

# 도로공사에서 생애주기비용을 사용한 지급조정모델 개발에 관한 연구

## LCCA-embedded Monte Carlo Approach for Modeling Pay Adjustment at the State DOTs

최재호\*  
Choi, Jae-ho

### 요약

미국에서는 품질 관리 문제를 해결할 수 있는 아이디어로 지급(Pay) Factor가 사용되어왔으며 현재는 생애주기비용까지 고려한 한층 진보된 지급조정모델 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 하지만 이러한 지급조정모델절차의 개발은 품질특성변수 선택의 문제, 품질특성변수의 확률적 분포와 도로 공용성간의 관계 분석의 문제, 그리고 하나의 전체 지급조정모델 개발의 문제 등으로 미 교통부에서 어려움을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 점을 극복하기 위한 방법론으로 생애주기비용분석을 고려한 몬테카를로 시뮬레이션 접근 방식이 사용되었다. 미 여러 교통부에서 적용 가능한 견본이 될 수 있도록 현 위스콘신 교통국에서 사용중인 도로관리 관련 시스템들에서 데이터를 추출하여 지급조정을 결정하기 위한 분석 절차를 제시하고 이를 근간으로 지급조정모델 결정 지원 시스템을 개발하였으며 민감도 분석을 실행하여 실제 데이터를 사용하여 개발된 지급조정모델의 적정성을 평가하였다. 본 논문에서 사용된 지급조정모델 개발 절차는 한층 정확성을 높인 도로공용성예측모델과 생애주기비용모델을 사용함으로써 실제 프로젝트에 사용 가능할 것으로 판단된다.

키워드: 공용성에 근거한 시방서, 생애주기비용, 지급조정모델, 몬테카를로, 도로공용성예측모델

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

지난 이십 수년간 아스팔트 도로포장기술은 재료, 혼합물 설계, 시방서 개발 등에서 괄목할 만한 성장을 보였다. 공사 시방서와 관련지어서 도로 공용성에 근거한 시방서(Performance-related Specifications, 이하 PRS라 칭함)는 주목할 만하다. Transportation Research Circular Number E-C010 (1999)에 따르면, 도로공사에서 품질이란 품질특성변수들의 균일한 정도를 가리키며 곧, PRS는 도로 공용성과 밀접한 관계가 있는 중요 재료·시공 품질특성변수(Quality Characteristics, 이하 품질특성변수라 칭함)들에 대한 적정 수준(desired level)을 기술하는 품질 보증 시방서라고 정의하고 있다. 기술적인 측면에서 PRS는 생산물의 공용성과 밀접한 관계가 있는 정량화된 품질특성변수와 생애주기비용(Life Cycle Cost, 이하 LCC라 칭함)간의 관계를 정의함으로써 공사단계에서 측정된 품질특성변수를 사용하여 예측 가능한 생애주기비용( $LCC_{as-con}$ )과 설계단계에서 예측 가능한 생애주기비용( $LCC_{as-des}$ )의 차를 시공업체 기성 단가에 반영함으로써 시공업체로 하여금 품질 향상에 노력을 기울이도록 하는 것을 주목적으로 한다.

기존의 시방서(end-result specifications)는 최종 생산물의 측정에 중점을 두고 시공자 측이 품질조정에 책임을 지므로 공사방법은 자유롭게 선택을 할 수 있다. 반면에 PRS는 시공단계에서 품질특성변수 값과 최종생산물의 품질사이의 밀접한 관계가 있기 때문에 품질특성변수 값의 측정에 중점을 둔다. 또 확률이론에 근거한 품질 시방서(QC/QA specifications)와 PRS의 가장 큰 차이점은 공사시 도로의 품질상태(품질특성변수들의 확률적 분포)의 시방서상의 허용기준치로부터의 변이가 경제적으로 미치는 영향까지 포함한다는 것이다.

