

공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향

Specimen Size Effect in Estimation of Rut Resistance based on Deformation Strength

이 문 섭* 최 선 주** 도 영 수*** 김 광 우****
 Lee, Moon-Sup Choi, Sun-Ju Doh, Young-Soo Kim, Kwang-Woo

Abstract

This study dealt with size effect of specimen in measuring deformation strength and estimating rut resistance of asphalt concretes under static loading using Kim test. Two aggregates, a normal asphalt (pen 60-80) and 6 polymer-modified asphalt (PMA) binders were used for preparation of 14 dense-graded mixtures. Mixtures were prepared based on optimum asphalt content by Marshall compactor (S = 10cm) and gyratory compactor (S = 15cm) for Kim test and for wheel tracking test. In statistical analysis by general linear model (GLM) procedure of SAS, the diameter of specimen was found not to be a significant factor that affect the Kim test result. Therefore, it was found that either 10cm-diameter or 15cm-diameter of specimen gave no significant difference in deformation strength (K_D) values in Kim test for any aggregate mixture. However, the thickness of specimen was found to be a significant factor in determining K_D . It is estimated that K_D is a function of y , vertical deformation, and y has something to do with thickness of specimen. Therefore, it is suggested that the thickness of specimen should not be higher than 6.6cm, and the correction factor depending on the thickness value should be developed in the future study.

Keywords : Kim test, K_D , wheel tracking, rut resistance, thickness

요 지

본 논문은 정하중하에서 김테스트를 사용하여 아스팔트 콘크리트의 소성변형과 변형강도가 공시체에 크기에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 2가지 골재(편마암, 화강암)와 6가지 아스팔트를 사용하여 총14개의 밀입도 혼합물을 사용하였다. 마샬 배합설계를 통해 최적아스팔트 함량을 구하고 결정된 최적아스팔트 함량으로 마샬공시체(S=10cm)와 자이레토리 공시체(S=15cm)를 제작하여 마샬안정도시험, 휠트래킹시험, 개발된 김테스트(Kim test)를 수행하였다. SAS 분석을 통하여 공시체의 지름이 김테스트의 결과에 중요한 변수가 아닌 것을 알았으나 공시체의 두께는

* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 도시시설연구그룹 연구원
 ** 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 공학석사
 *** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 책임연구원
 **** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수

K_D 에 주용한 변수가 되는 것을 알았다. K_D 값에 y 값이 사용되어 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 공시체의 두께를 6.6cm 이상으로 제작하여 김테스트에 적용 할 때에는 마샬안정도에서와 같이 y 값에 따른 보정계수를 사용하거나 시험시 6.6cm 미만으로 제작하여야 할 것이다. 향후 보정계수 사용에 관한 연구도 가능할것으로 판단된다.

핵심용어 : 김테스트, 변형강도, 휠트래킹, 소성변형, 두께

1. 서론

국내 뿐 아니라 많은 국가에서 아스팔트 혼합물 배합설계 특성치 중 한가지로 마샬안정도를 사용하고 있다. 이 특성치는 시험장치가 간단하고 측정하기 쉽지만 대부분의 혼합물이 기준치를 모두 만족하고있어 무의미한 경우가 많고 공용성과 관련된 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 공사 담당기관의 안정도 기준을 크게 상회하는 배합으로 제조한 혼합물에서도 소성변형이 많이 발생하고 있다. 특히 마샬 안정도는 같은 개질 재료 함량을 달리하여 제조한 같은 골재 입도의 아스팔트 혼합물에서도 그 값의 차이가 별로 나타나지 않는다(이상범, 2001).

소성변형을 제어하기 위해 외국의 경우 수퍼페이브 배합설계, 휠트래킹시험, 회복탄성계수시험, 정적, 동적 크리프시험을 통하여 많은 연구를 수행하고 있다. 최근 국내에서는 소성변형 제어를 위하여 미국의 수퍼페이브 배합설계에 관심을 보이고 있지만 현장기술자들에게 적용되기까지는 시간이 걸릴 것으로 보이며 현재까지는 일부 대학 및 연구기관에서 연구용으로만 적용되고 있다. 그리고 이 배합설계법의 적용은 국내뿐만이 아니라 미국을 제외한 유럽 및 일본 등지에서도 활발하지 않은 상태이다. 특히 이 방법의 최적아스팔트 함량의 결정에는 어떠한 역학적 특성치의 측정도 포함되어있지 않고 모두 혼합물의 용적 특성(volumetric property)으로만 이루어져 최적아스팔트 함량으로 제조된 혼합물에 대한 어떠한 강도특성도 알 수가 없다.

이러한 실정을 감안하여 김광우 등(2002)은 김테스트를 개발하여 현재 적용 실험을 하고 있다. 이는 최대하중(P)과 변형값(y)을 이용하여 변형강도(K_D)라는 특성치를 구하는데 이 값이 소성변형 특성치와의 상관관계가 매우 높아 향후 소성변형을 추정할 수 있는 강도치로 사용하기 위한 적용성을 검토하고 있는 시험법이다. 본 논문은 김테스트의 K_D 나 P값을 이용한 소성변형 추정에 공시체의 치수변수인 직경과 두께가 미치는 영향을 분석하는데 목적을 두고 있다.

