

아스팔트바인더의 새로운 소성변형공용성 등급기술개발

Development of New Grading Technology for Rut Performance of Asphalt Binders

허정도* · 남영국**

Huh, Jung Do · Nam, Young Kug

1. 서론

아스팔트바인더등급은 아스팔트의 품질을 결정하는 아주 중요한 기술이다. 아스팔트를 개질하거나 재생할 때, 포장하고자 하는 도로의 교통량이나 교통하중을 고려하여 아스팔트바인더를 선정할 때 바인더등급 기술은 필수적이다. 현재 사용되고 있는 바인더 등급은 침입도등급, 점도등급, 공용성등급 등의 세 종류가 있다. 그러나 이 세 등급 모두 올바른 등급을 제공하지 못하는 문제가 있다. 본 연구에서는 공용성에 근거를 둔 새로운 바인더등급 제정방법을 개발하려 한다. 지금까지 어떠한 연구도 소성변형과 바인더물성과의 관계식을 확립하지 못하였다. 그러나 최근들어 허정도 외 (2000)는 이러한 관계식을 확립하는 데 성공하였고, 본 연구는 그들이 제안한 식을 근거로 새로운 등급제정이론을 제안한다. 이러한 이론에 따라 등급을 제정하는 방법과 절차를 제안한다.

2. 새로운 소성변형공용성 등급이론

본 바인더등급은 J 개질바인더를 표준바인더로 선정하여 이를 기준으로 새로운 고온 공용성등급을 제정하고자 한다. 소성변형방지를 위한 고온등급기준은 미국의 수퍼페이크 PG 등급과 같이 60℃, 10 rad/s에서 측정된 값을 기준으로 한다.

허정도 외(2001)⁽¹⁾가 이미 발표한 바와 같이, 광범위한 실내바퀴주행시험과 현장가속시험 데이터를 통한 종합검토결과 등급제정을 위한 기본 식은 아래와 같다.

$$h_N = \frac{c \cdot N^\beta}{(G^* / \sin \delta)^{k\beta}} \quad (1)$$

먼저 소성변형등급제정에 대한 이론을 전개하기 위하여, 60℃에서의 임의의 바인더 혼합물에 대한 소성변형깊이(h_N)를 고려한다. 이 값을 60℃의 표준바인더 혼합물(아래첨자 s로 표시함)의 소성깊이 값과 비교하면 상호간에 차이가 존재한다.

임의의 바인더 혼합물의 소성변형깊이가 적어도 60℃에서의 표준바인더 혼합물의 소성변형깊이보다 적거나 같아야 소성변형에 안전한 바인더가 된다. 왜냐하면, 표준바인더를 선정할 때 이미 이 바인더는 소성변형 합격기준을 통과한 바인더로 검증되었기 때문이다. 일차년도 보고서에서 소성변형깊이의 온도에 대한 영향에서 밝힌 바와 같이 일반적으로 아스팔트혼합물의 소성변형깊이는 온도함수로서 온도를 높이거나 낮춤으로서 소성변형깊이를 크게 하거나 적게 할 수 있다. 60℃에서의 임의의 바인더 혼합물과 표준바인더의 소성변형깊이의 차이는 임의의 바인더 혼합물 온도를 낮추거나 높이므로써 60℃에서의 표준바인더의 소성변형깊이와 동일하게 만들 수 있다. 이러한 원리가 소성변형등급을 제정하는 기본 근거이다.

* 정회원 · 인천대학교 첨단도로교통연구센터 수석연구원 · 공학박사 · (032)770-8915 (Email : jung_huh@hotmail.com)

** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 · 공학박사 · (032)770-8461 (Email : yknam@incheon.ac.kr)



에서 이미 발표하였다. 이를 풀어서 표현하면 다음과 같다. 식 (2)에서 아래첨자 r 은 참고온도를 나타내며 여기서는 60°C 를 의미한다.

$$\text{Ln}(h_N) = \text{Ln} \left\{ \frac{d \cdot N^\beta}{(G^*/\sin \delta)_r^{k\beta}} \right\} - \frac{k\beta E_a}{R} \left\{ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right\} \quad (2)$$

이제 60°C 의 표준바인더 혼합물의 소성변형깊이(h_{N60})를 표현하는 식 (1)과 임의의 바인더 혼합물의 소성변형깊이(h_N)를 동일하게 하기 위하여 후자의 온도를 60°C 를 기준으로 변화시키면 등급제정 식이 얻어진다.

$$T(^{\circ}\text{K}) = \left[\frac{1}{T_{60C}} + \frac{R}{k\beta_{60C} E_a} \cdot \text{Ln} \left\{ N^{\beta-\beta_r} \cdot \frac{(G^*/\sin \delta)_s^{k\beta_r}}{(G^*/\sin \delta)^{k\beta}} \right\}_{60C} \right]^{-1} \quad (3)$$

위 식을 사용하여 등급을 제정하기 위하여서는 각 상수들이 정의 되어야 한다. 아래에 이들 상수에 대해서 구체적으로 다루고자 한다.

