



소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구

A Fundamental Approach for Developing Deformation Strength Based on Rutting Characteristics of Asphalt Concrete

김 광 우 · 이 문 섭 · 김 준 은 · 최 선 주

Kim, Kwang-Woo · Lee, Moon-Sup · Kim, Jun-Eun · Choi, Sun-Ju

Abstract

This study dealt with developing a new approach for finding properties which might represent rut resistance characteristics of asphalt mixture under static loading. Two aggregates, a normal asphalt (pen 60-80) and 5 polymer-modified asphalts were used in preparation of 12 dense-graded mixtures. Marshall mix design was used in determination of OAC and each mixture at the OAC was prepared for a newly-developed Kim test on Marshall specimen (S=10cm) and gyratory specimen (S=15cm), and for wheel tracking test. Kim test used Marshall loading frame and specimens were conditioned for 30min at 60°C before loading through Kim tester, an apparatus consisting of a loading column and a specimen and column holder. Diameter (D) of column was 3cm and 4cm with each column having different radius (r) of round cut at the bottom. The static load was applied at 50mm/min in axial direction of the specimen, not in diametral direction. The maximum load (P_{max}) and vertical deformation (y) at P_{max} point were obtained from the test. A strength value was calculated based on the P_{max}, r, D and y by using the equation $K_D = 4P_{max} / \pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2$ and is defined as the deformation strength (kgf/cm²). The values of P_{max}/y and K_r=K_D/y were also calculated. In general, the loading column diameter and radius of round cut were significant factors affecting K_D and P_{max} values, while specimen diameter was not. The statistical analyses showed the K_D had the best correlation with rut depth and dynamic stability. The next best correlation was found from P_{max} which was followed by P_{max}/y and K_r in order.

Keywords: deformation strength, rut resistance, loading column, maximum load

요 지

본 논문은 아스팔트 포장의 소성변형 저항성 추정을 보다 쉽게 하기 위하여 새로운 시험법 및 장비를 개발하기 위한 연구이다. 본 연구에서는 다양한 종류의 아스팔트 혼합물을 사용하여 소성변형 저항성과의 상관성이 높게 나타나는 변형강도를 개발하기 위하여 하중봉의 직경(D) 3, 4cm, 각 봉의 하단을 다양하게 원형절삭(r)한 김 테스트를 개발하였다. 이를 이용하여 마샬시험과 같이 공시체를 60°C에 수침처리하고 같은 속도의 정하중을 공시체에 다짐방향으로 가하여 최대하중(P_{max})과 이때의 수직 변위(y)를 구하였다. 변형강도는 개발된 식 $K_D = 4P_{max} / \pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2$ 으로 구하였으며 소성변형 특성치와 평균 R²이 0.77 이상의 높은 상관성을 보였다. 따라서 이 시험방법은 마샬안정도보다 훨씬 소성변형과의 상관관계가 큰 측정치를 얻을 수 있는 방법임을 알 수 있었으며, 특히 기존의 마샬시험기를 그대로 사용하고 공시체도 기존의 방법대로 제조 및 처리하도록 하여 적용이 빠를 것으로 판단된다. 향후 다양한 골재입도, 최대치수, r 등에서도 타당성과 상관성 검증 등을 통해 시험법을 표준화한다면 실용화 가능성이 매우 클 것이다.

핵심용어: 변형강도, 소성변형 저항성, 하중봉, 최대하중

* 정희원 · 강원대학교 농업공학부 교수 · 공학박사 · 033-250-6467
 ** 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284



1. 서론

현재 아스팔트 혼합물 특성 측정방법중 하나인 마샬시험법은 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(이상범, 2001).

그 이유는 여러 가지가 있겠지만 우선 마샬 안정도의 재하형식이 현장 운하중 재하 형식과 다르다는 점이다. 즉, 공시체를 놓고 볼 때 다짐은 축방향으로 하고 하중은 옆 방향에서 쥐어짜듯 가해서 현장에서 골재가 배열되어 있는 방향과 다르게 하중이 가해진다. 또한 다짐방법 자체가 현장 다짐방법과는 달라서 생기는 문제점도 있다. 이 문제점을 해결하기 위해서는 선회다짐기(gyratory compactor)가 개발되었다. 하지만 선회다짐기로 만든 공시체도 안정도를 측정 할 때는 앞서 언급하였듯이 현장과 다른 방향에서 재하를 하여 역시 소성변형과 상관성이 낮은 값이 얻어진다.

또 하나의 문제점은 미국 마샬배합설계 기준(1)에서도 제외된 흐름 값이다. 마샬시험에서의 흐름은 하중에 의한 공시체 직경 축소량의 측정치이나 실제 소성변형에서의 침하 깊이는 지압·압밀과 전단에 의한 수직변형이다. 따라서 안정도와 흐름은 혼합물의 강도나 변형에 대한 저항성이라기보다는 다짐방향에 수직한 방향으로 혼합물이 왜해지는 것에 대한 저항성을 나타내는 수치정도로 볼 수 있다.

최근 국내에서는 소성변형 제어를 위하여 미국의 superpave 배합설계에 관심을 보이고 있다. 하지만 이 방법은 장비가 고가이고 실험시간이 비교적 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 현재 국

내 실정을 살펴보면 이러한 시험은 극히 일부 대학 및 연구기관에서 연구용으로만 수행되고 있다.

이러한 실정을 감안하여 본 연구에서는 비교적 손쉬운 시험방법을 개발하여 일반 혼합물은 물론 개질 혼합물을 포함한 다양한 혼합물의 소성변형을 추정할 수 있는 어떤 특성치를 찾아내는데 그 목적이 있다.

2. 시험법의 개발

2.1 시험방법 개발의 기본 개념

본 연구에서의 시험방법 개발에 있어서 기본적인 철학은 소성변형과의 상관관계가 비교적 높으면서도 측정방법은 간편한 강도치를 구하는 것이다. 따라서 연구를 수행함에 있어 다음과 같은 다섯 가지 원칙을 설정하였다.

- ① 하중은 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가한다.
- ② 재하시 혼합물은 소성변형과 유사하게 지압·압밀 전단에 의한 변형이 유발되도록 한다.
- ③ 시험온도는 소성변형 측정시의 온도와 같은 온도(60℃)에서 수행한다.
- ④ 측정치는 구하기 쉽고 비교적 이해가 쉬워야 한다.
- ⑤ 시험법이 간단하여 향후 보급 및 활용성이 커야 한다.

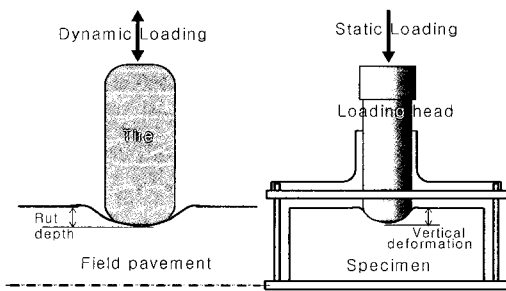
본래 소성변형은 동하중 하에서 발생하는 현상이지만 상기 원칙에 의하여 재하방법은 정하중으로 하고, 속도는 기존의 마샬안정도나 간접인장강도 측정시와 같이 50mm/min로 하였다. 따라서 기존의 마샬시험장치를 그대로 사용할 수 있으며 기타 시험장치들(흐름측정장치, 수조 등)도 그대로 사용할 수 있도록 하여 활용성을 높게 하였다.

