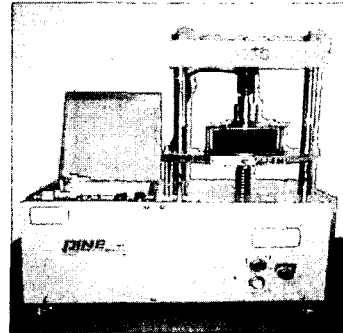


Figure 2. Kim tester setting on Marshall press

3. 사용재료

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 널리 사용되고 있는 AC 80-100 및 AC 60-80 이다. 골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 굵은골재 최대 치수는 19mm로 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질시험을 수행하고, 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 폴리머는 LDPE(Low-density polyethylene), SBS (Styrene-butadiene-styrene), SBR (Styrene-butadiene-rubber)이고 상품화된 슈퍼페브 등급 아스팔트로 PG 76-22을 사용하였다. 아스팔트 양의 중량비로 LDPE는 4%, 6%, SBS는 3%, 5% 비율로 AC 80-100 아스팔트에 혼합하여 개질 아스팔트를 제조하였고 PG 76-22는 국내산 제품을 사용하였다. 또한 고무 수지계인 SBR은 아스팔트 양에 7%를 사용하였다.

4. 시험방법

본 연구에서는 두 종류 골재, 7 종류 바인더를 첨가한 혼합물의 배합설계를 통해 각각의 최적아스팔트함량(OAC)을 결정하였다. Table 1은 사용된 각종 혼합물에 대한 설명이다. 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 305mm×305mm×60mm의 슬래브 공시체를 공극률 $4\pm 0.5\%$ 로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 시험온도 60°C에서 6시간 이상 저장 후 반복주행 시험에 사용되었다. 반복주행시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 52mm로 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 윤하중 압력은 100psi, 주행속도 0.5Hz, 1회 주행거리 는 200mm이며 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 변형량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 1, 2 단계 연구결과 요약 및 3단계 개요

1단계의 실험은 10cm 마살공시체와 15cm 자이레토리 공시체를 제작하여 김테스트를 수행하고 같은 혼합물로 슬래브 공시체를 제조하여 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험을 수행하고 두 결과의 상관성을 구하였다. 그 결과 하중봉의 직경(D)과 원형절삭 반경(r)이 결과에 유의차를 주는 변수로 확인되었고, 공시체 직경(S)은 유의차가 없었다. 즉, $r=0$ 보다는 $r=0.5$ 와 1.0cm가 R^2 이 월등히 높게 나와 2단계부터 $r=0$ 은 제외하고 $r=0.75\text{cm}$ 를 새로이 추가하였고, 공시체 직경 10, 15cm 간에는 차이가 없어 2단계부터는 10cm만 사용하였다. 소성변형과의 상관성에서는 변형강도(K_D)와 변형하중(P)이 가장 높게 나타났다.



Table 1. Designation of mixtures

Designation	Description of mixture
AD00	Gneiss(A) agg. dense(D)-graded AC 60-80 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.
ADR7	A agg. D graded AC80-100 with SBR 7% mix.
ADPG	A agg. D graded PG76-22 mix.
B000	Granite(B) agg. dense(D)-graded AC 60-80 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.
BDR7	B agg. D graded AC80-100 with SBR 7% mix.
BDPG	B agg. D graded PG76-22 mix.

1단계에서 K_D 의 R^2 은 평균 0.72가 나와 마찰안정도 등과 비교해서 상관성이 매우 높은 강도치임을 발견하고 2단계 실험을 착수하였다. 2 단계에서는 슬래브 공시체의 중앙을 따라 반복주행시험 후 그 궤적(wheel path: WP)의 양옆에서 직경 10cm 코어를 2개씩 모두 4개를 채취하여 변형강도를 측정하였다. 따라서 하나의 슬래브 공시체로부터 채취한 4개 코어 공시체에 대한 김테스트 결과와 WT 시험 결과를 가지고 상관성을 분석하였기 때문에 1단계 보다 확실히 상관성 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 그 결과 Table 2와 같이 K_D 의 R^2 은 약 0.9이상이어서 이 시험방법이 소성변형 특성치인 소성변형 깊이나 동적안정도와 상관성이 매우 큰 시험법임을 알 수 있었다.

