



소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수 분석

Analysis of Apparatus Variables for Deformation Strength Test of Asphalt Concrete Based on Correlation with Rutting and Prediction Model for Rutting

김 광 우^{*} · 이 문 섭^{**} · 김 성 태^{**} · 이 순 제^{***}

Kim, Kwang-Woo · Lee, Moon-Sup · Kim, Sung-Tae · Lee, Soon-Jae

Abstract

This study dealt with analysis of size effect of testing apparatus for Kim test which measures rut resistance characteristics of asphalt mixture under static loading. Two columns in different diameter with each column having different radius of round cut (Curvature) at the bottom were used for testing asphalt mixture. Deformation load (P_{max}) and deformation strength (K_D) were found to have relatively high correlation with rut depth and dynamic stability of asphalt concrete. Diameter of specimen was not a significant factor in this test. From the statistical correlation analysis with rutting properties, the radius of curvature and diameter of loading column were found to be important factor affecting the results of the test. Among the radius (r) of curvatures, $r=0.5\text{cm}$ and 1.0cm showed much higher correlation than the column without curvature, and $r=1.0\text{cm}$ being better between the two. The column with diameter of 4cm showed better correlation than diameter of 3cm. Therefore, the column of 4cm diameter with $r=1.0\text{cm}$ was found to be the best among various apparatus sizes. Prediction models for rut depth and dynamic stability were developed for each aggregate mixture based on Kim test variables using SAS STEPWISE procedure. Therefore, if this test method is validated through further study, Kim test can be used for selecting asphalt mixture with the highest resistance against permanent deformation.

Keywords: Kim test, deformation strength, radius of curvature, diameter of loading column

요 지

본 연구는 아스팔트 콘크리트 포장의 소성변형 추정을 보다 쉽게 하기 위하여 새로운 시험기법인 김 테스트의 변형강도 및 시험 장비를 개발함에 있어 직경규격을 선정하기 위한 것이다. 김테스트에서 하중봉의 직경(D) 및 하중봉 하단의 원형처리 반경(r)이 시험결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 혼합물에 대하여 D와 r 을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. r 에 따른 변형강도 및 변형하중과의 상관관계 분석결과 $r=0.5$ 와 1.0cm 로 원형 처리한 측정값에서 소성변형과 높은 상관성을 보여주었다. 공시체의 직경(S)은 중요 변인이 아니었으며, 하중봉은 직경 4cm에 반드시 하단을 원형처리를 해야 하고 이때의 절삭 반경 r 은 1.0cm가 가장 좋은 것으로 나타났다. 통계프로그램 SAS의 STEPWISE를 이용하여 골재별로 변형강도로부터 소성변형 깊이 및 동적안정도를 추정하기 위해 모델을 개발하였으며 R^2 은 0.95이상이 얻어졌다. 향후 보다 많은 실험을 통해 이 시험법의 표준화 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이며, 새로운 배합설계 방법을 개발한다면 본 실험법의 적용을 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

핵심용어: 김테스트, 변형강도, 원형처리 반경, 기동직경

* 정회원 · 강원대학교 농업공학부 교수 · 공학박사 · 033-250-6467
 ** 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284
 *** 정회원 · 강원대학교 석재신소재센터 연구원 · 공학석사 · 033-250-7284



1. 서론

최근 들어 아스팔트 포장에 발생하는 소성변형이 큰 문제가 되고 있다. 따라서 이를 방지하기 위한 방법이 여러 연구를 통해 제시되고 있으나 SHRP 연구를 제외하고는 대부분 재료개발에 집중되고 있으며 새로운 시험법이나 배합설계법의 개발은 별로 없는 실정이다.

현재 아스팔트 혼합물 특성 측정방법중 하나인 마찰시험법은 시험장치가 간단하고 경제적이지만 혼합물의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못하며 특히 소성변형을 예측할 수 없는 시험인 것으로 인식되고 있다. 따라서 잔접인장강도 임계치 4.6kgf/cm^2 (65psi)가 특정도로포장의 신뢰도 0.9973(probability of functional failure 0.0027)을 제공한다는 연구(Kim, 1988)와 비교하면 마찰안정도의 임계치 500kgf(또는 750kgf)는 신뢰도가 매우 낮을 것이다.

그 이유는 여러 가지가 있겠지만 우선 마찰안정도의 재하 메커니즘이 실제 현장에서의 재하 형식과 다르다는 점이다. 따라서 안정도에 대한 믿음이 낮아서 개선에 대한 의견들이 제시되기는 하지만 아직 대안으로 선뜻 채택되는 연구가 없다. 그리고 최근 국내에서는 소성변형 제어를 위하여 미국의 superpave 배합설계에 관심을 보이고 있지만 이러한 시험법은 시험장비가 고가이고 비교적 복잡하다는 단점이 있다. 그 때문인지 현재 국내 실정을 살펴보면 이러한 시험은 극히 일부 대학 및 연구기관에서 연구용으로만 수행되고 있다.

이러한 국내 실정을 감안하여 본 연구에서는 비교적 손쉬운 시험방법을 개발하여 다양한 혼합물의 소성변형 특성치와 상관성이 비교적 높은 변형강도를 개발하고 있으며 그 내용은 동반 제출된 논문(김광우 등, 2002b)에 제시되어 있다. 따라서 본 연구의 목적은 이를 위한 변형시험장

치의 신뢰성을 높이기 위하여 장치변수들을 적절히 선정하기 위한 방안을 실험결과를 토대로 제시하고 변형강도 측정시험에서 얻어지는 변수들을 이용하여 소성변형을 추정하는 모델을 제시하는 것이다.

