



통계적 분석을 통한 KS 아스팔트 침입도 규격의 문제점 고찰

Statistical Evaluation of Validity of KS Asphalt Penetration Grade System

김 광 우* 이 우 현** 정 재 현*** 도 영 수****
 Kim, Kwang Woo Lee, Woo Hyun Jung, Jae Hun Doh, Young Soo

Abstract

In this study, the Korean Industrial Standard (KS) penetration grade system was examined to evaluate its statistical validity. It was found from this limited study that the system has no gap between each grade, the binder falling out of limit trespasses into other binder grade. Therefore, many products can have similar property level with an adjacent grade even though the mean value is within the specification limit. It was also found out that the equal range setup of each grade, such as 20 for 40-60, 60-80, 80-100, has no statistical foundation. Since KS penetration grade is defined without gap between each grade, the producer must maintain the coefficient of variation below the level by the ASTM system to satisfy the normal quality control limit of products. Due to its lack of a gap between grades, higher percentage of products will be duplicated even if the mean is at the median of the specification limits due to material's quality uncertainty. Especially if the mean moves toward the upper limit, a half or more of the binder grade will be overlapped with the upper binder grade. Therefore, KS penetration specification should be immediately modified by statistically valid methodologies.

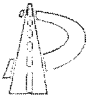
keywords : penetration, mean, standard deviation, standard error of mean, POL, PTL, confidence interval, operation characteristics curve

요 지

본 논문은 KS의 침입도 등급 체계에 대한 통계적 타당성을 검토하였다. 각 등급의 범위는 신뢰구간에 근거하여 설정되어야 하며, 최대한 인접 등급과의 중복을 피하도록 해야 한다. 그러나 통계적 이론에 근거해 검토한 결과 KS 침입도 등급 체계에는 각 등급 사이에 간격(Gap)이 없어서 범위를 벗어나는 것은 바로 다른 바인더의 등급을 침범한다는 점을 알 수 있었다. 따라서 많은 바인더 제품들의 침입도 평균값이 규정한계 내에 있을지라도 인접한 등급과 유사한 특성을 가질 수 있다. 또한 침입도 40-60, 60-80, 80-100과 같이 등급의 범위를 모두 20으로 규정한 것은 통계적 타당성이 없다. KS 침입도 등급은 각 등급 간에 간격이 없기 때문에 생산자는 제품의 품질관리 규정을 만족하기 위하여 ASTM 체계의 제품보다 변동계수를 더 낮게 유지해야 한다. 게다가 침입도평균이 상·하한선 쪽으로 치우친다면 재료의 품질 불확실성 때문에 바인더의 1/2 또는 그 이상이 인접 바인더와 중복된 것이다. 그러므로 KS침입도 등급은 통계적으로 타당토록 바로 수정되어야 한다.

핵심용어 : 침입도, 평균, 표준편차, 표준오차, 신뢰구간, 검사특성곡선

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수
 ** 정회원 · 동화합판(주) 과장 공학석사
 *** 정회원 · 강원대학교 대학원 석사과정
 **** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재센터 연구교수



1. 서론

국내 아스팔트의 침입도 등급 규격인 KS M 2201(스트레이트 아스팔트)은 ASTM D946과 유사한 규격에서 2002년 새롭게 바뀌었다. 하지만 새 등급체계가 통계적으로 많은 모순을 지니고 있어 사용되는 아스팔트에 여러 가지 문제점이 발생하고 있다.

아스팔트의 등급 체계(침입도, 점도 등급)는 일련의 범위(range)로 설정되며 각 등급의 범위는 평균(mean), 분산(variance) 등의 통계적 특성치를 반영하여 설정된다. 아스팔트 침입도나 점도는 특성상 분산을 피할 수 없으므로 범위가 너무 좁게 설정되면 생산자가 어려움을 겪게 된다(producer's risk). 반면 범위가 너무 넓게 설정되면 제품특성의 중복 확률이 높아져 사용자가 피해를 입게 된다(consumer's risk). 따라서 각 등급의 범위는 신뢰구간에 근거하여 설정해야 하며 최대한 인접 등급과의 중복을 피하도록 해야 한다.

임의의 침입도 등급 바인더의 침입도 값이 정규분포를 따르고 $\pm 2\sigma$ 또는 $\pm 3\sigma$ 관리를 한다면 침입도 측정치 평균의 대부분이 그 규격 안에 들어가게 될 것이다. 하지만 생산된 품질의 불확실성 때문에 주어진 규격에 못 들어갈 경우가 있더라도 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 없애므로써 중복된 제품의 발생을 피하기 힘들게 되어 있다.

