



고온 내변형 아스팔트혼합물 선정을 위한 변형강도 임계치 결정 방안

Suggestion for Determination of Minimum S_b for Rut-Resistable Asphalt Concretes

김 광 우* 조 병 진** 이 순 제*** 도 영 수****
Kwang W. Kim Byung J. Cho Soonjae Lee Young S. Doh

Abstract

Deformation strength (S_b) is a property which shows relatively good correlation with rut resistance of asphalt mixtures at high temperature. The Asphalt Pavement Analyzer (APA) is widely used as an equipment for estimating rut resistance of asphalt mixtures. The APA was used as corresponding property of the S_b to estimate rutting resistance of asphalt mixtures. Many data were collected to establish the correlation of S_b with APA. For S_b test, the specimen is submerged into the 60°C water for 30 minutes before applying a vertical load at the speed of 50mm/min to obtain peak load (P) and deformation (y) for S_b calculation. For the same materials, APA test was performed. Relation of the S_b with APA rut depth was evaluated using regression analysis. The R^2 value was 0.76, indicating this simple test procedure being a possible method for predicting deformation resistance of asphalt concretes at high temperature. It was also shown that, using the regression model, minimum value(s) of S_b of surface course asphalt mixture or binder course for a particular road level can be determined. The limit values may be possible to use as cut-off value(s) of asphalt mixtures for the layer after further elaborated studies.

Keywords : deformation strength, S_b , asphalt concrete, pavement, rutting, APA.

요 지

변형강도(S_b)는 고온에서 아스팔트 혼합물의 소성변형특성과 상관관계가 높은 특성이며, APA 시험기는 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 평가에 널리 이용된다. 따라서 S_b 를 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 추정에 상응하는 값으로 APA 시험 결과가 사용되었으며 S_b 와 APA의 상관관계를 설정하기 위하여 많은 데이터가 수집되었다. 아스팔트 공시체를 60°C에 30분간 수침한 후 50mm/min의 하중을 가하여 최대하중 P와 그때의 수직변형 y로부터 S_b 를 계산하였다. 같은 혼합물에 대하여 APA 시험도 수행되었다. APA 침하깊이와 S_b 간의 회귀분석을 수행하여 $R^2=0.76$ 이 얻어졌다. 이는 변형강도 시험이 아스팔트 혼합물의 고온변형 저항성을 추정 가능한 시험법임을 암시하는 것이다. 또한 회귀분석 모델을 이용하여 특정 등급도로의 표층 및 기층 혼합물 S_b 의 임계값을 설정할 수 있음을 보였다. 이를 더 정교하게 연구하면 이 임계치는 특정층 포장혼합물의 하한치로 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 변형강도, 아스팔트 콘크리트, 포장, 러팅, APA

* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수

** 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정

*** 정희원 · Research Assistant Professor, Clemson University, Clemson, SC, USA

**** 정희원 · 강원대학교 석재신소재센터 연구교수



1. 서론

수퍼페이브(Superpave) 시스템은 바인더를 여러 단계의 성능등급(Performance grading, 또는 PG 등급)으로 구분하도록 개발되었으며 국내에서도 이를 KS에 도입하였다. 높은 PG 고온등급의 바인더는 고온에서도 높은 전단저항($G^*/\sin\delta$)을 가지므로 변형저항성이 큰 점이 고유의 특성이다. 하지만 아스팔트 혼합물의 소성변형은 압축과 전단변형의 동시 작용에 의하여 발생하므로 바인더의 전단저항성은 물론 골재의 경도와 입도에 영향을 받는다. 따라서 같은 PG등급의 바인더로 제조된 혼합물도 골재나 입도가 다르거나 재료의 배합비가 다르면 소성변형 저항성이 다르게 나타난다(김광우 등 2004a,b). 이와 같은 이유로 수퍼페이브 배합설계에서는 같은 바인더를 사용해도 아스팔트 혼합물의 강도 및 변형특성에 대한 측정규정이 없어 배합비가 다르거나 다짐이 달라도 그 강약을 제대로 구분해내지 못한다.

또한 현재 국내에서 쓰이는 Marshall 안정도나 흐름은 혼합물의 강도나 변형저항성과 같아 보이지만 소성변형 특성과 상관성이 낮다(이상범 등 2001). 현재 우리가 비교적 쉽게 접하는 시험 중 소성변형 특성이 제대로 반영된다고 판단되는 것은 Wheel tracking(WT) 시험이나 Asphalt pavement analyser(APA) 시험이다. 회복탄성계수(M_R) 시험 및 동적 크리프(Dynamic creep) 시험 등도 소성변형 특성이 반영되어 나타나는 시험이지만 동하중에 의한 시험으로 비교적 어렵고 숙련된 기술자가 아니면 시험치에 오차가 큰 경우가 많다.

WT, APA 결과와의 상관성이 우수하며 현장공용성과의 상관성도 좋으며 시험법이 비교적 간단한 Kim test에 의한 변형강도(김광우 등 2002a,b,c, 2005, 이문섭 2004, Doh et al. 2006, Kim et al. 2003, 2004a,b, 2005a,b,c, Park et al. 2007)도 소성변형과의 상관성이 높게 나타나는 특성치이다(Doh et al. 2006, 김광우 등 2003). 이 변형강도(Deformation strength: S_b)는 정하중시험으로 동

하중시험과 유사한 소성변형특성 평가가 얻어지므로 이의 사용은 혼합물의 소성변형저항성을 보다 쉽게 판정하게 할 것이다.

만일 어떤 등급의 도로에 사용될 아스팔트 혼합물의 S_b 를 어느 임계치 이상으로 제한하면 WT나 APA에서 일정수준 이상의 결과를 요구하는 것과 유사한 결과를 얻게될 것이다. 따라서 WT나 APA의 시험결과와 S_b 의 상관관계를 여러 혼합물에 대하여 분석하여 왔다. 여러 종류의 혼합물로 각각에 대해 WT 시험과 S_b 시험을 수행하고 두 특성간에 회귀 분석을 수행한 결과 그 결정계수(R^2)가 평균 0.8 이상이었다. 또한 APA와 S_b 를 회귀분석한 결과도 R^2 이 0.8 정도 얻어져서 상관성이 높음을 확인하였다. 따라서 WT나 APA 시험의 결과치에 대한 규정상의 임계치가 있다면 이를 근거로 S_b 의 임계치를 결정할 수 있을 것이다.