이러한 원칙하에 그림 1과 같이 소성변형과 유사한 현상이 일어나는 재하 방법을 선정하기



위한 예비 실험을 실시하였다. 즉, 원칙 ②의 결과를 유발하기 위하여 처음에는 직경 2, 3, 4cm 강재 구슬(steel ball)과 지름 2, 3, 4, 5cm의 하중봉(loading column)을 실험에 적용하였다. 볼 및 하중봉의 지름은 공시체의 직경에 비례하여, 봉 길이는 공시체의 높이를 고려하여 마샬안정도 시험기에 사용할 수 있도록 결정하였다. 실험이 진행되면서 볼 2, 3, 4cm, 하중봉 2cm는 실험 결과에 일관성이 없어, 봉 5cm는 공시체 직경에 비해 너무 커서 제외하고, 본 논문에서는 하중봉 3, 4cm에 의한 시험방법과 결과만을 다루었다.

제시되었다. 그리고 이 하중봉을 편심 없이 수직으로 재하하기 위하여 그림 2에서와 같은 몰드를 개발하고 이를 김테스터(Kim tester)라 명명하고 이 시험법을 김테스트(Kim test)라 명명하였다. 그림 3은 이를 마샬안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이다.



(a) Schematic of rutting (b) schematic of developing test

그림 1. Illustration of loading mechanism by tire and loading column

하중봉으로 재하시 혼합물이 눌러 들어가면서 봉 하단 각진 부분에 골재가 맞물려 깨지는 현상이 일어난다. 따라서 봉 끝 부분을 원형으로 깎아서 (round cutting) 골재와의 맞물림 현상을 줄이고 원형절삭을 안한 하중봉과의 결과를 비교하였다. 하중봉 직경 3cm에는 반경 (radius of round cut: r) 0.5cm의, 하중봉 직경 4cm에는 반경 0.5, 1cm의 원형절삭을 하였다. 이에 대한 자세한 이유와 내용은 문헌(김광우 등, 2002b)에

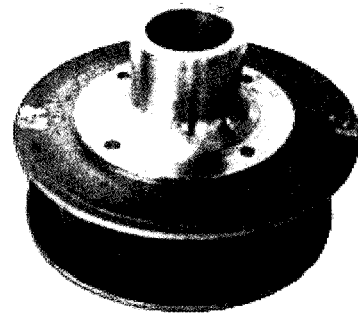


그림 2. Kim tester for 4cm-diameter loading column

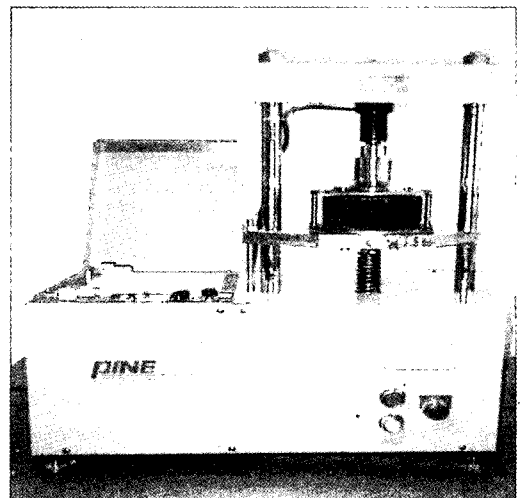


그림 3. Kim tester setting on Marshall press



그림 4는 실험에 사용한 하중봉을 보여주고 있다. 마찰안정도 시험을 하였을 경우 최대하중 및 흐름 값을 구할 수 있듯이 김테스트를 수행 하였을 경우에도 그림 5와 같은 하중-변형곡선이 얻어지며 여기에서 최대하중(P_{max})과 수직변형(y) 값을 얻을 수 있다. 여기서 나온 최대하중/수직변형은 마찰시험에서의 안정도/흐름과 유사한 형식의 값이다. 김테스트에서 최대하중과 수직변형으로 몇가지 특성치를 계산하고 이 특성치들과 소성변형과의 상관성을 비교 분석하여 가장 상관성이 높은 특성치를 찾아내도록 하였다.

2.2 변형강도

그림 6과 같이 직경 D 인 하중 재하용 하중봉의 양 하단을 반경 r 만큼 원형절삭하고 하중에 의해 바닥으로부터 y 만큼 하중봉이 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우를 고려하였다. 그 깊이에서 원의 직경은 그림에서와 같이 $(H+2x)$ 일 것이다.

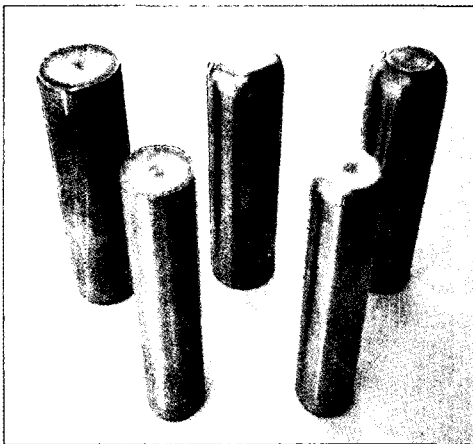


그림 4. Illustration of various loading columns

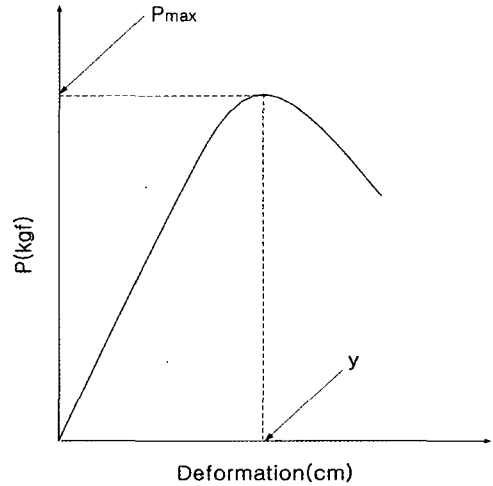


그림 5. A typical load-deformation curve from Kim test

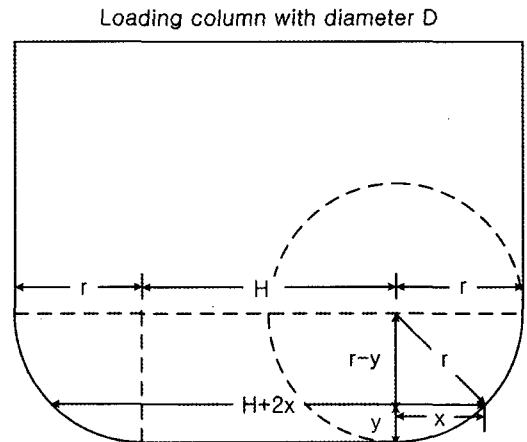


그림 6. Configuration of round-cut and details at the bottom of loading column

이때 x 를 구하기 위해 그림 6의 오른쪽 삼각형에 대해 고려하면,



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

이 성립이 되며, 이를 전개하여 x 에 대해 정리하면,

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

이 얻어지며, 이를 바닥으로부터 y 높이에서의 하중봉의 직경인 $H+2x$ 에 대입하면 $H + 2(\sqrt{2ry - y^2})$ 이고 반경은 $H/2 + \sqrt{2ry - y^2}$ 이 될 것이다. $H=D-2r$ 이므로 이를 이용하여 해당 높이(y)에서 바닥에 투영한 원 면적은

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

여기서 y 는 하중에 의한 수직 변형을 나타내는 값이며, 단위는 cm이다. 따라서 봉이 y 만큼 들어가 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. 그리고 식 (4)의 K_D 를 y 로 나눈 값을 식 (5)의 재하지수(bearing index: K_I)라 명명하였다.