3. 온도민감지수(E_a/R)의 산출

각 바인더에 대한 온도민감지수를 구하기 위해서는 10 rad/s 에서 $G^*/\sin \delta$ 와 온도와의 관계를 알아야 한다. 일반적으로 G'' 와 G^* 의 온도의존성은 거의 동일하므로 점탄성성질을 나타내는 $\sin \delta (=G''/G^*)$ 는 분자와 분모값이 서로 상쇄되어 온도에 대한 변화가 없다고 가정된다. 따라서 $G^*/\sin \delta$ 의 온도의존성은 실제로 복합전단계수(G^*)의 온도변화를 의미하며 이는 아레니우스(Arrhenius) 온도법칙을 따른다.

$$\frac{G^*}{\sin \delta} = \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_r \cdot \exp \left[\frac{E_a}{R} \left\{ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right\} \right] = A \cdot \exp \left\{ \frac{B}{T} \right\} \quad (4)$$

$$\text{Ln} \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right) = \text{Ln} \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_r + \frac{E_a}{R} \left\{ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right\} = \text{Ln}(A) + \frac{B}{T} \quad (5)$$

$$B = \frac{E_a}{R} \quad ; \quad A = \left(\frac{G^*}{\sin \delta} \right)_r \cdot \exp \left\{ \frac{-B}{T_r} \right\} \quad (6)$$

위 식에서 $G^*/\sin \delta$, $(G^*/\sin \delta)_r$, E_a , R , T , 그리고 T_r 은 각각 점탄성상수, 참고온도 T_r 에서의 점탄성상수, 유동을 위한 활성화에너지, 공통 가스상수, 절대온도, 그리고 참고절대온도 등을 가리킨다. 식 (4), (5) 및 (6)의 B 가 온도민감지수를 나타낸다. 국내 아스팔트바인더의 온도민감지수를 구하기 위하여, 동전단 시험을 통해 온도를 변화시켜가며 10 rad/s 에서의 $G^*/\sin \delta$ 값을 측정하였고 이들을 표 1에 나타내었다.

표 1의 데이터를 식 (5)로 회귀분석한 결과가 아래 그림 1과 그림 2에 전시되어 있으며 모두 우수한 예측 결과를 보여주고 있다. 회귀분석 결과 얻어진 물질상수들은 표 2에 수록하였다. 표 2에서 B 값이 구하고자 하는 온도민감지수이다.

4. 상수 β 의 정의와 산출

상수 β 는 경험적 소성변형 식 $h = \alpha N^\beta$ 에서 정의 된다. Lytton 등 (1993)⁽³⁾은 β -값이 0.5를 넘지 않는다고 보고하고 있으며, Zhang and Huber (1996)⁽⁴⁾은 여덟 종류의 SHRP 핵심 아스팔트에 대한 연구결과 β 가 0.29에서 0.45의 범위에 있음을 밝히고 있다. 따라서 본 연구에서도 β 의 최대 값이 0.5로 선택된다. 각 바인더에 대한 60°C 에서의 전단민감지수(n) 값은 표 3에 수록되어 있으므로 이를 이용하여 60°C 에 해당하는 β 값을 구하였으며, 이를 표 3에 수록하였다. β 값(혹은 n 값)이 작을수록 더욱 탄성적인 바인더임을 상기할 필요가 있다.