변형강도와 소성변형 특성과의 R^2 평균이 이렇게 높다는 것은 이 강도치가 단순히 가해진 힘을 면적으로 나누는 일반 강도보다 혼합물의 소성변형을 보다 근사하게 추정할 수 있는 특성치임을 의미한다. 그러나 2 단계에서는 WT시험시 DR(Depth of rut)이 1cm 이상일 경우 WP 근처가 용기되어 K_D 용 코어면이 고르지 못하여 변형강도에 영향을 미치는 것으로 판단되어서 이를 개선하기 위해 새로운 방법인 3단계 시험을 수행하였다.

Table 2 . R^2 between Kim test variables and rutting parameters for 2 phase

Kim test	$\bar{x}_{K_D} = 0.9018, \bar{x}_P = 0.8972$
Rut	$\bar{x}_{DR} = 0.9424, \bar{x}_{DS} = 0.8565$
Kim test · rut	$\bar{x}_{P \cdot DR} = 0.9344, \bar{x}_{P \cdot DS} = 0.8599, \bar{x}_{K_D \cdot DR} = 0.9505, \bar{x}_{K_D \cdot DS} = 0.8530$
D	$\bar{x}_{D=3} = 0.8971, \bar{x}_{D=4} = 0.9018$
$D(r)$	$\bar{x}_{3(0.5)} = 0.8612, \bar{x}_{3(0.75)} = 0.9330, \bar{x}_{4(0.5)} = 0.8810, \bar{x}_{4(1.0)} = 0.9226$

5.2 3단계 시험

3단계 시험에서는 2단계 방법과는 약간 달리하여 슬래브 공시체를 반으로 잘랐다. 한쪽에서는 Figure 3과 같이 직경 10cm 코어를 2개 채취하여 25°C에서 24시간 양생 후 김테스트에 사용하였고, 다른 한쪽은 WT 시험에 사용하였다. 이 방법은 1, 2단계에서 생긴 문제를 해결할 수 있고, 실험시간을 줄일 수 있는 이점이 있다. Table 3~4는 Kim tester로 측정한 최대하중(P), 수직변위(y), 변형강도(K_D) 치를 나타내고 있다. 2가지 하중봉으로 시험하여 얻어진 각 조합마다의 Kim test 값은 코어에서 채취한 2개 공시체의 평균값이다. 하중봉 직경을 구분한 이유는 봉에 따라 다소 차이가 나타나므로 두 봉의 결과를 비교하기 위해서이다. 혼합물의 종류에 따라 각 값들이 차이가 나타나며 K_D 값은 r과 y에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

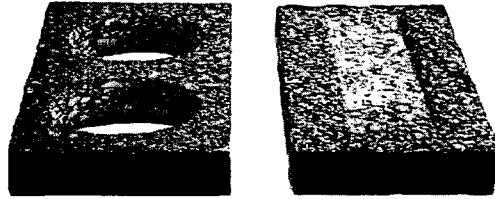


Figure 3. A photograph showing 2 pieces of slab after coring and wheel Tracking in 3rd phase.

Table 3. Kim-test and wheel tracking test results for D=3cm, r=0.75cm for phase 3

Mixture	P (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Depth of Rut (DR: mm)	Dynamic stability (DS: cycle/mm)
ADOO	152	0.280	27.18	16.96	473
ADR7	136	0.310	23.51	20.18	480
ADL4	187	0.310	32.32	14.45	556
ADL6	208	0.370	33.96	12.47	885
ADS3	193	0.360	31.78	10.94	801
ADS5	242	0.390	38.88	5.74	1,420
ADPG	295	0.380	47.77	3.73	4,113
BDOO	222	0.340	37.23	13.91	720
BDR7	216	0.370	35.27	14.38	564
BDL4	227	0.360	37.38	8.76	821
BDL6	280	-	-	6.87	835
BDS3	227	0.350	37.72	9.23	869
BDS5	228	0.260	41.81	7.79	1,420
BDPG	306	0.380	49.55	3.83	2,810

Table 4. Kim-test and wheel tracking test results for D=4cm, r=1.0cm for phase 3

Mixture	P (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Depth of Rut (DR: mm)	Dynamic stability (DS: cycle/mm)
ADOO	159	0.23	18.79	14.89	402
ADR7	143	0.27	16.17	15.07	581
ADL4	186	0.29	20.52	9.37	899
ADL6	204	0.28	22.78	5.86	1,982
ADS3	176	0.27	19.68	13.23	645
ADS5	193	0.28	21.32	9.23	1,200
ADPG	216	0.20	26.87	3.20	3,271
BDOO	216	0.35	22.12	13.85	638
BDR7	196	0.39	19.51	14.53	611
BDL4	250	0.26	25.58	7.86	1,385
BDL6	284	0.31	30.44	4.52	2,333
BDS3	216	0.28	23.86	9.13	793
BDS5	267	0.29	29.14	5.45	1,720
BDPG	295	0.30	32.12	3.91	2,871