2. 시험봉과 변형강도의 관계

변형강도를 측정하는 시험장치는 그림 1과 같은 하중봉을 이용해 공시체에 수직 하중을 가한다. 하중봉으로 재하 하였을 경우 하단이 각이 지면 골재와의 맞물림이 일어나는 경우가 생겨서 하중봉의 끝부분을 그림 1과 같이 다양하게 원형으로 깎을 수 있다. 이는 재하에 의해 하중이 타이어와 유사한 방향으로 가해져서 공시체가 눌러 들어감과 동시에 전단에 의해 옆으로 밀려나는 효과도 일으킨다. 그리고 이 하중봉을 편심 없이 수직으로 재하하기 위하여 그림 2에서와 같은 봉 홀더와 공시체 몰드를 개발하고 이를 기존의 마찰시험기를 이용하여 재하하였다.

마찰안정도 시험에서 최대하중 및 흐름값을 구할 수 있듯이 같은 온도인 60°C 로 30분간 수침한 공시체를 그림 2와 같이 시험을 하였을 경우에도 유사한 하중-변형곡선이 얻어진다. 여기에서 최대하중(P_{max})과 그때 눌러 들어간 깊이(y)를 구할 수 있는데 이를 각각 변형하중(deforming load) 및 수직변형(vertical deformation)이라 하였다. 그리고 그림 2와 같은 이 시험에서의 재하장치(봉, 봉 홀더 및 공시체 홀더)를 김테스터(Kim tester)라 명명(김광우 등, 2002a)하고 변형강도를 구하는 과정을 포함한 모든 시험 방법을 김테스트(Kim test)라 명명하였다.

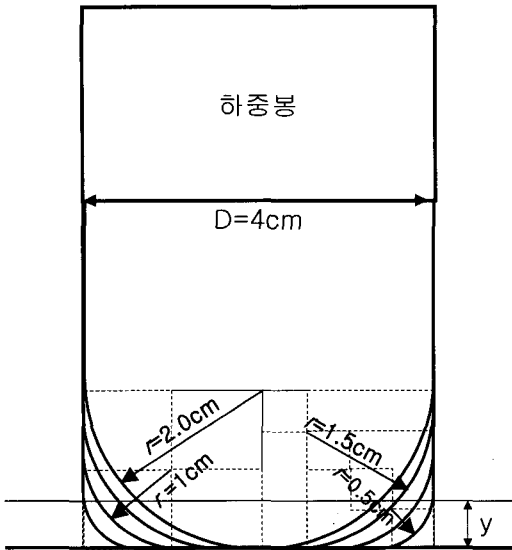


그림 1. Illustration of round cut

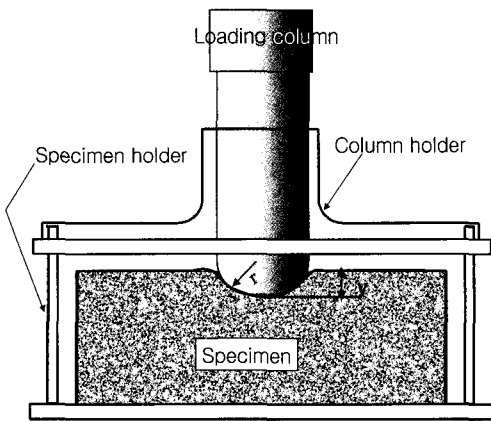


그림 2. Schematic of Kim test loading mechanism

그림 1과 같이 직경 D, 하중 재하용 하중봉의 양 하단을 반경 r 만큼씩 원형절삭(round cutting) 하고 하중 재하에 의해 y만큼 하중봉이 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우를 고려하였다. 그리고 파괴시 하중을 y 깊이에서 바닥

에 투영한 원의 면적으로 나눈 재료의 강도를 변형강도(deformation strength: K_D)라 하고 식 1로 나타내었다. 이에 대한 자세한 설명은 문헌(김광우 등, 2002a)에 제시되어있다.

$$K_D = \frac{4P_{\max}}{\pi(D - 2r + 2\sqrt{2ry - y^2})^2} \quad (1)$$

여기서, P_{\max} = Deforming load (kgf),

r = Radius of round cut (cm),

y = Vertical deformation (cm)이고 K_D 의 단위는 kgf/cm^2 이다.

같은 직경의 하중봉이라도 원형 절삭 반경 (r) 이 크면 동일 하중 하에서 수직으로 더 깊이 들어갈 것이며, 그에 따라 수직변형 y 가 더 커지므로 투영 면적이 넓어지고 그에 따라 K_D 계산치는 달라지게 된다. 예를 들어 그림 1과 같이 $D=4\text{cm}$ 하중봉을 $r=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{cm}$ 로 깎은 경우를 생각하자. 이들 봉으로 같은 재료의 공시체에 일정한 하중을 가했을 경우 r 이 크면 초기 접지면적이 작아 같은 하중 하에서 더 깊이 들어갈 것이다. 따라서 깊이 들어가면 y 가 커지고 y 의 증가는 투영면적의 증가를 가져온다. 그러므로 같은 하중하에서 r 의 증가는 y 의 증가를 수반하고, r 의 증가는 K_D 의 증가를 유발하며 y 의 증가는 K_D 의 감소를 유발하므로 상호 연관관계에 있다.

만일 하중이 300kgf 작용하여 그림 1에서 보인 $D=4\text{cm}$, $r=0.5\text{cm}$ 인 봉으로 $y=0.3\text{cm}$ 의 수직변형이 일어나서 공시체가 파괴되면 그때 $K_D=24.9\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이다. 이 공시체에 $r=1.0\text{cm}$ 인 봉으로 같은 하중을 가한다면 초기접지면적이 작으므로 y 는 더 깊어질 것이다. 이때 같은 K_D 가 얻어지기 위한 y 는 그림 3에서와 같이 0.72cm



정도가 될 것이다. 이와 같은 식으로 r 이 증가하면 y 는 증가하게 되는데 같은 공시체에 같은 하중으로 같은 K_D 가 얻어지기 위한 r 과 y 의 관계는 그림 3의 직선(linear y)과 같다. 그리고 이때 얻어지는 K_D 값은 같으므로 그림 4에서 steady K_D 와 같이 수평선이 된다.

