

도로 포장의 지불규정 적용을 위한 품질 측정에 관한 통계적 방법 분석

Analysis of Statistic Methods on Quality Measure for Application of Pay Factor in Pavement

이석근* · 박찬호** · 최장규***

Rhee, Suk Keun · Park, Chan Ho · Choi, Jang Kyu

1. 서론

국내 도로 포장에 지불규정을 적용하기 위해서는 포장의 품질을 측정하는 방법이 우선적으로 결정되어야 한다. 지불을 결정하기 위해 여러 가지 품질측정 방법이 사용되고 있다. 과거에는 승인방법, 평균 또는 목표 값에 대한 편차들의 평균을 통해 품질을 측정했다. 하지만 단지 평균만을 사용한다면 변동성을 나타내지 못하므로 현재는 변동성 또한 성능 기준에 중요한 요소로 인식되고 있다. 그래서 미국에서는 측정된 샘플의 품질을 정규분포화 시켜 전체 품질의 시방한계 만족여부에 대한 확률 값을 계산하는 PWL (Percent within Limits)과 PD(Percent Defective)방법이 AAD(Average Absolute Deviation)와 CI(Conformal Index)를 포함한 다른 측정 방법에 비해 최근 몇 년에 걸쳐 선호됐다. 하지만 이와 같은 측정 방법들 중 가장 효과적인 방법은 조사나 실험을 줄이고 불량률을 줄일 수 있는 경제적인 것이어야 한다. 이에 본 연구에서는 미국에서 지불규정에 적용하는 다양한 품질 측정 방법을 설명하였고 국내 지불규정에 적용 할 수 있는 적합한 품질 측정 방법을 제안하였다. 또한 제안된 품질 측정 방법을 국내 실제 도로 포장 구간의 데이터를 이용해 적용 분석하였다.

2. 품질 측정 방법의 정의

2.1 PWL 방법

PWL(Percent within Limits)이란 시방한계에 있는 모집단의 비율을 평가하기 위해서 샘플의 평균과 표준 편차를 이용하는 방법이다. 이 방법은 개념적으로 정규분포를 기초로 한다. PWL은 정규분포곡선 내 영역의 어떤 시방한계 내의 모집단의 비율을 결정하기 위해서 계산된다. 정규분포곡선에 Z-Value가 사용되는 대신에 PWL 측정에는 Q-Value가 사용된다. Q-Value는 품질 측정을 위해 추출된 모집단의 정규분포에 임의의 시방한계(LSL, USL)를 만족하는 확률값을 얻기 위해 설정하는 것으로 기본적인 개념은 Z-Value와 유사하다. 아래 식(1)은 Q값을 계산하기 위한 식이다. 또한 이 식을 통해 미국 사우스캐롤라이나 주에서 사용하는 PWL을 결정하기 위한 Q-Value를 표 1에 나타내었다.

$$Q_L = \frac{\bar{X} - LSL}{s} \quad \text{and} \quad Q_U = \frac{USL - \bar{X}}{s} \dots\dots\dots (1)$$

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2900 (E-mail:skrhee@khu.ac.kr)
** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 박사과정 · 031-201-2923 (E-mail:parkkak@hanmail.net)
*** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923 (E-mail:highway_jk@hanmail.net)



여기서, Q_L =하한 시방한계에 대한 품질지수(Quality Index)

Q_U =상한 시방한계에 대한 품질지수(Quality Index)

LSL(하한 시방한계 Lower Specification Limit)=목표값+허용오차

USL(상한 시방한계 Upper Specification Limit)=목표값-허용오차

\bar{X} =샘플 평균

s =샘플 표준편차

표 1. 품질 지수(Q-Value)에 따른 PWL의 예 (South Carolina, 2007)

PWL	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7	n = 8	n = 9	n = 10 to 11	n = 12 to 14
100	1.16	1.50	1.79	2.03	2.23	2.39	2.53	2.65	2.83
99	-	1.47	1.67	1.80	1.89	1.95	2.00	2.04	2.09
98	1.15	1.44	1.60	1.70	1.76	1.81	1.84	1.86	1.91
97	-	1.41	1.54	1.62	1.67	1.70	1.72	1.74	1.77
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
53	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
52	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
51	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

그림 1은 PWL 방법에서 정규분포상의 시방한계 내에 존재하는 샘플의 비율에 대한 표준편차의 정도를 나타내는 것으로 Positive Q-Statistic이라 하고, 그림 2는 시방한계 밖에 해당되는 샘플의 비율에 대한 표준편차의 정도를 나타내는 Negative Q-Statistic이다.