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

$$K_I = \frac{K_D}{y} = \frac{4 P_{max}}{\pi y [D - 2r + 2\sqrt{(2ry - y^2)}]^2} \quad (5)$$

여기서 P_{max} = Maximum load (kgf),

D = Diameter of loading column (cm),

r = radius of round cut (cm),

y = vertical deformation (cm)

K_D 의 단위는 (kgf/cm²),

K_I 단위는 (kgf/cm³)이다.

그리고 y 가 r 과 같거나 큰 경우에 $x = r = y$ 이므로 식 (4)의 분모는 $\pi(D)^2$ 이 되며, 이때 투영 면적은 본래 하중봉의 단면적이고 K_D 는 다음과 같이 된다.

$$K_D = \frac{4P_{max}}{\pi \cdot D^2} \quad (6)$$

식 (4)를 본 연구에서 사용한 하중봉 직경(D)과 원형절삭 반경(r)의 차이에 따라 계산한 K_D 값은 표 1에서와 같이 간단하게 표현된다.

일반적으로 같은 직경의 하중봉이라도 r 이 크면 동일 하중 하에서 수직으로 더 깊이 들어갈 것이다. 즉 수직변형 y 가 더 커지므로 투영 면적이 넓어짐에 따라 K_D 는 줄어들 것이다. 또한 같은 조건에서도 혼합물이 무르면 같은 하중 하에서도 그만큼 y 값이 커진다는 점을 고려하여 300kgf의 동일 하중 하에서 y 의 변화가 0.1~1.0cm에 따라 K_D 가 어떻게 변하는지를 그림 7에 한 예로 나타내었다. y 값이 증가할수록 K_D 가 낮아지며 y 가 r 이상이 되면 수평이 유지된다.

상기 결과를 보면 동일 하중임에도 $y = 0.1$ cm, $D = 3$ cm에서 $r = 0.5$ cm 경우 변형강도가 약 57kgf/cm²이고 $r = 1.0$ cm인 경우 109kgf/cm²로 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 또한 y 의 변화에 따라서도 $r = 1.0$ cm인 $D = 3$ cm의 경우 109~42, $D = 4$ cm의 경우 46~24까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그렇지만 $D=3$ cm, $r=1.0$ cm은 그 변화가 y 에 따라 매우 예민하며 제어가 어렵고 결과에 일관성이 부족하여 예비실험 후 제외하였다. 반면에 하단을 원형 처리 하지 않은 하중봉을 사용한 측정값은 단순



표 1. Simplified equation for K_D for given D and r

Diameter (D, cm)	3		4	
	H (cm)	K_D (kgf/cm ²)	H (cm)	K_D (kgf/cm ²)
0.5	2	$\frac{P_{max}}{\pi(1 + \sqrt{y - y^2})^2}$	3	$\frac{P_{max}}{\pi(1.5 + \sqrt{y - y^2})^2}$
1.0	1	$\frac{P_{max}}{\pi(0.5 + \sqrt{2y - y^2})^2}$	2	$\frac{P_{max}}{\pi(1 + \sqrt{2y - y^2})^2}$

압축강도의 성격을 띠고 있어 같은 P_{max} 하에서 모두 같은 강도가 식 6에 의해 얻어진다.

하지만 원형처리 한 하중봉에 의한 K_D 는 혼합물의 경연도(硬軟度) 차이에 따른 y 의 변화가 그림 7에서와 같이 반영되어 계산되는 수치이다. 즉, 일반적인 강도의 계산은 그림 8과 같이 P_{max} 가 같으면 변형의 크기에 관계없이 같은 값으로 계산되는데 비해 식 4의 K_D 는 y_1 과 y_2 의 차이가 반영된다. 따라서 동일한 D , r 로 시험시 같은 P_{max} 하에서 혼합물이 강해 y 가 작으면(그림 8의 곡선 ①) K_D 는 크게, 혼합물이 물러 y 가 커지면(그림 8의 곡선 ②) K_D 는 작게 나타난다. 따라서 하중 재하시 아스팔트 혼합물의 경연도에 따라 나타나는 수직변형의 차이가 반영되어 계산된 강도인 K_D 를 “변형강도”라 명명하였다.

3. 적용 실험

상기에서 제시한 성능 특성치들을 실제 측정하기 위하여 다양한 (12가지) 혼합물로 직경 10 및 15cm 공시체를 제조하고, 각 공시체별로 하중봉의 D 와 r 에 따른 최대하중 및 수직변형을 구하고 K_D , K_I 등을 계산하였다. 또한 이 특성치들이 소성변형과 어느 정도의 상관성을 가지는지를 분석하기 위하여 동일 혼합물에 대하여 반복주행 실험을 수행하고 이를 통계분석 하였으며 이에 대한 자세한 실험 및 분석 내용들은 다

음과 같다.

3.1. 사용재료

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 생산되고 우리 나라에서 널리 사용되고 있는 침입도 60-80인 AC 60-80 아스팔트이다.

본 연구에서는 최적 골재를 선정하기 위하여 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(gneiss)과 화강암(granite)을 선정하였다. 골재 치수는 19mm 골재, 잔골재(fine aggregate), 채움재(mineral filler)를 사용하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질시험한 결과는 표 2와 같다. 또한 굵은골재 최대치수를 19mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다.

본 연구에서 사용된 폴리머는 LDPE와 SBS

표 2. Properties of aggregates

Classification	Agg.	19mm agg.	Fine agg.	Filler
Specific gravity	Gneiss	2.72	2.72	2.75
	Granite	2.72	2.74	
Absorption	Gneiss	0.70	0.26	
	Granite	0.55	1.41	
Abrasion	Gneiss	18.1		
	Granite	19.6		

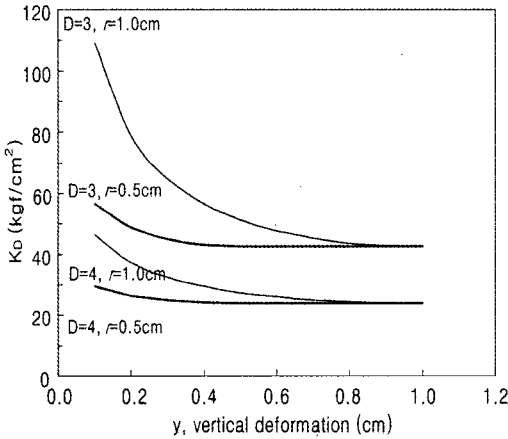
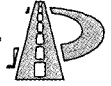


그림 7. Variation of K_D due to y , D and r under a 300kgf of loading.