하지만 실제 상황에서 이와 같은 현상은 발생할 수 없다. 즉, 공시체에 재하시 y 가 커지게 되면 혼합물의 저항이 상대적으로 증가하기 때문에 이와 같은 현상은 일어나지 않을 것이다. 즉, 예를 들어 초기 3mm가 침하 되는 것에 비해 추가로 3mm가 침하 되는 데는 훨씬 더 큰 힘을 필요로 한다.

반면에 같은 하중을 작용 시킬 때 y 가 변하지 않는다면 r 이 증가함에 따라 그림 4의 ascending K_D 와 같은 곡선이 얻어질 것이다. 만일 r 이 커지면 초기 접지 면적이 작아지기 때문에 같은 하중하에서 붐이 더 쉽게 들어가게 되는데 y 가 증가하지 않으려면 K_D 가 그것을 지지할 만큼 증가해야 한다. 다시 말해, 같은 하중하에서 r 이 커져도 y 가 같으려면 그만큼 재료가 변형에 강해야 한다는 의미이다. 그림 4에서 보면 r 이 커짐에 따라 이 곡선이 증가되는 기울기가 급해진다. 따라서 r 이 커지면 그만큼 K_D 의 변화가 민감해진다는 의미가 된다.

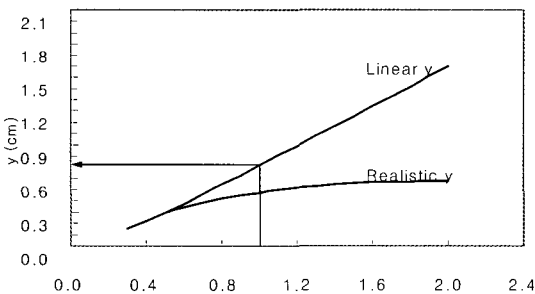


그림 3. Trands of y by change of r to produce steady K_D and realistic K_D

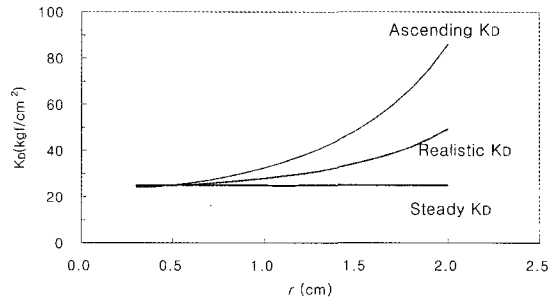


그림 4. Three types of K_D pattern depending upon r and y

하지만 이 두선 모두 현실성이 떨어지는 가정에 근거한 것이다. 실제로는 이 두선 사이 어딘가에 그림 4에서의 realistic K_D 와 같은 선이 존재하게 될 것이다. 즉, 같은 하중하에서 r 이 커짐에 따라 y 가 직선적으로 비례하지는 않을 것이다. 다시 말해 같은 하중하에서 r 의 증가는 어느 정도 y 의 증가를 유발하지만 그림 3처럼 직선적으로 증가되진 않으며 실제로는 그림 4의 realistic K_D 가 형성되는 y 가 그림 3의 realistic y 와 같이 존재하게 될 것이다.

r 이 어느 정도 커지면 밑바닥에 평면이 적어져 초기의 작은 힘에도 쉽게 들어가며 앞서 언급했듯이 K_D 의 산정에 예민해진다. 그리고 $r=D/2$ 가 되면 완전 구체와 같아 더욱 그렇다. 즉, 하중에 매우 민감하고 실험상 발생할 수 있는 작은 변동에도 편차가 크게 생겨 결과치에 분산(variance)이 매우 크게 나타나는 것을 예비 실험을 통해서 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 하중봉 직경 $D=3\text{cm}$ 에는 반경 $r=0.5\text{cm}$ 의, 하중봉 직경 $D=4\text{cm}$ 에는 반경 $r=0.5, 1\text{cm}$ 의 원형절삭을 하여 어느 정도 하단에 평면이 확보된 봉으로 연구를 수행하였다.



3. 적용 실험

상기에서 제시한 재료의 성능 특성을 측정하기 위하여 다양한 (12가지) 혼합물로 직경 10 및 15cm 공시체를 제조하고 하중봉의 직경과 원형 처리 반경종류에 따른 최대하중(P_{max}), 변형강도(K_D), P_{max}/y , 재하지수($K_I = K_D/y$) 등을 계산하였다. 또한 이 특성치들이 소성변형과 어느 정도의 상관성을 가지는지를 분석하기 위하여 동일 혼합물에 대하여 반복주행 실험 후 이를 통계분석 하여 소성변형과 상관성이 높게 나타나는 변수가 K_D 와 P_{max} 인 것으로 확인하였다(김광우 등, 2002a). 따라서 본 연구에서는 주로 이 두 변수를 장치변수 분석에 종속변수로 사용하였으며 이에 대한 자세한 실험 내용들은 아래와 같다.

3.1 사용재료

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되는 AC 80-100 및 AC 60-80 (AP3, AP5) 아스팔트이다. 골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(gneiss)과 화강암(granite)을 선정하였다. 굵은골재 최대치수는 19mm, 잔골재는 screenings 및 석회석 채움재(mineral filler)를 사용하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험하고 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 본 연구에서는 국내산으로 개질효과가 좋은(김광우 등, 1997) LDPE (low-density polyethylene)와 SBS (styrene-butadiene-styrene)를 AC 80-100에 각각 2가지 함량으로 섞어 제조한 PMA와 상용화된 PG76-22를 사용하였다.