또한 KS에서는 침입도 등급 60-80, 80-100과 같이 범위를 모두 20으로 규정한 것도 통계적으로 문제가 있다. 왜냐하면 품질의 변동계수가 같은 수준이라 해도 바인더의 경도에 따라 등급별 평균이 달라지며 그에 따라 변동량이 달라지기 때문에 등급의 범위도 이를 감안하여 적절히 차등화 해야 한다. 다시 말해 무른 바인더는 침입도치가 크고 측정에 따른 편차도 커지므로 이를 반영하여 범위를 넓혀 주어야 한

다. 하지만 KS에서는 침입도 20부터 120까지 사이에 5가지 침입도 등급의 범위를 모두 동일하게 20씩 규정하고 있다(KS M 2201).

즉, KS 침입도 등급은 통계적 타당성을 간과하여 한 등급의 바인더가 그 규격을 벗어나면 바로 인접 등급의 범위를 침범하게 되어있고, 또한 각 등급에서 평균이 규격의 한계에 인접할 경우 인접등급과 크게 중복이 되도록 되어있다. 이러한 등급체계 하에서는 바인더의 품질이 더욱 철저히 관리되어야 하지만 그렇지 못할 경우 인접 등급과 유사 바인더 제품이 생산되어 혼합물의 품질관리가 더욱 어려워진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 KS 침입도 규격의 통계적 타당성을 검토하고 제기되는 중요한 문제점을 분석하여 해결책을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 바인더의 침입도 등급 체계

아스팔트 침입도 등 대다수 건설재료의 품질특성은 정규분포를 따르는 것으로 가정한다^(1,2,7). 따라서 특정 침입도등급에 만족하도록 생산된 아스팔트 제품 모집단 침입도의 기대치는 등급의 중앙값(median)이며, 4σ ($\pm 2\sigma$) 또는 6σ ($\pm 3\sigma$) 품질관리를 할 경우 표본의 평균은 각각 95.5% 또는 99.8%가 규격에 만족하도록 생산되어야 한다. 하지만 아스팔트의 품질 특성은 변동성이 크므로 표준편차가 이를 만족하도록 생산되지 못하는 경우가 많다. 본 연구에서는 표 1과 같이 여러 단계 침입도 등급 중에서도 국내에서의 주 관심 대상인 두 가지 등급 60-80, 80-100(세칭 AP5, AP3)의 값을 중심으로 분석하였다. 이는 현재 ASTM과 과거 KS의 60-70, 85-100이 바뀐 것이며 표 2는 보다 상세한 두 등급 및 그와 유사한 점도등급에 대한 설명을 보여주며, 이것을 정규분포 형태로 그림 1에서 보여주고 있다. 그림에서 $N(65, 5.4)$ 는 정규분포로 평균이 65이며 표준편차가 5.4인 함수임을 나타낸다.

PG등급이전 미국에서 사용한 아스팔트 등급은 점



표 1. Specification limits for binder viscosity and penetration grades

Viscosity grade ASTM D3381				Penetration grades (Original binder)		
Original binder		Aged Residue*		KSM 2201**		ASTM D946
Designation	Range (p)	Designation	Range (p)	Range (0.1mm)	Designation	Range (0.1mm)
AC-2.5	250±50	AR-1,000	1000±250	120-150	-	200-300
AC-5	500±100	AR-2,000	2000±500	100-120	-	120-150
AC-10	1000±200	AR-4,000	4000±1000	80-100	AP3	85-100
AC-20	2000±400	AR-8,000	8000±2000	60-80	AP5	60-70
AC-40	4000±800	AR-16,000	16000±4000	40-60	-	40-50

* Aged Residue after rolling thin film oven test.

** Listed only for paving asphalt grades

표 2. Binder specifications and selected two grades in each specification.

Specification and property	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

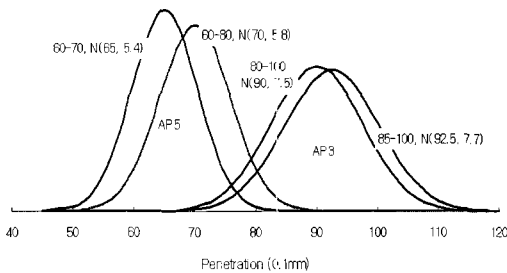


그림 1. Normal distributions of two binder grades for KS and ASTM.

도 등급으로 이는 일반적으로 침입도 등급보다는 더 선진 등급체계로 인식되어 왔다. 하지만 아직도 유럽 연합 등 상당수 국가는 침입도 등급을 사용한다. 점도 등급이 선진 체계라고 하는 것은 점도가 침입도에 비해 분산이 적어 품질의 불확실성이 적기 때문이기

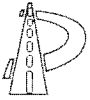
도 하다⁽⁶⁾.

표에서 보듯이 점도체계는 아스팔트의 점도 허용 범위를 ±20% 썩이나 제시하고 있다. 따라서 AC20 아스팔트는 60℃에서의 절대점도가 2,000±400p인 것을 말한다. 즉, 점도 범위가 1,600~2,400p 까지를 AC20으로 간주한다. 그리고 등급간에는 간격이 크게 떨어져 있다. 즉, AC10은 800~1,200이고 AC20은 1,600~2,400p이어서 1,201부터 1,599 사이의 값은 등급 상 존재하지 않는다.