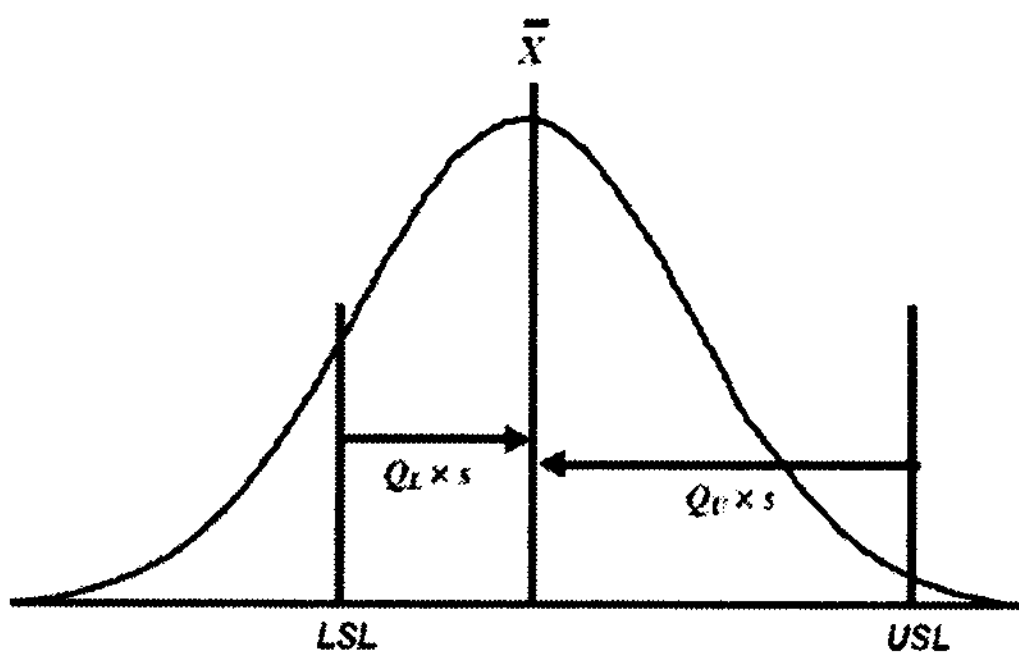


그림 1. Positive Q-Statistic (FHWA, 2002)

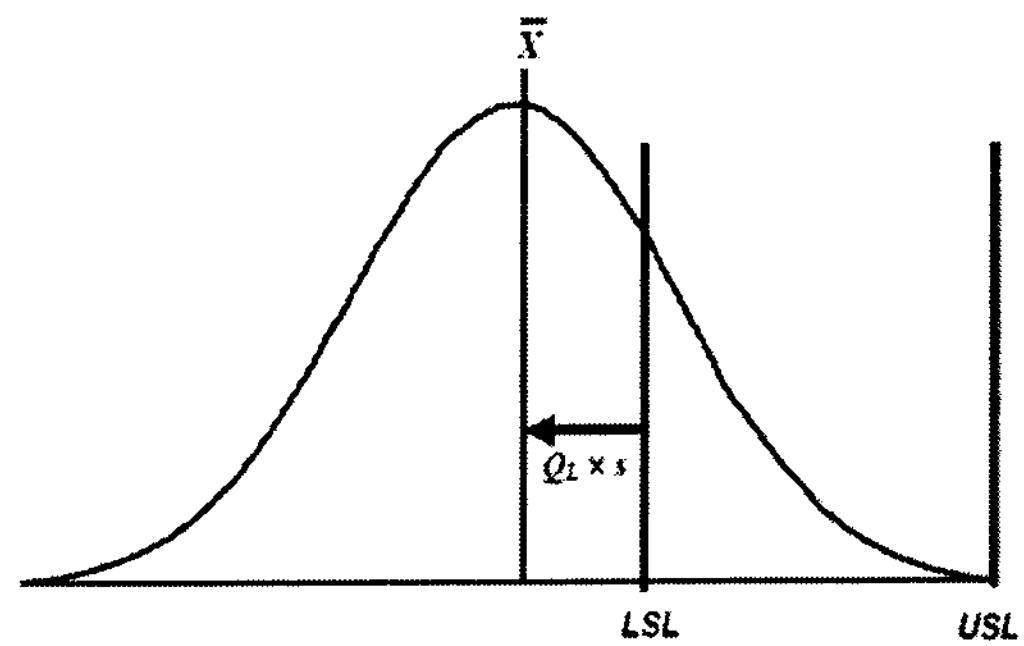


그림 2. Negative Q-Statistic (FHWA, 2002)