이를 위해 본 연구에서는 직경 10cm 마샬공시체와 직경 15cm Gyrotory 공시체를 제조하여 김테스트를 수행하고 같은 재료에 대하여 수행한 반복주행(wheel tracking)시험 결과와의 상관성 분석에 공시체 직경 및 두께의 영향을 분석하여 적정 치수를 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 아스팔트 및 골재

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 우리나라에서 널리 이용되고 있는 AC 80-100, AC 60-80를 사용하였다. 골재는 전국적으로 비교적 분포가 많고 성능이 좋은 편암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 골재는 치수별로 19mm 굵은 골재, 잔골재, 채움재(mineral filler)를 사용하였다.

이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험을 수행하였으며 비중 및 흡수율, 마모율 등이 규정 내에 만족하였다. 또한 굵은골재 최대치수를 19mm로 하고 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다.

2.2 폴리머

본 연구에서는 국내에서 생산되는 여러 종류의 폴리머 가운데 그간의 선행 연구(김광우 등 1997, 2000)에서 사용되어온 분말형태의 LDPE (Low-Density Polyethylene)와 SBS (Styrene-Butadiene-Styrene)와 액상(Latex)의 SBR (Styrene-Butadiene-Rubber)을 사용하였다. 분말재료는 실험실에서 함량별로 고성능 전단믹서로 AC 80-100에 첨가하여 폴리머 개질 아스팔트 (Polymer-Modified Asphalt : PMA)를 제조하여 사용하였으며 SBS는 실험실에서 제조한 것 외에 PG 76-22로 상품화된 것도 사용하였다. 또한 SBR은 고무 수지계 제품으로서 혼합형 유화제를 사용하였고, 이는 23.5%의 스티렌 함량을 가진 Cold Eulsion SBR이다. 이는 일반적으로 SBR Latex라 칭하며, 본 연구에서는 골재와 아스팔트 혼합시에 첨가하여 사용하였다.

2.3 배합설계

본 연구에서는 일반 아스팔트(AC 60-80)와 6종류 PMA (LDPE 4%, LDPE 6%, SBS 3%, SBS 5%, SBR 7%, PG 76-22)를 두 종류 골재(편마암, 화강암)와 혼합하여 14가지 혼합물을 제조하였다. 마찰 배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적아스

팔트 함량은 본 시험용 공시체 제작의 아스팔트 함량으로 이용하였다. 각 혼합물별 명칭과 내역은 표 1과 같다.

AD500 과 BD500 혼합물은 각각 편마암과 화강암 골재와 일반 AP-5로 제조한 무개질(일반) 혼합물이고 나머지들은 모두 AP-3를 제시된 폴리머별 함량으로 제조한 PMA로 개질한 혼합물들이다.

공시체는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마찰식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 일반 아스팔트 혼합물 다짐온도 (135~145℃)보다 약 10℃ 높게 폴리머 개질 아스팔트 혼합물 다짐온도를 145~155℃로 유지하면서 마찰다짐기를 이용하여 공시체의 양면을 각각 50회씩 다짐하여 직경 100mm의 공시체를 제작하여 실험하였다.

직경 100mm 공시체와 비교실험을 하기 위하여 선회다짐기(gyratory compactor)로 직경 150mm 공시체를 만들었다. 선회다짐기로 배합설계를 하였을 경우 최적 아스팔트함량은 마찰 다짐보다 약 0.2~0.5% 낮게 나온다. 그러므로 마찰다짐과 같

표 1. Designation of Mixtures

Designation	Description of mixture
AD50	Gneiss(A) agg. dense(D)-graded AC 60-80 mix.
AD3R7	A agg. D graded AC 80-100 with SBR 7% mix.
AD3L4	A agg. D graded AC 80-100 with LDPE 4% mix.
AD3L6	A agg. D graded AC 80-100 with LDPE 6% mix.
AD3S3	A agg. D graded AC 80-100 with SBS 3% mix.
AD3S5	A agg. D graded AC 80-100 with SBS 5% mix.
ADG76	A agg. D graded PG76-22 mix.
BD50	Granite(B) agg. dense(D)-graded AC 60-80 mix.
BD3R7	A agg. D graded AC 80-100 with SBR 7% mix.
BD3L4	B agg. D graded AC 80-100 with LDPE 4% mix.
BD3L6	B agg. D graded AC 80-100 with LDPE 6% mix.
BD3S3	B agg. D graded AC 80-100 with SBS 3% mix.
BD3S5	B agg. D graded AC 80-100 with SBS 5% mix.
BDG76	B agg. D graded PG76-22 mix.

은 최적아스팔트 함량을 맞추기 위하여 횡수를 미국 Superpave Level 1 배합설계에 나와 있는 평균 설계 대기온도(고온) 39℃ 이하의 값을 사용하지 않고, 다짐횡수를 조정하여 최적 아스팔트 함량이 일치하고 공극이 4%에 맞는 다짐 횡수를 찾았다. 예비실험결과 44회가 적합한 것으로 선정되었다. 모든 혼합물에 선회다짐횡수를 44회로 하였을 경우 마찰방법과 같은 최적 아스팔트 함량과 공극에 4±0.5%에서 일치하여 실험에 적용하였다.

2.4. 김테스트

마찰 안정도의 재하 메커니즘은 실제 현장에서의 재하 형식과 다르게 공시체를 축 방향으로 다져놓고 하중은 옆 방향에서 가한다. 따라서 이 축정치는 현장 혼합물의 진정한 하중 저항성과 다르므로 본 시험에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가한다. 그리고 재하에 의해 혼합물이 소성변형과 유사하게 압밀·전단을 의한 변형이 유발되도록 바닥이 볼록하게 원형 절삭된 하중봉(그림 1)을 사용하였다. 이는 접촉면이 원형인 타이어로 정하중을 가하는 것을 모사하기 위한 것이다.

