

통계적 근거에 의한 아스팔트 침입도 등급 산정 방안

Suggestion for Statistically Valid Asphalt Penetration Grade System

김광우¹⁾, 임동섭²⁾, 조병진²⁾, 도영수³⁾

Kim, Kwang Woo · Lim, Dong Sub · Joh, Byoung Jin · Doh, Young Soo

1. 서론

KS M2201 “스트레이트 아스팔트”는 ASTM D946과 유사한 과거의 KS규격을 2002년 새롭게 바꾼 것으로 도로용 아스팔트는 물론 그 외 용도의 것도 모두 포함하고 있다. 아스팔트의 침입도 등급은 일련의 범위로 설정되며 각 등급의 범위는 평균, 분산 등의 통계적 특성을 반영하여 설정되어야 한다. 임의의 등급의 침입도 값이 정규분포를 따르고 적절히 품질관리를 한다면 침입도 측정치 평균의 대부분이 그 규격 안에 들어갈 것이다. 하지만 품질의 불확실성 때문에 주어진 규격에 못 들어갈 경우라도 상하 인접 규격의 범위를 침범하지는 않아야 한다. 이를 위해서 각 등급의 범위가 통계적으로 타당하게 설정되는 것도 중요하지만 인접 등급과의 사이에 빈 간격(gap)을 두는 것도 필요하다. 하지만 KS 규정에서는 과거에 존재하던 gap을 없앴으므로 제품의 중복이 쉽게 되어 있다.

또한 KS에서는 침입도 등급 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120과 같이 범위를 모두 20으로 규정한 것도 통계적으로 문제가 있다. 왜냐하면 변동계수가 같은 수준이라 해도 바인더의 경도에 따라 등급별 평균이 다르고 그에 따라 변동량이 달라지기 때문에 등급의 범위도 이를 감안하여 적절히 차등화 해야 한다. 그러나 KS에서는 상기 5가지 침입도 등급을 모두 동일하게 20의 범위로 규정하고 있다(KS M2201).

따라서 본 연구에서는 이러한 KS 침입도규격의 통계적 문제점을 분석하여 도로용 아스팔트의 적정 침입도 등급 산정방안을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 침입도 등급 체계

아스팔트 침입도 등 대다수 건설재료의 특성은 정규분포를 따르는 것으로 가정한다(1,2,7). 따라서 특정 침입도 등급에 만족하는 아스팔트 모집단의 침입도 기대치는 등급의 중앙값(median)이며 $6\sigma(\pm 3\sigma)$ 품질관리를 할 경우 표본의 평균은 99.8%가 규격에 만족하도록 생산된다. 하지만 아스팔트는 변동성이 크므로 표준편차가 이를 만족치 못하는 경우가 많다. 본 연구에서는 여러 단계 침입도 등급 중에서도 국내 도로포장재료로 주 관심 대상인 두 가지 등급 60-80, 80-100(세칭 AP5, AP3)의 값을 중심으로 분석하였다. 이는 현재 ASTM의 60-70, 85-100이 바뀐 것이며 상세한 두 등급 및 그와 유사한 점도등급에 대한 내역은 Table 1에서 보여주며, 이것을 Figure 1에 도시하였다. 그림에서 $N(65, 2.89)$ 는 정규분포로 평균 65, 표준편차 2.89인 함수를 나타낸다.

점도 등급은 일반적으로 침입도 등급보다는 더 선진 등급체계로 인식된다. 하지만 아직도 유럽연합 등 상당수 국가는 침입도 등급을 사용한다. 점도 등급이 선진 체계라고 하는 것은 점도가 침입도에 비해 분산이 적어 품질의 불확실성이 적기 때문이기도 하다(6).

1) 강원대학교 지역기반공학과 교수, email: asphalttech@hanmail.net

2) 강원대학교 대학원 석사과정

3) 강원대학교 강사

Table 1. Binder specifications and selected two grades in each specification.