따라서 총 12가지 혼합물에 대해 마살식 배합설계를 통하여 각각의 최적아스팔트 함량을 결정하고 본 시험의 공시체 제작시 아스팔트 함량으로 이용하였다. 공시체는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마살식 아스팔트 혼합물 제조

방법에 따라 공시체 양면을 각각 50회씩 다짐하여 직경 100mm의 공시체를 제조하였다. 이와 비교하기 위하여 선회(gyratory)다짐기로 직경 150mm 공시체를 만들었다. 공극도 소성변형과 상관관계가 높은 변수(이상범, 2001)이므로 이는 모두 $4\pm 0.5\%$ 에서 일치하도록 조정하여 실험에 적용하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 305mm×305mm×70mm의 슬래브 공시체를 공극률 $4\pm 0.5\%$ 를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 시험온도 60°C에서 6시간 이상 저장 후 반복주행(wheel tracking) 시험기로 시험을 수행하였다.

반복주행시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 53mm로 하였으며 바퀴의 반복주행에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 차륜 축하중은 70kgf, 1회 주행거리는 200mm로 하고 축에 LVD T를 설치하여 반복주행에 따른 변형량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하고 그로부터 동적안정도(dynamic stability)를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 김테스트

표 1은 본 연구에 사용된 혼합물들의 명칭과 사용재료에 대한 설명이며, 표 2는 각 혼합물의 마살안정도와 김테스터로 측정한 최대하중(P_{max})치와 수직변형 y 및 변형강도 K_D 의 대표적인 예를 보여주고 있으며 자세한 데이터는 문헌(김광우 등, 2002b)에 상세히 제시되어있다. 여기서 K_D 는 D , y , r , P_{max} 를 식 1에 대입하여 구했으



며, P_{max} 와 K_D 가 혼합물의 종류에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

표 1. Designation of mixtures

Designation	Description of mixture(mix.)
ADOO	Gneiss(A) agg. dense(D)-graded AP 60-80 mix.
ADL4	A agg. D graded AP 80-100 with LDPE 4% mix.
ADL6	A agg. D graded AP 80-100 with LDPE 6% mix.
ADS3	A agg. D graded AP 80-100 with SBS 3% mix.
ADS5	A agg. D graded AP 80-100 with SBS 5% mix.
ADPG	A agg. D graded PG76-22 mix.
BDOO	Granite(B) agg. dense(D)-graded AP 60-80 mix.
BDL4	B agg. D graded AP 80-100 with LDPE 4% mix.
BDL6	B agg. D graded AP 80-100 with LDPE 6% mix.
BDS3	B agg. D graded AP 80-100 with SBS 3% mix.
BDS5	B agg. D graded AP 80-100 with SBS 5% mix.
BDPG	B agg. D graded PG76-22 mix.

직경 10cm 마살공시체와 직경 15cm gyratory 공시체로 직경을 구분한 이유는 공시체와 봉 직경의 크기에 따른 결과를 비교하기 위해서이다. 즉, 직경 15cm 공시체는 10cm 공시체에 비해 봉 직경대 공시체직경의 비(D/S)가 작으므로 시험시 쪼개짐에 대한 저항의 커서 더 신뢰성이 높은 결과를 가져올 것이라는 기대에서 실험변수로 채택하였다.

한편, 본 연구에서도 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 K_D 나 P_{max} 가 일반 아스팔트 혼합물보다 높게 나타났는데 이는 일반적으로 개질 아스팔트 혼합물의 여러 가지 역학적 성질이 보통 아스팔트 혼합물보다 우수하다는 점과 일치하는 것이다.

4.2 통계분석

공시체 크기(S), 하중봉 직경(D), 원형절삭반경(r), 골재(Agg)의 차이가 P_{max} 와 K_D 에 통계적으로 유의성 있는 영향을 미치는 인자인지 확인하기 위하여 SAS의 general linear model (GLM) procedure를 수행하였다. 그 결과 표 3에서 보듯이 D와 r 에서 유의차가 나타났다. 여기서 하중봉의 직경(D)과 원형절삭 반경 (r)은 최대하중(P_{max})과 변형강도(K_D)에 통계적으로 크게 영향을 주는 (유의확률 0.0001 이하) 요인이었다. 따라서 적합한 직경의 하중봉과 하중봉 하단을 원형으로 절삭할 때 반지름 r 의 선정이 중요함을 알 수 있었다.

하지만 공시체의 종류 (직경 10cm 마살공시체, 15cm gyratory 공시체), 골재 종류(편마암, 화강암)에 따라서 김테스트의 P_{max} 와 K_D 는 별로 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 이에 대한 자세한 수치들은 표 3과 4에서 보여주고 있다.

이 표에서 보면 하중봉 직경이 큰 4cm를 쓴 경우가 3cm 보다 최대하중은 크나 변형강도는 작았다. 그리고 r 값에서 보면 $r=0$ cm 경우가 그 외의 경우보다 크게 나타났다. 특히 $r=0.5$ 나 1.0cm의 경우는 거의 차이가 없었다. 이렇게 $r=0$ 에서 P_{max} 값이 큰 이유는 하중봉 하단이 납작하여 재하시부터 봉 전체가 접지되어 하중에 저항하기 때문이다. 이는 반대로 다른 봉들이 둥근 밑바닥 때문에 하중에 의해 혼합물 속으로 눌러 들어가 상대적으로 낮은 값을 나타내는 것과 대조를 이루는 것이다. 공시체 직경과 하중봉 직경의 비가 너무 크면 하중 재하시 혼합물 자체의 지압강도와 전단강도로 버티기보다는 썩기 효과로 공시체가 갈라지는 쪼갬현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 직경 10cm 공시체를 사용하기 때문에 상대적으로 직경이 너무 큰 5cm 이상의 하중봉은 예비 실험을 통해 제외하였다.