표 1. 각 아스팔트바인더의 10 rad/s에서의 온도별 G'/sind 값

바인더	40℃	45℃	50℃	55℃	60℃
A	510307	231700	107541	54668	27336
B	544239	266427	128984	64397	33301
B1	2782820	1488585	842482	502523	330736
C	2203810	1323972	805417	508509	322274
D	731980	336375	158023	75673	37682
E	1133351	527219	248716	118539	58893
F	1074428	489970	228082	108225	53268
G	2276659	1028501	450693	200484	97233
H	1483420	744410	382228	200184	107040
I	2066226	1171445	682217	407258	250713
J	1818381	1107782	691623	465199	354366
K	4728121	3431405	2461838	1956401	1706278
L	517713	293189	172658	105044	66575
M	365691	168477	79019	38456	27345
N	533362	242887	112823	54163	27345
O	301420	135941	62829	30267	15394
P	464334	193776	81085	38747	17675

5. 상수 k의 정의와 산출

일반적으로 k는 바인더와 무관하고 골재의 종류와 입경, 분포도와 관련이 있다. 통상 바인더등급을 고려할 때는 골재에 대한 모든 변수는 한 가지로 고정시키는 관계로 여기서도 k는 상수로 취급된다. 여기서는 k-값이 0.3482로 선정된다.

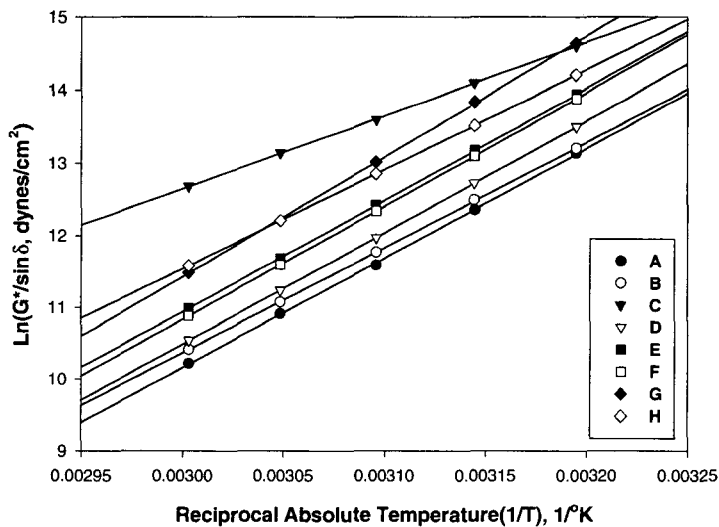


그림 1. 표 1의 데이터를 식 (9)로 회귀분석한 결과.

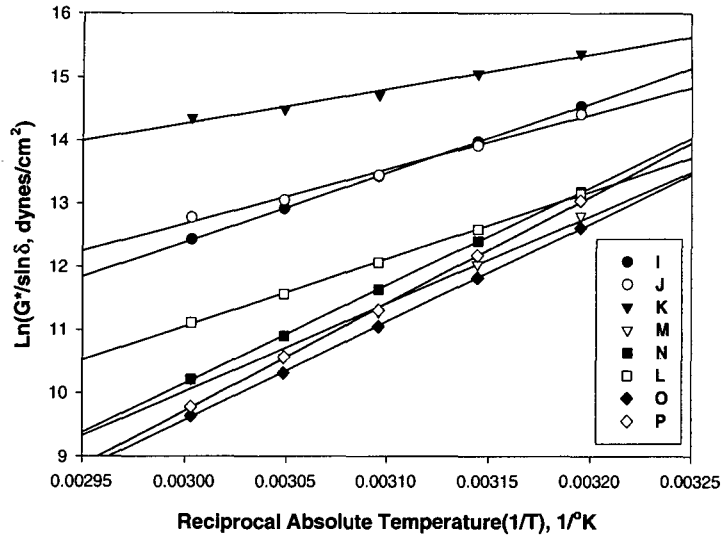


그림 2. 표 1의 데이터를 식 (9)로 회귀분석한 결과.

표 2. 그림 1과 2의 회귀분석결과 얻은 물질상수

바인더	Ln(A)	B=E _a /R	r ²
A	-35.50	15219	0.99968
B	-33.46	14610	0.99995
B1	-20.85	11157	0.99685
C	-17.39	10013	0.99993
D	-35.96	15481	0.99998
E	-35.39	15442	0.99997
F	-36.19	15676	0.99999
G	-38.25	16557	0.99977
H	-29.56	13700	0.99999
I	-20.61	11000	0.99985
J	-13.25	8642	0.99173
K	-2.039	5435	0.98048
L	-21.04	10697	0.99942
M	-31.73	13918	0.98760
N	-36.40	15518	0.99990
O	-37.04	15539	0.99980
P	-41.25	16989	0.99957

6. 국내 아스팔트바인더를 위한 새로운 소성변형 공용성등급제정

이제 식 (3)을 이용하여 등급제정을 할 수 있다. 여기서 얻어지는 등급온도는 새로운 공용성 고온등급 (NPG; New Performance Grading)이 된다. 따라서 60℃가 고온등급이라면 그 표기방법은 다음과 같다.

