



아스팔트 포장의 품질측정을 위한 확률이론과 PWL방법의 비교 분석

Comparison Analysis between PWL and Probability Theory for Quality Measurement of Asphalt Pavement

최 장 규* 이 석 근** 김 성 민*** 황 상 민****
Choi, Jang Kyu Rhee, Suk keun Kim, Seong-Min Hwang, Sang Min

Abstract

This study was conducted to suggest reasonable quality measurement methods of asphalt pavements to be used in the Pay adjustment. The Pay adjustment is a method to adjust the construction cost according to the pavement quality based on the statistic theories. Many U.S states use Pay adjustment and the PWL(Percent with in Limit) is calculated using their quality index tables. In this study, the application of PWL in Korea was evaluated by comparing the PWL South Carolina with the probability theories. The probability values and the PWL obtained using the data collected from the test roads were used to determine the pay factors suggested by AASHTO and the pay factors between them were closed to each other. In addition, the PWL was very similar to the probability obtained using the predicted average of the population when calculating the Z-values. The pay factors were obtained using artificial data whose average satisfied the codes and whose standard deviation was large. The pay factors were less than 100% in the quality measurements can be performed using the PWL methods, and with the development of the korea quality index table, the PWL methods can be applied in korea

Keywords : pay adjustment, pay factor, PWL, quality index table, probability, asphalt pavement

요 지

본 연구는 국내에 적합한 지불규정을 도입하기 위해 아스팔트 포장의 품질측정 방법을 제시하고자 수행되었다. 지불규정은 통계이론을 바탕으로 포장의 품질을 결정하여 시공비용을 조정하는 방법으로 지불규정을 적용하는 미국 대다수의 주에서는 고유의 품질테이블을 이용해 PWL(Percent With in Limit)을 산정한다. 따라서 미국 South Carolina에서 적용중인 품질측정테이블을 사용한 PWL과 통계분석방법에 기초한 확률이론의 비교분석을 통해 PWL의 국내 적용여부의 가능성을 판단하였다. 시험포장구간의 데이터를 사용하여 통계이론을 이용해 산출한 확률값과 PWL을 미국AASHTO에서 제시한 지불계수(Pay Factor)에 대입한 결과는 큰 차이를 보이지 않았으며 확률값 도출을 위한 Z-Value 산출과정에서 모집단의 평균을 추정해 계산한 확률값 역시 PWL과 유사한 값을 보였다. 또한 현행 아스팔트 포장의 시방규정을 만족하지만 표준편차가 큰 가상의 데이터를 이용하여 지불계수를 산정한 결과 데이터의 평균값은 현행 시방규정에 만족하지만 지불계수는 100%이하로 산정되는 경우가 있는 것을 알 수 있었다. 이는 PWL방법을 이용함으로써 균질하고 성능이 우수한 품질의 측정이 가능

* 비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : highway_jk@hanmail.net)

** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수(E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

*** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 조교수(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

**** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : jsddd23@hanmail.net)



한 것을 의미하며 따라서 국내실정에 적합한 품질측정테이블을 개발하여 PWL을 국내 지불규정의 품질측정방법으로 사용하는 것이 적합한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 지불규정, 지불계수, PWL, 품질측정테이블, 확률, 아스팔트포장

1. 서론

도로포장 분야는 준공 당시 성능을 판단할 수 있는 근거가 미비하기 때문에 도로포장의 시공품질저하에 따른 문제가 빈번히 발생하고 있다. 특히 우리나라는 두께와 평탄성만을 준공 기준으로 적용하고 있어, 기타 요인으로 인한 공용성 감소와 수명 단축을 예방하기 어려운 실정이다. 이에 따라 우리나라 역시 성능 기준 설계 및 시공 지침을 운영하기 위해 단기적으로는 지불규정 개발 및 적용을, 장기적으로 성능기준의 도입이 요구되고 있다. 포장 품질 향상을 위한 지불규정을 국내 도로 포장에 적용하기 위해서는 포장의 품질을 측정하는 방법과 지불계수가 우선적으로 결정되어야 한다. 1960년대 지불규정을 도입한 미국의 경우 포장의 품질을 통계적으로 측정하는 방법으로는 PWL (Percent with in Limits)과 PD(Percent Defective), AAD(Average Absolute Deviation)와 CI(Conformal Index) 등의 방법을 사용해왔다 (Burati et al., 2003). 하지만 현재 미국에서는 측정된 샘플의 품질을 정규분포화시켜 전체 품질의 시방향계 만족여부에 대한 확률값을 계산하는 PWL이 널리 사용되고 있다. PWL이란 한 개의 LOT에서 얻어진 자료가 정규확률분포를 가진다고 가정할 때 시방향계에 있는 모집단의 비율을 평가하기 위해서 샘플의 평균과 표준편차를 이용하는 방법으로 PWL은 정규분포곡선 내 영역의 어떤 시방향계 내의 모집단의 비율을 결정하기 위해서 계산된다. 하지만 일반적인 통계분석방법의 정규분포곡선에 Z-Value가 사용되는 반면 PWL 측정에는 Q-Value가 사용된다. Q-Value는 품질 측정을 위해 추출된 모집단의 정규분포에 임의의 시방향계를 만족하는 확률값을 얻기