PWL 측정에서 하한 시방한계만을 이용할 때는 Q_L 만을 사용하고, 상한 시방한계만을 이용할 때는 Q_U 만을 사용한다. 또한 하한, 상한 시방한계를 모두 사용할 경우 PWL 값은 아래 식(2)과 같이 계산된다.

$$TPWL = UPWL + LPWL - 100 \dots\dots\dots (2)$$



여기서,

$UPWL$ = 상한 시방한계내의 백분율 (Q_U 에 근거)

$LPWL$ = 하한 시방한계내의 백분율 (Q_L 에 근거)

$TPWL$ = 상한, 하한 시방한계내의 백분율

2.2 PD 방법

PWL 방법에 대한 정의를 앞에서 언급했기 때문에 PD(Percent Defective)와 PWL의 관계를 간단히 말하자면 $PWL=100-PD$ 라 할 수 있다. 따라서 PWL 방법과 PD방법은 동일한 품질 측정 방법이다. 하지만 PWL 방법은 재료 또는 성능이 얼마나 많은 요구조건을 만족하느냐 하는 긍정적 의미인 반면에 PD 방법은 재료 또는 성능이 얼마나 많은 요구조건을 만족시키지 못하느냐 하는 부정적 의미를 갖는 차이가 있다. 따라서 미국에서는 부정적 의미인 PD 방법보다 긍정적 의미인 PWL 방법을 장려하고 있다. 그림 3은 PWL과 PD의 관계를 나타내고 있다.

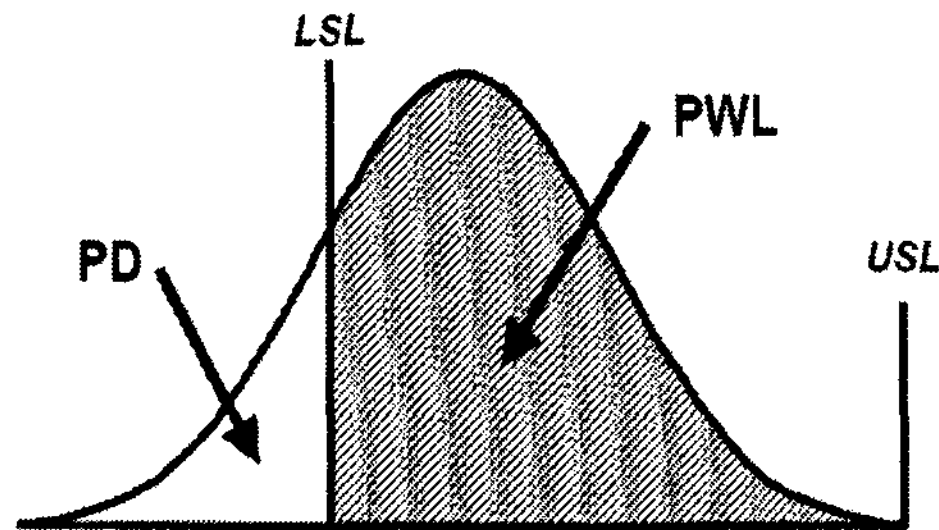


그림 3. PWL과 PD의 관계 (FHWA, 2002)

2.3 AAD 방법

과거 목표 값을 갖는 시방서에 대해 목표 값에 대한 평균은 한때 생산품의 승인 결정을 위해 사용되었다. 이러한 방법은 제품의 생산과정에서 시공사가 품질을 조작하도록 할 수 있는 약점이 있었다. 예를 들어, 오전에 2개의 테스트 결과가 목표 값 보다 낮았다면 오후에 2개의 테스트 결과 값을 높게 하여 4개의 평균을 증가시켜 목표 값에 근접하게 할 수 있다. 본질적으로 이러한 승인 방법은 과정상 평균값을 자주 조절하여 변동성을 증가시키도록 시공사를 부추길 수도 있다.