아스팔트 혼합물의 소성변형은 바퀴에 눌리는 부분만이 국부적으로 침하되는 현상이므로 재료의 지

압강도와 관련이 있다. 탄성재료인 콘크리트 같은 경우 가해진 윤하중에 의해 포장 단면에 휨이 유발되며 슬래브 단면의 휨 강도로 이를 버틴다. 하지만 고온에서 아스팔트 포장에는 윤하중이 작용하는 부분에만 압밀과 전단을 유발하는 일종의 국부 응력이 발생한다. 이에 본 연구에서는 공시체를 60℃로 가열하여 하중봉이 닿는 부분만이 국부적인 압력을 받아 변형되며 일정깊이 이상 변형이 커지면 썩기 현상에 의해 공시체가 파괴되도록 하였다.

실제포장에서는 포장체가 측방향으로 무한대로 전개되어있어 썩기효과에 의한 파괴는 발생하지 않는다. 그러므로 썩기현상에 의한 파괴를 방지하기 위하여 공시체에 테두리 등을 설치해 측방향 구속을 주면 썩기파괴는 없으나 정하중 하에서 하중변형 곡선에 정점이 나타나지 않는다. 따라서 정하중 하에서 측 방향을 구속한 강도 특성치는 구하기가 어렵고 재료별 특성을 파악하기도 어렵다.

따라서 본 연구에서는 공시체를 측 방향 구속이 없이 사용하고 파괴직전까지의 수직변형과 그때 하중봉의 접지 면적 및 하중으로 국부응력을 구하고 이를 그 부분의 변형에 대한 저항성으로 보고 변형강도(K_D)라 명명했다. 이는 일종의 지압강도와 유사한 성질로 그 부분의 변형에 대한 저항성이 강해 같은 하중하에서 변형이 작게 나타날수록 높은 측정치를 얻도록 계산된다. 재하시 그림 2와 같은 장치를 통해 하중봉이 수직으로 침하되도록 물드를 개발하고 이를 김 테스트, 이 시험법을 김테스트라 명명하였다(김광우 등, 2002).

그림 1과 같이 직경 D인 봉의 하단을 반경 r만큼 원형절삭하고 하중에 의해 바닥으로부터 y만큼 하중봉이 눌러 들어갈 경우를 고려하자. 그 깊이에서 하중봉이 혼합물 표면과 이루는 원의 직경은 그림에서와 같이 $(H+2x)$ 이고, 이때 원의 면적은 $A=\pi(H+2x)^2/4$ 이다. 일반식 $\sigma=P/A$ 에 이 원의 면적을 대입하고 σ 를 변형강도 (deformation strength; K_D)로 대치하여 정리하면 $K_D=4P/[\pi(H+2x)^2]$ 이며 이때 x를 r과 y의 함수로 정리하면 식 (1)을 얻

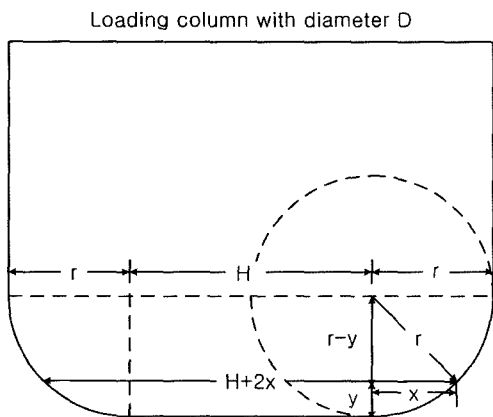


그림 1. Configuration of roundcut and details of a loading head

계 되며 이를 이용하여 변형강도를 구한다.

$$K_D = \frac{40P}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \quad (1)$$

여기서 K_D = Deformation strength (kPa)
 P = Maximum load (N)
 D = Diameter of loading head (cm)
 r = radius of round cut (cm)
 y = vertical deformation (cm)

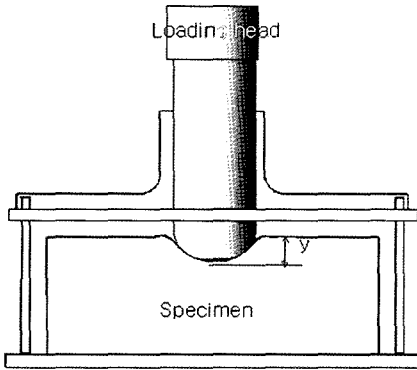


그림 2. Schematic of Kim test and its loading mechanism

김테스트 공시체를 넣고 마찰안정도 시험기를 통해 하중을 가해 얻어지는 하중-변형곡선은 그림 3과 같으며 여기서 최대하중 P_{max} 와 이때 변형값 y 를 식 1의 P 와 y 에 대입하였다.