위해 설정하는 것으로 기본적인 개념은 Z-Value와 매우 유사하다. 하지만 유사한 개념의 Z-Value와 Q-Value는 최종적인 확률값과 PWL 산출에 있어 근본적인 차이를 보인다. Z-Value를 이용한 확률값은 표준정규분포 곡선상의 면적으로 정의되는 반면 Q-Value에 따른 PWL은 지불규정을 실시하고 있는 각 주의 자체적인 기준에 따른 품질 테이블에 정의되고 있다. 이 품질테이블은 채취된 시료의 수에 따라 각각의 Q-Value에 대응하는 PWL을 기록하고 있으며 수 많은 포장 데이터를 사용한 통계분석을 통해 완성된 것이다(FHWA, 2004). 따라서 본 연구에서는 국내 포장 자료를 현재 미국에서 사용하고 있는 품질측정 방법인 PWL에 적용하여 Z-Value를 이용한 확률값과의 비교분석을 통해 PWL의 국내 적용 가능성을 분석하였다.

Z-Value를 통한 확률값을 계산함에 있어 모집단 선정의 문제점을 분석하기 위해 2만 여개의 난수값을 생성해 확률값을 산출했다. 엄밀한 의미의 확률값이란 표본평균이 모집단의 평균 μ 를 얼마만큼 대표할 수 있는지를 나타내는 것이다. 예를 들어 전체 도로 포장의 상태를 모집단 μ 로 정의하고 추출된 시료가 표본평균이 된다면 Z-Value값에 따른 확률값은 표본평균이 모집단의 평균 μ 에 어느 정도 만족하는지를 표현하는 것이다. 즉 밀도의 경우 표본평균이 94%를 나타냈다면 엄밀한 의미의 확률값이란 포장 전체를 대표하는 모집단에서 표본평균 94% 이상을 만족하는 비율을 나타내는 것이다. 하지만 Z-Value는 모집단의 평균 μ 를 알아야 하지만 도로포장의 경우 모집단 자체를 규정하기에 어려움이 따른다. 따라서 앞서 언급한 PWL과 확률값의 비교분석은 모집단의 평균 μ 가 표본평균 \bar{x} 와 같다는 가정을 전제로

분석을 진행했다. 따라서 난수를 생성해 가상의 모집단을 선정한 후 실제 포장구간에서 측정된 밀도와 평탄성 자료를 표본평균으로 정의해 확률값을 산출했다. 이는 PWL과 확률값의 비교·분석의 정확성을 높이기 위하여 적용한 것이다.

또한 데이터의 평균값은 시방규정을 만족하고 표준편차를 크게 하는 방식을 통해 2만 여개의 난수를 생성해 지불계수를 산출했다. 현행 국내 포장 품질측정은 표준편차를 고려하지 않은 채 데이터의 평균값이 시방규정에 만족하면 합격판정을 받게 되어 있어 균등한 포장 품질을 담보하지 못한다는 문제점이 발생한다. 하지만 미국의 경우 포장성능의 균등한 품질을 확보하기 위해 PWL산출에 표준편차는 중요한 요소로 적용된다. 따라서 데이터의 평균값은 국내 시방규정에는 만족하지만 표준편차를 크게 하였을 경우에 대한 PWL과 이에 따른 지불계수 값을 분석했다.

2. 국내 포장 자료를 이용한 PWL과 확률값의 비교분석

PWL을 결정하기 위해서는 아스팔트 포장 구간의 샘플로부터 얻은 데이터를 통해 Q-Value를 산출한다. Q-Value는 하한 시방한계만을 이용할 때는 Q_L 만을 사용하고, 상한 시방한계만을 이용할 때는 Q_U 만을 사용하며 식 (1)과 같이 Q-Value가 계산된다.