이다. 두 폴리머 재료 (LDPE, SBS)를 아스팔트 양의 중량비로 각각 LDPE는 4%, 6%, SBS는 3%, 5% 비율로 AC 80-100 아스팔트에 혼합하여 개질 아스팔트를 제조하였다. 이 비율은 문헌 조사와 연구의 결과(김광우 등, 2000)를 통하여 개질 효과가 조금씩 차이가 나도록 적절히 조절한 것이며 개질 아스팔트 제조방법 등은 문헌(김광우 등, 2002a)에 제시되어 있다.

3.2 배합설계

본 연구에서는 골재 두 종류(편마암, 화강암), 폴리머 두 종류(LDPE, SBS)를 두 가지 첨가함량으로, 한 종류 PG72-22 개질아스팔트를 사용하였다. 배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적 아스팔트 함량(OAC)은 공시체 제작시 OAC로 이용되었다. 공시체는 KS F 2337 마살식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 공시체의 양면을 각각 50회씩 다짐하여 직경 100mm의 공시체를 제조하였다. 표 3은 사용된 각종 혼합물에 대한 설명이다.

직경 100mm 공시체와 비교를 위해 선회(gyratory) 다짐기로 직경 150mm 공시체를 만들었다. 선회다짐기로 배합설계를 하였을 경우

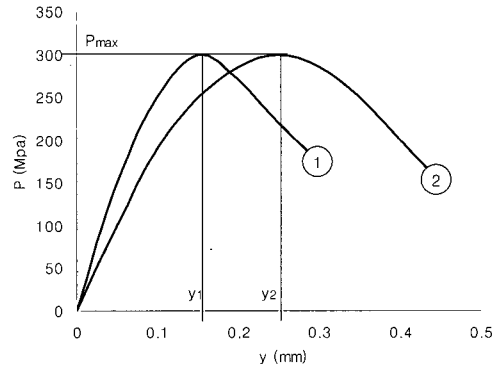


그림 8. Two curves under the same P_{max} with different y .

최적 아스팔트함량이 마살식과 다르게 된다. 그래서 최적 함량을 마살과 같이 맞추기 위하여 선회다짐 횟수를 미국 superpave Level 1 배합설계에 나와 있는 평균설계 대기온도(고온) 39°C 이하의 값을 사용하지 않고 최적 아스팔트 함량이 일치하고 공극이 4%에 맞는 다짐 횟수를 찾았다. 이는 44회이었으며 모든 혼합물에 다짐횟수를 44회로 하여 선회다짐을 하였을 경우 마살 방법과 같은 최적 아스팔트 함량과 공극 4%에서 일치하여 실험에 적용하였다.

3.3 마살안정도 시험

다짐 몰드에서 약 4시간 식힌 후 탈형한 공시체를 상온에서 20시간 보관 후 60°C의 수조에 30분 동안 수침시킨 후 수조에서 꺼내어 표면의 물기를 마른 수건으로 제거하고 바로 하중을 50mm/min 속도로 재하하였다. 최대하중과 흐름값을 이용하여 안정도-흐름 지수를 구하여 소성 변형과의 상관성을 추정하기 위한 자료로 사용하였다.



표 3. 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.

3.4 김테스트

표 3의 각 혼합물별로 OAC에서 직경 10cm(S=10) 마샬공시체와 직경 15cm(S=15) 자이레토리 공시체를 각각 3개씩 제조하여 24시간 25°C 실내에 보관 후 김테스트를 수행하였다. 시험전 30분간 공시체를 60°C 수조에 넣었다가 꺼내어 물기를 닦은 후 신속하게 김테스터에 넣고 마샬시험기를 이용하여 그림 5와 같은 하중과 수직 변형을 측정하였다.

3.5 반복주행시험

아스팔트 포장의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험이 반복주행 (wheel tracking) 시험이다. 본 연구에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 305mm×305mm×70mm의 슬래브 공시체를 공극률 4%를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 시험온도 60°C에서 6시간 이상 저장 후 반복주행 시험기로 시험을 수행하였다.

반복주행시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하

였고 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.

4. 결과 및 고찰

4.1 아스팔트의 특성

본 연구에 사용된 LDPE, SBS 폴리머 개질 아스팔트의 침입도, 점도는 폴리머 함량에 따라 측정하였으며 그 결과는 표 4와 같다. 개질 아스팔트는 폴리머 함량이 증가함에 따라 점도는 증가하고 침입도는 감소하였다. 따라서 아스팔트 종류 별로 폴리머 첨가에 따른 약간의 차이는 있겠지만 아스팔트의 온도 민감성을 저하시킴으로서 소성변형 저항성을 향상시키는 것으로 나타났다.

표 4. Penetration and viscosity of polymer-modified asphalts

Binder Properties	Penetration 25°C (0.1mm)	Absolute Viscosity 60°C (poise)	Kinematic Viscosity 135°C (cP)
ADOO	60	2,464	425
ADL4	66	2,400	636
ADL6	63	5,229	1,047
ADS3	65	2,901	580
ADS5	62	6,966	1,048
ADPG	67	4,708	805



4.2 반복주행시험

슬래브 공시체를 제조하여 시험온도 60℃에서 70kgf 하중하에 왕복 횟수 2,700 cycle로 실험한 결과는 표 5와 같다. 반복주행시험결과 얻어진 최종 침하깊이 (rut depth)와 동적안정도 (dynamic stability)는 본 연구에서 개발한 김테스터의 결과치와 비교·분석하는데 사용하였다.

표 5. Final rut depth and dynamic stability of wheel tracking test

Property Mixtures	Final rut depth (cm)	Dynamic stability (cycle/cm)
ADOO	1.8617	3616
ADLA	1.3968	4580
ADL6	1.0274	6081
ADS3	1.8298	3733
ADS5	0.8758	8428
ADPG	0.373	28368
BDOO	2.072	2445
BDLA	1.479	4355
BDL6	0.376	19455
BDS3	1.116	6360
BDS5	0.659	13436
BDPG	0.301	5128

4.3 김테스터

표 6~11은 김테스터로 측정된 최대하중 (P_{max}), 수직변위 (y), 변형강도 (K_D) 치를 나타내고 있다. 직경 10cm 마살공시체와 직경 15cm Gyrotory 공시체에 대해 5가지 하중봉으로 실험을 하였다. 직경을 구분한 이유는 공시체 직경과 봉 직경의 비에 따른 결과를 비교하기 위해서이다. 표 7, 10, 11에서 볼 수 있듯이 직경 15cm 공시체를 사용한 경우 $D=3cm$, $r=0.5cm$ 봉의 경우만 더 큰 값들이 얻어졌고(P_{max} ratio=1.28, K_D ratio =1.18) 나머지 경우는 10cm 공시체를 사용한 경우와 평균적으로 큰 차이가 없었다.