표 2. Marshall stability at OAC and P_{max} , v , and K_D for S=10cm specimen

Mixture	Marshall stability (kgf)	Loading column D=4cm								
		$r = 0\text{cm}$			$r = 0.5\text{cm}$			$r = 1.0\text{cm}$		
		P_{max} (kgf)	v (cm)	K_D (kgf/cm ²)	P_{max} (kgf)	v (cm)	K_D (kgf/cm ²)	P_{max} (kgf)	v (cm)	K_D (kgf/cm ²)
ADOO	1,054	-	-	-	468	0.19	41.6	376	0.19	47.56
ADL4	1,239	764	0.237	60.80	531	0.195	47	386	0.19	48.82
ADL6	1,219	822	0.199	65.41	692	0.18	62.05	576	0.195	72.22
ADS3	1,155	692	0.212	55.07	499	0.199	44.03	461	0.21	56.39
ADS5	1,221	756	0.225	60.16	695	0.21	60.81	550	0.19	69.56
ADPG	1,257	826	0.22	65.73	-	-	-	-	-	-
BDOO	1,259	692	0.178	55.07	510	0.181	45.68	-	-	-
BDL4	1,177	-	-	-	605	0.21	52.94	408	0.228	48.55
BDL6	1,364	855	0.199	68.04	616	0.18	55.23	419	0.21	51.25
BDS3	1,104	873	0.236	69.47	633	0.2	55.81	415	0.23	49.23
BDS5	1,008	727	0.21	57.85	613	0.21	53.64	441	0.21	53.95
BDPG	1,191	856	0.237	68.12	-	-	-	476	0.21	58.23

표 3. Mean values of Kim-test variables

Variable	Classification	Mean value			
		P_{max} (kgf)	N	K_D (kgf/cm ²)	N
Diameter*	3cm	465.79	43	68.94	43
	4cm	592.34	61	54.23	61
Radius of round cut (r)*	0cm	638.68	43	68.86	43
	0.5cm	475.02	41	54.15	41
	1.0cm	461.25	20	54.58	20
Specimen	10cm	540.43	51	60.67	51
	15cm	539.62	53	59.98	53
Aggregate	Gneiss	541.48	52	59.94	52
	Granite	538.56	52	60.69	52

* significant at $\alpha=0.01$

표 4. P_{max} and K_D under various test variables

S (cm)	D (cm)	r (cm)	N	P_{max} (kgf)	K_D (kgf/cm ²)	Note
10	3	0	11	538.82	76.23	
		0.5	10	340.00	55.31	
	4	0	10	786.50	62.59	
		0.5	10	586.20	51.90	
		1.0	10	450.80	55.76	
15	3	0	12	550.67	77.90	
		0.5	10	409.40	63.80	
	4	0	10	706.10	56.19	
		0.5	11	556.36	46.36	
		1.0	10	471.70	54.40	

그리고 4cm 붕을 직경 10cm 공시체에 사용하는 경우에 공시체 직경 대 붕 직경의 비(D/S = 0.4)가 가장커서 조깅에 의한 측정치 저하를 우려하였다. 하지만 표 3에서 보듯이 공시체 직경(S) 10cm에서 직경(D) 4cm 하중붕 사용시의 P_{max} 값이 3cm 사용시보다 작지 않아 우려하던 조깅 현상에 의한 강도저하는 나타나지 않은 것으로 판단되었다. 그리고 이는 그림 5와 같이 파괴 형태가 3cm나 4cm 하중붕 모두 유사하여 문제가 없을 것임을 짐작케 하였던 바와도 일치하는 결과이다.

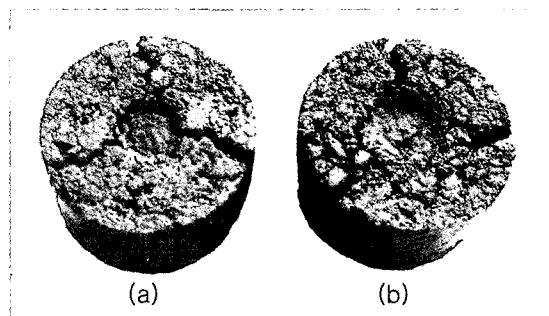


그림 5. Mode of failure by (a) D=3cm, r=0.5cm column and (b) D=4cm, r=0.5cm column



4.3 상관성 분석

이제까지 실험 결과를 가지고 소성변형과의 상관성을 보기 위해 회귀분석을 수행했다. 회귀식의 독립변수(x)는 김테스트의 P_{max} , P_{max}/y , K_D , $K_I (=K_D/y)$ 이며 종속변수(y)는 반복주행 시험의 최종 침하 깊이(rut depth: RD)와 동적안정도(dynamic stability: DS)이다. 회귀분석 모델은 각 특성별로 선형(linear), 곡선(curvilinear), 대수(logarithm), 지수(exponential), x 의 누승(power) 중에서 가장 R^2 가 높게 얻어지는 것을 선정하였다. 그 결과 y 값이 분모가 된 P_{max}/y 나 K_I 에서는 통계적으로 소성변형 특성치와 상관성이 낮게 나타났다. 즉, P_{max} 와 K_D 는 상대적으로 나머지 두 특성(P_{max}/y , K_I)에 비해 높은 R^2 이 얻어져 표 5에서는 그 두 가지의 결정계수(R^2) 값만을 보여준다. 전체적으로 R^2 을 보면 하중봉 하단에 원형처리하지 않은 두 개의 $r=0\text{cm}$ 에서 모두 가장 낮게 나타났다.

변형강도 K_D 와 최대하중 P_{max} 가 $r=0.5$ 나 1.0cm 에서 비교적 소성변형과의 상관성이 큰데 RD와 DS에서의 평균이 $r=0.5\text{cm}$ 의 경우 $D=3\text{cm}$ 에서는 0.7074 , $D=4\text{cm}$ 에서는 0.6545 인데 비해 $r=1.0\text{cm}$ 인 $D=4\text{cm}$ 에서는 평균이 0.7288 로 가장 높았다.