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

여기서,

Q_L = 하한 시방한계에 대한 품질지수

Q_U = 상한 시방한계에 대한 품질지수

LSL (하한 시방한계 Lower Specification Limit)

= 목표값 + 허용오차

USL (상한 시방한계 Upper Specification Limit)

= 목표값 - 허용오차

\bar{X} = 샘플 평균 s = 샘플 표준편차

미국의 경우 이와 같이 산출된 Q-Value를 이용해 각주에서 사용 중인 품질측정테이블에 따라 PWL을 결정한다. 또한 아스팔트 포장의 밀도와 함량과 같이 하한, 상한 시방한계를 모두 사용할 경우 PWL 값은 식 (2)와 같이 계산되며 AASHTO에서는 최종적인 지불계수를 식(3)과 같이 제안한다. 이를 표준정규분포곡선에 나타낸 것이 그림 1이다.

$$TPWL = UPWL + LPWP - 100 \quad (2)$$

여기서,

$UPWL$ = 상한 시방한계내의 백분율 (Q_U 에 근거)

$LPWP$ = 하한 시방한계내의 백분율 (Q_L 에 근거)

$$\text{Pay Factor} = 55 + 0.5TPWL \quad (3)$$

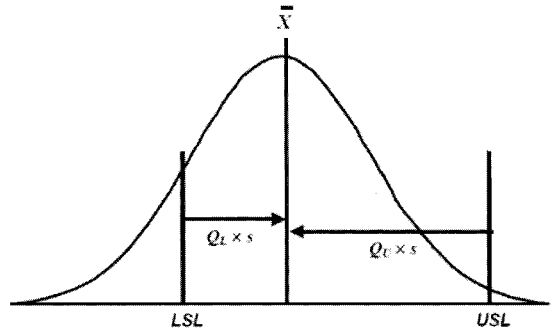


그림 1. 표준정규분포곡선상의 상한한계와 하한한계 (Burati et al., 2003)

미국의 경우 각각의 시방한계를 산정함에 있어 특정한 목표값에 일정부분의 허용오차를 주고 있다. 이는 품질측정에 앞서 진행되는 시료의 채취와 물성시험에서 발생 가능한 오차를 보정해주기 위한 것이다 (FHWA, 2004). 하지만 본 연구에서는 국내 품질기준에 준하여 상한한계와 하한한계를 설정하였으며 이를 바탕으로 PWL에 따른 지불계수와 확률값에 따른 지불계수를 비교 분석하였다. Z-Value는 모집단의 평균 μ 를 알아야 하지만 도로포장의 경우 모집단 자체를 규정하기에 어려움이 따르기 때문에 모집단



의 평균 μ 가 표본평균 \bar{X} 와 같다는 가정을 전제로 분석을 진행했다. 이는 모집단의 평균을 모르는 상태의 경우 자료의 개수가 크고 모집단이 정규분포를 가진다고 가정하면 표본평균 \bar{X} 가 모집단의 평균 μ 의 가장 좋은 추정량이라는 통계학적 이론을 바탕으로 한 것이다. 표 1은 덕포-연하 아스팔트 시험포장 구간의 밀도에 대한 자료이다. 또한 표 2는 농소-불임 아스팔트 시험포장 구간의 밀도에 대한 자료로 시료의 개수가 3개로 자료의 개수가 매우 적다. 따라서 농소-불임 구간의 경우 Z-Value에 따른 확률값과 더불어 자료의 개수가 매우 적을 경우 사용하는 T-Value를 이용해 확률값을 산출했다. 표 3은 채취된 시료의 개수가 9개일 경우에 사용되는 미국 사우스 캐롤라이나주의 품질 테이블이다. Q-Value 산출을 위해 밀도에 대한 시방한계는 국토해양부에서 아스팔트 배합설계 지침으로 제시한 이론최대밀도비 92%를 하한한계로 이론최대밀도비 96%를 상한한계로 설정하였다(국토해양부, 2006).

표 1. 아스팔트 시험포장 구간 밀도 자료 (덕포-연하 시험포장구간)

연번	이론최대밀도	현장코어밀도	이론최대밀도비(%)
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 2. 아스팔트 포장 구간 밀도 자료(농소-불임 포장구간)

연번	이론최대밀도	현장코어밀도	이론최대밀도비(%)
1	2.463	2.357	95.97
2	2.463	2.358	95.74
3	2.463	2.351	95.45
평균			95.72
표준편차			0.2606

표 3. Q_L 과 Q_U 값에 따른 LPWL과 UPWL (n=9) (South Carolina, 2004)

Q_L or Q_U	LPWL or UPWL	Q_L or Q_U	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

식 (1)을 이용하여 Q_L 값과 Q_U 값을 계산하고 표 2를 이용하여 LPWL과 UPWL을 산정하여 식 (2)로부터 TPWL을 구하였다. 덕포-연하 구간의 사우스 캐롤라이나의 통계적 품질 측정 테이블을 이용한 Q-Value에 따른 PWL과 Z-Value에 따른 확률값은 표 4, 표 5와 같이 산출됐으며 이를 바탕으로 그림 2와 같은 정규분포곡선을 얻었다.

