



# PG 고온등급의 문제점과 새로운 대안

## Problems in High Temperature Superpave PG-Grading and A New Alternative

허 정 도\*

Huh, Jung Do

### Abstract

Asphalt binder grading is to specify quality of asphalt binders relating to pavement performance in orderly manner, and provides the necessary information in selecting the appropriate asphalt binder for the hot mix design. For this purpose, United States has developed the PG-grading in 1995 and is implementing in practice. Recently, this American PG-grading system has been accepted as the domestic binder grading specification. However, the Asian (including Japan and China) and the most European countries are still use the traditional penetration and viscosity specification. The goal of this study lies in analysing the American PG-grading for its justification. As the result, the serious errors are found, and thus, to eliminate the errors, the more precise binder grading equation is introduced. Credibility of this study is checked by predicting the literature rut data with the equations mentioned. The prediction result are validating the claims made in this study.

**Keywords :** asphalt binder grading, performance grading(PG), problems of high temperature PG-grading, a new high temperature grading equation

### 요 지

아스팔트바인더등급은 아스팔트바인더의 품질을 포장의 공용성과 관련하여 등급화한 것으로, 혼합물배합설계에 있어서 중요재료인 아스팔트를 적절히 선정하는 데 필수적인 정보를 제공한다. 이러한 목적을 위해 미국은 1990년대 중반에 PG-등급을 개발하여 현장에 적용하고 있다. 국내에서도 최근에 미국의 PG-등급을 들여와서 바인더규정으로 채택하고 있다. 그러나 일본, 중국을 비롯한 아시아 지역이나 유럽의 대부분 나라들은 미국과는 달리 침입도나 점도등급을 고온등급으로 사용하고 있다. 본 연구의 목적은 미국의 PG-등급의 타당성을 분석하는 데 있다. 분석결과는 이 등급에 심각한 오류가 있음을 말해주며, 이를 해결하기 위한 대안으로 보다 정확한 바인더등급 이론식이 소개된다. 상기 식들을 이용하여 현장가속시험기나 실내 바퀴주행시험기에서 얻어진 문헌의 데이터를 예측함으로서 본 논문에서 주장하는 내용들을 입증한다.

**핵심용어 :** 아스팔트바인더 등급, 공용성 등급, 고온 PG-등급의 문제점, 새 고온등급 식

\* 정회원 · 인천대학교 첨단도로교통연구센터 수석연구원 · 공학박사



oo

## 1. 서 론

최근 미국에서는 SHRP(Strategic Highway Research Program) 연구를 통해 공용성에 기초한 아스팔트 바인더등급을 개발하였는데 이를 수퍼페이브(Superpave : Superior Performing Asphalt Pavement) 공용성등급(PG : Performance Grading)이라 하여 현재 미국 전역에 널리 보급되고 있다. 공용성 등급의 이론적 배경은 Bahia and Anderson(1995)<sup>(1)</sup>에 의해서 제시되었다. 그들의 논문에 의하면 침입도등급의 침입깊이나 점도등급의 점도와 같이 공용성등급에서는  $G^*/\sin\delta$ 가 등급규정 상수로 제안되어 있다.

그러나 그들이 제안한 이론식은 논리적 모순을 포함하고 있을 뿐만 아니라, 현장실험을 통한 검증결과도 명백한 오류를 지적하고 있다. 원래의 PG등급제 정에 참여했던 Bahia는 최근 그의 논문(Bahia et al (1998)<sup>(2)</sup>)을 통해 수퍼페이브 PG등급이 고분자 개질아스팔트의 경우에는 비선형적 특성 때문에 선형적 원리에 기초를 둔 수퍼페이브 PG등급으로 등급을 정하기에는 적절하지 않다고 보고하고 있다. 또한 Stuart and Mogawer (1997)<sup>(3)</sup>과 Stuart et al (2000)<sup>(4)</sup>은 현행 수퍼페이브 PG등급이 고분자개질 아스팔트바인더의 소성변형저항성을 올바르게 평가할 수 없다는 사실을 실험을 통해 증명하고 있다.

일반 스트레이트 아스팔트의 경우에도 PG등급을 제정한다면 등급순위에 있어서는 오차가 없다 하더라도 등급의 상대적 정확성이 있어서는 상당한 오차가 발생함을 본 연구를 통해 증명할 것이다.

국내의 산업자원부에서는 기준에 사용하던 침입도등급의 문제점을 오랫동안 인식하여 모든 차에 이를 개선하고자 최근에 미국의 PG등급을 국내 등급으로 개정하였다. 그러나 고온 PG등급에 대해서도 문제점이 발견됨으로 인하여 이에 대한 수정이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 미국의 고온 PG등급에 대한 대안으로서 보다 정확한 고온등급이론식을 소개하고자 한다. 이 식을 미국의 PG등급식과

비교 검토함으로서 새로운 고온등급식의 타당성을 검증할 것이다. 혼합물 배합설계 시에 올바른 등급체계에 의한 바인더선정이 이루어지지 않으면 잘 못 선정된 바인더로 인해 생길 수 있는 소성변형문제로 시간과 경비의 낭비를 피하기가 어려울 것이다.