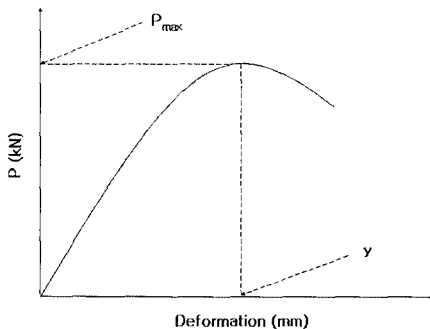


그림 3. A typical load-deformation curve from Kim test

본 연구에서는 기존 연구에서 변형강도의 특성을 보다 잘 나타내는 것으로 확인된 직경 3, 4cm 봉의 하단을 원형 절삭한 것을 사용하였다. 직경 $D=3\text{cm}$ 봉에는 $r=0.5\text{cm}$ 원형 절삭한 한가지 봉과 직경 $D=4\text{cm}$ 봉에는 $r=0.5$ 와 1.0cm 로 절삭한 2가지 봉 등 모두 3가지 하중봉을 사용하였다. 따라서 봉 3(0.5)는 전자를, 4(0.5), 4(1.0)은 각각 후자를 표현하는 방식을 사용하였다.

2.5. 휠트래킹시험

아스팔트 콘크리트의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험방법이 반복주행(Wheel tracking)시험이다. 본 연구에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 $305\text{mm} \times 305\text{mm} \times 70\text{mm}$ 의 슬래브 공시체를 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 반으로 잘라 시험온도 60°C 에서 6시간 이상 저장 후 반복주행 시험기로 시험을 수행하였다.

휠트래킹시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 53mm로 하였으며 바퀴의 반복주행(0.5Hz)에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 또한 강재와 아스팔트 콘크리트의 직접 접촉에 의한 골재의 파손 등을 방지하기 위하여 폴리프로필렌 부직포를 공시체 표면에 덮었다. 축 하중은 70 kgf, 1회 주행거리는 200mm로 하고 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 침하량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하고 최종 침하 깊이(depth of rut)와 동적안정도(dynamic stability)를 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 김테스트

그림 4는 각각 $S=10\text{cm}$ 와 15cm 의 파괴된 공시

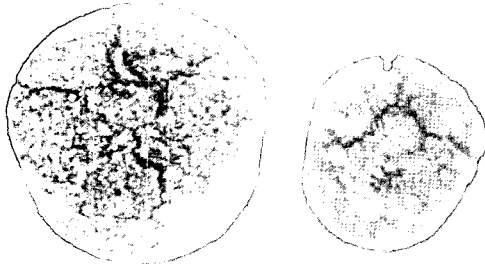


그림 4. Mode of failure for S=15cm and S=10cm specimens

체를 보여주고 있다. 하중을 가하였을 경우 쪼갬현상으로 파괴된 모습을 S=10cm 공시체에서 더 분명하게 확인할 수 있었다. 표 2~4는 김테스터로 측정된 최대하중(P), 변형(y), 변형강도(K_D)를 나타내고 있다. 혼합물의 종류에 따라 각 값들이 차이가 있으며 K_D 값은 r과 y에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다. PMA 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물보다 인장강도 및 소성변형 저항성이 높고 또한 같

은 폴리머에서는 함량에 따라 차이가 난다. 이점을 염두에 두고 김테스트 측정 결과치를 살펴보면 PMA 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 최대하중 및 변형강도가 높다는 것을 알 수 있다.

표 5는 김테스트에 사용한 혼합물에 대한 각각의 두께를 나타내고 있다. 현재 마찰안정도는 두께별로 각각의 보정계수를 두고 있다. 이는 공시체 두께가 안정도 값에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 본 연구에서 개발한 김테스트 시험결과에서도 공시체 두께와 P , K_D 값들에 어떤 유의차가 있는지를 알아 보기 위하여 분석을 수행하였다.

3.2 휠트래킹시험

슬래브 공시체를 제조하여 시험온도 60°C에서 70 kgf 하중 하에 왕복 횟수 5,400cycle로 실험하였으며 그 결과는 표 6과 같다. 휠트래킹시험 결과 얻어지는 최종침하 깊이 (Depth of rut: DR)와 동

표 2. Comparison of P and K_D between S=10cm and S=15 specimens (D=3cm)

Mixtures	P (kN)			K_D (kPa)		
	S = 10cm	S = 15cm	P ratio*	S=10cm	S=15cm	K_D ratio*
AD5O	2.84	3.26	1.15	4525.8	5059.3	1.12
AD3R7	2.04	2.85	1.40	3300.9	4397.3	1.33
AD3L4	2.76	4.22	1.53	4585.6	6783.3	1.48
AD3L6	2.48	4.49	1.81	4173.7	7111.8	1.70
AD3S3	2.49	3.93	1.58	4219.8	5838.9	1.38
AD3S5	3.08	4.12	1.34	5027.9	6763.6	1.35
ADG76	3.12	4.97	1.59	5064.2	7707.0	1.52
BD5O	3.30	2.48	0.75	5560.4	4003.1	0.72
BD3R7	2.90	2.27	0.78	4633.6	3684.4	0.80
BD3L4	3.81	3.78	0.99	6037.0	6121.3	1.01
BD3L6	4.02	4.00	1.00	6610.7	6561.6	0.99
BD3S3	3.88	4.11	1.06	6214.5	6196.8	1.00
BD3S5	4.05	3.50	0.86	6496.9	5554.5	0.85
BDG76	4.38	5.49	1.25	6850.9	7857.1	1.15
Mean			1.22			1.17

* Ratio = (P for S=15cm)/(P for S=10cm)

표 3. Comparison of P between S=10cm and S=15cm specimens (D=4cm)