침입도는 특성상 분산이 점도에 비해 더 크다고 알려져 있어 허용한계가 ±20%보다 더 커야 할 것이다. 그 이유는 여러 가지 있겠지만 우선 아스팔트 재료의 특성상 침입도의 측정치는 변동(variation)이 크다. 즉, 복잡한 화학구조로 이루어진 아스팔트의 성질을 일정한 온도에서의 침입도(침입깊이) 만으로 모두 대변하지 못하므로 침입도는 단지 아스팔트의 한 특성을 나타내는 측정치일 뿐이라는 것이다. 또 다른 이유는 측정방법이 점도에 비해 덜 과학적이라는 점이다. 따라서 내외의 여러 가지 변동요인 때문에 변동 폭이 커서 측정방법에 따른 오차도 크고 신뢰도도 낮다. 즉, 분산이 크므로 침입도의 규격을 정할 때는 그 점을 염두에 두어야 한다.

표 1, 2에서 보듯이 미국 ASTM(우리나라의 과거 침입도: Old KS Pen.)의 침입도 규격은 점도 등급과 유사하게 60-70과 85-100 사이에 15만큼의 간격(gap)을 떼어놓았다. 하지만 현 KS 침입도 등급 사이에 이 간격이 존재하지 않는다. 또한 60-70 등급은 60부터 70까지 10의 범위(range)를 가지며 85-100은 15의 범위를 가져 등급에 따라 범위도 차등화 되어있다.

침입도 규격 60-70의 평균치는 65이고 85-100의 평균치는 92.5가 될 것이다. 점도와 같이 65±20%를 적용하면 침입도 범위는 52~78이고 92.5±20%는 74~111이다. 즉 적게 잡아 점도수준의 허용한계를 적용해도 상기 두 등급은 74와 78에서 겹치는 부분이 생긴다. 하지만 침입도의 오차가 점도보다 더 크다고 본다면 60-70과 85-100 두 등급사이



에는 겹치는 부분이 더 크고, 더구나 KS 60-80, 80-100 사이에는 중복이 더 클 것이다.

3. 통계적 분석

3.1 평균, 표준편차의 산정

상기의 설명은 단순히 산술적인 계산이고 여기서는 이를 통계적으로 분석하여 문제점을 분석한다. 기존의 연구^(1,6,7,9)에 의하면 침입도가 점도보다 분산이 더 크므로 허용범위를 $\pm 25\%$ 라 가정 하자(AR 점도와 같은 수준). 각 침입도 등급의 통계적 기대치(expected value)는 평균이고, 정규분포이므로 평균은 범위의 중앙값(median)이다.

예를 들어 침입도 등급 60-70이라는 것은 해당 등급 아스팔트 품목집단(lot)의 침입도 평균이 60과 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: $s_{\bar{x}}$)는 4σ 관리를 할 경우 $s_{\bar{x}} = (70-60)/4 = 2.5$, 6σ 관리를 할 경우 $s_{\bar{x}} = (70-60)/6 = 1.67$ 로 추정할 수 있다. 그리고 일반적으로 한 샘플의 침입도시험은 3번의 평균을 취하므로 평균의 표준오차 $s_{\bar{x}} = s/\sqrt{3}$ 로부터 4σ 관리를 할 경우 표준편차(standard deviation: s)는 $s = 2.5 \times \sqrt{3} = 4.33$, 같은 방식으로 6σ 관리를 할 경우 $s = 2.89$ 이다. 이와 같이 표준편차가 얻어지면 4σ , 6σ 품질관리를 할 경우 해당 바인더가 규격을 만족할 확률이 각각 95.5%, 99.8%이다.

하지만 이 표준편차는 규격의 범위를 근거로 구한 수치이고 이를 실제 현장에서 나타날 가능성이 높은 평균 $\pm 25\%$ 를 표본의 범위로 적용하면 다르다. 즉,

허용오차 범위를 평균 $\pm 25\%$ 로 하여 샘플 표준편차를 추정하면 4σ 관리를 할 경우 평균은 6σ , 표준편차 $s = 2(65 \times 0.25)/4 = 8.125$, 6σ 관리를 할 경우 $s = 2(65 \times 0.25)/6 = 5.42$ 가 된다. 이 표준편차 들은 앞서 계산한 것들보다 훨씬 커서 실제로 해당 등급 규정을 만족할 확률은 상기의 95.5%나 99.8%보다 훨씬 낮다. 같은 방식으로 계산한 60-80, 80-100, 85-100의 표준편차들을 표 3에 나타내었다.