한편 K_D 와 P_{max} 를 비교해 보면 $r=0\text{cm}$ 인 경우를 제외하고는 거의 대부분의 경우 K_D 의 R^2 값이 더 높고 특히 그룹평균에서 보면 이를 알 수 있다. 여기서 $r=0\text{cm}$ 의 R^2 값은 P_{max} 와 K_D 가 같은데 이는 봉의 하단이 원형으로 처리되지 않아 y 값에 관계없이 일정한 K_D 가 얻어지기 때문이다. 즉, $r=0\text{cm}$ 인 경우 $K_D = P_{max}/A$ 이고, 여기서 A 는 봉의 고유 단면적으로 봉 직경에 따른 상수이므로 K_D 와 P_{max} 는 일정한 관계에 있기 때문이다. 반면에 $r=0\text{cm}$ 이 아닌 경우 y 의 변화가 식 (1)과 같이 K_D 에 영향을 주므로 각각의 y 값이 반영된다. 그리고 $r=0\text{cm}$ 의 경우 $r=0.5$ 나 1.0cm 보다 R^2 값들이 대부분 더 낮게 나타나는데 이는 골재와의 맞물림에 영향을 받고 또한 혼합물의 연경도 특성에 따른 수직 변형이 반영이 되질

않기 때문이라고 보여진다.

4.4 최적 규격의 선정

표 6, 7에서 보면 여러 가지 실험변수 중에서 상대적으로 소성변형 깊이나 동적안정도와 상관관계가 높은 것들을 찾을 수 있다. 표에서 grouping은 duncan의 multiple range test에서 얻어진 것으로 동일 그룹에서 문자가 다른 것은 $\alpha = 0.05$ 수준에서 통계적으로 유의성이 있다는 것을 의미한다.

하중봉의 직경은 4cm 인 것이 3cm 에 비해 전체적(표 6의 mean)으로 R^2 값이 높으며 표 7에서와 같이 r 이나 S 에 따라 구분을 하여도 직경 4cm 하중봉으로 시험한 것이 3cm 인 것의 R^2 보다 모두 더 높다. 즉, 하중봉 밑면의 원형처리 반경 r 이나 사용된 공시체의 직경에 관계없이 직경 4cm 하중봉으로 구한 최대하중이나 변형강도가 3cm 에 비해 소성변형 특성치와 상관성이 더 높게 나타나 이를 사용하는 것이 더 좋을 것임을 알 수 있었다.

또한 r 값별 R^2 을 보면 $r=1.0\text{cm}$ 인 것이 표 6이나 7의 모든 경우에서 가장 낮았다. 반면에 $r=0.5\text{cm}$ 와 $r=1.0\text{cm}$ 를 비교해보면 일부 $r=0.5\text{cm}$ 의 R^2 값이 $r=1.0\text{cm}$ 의 R^2 보다 더 높았고 대부분은 $r=1.0\text{cm}$ 의 R^2 이 더 높았으나 통계적으로 이 둘은 유의성이 없는 것으로 나타났다 (Grouping = B). 하지만 표 6에서 전체 평균을 보면 $r=0.5\text{cm}$ 의 R^2 값이 0.6981 이고 $r=1.0\text{cm}$ 의 R^2 값이 0.7386 으로 다소 더 높았다. 따라서 하중봉은 직경 4cm 에 하단을 반경 1.0cm 로 원형처리 한 것을 사용하는 것이 소성변형과의 상관성이 가장 높았다. 또한 공시체의 직경별 차이를 보면 통계적으로 유의성은 없으며 표 6, 7에서 보듯이 단지 R^2 의 평균에서 $S=15\text{cm}$ 가 다소 높다



표 5. Coefficient of determination (R^2) between Kim-test variables and RD and DS

Spec.	Prop.	Agg.	R^2 for D=3cm				R^2 for D=4cm					Mean	Group mean	
			$r=0\text{cm}$		$r=0.5\text{cm}$		$r=0\text{cm}$		$r=0.5\text{cm}$		$r=1.0\text{cm}$			
			RD	DS	RD	DS	RD	DS	RD	DS	RD			DS
S=10cm	P_{\max}	Gnei.	0.2768	0.1083	0.4181	0.5501	0.7784	0.4824	0.9464	0.8279	0.5022	0.3697	0.53	0.54
		Gran.	0.5396	0.4356	0.8472	0.6222	0.4217	0.3562	0.6037	0.2676	0.6680	0.9002	0.57	
	K_D	Gnei.	0.2768	0.1083	0.5422	0.6733	0.7784	0.4824	0.9342	0.7920	0.6847	0.6036	0.59	0.595
		Gran.	0.5396	0.4356	0.9350	0.5927	0.4217	0.3562	0.6675	0.5560	0.7622	0.9091	0.62	
S=15cm	P_{\max}	Gnei.	0.4240	0.1578	0.7580	0.6792	0.6717	0.3607	0.7551	0.5302	0.6120	0.7570	0.57	0.625
		Gran.	0.6096	0.4069	0.6731	0.9362	0.5661	0.9088	0.6328	0.4832	0.7156	0.9543	0.69	
	K_D	Gnei.	0.4240	0.1578	0.8108	0.6132	0.6717	0.3607	0.7716	0.5377	0.6249	0.8056	0.58	0.64
		Gran.	0.6096	0.4069	0.7303	0.9372	0.5661	0.9088	0.6329	0.6054	0.8179	0.9743	0.72	
Mean			0.3863	0.2772	0.7143	0.7005	0.6095	0.5270	0.7340	0.5750	0.6734	0.7842	0.59	0.60
Group mean			0.3318		0.7074		0.2940		0.6545		0.7288		0.60	0.60

표 6. Mean R^2 from regression of P_{\max} and K_D based on various experimental variables