## 2. 수퍼페이브 PG 고온등급이론

다음은 원래 PG-등급을 개발한 Bahia and Anderson(1995)<sup>(1)</sup>의 고온등급이론이다. 소성변형은 아스팔트포장에 반복적으로 교통하중을 적용함으로서 발생하는 영구변형의 측적이다. 이는 주로 포장 표층에서 발생하여 하층으로 전달된다. 교통하중을 한번 적용시키는 동안 이에 상응하는 일정양의 일(에너지)이 표층의 작은 영구변형을 유발시키는 테 적용된다. 소성변형을 최소화하기 위해서는 각 하중 주기 동안에 소모되는 일이 최소화되어야 한다. 점탄성 재료에 있어서 한 주기당 소모되는 일( $W_c$ )은 다음과 같이 응력(stress,  $\sigma$ )과 변형율 (strain,  $\epsilon$ )의 항으로 표현 된다. 즉,

$$W_c = \pi \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \sin \delta \quad (1)$$

아스팔트 층의 소성변형은 일정한 응력( $\sigma_0$ )이 반복되는 현상에 의해 일어난다고 가정한다.

$$W_c = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon \cdot \sin \delta \quad (2)$$

여기서 변형율( $\epsilon$ )은 아래와 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{G^*} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 결합하면, 다음 식이 얻어진다.

$$W_c = c \cdot \pi \cdot \sigma_0^2 \cdot \left( \frac{1}{G^* / \sin \delta} \right) \quad (4)$$

식 (4)는 한 하중 주기당 소모되는 일이 SHRP 규정에 선정된 상수인  $G^*/\sin\delta$ 에 반비례한다고 지적해 주고 있다. 이 식에 의해  $G^*/\sin\delta$ 가 클수록 한 하중



주기 동안에 포장표면에 가해지는 일의 양이 감소하고 이에 따라 소성변형도 줄어듦을 시사한다. 이에 따라  $G^*/\sin\delta$  값을 60°C에서 측정하고, 단기 산화노화 시험을 안한 시편에 대해서는 측정값이 1kPa(한 경우에는 2kPa)이 되는 온도를 찾아내면 이 온도가 수퍼페이브 PG의 고온등급이 된다.

Bahia and Anderson(1995)<sup>(1)</sup>의 고온등급이론식은 바인더 물성인  $G^*/\sin\delta$ 를 아스팔트포장에 가해지는 차량하중에 의한 일의 양과 관련짓고 있으며, 포장의 공용성문제인 소성변형과의 직접적인 관계는 도출하지 못하고 있다. 다만, 묵시적으로 일의 양이 적으면 소성변형도 줄어든다고 주장하고,  $G^*/\sin\delta$ 의 대소에 따라 일의 양, 즉, 소성변형 깊이가 결정됨으로  $G^*/\sin\delta$ 를 소성변형 등급인자로 선정하고 있다. 이러한 논리는 소성변형과 일의 관계가 선형 비례임을 암시한다. 즉,

$$h = C \cdot W_c = c \cdot \pi \cdot \sigma_0^2 \cdot \left( \frac{1}{G^*/\sin\delta} \right) \quad (5)$$

그러나 일의 양과 소성변형과의 관계가 선형이라는 어떠한 이론이나 논리를 제시하지 못함으로 인하여 선형관계의 정당성에 대한 심각한 의문이 제기된다. 본 연구에서는 PG-등급식의 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 새로운 등급식을 소개한다. 이식에는 차량이 포장에 가하는 일과 같은 애매모호한 역학적인 정량화는 배제되고, 아스팔트포장의 공용성 문제인 소성변형깊이와 바인더 물성인  $G^*/\sin\delta$ 를 직접 연결하는 식으로 구성되며, 그 관계는 명확하게 비선형적인 수학적 표현을 제공한다.

### 3. 수퍼페이브 PG 등급의 이론적 모순과 새로운 등급식

수퍼페이브 PG 고온등급 이론 중에는 논리적인 모순이 발견된다. 등급상수  $G^*/\sin\delta$ 를 유도하는 과정에서 복합전단계수( $G^*$ )를 고체역학의 응력계수( $G$ )로 취급하고 있으나, Cox and Mertz<sup>(5)</sup> 법칙에

