



콘크리트 도로 포장의 품질 관리 및 보증을 위한 지불규정 개발 기법

Methodologies to Develop Payment Adjustment Regulations for Quality Control and Assurance of Concrete Pavements

김성민* 이석근** 서봉교***
Kim, Seong-Min Rhee, Suk-Keun Seo, Bong Kyo

Abstract

This study was performed as part of the development of the payment adjustment regulations for ensuring high performance of concrete pavements. The objectives of this study were to develop the reasonable quality measurement approaches for the implementation of the payment adjustment regulations and to propose the methods to determine the quality dependent pay factors. First, by using the statistics the slab thickness measurement data was analyzed and the methods to determine the allowable measurement errors, the proper measurement spacing, and the selection of the measurement location were proposed. In addition, to suggest the reasonable methods to determine the pay factors, by using the data of the slab thickness and concrete flexural strength, the pay factors based on the PWL (Percent Within Limits) method used in the USA were compared with those obtained considering the normal probability distribution and t distribution. Finally, the most appropriate method to determine the pay factors was proposed.

Key words: pent adjustment regulation, concrete pavement, pay factor, slab thickness, flexural strength, normal probability distribution

요 지

본 연구는 콘크리트 도로 포장의 고품질을 확보하기 위한 방안으로 지불규정을 개발하는 과정의 일환으로 수행되었으며 지불규정의 적용을 위한 합리적인 품질측정방법의 개발 방안을 모색하고 품질에 따라 지불계수를 결정하는 기법을 개발하는 것이 목적이다. 우선 콘크리트 포장의 지불규정 인자인 슬래브 두께에 대하여 통계적인 기법을 이용하여 측정 자료를 분석함으로써 측정자에 따른 읽음오차를 감안하여 지불규정의 기준에 대한 허용오차를 결정하는 방법을 제시하였으며 두께 측정 시 측정 간격 및 위치 등의 측정빈도를 결정하는 방법도 제시하였다. 또한 지불계수를 합리적으로 결정하는 방법을 제시하기 위하여 슬래브 두께와 콘크리트 휨강도 등의 지불규정 인자에 대하여 미국에서 사용하고 있는 PWL 방법을 이용한 지불계수를 산정하여 정규분포와 t분포를 이용하여 구한 지불계수와 비교분석함으로써 국내에 적용하기 적절한 지불계수를 산정하는 방안을 제시하였다.

핵심용어: 지불규정, 콘크리트 포장, 지불계수, 슬래브 두께, 휨강도, 정규확률분포

* 정희원, 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수

** 정희원, 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수, 교신저자

*** 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정



1. 서 론

현재 국내에서는 도로 건설을 위하여 막대한 비용을 들이고 있으나 고품질 확보를 위한 시공품질에 대한 기준이 미비하여 완공 후에도 유지보수를 위하여 매우 많은 비용이 소요되고 있는 실정이다. 이에 반해 선진 외국에서는 시공품질에 따라 시공금액을 차등 지급하도록 하는 지불규정(Payment Adjustment Regulation) 제도를 시행하여 도로 포장의 장기적인 고품질 확보에 큰 성과를 보이고 있으며 그로 인하여 유지보수에 대한 비용도 절감하고 있다(Burati et al., 2003). 이에 따라 국내에서도 현재 재료 및 시공방법 중심으로 된 시방에 지불규정을 포함시킴으로써 포장 기술의 발전을 도모하고 포장의 성능 및 품질을 향상시킬 수 있도록 하는 연구를 진행 중에 있다. 지불규정의 도입을 위해서는 지불규정의 합리적인 적용방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 지불규정에 포함되는 각 인자들에 대한 시공현장에서의 합리적인 품질측정방법이 필요하며 측정된 품질에 상응하는 적합한 시공금액을 지불하도록 하는 기준의 정립도 요구된다. 이에 따라 본 연구는 콘크리트 도로 포장을 대상으로 합리적인 품질측정방법의 개발 방안을 모색하고 품질에 따라 지불규정을 적용하는 기법을 개발하는 것을 목적으로 수행되었다.

우선 콘크리트 포장의 합리적인 품질 측정 기준의 개발 방안을 모색하기 위하여 콘크리트 포장의 지불규정 인자로 가장 중요시 되는 콘크리트 슬래브의 두께에 대한 연구를 수행하였다. 국내의 고속도로 준공현장에서 콘크리트 포장의 두께를 측정하여 통계적인 기법을 이용하여 지불규정의 기준에 대한 허용오차를 결정하는 방법을 제시하였으며 허용오차는 측정자에 의해서 발생하는 읽음오차를 고려하여 산정하였다. 또한 두께 측정 시 Lot이라고 칭해지는 지정된 크기의 구간 내에서 몇 개의 다른 위치에서 두께를 측정해야 측정구간 내의 두께에 대해 신뢰 있는 결과를 가져올 수 있는지에 대한 측정빈도를 결정하는 방법을 제시하였다.