Property specification	Designation	Typical two grades	Range	Gap between two grades	unit
ASTM Viscosity	AC10 AC20	1000 ± 200 2000 ± 400	400 800	400	p
Old KS pen. & ASTM	AP5 AP3	60-70 85-100	10 15	15	0.1mm
KS Penetration	AP5 AP3	60-80 80-100	20 20	0	0.1mm

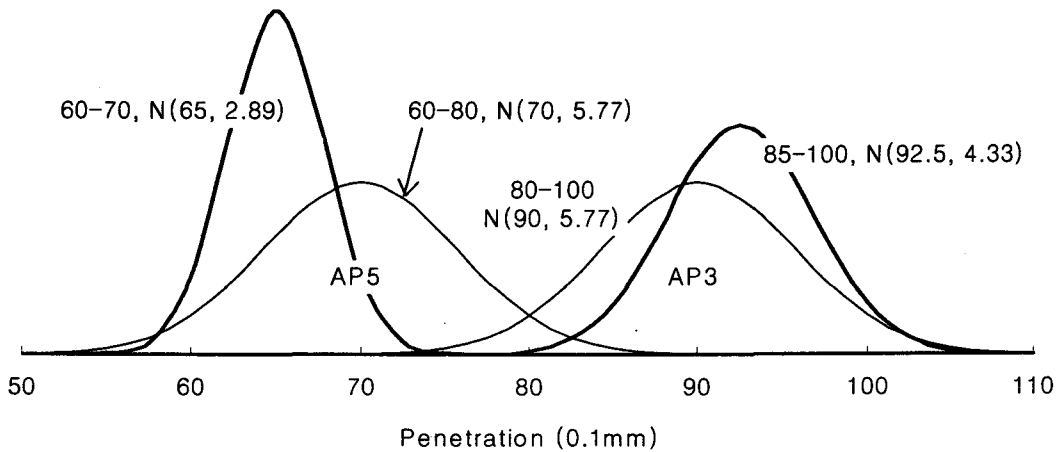

Figure 1. Normal distributions of two binder grades for KS and ASTM.

Table 1에서 보듯이 점도는 허용한계가 $\pm 20\%$ 이다. 침입도는 분산이 점도에 비해 더 크다고 알려져 있어 허용한계가 그 보다 더 커야 할 것이다. 침입도는 내외의 여러 가지 요인 때문에 변동 폭이 커서 측정 방법에 따른 오차도 크고 신뢰도도 낮다. 따라서 분산이 크므로 침입도의 규격을 정할 때는 그 점을 염두에 두어야 한다.

Table 1의 ASTM(우리나라의 과거 침입도: Old KS Pen.) 침입도 규격은 60-70과 85-100 사이에 15만큼의 gap을 떼어놓았다. 하지만 현재 KS 침입도 등급에는 이 간격이 존재하지 않는다. 또한 60-70 등급은 60부터 70까지 10의 범위(range)를 가지며 85-100은 15의 범위를 가져 등급에 따라 범위도 차등화되어 있다.

3. 통계적 분석

3.1 평균, 표준편차의 산정

침입도 분포를 정규분포로 가정 하면 각 등급의 통계적 기대치(expected value)는 평균이고, 그 평균은 범위의 중앙값(median)이다. 예를 들어 침입도 등급 60-70이라는 것은 해당 등급 아스팔트 품목집단(lot)의 침입도 평균이 60초과 70이하의 범위 안에 들어야함을 의미한다. 하지만 평균이 규격을 만족한다 해도 임의의(random) 샘플의 침입도는 규격의 밖에 존재할 수 있다. 따라서 바인더 표본(sample) 침입도의 실제 범위는 훨씬 넓게 존재한다.

규격상 주어진 침입도 범위 60-70인 바인더의 경우 평균이 65이고 평균의 표준오차(standard error of mean: s_x)는 6σ 관리를 할 경우 $(70-60)/6 = 1.67$ 로 추정할 수 있다. 그리고 일반적으로 한 샘플의 침입도시



험은 3번의 평균을 취하므로 평균의 표준오차 $s_x = s/\sqrt{3}$ 로부터 6σ 관리를 할 경우 표준편차(standard deviation: s)는 $s = 1.67 \times \sqrt{3} = 2.89$ 이다. 이와 같이 표준편차가 얻어지면 6σ 품질관리를 할 경우 해당 바인더가 규격을 만족할 확률이 각각 99.8%이다. 같은 방식으로 계산한 60-80, 80-100, 85-100의 표준편차들을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Estimated mean and standard deviation for 4 binders by quality control level.

Penetration grade	Penetration mean (\bar{x}) (0.1mm)	For 6σ QC	
		Standard deviation (s)	CV (%)
60-70	65	2.89	4.45
60-80	70	5.77	8.24
85-100	92.5	4.33	4.68
80-100	90	5.77	6.41

CV: $s / \bar{x} \times 100$

3.2 등급별 범위설정의 문제점

침입도 규격에서 한 등급의 범위는 그 등급에 해당하는 임의의 품목집단(lot)의 평균의 범위를 규정하는 것이다. 하지만 침입도가 큰 등급의 샘플은 낮은 등급보다 넓게 분포하며 그에 따라 실제 침입도의 분산은 무른 바인더일수록 더 크고 침입도가 낮으면 그만큼 분산도 작다. 즉, 침입도가 큰 무른 바인더는 미세한 환경변화(측정온도, 바늘 끝의 민감도, 하중, 실험자 등)에도 측정 오차가 많이 생겨 그만큼 분산이 커진다.