표. 3. Estimated mean and standard deviation for 4 binders by quality control level

Binder	Penetration mean(\bar{x}) (0.1mm)	Standard deviation (s) for QC level of			
		4σ		6σ	
		by spec. limit	by $\bar{x} \pm 25\%$	by spec. limit	by $\bar{x} \pm 25\%$
60-70	65	4.33	8.13	2.89	5.42
60-80	70	8.66	8.75	5.77	5.83
85-100	92.5	6.50	11.56	4.33	7.71
80-100	90	8.66	11.25	5.77	7.50

3.2 등급별 범위설정의 문제점

침입도 규격에서 한 등급의 범위는 그 등급에 해당하는 임의의 품목집단(lot)의 평균의 범위를 규정하는 것이다. 하지만 그림 2에서는 어떤 바인더의 침입도 평균이 규격의 한계에 걸쳐있는 경우 표본 측정치의 범위는 그 규격보다 더 넓어 범위 밖에도 있음을 보여준다.

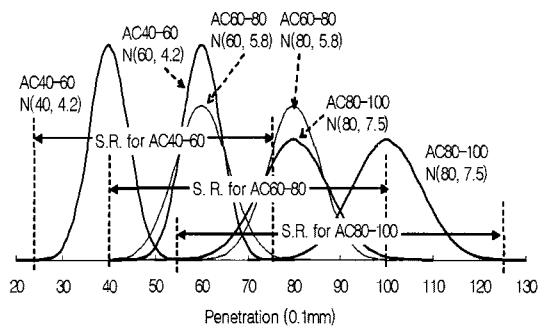


그림 2. Sample ranges (S. R.) when means are at spec. limits for each grade

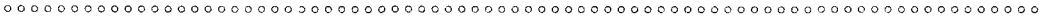


그림 2에서 보듯이 KS 규격은 범위를 모두 같은 20으로 규정했으나 침입도가 큰 등급의 샘플은 낮은 등급보다 넓게 분포하며 그에 따라 실제 침입도의 분산은 무른 바인더일수록 더 크고 침입도가 낮으면 분산도 그만큼 작다. 즉, 침입도가 큰 무른 바인더는 미세한 환경변화(측정온도, 바늘 끝의 민감도, 하중, 실험자 등)에도 측정치의 차이가 많이 생겨 그만큼 분산이 커진다.

그림 2에서는 40-60 바인더의 평균이 규격의 하한선인 40에 있을 때 표본은 약 25부터 존재 할 수 있으며, 상한선인 60에 있으면 표본은 위로 약 75까지 존재 할 수 있음을 보여준다. 같은 방식으로 80-100에 대해서도 보여주고 있으며 이를 통해 40-60 샘플의 범위는 약 25부터 75까지 50에 걸쳐 존재하고 80-100의 범위는 약 55부터 125까지 70만큼 퍼져있음을 알 수 있다. 즉, 규정상으로 같은 등급범위 20을 가진 두 바인더라도 샘플의 분산은 침입도 수준에 따라 다름을 보여주는 것이다. 따라서 이와 같이 침입도 수준이 다른 등급의 바인더 규격을 같은 크기로 정한 것은 분산 특성을 고려하지 않은 것이다. 즉, 침입도 수준이 다른 바인더 등급의 범위를 40-60, 60-80, 80-100, 100-120과 같이 모두 20으로 정하는 것은 통계적으로 문제가 있다.

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 물리질수록 침입도 평균치가 커지고 침입도가 큰 바인더는 측정에 따른 편차도 같이 커짐을 수식으로 나타낸 것이다. 따라서 평균과 표준편차의 차이에 따라 규격의 범위도 조정해 주어야 한다. 따라서 과거의 등급이 60-70, 85-100 등과 같이 경도에 따라 범위가 다르게 된 것은 변동량이 규정에 반영되어 침입도가 높은 등급의 범위가 크게 설정된 것이므로 통계적으로 타당한 것이다.

3.3 기준치를 벗어날 확률

가. ASTM 침입도 규격

그림 3은 ASTM체계의 침입도 60-70과 85-100 두 바인더의 정규분포도이다. 이는 표 3의 6 σ 관리의 경우 $\bar{x} \pm 25\%$ 의 표준편차에 근거하여 그린 것이다. 그림에서와 같이 두 바인더가 각각 자체의 기준치를 벗어날 확률은 각각 17.8%, 16.5%이다.

예를 들어 60-70 바인더에서 임의의 샘플 값의 침입도, x 가 70을 넘을 확률은 $P(x > 70)$ 이며 이를 표준화(normalization) 하면,

$$P\left[z > \frac{70 - 65}{5.42}\right] = P[z > 0.92] = 1 - P[z < 0.92]$$

이고, 정규분포 표로부터 $P(z < 0.92) = 0.8212$ 이므로 x 가 자체규격 70을 넘을 확률은 $P(x > 70) = 1 - 0.8212 = 0.1788$ 이다.