표 4. 사우스 캐롤라이나 품질 테이블을 이용한 분석결과 (덕포-연하)

샘플 수 (n)	평균 (\bar{X})	표준 편차 (s)	하한 한계 (LSL)	상한 한계 (USL)	품질지수		시방한계 백분율		전체 백분율
					Q_L	Q_U	LPWL	UPWL		TPWL
9	93.42	1.024	92	96	1.387	2.520	93	100	93

표 5. Z-Value를 이용한 분석결과(덕포-연하)

샘플 수 (n)	평균 (\bar{X})	표준 편차 (s)	하한 한계 (%)	상한 한계 (%)	Z 값		확률값		품질합격 확률(%)
					Z_L	Z_U	$P_r > 92$	$P_r < 96$	
9	93.42	1.024	92	96	1.388	2.520	0.918	0.994	91.2

위와 동일한 분석방법을 사용하여 농소-불임 아스팔트 시험포장 구간의 자료를 분석하였으며 지불계수는 미국 AASHTO에서 제시한 식(3)을 사용하였다. 분석 결과는 표 6과 같다.

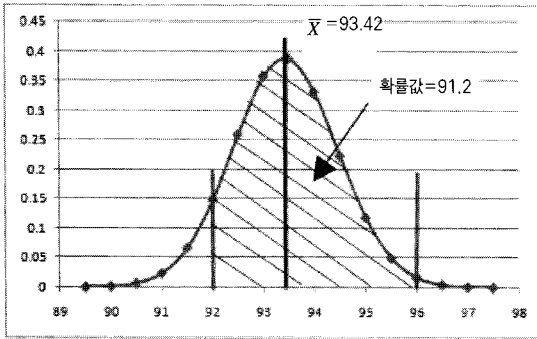


그림 2. 표준정규분포곡선 (덕포-연하 시험포장구간)

표 6. 품질측정방법에 따른 지불계수의 비교 분석-밀도 (농소-불임)

샘플 수(n)	평균(\bar{x})	표준편차(s)	하한한계	상한한계	
3	95.72	0.2605	92	96	
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	
14.276	1.074	100	89	89	99.5
Z-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
Z_L	Z_U	$P_r > 92$	$P_r < 96$	$92 < P_r < 96$	
14.276	1.074	1	0.859	85.871	97.935
t-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
t_L	t_U	$P_r < 92$	$P_r > 96$	$92 < P_r < 96$	
24.726	1.861	0.000816	0.10189	89.7	99.86

데이터 분석 결과 덕포-연하 구간의 경우 Q-Value에 따른 TPWL값이 Z-Value에 따른 계산된 확률값보다 조금 더 높게 산정되었지만 TPWL과 확률값을 비교하면 매우 근사함을 알 수 있다. 따라서 품질 측정 테이블을 통한 TPWL은 앞서 FHWA에서 지적한 바와 같이 많은 데이터를 통하여 통계적으로 작성되어 신뢰도를 갖는 품질 측정 테이블로 판단되며 국내 도로 포장 구간의 품질 측정 역시 이와 같은 방법의 적용이 가능하다고 사료된다. 또한 위의 시험포장 구간의 밀도 자료를 이용하여 AASHTO에서 제시하는 지불계수에 Q-Value에 따른 TPWL값을 적용하여 산출한 지불계수와 Z-Value에 따른 확률값을 TPWL로 치환하여 산정한 지불계수를 비교

하였다. 그 결과 덕포-연하 구간의 경우 미국 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블을 이용한 지불계수는 공사비의 101.5%로 산정되었고, Z-Value를 이용한 경우는 100.59%로 산정되었다. 특히 위의 데이터를 국내 아스팔트포장의 품질 기준에 적용 시 이론최대밀도비의 평균은 93.42%로 시방한계 92% 이상 96% 이내에 분포하며 Q-Value와 Z-Value를 이용한 경우 모두 공사비가 100% 이상이므로 적절한 포장구간으로 판단된다.