현재 국내에서는 WT 시험이 혼합물의 상대비교를 위해 사용되나 침하깊이에 대한 규정은 없고 동적안정도(Dynamic stability: DS)에 대한 규정만 있다. 최종 침하깊이에 대한 규정이 없는 것은 장비의 규격화가 미비한데 기인한다. KS의 DS 규정은 WT시험에서 얻은 곡선의 후반 1/4 구간의 기울기 역수를 취해 구하도록 되어있어 종종 최종 침하깊이가 깊어도 동적안정도는 높게 나타나는 경우가 있다. 따라서 새로운 동적안정도 산정기준 제정방안(김광우 등 2006, 2004d)이 제시되는 등 현재로서는 WT 시험에 의한 깊이나 DS를 통한 소성변형 저항성 판정에 논란이 있어 향후 체계적인 장비규격 및 기준의 재정립이 필요하다.

미국의 여러 주에서는 APA 시험치를 가지고 배합 설계된 혼합물의 소성변형 저항성을 판정하고 있다. 그 기준을 이용하면 혼합물의 소성변형저항성을 판정하는 기준으로 S_b 의 임계치를 결정하는 방안을 마련할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구의 가설은 이렇게 S_b 임계치기준을 정하여 배합설계 단계부터 적용하면 소성변형에 상당한 저항성을 가지는 혼합물을 제조할 수 있으리라는 것이다. 이에 본 연구의 목적



은 바인더, 골재, 배합비, 입도특성에 따라 차이가 나는 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성을 도로의 등급에 따라 적용되는 APA기준을 근거로 S_D 기준을 설정하는 방안을 제시하는 것이다.

2. 변형강도(S_D) 및 APA시험방법

변형강도시험은 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물이 소성변형과 유사하게 수직압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 바닥이 둥근 하중봉을 사용한다. 선회다짐기(Superpave gyratory compactor: SGC)로 제조하거나 코어에서 얻어진 공시체를 반복주행(Wheel tracking) 시험에서와 같은 시험온도인 60℃ 상태로 만들기 위해 사전에 60℃ 물에 30분간 넣었다가 꺼내어 하중봉을 통해 수직으로 정하중을 가한다.

변형강도의 계산공식의 특징은 재하면적 A의 계산에 있다. 하중이 가해져 공시체가 파괴될 때 하중봉과 공시체가 맞닿은 면적은 사발과 같이 곡면을 이루고 있고 붓이 눌러 들어간 깊이에 따라 차이가 나므로 정확한 접촉면적의 계산이 어렵다. 하지만 유체역학에서 수압의 작용면적을 투영면적으로 계산하듯이 하중봉이 공시체 표면과 맞닿은 면적을 투영 원의 면적으로 취한다. 이 경우 하중봉의 눌러 들어간 깊이에 따라 투영 원의 직경이 달라져 면적이 변한다. 따라서 변형강도는 하중 P와 재하면적 A의 함수이며, A는 하중봉의 침하깊이로 측정되는 혼합물의 수직변형 y (그림 1)의 함수가 된다. 즉, 변형강도는 하중과 수직변형값이 둘 다 계산에 고려되므로 단순 $\sigma = P/A$ 공식과 달리 비선형 거동을 하는 소성재료에 적용될 수 있으며 고온에서 소성변형이 유발되는 아스팔트 혼합물의 강도계산에 적용이 가능한 것이다.

변형강도는 그림 1과 같은 하중봉이 외력에 의해 표면으로부터 y 만큼 눌러 들어갈 경우의 하중(P)을 빗금친 원면적으로 나누어 구한다. 식 (1)은 이와 같이 개발된 것이며 그림 2(a)는 실제 공시체에 하

중을 가하는 사진이다.

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

여기서, S_D = 변형강도(MPa), P = 최대하중(N), r = 하중봉 하단의 원형절삭반경(mm), y = 파괴시 최대하중에서의 수직 침하깊이(mm)이다. 식 (1)에 의한 강도 값은 변형에 저항하는 재료의 강도(Material strength against deformation)를 의미하므로 이를 변형강도(Deformation strength: S_D)라 명명하고 이 시험법을 개발자의 성을 따라 Kim Test라 명명하였다(Kim et al. 2004). 본 연구에서는 직경 150mm 공시체를 높이 75mm로 제조하여 APA에 사용하였으며 변형강도 시험용 공시체는 높이를 62mm로 절단하여 사용하였다.

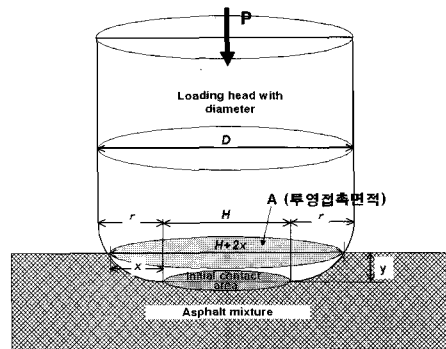
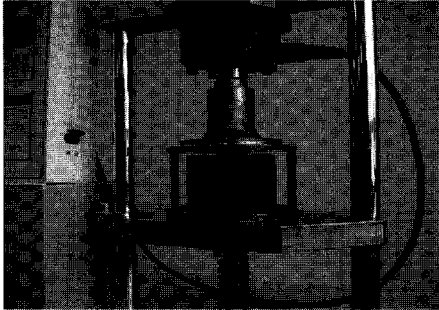