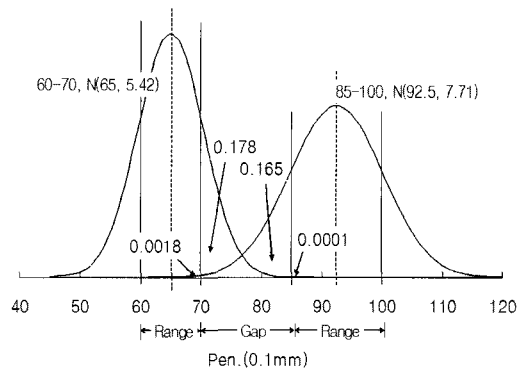
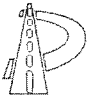


그림 3. Probability density functions of ASTM 60-70 and 85-10

한편 85-100에서 x 가 하한치 85를 벗어날 확률은 $P(x < 85)$ 이고 이를 같은 방식으로 계산하면 0.1650이다. 즉, 60-70은 그 등급의 상한선인 70을 벗어날 확률(Probability out of Own Limit: POL)이 약 18%이고 85-100은 하한선인 85 이하로 내려갈 확률(POL)이 16.5%이다. 그리고 각 등급 자체의 경계선을 넘어 인접등급을 침범할 확률(Probability of Trespassing into next grade Limit: PTL)을 계산



하면, 60-70 바인더가 85-100의 85를 넘을 확률은 $P(x > 85) = P(z > (85-65)/5.42) = P(z > 3.69) = 1 - 0.9999 = 0.0001$ 이다. 그리고 85-100가 60-70의 상한인 70 이하로 내려갈 확률 $P(x < 70)$ 도 같은 방식으로 계산하면 0.0018이어서 두 경우 모두 타 바인더 규격의 상·하한선을 침범할 확률은 0.2%도 되지 않는다. 따라서 18%와 16.5%는 자체 규격을 벗어나 인접 등급 사이의 갭에 들어갈 확률이라 할 수 있다. 그림 3에 나타난 각각의 수치들은 각 등급 바인더가 자체 규격을 벗어날 확률과 인접등급을 침범할 확률을 나타낸다.

나. KS 침입도 규격

그림 4는 KS 침입도 규격을 기준으로 한 AP3와 AP5 두 바인더의 정규분포도이다. 이는 표 3의 6σ 관리경우 $\bar{x} \pm 25\%$ 의 표준편차에 근거하여 그린 것이다. 그림에서와 같이 두 바인더가 각각 자체의 기준치를 벗어날 확률을 앞에서와 같은 방식으로 계산하면 각각 0.0427, 0.0918다. 즉, 60-80이 그 등급의 상한선인 80을 벗어날 확률이 약 4.3%이고 80-100이 하한 기준치인 80 이하로 내려갈 확률이 약 9.2%이다.

이 수치만 보면 두 바인더가 규격 경계선을 넘을 확률이 ASTM의 경우보다 작다. 하지만 KS에서는 ASTM과 달리 이 수치가 자체규격을 벗어날 확률이면서 바로 인접규격을 침범할 확률이다. 이와 같은 계산을 바인더, 표준편차 및 품질관리 수준별로 수행하여 표 4에 요약 정리하였다.

표에서 60-80은 위로 80을 벗어날 확률과 80-100은 아래로 80을 벗어날 확률(POL)을 계산한 것이며, 공히 공통 한계선인 80을 자체 규격은 물론 타 규격의 한계로 가지고 있어 PTL도 같다. KS나 ASTM 모두 규격 범위로(by spec. range) 얻어진 표준편차에 의하면 POL이 같으나 표준편차가 $\bar{x} \pm 25\%$ 에 의해 얻어진 경우는 오히려 KS가 낮아 등급 설정이 별 문제가 없어 보인다. 하지만 ASTM의 경우 자체 규격을 벗어날 확률은 대부분 두 등급사이

(갭)에 있을 확률이지만 KS는 자체 규격을 벗어날 확률이 바로 인접규격을 침범할 확률이다. 즉, ASTM의 경우 자체규격은 좀 벗어나도 타 규격을 침범할 PTL이 8가지 경우 모두 매우 낮거나 거의 0에 가깝다. 이는 규정 자체가 두 바인더의 중복될 가능성을 방지해주고 있는 것이다. 하지만 KS 경우는 등급체계가 달라 4σ관리를 할 경우 높게는 12.7%의 AP5가 AP3와 중복되고, 18.7%의 AP3가 AP5와 중복되는 경우가 발생 할 수 있음을 보여준다. 이는 즉 두 규격사이가 격리되지 않고 붙어있기 때문에 생기는 결과이다.