Variable	Classification	Mean value of R^2 for				Mean	Grouping
		P_{\max}		K_D			
		RD	DS	RD	DS		
Diameter	3cm	0.5683	0.4870	0.6085	0.4906	0.5386	A
	4cm	0.6602	0.6104	0.7008	0.6624	0.6584	B
Radius of round cut (r)	0cm	0.5360	0.4021	0.5360	0.4021	0.4691	A
	0.5cm	0.7043	0.6463	0.7531	0.6885	0.6981	B
	1.0cm	0.6286	0.7417	0.7549	0.8290	0.7386	B
Specimen	10cm	0.6451	0.4920	0.6542	0.5509	0.5856	A
	15cm	0.6002	0.6323	0.6705	0.6336	0.6341	A
Aggregate	Gneiss	0.6145	0.4918	0.6549	0.4810	0.5605	A
	Granite	0.6277	0.6545	0.6683	0.6882	0.6597	A

표 7. Mean R^2 from regression of P_{\max} and K_D based on various size variables

Variable		Mean value of R^2 for				Mean	Grouping	
		P_{\max}		K_D				
		RD	DS	RD	DS			
Loading column diameter (D)	3cm	$r=0.0\text{cm}$	0.4625	0.2772	0.4625	0.2772	0.3698	A
		$r=0.5\text{cm}$	0.6741	0.6969	0.7546	0.7041	0.7074	B
	4cm	$r=0.0\text{cm}$	0.6095	0.5270	0.6095	0.5270	0.5683	A
		$r=0.5\text{cm}$	0.7345	0.5957	0.7516	0.6729	0.6887	B
		$r=1.0\text{cm}$	0.6286	0.7414	0.7549	0.8290	0.7386	B
Specimen diameter (S)	10cm	D=3cm	0.5204	0.4291	0.5734	0.4525	0.4939	A
		D=4cm	0.6534	0.5349	0.7081	0.6166	0.6283	B
	15cm	D=3cm	0.6162	0.5450	0.6437	0.5288	0.5834	A
		D=4cm	0.6683	0.7022	0.6920	0.7174	0.6950	B



따라서 15cm 직경의 공시체를 사용하는 것이 다소 유리해 보이나 통계적으로 유의차가 없고 선회다짐기로 공시체를 만드는데 따른 번거로움을 고려한다면 10cm 마살공시체를 사용하는 것도 무방하다.

4.5 추정모델 개발

본 연구에서 구해지는 P_{max} 와 y 를 가지고 계산해내는 값들은 P_{max}/y , K_D , K_I 이므로 이들을 각각 독립변수로 하여 RD나 DS를 추정하는 모델을 개발하기 위한 통계분석을 수행하였다. 이를 위해서 SAS의 STEPWISE procedure를 이용하였으며 중회귀분석(multiple regression)을 수행하였다.

이 방법에서는 최대의 R^2 가 얻어지도록 모든 변수들을 차례로 모델에 대입 및 제거를 반복하며 최적 모델을 찾았다. 분석시 골재별로 소성변형 특성에 차이가 나므로 이를 분리하였고 또한 r 값에서도 상관성에 차이가 나므로 분리해서 수행하였다.

이로부터 얻어진 최적 모델은 표 8과 같으며 역시 두 골재 모두 $r=1.0cm$ 에서 가장 높은 R^2 가 얻어졌다.

표 8. R^2 for prediction model by aggregate and r value.

Aggregate	r	R^2 for RD	R^2 for DS
Gneiss	0.0cm	0.6223	0.7073
	0.5cm	0.6436	0.8171
	1.0cm	0.9999	0.9994
Granite	0.0cm	0.4466	0.5359
	0.5cm	0.6326	0.9170
	1.0cm	0.9488	0.9972

골재별로 가장 높은 R^2 이 얻어진 추정식은 모두 $r=1.0cm$ 에서 얻어져 $r=1.0cm$ 로부터 소성변형 추정에 가장 상관성이 높은 결과를 얻을 수 있음을 다시 확인하였다. 추정 모델은 식 (2)~(5)와 같고, 이를 이용한 추정치와 실측치의 관계를 그림 6~9에서 보여주고 있다.

그림에서 보듯이 실측치와 추정치와의 상관관계가 밀접하여 본 연구에서 개발한 강도 및 변형 측정치들을 사용한 소성변형의 추정이 매우 정확할 수 있음을 보여 준다.

$$R_{ut}(A, 1.0) = 7679.15 - 14426.44y - 20.44P + 0.064P^2 - 0.00003P^3 - 0.474K_D^2 - 0.0148K_D^3 - 21.5K_I + 0.00089(P/y)^2 \quad (2)$$

$$R_{ut}(B, 1.0) = -9948.16 + 45365y - 61453y^2 - 0.054P^2 + 0.000067P^3 + 91.164K_D + 0.505K_D^2 - 0.0177K_D^3 + 2.05(P/y) \quad (3)$$

$$DS(A, 1.0) = -37518263 + 72793360y + 99074P - 323.7P^2 + 0.164P^3 - 3449K_D^2 + 64.9K_D^3 + 102265K_I - 4.31(P/y)^2 \quad (4)$$

$$DS(B, 1.0) = 58058176 - 682232906y + 927951949y^2 - 224112P + 1312P^2 - 1.362P^3 - 34230K_D^2 + 427K_D^3 - 29814P/y \quad (5)$$

여기서 P 는 P_{max} 이다.

따라서 개발된 실험 방법은 기존의 마살방법보다 훨씬 소성변형과의 상관성이 큰 측정치를 얻을 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

특히 기존의 마살시험기를 그대로 사용하고 또한 공시체도 기존의 방법대로 제조할 수 있으며 시험전 처리방법도 동일하여 적용이 빨라 향후 계속 연구를 수행하여 표준화한다면 실용화 가능성이 매우 클 것으로 보인다.