그림 1. 하중봉이 공시체에 눌러 들어간 모식도

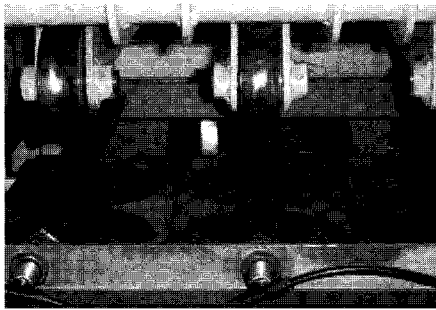
Asphalt pavement analyzer (APA) 시험에는 선회 다짐기로 제작된 원주형 공시체 6개를 세 줄로 몰드에 넣어 배열해 놓고 그 위에 100psi 압력의 공기를 넣은 직경 3cm 고무호스를 웨드로 이용하여 690kPa의 압력을 가하는 강제바퀴가 그 위에 왕복주행한다(그림 2(b)). 주행속도는 1Hz이며 총 140분간 8,400cycle을 주행후 침하깊이를 측정하여 혼합물의 소성변형저항성을 추정한다(Kandhal and Mallick 1999). 공시체는 직경 150mm, 높이 75mm의 Gyratory 다짐 공시체이며 시험온도는 64



℃로서 공시체를 사전에 4시간 이상 이 온도에 보관 한 후 사용하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) Kim Test setup, (b) inside view of Asphalt pavement analyzer

3. 변형강도(S_D)에 의한 소성변형 추정

3.1 실내시험

3.1.1 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와의 관계

Superpave 연구결과에 의하면 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 는 그 자체가 바인더의 소성변형 저항성을 나타내는 척도이다. 또한 아스팔트 혼합물을 만들었을 때, 골재의 영향을 고려하더라도 $G^*/\sin\delta$ 는 지배적인 영향을 나타낸다. 따라서 같은 입도와 종류의 골재를 사용할 경우 $G^*/\sin\delta$ 의 대소는 혼합물의 소성변형 저항성의 강약에 거의 그대로 반영된다.

선행연구(김광우 등 2005)에서는 이에 따른 영향

이 S_D 시험을 통해 얼마나 잘 반영되는지를 그림 3~그림 6에서 보여준다. 그림 3, 4는 $G^*/\sin\delta$ 와 변형강도의 관계이다. $G^*/\sin\delta$ 가 커지면 S_D 도 커지며

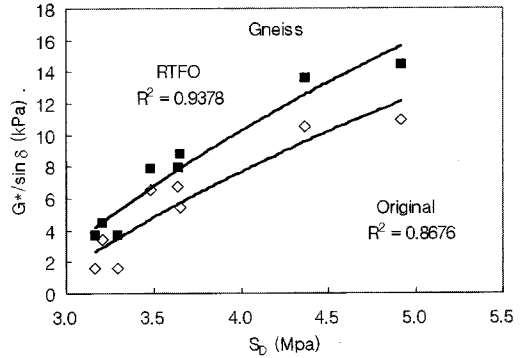


그림 3. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 편마암골재 혼합물 S_D 와의 상관관계 (김광우 등 2005)

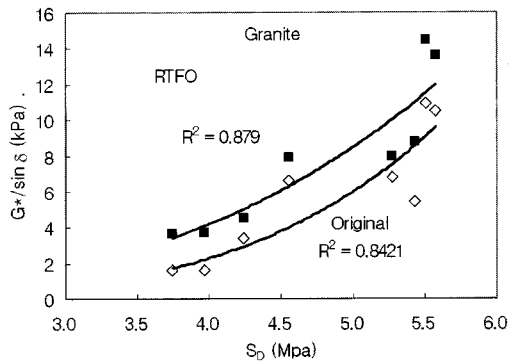


그림 4. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 S_D 와의 상관관계 (김광우 등 2005)

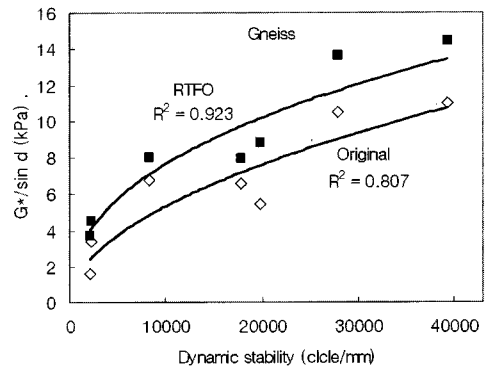


그림 5. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 편마암골재 혼합물 동적안정도와의 상관관계(김광우 등 2005)

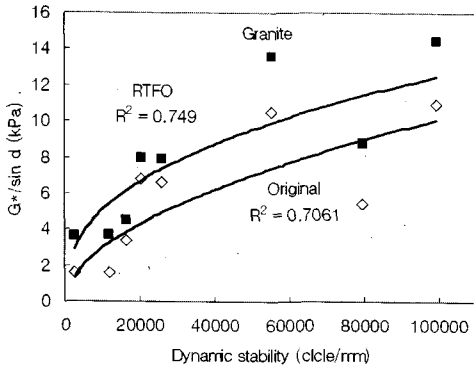


그림 6. 바인더 $G^*/\sin\delta$ 와 화강암골재 혼합물 동적안정도와와의 상관관계(김광우 등 2005)

골재별, 바인더 노화상태별로 조금씩 차이는 있으나 평균 $R^2=0.88$ 로 매우 높아, 그림 5, 6의 $G^*/\sin\delta$ 와 WT 시험의 동적안정도와와의 관계의 평균 $R^2=0.80$ 보다 더 높다. 이는 바인더 특성에 따른 혼합물의 소성변형 특성이 S_b 시험을 통해 매우 잘 나타나며 WT 시험에 비해서도 못하지 않다는 의미이다.