또한 현 AP5 침입도 평균이 규격의 중앙인 70일 때 과거의 상한 기준인 침입도 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 허용되

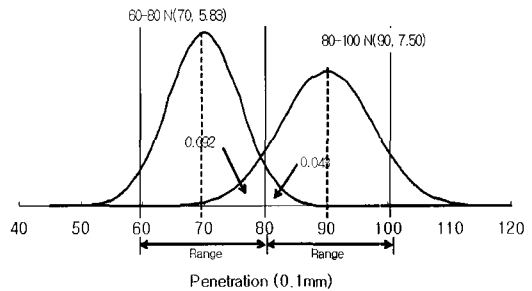


그림 4. Probability density functions for KS 60-80 and 80-100

표 4. Probability out of limit and trespassing into the adjacent limit

Probability	POL				PTL			
	by spec. range		by $\bar{x} \pm 25\%$		by spec. range		by $\bar{x} \pm 25\%$	
QC Level	4σ	6σ	4σ	6σ	4σ	6σ	4σ	6σ
ASTM 60-70	0.1241	0.0416	0.2692	0.1780	0.0001	0.0001	0.0069	0.0001
ASTM 85-100	0.1241	0.0416	0.2582	0.1653	0.0003	0.0001	0.0058	0.0018
KS 60-80	0.1241	0.0416	0.1265	0.0432	0.1241	0.0416	0.1265	0.0432
KS 80-100	0.1241	0.0416	0.1870	0.0912	0.1241	0.0416	0.1870	0.0918

POL: probability of falling out of its own specification limits, PTL: probability of trespassing into next specification limits.



므로 변동 폭이 커졌다. 즉, 배치의 평균이 60부터 80까지의 바인더가 다 AP5로 간주되므로 샘플 침입도 값은 약 40부터 100까지 넓게 존재하게 된다(그림 2). 따라서 인접등급인 40-60과 80-100 범위까지 60-80 바인더가 침범할 확률이 매우 높아졌다.

다. 평균이 규격의 중앙에서 벗어난 경우

실제 생산된 아스팔트의 대부분은 규격의 정 중앙에 평균이 위치하지는 않는다. 외국의 연구⁽⁷⁾에 의하면 두 정유사에서 7개월 간 생산된 85-100의 침입도 평균은 91.1과 86.0이었고, 김광우 등⁽¹⁾은 88, 김남호 등⁽³⁾은 평균 93.8이었다. 또한 AP5의 침입도 평균이 반드시 65가 얻어진 경우는 드물다. 개정 전 AP5에 대해 김남호 등⁽³⁾은 평균 68.5, 김광우 등⁽²⁾은 60이어서 규격의 경계선까지 평균이 나타났다.

예를 들어 표준편차는 표 3의 $\bar{x} \pm 25\%$, 6 σ 관리경우의 값으로 고정하고 KS 60-80의 평균이 75, 80-100의 평균이 85일 경우를 보면 60-80의 상한선인 80을 넘을 확률은 $P(x > 80) = 1 - 0.8051 = 0.1949$ 로 약 20%이다. 반면 AP3가 80-100의 하한선인 80이하로 내려갈 확률은 $P(x < 80) = 1 - 0.7486 = 0.2514$ 로 약 25%이다. 따라서 AP5의 약 20%는 AP3와 중복되고, AP3의 약 25%는 AP5와 중복된다. 또한 극단적으로는 60-80나 80-100 모두 평균이 경계선인 80인 경우도 생길 수 있으며 이 경우 그림 2의 60-80 N(80, 5.8)과 80-100 N(80, 7.5)와 같이 두 바인더는 100% 겹치게 된다.

하지만 ASTM에서는 60-70과 85-100 바인더에서 극단적으로 평균이 각 등급의 규격 한계인 70과 85에 나타나도 두 바인더가 겹치는 확률은 KS 경우보다 낮다(그림 5). 하지만 KS 경우는 완전히 겹침으로 KS는 규격이 바인더의 중복 가능성을 열어 놓고 있다고 볼 수 있다.

또한 침입도 75인 60-80을 과거의 AP5와 비교하기 위해 침입도 70 이하인 확률을 계산하면 $P(x < 70) = 0.1949$ 로 20%도 되지 않는다. 즉, 임의의 AP5 품목집단의 평균 침입도가 75라면 그 중 침입

도 70 이상이 전체의 80% 넘으므로 이 바인더가 과거의 AP5 규격을 만족 할 확률은 매우 낮다. 게다가 침입도 평균이 75뿐만 아니라, 79, 80으로 생산돼도 규격(60-80) 상으로는 하자가 없어 제제가 불가능하므로 현재의 세칭 AP5는 과거보다는 물을 확률이 높다. 반면 AP3는 하한을 80으로 낮추고 범위를 넓힘으로 AP5와 중복될 확률이 높아졌다.