5.3 상관성 연구

3단계에서는 1, 2 단계 실험을 통하여 소성변형과의 상관성 향상에 문제점으로 제시되었던 부분을 보완하여 실험을 하였다. 이번 회귀분석에서도 기존 실험에서 사용한 4가지 변수(공시체, 붕직경, r 및 골재)별로 분류하였고 독립변수로는 K_D 를 사용하였다. 종속변수는 전 단계의 실험과 마찬가지로 반복주행시험에서 얻



어지는 소성변형 특성치(rut parameter)인 최종 침하깊이(DR)와 동적안정도(DS)이다. 회귀분석 방법으로는 DR 또는 DS를 종속변수로 하여 상기 각 특성별로 전 단계서와 마찬가지로 5가지 회귀분석을 통해 결정계수(Coefficient of determination ; R^2)가 가장 높은 모델을 선정하였다.

Table 5는 각 골재별, 하중봉 D(r)별로, DR, DS와 K_D 에 대한 회귀분석에서 나타나는 결정계수를 기록한 것이다. 전체적으로 R^2 는 0.94이상으로 나타나 K_D 는 DR이나 DS와 상관관계가 대단히 높은변수임을 알 수 있다. 하중봉 직경 별로 보면 D=4cm 하중봉을 사용한 것이 D=3cm보다 훨씬 높고, 2단계보다도 훨씬 높아 0.96에 가까웠다. DR과 DS를 구분해보면 DS의 R^2 이 훨씬 높은데 이는 K_D 로 DS를 추정하는 것이 상관관계가 보다 더 좋다는 의미이며, 특히 이렇게 큰 차이가나는 것은 3(0.75) 봉에서 차이가 큰 것에 기인한다.

3단계에서는 모두 $r/D=0.25$ 인 봉만을 사용하였는데 이는 전단계에서 가장 결정계수가 높게 나타난 봉이었기 때문에 이것만을 택한 것이다. 따라서 향후 더 연구가 진행되겠지만 하중봉 제조는 이 비율을 적용하는 것이 가장 적합할 것이라는 점에 신빙성을 더해주는 결과라고 볼 수 있다.

Table 5. Coefficient of determination (R^2) between K_D and rut parameters

Classification		R^2 for DR		R^2 for DS		Mean
		3(0.75)	4(1.0)	3(0.75)	4(1.0)	
Aggregate	Gneiss	0.9328	0.9204	0.9227	0.9580	0.9118
	Granite	0.8871	0.9768	0.9787	0.9750	0.9066
	Mean	0.9099	0.9486	0.9507	0.9665	0.9439
Variable	Rut parameter	$\bar{x}_{DR} = 0.9292, \bar{x}_{DS} = 0.9586$				
	D	$\bar{x}_{D=3} = 0.9303, \bar{x}_{D=4} = 0.9576$				

Figure 4, 5는 각 소성변형 특성과 K_D 와의 관계를 회귀분석하여 얻어진 결과의 그래프를 R^2 값과 함께 골재별로 하중봉의 종류에 따라 보여주고 있다. 변형강도가 높아지면 혼합물의 DR은 낮아지고, 반면에 DS는 커지는 경향을 보인다. 하지만 골재별로 그 경향이 다소 다르며 각 변수별로 최고 R^2 를 얻은 회귀분석모델은 다르지만 R^2 는 0.89~0.98로 매우 높았다. 그림에서 보이지는 않지만 이때 회귀 방정식은 2차 함수, 로그 함수, x의 누승 모델 등 다양하였다. 일반적으로 마찰 안정도와 소성변형과의 상관성 R^2 은 0.26이하로 나타나는데 반해, 김테스트 본 연구에서는 R^2 값이 평균 0.94 이상(Table 5)으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 K_D 는 아스팔트의 소성변형과의 상관성이 매우 높다는 것을 알 수 있었다.