따라서, PRS는 기존 시방서보다 훨씬 포괄적이라 할 수 있으며 공용성에 영향을 미치고 시공사가 컨트롤할 수 있는 품질특성변수를 측정하도록 한다. 또한 공학적인 개념과 경제적 원칙을 사용한 예측 가능한 생애주기비용에 근거하여 기성을 조정할 수 있게 한다. 이러한 모든 것들은 품질 향상(품질특성변수의 낮은 변이성)과 이에 따른 생애주기비용의 절감을 도모할 수 있다. 또한 재료 공급자와 시공자로 하여금 고품질의 도로를 건설할 수 있도록 동기를 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 주목적은 교통국에서 사용중인 도로의 평탄성

\* 일반회원, 한국건설관리공사 과장, 공학박사

에 대한 최종 지급조정모델을 결정하기 위한 고안된 표준 절차를 제시하고 이를 바탕으로 조정모델조정 결정 지원 시스템을 개발하는 것이다. 시공사가 성취한 품질상태와 장기적으로 도로 공용성에 미치는 경제적인 효과와의 관계를 파악하기 위해서 현 위스콘신 교통국 도로관리 관련 시스템에서 과거 프로젝트 데이터를 추출하여 사용하였으며, 품질특성변수의 확률적 분포를 반영하기 위해서 몬테카를로 시뮬레이션이 사용되었다.

지급조정모델은 PRS의 가장 중요한 요소이다. 하지만, 현 교통부에서는 지급조정모델 개발에 다음과 같은 문제점으로 인해 어려움을 가지고 있다.

- 1) 현재 기성 (Pay) factor로 사용중인 품질특성변수들의 선택적 사용은 공학적 판단 (Engineering judgement)에 근거하기 때문에 품질특성변수들의 상대적 영향력을 파악하기 위한 분석이 필요하다.
- 2) 품질특성변수의 목적치 (target value)로 부터의 변이가 도로공용성에 미치는 영향은 잘 알려져 있지 않다.
- 3) 품질특성변수들은 상호 영향을 미치며 도로 공용성과 관련지어 서로 이율 배반적이다. 그리고 각 품질특성변수 별로 사용되는 지급조정모델로부터 하나의 전체적인 모델을 개발하기 어렵다.

이러한 문제점에 해결방안으로 다음 그림 1과 같은 지급조정모델절차가 개발되었다.

그림 1에서 보이는 LCCA에 근거한 몬테카를로 시뮬레이션 분석 방법에 사용된 데이터는 공사전 단계 (pre-construction)에 유용한 정보, 즉 설계 데이터와 공사 후 단계 (post-construction), 즉 QC/QA 데이터로 나뉜다. 다시 말하면, 선택된 품질특성변수들의 평균치와 분산 정보데이터가 LCCA에 근거한 몬테카를로 시뮬레이션 프로세스를 거치면서 예측 가능한 LCC<sub>as-des</sub>과 LCC<sub>as-con</sub>의 차이가 바로 지불조정액이 되는 것이다. 이 접근 방식의 중요한 가정은 설계 및 시공 데이터, 수명예측모델의 오차, 그리고 유지보수 오차 등은 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 반영된다.

그림 1에 제안된 방식의 장점은 개별적인 지불조정모델들의 상호 작용성과 품질특성변수들의 내재적인 변이성을 고려할 수 있다는 것이며, 유일한 단점으로는 시공 데이터의 변이성과 불확실성을 고려할 때 잘 준비된 데이터베이스가 필요하다는 것이다.

## 2. 품질특성변수의 선택

일반적으로 PRS를 개발하기 위한 첫 번째 질문은 어떤 도로 변형 모드 (Distress Mode)가 발주처에게 가장 중요한 고려사항인가를 결정하는 것이다. 다음에는 그 모드에 해당되는 기계적 모델 (Mechanistic Model) 또는 실험적 모델 (Empirical Model)을 선택하는 것이다.