의하면  $G^*$ 은 응력계수( $G$ )가 아니라 전단응력( $\sigma_0$ )임을 유의하기 바란다. 즉, 아스팔트 바인더의 등급을 제정하기 위하여 60°C에서  $G^*/\sin\delta$ 를 주기( $\omega$ )의 함수(액체상태에 적용)로 측정함에도 불구하고, 이  $G^*/\sin\delta$ 를 유도하는 과정은 고체처럼 변형율의 함수로서 응력관계를 나타내는 식 (3)을 사용하고 있다. 이것은  $G^*/\sin\delta$ 을 측정하는 실험과  $G^*/\sin\delta$ 을 유도하는 이론이 서로 상충하는 결과를 초래함으로 명백한 오류이다. 여기서 고체라 함은 외부응력을 받으면 일반적으로 적은 변형을 일으킴으로 응력( $\sigma_0$ )과 변형율( $\epsilon$ )로 측정되며, 응력을 변형율로 나누면 응력계수( $G$ )가 얻어진다. 반면에 액체라 함은 외부응력( $\sigma_0$ )을 가하면 상대적으로 큰 변형을 일으킴으로 변형율 대신에 변형율의 시간미분( $d\epsilon/dt$ ), 즉, 전단속도 혹은 주기( $\omega$ )가 사용된다. 이때의 역학식은 식 (6)과 같고 복합전단계수( $G^*$ )를 주기( $\omega$ )로 나누면 응력계수( $G$ ) 대신에 점도( $\eta$ )가 얻어진다.

$$\sigma_0 = G^* = \eta^* \cdot \omega \quad (6)$$

따라서 식 (3)은 더 이상 성립되지 않고, 식 (4)도 얻어지지 않는다. 이러한 조건하에서는  $G^*/\sin\delta$ 가 Bahia and Anderson<sup>(1)</sup>의 주장처럼 소성변형등급을 규정하는 상수가 될 수 없다.

이러한 이론상의 오류는 다음 사례에서 더욱 분명해진다. 문헌을 참고하면 Bonaquist 와 Mogawer<sup>(6)</sup>이 FHWA의 포장가속시험(Accelerated Pavement Tester, ALF) 장비를 사용하여 Superpave 공용성 등급에 대한 검증 연구를 수행하였는데, 이 연구에서 바퀴주행회수가 2000일 때의 소성변형데이터를 취하여 회귀분석을 실시한 결과 얻어진 공용성식은 아래와 같이 지수형태를 취한다고 보고하고 있다.

$$h_{2000} = 2076 \left( \frac{G^*}{\sin\delta} \right)^{-0.318}, \quad r^2 = 0.87 \quad (7)$$

식 (7)은 식 (5)와 분명히 다르다. 즉, 소성변형깊이( $h_N$ )와 점탄성변수( $G^*/\sin\delta$ )와의 관계가 Bahia and Anderson<sup>(1)</sup>의 이론 식 (5)처럼 단순한 직선관계( $G^*/\sin\delta$ 가 커지면, 타이어바퀴가 일 회전할 때



포장표면에 가하는 일( $W_c$ )이 적어지고, 따라서 소성변형깊이( $h_N$ )가 작아진다는 가정)가 아니고, 식(7)의 지적처럼 소성변형깊이( $h_N$ )가  $G^*/\sin\delta$ 의 지수형태가 됨을 명백히 하고 있다. 즉, 식(7)에 따르면 등급변수는  $(G^*/\sin\delta)$ 가 아니고  $(G^*/\sin\delta)^m$ 가 되어야 타당하며, 이러한 점에서  $(G^*/\sin\delta)$ 를 등급상수로 사용하는 기존의 수퍼페이브 PG 공용성등급은 또 하나의 심각한 오류를 포함한다. 식(7)을 자연대수의 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln(h_{2000}) = \ln(2076) - 0.318 \cdot \ln\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right) \quad (8)$$

식(7)과(8)은 허정도 외(2001)<sup>(7)</sup>의 논문에서 발표한 아래식과 동일하다.

$$\ln(h_N) = \ln(d \cdot N^\beta) - k\beta \cdot \ln\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right) \quad (9)$$

식(9)는  $\beta$ 를 상수, 즉, 평균  $\beta$ 를 사용했을 때의 표현이며, 엄밀한 소성변형 식을 쓰면 아래와 같다.

$$h = a \cdot N^\beta = \frac{d}{(G^*/\sin\delta)^{k\beta}} \cdot N^\beta = F\left(\frac{G^*}{\sin\delta}, \beta\right) \quad (10)$$

식(10)은 소성변형깊이가 두 변수( $G^*/\sin\delta$ 와  $\beta$ )의 함수임을 분명히 하고 있으나 현행 수퍼페이브 PG-등급은 하나( $G^*/\sin\delta$ )만의 변수로 되어 있어 오차를 피할 수 없을 뿐만 아니라, 소성변형과 이  $G^*/\sin\delta$ 와의 관계가 단순한 반비례의 형태를 띠고 있어서 또 다른 문제가 되고 있다.  $G^*/\sin\delta$ 와  $\beta$ 를 두 변수로 취급하는 식(10)을 직선 형태로 표현하면 다음 식이 얻어진다.