농소-불임 구간 역시 미국 사우스 캐롤라이나 주의 품질 측정 테이블을 이용한 지불계수는 공사비의 99.5%로 산정되었고, Z-Value를 이용한 경우는 97.935%로 산출되었다. T-Value에 의한 지불계수 역시 99.86%로 Q-Value와 Z-Value에 의한 지불계수와 큰 차이를 보이지 않았지만 채취된 시료의 개수를 감안한 T-Value를 사용한 지불계수가 Q-Value에 의한 지불계수와 조금 더 유사함을 알 수 있다. 또한 농소-불임 구간의 측정 자료를 국내 아스팔트포장의 품질 기준에 적용 시 이론최대밀도비의 평균은 95.72%로 시방한계 92% 이상 96% 이내에 분포하여 적절한 포장구간으로 판단되지만 Q-Value와 Z-Value, T-Value를 이용한 경우 모두 지불계수가 100% 이하로 공사비를 삭감해야하는 결과를 보였다.

농소-불임 구간의 경우 평탄성과 두께에 대한 데이터 분석을 추가로 실시했다. 이는 밀도를 제외한 다른 지불규정인자에 대해서도 품질측정방법에 대한 비교를 진행하기 위해서이다. 표 7은 농소-불임 구간의 두께 측정 자료이며 표 8은 평탄성자료이다.

표 7. 아스팔트 포장 구간 두께 자료(농소-불임 포장구간)

위치	No.1	No.2	No.3	평균	표준편차
측정결과					
두께(cm)	6.35	6.37	6.37	6.363	0.0115

표 8. 아스팔트 포장 구간 평탄성 자료(농소-불임 포장구간)

위치	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	평균	표준편차
측정결과								
PRI (cm/km)	8.0	8.0	5.3	6.0	7.3	4.0	6.433	1.6158



평탄성의 시방한계는 현행 아스팔트포장 설계 및 시공요령에 기재된 10cm/km로 설정했으며 두께는 현행 국내 품질 측정 기준에 따라 두께의 시방규정인 표층 5cm에 0.3cm의 허용오차를 적용해 4.7cm를 하한한계로 설정했다(도로교통협회, 1997). 농소-불임구간의 밀도 데이터와 같은 방식을 사용해 각 품질측정방법에 따른 지불계수를 비교분석했으며 표 9는 두께를 표 10은 평탄성에 대한 분석 결과를 나타낸다.

표 9. 품질측정방법에 따른 지불계수의 비교 분석-두께 (농소-불임)

샘플 수(n)	평균(\bar{X})	표준편차(s)		하한한계	상한한계
3	6.636	0.0115		4.7	-
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	
144.05	-	100	-	100	105
Z-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
Z_L	Z_U	$4.7 < P_r$	-	$4.7 < P_r$	
144.05	-	1	-	100	105
t-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
t_L	t_U	$4.7 < P_r$	-	$4.7 < P_r$	
249.5	-	8.03E-06	-	100	105

표 10. 품질측정방법에 따른 지불계수의 비교 분석-평탄성 (농소-불임)

샘플 수(n)	평균(\bar{X})	표준편차(s)		하한한계	상한한계
5	6.433	1.6158		-	10
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	
-	2.207	-	100	100	105
Z-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
Z_L	Z_U	-	$P_r < 10$	$P_r < 10$	
-	2.207	-	0.986	98.636	104.32
t-Value		확률값		품질합격확률 (%)	PAY FACTOR
t_L	t_U	-	$P_r > 10$	$P_r > 10$	
-	5.407	-	0.00146	99.99	104.93

두께와 평탄성 자료를 분석한 결과 모든 분석방법의 지불계수가 최대값인 105에 가까움을 알 수 있다. 이는 농소-불임 구간의 두께와 평탄성 자료가 모두 시방한계 안에 존재하고 있기 때문이다. 참고로 미국에서는 지불계수가 100% 이상일 경우는 모든 지불계수를 100%로 인정하거나 100% 이상의 비율만큼 두께에 따라 보너스로 추가 지급하기도 한다.

본 분석결과에서 알 수 있듯이 Z-Value와 T-Value를 이용한 지불계수 산출(샘플의 수가 극히 적은 경우는 T-Value 적용)뿐만 아니라, 도로 포장 구간에 채취된 적은 수의 데이터를 많은 수의 데이터와 다양한 통계적 분석 및 보정을 통해 작성된 미국의 품질 측정 테이블에 적용하여 국내 아스팔트 포장의 PWL과 이에 따른 지불계수 산출이 가능하리라 사료되며, 향후 정확한 품질측정 구간을 선정하여 국내 아스팔트 포장의 품질측정 방법 선정에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