혼합물의 종류에 따라 각 값들이 차이가 나고

있으며 K_D 값은 r 과 y 에 따라 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 현 단계의 실험은 기존의 안정도 값과의 비교에도 중점을 두고 있다. 김광우 등(4)에 의하면 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 인장강도 및 소성변형 저항성이 높다는 것을 알 수가 있다. 또한 LDPE 4%보다 LDPE 6%가 높고 SBS 5%가 SBS 3%보다 높다는 것도 알 수가 있다. 김테스터의 결과치를 살펴보면 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 측정치들이 높다는 것을 알 수 있다.

4.4 통계분석

공시체 크기 (S), 하중봉 직경 (D), 원형절삭 반경 (r), 골재(Agg), 그리고 같은 직경에서 r 별로 ($D \times r$), 같은 공시체 크기에서 하중봉 직경별로 ($S \times D$)에 통계적 유의성이 있는지 확인하기 위하여 일반선형모델(general linear model: GLM) 통계처리과정을 수행하였다. 사용된 통계 프로그램은 SAS (statistical analysis system)이며 표 12와 13은 본 연구에서 관심이 가장 큰 변형강도 (K_D)와 최대하중 (P_{max})에 대한 ANOVA를 보여주고 있다.

두 표에서 보듯이 하중봉의 직경 D 와 원형처리반경 r 은 변형강도(K_D)와 최대하중(P_{max})에 통계적으로 심각한 영향을 주는 (유의확률 0.0001이하) 요인이었다. 따라서 적합한 직경의 하중봉과 하중봉 하단을 원형으로 절삭할 때 반지름 r 의 선정이 중요함을 알 수 있었다

하지만 공시체 종류와 하중봉 직경과의 교호작용($S \times D$)을 보면 K_D 에서는 유의성이 나타난 반면 P_{max} 에서는 나타나지 않아 K_D 값은 같은 공시체 중에서도 하중봉 직경에 영향을 받는 값을 알 수 있었다.



표 6. Marshall stability at OAC and P_{max} (kgf) using Kim tester for S=10cm specimen

Mixture types	Marshall stability (kgf)	Loading column D = 3cm		Loading column D = 4cm		
		$r = 0\text{cm}$	$r = 0.5\text{cm}$	$r = 0\text{cm}$	$r = 0.5\text{cm}$	$r = 1.0\text{cm}$
ADOO	1,054	442	290	-	468	376
ADL4	1,239	494	282	764	531	386
ADL6	1,219	576	253	822	692	576
ADS3	1,155	520	254	692	499	461
ADS5	1,221	498	-	756	695	550
ADPG	1,257	-	318	826	-	-
BDOO	1,259	473	337	692	510	-
BDL4	1,177	605	-	-	605	408
BDL6	1,364	602	410	855	616	419
BDS3	1,104	493	396	873	633	415
BDS5	1,008	585	413	727	613	441
BDPG	1,191	639	447	858	-	476

표 7. P_{max} (kgf) using Kim tester for S=15cm specimen

Mixture types	Loading column D = 3cm				Loading column D = 4cm					
	$r = 0\text{cm}$	Ratio	$r = 0.5\text{cm}$	Ratio	$r = 0\text{cm}$	Ratio	$r = 0.5\text{cm}$	Ratio	$r = 1.0\text{cm}$	Ratio
ADOO	484	1.10	333	1.15	654	*	424	0.91	-	*
ADL4	563	1.14	431	1.53	836	1.09	616	1.16	507	1.31
ADL6	548	0.95	458	1.81	779	0.95	543	0.78	514	0.89
ADS3	529	1.02	401	1.58	-	*	439	0.88	529	1.15
ADS5	541	1.09	-	*	753	0.99	556	0.80	483	0.88
ADPG	556	*	507	1.59	836	1.01	696	*	620	*
BDOO	293	0.62	253	0.75	467	0.67	417	0.82	312	*
BDL4	484	0.80	386	*	616	*	412	0.68	367	0.90
BDL6	572	0.95	408	1.00	591	0.70	-	*	396	0.95
BDS3	730	1.48	-	*	-	*	707	1.12	-	*
BDS5	509	0.87	357	0.86	609	0.84	546	0.89	411	0.93
BDPG	799	1.25	560	1.25	920	1.07	764	*	578	1.21
Mean		1.02		1.28		0.91		0.89		1.02

Ratio = (P_{max} for S=15cm)/(P_{max} for S=10cm).

* No value available due to missing test data.



표 8. K_D using D=3cm loading column of Kim tester for S=10cm specimen

Mixture types	Loading column D = 3cm					
	$r = 0cm$			$r = 0.5cm$		
	P_{max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	P_{max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)
ADOO	442	0.174	62.59	290	0.221	46.15
ADL4	494	0.186	69.86	282	0.182	46.76
ADL6	576	0.203	81.53	253	0.171	42.56
ADS3	520	0.207	73.61	254	0.165	43.03
ADS5	498	0.216	70.41	-	-	-
ADPG	-	-	-	318	0.200	51.64
BDOO	473	0.170	66.87	337	0.172	56.70
BDL4	605	0.190	85.60	-	-	-
BDL6	602	0.221	85.17	410	0.189	67.41
BDS3	493	0.211	69.72	396	0.215	63.37
BDS5	585	0.220	82.77	413	0.212	66.25
BDPG	639	0.241	90.41	447	0.242	69.86

표 9. K_D using D=4cm loading column of Kim tester for S=10cm specimen

Mixture types	Loading column D = 4cm								
	$r = 0cm$			$r = 0.5cm$			$r = 1.0cm$		
	P_{max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	P_{max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	P_{max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)
ADOO	-	-	-	468	0.190	41.60	376	0.189	47.62
ADL4	764	0.237	60.79	531	0.195	47.01	386	0.195	48.79
ADL6	822	0.199	65.42	692	0.180	62.05	576	0.195	72.21
ADS3	692	0.212	55.07	499	0.199	44.04	461	0.210	56.40
ADS5	756	0.225	60.19	695	0.210	60.81	550	0.190	69.61
ADPG	826	0.220	65.70	-	-	-	-	-	-
BDOO	692	0.178	55.07	510	0.181	45.73	-	-	-
BDL4	-	-	-	605	0.210	52.94	408	0.228	48.51
BDL6	855	0.199	68.00	616	0.180	55.20	419	0.210	51.28
BDS3	873	0.236	69.48	633	0.200	55.96	415	0.230	49.20
BDS5	727	0.210	57.84	613	0.210	53.46	441	0.210	53.91
BDPG	858	0.237	68.31	-	-	-	476	0.211	58.22



표 10. K_D using D=3cm loading column of Kim tester for S=15cm specimen

Mixture types	Loading column D = 3cm							
	$r = 0\text{cm}$				$r = 0.5\text{cm}$			
	P_{\max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Ratio	P_{\max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Ratio
ADOO	484	0.199	68.47	1.09	333	0.250	51.59	1.10
ADL4	563	0.233	79.71	1.14	431	0.212	69.17	1.48
ADL6	548	0.225	77.57	0.95	458	0.224	72.52	1.80
ADS3	529	0.212	74.89	1.02	401	0.314	59.54	1.38
ADS5	541	0.262	76.50	1.09	-	-	-	*
ADPG	556	0.419	78.64	1.23	507	0.347	74.04	1.49
BDOO	293	0.205	41.51	0.62	253	0.208	40.82	0.73
BDL4	484	0.190	68.47	0.80	386	0.203	62.42	0.85
BDL6	572	0.221	80.89	0.95	408	0.190	66.91	0.99
BDS3	730	0.306	103.21	1.48	-	-	-	*
BDS5	509	0.245	72.00	0.87	357	0.223	56.64	0.85
BDPG	799	0.347	113.09	1.25	560	0.406	80.12	1.17
Mean				1.04				1.18

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

* No value available due to missing test data.