시공 품질에 따른 시공 금액의 지불 기준을 결정하기 위하여 미국에서는 PWL (Percent Within Limits) 이라는 방법을 도입하고 있다(Burati et al., 2004). PWL

방법은 한 개의 Lot에서 측정된 각 지불규정 인자의 품질이 시방한계값을 만족시킬 수 있는 확률을 구하여 지불계수(Pay Factor)를 산정하는 방법이다. 확률값을 산정할 때 측정구간에 대한 모집단이 정규확률분포를 가진다고 가정하지만 실제 확률값은 QI(Quality Index)를 이용하여 산정한다. 따라서 본 연구에서는 슬래브 두께와 콘크리트 휨강도 등 수집된 포장상태자료들을 이용하여 미국에서 사용하는 QI를 이용한 지불계수와 정규분포를 이용하여 산정된 지불계수에 대하여 비교분석을 실시하였다. 또한 측정 시 자료의 개수가 비교적 적은 인자에 대하여 정규분포가 아닌 t분포를 이용하여 지불계수를 산정하는 방법에 대하여 분석하였고 결과를 QI를 이용한 지불계수와 비교함으로써 궁극적으로 국내 실정에 적용하기 가장 합당한 방법을 선정할 수 있는 기반을 마련하였다. 본 논문에서 이러한 연구 내용에 대하여 상세히 설명한다.

2. 품질 측정 기준 설정 방법에 대한 연구

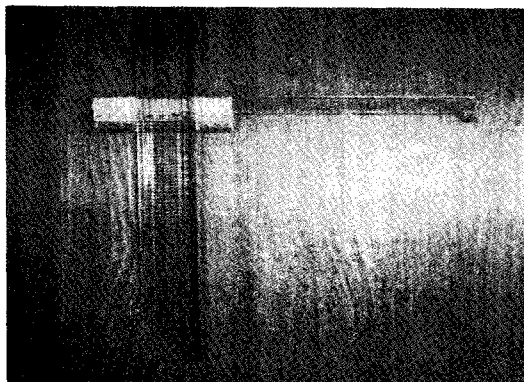
콘크리트 포장의 지불규정에서 사용할 품질 측정 기준 및 인자에 대한 측정 허용오차의 범위를 결정하는 방법을 개발하기 위하여 콘크리트 포장에서 가장 중요한 인자인 슬래브의 두께를 선정하여 연구를 수행하였다. 슬래브 두께에 대한 준공현장에서의 자료 수집을 위하여 재령 60일 정도 된 준공콘크리트 도로 포장의 준공현장에서 300m 구간을 대상으로 슬래브의 측면에서 두께 측정을 실시하였다. 두께 측정 시 슬래브 측면 두께를 측정하는 이유는 준공현장에서 슬래브의 두께를 중앙 부분에서 측정하려면 코어를 채취해야 하며 이는 비용의 증가를 야기할 뿐만 아니라 신설 도로에 흠을 만드는 결과를 초래하여 시공사에서 기피하기 때문이다. 또한 현행 도로 포장 건설에서 두께 측정 시 측면에서 측정하는 실정을 감안하여 국내에 적합한 지불규정 적용을 위해서는 슬래브 측면의 두께를 측정하는 것이 가장 적합하다고 판단하였기 때문이다.