일반적으로 콘크리트 압축강도나 아스팔트 침입도 등의 품질은 평균(\bar{x})에 대한 표준편차(s)의 비율인 변동계수(coefficient of variation: CV)를 일정수준으로 유지하여 관리한다(4,5). 즉, $CV = s / \bar{x} \times 100(\%)$ 이므로 CV 고정시 평균이 커지면 표준편차도 같은 비율로 커진다. 이는 바인더가 물러질수록 침입도 평균치가 커지고 침입도가 큰 바인더는 측정에 따른 편차도 같이 커짐을 수식으로 나타낸 것이다. 따라서 평균이 커지면 표준편차도 커지므로 이를 만족할 수 있도록 규격의 범위도 넓혀주어야 한다. 따라서 과거 등급의 60-70, 85-100 등은 바인더경도에 따라 달라지는 변동량이 규정에 반영되어 침입도가 높은 등급의 범위가 크게 설정된 것으로 통계적으로 타당한 것이다.

3.3 기준치를 벗어날 확률

Figure 2는 KS 침입도 규격을 기준으로 한 AP3와 AP5 두 바인더의 정규분포도이다. 그림에서와 같이 두 바인더가 각각 자체의 기준치를 벗어날 확률을 계산하면 모두 다 0.042이다. 즉, 60-80이 그 등급의 상한선인 80을 넘을 확률이 4.2%이고 80-100이 하한 기준치인 80 이하로 내려갈 확률도 4.2%이다. 따라서 이 수치만 보면 규격 경계선을 넘을 확률이 Figure 3의 ASTM과 같다. 하지만 KS의 이 수치는 자체규격을 벗어날 확률이면서 바로 인접규격을 침범할 확률이다. ASTM의 경우 자체 규격을 벗어날 확률은 어느 정도 있어도 이는 두 등급사이(갭)에 들어갈 확률이지만 KS는 자체 규격을 벗어날 확률이 바로 인접규격을 침범할 확률이다. 즉, ASTM의 경우 자체규격은 좀 벗어나도 타 규격을 침범하는 확률은 거의 0이며, 이는 규정 자체가 두 바인더의 중복될 가능성을 방지해주고 있는 것이다.