$$\ln\left(\frac{h_N}{N^\beta}\right)_N = \ln(d) - k \cdot \ln\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)^\beta \quad (11)$$

식(10)과(11)에서  $\beta$ 를 평균값으로 두고  $G^*/\sin\delta$ 만을 변수로 취급하면, 식(7), (8), (9), (10) 및 (11)은 모두 동일한 형태로 된다. 그러나 실제로는  $\beta$ 가 바인더에 따라 변하는 변수임으로 식(7), (8) 혹은(9)는 시험바인더 전체의 평균- $\beta$ 값을 상수로 사용한 근사식인 반면에, 식(11)은 각 바인더의 실제  $\beta$ 값을 바인더마다 적용한 식임을 알 수 있다. 또한 식(11)을 사용하면 모든 바퀴주행회수에 따라 측정된 소성변형 데이터가 60°C, 10rad/s에서 측정한 바인더의 물성인  $G^*/\sin\delta$ 와  $\beta$ 에 의해 하나의 직선으로 표현되는 데 반하여, 식(7), (8) 혹은(9)는 바퀴주행회수에 따라 각기 다른 직선으로 표현되는 차이점이 있다. 상기 결과를 종합하여 표1에 나타낸다. 표1에서 수퍼페이브 PG등급은 잘못된 등급변수를 채택하고 있음을 알 수 있다.

다시 한번 강조할 점은 기존의 수퍼페이브 PG-등급은 바인더의 또 다른 물성인  $\beta$ 를 완전히 무시하고  $G^*/\sin\delta$ 만을 고려하였으며, 더욱이  $G^*/\sin\delta$ 의 지수도 1로 고정되어 있다. 이에 비하여 식(9)은  $G^*/\sin\delta$ 를 변수로, 평균- $\beta$ 와  $k$ 의 곱을 그 지수로 사용함으로서 실제  $G^*/\sin\delta$ 와  $k\beta$ 를 두 변수로 사용하는 식(11)보다는 정확성에서 다소 떨어지지만 기존의 수퍼페이브 PG-등급보다는 훨씬 정확하다. 그러나 식(9)도 표1에서 보듯이 주행회수  $N$ 가 커질수록 식(9)과 식(11)의 차이(오차)가 커지는 데, 그 주된 이유는 식(11)의 주행회수  $N$ 의  $\beta$ -지수 때문이다. 이러한 식들에 대한 고찰을 바퀴주행실험 데이터에 의해 살펴보기로 하자.

표 1. 각 PG등급식의 등급제정변수

등급식	소성변형( $h$ )식	등급제정변수	물성측정 변수
수퍼페이브 PG식 (식(5))	$h = C/(G^*/\sin\delta)^1$	$(G^*/\sin\delta)$	1개-( $G^*/\sin\delta$ )
평균 PG식 (식(9))	$h = C_2 N^{(\text{평균}\beta)} / (G^*/\sin\delta)^{k(\text{평균}\beta)}$	$(G^*/\sin\delta)^{k(\text{평균}\beta)}$	1개-( $G^*/\sin\delta$ )
정확한 PG식 (식(11))	$h = C_3 N^b / (G^*/\sin\delta)^{k\beta}$	$N^b / (G^*/\sin\delta)^{k\beta}$	2개-( $G^*/\sin\delta$ ), $\beta$



#### 4. 바퀴주행실험 데이터에 의한 등급식의 고찰

세 다른 스트레이트 아스팔트바인더로 만든 King et al<sup>(8)</sup>의 혼합물시편에 대한 휠트랙킹 소성변형 데이터를 식 (9)를 이용하여 예측한 결과는 아래 그림 1에 보여주고 있다. 그림 1에 의하면 식 (9)가 휠트랙킹 데이터를 성공적으로 예측하고 있음을 보여준다. 즉, 바인더의 성질인  $G^*/\sin\delta$ 값이 혼합물의 휠트랙킹 소성변형깊이와 관련이 있음을 보여준다. 이 회귀분석 결과는 스트레이트 아스팔트의 경우 바퀴주행회수에 따라 기울기가 변화하지만 동일한 바퀴주행회수에서는 아스팔트바인더가 달라도 하나의 기울기 값으로 표현되고 있다.

그림 1에서 주행회수에 따라 기울기와 절편이 달라진다. 주행회수에 상관없이 소성변형 깊이를 한 식으로 표현하려면 식 (11)을 사용하면 가능하다. 그림 1의 데이터를 식 (11)로 회귀분석한 결과가 그림 2에 표시되어 있다. 그림 1의 모든 데이터가 그림 2에서는 한 선으로 귀착되며 회귀분석결과도 우수하다. 이것은 식 (11)이 아스팔트바인더의 성질인  $G^*/\sin\delta$ 와  $\beta$ 값으로 혼합물의 공용성문제인 소성변형깊이를 적절히 표현하고 있음을 입증하고 있다.