슬래브의 두께를 측정할 때 발생할 수 있는 오차로는

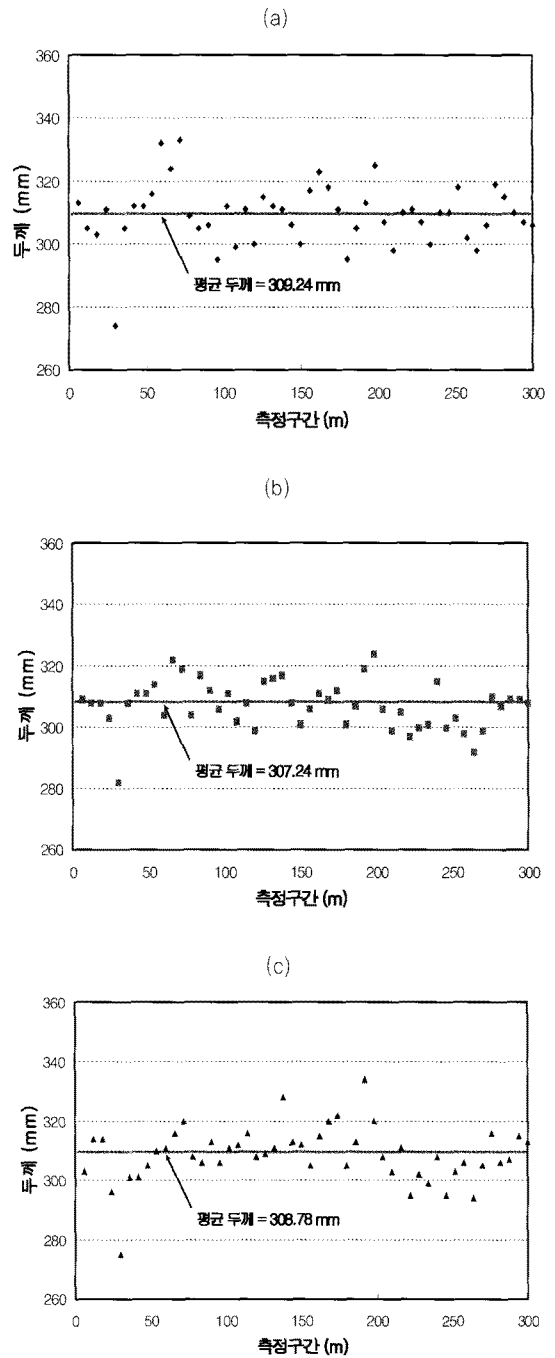


기계오차와 읽음오차를 들 수 있다. 기계오차는 측정 도구의 종류에 따라 생길 수 있는 것이므로 측정 도구의 정밀도를 분석하여 가장 합리적인 도구를 선정하여 이를 사용하는 것으로 표준화 하면 기계오차에 대한 문제는 해결할 수 있다. 하지만 이러한 도구를 사용하여 측정하는 사람에 따라 발생하는 읽음오차에 대해서는 분석이 필요시 된다. 만약에 이러한 읽음오차를 고려하지 않고 지불규정을 적용하게 된다면 발주처와 시공사 간의 분쟁을 일으킬 소지가 있으므로 지불규정 인자의 허용범위를 결정하는데 있어서 이러한 오차는 반드시 고려되어야 할 것이다. 따라서 슬래브 두께에 대한 측정오차를 분석하기 위하여 3명의 측정자를 대상으로 6m 간격으로 같은 위치에서 300m 측정구간에 대한 콘크리트 포장 슬래브의 두께를 측정하도록 하였다. 측정 도구는 <그림 1>에서 보여주는 바와 같이 수직자에 수평으로 된 플라스틱 막대를 꽂을 수 있도록 고안하여 수평 막대를 아래위로 움직이며 슬래브의 측면에서 효과적으로 두께를 측정할 수 있도록 하였다.

<그림 2>는 각 측정자의 두께 측정값에 대한 분포 및 평균값을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정구간에서의 두께 측정값은 대부분 설계 두께인 300mm를 만족하고 있으나 측정자 및 측정 위치에 따라 측정 두께가 변화하며 다양하게 분포되어 있는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 측면 두께 측정을 위한 도구



<그림 2> 두께 측정값: (a) 측정자 1, (b) 측정자 2, (c) 측정자 3



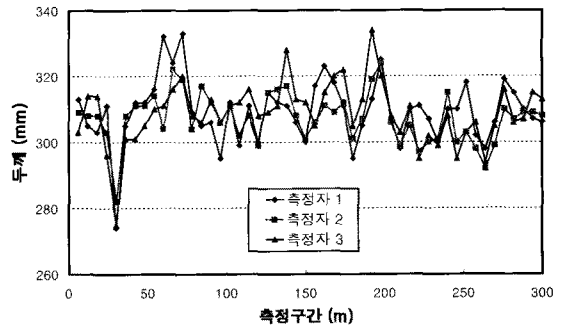
각 측정자들의 두께에 대한 측정 데이터와 평균 및 표준편차를 이용하여 신뢰도 99%, 95%, 90%에 해당하는 두께 구간을 구하여 결과를 <표 1>에 나타내었다. 본 신뢰도 분석을 위하여 평균두께의 모집단(population)이 정규확률분포를 가진다고 가정하였다. 분석 결과를 살펴보면 신뢰도가 높아질수록 평균과 한계값의 차이가 커지는 일반적인 사항을 확인할 수 있으며 측정자 1의 경우에서 두께 측정값이 가장 큰 편차를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서 고려된 측정 구간 내에서의 슬래브 두께의 변화는 신뢰도 99%인 경우에도 약 3.5mm 내외로 상당히 미소하다는 것을 알 수 있다.

<표 1> 측정자에 따른 두께 측정값에 대한 신뢰도 분석

	신뢰도 99%	신뢰도 95%	신뢰도 90%
측정자 1 (평균두께: 309.24mm)			
상한값 (mm)	312.959	312.028	311.566
하한값 (mm)	305.521	306.452	306.914
평균과 한계값의 차(mm)	3.719	2.788	2.326
측정자 2 (평균두께: 307.24mm)			
상한값 (mm)	310.162	309.431	309.068
하한값 (mm)	304.318	305.049	305.411
평균과 한계값의 차(mm)	2.922	2.191	1.828
측정자 3 (평균두께: 308.78mm)			
상한값 (mm)	312.338	311.448	311.006
하한값 (mm)	305.222	306.112	306.554
평균과 한계값의 차(mm)	3.558	2.668	2.226

<그림 3>에서는 각각의 측정자들이 측정한 두께를 같은 위치에서 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 같은 위치에서 측정된 두께가 일치하지는 않지만 두께가 증가하는 구간에서는 측정자 대부분의 측정값들이 증가하며 두께가 감소하는 구간에서는 측정값들이 감소하는 추세를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 측정자들의 측정값이 서로 완전히 상이한 값을 나타내지는 않으며 전체적으로 비슷하게 두께를 측정한다는 것을 알 수 있다.

측정자 간의 두께 측정값은 매우 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있으나 이러한 측정자 간의 읽음오차에 대한 보다 정밀한 통계적 분석이 필요하다.