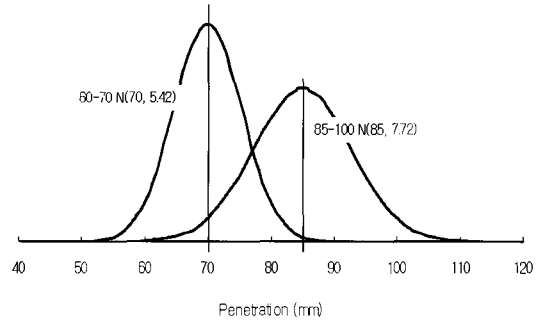


그림 5. Duplication of 60-70 and 85-100 when their means are at own limits

이와 같은 KS 규격변화로 나타나는 가장 큰 문제점은 AP5의 변화이다. 그간 국내에서는 소성변형의 만연으로 인해 기본 아스팔트를 AP3에서 AP5로 전환하고 있는데 AP5가 과거 것보다 훨씬 무르게 되었고 인접 AP3 등급과의 구분도 애매해졌다. 따라서 소성변형 제어를 위한 바인더 교체 노력이 규격의 변화로 큰 의미가 없어진 셈이다.

60-80의 평균치 변화에 따라 과거 AP5 기준인 70과 현재기준인 80을 넘을 확률을 그림 6에서 검사 특성곡선(operation characteristics curve⁽⁶⁾)으로 보여준다. 그림에서 “KS60-80 at 70” 곡선은 KS 60-80 바인더의 평균이 규격한계인 60부터 80까지 변화할 때 임의의 60-80 샘플 침입도가 70보다 낮을 확률을 나타낸다. 평균이 75일 경우 그 확률은 약 20%이며 평균이 더 높아지면 그 확률은 더 낮아져 평균 80에서는 5%도 되지 않는다. “ASTM 60-70 at 70” 곡선은 60-70 바인더의 평균이 규격한계인 60부터 70까지 변화해갈 때 임의의 60-70 샘플 침입도가 70 이하일 확률이다. 그리고 “KS60-80 at



80" 곡선은 임의의 60-80 샘플의 침입도가 80이하 일 확률을 보여주며, "ASTM60-70 at 85" 곡선은 60-70 샘플의 침입도가 85이하일 확률을 나타낸다.

이 그림을 통해 ASTM 60-70는 임의의 샘플 침입도가 70을 넘을 확률이 50% 이하인 것에 비해 현 규격에서는 침입도 70을 넘을 확률이 95% 이상도 발생할 수 있음을 보여준다. 특히 생산자 측에서는 비용 면에서 보다 유리한 것을 추구한다고 보면 (AP3가 AP5보다 가격이 낮음), 기준 내에서 가능하다면 AP5를 무르게 생산할 가능성이 높다는 현실적인 문제도 안고 있다.

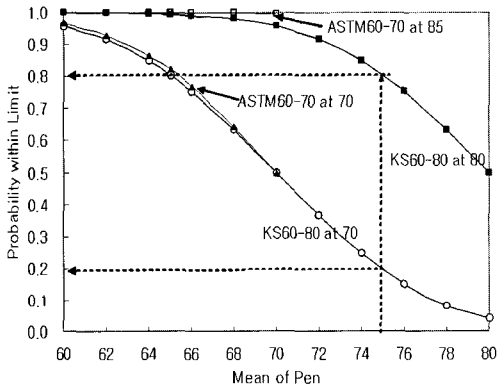


그림 6. Operation characteristics (OC) curve of being within the given limit due to mean change.

4. 바람직한 품질 특성치

어떤 등급의 바인더가 인접 규격을 침범할 확률은 $\pm 3\sigma$ 관리에 의하면 0.1% 이하이어야 한다. 예를 들어 AP5(60-80)의 침입도 평균이 중앙값인 70인 경우 이를 만족할 표준편차는 등급 범위로부터 구한 5.77이다(표 3). 이는 변동계수로 $5.77/70 \times 100 = 8.2\%$ 이다. 같은 방식으로 AP3 (80-100)의 경우를 계산하면 표준편차는 그림 3의 5.77이므로 AP3도 같은 표준편차를 유지해야 한다. 하지만 이를 변동계수로 계산하면 $5.77/90 \times 100 = 6.4\%$ 이어서 AP5보다 변동계수를 더 낮게 관리해야 하는 문제가

발생한다. 변동계수를 AP5와 같은 수준으로 유지 한다면 표준편차는 $0.082 \times 90 = 7.4$ 가 적합하나 표준 편차가 이렇게 커지면 80-100 범위를 가지고는 품질관리 수준을 만족시키지 못하게 된다. 이를 만족하려면 80-100의 범위가 더 넓게 조정되어야 한다.

역으로 80-100이 변동계수 6.4%로 품질수준을 만족하므로 같은 수준의 변동계수에 해당하는 60-80의 표준편차는 $70 \times 0.064 = 4.48$ 이며, 범위는 $4.48/\sqrt{3} \times 6 = 15.52 \approx 16$ 으로 $70 \pm 8 = 62-78$ 이다. 즉, 80-100과 같은 수준으로 품질관리를 할 경우 한 단계 낮은 바인더의 적정 범위는 AC62-78이다.