따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해 테스트 결과에 대해 목표 값이나 시방 값에 대한 평균편차를 변용한 AAD 방법이 나오게 되었다. 목표값에 대한 편차의 절대값을 이용함으로써 시공사는 목표값을 지향하는 것 외에 다른 방법으로 이득을 얻을 수 없다. 예를 들어 LOT에 대해 먼저 측정한 값이 목표값보다 -0.4, -0.6 낮았다고 하여 나중에 두 개의 측정값을 목표값 보다 0.5, 0.5 높게 하여도 4개의 평균은 $(-0.4-0.6+0.5+0.5)/4=0.0$ 이지만 AAD를 사용하면 4개의 절대 평균은 $(0.4+0.6+0.5+0.5)/4=0.5$ 이다. 이렇기 때문에 시공사가 테스트 값을 조작 할 수가 없다. AAD를 계산하기 위한 식은 아래 식(3)과 같다.

$$AAD = \frac{\sum |X_i - T|}{n} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

X_i = 각각의 테스트 결과

T = 목표 값 (Target Value)

n = LOT 당 테스트 수



2.4 CI 방법

목표값에 대한 편차의 제곱을 합하여 결과 값들의 수로 나누어서 얻어진 값을 제곱근하여 표현되며, 목표값이나 시방서 값에 근접하는 여러 결과값의 분산을 측정하는 방법이다. 표준편차는 정밀도를 측정하는 것이지만 CI는 목표값에 대한 일치 정도나 정확도를 측정하는 것이다.

개념적으로 CI 는 AAD와 유사한 방법이다. AAD는 목표값에 대한 각각의 편차의 절대값의 평균값을 이용하는 반면에 CI는 목표값에 대한 각각 편차의 제곱을 이용한다. 또한 CI는 표준편차와 개념적으로 유사하다. 표준편차는 평균값과의 차를 제곱한 평균을 제곱근의 값이다.

그런데 CI는 HMAC에 대한 현장 배합설계값과 같은 목표값에 대한 차를 제곱한 평균값을 제곱근하여 계산한다. AAD와 마찬가지로 CI도 목표값으로부터 크게 또는 작게하는 것을 허용하지 않으므로 전체적인 LOT에 대한 조사를 할 수 없다. CI의 계산은 다음과 같다.

$$CI = \sqrt{\frac{\sum(X_i - T)^2}{n}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

X_i = 각각 테스트 결과값

T = 목표 값

n = LOT 당 테스트 수

3. 품질 측정 방법의 평가 및 선정

3.1 AAD와 CI 평가

평균 절대편차가 낮을수록 목표값에 더 가까워지고 그러므로 생산품의 품질이 더 좋아진다는 이론은 합리적이기 때문에 객관적으로 AAD는 품질 측정에 좋은 방법이라고 판단된다. 하지만 AAD 방법에도 단점들이 존재한다. 가장 큰 문제점은 목표값이 있어야만 적용할 수 있다는 것이다. 콘크리트 압축강도와 같이 오직 하나의 시방한계가 존재할 때 AAD는 적용할 수 없다. 또 하나의 단점은 LOT(품질 측정대상인 모집단)의 변동성을 적절하게 측정할 수 없다는 것이다. 특히 테스트 결과 값이 매우 다른 경우에도 동일한 AAD 값이 나올 수 있다는 것이다.

예를 들어 AAD 방법을 적용할 경우 표 2에 나타낸 4개의 테스트에 3개의 LOT은 값은 같은 AAD 값을 가지므로 동일한 지불규정이 적용될 것이다. 만약 이렇게 상당히 다른 조건에 대해서 동일한 지불규정이 적용된다면 많은 문제점이 야기되고 분쟁의 소지가 될 수 있다. 따라서 평균과 변동성의 차이를 확인할 수 없는 AAD 방법은 품질을 측정하는 방법으로 사용하기에는 문제점이 많다고 판단된다.

표 2. 서로 다른 평균과 표준편차를 나타내지만 같은 AAD 값을 나타내는 LOT의 예 (FHWA, 2002)

Test	$X_i - T$ (샘플 결과 - 목표값)		
	LOT 1	LOT 2	LOT 3
1	+0.4	+0.4	-0.4
2	-0.5	+0.5	-0.5
3	+0.6	+0.6	-0.6
4	-0.5	+0.5	-0.5
AAD	0.5	0.5	0.5
샘플 평균	0.0	+0.5	-0.5
샘플 표준편차	0.58	0.08	0.08



CI는 AAD와 실행하는데 있어서 매우 유사하다. 하나의 시방한계를 갖는 것에 대해서 적용하지 못하는 점과, 상당히 다른 샘플 결과 값에 대해서 같은 CI 값으로 계산될 수 있다는 점이다. 표 3은 3개의 샘플 LOT에 대한 CI값, 샘플 평균, 샘플 표준편차 값이다.