식 (9)를 스트레이트 아스팔트바인더가 아닌 고분자 개질 아스팔트의 경우에 적용하면 무시 못할 오류가 발견된다. 이에 대한 사실여부는 Bonaquist와 Mogawer<sup>(6)</sup>이 현장가속실험으로 얻은 소성변형 데

이터를 식 (9)로 예측해보면 자명해진다. 그들이 현장가속시험기로 측정한 소성변형 데이터에는 스트레이트 바인더 (PG 58-28 와 PG 64-22) 뿐만 아니라 고분자 개질 아스팔트 바인더 (PG 76-22와 PG 82-22)에 대한 데이터도 포함되어 있다. 따라서 스트레이트와 고분자개질의 경우, 평균  $\beta$ 값과 실제 각 바인더의  $\beta$ 값에 차이가 생기며, 이 차이로 인해 바퀴주행회수의 증가에 따라 오차도 더욱 커진다. 그림 3에서 이 증거들을 읽을 수 있다.

그림 3에서는 각 주행회수에서의 소성변형깊이 데이터와 그에 상응하는 각 바인더의  $G^*/\sin\delta$  데이터를 나타내며, 이들 데이터를 식 (9)로 예측한 결과도 보여주고 있다. 그림 3에서 관측된 결과는 개질 아스팔트와 스트레이트 아스팔트가 함께 있을 경우에는 스트레이트 아스팔트바인더만 있을 경우(그림 1)와는 달리 식 (9)의 적용에 적지 않은 오차가 목격된다. 결론적으로 식 (9)는 탄성이 비교적 적고 점성이 큰 아스팔트바인더(스트레이트 아스팔트바인더)의 등급에는 어느 정도 정확성이 확보되지만, 고분자개질 아스팔트바인더를 포함한 비교적 탄성이 큰 바인더가 함께 있을 경우에는 적절하지 못하다는 결론에도 달한다. 주된 이유는 식 (9)는 개개 바인더의 고유  $\beta$ 대신에 시험에 적용된 모든 바인더의 평균  $\beta$ 를 사용함에 따른 것이다.