하지만 아스팔트의 고유 변동성 때문에 현실적으로 두 바인더에서는 공히 표 3의 $\bar{x} \pm 25\%$ 로 계산된 수준의 표준편차가 얻어지게 될 것이다. 즉, 표 3의 AP5는 5.83, AP3는 7.5가 얻어질 것이다. 하지만 이를 5.77 이내로 줄여야 KS 품질관리 기준을 만족할 수 있다. 이는 쉽지 않고 특히 AP3의 7.5를 5.77로 줄이기는 매우 어려울 것이다. 따라서 이의 해결책은 등급간에 갭을 넣는 것이며, 이 점이 고려된 것이 ASTM 침입도 등급이다.

ASTM(과거 KS)에서는 60-70이 85-100의 경계인 85를 침범할 확률을 0.1% 이하로 줄이려면 평균을 중앙값 65로 취했을 때 $3 \geq |(65-85)|/s$ 로부터 표준편차(s)는 6.67이하이면 되었다. 이는 변동계수로 $6.67/65 \times 100 = 10.3\%$ 이며, 표 3의 $\bar{x} \pm 25\%$ 로 계산한 5.42 보다도 훨씬 커서 만족하기가 쉬워 생산자 측에 유리할 것이다.

따라서 과거 기준으로는 표준편차를 6.67 이하로만 줄이면 인접 등급을 침범할 확률이 거의 없었으나 개정 후는 표준편차를 크게 낮추어야 하는 어려움이 생겼고 이를 이행치 못하면 인접등급과 중복 확률이 커진다. 60-70의 범위를 60-80으로 넓힌 것은 허용한계를 넓혀 융통성이 커진 것 같아 보이나 오히려 생산자에게는 변동계수를 더 낮추어야 하는 어려움을, 소비자에게는 인접등급과 중복확률이 높아지는 오류를 유발했다.

그 이유는 새로운 규정에서 등급사이에 간격이 없어졌기 때문이다. 각 등급의 범위나 간격은 바인더



품질의 신뢰구간(confidence interval)에 근거해서 결정되어야 하지만 새로운 규격은 이러한 통계적 근거와는 달리 등 간격으로 각 등급을 규정하였다. 외형적으로는 생산자에게 유리해 보이지만 실제로는 기존 품질을 달성하기 더 어렵게 되었고 그에 따라 품질 왜곡이 심하게 되어 사용자도 불리하게 된 것이다. 그러므로 침입도 등급은 ASTM과 같이 범위와 갭을 차등하게 설정하되 보다 체계적인 연구를 통해 통계적으로 타당한 등급으로 개정을 해야 할 것이다.

을 대상으로 체계적인 데이터의 축적하는 노력이 필요하다. 그리하여 향후 범위와 갭을 차등하게 설정하되 보다 체계적인 연구를 통해 통계적으로 국내재료에 타당하도록 규정을 개정해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재센터의 지원에 의하여 이루어진 것임.

참고문헌

1. 김광우, 연구석, 이정규, 박용철, "아스팔트 콘크리트 포장의 다짐밀도에 대한 품질관리 규정 개발," 대한 토목학회 논문집 제15권 1호, 1995. 1, pp. 119-129.
2. 김광우, 박제선, 이성남, "PC에서 퍼지을 이용한 아스팔트 포장의 기능수행 가능성 추정," 대한토목학회 논문집 제 13 권, 제 5 호, 1993. 11.
3. 김남호, 황성도, 박용철, "비온점감을 위한 도로재료 연구사업," 연구보고서, 건기연97-094, 한국건설기술연구원, 1997
4. 박성현, 공업 통계학, 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., "Variability 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.

5. 결론

1. KS 침입도 등급은 아스팔트 제품의 통계적 특성이 제대로 반영되지 않은 동일 범위의 등급과 등급사이에 존재하던 간격(gap)을 없앤 규격을 제시함으로써 재료의 변동 특성이 제대로 고려되지 못하고 있다. 특히 세칭 AP5의 허용한계를 60-80으로 10 넓혀 융통성이 커진 것 같아 보이니 오히려 생산자에게는 변동계수를 더 낮게 관리해야 하는 어려움을, 소비자에게는 품질의 중복확률이 높아지는 오류를 유발했다.
2. 또한 국내에서는 소성변형 억제를 위해 AP5의 사용이 급속히 증가되었는데 규격의 변화로 통계적으로 보면 과거의 침입도 상한치인 70을 넘을 확률이 반 이상이 되어 그 효과가 적어지게 되었고, 과거의 60-70보다 현재 60-80등급 바인더는 훨씬 무른 아스팔트일 확률이 높아 졌다.
3. 각 등급의 범위나 간격은 바인더 품질 특성에 따라 신뢰구간(confidence interval)을 고려해서 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.
4. 아스팔트는 특성상 분산이 내재해있어 등급간 어느 정도 중복을 피할 수는 없으므로 국내 생산제품

접 수 일: 2006. 10. 27
 심 사 일: 2006. 11. 17
 심사완료일: 2006. 12. 5