Mixture types	P(kN) using 4(0.5) column for			P(kN) using 4(1.0) column for		
	S = 10cm	S = 15cm	P ratio*	S = 10cm	S = 15cm	P ratio*
AD500	4.59	4.16	0.91	3.68	3.68	1.00
AD3R7	3.00	4.21	1.41	2.93	3.17	1.08
AD3L4	5.20	6.04	1.16	3.78	4.97	1.31
AD3L6	6.78	5.32	0.78	5.64	5.04	0.89
AD3S3	4.89	4.30	0.88	4.52	4.17	0.92
AD3S5	6.81	5.45	0.80	5.39	4.73	0.88
ADG76	7.06	6.82	0.97	6.24	6.08	0.97
BD500	5.00	4.09	0.82	3.24	3.06	0.94
BD3R7	4.25	2.92	0.69	3.03	2.36	0.78
BD3L4	5.93	4.04	0.68	4.00	3.60	0.90
BD3L6	6.04	7.52	1.25	4.11	3.88	0.95
BD3S3	6.20	6.93	1.12	4.07	3.76	0.93
BD3S5	6.01	5.35	0.89	4.32	4.03	0.93
BDG76	6.54	7.49	1.15	4.66	5.66	1.21
Mean			0.96			0.99

* Ratio = (P for S=15cm)/(P for S=10cm)

표 4. Comparison of K_D (kPa) between S=10cm and S=15cm specimens (D=4cm)

Mixture types	K_D (kPa) using 4(0.5) column for			K_D (kPa) using 4(1.0) column for		
	S=10cm	S=15cm	K_D ratio*	S=10cm	S=15cm	K_D ratio*
AD500	4079.6	3481.4	0.85	4689.5	4217.8	0.90
AD3R7	2634.1	3500.0	1.33	3603.9	3814.8	1.06
AD3L4	4610.1	4920.0	1.07	4755.2	5944.8	1.25
AD3L6	6085.0	4466.0	0.73	7081.4	5850.6	0.83
AD3S3	4318.9	3655.9	0.85	5756.5	4742.5	0.82
AD3S5	5963.4	4507.1	0.76	6673.4	5704.5	0.85
ADG76	6271.4	5562.3	0.89	7915.0	6521.4	0.82
BD500	4484.6	3607.9	0.80	3970.7	3493.1	0.88
BD3R7	3839.3	2561.5	0.67	3751.0	2775.3	0.74
BD3L4	5191.6	3630.4	0.70	4760.1	4222.7	0.82
BD3L6	5413.3	6407.7	1.18	5028.9	4569.9	0.91
BD3S3	5487.8	5646.7	1.03	4816.0	4229.6	0.88
BD3S5	5242.6	4517.9	0.86	5362.3	4592.5	0.86
BDG76	5763.4	6019.3	1.04	5710.4	5700.6	1.05
Mean			0.91			0.91

* Ratio = (K_D for S=15cm)/(K_D for S=10cm)

표 5. Thickness of Kim test Specimens

Mixture types	S=10cm			S= 15cm		
	D=3cm	D=4cm		D=3cm	D=4cm	
	r=0.5cm	r=0.5cm	r=1.0cm	r=0.5cm	r=0.5cm	r=1.0cm
AD500	6.40	6.41	6.38	6.50	6.56	6.70
AD3R7	6.52	6.47	6.41	6.81	6.98	6.57
AD3L4	6.39	6.44	6.43	6.49	6.49	6.47
AD3L6	6.39	6.44	6.42	6.50	6.55	6.68
AD3S3	6.41	6.44	6.41	6.54	6.75	6.77
AD3S5	6.42	6.39	6.39	6.56	6.51	6.61
ADG76	6.48	6.49	6.40	6.46	6.46	6.50
Mean	6.43	6.44	6.41	6.55	6.61	6.62
BD500	6.36	6.23	6.21	6.63	6.70	6.67
BD3R7	6.15	6.13	6.21	6.58	6.68	6.57
BD3L4	6.25	6.25	6.20	6.61	6.70	6.64
BD3L6	6.16	6.20	6.20	6.63	6.65	6.63
BD3S3	6.13	6.20	6.09	6.14	6.51	6.46
BD3S5	6.13	6.33	6.27	6.52	6.49	6.62
BDG76	6.19	6.09	6.18	6.47	6.56	6.54
Mean	6.20	6.20	6.19	6.55	6.61	6.59

표 6. Marshall Stability final DR and DS of each mixture

Mixtures \ Property	Marshall stability (kgf)	Depth of rut (DR, mm)	Dynamic stability (DS, cycle/mm)
AD500	1,054	18.62	362
AD3R7	1,038	20.61	322
AD3L4	1,239	13.97	458
AD3L6	1,219	10.27	608
AD3S3	1,155	18.30	373
AD3S5	1,221	8.76	843
ADG76	1,257	3.73	2,837
BD500	1,245	20.72	245
BD3R7	1,197	23.22	211
BD3L4	1,177	14.79	436
BD3L6	1,394	3.76	1,946
BD3S3	1,104	11.16	636
BD3S5	1,008	6.59	1,344
BDG76	1,191	3.01	5,128

적 안정도 (Dynamic stability: DS)는 본 연구에서 개발한 김테스트 결과와 상관관계를 분석하는데 사용하였다.