<그림 3> 측정자에 따른 두께 측정값 분포

이를 위해 각 측정위치에서의 측정자 간 최대오차를 구하여 이러한 각 위치에서의 최대오차에 대한 평균과 표준편차를 구하여 신뢰도 분석을 수행하였다. 전체 구간 중에 측정자 간의 최대오차 중 가장 큰 값은 28mm이었으며 측정자 간 최대오차의 평균은 9.38mm이었다. 표 2는 이러한 측정자 간의 최대오차에 대한 신뢰도를 분석한 결과를 보여준다. 신뢰도 99%에서는 측정자 간에 발생할 수 있는 최대오차는 11.219mm이며 95%와 90%의 신뢰도에서는 최대오차가 각각 10.759와 10.531mm이다. 따라서 측정자 간에 약 10mm의 읽음오차는 허용해야 한다는 것을 알 수 있다.

<표 2> 측정자 간 최대오차에 대한 신뢰도 분석

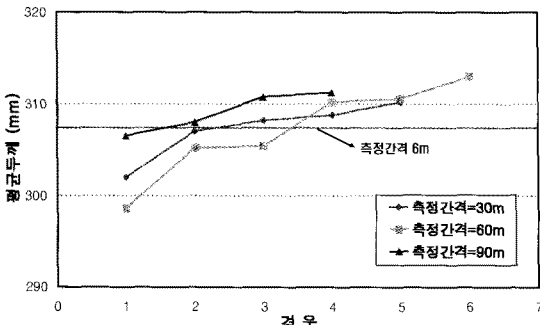
	신뢰도 99%	신뢰도 95%	신뢰도 90%
상한값 (mm)	11.219	10.759	10.531
하한값 (mm)	7.541	8.001	8.229

두께에 대한 합리적인 지불규정의 적용을 위해서는 측정자 간의 두께 측정 오차를 고려한 허용 오차 결정뿐만 아니라 데이터 수집 과정과 관련된 측정 빈도 및 측정 위치에 대한 영향의 분석도 필요시 된다. 이에 본 연구에서는 측정자 2가 6m 간격으로 300m 구간을 측정 한 두께 측정 자료를 이용하여 측정간격을 6m 이외에 30m, 60m, 90m로 다르게 하여 각 경우에 대한 측정값의 변동 양상을 분석하였다. 또한 같은 측정간격이라도 측정 시점을 다르게 하여 측정 위치가 변화함에 따른 두께 측정값의 변화 양상에 대하여도 분석을 수행하였다. 측정간격이 커지면 상대적으로 두께 측정 데이터의



수가 감소하므로 신뢰도 분석을 수행할 때 모표준편차 (σ)를 모르고 자료의 수가 적을 때 사용하는 “Student의 t 분포” 를 이용하였다.

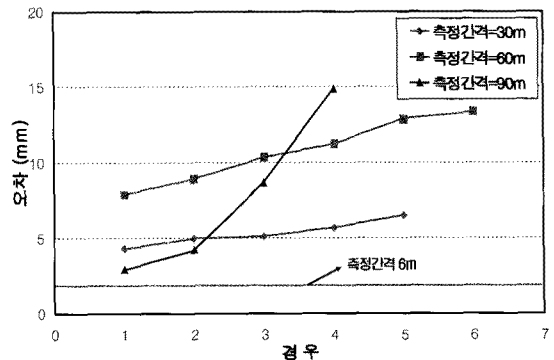
〈그림 4〉는 각 측정간격에 따라 측정 시점을 다르게 하여 측정 위치가 변화할 때의 두께 측정값의 평균이 변화하는 양상을 보여준다. 그림에서 가로축을 경우로 표시하고 있는데 이는 시점이 달라지는 여러 경우를 표현하는 것으로써 평균 두께가 가장 작게 나온 경우를 경우 1로하고 평균값이 커짐에 따라 경우 2, 3 등으로 표현하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평균두께는 측정간격에 따라 영향을 받으며, 또한 같은 측정간격이라도 시점 또는 측정 위치가 변화함에 따라 어느 정도 영향을 받는 것을 알 수 있다. 하지만 측정간격이 6m일 때의 평균 두께와 비교하면 그리 큰 차이를 보이지 않으며 그 주변의 값을 가지는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 측정 간격 및 위치에 따른 평균 두께 분포

측정간격 및 위치에 따른 영향을 보다 더 통계적인 관점에서 분석하기 위하여 신뢰도 95% 수준에서의 평균 두께와 한계값과의 차이인 최대 오차를 구하여 〈그림 5〉에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정간격별로 측정위치가 달라질 때의 오차의 변화 기울기가 측정간격이 30m일 때 가장 작고 90m일 경우에 가장 큰 것을 알 수 있다. 다시 말하면 측정간격이 작을 경우에 측정 위치에 따라 크게 영향을 받지 않으며 측정간격이 커짐에 따라 측정위치의 영향을 많이 받게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 우리나라에서 대부분 사용하고 있는 콘크리트 포장 형식인 줄눈콘크리트 포장을 고려하면 대부분의 줄눈간격이 6m이며 이에 따라 6m간격으로 모든

슬래브에서 두께를 측정하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있으나 경제적인 면을 고려하여 이에 비해 신뢰도가 크게 떨어지지 않는 30m의 측정간격을 사용하는 것이 현실적으로 가장 적합한 것으로 사료된다. 현재 고속도로 전문시방서에서는 포장 슬래브의 두께 측정을 300m마다 측면에서 측정하도록 제시하고 있다(한국도로공사, 2005). 이러한 측정간격을 사용하면 본 연구의 결과로 미루어 보아 측정위치에 따라 상당히 큰 오차를 보일 것으로 판단된다. 따라서 합리적인 지불규정의 적용을 위해서는 측면 두께 측정 시 측정 빈도를 30m 또는 비교적 작은 간격으로 측정하도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 이러한 비교적 작은 측정간격을 사용하면 측정 시점의 위치를 감독자의 판단에 따라 임의의 위치로 결정하여도 두께 측정값이 이에 크게 영향을 받지 않게 된다.