3.1.2 Wheel tracking (WT) 시험, APA 시험과의 상관성

바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와 S_b 의 상관관계가 우수하므로 이를 잘 알려진 소성변형 판정시험방법인 WT 시험과 Asphalt pavement analyzer(APA)의 결과와 다양한 골재와 바인더를 사용하여 비교하였다. 혼합물 종류별로 구분하면 더 높기도 하지만 사용된 모든 혼합물을 가지고 회귀분석한 결과를 그림 7에서 보

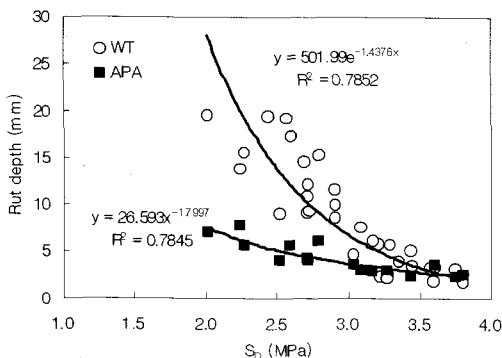


그림 7. 전체 혼합물의 S_b 와 APA 및 WT의 상관관계 (Doh et al. 2006)

여주듯이 각각 R^2 이 약 0.78 이상이다. 이는 WT나 APA와 S_b 의 상관관계가 양호하므로 특정 혼합물의 소성변형특성 추정을 위해 WT나 APA 대신 S_b 를 사용할 수 있음을 시사하는 것이다.

3.2 현장시험

특정 아스팔트 혼합물의 변형강도 강약이 WT 특성과 상관성이 있음을 확인하였다. 하지만 이는 여러 가지 조건이 제어된 단순 왕복하중하에서 이루어진 시험에 대한 상대비교이다. 따라서 실제 현장에서의 소성변형상태와 그 위치의 혼합물이 가지는 변형강도를 측정해서 상관성이 있는지를 확인하는 것은 변형강도의 실용성 판단을 위해 매우 중요하다.

본 연구에서는 기존에 공용중에 있는 아스팔트 포장에서 소성변형이 나타나는 지점과 그렇지 않은 지점에서 그림 8과 같이 가운데 평편한 부분(Mid-lane)에서 외부직경 100mm 코어를 채취하였다. 그리고 같은 선상의 양 바퀴자국 (Wheel path)의 소성변형 깊이를 측정하고 평균을 내어 이를 코어에서 측정된 변형강도와와의 상관성분석에 사용하였다. 채취한 코어에서는 최상부를 약 62mm 높이로 절단하여 변형강도 측정에 사용하였다.

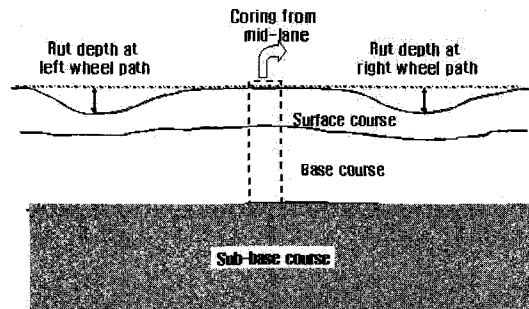


그림 8. 코어 채취위치의 모식도

코어 공시체의 S_b 와 해당 위치의 좌우궤적에서 측정한 소성변형깊이 평균의 상관관계를 회귀분석한 결과를 그림 9에서 보여준다. 그림의 각 점은 2년간



의 14개소에서 각각 3-4개씩 총 47개의 코어를 채취하여 평균한 것이며 전체 $R^2=0.75$ 이상이 얻어졌다. 이는 S_b 가 현장 소성변형특성과 상당한 관계를 가짐을 의미한다. 즉, 현장 혼합물의 종류에 구분 없이 S_b 가 강한 혼합물로 포설되어 있는 지점은 소성변형이 낮고 그렇지 못한 지점은 소성변형이 높다는 것을 보여주는 것이다. 여러 변수에 의한 변동요인에도 불구하고 현장데이터에서 $R^2>0.75$ 수준이 얻어진 것은 S_b 가 현장 성능과 높은 상관성을 가진다는 의미이다. 따라서 이 결과는 실내 실험은 물론 현장 data를 통해서도 혼합물의 S_b 가 소성변형과 양호한 상관관계를 가짐을 보여준 것이다

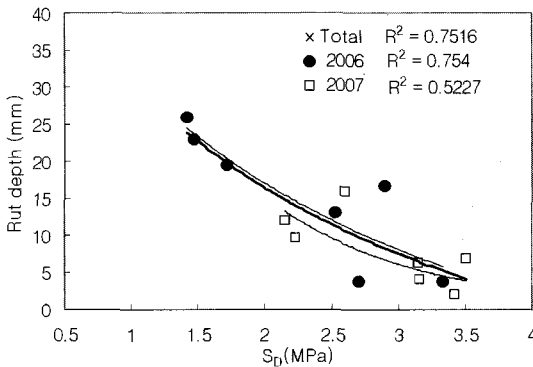


그림 9. 현장소성변형 깊이와 S_b 의 관계

4. APA data에 근거한 S_b 기준치 설정방안

4.1 APA와 S_b 의 상관관계 분석

미국에서는 APA를 아스팔트 포장의 고온변형 특성평가를 위한 기본시험기로 사용하는 수가 늘고 있다. 즉, 미국에서 소성변형이 문제가 되는 여러 주에서는 배합설계된 아스팔트 혼합물을 포설하기 전 소성변형 취약성평정을 위해 APA를 사용한다. 실제로 South Carolina주에서는 State Highway급 이상의 도로의 경우 해당 플랜트에서 배합설계를 마치고 현장배합비(Job-mix formula: JMF)와 재료를 주도

로국 실험실(Materials laboratory at South Carolina Department of Transportation: SCDOT Lab)로 보내서 공시체를 제조하여 APA를 수행하고 그 결과에 따라 합격여부를 판정한다. 즉, 64℃에서 PG64-22를 사용한 표층이나 중간층(Binder or Intermediate course) 혼합물은 APA rut depth가 5mm 이하, PG76-22 혼합물은 3mm 이하가 되어야 합격을 시킨다. 만일 이를 만족하지 못하면 돌려보내 재배합설계를 지시하고 재검증과정을 거친 다음 현장포설에 들어간다(Amirkhanian and Kim 2007).

본 연구에서는 이렇게 공신력이 있게 사용되는 APA와 S_b 의 상관관계를 이용해 APA Cut-off 값에 근거한 S_b 값을 찾을 수 있는지에 대하여 분석하였다. 이를 위해 APA 장비를 사용하는 미국 South Carolina(SC)주 도로국 재료실험실(SCDOT Lab)과 Clemson 대학교 Asphalt Rubber Technology Service Laboratory (ARTS Lab) 실험실을 이용하여 APA 시험과 S_b 시험을 각각 수행하였다. 사용된 혼합물은 SC주의 실제 도로에 사용될 여러 지역의 플랜트에서 배합설계된 혼합물이다.