3.3 상관성 분석

이제까지 실험 결과를 가지고 회귀분석을 수행하였으며 독립변수(X)는 김테스트의 P와 K_D 이며 종속변수(Y)는 휠트래킹시험의 최종 침하깊이(DR)와 동적 안정도(DS)이다. 회귀분석방법은 각각 침하 깊이(DR)와 동적안정도(DS)를 종속변수로 하여 각 특성별치로 선형(linear), 곡선(curvilinear), 대수(logarithm), 지수(exponential), x의 거듭승(power) 등 4가지 회귀분석을 통해 가장 R^2 이 높은 모델을 선정하였다. 기존의 한 연구결과에서 알려진 바에 의하면 표 7에서 보듯이 마찰특성치는 R^2 이 0.18을 넘지 못하고 있다(이상범, 2001).

표 8은 각 혼합물별로 공시체 크기, 골재, 하중부의 직경과 r에 따른 김테스트의 2가지 특성치와 소

성변형 침하 깊이와의 회귀분석에서 얻어진 결정계수 (coefficient of determination: R^2)를 보여준다. 마찬가지로 방법으로 상기 2가지 특성치와 동적 안정도와의 R^2 값을 표 9에서 보여준다.

표 8과 9에서 볼 수 있듯이 변형강도 K_D 와 최대 하중 P가 소성변형 깊이(DR)와 동적 안정도(DS)와의 회귀분석에서 전반적으로 R^2 값이 높게 나타났다. K_D 의 경우 DR과는 평균 약 0.84이상, DS와는 0.70이상을 보였고 또한 P는 DR와는 평균 약 0.82이상, DS와는 0.70이상을 보였다. 이는 마찰안정도와 비교하였을 경우 K_D 와 P가 소성변형과의 상관성이 매우 높은 특성치임을 의미한다.

그림 5, 6은 각 변수(P 및 K_D) 별로 표 8, 9중 상관성이 우수하게 나타난 대표적인 회귀분석 결과를 R^2 과 함께 보여주고 있다. 그 중에서도 K_D 에 의한 DR 추정 모델의 경우가 $R^2=0.97$ 이상으로 가장 상관성이 높았고 P 역시 DR추정 다항식 모델이 $R^2=0.92$ 이상이 얻어졌다.

표 7. Coefficient of determination(R^2) between Marshall Properties DR and DS

Property	Marshall Stability	Marshall Stability/Flow
DR	0.1136	0.1227
DS	0.0517	0.1709

표 8. Coefficient of determination(R^2) between Kim test variables and depth of rut

Specimen	Agg.	Property	R^2 for rut depth (DR)			Mean	Note
			D=3cm		D=4cm		
			r=0.5	r=0.5	r=1.0		
Marshall specimen S=10cm	Gneiss	P	0.5584	0.9215	0.8608	0.7802	K_D mean = 0.8377 P mean = 0.8209
		K_D	0.5598	0.9156	0.8468		
	Granite	P	0.9070	0.8062	0.8713		
		K_D	0.9721	0.8268	0.9049		
Mean			0.7496	0.8703	0.8766	0.8293	
Gyratory specimen S=15cm	Gneiss	P	0.8442	0.8005	0.8743	0.8397	K_D mean = 0.8502 P mean = 0.8260
		K_D	0.9205	0.8193	0.8773		
	Granite	P	0.7833	0.8180	0.8340		
		K_D	0.8021	0.8200	0.8618		
Mean			0.8345	0.8194	0.7769	0.8379	



표 9. Coefficient of determination(R^2) between Kim test variables and dynamic stability

Specimen	Agg.	Property	R^2 for dynamic stability (DS)			Mean	Note
			D=3cm	D=4cm			
			$r=0.5$	$r=0.5$	$r=1.0$		
Marshall specimen S=10cm	Gneiss	P	0.4732	0.6000	0.6984	0.5905	K _D mean = 0.6858 P mean = 0.6733
		K _D	0.4776	0.5959	0.6952		
	Granite	P	0.8211	0.6311	0.8158		
		K _D	0.7818	0.6879	0.8765		
Mean			0.6384	0.6287	0.7715	0.6795	
Gyratory specimen S=15cm	Gneiss	P	0.6334	0.7157	0.8452	0.7314	K _D mean = 0.7239 P mean = 0.7420
		K _D	0.6191	0.7263	0.6194		
	Granite	P	0.7853	0.7253	0.7475		
		K _D	0.7858	0.7058	0.8869		
Mean			0.7059	0.7183	0.7748	0.7330	