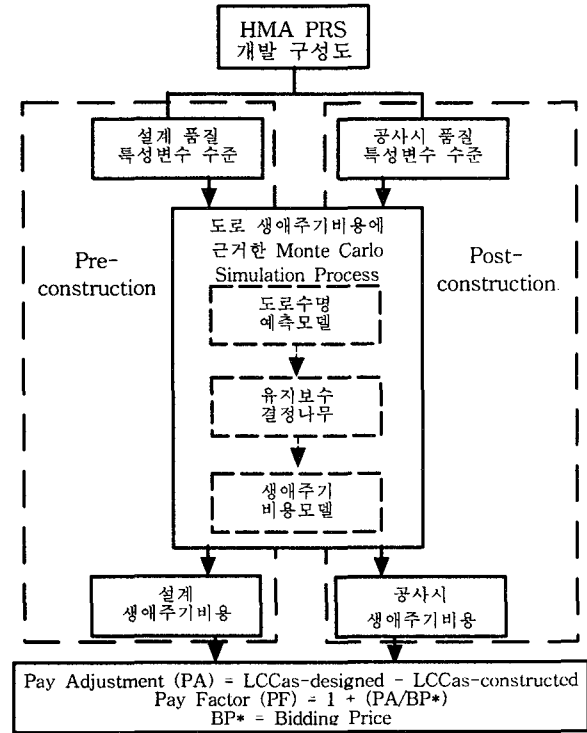


그림 1. PRS 프레임워크

이러한 모델은 재료나 시공 변수와 변형 지수 (Distress Indicators)나 공용성 측정지수 (Performance measures)와의 연결 역할을 한다. 현재 미 교통국에서 사용중인 Pay factor로 사용되는 품질특성변수는 각 주별 주관적인 판단에 근거하여 사용되므로 정확한 변수 선정에 대한 기준은 없는 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 모델링 노력 (Distress models, material models, 그리고 performance models)과 위스콘신 교통부에서 사용중인 도로관리 관련 시스템에 저장된 데이터 상황을 고려하여 논리적 선택 관계 (logical selective relationship)에 근거하여 품질특성변수를 선택하였다 (최재호 2002). 표 1은 선택된 입력변수 (PSR을 제외한 모든 변수)와 출력변수 (PSR - Pavement Serviceability Rating, 본 논문에서는 IRI 이 대체 사용됨)를 나타낸다.

표 1. 입력 및 출력 변수 요약

Distress Model	Materials Model	Performance Indicator Model	
Stiffness	P200	SN	PSR* (IRI_Average)
Total Asphalt Layer Thick	Air Void	Age	
Amounts of Rounded Aggregate	Viscosity, Asphalt Content	CESAL	

## 3. PRS 구성 모델

PRS를 개발하기 위해서는 도로공용성예측 모델과 생애주기비용 모델이 필요하다 (PRS: A cooperative effort to improve pavement quality 1997). 생애주기비용 모델은 유지보수결정나무를 필요로 한다. 일반적으로 고정화된 유지보수결정나무의 개발은 어려운 일이기 때문에 위스콘신 교통부에서 자주 사용되는 투자 전략과 실제 관행에 근간을 두어 유지보수결정나무 (Maintenance and Rehabilitation Decision Tree - M&R)를 개발하였다.

### 3.1 도로공용성예측 모델

다중회기분석기법을 사용하여 두 개의 도로 공용성 모델을 개발하였다. 표 1에 제시된 변수들을 사용하여 첫 번째는 IRI (International Roughness Index), 두 번째는 PDI (Pavement Distress Index)를 개발하였다. IRI는 종단평면의 굴곡정도를 나타내며 PDI는 관측되는 여러 변형들의 정도를 나타내는 지수이다. 위스콘신주 I-94 동쪽방향의 8개의 콘크리트 오버레이 프로젝트 데이터로부터 추출된 데이터를 사용하여 IRI와 PDI를 개발하였으며 방정식들은 Eq. 1 및 Eq. 2 와 같다.

$$IRI = 5.66P200 + 3.82AV + 0.644AC \cdot P200 - 0.9244AC \cdot AV + 0.426P200 \cdot AV + 0.0025Age \quad \text{Eq. 1}$$

$$PDI = 461 - 137 P200 + 12.5 AC \cdot P200 - 17.6 AC \cdot AV + 18.0 P200 \cdot AV - 0.0427 Age \quad \text{Eq. 2}$$

where,

- AC = Asphalt Content measured during construction
- P200 = Percent passing #200 sieve measured during construction
- AV = Initial Air Void after construction
- Age = Days after opening road to public traffic