SCDOT Lab에서는 2007년 상반기 주내의 각 도로별 포장에 포설하기 위해 배합설계된 혼합물의 공시체를 제조하여 무작위로 일부를 선정하여 APA 시험을 수행하고 나머지를 ARTS Lab으로 가져와 S_b 시험을 수행하였다. 이들은 지난 1월부터 7월까지 6개월간 3~4주 간격으로 매년 5~10가지로 총 50가지 이상의 혼합물을 시험하였으며 그 데이터는 표 1과 같으며 이를 S_b 순서대로 APA data와 함께 배열한 것을 그림 10에서 보여준다. 대부분의 표층 혼합물은 13mm 밀입도이고 중간층 혼합물은 19mm 밀입도이다.

이 data를 표층과 중간층 둘로 구분하여 APA rut depth와 S_b 간의 회귀분석을 수행하였다. 그림 11의 표층용 혼합물의 APA rut depth와 S_b 의 R^2 은 0.70으로서 양호한 편이다. 또한 그림 12의 중간층용 혼합물의 APA rut depth와 S_b 의 R^2 은 0.73으



표 1. APA rut depth and S_b at each OAC

Surface course mixture						Binder course mixture					
Agg. source	Binder	OAC (%)	Air Void (%)	APA (mm)	S_b (MPa)	Agg. source	Binder	OAC (%)	Air Void (%)	APA (mm)	S_b (MPa)
Hanson-Sandy Flats	64-22	4.7	4.2	3.67	3.74	Vulcan-Rockingham	64-22	4.5	4.0	1.91	7.04
Vulcan-Palmetto	64-22	5.3	4.1	2.32	5.30	Vulcan-Rockingham	64-22	4.7	4.2	3.65	2.90
Vulcan-Palmetto	64-22	5.0	3.7	2.99	5.59	Vulcan-Lyman	76-22	5.0	4.1	0.81	11.38
Vulcan-Rockingham	64-22	5.0	4.2	2.98	5.37	Vulcan-Rockingham	64-22	4.7	4.1	3.43	4.12
Martin Marietta	64-22	5.3	4.1	5.20	2.76	Hanson-Jefferson	64-22	5.2	3.8	6.70	3.44
Martin Marietta	64-22	5.0	3.5	1.87	4.93	Hanson-Jefferson	64-22	4.7	3.9	3.80	5.70
Hanson-Lowry's	64-22	5.5	3.7	5.70	4.83	Martin Marietta	64-22	4.8	4.4	1.45	7.60
Vulcan-Blacksburg	64-22	5.4	4.0	2.16	6.16	Martin Marietta	64-22	4.5	4.1	1.74	7.04
Vulcan-Blacksburg	64-22	4.6	3.4	2.13	6.83	Martin Marietta	64-22	4.8	3.9	2.10	6.13
Vulcan-Rockingham	64-22	6.5	7.7	10.00	1.85	Martin Marietta	64-22	4.5	3.9	1.14	6.17
Martin Marietta	64-22	5.6	3.9	6.09	2.85	Vulcan-Rockingham	76-22	4.4	3.6	0.91	10.67
Vulcan-Gray Court	64-22	5.7	4.2	2.63	4.21	Hanson-Lowry's	64-22	4.9	3.9	2.67	5.18
Martin Marietta	64-22	5.3	3.5	2.89	4.64	Martin Marietta	64-22	5.3	4.0	4.38	2.85
Vulcan-Blacksburg	64-22	4.7	3.4	1.37	7.76	Vulcan-Blacksburg	64-22	4.0	4.0	1.01	8.05
Vulcan-Rockingham	64-22	5.5	4.1	4.71	2.74	Martin Marietta	64-22	4.8	3.9	1.50	6.92
Martin Marietta	64-22	5.0	3.7	1.46	7.57	Vulcan-Stoney Point	64-22	4.4	3.9	4.28	3.31
Martin Marietta	64-22	5.4	3.8	4.31	3.10	Hanson-Jefferson	64-22	4.5	4.0	3.79	4.21
Vulcan-Stoney Point	64-22	5.7	4.2	6.40	2.30	Martin Marietta	64-22	4.8	3.8	1.80	5.79
Hanson-Jefferson	64-22	5.3	3.4	5.00	3.41	Martin Marietta	64-22	4.7	3.5	2.35	5.39
Vulcan-Blair	64-22	5.5	4.1	7.02	3.21	Vulcan-Liberty	64-22	4.3	3.8	2.48	-
Hanson-Jefferson	64-22	5.4	4.1	4.62	3.97	Vulcan-Rockingham	64-22	4.6	3.9	1.99	7.40
Hanson-Anderson	64-22	5.4	3.7	4.50	4.63	Vulcan-Gray Court	76-22	4.7	3.9	2.76	5.15
Martin Marietta	64-22	5.4	4.0	3.87	4.90	Vulcan-Gray Court	64-22	4.6	4.3	1.37	9.30
Vulcan-Palmetto	64-22	6.0	4.1	5.41	4.37	Hanson-Jefferson	64-22	4.3	4.1	3.69	6.41
Martin Marietta	64-22	5.2	4.0	1.91	6.12	Vulcan-Liberty	64-22	4.6	4.0	2.10	8.24
Vulcan-Blacksburg	64-22	4.6	3.9	1.18?	5.42	Vulcan-Pacolet	64-22	4.5	4.0	1.17	7.71
Vulcan-Rockingham	64-22	5.2	3.8	3.09	5.34						

로서 좀 더 높은 편이었다. 두 층 혼합물간에는 중간 층 혼합물의 S_b 가 약간 높고 R^2 이 다소 높은 외에 S_b 에 따른 APA 변화 경향도 매우 유사하여 이를 통합하여 전체 data로 회귀분석한 결과를 그림 13에서 보여준다. 전체 혼합물의 APA rut depth와 S_b 의 R^2 는 0.76으로서 좀 더 높은 편이었다.