〈그림 5〉 측정 간격 및 위치에 따른 신뢰도 95% 수준에서의 오차 분포

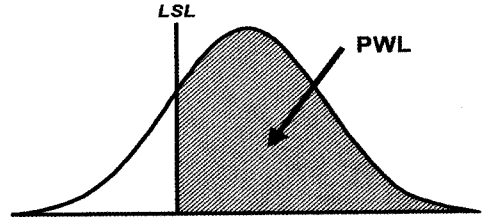
이와 같이 본 연구의 일환으로 콘크리트 포장에 지불규정을 적용하기 위한 품질 측정 방법론을 개발하기 위하여 지불규정 인자 중의 하나인 콘크리트 슬래브의 두께를 예로 하여 측정자 간에 발생할 수 있는 측정오차를 신뢰도 분석을 통해 구하고 측정간격과 측정위치에 대한 영향을 분석하여 지불규정에서 사용할 수 있는 인자에 대한 범위 설정 및 적절한 측정 빈도를 결정하는 방법을 제시하였다. 슬래브 두께 이외의 인자인 콘크리트의 휨강도에 대해서도 이와 유사한 방법론을 적용하여 지불규정에서 사용할 범위와 측정 빈도를 결정할 수 있다.



3. 포장 상태 자료를 이용한 지불계수 산정 및 분석

미국의 지불규정 적용 사례를 살펴보면 지불규정의 각 인자별로 측정된 품질들에 대하여 통계적인 기법을 이용하여 계약 시공금액에 대한 실제 지불금액의 비율인 지불계수(Pay Factor)를 산정하고 있다. 통계적인 기법을 이용한 지불계수 산정 방법 중에 PWL 방법을 많이 사용하고 있는데 이러한 PWL 방법은 한 개의 Lot에서 측정된 각 지불규정 인자의 품질이 시방 한계값 이내에 들어올 확률값을 이용하여 지불계수를 산정하는 방법이다(Burati et al., 2004). 시방 한계값이란 시방서에서 제시한 인자별 기준값에서 허용 오차를 가감한 값을 말한다. 예를 들어 슬래브 두께의 경우 국내 고속도로 전문 시방서에서는 기준값으로 설계 두께 300mm와 두께의 허용 오차 -5%를 제시하고 있다(한국도로공사, 2005). 이 때 시방 한계값은 300mm에서 15mm를 감한 285mm로 이를 시방 하한값(LSL: Lower Specification Limit)이라고 일컫는다. 슬래브 두께에서 시방 상한값(USL: Upper Specification Limit)은 고려하지 않으며 이는 포장체가 설계 두께보다 크게 시공되었을 경우에는 포장체의 성능을 저하시키지 않기 때문이다. 슬래브 두께 이외에 콘크리트의 강도에 대해서도 시방 하한값만을 고려하며 그 이유 역시 두께에서의 이유와 동일하다. <그림 6>은 시방 하한값만을 고려할 경우의 PWL 품질측정방법에 대한 개념을 보여준다. 다시 정리하면 PWL이란 모집단(population)이 정규확률분포를 가진다고 가정

하고 수집된 자료(sample)의 평균이 시방 하한값(LSL)보다 크게 될 확률값을 의미한다.



<그림 6> 시방 하한값만을 고려한 PWL(Burati et al., 2004)

PWL 품질측정 방법에서는 모집단이 정규확률분포를 가진다고 가정하지만 확률값의 계산을 위하여 표준정규화 지수인 Z-value를 사용하는 것이 아니라 품질측정지수라는 Q-value 또는 QI(Quality Index)를 사용한다. 이러한 품질측정지수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$Q_L = \frac{(X_{avg} - LSL)}{S} \quad (1)$$

여기서 Q_L 은 시방 하한값에 대한 품질지수이며 X_{avg} 는 측정된 표본의 평균이며 LSL은 시방 하한값 그리고 S는 측정된 표본의 표준편차이다.

품질측정지수를 구하게 되면 이에 따른 PWL의 관계를 나타내는 표를 이용하여 PWL을 산출하게 되는데 미국의 연방도로국(FHWA: Federal Highway Administration)에서는 품질측정지수 Q-value와 PWL과의 관계를 통계적인 방법에 경험적인 사항을 포함하여 <표 3>과 같이 제시하고 있다.