이러한 평균값과 개개의  $\beta$ 값의 차이는 바퀴주행회수가 적을 때(그림 3의  $N=1000(\gamma^2=0.92)$ )이나 식

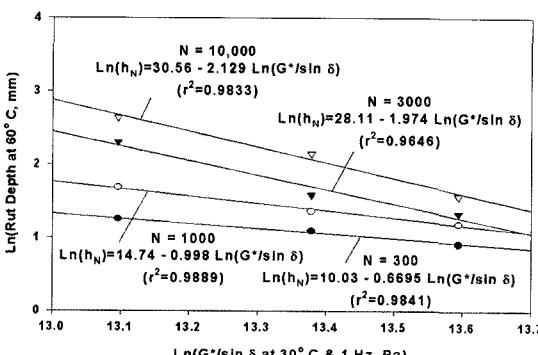


그림 1 스트레이트 아스팔트의 소성변형 데이터에 대한 식 (9)의 적용결과

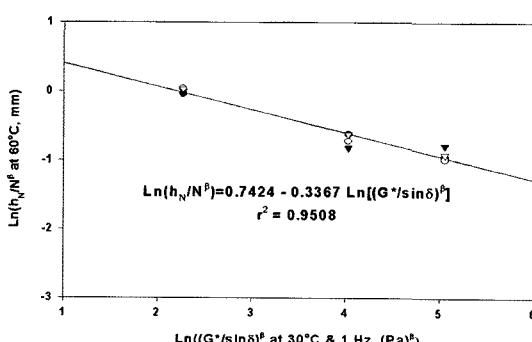


그림 2 식 (11)에 의한 스트레이트 아스팔트의 회귀분석

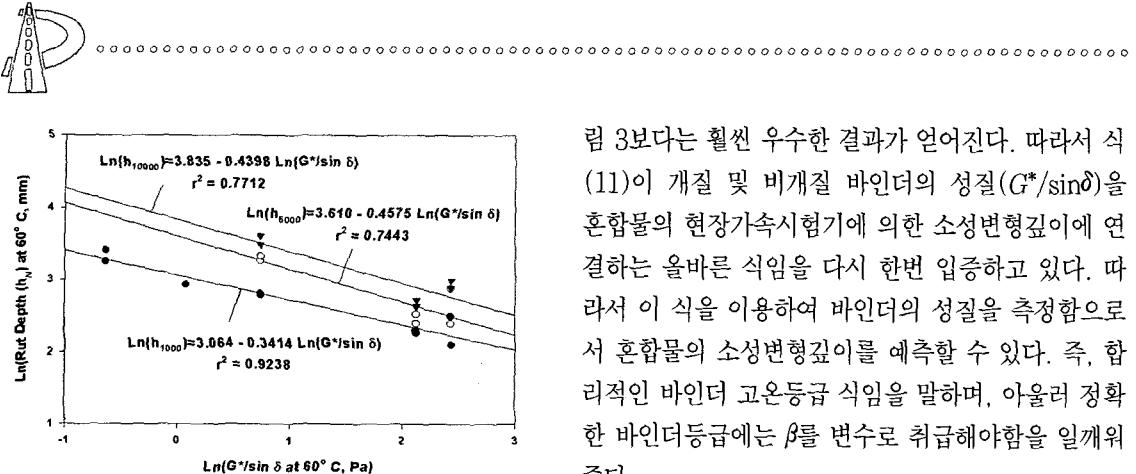


그림 3 개질 아스팔트의 소성변형깊이에 대한 식 (9)의 회귀분석 결과

(7)의  $N=2000$  ( $\gamma^2=0.96$ )의 경우는 식 (9)가 다소 근사한 예측결과를 보이지만, 주행회수가 커지면 ( $N=5000$  ( $\gamma^2=0.74$ )이나  $N=10000$  ( $\gamma^2=0.77$ )) 예측오차도 함께 커지므로 식 (9)만으로는 만족스러운 결과를 주지 못한다.  $N$ 가 적을 경우는  $h=aN^\beta$ 에서  $\beta$ 를 각 바인더의 고유  $\beta$ 값을 사용하는 대신에 평균값으로 사용하더라도 그 오차가 상대적으로 적지만,  $N$ 가 커지면  $\beta$ 값에 조금만 차이가 생겨도 소성변형깊이  $h$ 에서의 오차가 크게 증가할 수밖에 없다. 이로 인해 그림 3에서 주행회수가 클 때 각 바인더를 나타내는 개개 데이터의 오차도 함께 커진다.

아래 그림 4에서는  $\beta$ 를 변수로 취급한 경우인 식 (11)을 이용하여 그림 3과 동일한 데이터를 예측한 결과를 보여주고 있다. 이 경우 그림 3의 모든 주행회수에 대한 데이터가 한 직선으로 귀결되며 또한 그

림 3보다는 훨씬 우수한 결과가 얻어진다. 따라서 식 (11)이 개질 및 비개질 바인더의 성질( $G^*/\sin\delta$ )을 혼합물의 현장가속시험기에 의한 소성변형깊이에 연결하는 올바른 식임을 다시 한번 입증하고 있다. 따라서 이 식을 이용하여 바인더의 성질을 측정함으로서 혼합물의 소성변형깊이를 예측할 수 있다. 즉, 합리적인 바인더 고온등급 식임을 말하며, 아울러 정확한 바인더등급에는  $\beta$ 를 변수로 취급해야함을 일깨워 준다.

## 5. 수퍼페이브 PG 등급의 오류 사례들

그림 5는 그림 1의 데이터를 수퍼페이브 PG등급 식(식 (5))으로 회귀분석한 결과이다. 그림 1에서  $N=1,000$ 일 때의 기울기가 1에 근접함으로 이 경우 만이 수퍼페이브 PG등급식이 우수한 회귀분석결과를 보이고, 다른 경우는 상당한 오차를 나타낸다. 그림 1의 데이터는 일반 스트레이트 아스팔트로 혼합물 시편을 만든 경우이다. 즉, 일반 아스팔트의 경우에도 수퍼페이브 PG등급은 상당한 오류를 유발시키게 됨을 그림 5를 통해서 명백해진다.

그림 6은 그림 2의  $N=1000$ 의 경우에 해당하는 ALF 현장가속시험기에 의한 소성변형깊이 데이터를 수퍼페이브 PG등급식(식 (5))에 의한 회귀분석 결과와 지수식 (9)에 의한 결과와의 차이를 비교하