표 3. 서로 다른 평균과 표준편차를 나타내지만 같은 CI 값을 나타내는 LOT의 예 (FHWA, 2002)

Test	LOT 1	LOT 2	LOT 3
1	+1.4	+1.4	-1.4
2	-1.5	+1.5	-1.5
3	+1.6	+1.6	-1.6
4	-1.5	+1.5	-1.5
CI	1.50	1.50	1.50
샘플 평균	0.0	+1.5	-1.5
샘플 표준편차	1.73	0.08	0.08

3.2 품질 측정 방법의 선정

지불규정을 적용하기 위해 인자에 대한 품질을 측정하는 방법은 앞서 말한 바와 같이 PWL, PD, AAD, CI 등 여러 가지 방법이 있다. 이 중 AAD와 CI 방법의 경우 시공사가 임의로 데이터를 조작해 목표 값에 가깝게 할 수 있는 허점들이 있고 데이터의 변동성 또는 목표값으로 부터의 편차를 판단하기 어렵기 때문에 품질 측정 방법으로 선정하기에는 어려움이 많을 것으로 판단된다. 또한 AAD와 CI 방법은 상한 또는 하한 한계만을 갖는 인자에 대해서는 적용할 수 없고 오직 두 가지 시방한계를 갖는 인자에 대해서만 적용할 수 있다는 단점이 있다.

따라서 데이터의 변동성을 판단할 수 있고 한 가지 시방한계만을 갖는 인자에 대해서도 적용할 수 있는 PWL 방법이 가장 이상적이라고 판단된다. 품질 측정 방법의 선정과정을 그림 4에 나타내었다.