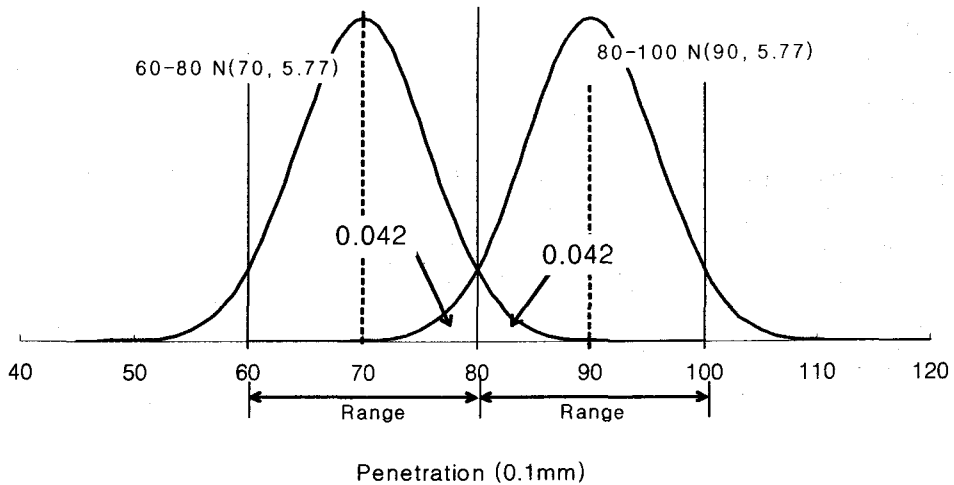


Figure 2. Probability density functions for KS 60-80 and 80-100

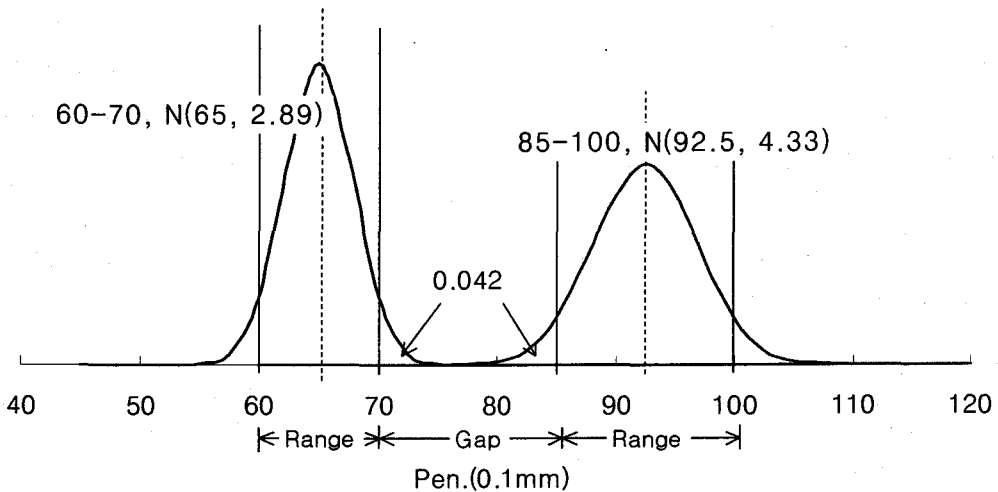


Figure3. Probability density functions of ASTM 60-70 and 85-100

또한 현 KS 규정으로 생산된 AP5 침입도 평균이 규격의 중앙인 70일 때 과거 60-70의 상한 기준인 70을 넘을 확률은 50%이다. 이는 현재 60-80 등급 아스팔트의 약 반은 과거의 AP5 기준을 넘는다는 의미이다. 또한 60-70을 60-80으로 넓혀 그만큼 큰 범위가 허용되므로 변동 폭이 커졌다. 따라서 인접등급인 40-60과 80-100 범위까지 60-80 바인더가 침범할 확률이 매우 높아졌다.

이와 같은 KS 규격변화로 나타나는 가장 큰 문제점은 AP5의 변화이다. 그간 국내에서는 소성변형의 만연으로 인해 기본 아스팔트를 AP3에서 AP5로 전환하고 있는데 현재 AP5가 과거의 것보다 훨씬 무르게 되었고 인접 AP3 등급과의 구분도 애매해졌다. 따라서 소성변형 제어를 위한 바인더 교체 노력이 KS 규격의 변화로 큰 의미가 없어진 셈이다. 특히 생산자는 비용 면에서 보다 유리한 제품 생산을 추구한다고 보면 (AP3가 AP5보다 가격이 낮음) 기준 내에서 가능하면 AP5를 무르게 생산할 가능성이 높다는 현실적인 문제도 안고 있다.



4. 바람직한 침입도 등급 체계

어떤 등급의 바인더가 인접 규격을 침범할 확률은 $\pm 3\sigma$ 관리에 의하면 0.1% 이하 이어야 한다. 표 2에서 보면 국내 바인더의 변동계수는 6.4 - 8.2%이고 ASTM 바인더의 변동계수는 4.5% 정도이므로 국내 품질관리 수준을 고려하여 5%를 적정 변동계수로 가정하고 이를 이용하여 표준편차 s 를 산정하여 계산에 적용하였다. 그러면 AP5의 침입도 평균을 70, 범위 R의 하한을 60으로부터 시작한다고 전제하고, AP3의 평균을 90, 범위 R의 상한을 100으로 제한한다는 가정 하에 다음과 같이 적정 범위를 구할 수 있다.

$$AP5: s = 70 \times 0.05 = 3.5, R = 3.5 / \sqrt{3} \times 6 = 12.12 \approx 12 \rightarrow R = 60 - 72, \bar{x} = 66$$

$$AP3: s = 90 \times 0.05 = 4.5, R = 4.5 / \sqrt{3} \times 6 = 15.59 \approx 16 \rightarrow R = 84 - 100, \bar{x} = 92$$