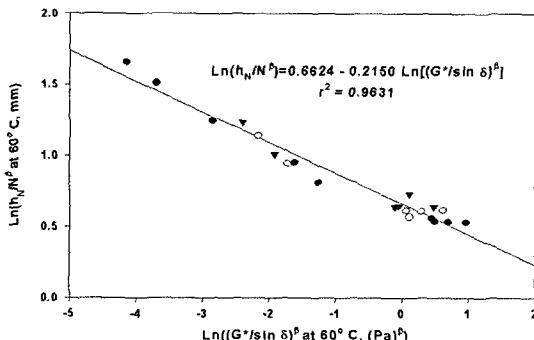


그림 4 식 (11)에 의한 스트레이트 및 개질바인더 데이터의 예측

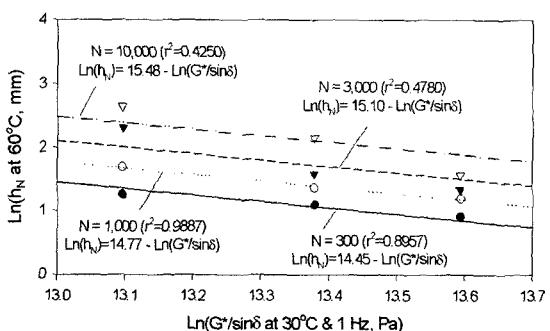


그림 5. 그림 1의 데이터를 PG-등급식 (5)로 회귀분석함

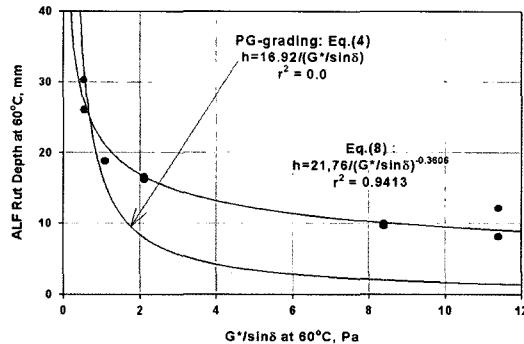


그림 6. N=1000에서의 ALF 소성변형데이터의 회귀분석

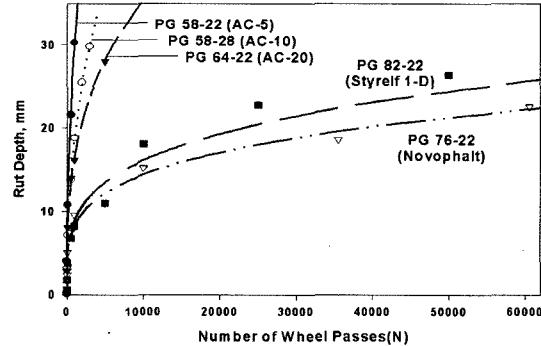


그림 7. ALF 시험에 의한 5종의 바인더혼합물 소성변형깊이

고 있다. 그림에서 개개의 기호는 각기 다른 개질과 비개질 바인더로 만든 혼합물의 소성변형깊이 데이터를 대표하며, 실선은 두 식에 의해 회귀분석한 결과를 전시하고 있다. 현행 PG등급은 상당한 오차를 내포하고 있음이 자명하다.

그림 6의 결과는  $(G^*/\sin\delta)$ 에 의해서가 아니라  $(G^*/\sin\delta)^{0.3606}$ 에 의해 등급을 정해야 정확한 등급이 됨을 암시한다. 그러나 0.3606지수도 그림에 보이는 각 바인더 혼합물의 평균- $\beta$ 와  $k$ 를 곱한 값에 해당함으로, 주행회수  $N$ 가 커지면 각 바인더의 실제  $\beta$ 값과 평균값의 차이로 인하여 소성변형깊이 데이터에 무시 못 할 오차가 발생하게 된다. 그 결과, 바퀴주행회수( $N$ )가 큰 경우를 나타내는 그림 2의  $N=6000$ 이나  $N=10000$ 일 때는 식(9)에 의한 회귀분석결과에도 상당한 오류가 생기게 됨을 앞에서 지적한 바 있다. 그럼으로, 그림 4에서 입증한 바와 같이  $\beta$ 를 변수로 취급하는 식(식 (11))이 정확한 바인더등급식임을 재삼 상기하게 된다.

그림 7은 Bonaquist와 Mogawer<sup>(6)</sup>이 ALF현장가속시험을 수행한 결과로 얻은 소성변형 데이터를 보여준다. 수퍼페이브 PG 등급에 의하면, 그림의 PG82-22 혼합물이 PG76-22보다 소성변형등급이 높으므로 변형깊이가 적어야 함에도 오히려 반대결과를 보이고 있다. 이는 PG등급의 오류를 보여주는 또 하나의 사례이다.

Stuart and Mogawer(1997)<sup>(3)</sup>는 Bonaquist & Mogawer(1997)<sup>(6)</sup>의 결과를 재검증하기 위하여 동일한 아스팔트바인더재료를 이용하여 혼합물을 만들고 ALF(Accelerated Loading Facility), French PRT(Pavement Rutting Tester), Georgia LWT(Loaded Wheel Tester), Hamburg WTD(Wheel Tracking Device) 시험을 수행하였다. 그 결과는 표 2에 나타내었다. 아래 표 2에 나타난 각 시험의 소성변형 저항순위는  $G^*/\sin\delta$ 의 순위와는 다르다.  $G^*/\sin\delta$ 에 의해 PG등급이 높게 매겨진 PG 82-22(Styref)가 낮게 매겨진 PG 76-

표 2. 소성변형 공용성의 통계학적 순위

순위	$G^*/\sin\delta$	ALF (w=2.25r/s, 58C)	French PRT (w=0.875r/s, 60C)	Georgia LWT (w=0.125r/s, 40C)	Hamburg WTD (w=0.125r/s, 50C)
1	Styref	Novophalt	Novophalt	Novophalt	Novophalt
2	Novophalt	Styref	Styref	Styref	Styref
3	AC-20	AC-20	AC-20	AC-20	AC-20
4	AC-10	AC-10	AC-10	AC-10	AC-10
5	AC-5	AC-5	AC-5	AC-5	AC-5



22(Novophalt)보다 소성변형저항성이 우수하여야 함에도 각종실험은 정반대의 결과를 보인다. 이러한 결과는 수퍼페이브 PG등급의 부적절성에 기인한다고 믿어진다.