4.2 S_b 임계치 설정방안

두 회귀곡선은 유사한 형태이며 각 곡선의 회귀식을 이용하여 APA rut depth와 S_b 를 추정한 결과를 혼합물 별로 표 2~4에서 보여준다. 표 2에서 보면 S_b 의 증가에 따라 추정 APA 값이 낮아지며 S_b 가 2.0MPa에서 9mm 이상이던 APA 값이는 3.0과

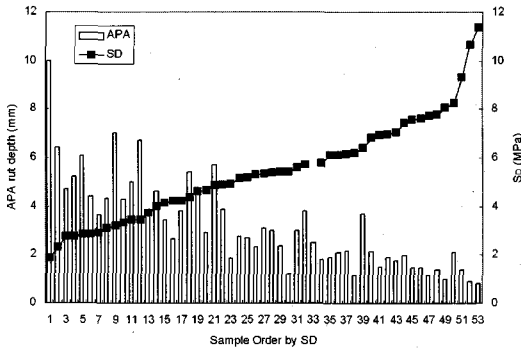


그림 10. APA data from SCDOT Lab and S_D data from ARTS Lab

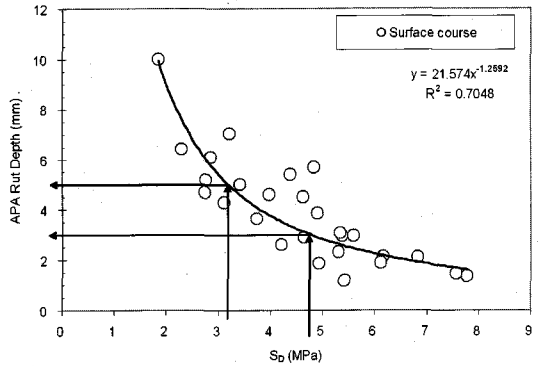


그림 11. Relation of APA rut depth with S_D for surface course mixtures

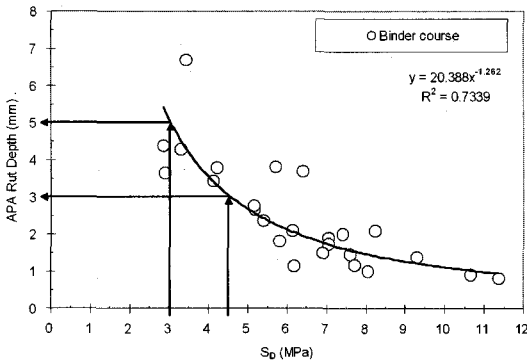


그림 12. Relation of APA rut depth with S_D for binder course mixtures

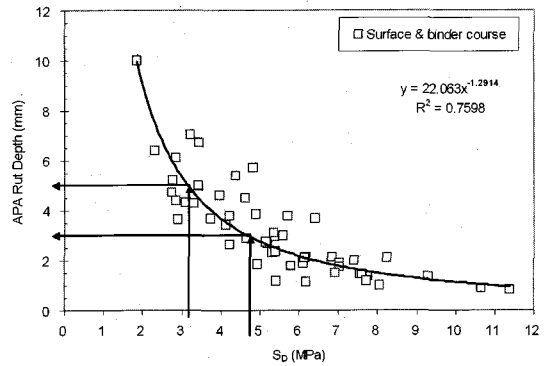


그림 13. Relation of APA rut depth with S_D for all mixtures

표 2. Predicted APA rut depth based on S_D and slope of curve for surface course mixtures

S_D (MPa)	2.000	3.000	3.193	4.000	4.795	5.000	6.000	7.000
Rut(mm)	9.013	5.409	5.001	3.765	3.000	2.843	2.260	1.861
Slope	-5.674	-2.270	-1.972	-1.185	-0.787	-0.716	-0.474	-0.335

표 3. Predicted APA rut depth based on S_D and slope of curve for binder course mixtures

S_D (MPa)	2.000	3.000	3.045	4.000	4.565	5.000	6.000	7.000
Rut (mm)	8.501	5.096	5.001	3.545	3.000	2.675	2.125	1.749
Slope	-5.364	-2.144	-2.073	-1.118	-0.771	-0.675	-0.447	-0.315

표 4. Predicted APA rut depth based on S_D and slope of curve for total mixtures

S_D (MPa)	2.000	3.000	3.156	3.500	4.000	4.688	5.000	6.000	7.000
Rut(mm)	9.014	5.340	5.001	4.376	3.683	3.000	2.761	2.182	1.788
Slope	-5.820	-2.299	-2.046	-1.615	-1.189	-0.826	-0.713	-0.470	-0.330



4.0MPa에서는 5.4mm와 3.8mm로 급속히 감소된다. 이는 각 S_b 별 곡선의 접선기울기(slope)의 절대값에서도 잘 보여주며 S_b 가 2.0MPa에서 5.7이던 기울기 절대값은 3.0과 4.0MPa에서는 2.3와 1.2대로 급격히 감소되었다. 이와 유사한 현상은 표 3, 4에서도 볼 수 있듯이 모두 유사하게 나타났다. 기울기가 크면 그만큼 곡선의 변화율이 크므로 S_b 의 적은 차이에도 APA에 큰 차이가 발생함을 의미한다.

SCDOT에서 규정하는 PG64-22와 PG76-22 바인더를 사용한 혼합물의 APA rut depth 기준치는 각각 5mm와 3mm 이하이다. 이 기준으로부터 국내 일반도로용 아스팔트 포장 바인더인 AC60-80의 PG등급이 대략 64~22 이므로 국내에 적용할 수 있는 S_b 임계값을 추정할 수 있다. 또한 국내에서도 고속도로 등 간선도로는 개질아스팔트를 사용하며 PG 등급으로 76~22를 사용하므로 그에 상응하는 S_b 의 임계값을 추정할 수 있을 것이다.