<표 3> 미국 연방도로국에서 제시한 품질측정지수 Q-value와 PWL의 관계(Burati et al., 2004)

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
96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	-	-	-	-	-	-	-	-	-
93	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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

본 연구에서는 국내 지불규정의 합리적인 개발 방법을 모색하기 위하여 미국의 Q-value를 이용한 PWL을 구하는 방법과 표준정규화 지수 Z-value 또는 자료의 수가 적을 경우에 사용하는 'Student의 t 분포'에서의 T-value를 이용하여 PWL을 구하는 방법을 비교 분석하였다. PWL을 구하게 되면 최종적으로 지불공식을 이용하여 각 인자에 대한 지불계수를 산출할 수 있게 된다. 미국에서는 일반적으로 식(2)에 보인 AASHTO Quality Assurance Guide Specification에서 제시한 지불공식을 사용하며 본 연구에서도 이러한 공식을 사용하였다(AASHTO, 1996).

$$\text{지불계수}(\%) = 55 + 0.5 \text{PWL} \quad (2)$$

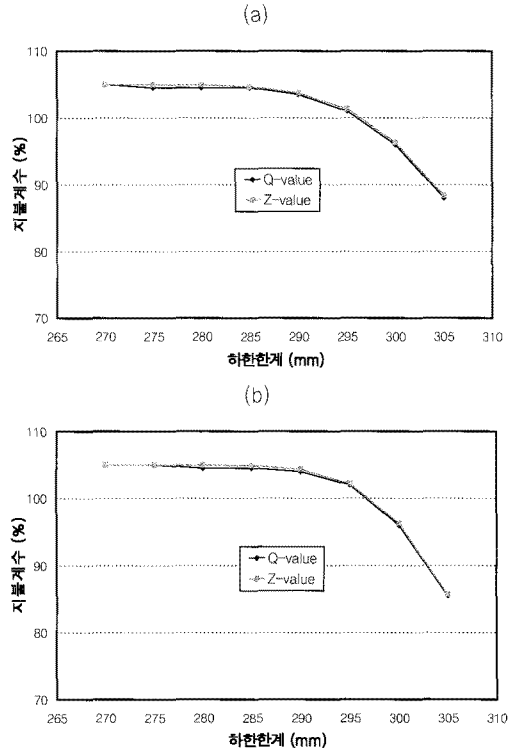
우선 슬래브 두께를 지불인자로 하여 이에 대한 각각의 품질측정지수에 따른 지불계수를 산정하여 비교 분석하였다. 슬래브 두께 측정 자료는 <그림 2>에 나타난 측정자 1과 2의 측정 자료를 사용하였다.

이 경우에는 자료의 개수가 그리 적지 않기 때문에 Z-value를 사용하였으며 모집단의 평균은 표본평균으로 가정하였다. 시방 하한값을 변화시켜가며 Z-value를 이용한 지불계수를 산정하여 Q-value를 사용하였을 경우의 지불계수와 비교하여 <그림 7>에 나타내었다.

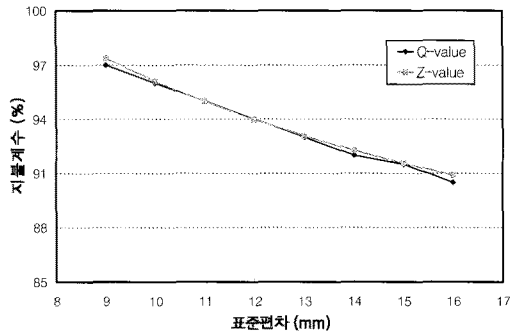
그림에서 볼 수 있는 바와 같이 시방 하한값이 어느 수준 이하로 작으면 지불계수가 100% 이상을 유지하기 때문에 이 경우에는 두께에 대해서는 계약 시공금액을 삭감하지 않아도 된다. 하지만 시방 하한값이 증가하면 결국에는 지불계수가 100% 이하로 되어 계약 금액을 삭감하게 된다. 따라서 시방 하한값은 지불계수를 결정하는 매우 중요한 기준이라 할 수 있다.

또한 Z-value와 Q-value를 이용하여 구한 지불계수를 비교해 보면 매우 유사한 것을 알 수 있으나 Q-value를 이용한 지불계수가 미소하나마 작기 때문에 Q-value를 이용하면 다소 엄격한 지불규정을 적용하게 되는 것이다.

평균 두께와 시방 하한값이 일정할 경우에도 두께 측정 자료의 편차에 따라서 지불계수는 영향을 받게 되며 그 양상을 분석하여 <그림 8>에 나타내었다. 분석을 위해 측정자 1의 평균값과 시방 하한값 300mm를 사용하



<그림 7> 시방 하한값에 따른 Q와 Z-value를 이용한 슬래브 두께에 대한 지불계수의 변화:
(a) 측정자 1, (b) 측정자 2



<그림 8> 표준편차에 따른 Q와 Z-value를 이용한 슬래브 두께에 대한 지불계수 변화

였으며 표준편차를 임의로 증감시켜가며 분석을 수행하였다. 그림에서와 같이 표준편차가 증가할수록 지불계수는 감소하게 되며 이는 표준편차가 클수록 기준치 미달의 두께가 많이 존재하기 때문이다. 이 경우에도 Q-value와 Z-value를 사용하였을 때의 지불계수가 거