특히 2단계에서의 실험시 문제가 되었던 WT 후의 바퀴자국 옆의 용기 문제를 해결하고 하중봉의 r/D 비율을 0.25만을 사용함으로써 더 높은 상관성을 얻었다. 즉, 그간 실험에 수반되어오던 오차를 최소화하여 매우 높은 상관성을 얻을 수 있었으며, 이는 비교적 분산이 큰 건설재료 분야의 연구에서 본다면 대단히 높은 값을 알 수 있다. 하지만 Kim test 결과는 모두 2개 공시체의 평균값으로 최소한 3개를 확보하기 위한 보완 방안 연구가 이루어져야할 것이다.

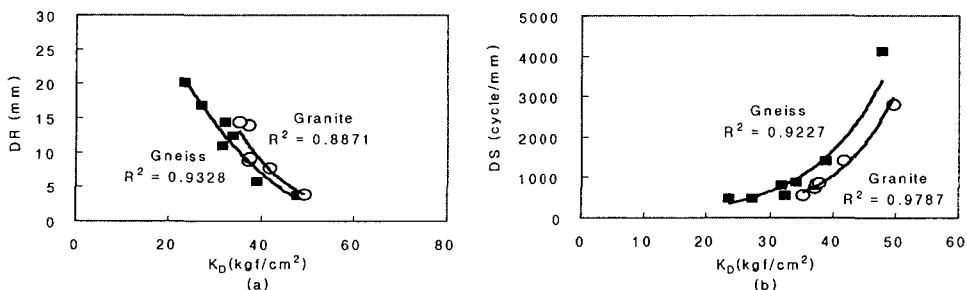


Figure 4. Relationships of (a) DR vs. K_D and (b) DS vs. K_D by aggregate using loading head 3(0.75)

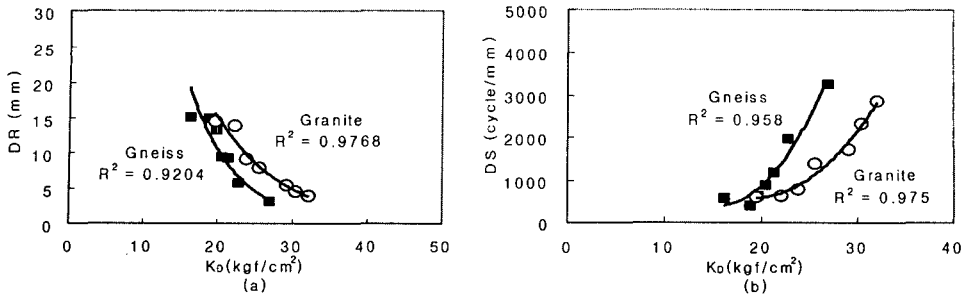


Figure 5. Relationships of (a) DR vs. K_D and (b) DS vs. K_D by aggregate using loading head 4(1.0)

6. 결론

1. 본 연구에서 측정한 김테스트의 K_D 는 소성변형 침하 깊이(DR) 및 동적 안정도(DS)와의 결정계수(R^2)가 $r=1\text{cm}$ 원형 절삭한 직경 4cm 하중봉 4(1.0)을 사용할 경우 평균 0.96 이상을 보여 상관성이 높은 시험법임을 확인하였다.
2. 변형강도는 이제까지 개발된 정하중 하에서의 특성치 중 소성변형 특성치와 가장 높은 상관성을 가지는 것으로 인식되어 향후 아스팔트 콘크리트의 대표적인 특성치로 활용할 수 있을 것이다.
3. 원형절삭반경 r 에 따른 상관성 분석결과 K_D 의 경우 4(1.0)이외의 하중봉에서도 상당히 높은 R^2 가 얻어져 원형 처리 반경 및 하중봉 직경도 신중하게 결정해야 할 것으로 나타났다.
4. 지금까지 실험에서는 한가지 골재의 입도를 사용하였으므로 향후 밀입도와 겹입도 등에 다양한 재료에 대한 연구와 하중재하 속도, 시험온도 등의 시험 변수에 대한 연구도 수반되어 모든 조건에서도 소성변형 특성치와 높은 상관관계를 보이는지를 지속적으로 확인해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애(1997). "폴리머(LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성" 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄논문집, 강원대학교 석재복합 신소재센터, pp. 251-271
2. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제(2002a). "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발" 석재연 논문집, 제 3집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터. pp. 73-90
3. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제(2002b). "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치변수 분석" 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 41-52
4. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주(2002c). "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구" 한국 도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 23-39
5. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주(2002d). "소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도 측정법의 개발" 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집. pp. 67-74
6. 이상범(2001). "아스팔트 혼합물의 공극 및 강도 특성을 이용한 소성변형 추정 연구", 강원대학교 대학원 박사학위논문