Stuart et al (2000)<sup>(4)</sup>은 ALF시험을 통해 다른 각도에서 비슷한 시험을 수행하였고 위와 동일한 결론을 얻고 있다. 이상의 모든 증거들은 현행 수퍼페이브 PG등급이 오류를 내포하고 있음을 여러 각도에서 명확하게 확인시키고 있다.

## 6. 결 론

1. 수퍼페이브 PG등급이론은 등급변수인  $G^*/\sin\delta$ 를 유도하는 이론적 과정에서는 고체 역학식을 적용하고, 이 등급변수를 측정하는 실험에서는 액체 역학식을 사용함으로서 서로 상충하는 모순을 낳고 있다.
2. ( $G^*/\sin\delta$ )는 바인더의 점탄성 물성이지 소성변형에 대한 등급상수가 아니다. 소성변형등급을 위해서는 바인더의 물성이  $G^*/\sin\delta$ 와 해당 바인더로 만든 혼합물에 대한 소성변형깊이와의 상관관계가 (비선형)함수로서 확립되어야 한다. 그러나 현행 미국의 PG등급은 바인더물성이  $G^*/\sin\delta$ 와 타이어가 한바퀴 회전동안 포장에 행하는 일의 양과 관련짓고 있으며, 이러한 일의 양과 소성변형깊이와의 관계는 선형임을 암시하고 있다. 그러나 이러한 선형관계가 잘못되었음을 본 논문을 통해 밝혔다.
3. 혼합물의 소성변형깊이( $h$ )는 혼합물을 만든 해당 바인더의 물성의 함수로서 표현되며, 이 때 바인더의 물성으로서  $G^*/\sin\delta$  뿐만 아니라  $\beta$ 도 함께 고려되어야 한다. 그러나 현행 미국의 PG등급은  $G^*/\sin\delta$ 만 고려하고 또 다른 바인더 물성인  $\beta$ 에 대한 언급은 전혀 없음으로 심각한 오차가 발생한다.
4. 현장가속시험기나 실내 바퀴주행시험기의 실험데

이터들을 현행 미국의 수퍼페이브 PG등급 식으로

회귀분석한 결과는 PG등급 식에 상당한 오류가 있음이 입증될 뿐만 아니라, 이러한 오차는 개별 아스팔트바인더는 물론이고 스트레이트 아스팔트바인더에서도 동일하게 발견된다.

5. 미국의 PG등급의 오류를 정정하기 위하여 새로운 아스팔트바인더 등급 식을 소개하였으며, 문현상에 발표된 여러 실험데이터로 이 식들의 타당성을 검증한 결과 보다 합리적이고 정확하다는 결론에 도달했다. 따라서 앞으로 이 식을 이용한 새로운 아스팔트바인더 등급체계의 구축이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년 건설교통부 산·학·연 공동연구사업으로 한국건설교통기술평가원의 재정적 지원과 일부는 한국형 포장설계법 개발 프로젝트의 일환으로 한국도로학회의 재정적 지원을 받아 수행되었기에 본 연구를 가능케 한 두 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Bahia, H.U. and Anderson, D.A., "Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters : Background and Comparison with Conventional Properties", *Transportation Research Record 1488, TRB, National Research Council*, Washington, D.C., 1995, pp. 32-39.
2. Bahia, H.U., Hislop, W.P., Zhai, H., and Rangel, A., "Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders", *Proc. Assoc. of Asphalt Paving Tech.*, Vol. 67, 1998, pp 1-41.
3. Stuart, K.D. and Mogawer, W.S., "Validation of Asphalt Binder and Mixture Tests that Predict Rutting Susceptibility Using the FHWA ALF",



- .....
- AAPT, Vol. 66, 1997, pp 109-152.
4. Stuart, K.D., Mogawer, W.S. and Romero, P., "Evaluation of the Superpave Asphalt Binder Specification for High-Temperature Pavement Performance", AAPT, Vol. 69, 2000, pp 148-173.
5. Cox, W.P. and Mertz, E.H., *J. Polymer Science*, Vol. 28, 1958, pp. 619-622.
6. Bonaquist, R.F. and Mogawer, W.S., "Analysis of Pavement Rutting Data from FHWA Pavement Testing Facility Superpave Validation Study", In TRR 1590, TRB, NRC, 1997, pp 80-88.
7. J.D. Huh, K.T. Cho and Y.K. Nam, A Study of a New High Temperature Grading for Modified and Unmodified Asphalt Binders, *J. of Korean Soc. of Pav. Eng.*, Vol.3, No.2, 2001, pp. 91-102.

〈접수 : 2004. 11. 25〉