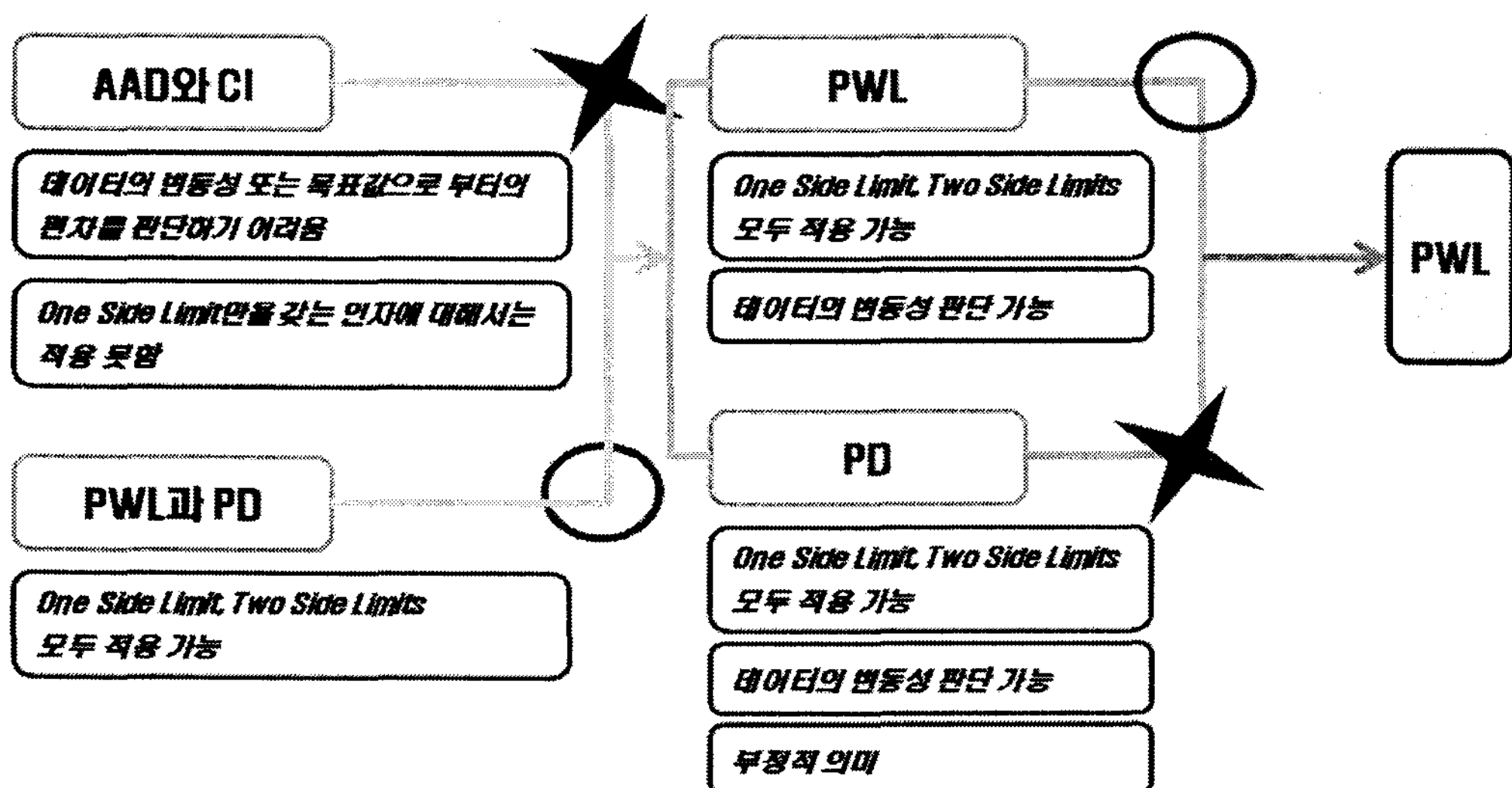


그림 4. 품질 측정 방법의 선정 과정



4. 국내 포장 데이터를 이용한 품질 측정 방법 분석 및 지불규정 산정

미국에서는 이미 통계적 품질 측정 방법을 이용하여 지불규정제도를 시행하고 있다. 아스팔트 시험 포장 구간으로부터 얻은 데이터를 표 5와 같은 통계적 품질 측정 테이블을 이용함으로써 지불규정을 적용하고 있다. 따라서 국내 시험포장 구간의 데이터를 미국 사우스 캐롤라이나 주의 통계적 품질 측정 테이블에 적용하고, 같은 데이터에 대해 정규분포를 적용하여 품질 측정 결과의 연관성을 비교하였다. 표 4는 아스팔트 시험 포장 구간의 밀도에 대한 자료이다. 밀도에 대한 데이터 분석 기준은 건설교통부에서 아스팔트 배합설계 지침으로 제시한 이론최대밀도비 94%를 목표값으로 하여 허용오차 $\pm 2\%$ 로 분석하였다.

표 4. 아스팔트 시험포장 구간 밀도 자료(덕포-연하 시험포장구간)

연번	이론최대밀도	현장코어밀도	이론최대밀도비(%)	비고
1	2.534	2.360	93.13	
2	2.534	2.387	94.20	
3	2.534	2.398	94.63	
4	2.534	2.368	94.44	
5	2.534	2.396	94.55	
6	2.534	2.384	92.08	
7	2.534	2.343	92.46	
8	2.534	2.351	92.77	
9	2.534	2.345	92.54	
평균			93.42	
표준편차			1.024	

표 5. Q_L 과 Q_U 값에 따른 LPWL과 UPWL (n=9) (South Carolina, 2007)

QL or QU	LPWL or UPWL	QL or QU	LPWL or UPWL
2.001 or More	100	-0.539 to -0.540	30
1.841 to 2.000	99	-0.599 to -0.570	29
:	:	:	:
1.421 to 1.480	94	-0.999 to -0.960	17
1.361 to 1.420	93	-1.039 to -1.000	16
1.311 to 1.360	92	-1.079 to -1.040	15
:	:	:	:
0.081 to 0.100	53	-2.529 to -2.000	1
0.051 to 0.080	52	-2.530 or Less	0

표 5는 미국 사우스 캐롤라이나 주의 데이터의 개수가 9인 경우의 통계적 품질 측정 테이블이다. 데이터 분석은 국내 밀도 품질 측정 기준에 준하여 이론최대밀도비의 하한 한계(LSL)는 92%로 하였고 상한한계(USL)는 96%로 하여 산정하였다. 식(1)을 이용하여 Q_L 값과 Q_U 값을 계산하고, 표 5를 이용하여 LPWL과 UPWL을 산정하여 식(2)로부터 TPWL을 구하였다. 표 6은 사우스 캐롤라이나의 통계적 품질 측정 테이블을 이용한 데이터 분석 결과이다.



표 6. 사우스 캐롤라이나 주의 통계적 품질 측정 테이블을 이용한 분석결과

샘플 수 (n)	평균 (\bar{X})	표준편차 (s)	하한한계 (LSL)	상한한계 (USL)	품질지수		시방한계 백분율		전체 백분율
					QL	QU	LPWL	UPWL	TPWL
9	93.42	1.024	92	96	1.387	2.520	93	100	93

또한 데이터 9개의 평균과 표준편차를 이용하여 정규분포로 분석한 결과는 표 7과 같고, 정규분포곡선으로 나타내면 그림 5와 같다.