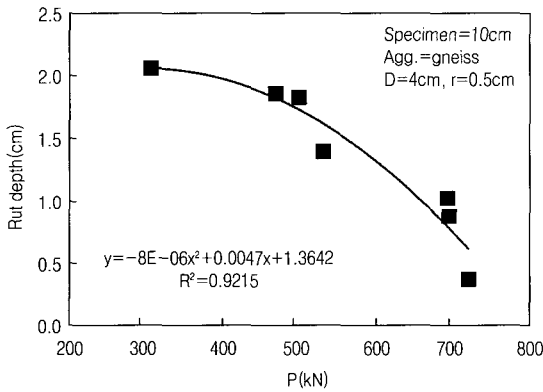


그림 5. The best-fit regression curve for P

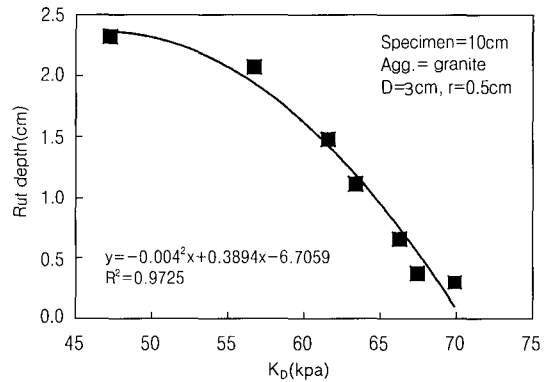


그림 6. The best-fit regression curve for K_D

3.4 통계 분석

공시체 크기(S), 두께(t), 하중봉 직경(D), 골재(Agg), 그리고 공시체 두께별 교호작용(Interaction: S*t)에 김테스트 시험치가 통계적 유의성이 있는지를 확인하기 위하여 일반선형모델(General linear model: GLM)에 의한 통계분석을 수행하였다. 사용된 통계 프로그램은 SAS(Statistical analysis system)이며 표 10은 최대하중(P)과 변형강도(K_D)에 대한 분산분석(ANOVA)의 결과이다.

표 10에서 보듯이 공시체의 종류(S=10cm, S=15cm) 및 골재의 종류(편마암, 화강암)에 따라서는 P, K_D 모두다 유의성이 없는 것으로 나타났다. 이는 김테스트 결과가 공시체의 종류 및 골재에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다. 하지만 공시체 두께(t)와 두께와 직경의 교호작용에서는 K_D의 경우 유의성이 있는 것으로 나타났다.

표 11은 Duncan의 multiple range test의 결과이며, 동일 그룹 내에서 문자가 다른 것은 $\alpha=0.05$ 수준에서 통계적으로 유의성이 있음을 의미한다. 공시체의 직경간에 그리고 골재간에는 유의성이 없

표 10. GLM results for dependent variable P and K_D

Source	Pr > F	
	P	K_D
Specimen (S)	0.7770	0.8752
Thickness (t)	0.4872	0.0154*
Aggregate (A)	0.5210	0.4382
S*t	0.5158	0.0487*

* Significant at $\alpha = 0.05$

표 11. Multiple range test R^2 for P and K_D based on various size variables

Variable	Classification	Mean value of R^2 for P		Group	Mean value of R^2 for K_D		Group	
		DR	DS		DR	DS		
Specimen	10cm	0.8209	0.6733	A	0.8377	0.6858	A	
	15cm	0.8260	0.7420	A	0.8502	0.7239	A	
Aggregate	Gneiss	0.8100	0.6610	A	0.8232	0.7223	A	
	Granite	0.8366	0.7544	A	0.8647	0.7875	A	
Specimen diameter (S)	10cm	D=3cm	0.7327	0.6472	A	0.7662	0.6297	A
		D=4cm	0.8650	0.6863	B	0.8735	0.7139	B
	15cm	D=3cm	0.8138	0.7094	A	0.8613	0.7025	A
		D=4cm	0.8317	0.7584	B	0.8446	0.7346	B
Thickness (t)	$t \leq 6.3\text{cm}$	0.8615	0.7560	A	0.9055	0.7821	A	
	$6.3\text{cm} < t \leq 6.45\text{cm}$	0.7802	0.5905	A	0.7814	0.5896	B	
	$6.45\text{cm} < t \leq 6.6\text{cm}$	0.8205	0.7576	A	0.8638	0.7648	A	
	$6.6\text{cm} < t$	0.7453	0.6666	A	0.7553	0.6338	B	

이 표 10과 같은 결과를 얻었으며 R^2 의 평균도 비슷한 값을 나타냈다. 따라서 어떤 골재를 사용하던 간에 15cm 선화다짐기 공시체나 10cm 마샬공시체를 사용하여도 무방한 것으로 판단되었다.

한편 향후 더 연구가 있어야 하겠지만, 코어를 통한 품질검사시 10cm 직경의 코어공시체를 사용하여 변형강도 시험을 하여도 될 것으로 사료된다. 참고로 안정도나 간접인장강도 시험은 코어공시체를 사용하는 경우 측면의 상태에 크게 영향을 받아 측면을 별도 처리하지 않으면 안된다. 따라서 품질검사시 코어공시체에 대한 안정도는 시험항목에서 배제되어 있다. 하지만 김테스트는 공시체 상부에 수직으로 하중을 가하므로 측면상태가 다소 고르지

못해도 큰 차이가 없을 것으로 보여진다.

하중봉에 따른 차이를 보면 직경 4cm 하중봉으로 시험한 것이 3cm보다 R^2 이 모두 더 높게 나타나 4cm 하중봉으로 시험하는 것이 소성변형 특성치와 상관성을 찾는데 더 유효함을 알 수 있었다. 공시체 두께별로 구분하여 비교한 것을 보면 P에서는 모든 두께에서 동일 Group으로 공시체 두께의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만 K_D 값에서는 다른 그룹으로 나타나 유의성이 있는 것으로 나타났다. 이는 공시체의 두께가 K_D 값에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 따라서 김테스트 시험시 향후 연구를 통해 두께에 따라 마샬안정도에서와 같이 보정계수를 적용하는 것을 고려해야 할 것으로 보여진다.