이를 가지고 인접한 등급의 침범 확률을 계산해보면 다음과 같다. 우선 AP5인 60-72 {N(66, 3.5)}가 84-100의 84를 넘어 침범할 확률이 $\pm 3\sigma$ 관리에 의해 0.1% 이하가 되려면 $(x - \mu) / 3.5 \geq 3.0$ 이어야 한다. 여기서 $(x - \mu) \geq 3.5 \times 3 = 10.5 \approx 11$ 이며, 이는 AP5의 평균(μ)과 상위 등급의 경계 x 와의 차이가 11 이상이 되어야 한다는 의미이다. 그런데 현재 AP5의 평균 66과 AP3의 하한선 84와의 거리는 $84 - 66 = 18$ 로 충분히 떨어져 있다. 따라서 이는 두 등급의 바인더가 중복될 확률이 상당히 낮은 상태에 있음을 알 수 있다. 하지만 이를 실제 현장에서 일어날 수 있는 평균 $\pm 25\%$ 의 분산을 통해 구한 표준편차로 계산하면 약간의 중복확률이 있을 수 있겠지만 본 연구에서 이는 생략하기로 한다.

본 연구에서는 두 바인더의 침입도 등급 산정의 한 예로 60-72와 84-100를 제시하며 그 계산 과정을 보여주었다. 이는 AP3와 AP5만을 가지고 계산한 것으로 잠정적인 것이며 전체적으로 포장용 아스팔트의 등급 설정에 관해 보다 깊이 있고 포괄적인 연구가 필요함을 보여주는 한 예이기도 하다.

5. 결 론

1. KS 침입도 등급은 아스팔트 제품의 통계적 특성이 제대로 반영되지 않은 동일 범위의 등급과 등급사이에 존재하던 빈 간격(gap)을 없앤 새로운 규격을 하고 있다. 이 규격 변화를 통계적으로 보면 현 60-80 등급이 과거 AP5의 침입도 상한치인 70을 넘을 확률이 반 이상이 되므로 같은 AP5라도 과거의 60-70보다 현재 60-80등급 바인더는 훨씬 무른 아스팔트일 확률이 높아 졌다.
2. 각 등급의 범위나 간격은 바인더 품질 변동성에 따라 결정되어야 하지만 KS 규격은 대부분 포장용 아스팔트 등급을 20씩 동일하게 범위를 규정하였다. 게다가 등급사이에 간격이 없어졌기 때문에 규정의 한계를 넘는 경우에 바로 인접등급의 바인더와 중복되는 현상이 발생하여 아스팔트간의 차별성이 적어지게 되었다.
3. 따라서 본 연구에서는 현재 등급체계보다는 보다 통계적으로 신뢰성이 있는 등급체계의 한 예로 60-74, 84-100과 같은 범위가 차등화 되고 등급간에 겹이 있는 등급체계를 만들 수 있음을 보여 주었다.
4. 하지만 이는 통계적 특성을 반영하여 규격을 정할 수 있음을 보여 준 한 예이며, 향후 범위와 겹을 차등하여 설정하되 보다 체계적인 데이터의 축적과 연구를 통해 통계적으로 타당하도록 규정을 개정해야 할 것이다.



감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재센터의 지원에 의하여 이루어진 것임.

참고문헌

1. 김광우, 연규석, 이정규, 박용철, "아스팔트 콘크리트 포장의 다짐밀도에 대한 품질관리 규정 개발," 대한토목학회 논문집 제15권 1호, 1995. 1, pp. 119-129.
2. 김광우, 박제선, 이성남, "PC에서 퍼지셀을 이용한 아스팔트 포장의 기능수행 가능성 추정," 대한토목학회 논문집 제 13 권, 제 5 호, 1993. 11.
3. 김남호, 황성도, 박용철, "비용절감을 위한 도로재료 연구사업," 연구보고서, 전기연97-094, 한국건설기술연구원, 1997
4. 박성현, 공업통계학, 대영사, 1995.
5. Grant, E. L. and Leavnworth, R. S., "Statistical Quality Control," 6th Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
6. "Hot-mix asphalt user guide," Teacher's Manual, Asphalt Institute, 1988.
7. Kalidindi, S. N., "Vriability in asphalt cement properties based on source and time," Thesis in partial fulfillment of the requirement for MS, Graduate School, Clemson University, SC, 1986.
8. Kim, K. W, Burati, J. L. and Amirkhanian, S. N., "Required Number of Specimens for Moisture Susceptibility Testing," Transportation Research Record 1228, TRB, Washington, DC, 1989.
9. 이봉학, 김광우, "불확실성 요인들이 포장공사 지급액 결정에 미치는 영향," 대한토목학회 논문집 제 12 권, 제 4 호, 1992. 12.
10. 김광우, "아스팔트 바인더 규격의 통계적 타당성," 지역도로기술 워크샵 논문집, 한국 건설기술연구원, 2005. 10.