3. Z-Value를 통한 지불계수 산출 상세 분석

Z-Value를 통한 확률값 계산에 있어 기본적으로 요구되는 것은 모집단의 평균과 표본평균을 정확히 알아야 한다는 점이다. 예를 들어 아스팔트 포장의 두께가 n cm 이상일 확률범위를 정의한다면 $P_r(\bar{X} \geq n)$ 과 같을 것이다. 이를 통해 표준정규화 지수 Z-Value 를 구하면 식(4)와 같을 것이다.

$$P_r(\bar{X} \geq n) = P_r\left(\frac{\bar{X} - \mu}{s} \geq \frac{n - \mu}{s}\right) = P_r\left(Z \geq \frac{n - \mu}{s}\right) \quad (4)$$

하지만 표본평균으로 정의되는 채취된 시료의 측정값이 아닌 도로포장 전체를 대상으로 하는 모집단을 정의하기는 어렵다. 뿐만 아니라 시료 채취 작업을 하는 자에 의한 오차와 무작위로 시료를 채취함에 따라 발생하는 위치에 대한 오차 역시 고려돼야 하는 문제점이 존재한다. 앞서 Q-Value와 비교한 Z-



Value에 의한 확률값은 통계이론에 근거해 모집단의 평균을 표본평균으로 가정하여 분석을 수행하였으나 더욱 정확한 비교 분석을 위해 실제 모집단을 가정하여 Q-Value에 따른 PWL과 비교 분석하는 것이 필요하다고 판단된다. 따라서 덕포-연하 구간의 밀도 자료를 표본평균으로 정의한 후 모집단을 정의하기 위해 표본평균을 고려하여 일정범위의 편차와 평균을 제시하여 20만 여개의 난수를 생성했다. 무작위로 생성되는 난수값에 대한 오차를 줄이기 위해 총 3회에 걸쳐 난수를 생성하였으며 이를 다시 무작위로 추출하여 2만 여개의 난수를 추출하였으며, 이를 다시 1000개의 난수로 임의 추출하여 아래 표 11과 같이 모집단으로 정의하였다.

표 11. 난수로 생성된 밀도값의 모집단

모집단	구분	1	2	3	.....	998	999	1000
I	μ	95.289..	93.456..	94.287..	.....	94.562..	94.456..	94.638..
	평균	94.440		표준편차		1.026		
II	μ	94.179..	94.789..	93.127..	.....	94.775..	94.249..	94.893..
	평균	95.478		표준편차		1.021		
III	μ	91.159..	95.713..	92.156..	.....	90.463..	93.271..	92.542
	평균	93.542		표준편차		1.023		

위의 같이 임의로 생성된 난수값을 정의하여 얻어진 모집단과 덕포-연하구간에서 측정된 자료를 표본평균으로 정의해 표 12와 같이 확률값을 계산하였다.

표 12. 모집단의 μ 를 정의한 Z-Value를 이용한 분석결과 (덕포-연하)

모집단	평균 (\bar{X})	표준 편차 (s)	μ	Z-Value	확률값	품질합격 확률(%)	PAY FACTOR
I	93.42	1.024	94.440	-0.9961	0.160	84%	97
II	93.42	1.024	95.478	-2.0097	0.023	97.3%	103.65
III	93.42	1.024	93.542	-0.1176	0.453	54.7%	82.35

앞서 언급한 바와 같이 엄밀한 의미의 확률값이란 표본평균이 모집단의 평균 μ 를 얼마만큼 대표할 수 있는지를 나타내는 것이다. 위의 난수값의 경우 전체

시험 포장 구간의 상태를 모집단 μ 로 정의하고 추출된 시료가 표본평균이 된다면 Z-Value값에 따른 확률값은 표본 평균이 모집단의 평균 μ 에 어느 정도 만족하는지를 표현하는 것이다. 즉 모집단 I의 경우 표본평균이 93.42%를 나타냈다면 엄밀한 의미의 확률값이란 포장 전체를 대표하는 모집단의 평균이 94.440일때 전체 모집단에서 표본평균인 밀도 93.42% 이상을 만족하는 비율이 84%라는 것을 나타낸다.