앞선 분석에 의하면 APA 소성변형 깊이가 각 기준 5mm와 3mm이하로 발생될 최소 S_b 를 회귀식을 이용하여 역으로 추정하면 표층(Surface course)의 경우 3.193MPa와 4.795MPa이고 중간층(Binder course)의 경우 3.045MPa와 4.565MPa이다. 따라서 국내에서 가장 많이 쓰이는 아스팔트인 침입도 60~80 (AP-5)에 해당하는 PG64~22의 경우에 APA 깊이가 5mm 이하로 되려면 표층용 혼합물 data상의 S_b 추정값이 3.193MPa 이상이어야 한다.

S_b 가 3.0~6.0MPa 구간에서 곡선의 변화가 크므로 그림에서 보듯이 S_b 가 3.0MPa에서 4.0MPa로 1.0MPa 증가에 따른 APA 깊이 감소폭이 S_b 가 5.0MPa에서 6MPa로 1.0MPa 증가 할 때와 큰 차이가 난다. 즉, APA 변화율을 나타내는 접선기울기의 절대값이 S_b 값이 낮을수록 크게 나타났다. 이는 S_b 가 낮을수록 APA 값의 변화가 크다는 의미이므로 곡선의 기울기가 임계 S_b 설정에 고려되어야 할 것이다.

그러므로 64~22의 임계치로 계산된 $S_b = 3.193MPa$ 부근곡선의 기울기 절대치가 1.972로서 APA rut depth의 변화가 크므로 안전률을 고려하여 10% 정도를 크게 취하면 3.51MPa이 된다. 그러나 실제 활용의 편리성을 위해 규격상의 소수점 두 자리 이하의 값을 무시하면 3.5MPa을 취할 수 있으며 이를 표 5에 제안하였다. 이때 곡선의 접선의 기울기 절대치는 1.6으로 낮아졌다. 그리고 PG76-22 혼합물의 경우, APA 깊이가 3mm 이하로 되려면 S_b 는 4.795MPa 이상으로 추정된다. 이것도 안전률을 고려하여 증가시키지만 S_b 4.795MPa 지점은 3.193MPa 지역의 기울기 1.972의 40% 수준인 0.787이므로 4%만을 증가시키면 4.987MPa이 된다. 그리고 규격상의 값으로는 이를 반올림하여 5.0MPa로 설정하여 표 5에 제안하였다. 이와 같은 방식으로 South carolina의 기준을 인용하여 국내에서의 기준을 설정하는 안을 표층, 중간층 및 두 층

표 5. 바인더 등급에 따른 변형강도 임계값 제시의 예

Layer	Binder	APA limit (mm)	Estimated S_b (MPa) at 60°C	Suggested S_b limit (MPa) at 60°C	Action for failed mixture	Note
Surface course	PG64-22	≤5.0	≥3.193	3.5	re-mix design	dense grade 13mm
	PG76-22	≤3.0	≥4.759	5.0	//	
Binder course	PG64-22	≤5.0	≥3.045	3.4	//	dense grade 19mm
	PG76-22	≤3.0	≥4.565	4.8	//	
Total	PG64-22	≤5.0	≥3.156	3.5	//	dense grade
	PG76-22	≤3.0	≥4.688	4.9	//	



을 합한 데이터로 통합(Total)으로 표시해서 표 5에 나타내었다.

이 규정값은 배합설계시 하나의 기준으로 사용할 수도 있고 또한 배합설계후 OAC로 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 공시체를 제조하여 변형강도를 측정하여 혼합물의 판정기준으로 적용할 수도 있다. 예를 들어 표층 혼합물의 경우 AP-5 바인더를 사용한 것은 3.5MPa, PG76-22를 사용한 혼합물의 경우는 5.0MPa 이상을 얻어야 합격을 할 것이다. 즉 S_b 가 상기 규격값 이상을 얻어야 소성변형에 대한 저항성이 적절한 것으로 볼 수 있다는 의미이다.

상기의 결과는 미국에서 실제 도로포장에 사용되는 혼합물을 사용하여 150mm 직경의 공시체에 근거한 것이다. 하지만 국내에서는 100mm 공시체가 널리 사용된다. 따라서 이를 국내에 적용하기 위해서는 직경 차이에 따른 변형강도의 차이를 많은 실험치의 통계적 data를 확보해 결정하고 이를 적용해야 할 것이다. 예를 들어 AP-5 혼합물에서 직경 100mm 공시체의 S_b 가 150mm 공시체보다 평균 약 5~6%가 낮다면 3.3MPa이, 8%가 낮다면 3.2MPa이 적용될 수 있을 것이다. 실제 그간의 많은 연구에 의하면 표층용 13mm 일반 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 Wheel tracking 시험에서 양호한 동적안정도를 보이는 경우 100mm 공시체로 3.3MPa 전후의 S_b 가 얻어졌고 국내의 PG76-22 바인더의 경우 4.8MPa에 가깝게 나타났다(김부일 등 2006, 정재현 등 2007, Park et al. 2007, Jung et al. 2007, Doh et al. 2006). 따라서 본 연구에서 예로 제시한 S_b 값들은 어느 정도 실용범위에 있는 값으로 보여진다. 하지만 이의 적용을 위해서는 향후 보다 체계적인 연구를 통해 이를 구체화하는 많은 노력이 필요할 것이다.

5. 결론

본 논문은 변형강도(S_b)가 아스팔트 혼합물의 고

은 내변형 저항성을 나타내는 특성치이므로 이를 배합설계 단계부터 제어하면 소성변형에 상당한 저항성을 가지는 혼합물을 제조할 수 있으리라는 가정 하에 S_b 의 임계치를 결정하는 방안을 연구하였다. 적용기준의 근거로는 미국 South Carolina주의 Asphalt Pavement Analyzer(APA)의 기준을 택하였으며 APA 소성변형 깊이와 S_b 와의 상관성 분석을 통해 임계치를 결정하는 방안을 예시로 제시하였다. 그 결과 PG64-22 바인더(국내의 60-80 바인더와 유사)로 제조한 13mm 표층혼합물의 경우 직경 150mm 공시체를 사용하면 3.5MPa, PG76-22 바인더의 경우 5.0MPa이 임계치로 얻을 수 있음을 보여 주었다.