$$\text{NPG-60}$$

(7)



식 (3)에서 J를 표준바인더로 선정하면 최종 고온등급 식 (8)이 얻어진다.

$$T(^{\circ}K) = \left[\frac{1}{333} + \frac{1}{0.215\beta(E_a/R)} \cdot \text{Ln} \left\{ N^{\beta-0.3989} \cdot \left(\frac{354366^{0.3989}}{(G^*/\sin\delta)^{\beta}} \right)^{0.215} \right\} \right]^{-1}_{60C} \quad (8)$$

이 식에서 임의의 바인더의 60℃에서의 (G*/sinδ), (Ea/R) 및 β를 알면 그 바인더에 대한 등급이 정해진다. 주행회수는 N=10000회로 고정한다.

표 3. 전단민감지수로부터 구한 b값.

번호	바인더	60℃의 n	β
1	A	0.9332	0.4827
2	B	0.9466	0.4863
3	B1	0.7252	0.4204
4	C	0.5688	0.3626
5	D	0.9605	0.4899
6	E	0.9282	0.4814
7	F	0.9702	0.4924
8	G	0.9034	0.4746
9	H	0.8735	0.4662
10	I	0.6491	0.3936
11	J	0.6637	0.3989
12	K	0.6837	0.4061
13	M	0.9624	0.4904
14	N	0.9624	0.4904
15	L	0.7034	0.4129
16	O	0.9535	0.4881
17	P	1.0	0.5

표 4. 식 (86)에 의한 각 바인더의 고온등급 제정 결과.

바인더	(G*/sind)60C	Ea/R	b=n/(n+1)	k	등급온도	등급
A	27336	15219	0.4827	0.3482	28	NPG-28
B	33301	14610	0.4863	0.3482	27	NPG-27
B1	330736	11157	0.4204	0.3482	53	NPG-53
C	322274	10013	0.3626	0.3482	75	NPG-75
D	37682	15481	0.4899	0.3482	29	NPG-29
E	58893	15442	0.4814	0.3482	33	NPG-33
F	53268	15676	0.4924	0.3482	31	NPG-31
G	97233	16557	0.4746	0.3482	38	NPG-38
H	107040	13700	0.4662	0.3482	36	NPG-36
I	250713	11000	0.3936	0.3482	58	NPG-58
J	354366	8642	0.3989	0.3482	60	NPG-60
K	1706278	5435	0.4061	0.3482	90	NPG-90
M	27345	13918	0.4904	0.3482	24	NPG-24
N	27345	15518	0.4904	0.3482	27	NPG-27
L	66575	10697	0.4129	0.3482	39	NPG-39
O	15394	15539	0.4881	0.3482	24	NPG-24
P	17675	16989	0.5	0.3482	26	NPG-26



7. 결론

본 연구에서는 처음으로 소성변형공용성에 근거한 등급제정이론을 제안하였다. 또한 등급제정식에 필요한 물질상수를 정의하고, 동전단시험을 통해 필요한 데이터를 측정하고 분석하여 등급제정에 필요한 물질상수를 산정하였다. 등급제정 식에 산정된 물질상수를 도입하여 국내에 사용되고 있는 대부분의 아스팔트바인더에 대한 등급을 제정하였다. 앞으로의 연구는 이러한 등급이 얼마나 현실적으로 타당한가에 대한 검증을 거쳐 실제 현장에 적용할 수 있도록 하는 것이다. 본 연구는 그 내용에 있어서 획기적이고 독창적인 개념을 가지고 있으므로 아스팔트포장산업에 필수적인 기반기술이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년 건설교통부 산학연 공동연구사업과 관련하여 한국건설교통기술평가원의 재정적 지원을 받아 수행되었기에 본 연구를 가능케 한 두 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 허정도, 남영국 (1999), "A New Theory for Temperature Dependence of Rutting", *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 159 - 169.
- (3) R.L. Lytton, J. Uzan, E.G. Fernando, R. Roque, D. Hiltunen, and S.M. Stoffels (1993), "Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes", SHRP-A-357, SHRP, National Research Council, Washington, D.C.
- (4) X. Zhang and G. Huber (1996), "Effect of Asphalt Binder on Pavement Performance: An Investigation Using the Superpave Mix Design System", *J. Assoc. of Asphalt Paving Technol.*, Vol. 65, pp. 449.