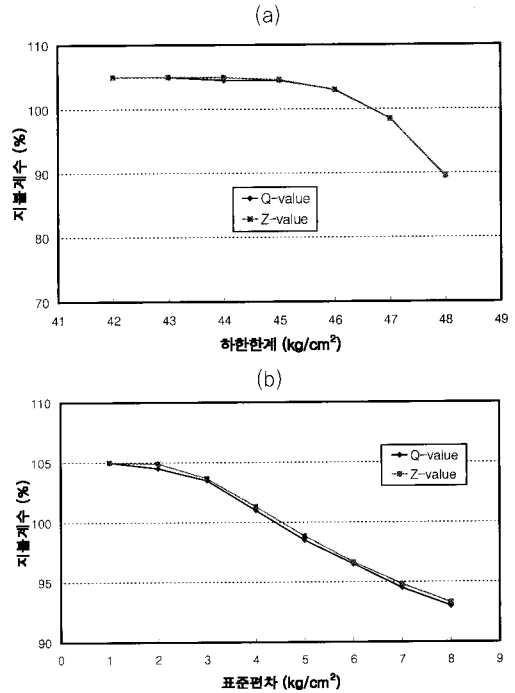
의 값이지만 미소하나마 Q-value를 사용한 지불계수가 더 작은 것을 알 수 있다.

콘크리트 포장의 지불규정에서 사용하는 다른 인자로서 콘크리트의 휨강도에 대하여도 지불계수 산정에 대한 분석을 수행하였다. 분석을 위해 고속도로 신설 콘크리트 포장의 휨강도 측정자료 중 서해 2지역의 19공구에서 측정된 자료를 사용하였다(건설교통부, 2004). 이러한 공구의 자료를 선정한 이유는 대부분의 다른 공구의 휨강도는 모두 설계 기준강도(45kg/cm²)를 만족하기 때문에 품질측정지수에 따른 지불계수의 비교 분석을 수행하기 적합하지 않기 때문에 휨강도 측정 자료 중 상대적으로 가장 낮은 휨강도 측정값을 보이는 공구를 선정한 것이다.

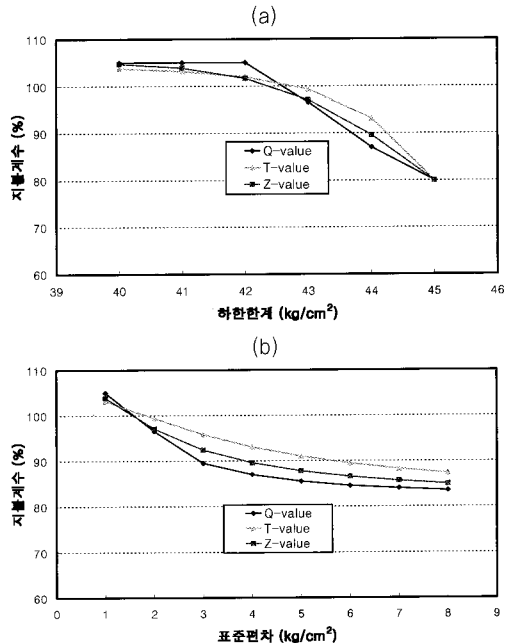
〈그림 9〉는 휨강도의 시방 하한값 및 표준편차에 따른 Q-value와 Z-value를 사용하여 구한 지불계수의 변화 양상을 보여준다. 본 자료의 평균은 48.8kg/cm², 실제 표준편차는 1.6kg/cm², 그리고 자료의 수는 55개이다. 슬래브 두께에서와 마찬가지로 시방 하한값 및 표준편차가 증가할수록 지불계수가 감소하게 되며 두 가지의 다른 품질측정지수에 따른 결과는 매우 유사하나 Q-value를 이용한 지불계수가 미소하게 작은 것을 볼 수 있다.

Z-value를 이용하여 지불계수를 산정하는 방법은 측정된 자료의 수가 어느 정도 많은 경우에 사용할 수 있다. 하지만 지불 규정을 적용함에 있어서 한 개의 Lot에서 채취할 수 있는 휨강도 측정 자료의 개수는 앞에서 사용된 하나의 공구에서의 측정 자료의 개수처럼 많지가 않다. 현재 국내에서 휨강도 측정 시 세 개의 자료를 이용하는 건설품질관리 실정을 감안하여 본 연구에서는 이에 적합한 지불규정의 개발을 위하여 측정 자료의 개수가 적은 경우의 지불계수 결정 방법에 대하여도 분석을 수행하였다.

자료의 수가 적은 경우에는 일반적으로 T-value를 이용한 “Student의 t 분포”를 이용한다. 따라서 자료의 수가 3개이며 평균 휨강도가 45kg/cm², 표준편차가 2.0kg/cm²인 경우를 가정하여 T, Q, Z-value를 각각 이용하여 지불계수를 구하여 비교한 결과를 〈그림 10〉에 나타내었다. 자료의 수가 적을 경우에도 그림에서와 같이 각각의 품질측정지수에 따른 시방 하한값 및 표준



〈그림 9〉 Q와 Z-value를 이용한 콘크리트 휨강도에 대한 지불계수의 변화: (a) 시방 하한값의 영향, (b) 표준편차의 영향



〈그림 10〉 T, Q, Z-value를 이용한 콘크리트 휨강도에 대한 지불계수의 변화: (a) 시방 하한값의 영향, (b) 표준편차의 영향



편차의 지불계수에 대한 영향이 유사한 것을 알 수 있다. 하지만 일정한 시방 하한값 또는 표준편차에서 지불계수의 값은 품질측정지수에 따라 확연하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 지불계수가 100% 이하에서 이전의 경우와 마찬가지로 Q-value를 사용하였을 경우의 지불계수가 가장 작으며 T-value를 사용한 지불계수가 가장 큰 것을 알 수 있다.