표 7. 정규분포를 이용한 분석결과

평균 (\bar{X})	표준편차 (s)	하한한계 (%)	상한한계 (%)	Z 값		확률값		품질합격확률(%)
				ZL	ZU	Pr>92	Pr<96	92<Pr<96
93.42	1.024	92	96	1.388	2.520	0.918	0.994	91.2

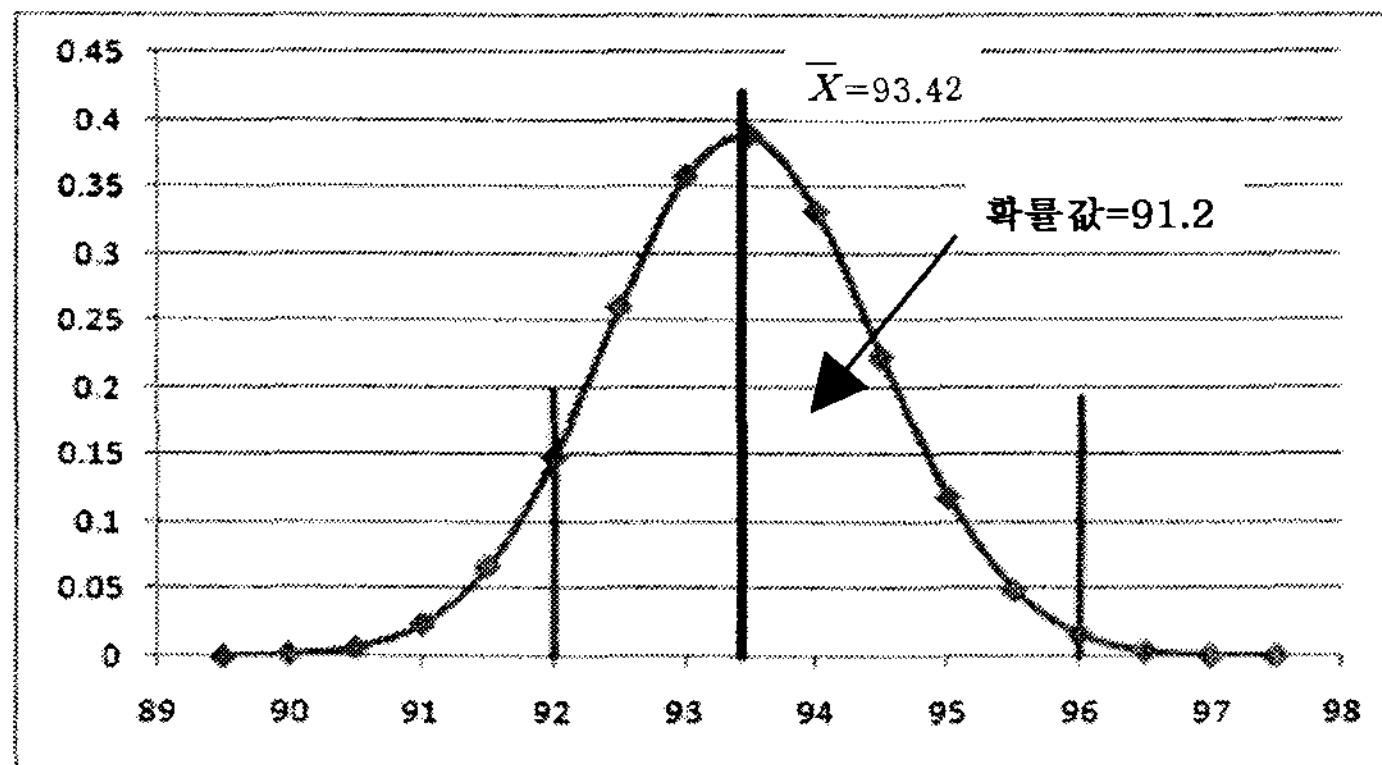


그림 5. 표준정규분포곡선

데이터 분석 결과 미국 사우스 캐롤라이나 주에서 적용되는 통계적 품질 측정 테이블을 이용한 TPWL값이 정규분포를 이용하여 계산된 확률 값 보다 조금 더 높게 산정되었고, TPWL과 확률 값을 비교하면 근사한 값이 산정되었다. 따라서 품질 측정 테이블은 많은 데이터를 통하여 통계적으로 작성되어 신뢰도를 갖는 품질 측정 테이블이라 판단되며, 적은 수의 데이터를 이용하여 국내 도로 포장 구간의 품질 측정이 가능하다. 또한 AASHTO에서 제시하는 지불 방정식(5)에 TPWL값을 적용하여 지불규정을 산정하고, 정규분포를 이용한 경우 품질 합격 확률을 TPWL로 하여 지불규정을 산정하여 비교하였다. 또한 국내에 현재 적용되는 시방기준에 따른 품질 측정 방법으로 평가하여 연관성을 분석하였다.

$$\text{Pay Factor} = 55 + 0.5 \times (\text{TPWL}) \dots\dots\dots (5)$$

미국 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블을 이용한 지불규정은 공사비의 101.5%로 산정되었고, 정규분포를 이용한 경우는 100.59%로 산정되었다. 또한 국내 아스팔트 시방기준을 따른 평가에서 이론최대밀도비는 93.42%로 시방한계 92%이상 96%이내이므로 적절한 포장구간이다. 그리고 품질 측정 테이블을 이용한



경우와 정규분포를 이용한 경우 모두 공사비가 100%이상이므로 적절한 포장구간이다. 이러한 결과분석은 정규분포를 이용한 지불규정보다 품질 측정 테이블을 이용한 경우 조금 더 높은 지불이 결정되는 경향을 나타냈다. 이는 지불규정 적용에 있어서 품질 측정 테이블은 하한시방한계(LSL)와 상한시방한계(USL)에 산정에 있어서 정규분포에 이용되는 특정한 Z값과는 다르게 표 5와 같이 Q_U 와 Q_L 에 대한 허용 오차를 주었기 때문이다. 따라서 많은 데이터를 기초로 하여 통계적 분석 및 보정을 통해 작성된 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블을 이용하여 국내 도로 포장 구간에 적은 수의 데이터를 PWL방법으로 품질 측정하여 지불규정을 산정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 도로포장에 지불규정을 적용하기 위한 다양한 통계적 품질 측정 방법을 비교하였고, 그 결과 데이터의 변동성을 판단할 수 있고, 한 가지 시방한계만을 갖는 인자에 대해서도 적용할 수 있는 PWL 방법이 가장 이상적인 품질 측정 방법이었다.