PRS 개발을 고려중인 교통부에서는 일반적으로 모든 도로 네트워크에 적용할 수 있는 보편적인 모델이나 Eq. 1 이나 Eq. 2에서 보이는 것처럼 지역모델을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 합성 공용성 모델 (composite quality indicators - IRI, PDI)이 사용되었으나, 다른 기관에서는 rut depth, fatigue cracking, 또는 thermal cracking 모델 같은 개별 변형 모델들을 사용할 수 있다. 중요한 고려사항은 유지보수결정나무는 사용된 모델에 기초하여 개발되어야 한다는 점이다. 본 연구에서 개발된 도로 공용성 모델에 환경변수는 일정한 것으로 가정되어 사용되지 않았으며 축적된 교통량은 Age간의 높은 상관관계로 사용되지 않았다.

### 3.2 유지보수결정나무

그림 1에서 보이는 것처럼 유지보수결정나무는 PRS 개발을 위한 하나의 중요한 구성요소이며 M&R 방법은 사용된 모델들 중 어느 한 모델의 출력 값이 미리 지정된 한계 값에 도달했을 때 사용된 모델들의 출력 값들의 상태에 따라 결정된다. 표 2는 본 연구에 사용된 유지보수결정나무를

보여준다.

표 2. 유지보수결정나무

Type	Distresses	PDI Severity		
		>70	70<PDI<45	PDI<45
Roughness	Level			
IRI Severity	IRI>2.5	Thick Overlay (6~8 years) \$120,000	Full Depth Mill / Overlay (7~9 years) \$150,000	Reconstruct (8~10 years) \$200,000
	1.5<IRI<2.5	Thin Overlay (4~6 years) \$85,000	Partial Mill / Overlay (5~7 years) \$110,000	Full Depth Mill / Overlay (6~8 years) \$150,000
	IRI<1.5	Crack Filling (2~4 years) \$5,000	Thin Overlay (4~6 years) \$85,000	Partial Mill / Overlay (5~7 years) \$110,000

### 3.3 생애주기비용 모델

LCCA 수행중 중요한 단계는 도로 공용성에 영향을 미치는 변수와 LCCA 기간동안 수행되는 M&R 대안과 관련된 미래가에 영향을 미치는 변수를 파악하는 것이다. 미 교통부에서 사용중인 LCCA 모델들은 이러한 변수들을 고정 변수로 가정을 하는데 실제로 대부분 이러한 변수들은 불확실성을 포함한 가변 변수들이다. 몇 가지 조합을 고려한 제한된 민감도 분석은 이러한 변수들이 LCCA에 미치는 결과를 정성적으로 판단하는 근거를 준다.

하지만, 이러한 접근 방법은 의사결정을 하는데 중요한 요소를 모두 고려하지 못하는 한계점이 있으므로 불확실한 변수들의 확률적 분포와 시물레이션을 사용하는 위험분석이 사용되었다 (Keith 2000). LCCA에 근거한 PRS 시물레이션 적용 사례 분석을 위해서 다음 장에서는 품질특성변수와 M&R 대안들의 확률적 변이성을 반영하는 위험분석기법을 사용하였다. 미래가 산정을 위해서 구출재화가격, 사용자 비용 등 여러 요소를 고려할 필요가 있지만 데이터 부족으로 인해 M&R 대안들의 현재가와 미래가만을 고려하였으며 돈의 시간 가치를 반영하기 위해 경제 요소 (i.e., discount rate)가 사용되었다.

## 4. LCC에 근거한 몬테카를로 시물레이션 적용 사례

본 장에서는 그림 1에서 제안된 PRS 방법론을 적용하여 위스콘신에서 건설된 실제 프로젝트에 적용하여 지급조정 모델을 개발한 사례를 보여준다. 구체적 사항으로는 프로젝트 배경, 데이터 수집, 지급 조정 모델 개발, 품질특성변수의 변화에 따른 민감도 분석 등을 포함한다.