따라서 위의 분석 결과를 종합하면 표본평균이 모집단의 평균과 가까울수록 확률값은 낮아지게 된다는 것을 알 수 있다. 즉 표본평균이 모집단의 평균 μ 보다 작다는 것은 전체 모집단에서 표본평균 이상인 모집단의 일원이 많다는 의미를 지니고 있는 것이다. 이를 시방한계의 개념으로 설명하면 일정한 확률값을 산출함에 있어 모집단의 평균 μ 를 시방한계로 치환한다는 것은 표본평균이 시방한계로 정의된 구간 안에 어느 정도 존재하는지 여부를 확률로써 확인 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉 모집단의 평균을 모르는 상태의 경우 자료의 개수가 크고 모집단이 정규분포를 가진다고 가정하면 표본평균 \bar{X} 가 모집단의 평균 μ 의 가장 좋은 추정량(영지문화사, 2006)이라는 통계학적 이론은 포장 품질측정을 위한 실제 데이터에 적용이 가능하며, 모집단의 평균을 표본평균으로 표본평균을 시방한계로 가정하여 산출한 Z-Value에 의한 확률값이 적절한 신뢰성을 확보할 수 있으며 이와 더불어 PWL방법으로 측정된 품질 역시 신뢰할 수 있는 것으로 볼 수 있다.

4. 표준편차의 변화에 따른 포장품질측정 결과 비교

현행 국내에서 적용중인 아스팔트 포장 품질 기준에 따르면 이론밀도비의 평균이 시방규정안에 존재하면 합격판정을 받게 되어있다. 하지만 국내 규정의 경우 표준편차를 고려하지 않아 데이터의 평균이 시



방한계 안에 존재하더라도 균등한 포장 품질을 보장할 수 없는 단점이 존재한다(김광우 1994). 따라서 2만 여개의 난수를 생성해 모집단의 선정에 관한 통계분석을 실시한 것과 같은 방법으로 표준편차를 임의로 크게 적용한 난수를 생성해 표준편차에 따른 확률값과 PWL을 분석해 지불계수 산출에 미치는 영향을 알아보았다. 이는 단순한 평균값으로만 포장 품질을 측정하는 현행 국내규정의 단점을 보완하고 지불규정을 통한 포장품질측정의 신뢰성을 확보하기 위함으로 표 13과 같이 표준편차변화에 따른 난수를 생성했다. 표준편차의 평균 등의 영향에 따른 지불계수의 변동폭을 최소화하기 위해 표 13의 난수는 덕포-연하 구간의 표본평균과 동일한 평균을 갖도록 하였고 단지 표준편차만 조정했으며 특히 모집단 III은 덕포-연하 구간과 동일한 표준편차를 갖도록 하였다.

표 13. 표준편차를 변화시킨 난수로 생성된 밀도값의 모집단

모집단	구분	1	2	3	.....	998	999	1000
I	μ	91.237...	93.824...	96.291...	.....	92.387...	94.742...	95.961...
	평균	93.42			표준편차	3.04		
II	μ	94.179...	94.789...	93.127...	.....	94.775...	94.249...	94.893...
	평균	93.42			표준편차	2.02		
III	μ	92.578...	94.249...	92.457...	.....	93.815...	93.694...	94.460
	평균	93.42			표준편차	1.024		

위와 같이 임의로 생성된 난수값의 평균을 표본평균으로 정의하여 표 14와 같이 PWL과 지불계수를 산출했으며 하한한계(LSL)는 92%로 하였고 상한한계(USL)는 96%로 하여 정의하였다.

표 14. 표준편차 영향 비교

모집단	평균 (\bar{X})	표준편차 (s)	Q_L	Q_U	LPWL	UPWL	TPWL	PAY FACTOR
I	93.42	3.04	-0.1908	0.8487	43	54	-3	Fail
II	93.42	2.02	-0.2871	1.2772	50	91	41	75.5
III	93.42	1.024	1.387	2.520	93	100	93	101.5

앞의 결과에서 알 수 있듯이 현행 규정에 의하면

모집단 I, II, III의 평균 모두 시방한계에 존재하므로 합격판정을 받을 수 있다. 하지만 지불계수는 모집단 I의 경우 Fail로 판정됐으며 모집단 II도 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 참고로 지불계수를 산정하지 못하여 Fail로 나타났다는 의미는 준공을 허락할 수 없다는 것이다. 따라서 이는 현행 국내 포장품질측정이 표준편차를 고려하지 않음으로 포장품질을 적절하게 판정하지 못하는 단점을 가지고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 또한 포장품질측정에 있어 표준편차의 영향을 고려한 통계이론에 기초한 확률값을 이용하거나 PWL을 이용해 산출한 지불계수에 따른 방식이 현행 국내 포장 품질평가방식보다 더욱 합리적으로 포장의 품질을 측정할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 지불규정의 국내 적용을 위한 합리적인 품질측정 방법을 선택하기 위한 연구이다. 본 논문은 국내에 적합한 품질평가방식을 제시하고자 다음과 같은 연구내용을 수행하였다. 먼저 미국에서 사용 중인 PWL방법과 통계이론을 바탕으로 한 확률값에 따른 지불계수를 비교 분석하였으며, 난수를 생성해 모집단의 평균을 모르는 상태의 경우 표본평균 \bar{x} 가 모집단의 평균 μ 의 가장 좋은 추정량이라는 통계학적 이론을 시험 포장 데이터를 통해 확인했으며, 포장품질측정에 있어 데이터의 표준편차의 영향에 대해서도 분석하였다. 이를 통해 합리적인 국내 지불계수 산출 방식과 이를 통한 포장품질평가방식을 제안하고자 하였으며 그 결과는 아래와 같다.