구해진 임계치는 배합설계시 혼합물의 강도기준으로 적용할 수도 있고 또한 배합설계후 공시체를 제조하여 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 에서 혼합물의 판정기준으로 적용할 수도 있을 것이다. 상기 결과는 미국의 한 주에서 실제 도로포장에 사용되는 50가지 이상의 혼합물의 150mm 직경의 선화다짐 공시체에 근거한 것이므로 단순실험실의 수치는 아니다. 하지만 국내에서는 100mm 공시체가 널리 사용되므로 이를 국내에 적용하기 위해서는 직경 차이에 따른 변형강도의 차이를 통계적 data를 확보해 결정하고 이를 수정할 필요가 있다.

기존의 연구에 의하면 표층용 13mm 일반아스팔트 혼합물의 동적안정도가 어느 정도 양호한 경우 100mm 공시체의 S_b 가 3.3MPa 전후가 얻어졌고 국산 PG76-22 바인더의 경우 4.8MPa정도로 나타났다. 따라서 본 연구에서 예로 제시한 값들은 어느 정도 실용성이 있는 값으로 보여 진다는 점이 고무적이다. 하지만 향후 보다 체계적인 연구를 통해 이를 구체화하는 노력이 필요하며 국내는 물론 미국에서의 데이터도 더 많이 확보하고 분석해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 자유공모과제의 지원과 강



원대학교 석재복합신소재센터, 미국 South Carolina주의 도로국 실험실, Clemson 대학교의 ATRS 실험실에서 도움을 이루어진 것이다.

참고문헌

김광우, 도영수 (2006), "아스팔트 혼합물 반복주행시험에서 합리적 동적안정도의 산정방법," 한국도로학회 논문집, 8(1), 77-87.

김광우, 도영수, 조문진 (2005), "바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 통한 김테스트 적용성 고찰," 한국도로학회 논문집, 7(4), 91-100

김광우, 김성태, 권오선, 도영수 (2004a), "수퍼페이브 혼합물의 소성변형저항성과 변형강도와의 상관성 분석," 한국도로학회 논문집 6(4), 45-53

김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 최선주 (2004b), "개질 아스팔트 혼합물의 변형강도 측정연구," 석재연 논문집 9권, 191-206.

김광우, 최선주, 이기호, 도영수 (2004c), "온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형과의 상관성 연구," 대한토목학회논문집, 24(5D), 743-748.

김광우, 김준은, 김변창, 도영수 (2004d), "아스팔트 콘크리트 반복주행시험에서의 동적안정도 정립에 관한 연구" 한국도로학회 논문집 6(3), 37-46.

김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수분석," 한국도로포장공학회 논문집, 4(4), 41-52.

김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 4(4), 23-39

김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002c), "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발," 석재연 논문집 7권, 강원대학교 석재복합신소재 연구센터.

김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제 (2003), "개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성 변형특성 연구," 석재연 논문집, 8권, 71-88.

김부일, 이문섭, 김광우 (2006), "포장성능관련 역학적 특성이 고려된 아스팔트 혼합물의 배합설계 방안,"

한국도로학회 논문집, 8(1), 15-23.

이문섭, 최선주, 도영수, 김광우 (2004), "공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향," 한국도로학회논문집, 6(2), 1-13.

이상범, 이문섭, 이기호, 김광우 (2001), "아스팔트 혼합물의 마찰특성치와 소성변형 관련성 평가," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집.

정재현, 이종섭, 박남원, 김현환, 백성현, 이순제, 김광우 (2007), "내변형기준을 위한 아스팔트 포장의 임계 변형강도의 산정방안" 석재연 논문집, 12(1), 21-31

Amrikhanian S. and Kim, K. W. (2007), "Application of S_D based on South Carolina Asphalt Pavement Guides," *Technical Note Presented in the Promotional Meeting at ARTS, July.*

Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirkhanian, S. N. and Kim, K. W. (2006), "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, Internet edition, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.032

Jung, J. H., Lee, J. S., Kweon, J. S., and Kim, K. W. (2007), "Change of deformation strength due to mixture aging," *Proceedings of 5th MAIREPAV Conference*, Park City, Utah, USA, Aug., 133-138.

Kandhal, P. S. and Mallick, R. B. (1999), "Evaluation of asphalt pavement analyzer for HMA mix design," *NCAT Report No. 99-4*, Auburn, AL

Kim, K. W., Lee, G. H., Lee, M. S. Choi, S. J. (2005a), "Development of Deformation Strength as a Relative Index for Estimating Rut Resistance of Asphalt Concretes," *Proceedings of 5th ICPT*, Ed. by Kim, 864-871.

Kim, K. W., Lee, G. H., Kwon, O. S. and Cho, M. J. (2005b), "Validation of Kim Test Using Asphalt Pavement Analyzer and Dynamic Creep Test," *Proceedings of 5th ICPT*, Ed. by Kim, 534-540.



- Kim, K. W., Cho. M. J., Ko, T. Y., Doh, Y. S. (2005c), "Kim Test for measure of rut resistance of asphalt concretes," *Proceedings of 5th ICPT, Ed. by Kim*, 408-415.
- Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N. (2004a), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," *Road Materials and Pavement Design*, 5(3), 303-322.
- Kim, K. W., Doh, Y. S., Lee, K. H., Cho, M. J. Kwon, O. S. and Ko, T. Y. (2004b), "Use of deformation strength for predicting rut resistance of asphalt concrete," *Proceedings, 2004 Advanced Technologies in Asphalt Pavement*, 57-82.
- Kim, K. W. Choi, S. J. Lee, G. H. and Lee, M. S. (2003), "Correlation of Deformation Strength with Permanent Deformation of Polymer-Modified Asphalt Concretes," *4th ASPIC*, Chun Cheon, Korea.
- Park, N. W., Kim, H. H., Baek, S. H., Kim, K. W. and Doh, Y. S. (2007), "Correlation of deformation strength (S_p) with lab data and field rutting data of asphalt pavements," *UKC Conference*, Washington, DC, USA, Aug.

접 수 일: 2007. 10. 4

심 사 일: 2007. 10. 29

심사완료일: 2007. 11. 30