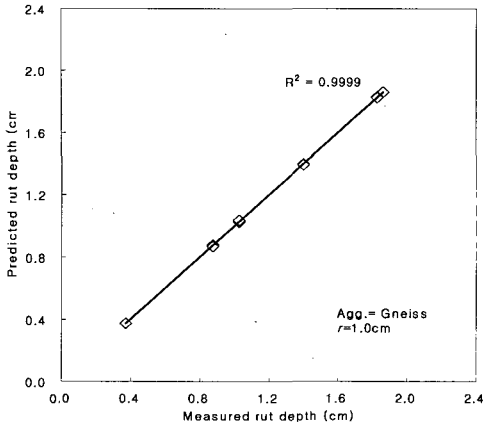


그림 6. Predicted rut depth vs. measured value for gneiss mixture

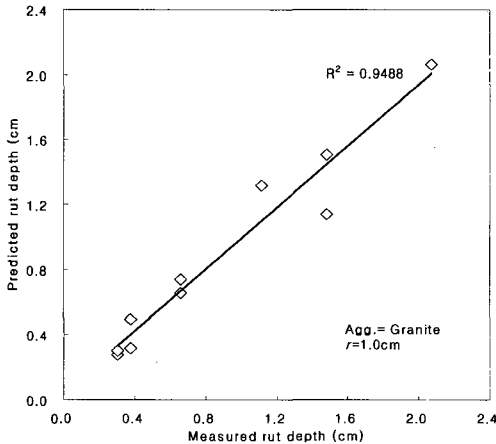


그림 7. Predicted rut depth vs. measured value for granite mixture

5. 결론

본 논문은 아스팔트 콘크리트 포장의 주요파손 형태의 하나인 소성변형 저항성 추정을 보다 쉽게 하기 위하여 새로운 시험기법인 김테스트의 변형강도(K_D) 및 장비를 개발함에 있어 적정 규격을 선정하기 위한 연구로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

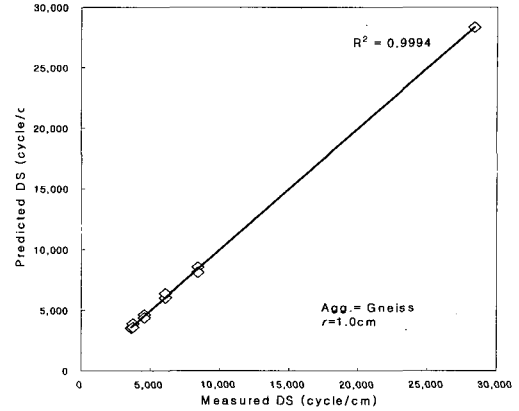


그림 8. Predicted dynamic stability vs. measured value for gneiss mixture

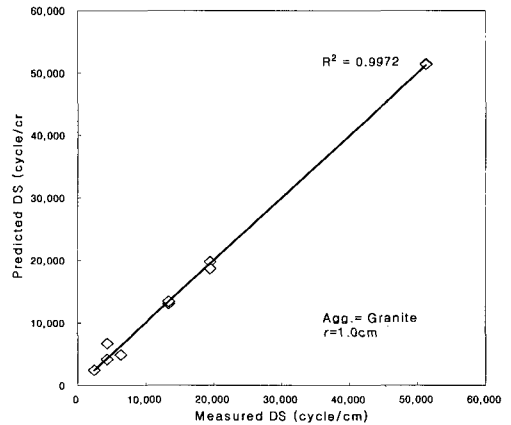


그림 9. Predicted dynamic stability vs. measured value for granite mixture

1. 김테스트에서 기둥의 직경 및 하중봉 하단의 원형처리 반경(r)이 시험에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며 하중봉의 직경과 원형처리 반경이 중요한 변수임을 발견하였다.

2. r 에 따른 K_D 및 변형하중(P_{max})과의 회귀분석을 통한 상관관계 분석결과 $r=0.5$ 와 1.0 cm로



원형 처리한 측정값에서 소성변형과 더 높은 R^2 이 얻어져 하중봉의 하단을 원형 처리가 필요한 것으로 나타났는데 이는 혼합물의 연경도 특성에 따른 수직 변형이 측정치에 적절히 반영되기 때문이라고 보여진다.

3. 하중봉의 직경과 하단 원형처리 반경이 중요 변인임에 비해 공시체의 직경은 중요 변인이 아니었으므로 공시체는 10cm나 15cm 중 어떤 것을 사용해도 괜찮을 것이나 하중봉은 직경 4cm에 반드시 하단을 원형처리를 해야 하고 이때의 절삭 반경 r 은 1.0cm가 가장 좋아 보이며 향후 보다 많은 실험을 통해 표준화가 되도록 연구해야 할 것이다.

4. 새로운 배합설계 방법을 개발한다면 본 실험법의 적용을 검토해 볼 필요가 있으며, 본 연구는 이제 시작단계로서 향후 밀입도 뿐만 아니라 여타 입도, 굵은 골재 최대치수, 다양한 바인더 등을 사용한 혼합물의 소성변형과의 상관성 등도 조사하고 보다 일반화된 결과를 도출하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 강원대학교부설 석재복합신소재 연구센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), "폴리머 (LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성", 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, p. 252.
2. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순재 (2002a), "아스팔트 콘크리트의 고온저항특성 측정방법의 개발," 석재연 논문집 제7권, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터
3. 김광우, 이문섭, 최선주 (2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초 연구," 한국도로포장공학회 논문집에 게재를 위해 제출한 논문.
4. 이상범, (2001), "아스팔트 혼합물의 용적 및 강도특성을 이용한 소성변형 추정 연구", 강원대학교 대학원 박사학위논문
5. Kim, K. W., (1988), "*Determination of critical tensile strength for bituminous concrete surface course*", Dissertation in partial fulfillment of Ph.D. in Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC.

(접수 : 2002. 10. 9)