표 11. K_D using D=4cm loading column of Kim tester for S=15cm specimen

Mixture types	Loading column D = 4cm											
	$r = 0\text{cm}$				$r = 0.5\text{cm}$				$r = 1.0\text{cm}$			
	P_{\max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Ratio	P_{\max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Ratio	P_{\max} (kgf)	y (cm)	K_D (kgf/cm ²)	Ratio
ADOO	654	0.174	52.06	0.71	424	0.280	35.50	0.85	-	-	-	*
ADL4	836	0.229	66.50	1.09	616	0.254	52.38	1.11	507	0.224	60.62	1.25
ADL6	779	0.212	61.99	0.95	543	0.280	45.54	0.73	514	0.246	59.66	0.83
ADS3	-	-	-	*	439	0.254	37.28	0.85	529	0.275	59.09	1.01
ADS5	753	0.210	50.55	0.84	556	0.309	45.96	1.06	483	0.322	51.12	1.03
ADPG	836	0.381	66.50	1.33	696	0.347	56.72	1.46	620	0.309	66.50	1.77
BDOO	467	0.219	37.13	0.67	417	0.201	36.79	0.80	312	0.258	35.62	0.63
BDL4	616	0.161	49.05	0.68	412	0.178	37.02	0.69	367	0.237	43.06	0.82
BDL6	591	0.163	47.06	0.84	-	-	-	*	396	0.235	46.60	0.91
BDS3	-	-	-	*	707	0.350	57.58	1.03	-	-	-	*
BDS5	609	0.197	48.45	0.84	546	0.267	46.07	0.86	411	0.258	46.83	0.86
BDPG	920	0.317	73.24	1.07	764	0.402	61.38	1.33	578	0.373	58.13	1.05
Mean				0.9				0.97				1.01

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

* No value available due to missing test data.



표 12. GLM results for dependent variable K_D .

Source	df	Sum of square	Mean square	F	Pr > F
Specimen (S)	1	0.0446	0.0446	0.00	0.9846
Diameter (D)	1	4111.7944	4111.7944	35.41	<0.0001
Radius of round cut (r)	2	4017.2973	2008.6487	17.30	<0.0001
Aggregate (Agg)	1	1.2663	1.2663	0.01	0.9171
$D \times r$	1	268.3251	268.3251	2.31	0.1318
$S \times D$	1	584.1515	584.1515	5.03	0.0272
Error	96	11148.5093	116.1303		
Total	103	21608.1266			

표 13. GLM results for dependent variable P_{max} .

Source	df	Sum of square	Mean square	F	Pr > F
Specimen (S)	1	484.49	484.49	0.05	0.8233
Diameter (D)	1	830777.07	830777.07	85.96	<0.0001
Radius of round cut (r)	2	1134135.33	567067.66	58.67	<0.0001
Aggregate (Agg)	1	139.67	139.67	0.01	0.9046
$D \times r$	1	161.84	161.84	0.02	0.8973
$S \times D$	1	29474.97	29474.97	3.05	0.0840
Error	96	927848.88	9665.09		
Total	103	2499447.96			

반면에 공시체의 종류 (S=10cm 마살공시체, S=15cm gyratory 공시체), 골재(편마암, 화강암), 하중봉 직경과 r 과의 교호작용($D \times r$)에서는 P_{max} 와 K_D 에 통계적으로 유의차가 나타나지 않았다. 따라서 김테스트의 P_{max} 와 K_D 는 이들 변수, 즉 공시체 크기 및 골재의 종류 등에 영향을 받는 수치가 아님을 알 수 있었다.

4.5 상관성 연구

이제까지 실험 결과를 4가지 변수(공시체, 봉 직경, r 및 골재)별로 분류하여 회귀분석을 수행하였으며 독립변수는 마살안정도(kgf), 안정도/흐름, 김테스트의 P_{max} , P_{max}/y , K_D , K_I 이며 종속변수는 소성변형 최종침하깊이와 동적안정도이다. 회귀분석 방법으로는 침하깊이(Rut depth: RD) 또는 동적안정도(DS)를 종속변수로 하여 상기 각 특성별로 선형(linear), 곡선(curvilinear),

대수(logarithm), 지수(exponential), x 의 누승(power) 회귀분석을 통해 결정계수(coefficient of determination: R^2)가 가장 높은 모델을 선정하였다.

마살안정도와 RD 및 DS와의 상관관계는 표 14에서 보듯이 매우 낮다. 비록 안정도를 흐름으로 나눈 값이 다소 더 높은 상관관계를 보이거나 역시 0.26이하로서 매우 낮은 편이다. 한편 기존의 연구에서 간접인장강도와 소성변형과의 R^2 은 최고 0.54까지 얻어졌다(이상범, 2001).

표 14. Correlation coefficient between stability and rut depth

Property	Stability (kgf)	Stability/Flow (kgf/cm)
Rutting depth (RD, cm)	0.0801	0.2552
DS (cycle/cm)	0.0371	0.2596

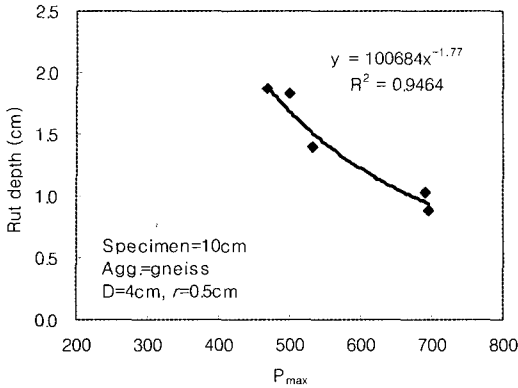


그림 10. Best-fit regression curve for P_{max}

그림 10~13은 각 특성별로 상관성이 우수하게 나타난 대표적인 회귀분석 예를 보여준다. 각 변수별로 최적모델을 얻은 회귀분석법은 다르지만 $R^2=0.89\sim0.97$ 로 매우 높았다. 그 중에서도 K_D 와 DS의 경우가 가장 상관성이 높는데 이는 화강암 골재로 만든 15cm 공시체에 $D=4cm$, $r=1cm$ 하중봉을 사용한 경우에서 얻어졌으며 이때 회귀식은 2차 함수 모델이었다. 반면 P_{max} 는 x 의 누승, P_{max}/y 와 K_I 는 지수함수 모델이 얻어졌다. 변형에 강한 혼합물에서 소성변형 침하깊이는 줄어들고, 동적 안정도는 증가되는 것이 일반적인 현상인데 경우에 따라 그 반대의 경향을 나타내는 모델은 현실성이 없어 선정에서 제외하였다. 또한 주어진 구간 내에서 급격한 상승-하강, 또는 하강-상승 추세를 나타내는 모델도 실제현상과 맞지 않으므로 제외하였다(김광우 등, 2002a). 이와 같이 비정상적인 형태로 추세가 나타난 모델의 R^2 값은 표 15, 16에서 모두 0.001로 처리하고 "*"로 나타내었다. 표 15는 각 혼합물별로 공시체 크기, 골재, 하중봉의 직경과 그에 따른 김테스트의 4가지 특성치와 소성변형 침하깊이(RD)와의 회귀분석에서 얻어진 결정계수(Coefficient of determination, R^2)를 보여준다. 마찬가지로 방법으로 상기 4가지 특성치와 동적안정도(DS)와의 R^2 값을 표 16에서 보여준다.