1. Q-Value에 따른 PWL과 Z-Value에 의한 확률값 모두 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 포장 자료 모두가 시방기준을 100% 충족하기 때문으로 판단된다. 하지만 밀도의 경우 측정 자료의 수가 작아 Z-value와 T-value를

이용하여 지불계수를 산정한 값이 Q-value에 의한 확률값과 조금의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 확실하게 어떤 방법이 더 큰 확률값을 가질 것이라고 판단하기에는 무리가 있지만 국내 도로 포장 구간에서 채취된 적은 수의 데이터를 많은 수의 데이터와 다양한 통계적 분석 및 보정을 통해 작성된 미국의 품질 측정 테이블에 적용하여 PWL산출과 이에 따른 지불계수 산출이 가능하리라 사료된다.

2. 품질측정 방법의 비교에서 보는 바와 같이 모집단의 평균을 모르는 상태의 경우 자료의 개수가 크고 모집단이 정규분포를 가진다고 가정하면 표본평균 \bar{x} 가 모집단의 평균 μ 의 가장 좋은 추정량이라는 통계학적 이론은 실제 포장 품질 측정을 위한 실제 데이터에 적용이 가능하며 포장데이터의 표준편차를 고려한 확률이론에 기초한 지불규정이 현행 국내 포장 품질평가방식보다 더욱 합리적으로 포장의 품질을 측정할 수 있는 방법으로 볼 수 있다. 다만, 분석결과를 통해서 볼 때 모집단을 정규분포라고 가정하는 Z-value, T-value에 의한 확률값과 Q-value에 의한 확률값의 차이는 크지 않다. 특히 자료의 개수가 적은 경우에 사용하는 통계분석 방법인 T-value와 PWL의 사용 모두 가능하다고 판단되며, 향후 정확한 품질측정 구간을 선정하여 국내 아스팔트 포장의 품질측정 방법 선정에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.
3. 임의로 표준편차를 크게 하여 생성한 난수를 통해 지불계수를 산출했다. 그 결과 포장품질측정에 있어 표준편차의 영향을 고려한 통계이론에 기초한 확률값을 이용하거나 PWL을 이용해 산출한 지불계수에 따른 방식이 현행 국내 포장 품질평가방식보다 더욱 합리적으로 포장의 품질을 측정할 수 있는 방법이라는 것을 확인하였다.
4. 국내 도로 포장 현장에서 수집된 측정 자료는 모두 설계 기준보다 높게 시공되어 있는 것으로

기록돼 Q-value를 이용한 방법과 Z-value를 이용한 지불계수의 차이를 면밀하게 분석할 수는 없었다. 따라서 더욱 많은 국내 포장 현장 자료의 분석을 통해 국내 지불규정 적용을 위한 지불계수 산정을 위해 Z-value, T-value와 PWL의 품질측정 테이블에 대한 구체적인 통계학적 검토 및 방안이 추가로 연구되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

김광우, 연구석, 이정규, 박용철, "아스팔트 포장 다짐밀도의 통계적 품질관리 규정 개발", 대한토목학회 논문집 제 15권 1호, 1995.1, pp. 119~129.
 영지문화사, 현대 통계학, 영지문화사, 2006.
 한국도로교통협회, "아스팔트 포장 설계 및 시공요령", 한국도로교통협회 1997.
 한국건설기술연구원, "아스팔트 포장의 현장다짐 관리 매뉴얼", 국토해양부 2006
 Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes C. S., and Hill, H. S. "Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications" Report FHWA-RD-02-095, Civil Engineering Department of Clemson University, 2003.
 South Carolina Department of Transportation., "QA Specification for Hot Mix Asphalt (Percent Within Limits)", 2004
 Federal Highway Administration, "Evaluation of Procedures for Quality Assurance Specifications", Federal Highway Administration, 2004.

접 수 일: 2008. 10. 16

심 사 일: 2008. 10. 16

심사완료일: 2009. 5. 13