여러 가지 품질측정지수를 이용한 지불계수 분석을 통해서 자료의 수가 비교적 많을 경우에는 Q-value와 Z-value를 사용한 지불계수가 매우 유사하지만 Q-value를 이용한 지불계수가 미소하게 작은 것을 알 수 있었으며, 자료의 수가 적을 경우에는 품질측정지수에 따라 지불계수가 확연히 차이가 날 수 있으며 이 경우에도 Q-value를 이용한 지불계수가 가장 작으며 T-value를 이용한 지불계수가 가장 크게 나오는 것을 알 수 있었다.

따라서 국내의 지불규정 개발을 위해서는 너무 엄격한 기준을 초기부터 적용하기 보다는 다소 완화된 규정을 적용하는 것이 합리적이라는 관점에서 볼 때 자료의 수를 쉽게 많이 확보할 수 있는 슬래브의 두께에 대해서는 Z-value를 이용한 지불계수를 사용하고 자료의 수를 많이 확보하기 어려운 콘크리트 휨강도의 경우에는 T-value를 사용하여 지불계수를 산정하는 방법이 적합할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 도로 포장의 고성능 품질을 보증하기 위한 방법으로 지불규정을 개발하여 적용하는 기법에 대한 연구를 수행에 대하여 기술하였다. 먼저 콘크리트 포장의 지불규정 인자에 대하여 합리적인 품질 측정 기준을 개발하는 방안을 위해 슬래브의 두께를 예를 들어 연구를 수행하였다. 콘크리트 포장의 두께를 측정하여 통계적인 기법으로 분석함으로써 측정자에 따른 읽음오차를 감안하여 지불규정의 기준에 대한 허용오차를 결정하는 방법을 제시하였으며 두께 측정 시 측정 간격 및 위치 등의 측정빈도를 결정하는 방법도 제시하였다. 또한 지불계수를 결정하기 위하여 슬래브 두께와

콘크리트 휨강도를 예를 들어 미국에서 사용하고 있는 PWL 방법을 이용한 지불계수를 정규분포와 t분포를 이용하여 구한 지불계수와 비교분석하여 적절한 지불계수를 산정하는 방안을 제시하였다. 이러한 연구를 수행하여 도출한 결론은 다음과 같다.

- 지불규정 인자에 대한 품질측정에 있어서 측정자에 간에 읽음오차가 발생할 수 있으며 이러한 오차는 지불계수를 산정할 때 고려되어야 한다. 예를 들어 슬래브 두께의 경우에는 약 10mm의 읽음오차는 허용해야 한다.
- 품질 측정간격 및 측정위치는 지불규정 인자의 평균과 표준편차에 영향을 미치게 되며 측정간격이 작을 경우에는 측정 위치에 따라 그리 크게 영향을 받지 않으나 측정간격이 커짐에 따라 측정위치의 영향을 많이 받게 된다. 슬래브의 두께는 이를 고려하여 임의의 위치를 시점으로 30m 마다 측정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.
- 지불계수는 지불규정 인자의 시공 하한값 또는 측정 자료의 표준편차가 커질수록 감소하게 되며 품질측정지수의 종류에 따라 다소 영향을 받는다.
- 측정 자료의 수가 비교적 많을 경우에는 Q-value와 Z-value를 이용하여 구한 지불계수가 매우 유사하며 Q-value를 이용한 지불계수가 미소하나마 작게 된다.
- 측정 자료의 수가 적을 경우에는 T-value, Q-value, Z-value를 이용하여 구한 지불계수가 뚜렷한 차이를 보이게 되며 Q-value를 이용한 지불계수가 가장 작고 T-value를 이용한 지불계수가 가장 크게 된다.
- 국내에 처음으로 도입이 시도되는 지불규정의 개발을 위해서는 초기부터 매우 엄격한 기준을 적용하기 보다는 다소 완화된 규정을 적용하는 것이 합리적이라는 관점에서 볼 때 측정 자료의 수를 쉽게 많이 확보할 수 있는 슬래브의 두께 등의 지불규정 인자에 대해서는 Z-value를 이용한 지불계수를 적용하고 측정 자료의 수를 많이 확보하기 어려운 콘크리트 휨강도 등의 지불규정 인자의 경우에는 T-value를 사용하여 지불계수를 산정하는 방법이 타당할 것으로 사료된다.



감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설교통R&D정책 인프라사업의 일환인 성능중심의 건설기준 표준화 연구 - 도로포장 및 콘크리트 구조물 중심 연구 중 공용성을 기반으로 한 지불규정 개발 연구에서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

AASHTO, *AASHTO Quality Assurance Guide Specification*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996.

Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes, C. S., and Hill, H. S. "Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications," *Report FHWA-RD-02-095*, Federal

Highway Administration, Washington, DC, 2003.

Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes, C. S., and Hill, H. S. "Evaluation of Procedures for Quality Assurance Specifications," *Report FHWA-HRT-04-046*, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2004.

건설교통부, "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구보고서", 건설교통부, 2004.

한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서 토목면, 한국도로공사, 2005.

접 수 일 : 2008. 7. 25
심 사 일 : 2008. 7. 30
심사완료일 : 2008. 9. 02