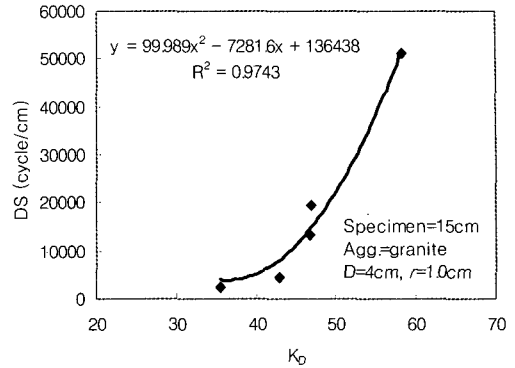


그림 12. Best-fit regression curve for K_D

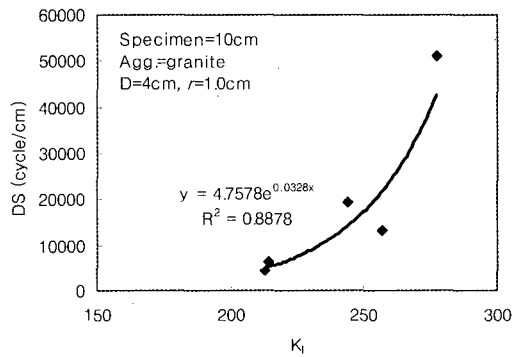


그림 13. Best-fit regression curve for K_I

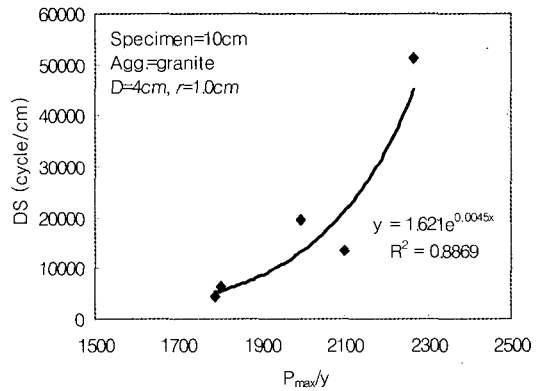


그림 11. Best-fit regression curve for P_{max}/y

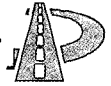


표 15. Coefficient of determination (R^2) between Kim test variables and rut depth

Specimen	Agg.	Prop.	R^2 for rut depth (RD)					Mean	Mean by group
			D=3cm		D=4cm				
			r=0	r=0.5	r=0	r=0.5	r=1.0		
Marshall specimen S=10cm	Gneiss	P_{max}	0.2768	0.4181	0.7784	0.9464	0.5022	0.58	$K_D = 0.662$ $P_{max} = 0.615$
		P_{max}/y	0.0001*	0.3206	0.3301	0.7921	0.7318	0.54	
		K_D	0.2768	0.5422	0.7784	0.9342	0.6994	0.64	
	Granite	K_I	0.0001*	0.1618	0.3301	0.7551	0.7409	0.50	
		P_{max}	0.5396	0.8472	0.4217	0.6037	0.6680	0.62	
		P_{max}/y	0.0001*	0.0001*	0.0121	0.6121	0.7572	0.46	
Gyatory specimen S=15cm	Gneiss	K_D	0.5396	0.9350	0.4217	0.6675	0.7622	0.67	$P_{max}/y = 0.415$ $K_I = 0.390$
		K_I	0.0001*	0.0001*	0.0121	0.5607	0.7908	0.45	
		P_{max}	0.4240	0.7580	0.6717	0.7551	0.5120	0.62	
	Granite	P_{max}/y	0.0001*	0.4251	0.0001*	0.6147	0.0173	0.35	
		K_D	0.4240	0.8108	0.6717	0.7716	0.6249	0.66	
		K_I	0.0001*	0.3655	0.0001*	0.4766	0.0001*	0.42	
Mean		P_{max}	0.6096	0.6731	0.5661	0.6328	0.7156	0.64	
		P_{max}/y	0.2644	0.1426	0.0854	0.0001*	0.7516	0.31	
		K_D	0.6096	0.7303	0.5661	0.6329	0.8179	0.67	
		K_I	0.2644	0.0713	0.0854	0.0001*	0.3844	0.20	
Mean			0.42	0.51	0.41	0.70	0.63	0.53	

표 16. Coefficient of determination (R^2) between Kim test variables and dynamic stability.

Specimen	Agg.	Prop.	R^2 for dynamic stability (DS)					Mean	Mean by group
			D=3cm		D=4cm				
			r=0	r=0.5	r=0	r=0.5	r=1.0		
Marshall specimen S=10cm	Gneiss	P_{max}	0.1083	0.5501	0.4824	0.8279	0.3697	0.47	$K_D = 0.590$ $P_{max} = 0.560$
		P_{max}/y	0.0001*	0.2471	0.1933	0.6056	0.6642	0.43	
		K_D	0.1083	0.6733	0.4824	0.7920	0.6036	0.53	
	Granite	K_I	0.0001*	0.1388	0.1933	0.5555	0.6615	0.39	
		P_{max}	0.4356	0.6222	0.3562	0.2676	0.9002	0.52	
		P_{max}/y	0.0001*	0.0001*	0.0056	0.5114	0.8869	0.47	
Gyatory specimen S=15cm	Gneiss	K_D	0.4356	0.5927	0.3562	0.5560	0.9091	0.57	$P_{max}/y = 0.391$ $K_I = 0.410$
		K_I	0.0001*	0.0001*	0.0056	0.4421	0.8876	0.45	
		P_{max}	0.1578	0.6792	0.3607	0.5302	0.7570	0.50	
	Granite	P_{max}/y	0.0001*	0.3124	0.0001*	0.5343	0.0001*	0.42	
		K_D	0.1578	0.6132	0.3607	0.5377	0.8056	0.5	
		K_I	0.0001*	0.2580	0.0001*	0.4061	0.0001*	0.33	
Mean		P_{max}	0.4069	0.9362	0.9088	0.4832	0.9543	0.74	
		P_{max}/y	0.2627	0.0609	0.0511	0.0001*	0.5079	0.22	
		K_D	0.4069	0.9372	0.9088	0.6054	0.9743	0.77	
		K_I	0.2627	0.0812	0.0511	0.0001*	0.1452	0.14	
Mean			0.27	0.48	0.34	0.55	0.72	0.47	