국내 아스팔트 시험포장 구간의 밀도 데이터를 이용하여 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블로 산정된 TPWL은 정규분포를 이용한 품질 합격률과 비교하여 비슷한 분석값이 산정되므로 품질 측정에 통계적 신뢰도를 갖는다. 또한 국내 시방기준으로 합격되는 시험 포장 구간의 데이터를 AASHTO에서 제시한 지불 방정식(식 5) 적용한 결과값과 정규분포를 이용한 결과값이 모두 100%이상의 지불이 산정되므로 품질 측정에 있어 합격이다. 여기서 품질 측정 테이블을 이용할 경우 Q_U 와 Q_L 값에 허용오차를 주어 정규분포를 이용한 경우보다 다소 높은 품질로 측정되는 경향을 보였다. 따라서 많은 데이터를 기초하여 통계적 분석 및 보정을 통해 작성된 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블은 적은 수의 데이터를 PWL방법으로 품질 측정하여 국내 도로 포장에 있어 지불규정 적용의 가능성을 보였다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D 정책·인프라 사업 - 성능중심의 건설기준 표준화과제('06~'11) 연구 결과의 일부입니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김광우, 연구석, 이정규, 박용철 (1995), 아스팔트 포장 다짐밀도의 통계적 품질관리규정 개발, 대한토목학회논문집 제15권 제1호
2. 이정규(1994), 이론최대밀도에 근거한 아스팔트포장 다짐의 통계적 품질관리 연구, 석사학위논문, 강원대학교
3. Federal Highway Administration (2002), Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications, Federal Highway Administration
4. Federal Highway Administration (2004), Evaluation of Procedures for Quality Assurance Specifications, Federal Highway Administration
5. South Carolina Department of Transportation (2004), QA Specification for Hot Mix Asphalt (Percent Within Limits)
6. Janmes L. Burati, Jr., and Richard M. Weed (2004), Accuracy and Precision of Typical Quality Measures
7. AASHTO, Washington, D.C (1996), Implementation Manual for Quality Assurance.