앞서 언급했듯이 공시체 직경과 두께의 교호작용에서도 R^2 값들 간에 P는 유의성이 없지만 K_D 에서는 유의성이 있는 것으로 나타났으며 이는 P와 K_D 의 측정치에서도 같은 결과가 나왔다(표 12). 이는 K_D 값을 구할 때 사용되는 y가 공시체 두께에 영향을 받기 때문이라고 추정된다. 따라서 공시체의 두께가 우선은 6.3cm 이하(6.0-6.3) 공시체를 사용하는 것이 가장 상관성이 높아 이를 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단되며, 6.6cm 이상의 경우에는 표 11에 나타난 바와 같이 R^2 이 낮고 표 12에서 K_D 평균도 낮게 나타나므로 사용치 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 13은 공시체 직경과 하중봉에 따른 김테스트 시험치를 보여준다. 하중봉의 직경이 큰 4cm의 경

우 3cm보다 최대하중이 크나 변형강도는 반대로 더 작게 나타났다. 공시체 직경에 비해 하중봉 직경이 너무 크면 하중 재하시 혼합물 자체의 지압강도와 전단강도로 버티기보다는 썩기효과로 공시체가 쪼개지는 현상이 일찍 발생한다. 따라서 사용된 봉중 공시체 직경 대 봉 직경의 비(D/S)가 0.4로 가장 큰 4cm 봉을 10cm 공시체(S)에 사용하는 경우의 측정치 저하를 우려하였다. 하지만 표 13에서 보듯이 직경 S=10cm 공시체에서 하중봉 D=4cm 사용시의 P값이 3cm 사용시보다 작지 않아 우려하던 쪼갬 현상에 의한 강도저하는 나타나지 않았다. 따라서 직경 4cm 하중봉을 직경 10cm 공시체에 사용하는 것이 소성변형과의 상관성이 높은 적정강도를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

표 12. Mean values and Duncan's multiple range test for P and K_D

Variable	Classification	Mean value and Duncan's multiple range test					
		N	P (kN)	Group	N	K_D (kPa)	Group
Specimen	10cm	42	4.36	A	42	5159.3	A
	15cm	42	4.48	A	42	5063.2	A
Thickness	$t \leq 6.3$	20	4.60	A	20	5328.0	A
	$6.3 < t \leq 6.45$	20	4.60	A	20	5253.4	A
	$6.45 < t \leq 6.6$	26	4.56	A	26	5211.3	A
	$6.6 < t$	18	4.08	A	18	4567.0*	B
Aggregate	Gneiss	42	4.46	A	42	5143.6	A
	Granite	42	4.38	A	42	5078.9	A

* Significant at $\alpha=0.05$

표 13. P and K_D under various test variables

S (cm)	D (cm)	r (cm)	N	P (kN)	K_D (kPa)	Note
10	3	0.5	14	3.22	5235.8	
		1.0	14	4.26	5285.8	
	4	0.5	14	5.59	4956.3	
15	3	0.5	14	3.89	5942.8	
		1.0	14	4.25	4767.0	
	4	0.5	14	5.31	4478.7	

4. 결 론

본 논문은 아스팔트 콘크리트 포장의 주요손상 형태의 하나인 소성변형과의 상관성이 높은 새로운 시험기법인 김테스트를 개발하기 위한 연구의 일환이다. 다양한 혼합물을 제조하여 휠트래킹시험(Wheel tracking test)을 수행하고 김테스트의 최대하중(P)과 변형강도(K_D)와 상관성 분석을 수행하였다. 공시체 크기(S), 두께(t), 골재(Agg)에 통계적 유의성이 있는지를 확인하기 위하여 일반선형모델(General linear model: GLM)을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소성변형 특성치인 침하 깊이, 동적 안정도와 김테스트의 최대하중(P), 변형강도(K_D)와의 상관성 분석에서 R^2 은 혼합물의 종류에 따라 최고 0.92이상 나타났으며, 평균 R^2 은 각각 0.7744 및 0.7655이상이었다. 이는 안정도와 상관성 분석에서 R^2 이 0.05~0.17인 점과 비교하면 매우 높은 값이며, 이제까지 개발된 정하중 하에서의 시험치중 가장 소성변형과의 상관성이 큰 특성치로 판단된다.
2. GLM 통계 분석결과 공시체의 직경과 골재의 종류는 김테스트에 영향을 주는 요인이 아니었으므로 공시체는 10cm나 15cm 중 어떤 것을 사용해도 무방할 것으로 판단된다.
3. 공시체의 두께에 따라서는 K_D 에 유의성이 있는 것으로 나타났다. 6.3cm이하 공시체의 경우가 K_D 값도 가장 크고 소성변형과의 상관성도 가장 좋아 이를 적용하여 시험을 하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단되며 6.6cm이상의 경우 R^2 이 낮을 뿐만 아니라 K_D 평균이 특히 낮게 나타나므로 이 이상의 두께는 사용치 않을 것을 제시한다.
4. 하중봉 직경이 4cm인 경우 3cm보다 R^2 이 높게 나타났고 특히 직경 4cm, $r=1.0$ 봉이 가장 우수하여 이를 사용하는 것이 보다 효과적인 것임을 알 수 있었다.
5. 본 연구에서는 김테스트의 측정치가 소성변형과의 상관관계가 높으며 공시체 두께가 이에 영향

을 미치는 변수임을 확인하였으나 제한된 재료와 휠트래킹 시험기를 사용한 것이다. 따라서 일반화된 결과 도출을 위해서는 향후, 보다 다양한 재료와 휠트래킹 시험기에의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

5. 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 7집, 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, 김준은, 최선주(2002c). "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 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
7. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순제(2000). "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계 규명," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 171-175

(접수 : 2003. 11. 10)