표 17. R^2 of K_D with rut depth(RD) and dynamic stability(DS)

Dependent variable	Specimen	Agg.	R^2 for				
			D=3cm		D=4cm		
			$r=0$	$r=0.5$	$r=0$	$r=0.5$	$r=1.0$
RD	S=10cm	Gneiss	0.2768	0.5422	0.7784	0.9342	0.6847
		Granite	0.5396	0.9350	0.4217	0.6675	0.7622
	S=15cm	Gneiss	0.4240	0.8108	0.6717	0.7716	0.6249
		Granite	0.6096	0.7303	0.5661	0.6329	0.8179
DS	S=10cm	Gneiss	0.1083	0.6733	0.4824	0.7920	0.6036
		Granite	0.4356	0.5927	0.3562	0.5560	0.9091
	S=15cm	Gneiss	0.1578	0.6132	0.3607	0.5377	0.8056
		Granite	0.4069	0.9372	0.9088	0.6054	0.9743
Mean			0.3698	0.7293	0.5683	0.6872	0.7728

전체적으로 하중봉 직경과 r 별로 보면 직경 3cm, 4cm 봉 하단에 원형처리하지 않은 $r = 0$ 에서 R^2 이 가장 낮게 나타났고, 그 다음이 $r = 0.5$ 이고 $r = 1.0$ 에서 가장 높게 나타났다. 특성치별로 보면 최대하중을 수직변형으로 나눈 P_{max}/y 나 K_I 에서는 R^2 이 0.0001로 처리되거나 0.1이하의 낮은 것들이 많다. 이는 회귀분석 모델이 현실성이 없거나 소성변형 저항성과 이들 값의 크기가 적절한 상관관계를 가지지 못한다는 의미이다. 따라서 R^2 의 평균값도 K_I 가 가장 낮고 다음으로 P_{max}/y 가 낮게 나타났다.

반면에 변형강도 K_D 와 최대하중 P_{max} 는 타 변수에 비해 소성변형 깊이(RD)와 동적안정도(DS) 모두에서 전반적으로 R^2 값이 높게 나타났다. 이는 이 두 값이 비교적 소성변형과의 상관성이 크다는 의미이며 K_D 의 경우 RD(표 15)와는 평균 약 0.66이상, DS(표 16)와는 0.59이상을 보여 양호한 편이었다. P_{max} 의 경우는 이보다 다소 낮았으며 RD와는 평균 약 0.61이상, DS와는 0.56이상을 보였다.

$r=0$ 의 경우 P_{max} 와 K_D 는 R^2 값이 같게 되는데 이는 봉의 하단이 원형으로 처리되질 않아 y 값이 고려되질 않기 때문이다. 그리고 $r = 0$ 의 경우 $r = 0.5$ 나 1.0보다 R^2 값들이 대부분 더 낮은데 이는 혼합물의 특성에 따른 수직 변형이 반영되

지 않기 때문이라고 보여진다.

따라서 본 연구에서 개발한 김테스트로 얻어진 특성치 중에서는 변형강도 K_D 가 소성변형과 가장 큰 상관관계를 나타내므로 변형강도가 큰 혼합물은 상대적으로 소성변형에 강한 것임을 의미한다고 볼 수 있다. 따라서 표 17에는 R^2 이 가장 높게 나타나는 특성치인 변형강도의 R^2 값들만을 요약해서 정리하였다. 그러므로 이 값을 1차적으로 내변형 혼합물을 선정하는데 있어 활용하는 것이 가능할 것으로 보여지며, 이 경우 소성변형과의 상관성을 나타내는 결정계수(R^2)가 평균 $R^2 > 0.7728$ (최저 0.6, 최고 0.97)을 가져올 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문은 아스팔트 콘크리트 포장의 주요파손 형태의 하나인 소성변형 저항성 추정을 보다 쉽게 하기 위하여 새로운 실험기법 및 장비를 개발하여 시험에 적용하고자 시도한 기초연구로서 아직 초기 단계이며, 이제까지 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 개발한 변형강도 (deformation strength : K_D)는 소성변형 특성치와의 결정계수 (R^2)가 $r = 1$ cm 원형절삭한 직경 4cm 하중봉을 사용할 경우 평균 0.77 이상을 보여 상당한 상관



성이 있는 강도특성치 임을 확인하였다. 이는 기존의 정하중 하에서의 측정치인 안정도($R^2 = 0.03 \sim 0.26$)나 간접인장강도($R^2 = 0.54$) 등과 비교하여 매우 높은 상관성을 가지는 것으로 인식된다

2. 이와 같이 소성변형과의 상관성이 비교적 높게 나타나는 것은 혼합물의 경연도에 따른 수직변형이 계산식에 반영되기 때문이다. 즉, 일반 강도 계산식은 파괴하중이 같으면 그때의 변형에 관계없이 강도 값이 같이 계산되는데 비해 KD는 변형이 계산식에 반영되었기 때문이라 판단된다.

3. 따라서 하중봉 하단의 원형절삭이 매우 중요한 것으로 확인되었다. 즉, 절삭반경 r 에 따른 상관성 분석결과 $r=0$ 보다 $r = 0.5$ 와 1.0cm 가 훨씬 더 높은 R^2 가 얻어져 하중봉의 하단을 원형 처리하는 것이 분명히 더 좋은 것으로 나타났는데 이는 혼합물의 경연도 특성에 따른 수직 변형을 변형강도치에 적절히 반영하는 역할을 하기 때문이다. 따라서 향후 보다 여러 종류의 r 에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 다른 특성치들의 동일한 상관분석 결과 평균 R^2 은 변형강도(K_D), 최대하중(P_{max}), P_{max}/y , 재하지수(K_I)의 순으로 나타났는데 그중 P_{max} 의 R^2 도 전체평균 R^2 는 0.61 이상이어서 상당한 수준이었다.

5. 개발된 실험 방법은 기존의 마살방법보다 훨씬 소성변형과의 상관관계가 큰 측정치를 얻을 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 특히 기존의 마살시험기를 그대로 사용하고 또한 공시체도 기존의 방법대로 제조 및 처리하도록 하여 적용이 빠를 것으로 생각된다. 따라서 향후 다양한 골재 입도, 최대치수, r 등에서도 타당성과 상관성 검증 을 통해 시험법을 표준화한다면 실용화 가능성이 매우 클 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교부설 석재복합신소재연구센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. "가열 아스팔트혼합물의 배합설계 지침." (1998), 아스팔트포장연구회, 도서출판 정보나라.
2. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002a), "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발," 석재연 논문집, 제 7 집, 강원대학교 석재복합 신소재연구센터.
3. 김광우, 이문섭, 이순제 (2002b), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집 게재를 위해 제출한 논문.
4. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순제 (2000), "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계구명," 석재연 논문집, 제5집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, pp.63-74.
5. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), "폴리머 (LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성", 아스팔트포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, p. 252.
6. 이상범, (2001), "아스팔트 혼합물의 공극 및 강도 특성을 이용한 소성변형 추정 연구", 강원대학교 대학원 박사학위논문
7. 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.
8. 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.

(접수 2002. 10. 9)