### 4.1 프로젝트 배경

제안된 PRS 방법론을 적용한 실제 공사는 Superpave방

식으로 건설된 아스팔트 콘크리트 도로(프로젝트 번호: 1032-03-70)이다. 위스콘신주의 남동부에 위치한 케노샤 카운티에 포함되며 I-90 고속도로의 한 부분이다. 이 프로젝트와 관련된 여러 혼합물 설계 데이터 중 T-250-2157-98로 건설된 구간에 LCCA에 근거한 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였다. 설계 단계와 시공 단계에서 사용된 조정 변수들은 표 3 과 같다. 이 표에 의하면 시공 단계의 조정변수 (i.e., 품질특성변수) 영역들은 설계단계의 조정 변수 영역 안에 포함되어있으므로 본 프로젝트를 수행한 시공업체는 시공자 측이 달성한 품질향상 수준에 맞는 지급조정이 예상된다.

## 4.2 민감도 분석

입력품질변수들의 상대적 중요성을 파악하기 위해서, 아스팔트 함량, 공극량, P<sub>200</sub>의 분포 영역 안에서 각 변수들의 변화량에 따른 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 생애주기비용의 변화량, 즉 지급 조정 량은 정해될 필요가 있다. 민감도 분석 결과를 통해 어느 품질특성변수가 도로 공용성, 생애주기비용, 그리고 지급조정액에 상대적으로 큰 영향을 미치는가에 대한 정보를 제공하므로 시공사는 큰 영향을 미치는 품질특성변수에 더 많은 주의를 기울여 품질관리를 할 필요가 있다. 다른 품질특성변수들은 그들의 목적치 값에 고정된 상태에서 하나의 특정한 품질특성변수가 변화하면서 시뮬레이션을 실행하였다. 주어진 분포영역에서 무작위 변수 추출을 위해 Latin Hypercube Sampling 방법이 사용되었으며 Morgan 과 Henrion (1990)가 제안한 지침에 따라 각 시뮬레이션 품질특성변수 별로 10,000번이 실행되었다 (최재호 2002). 생애주기비용을 산출하기 위한 분석기간은 35년으로 가정하였으며 그림 2는 각 품질특성변수별로 민감도 분석 결과를 나타내는 것이다. 두께에 대해서는 데이터의 부재로 민감도 분석에 사용되지 않았다.

표 3. 프로젝트 1032-03-70와 관련된 설계와 시공 데이터 정보

조정 변수	단위	목적치	분산	설계시 $\bar{X}, \pm S$	건설시 $\bar{X}', \pm S'$
아스팔트함량	% weight	5.3	0.4	5.3±0.4	5.41±0.295
공극량	% volume	4	1.3	4.0±1.3	4.194±0.967
P <sub>200</sub>	%	3.7	2.0	3.7±2.0	4.45±0.325
두께	in	N/A	N/A	4.5	N/A

$\bar{X}_i, \bar{X}'_i$  : 단위 아스팔트 구간내의  $i$ 개의 설계와 시공 조정 변수 평균

$S_i, S'_i$  :  $i$ 개의 설계와 시공 조정 변수의 분산

그림 2 (a)를 보면 아스팔트 함량 5.4% 이외의 범위에서는 단지 가격의 감소를 보인다. 일반적으로 알려져 있는 아스팔트 함량비와 도로 평탄성사이의 관계는, 적정 수준 이하의 아스팔트 함량은 혼합물 골재간의 결합에 결함을 가져오며 이는 도로 표면의 붕괴로 이어진다. 그리고 지나친

아스팔트 함량은 더욱 쉽게 소성변형을 가져온다는 것인데 그림 2 (a)는 이러한 관계를 잘 묘사한다.

그림 2 (b)를 보면 시공사는 작은 공극량 (높은 다짐)에 대해 보너스를 받으며 높은 공극량에 대해 페널티를 받는 결과를 보인다. 이러한 결과는 다짐은 아스팔트 도로 포장 공사에서 중요한 pay factor임을 보여주고 있다.

그림 2 (c)를 보면 (a)에서 비슷한 양상을 보이며 P<sub>200</sub> 4.55 %이외의 값에서는 가격 감소 현상을 보인다. P<sub>200</sub>와 도로 평탄성간의 일반적 관계는 P<sub>200</sub>가 증가할수록 평탄성이 향상되며 P<sub>200</sub>가 적정 수준 이상이면 소성변형을 가져오기 쉬우며 rutting 현상을 가져올 확률이 크므로 도로 평탄성은 저하된다. 이러한 관계는 그림 (c)에 잘 묘사된다.

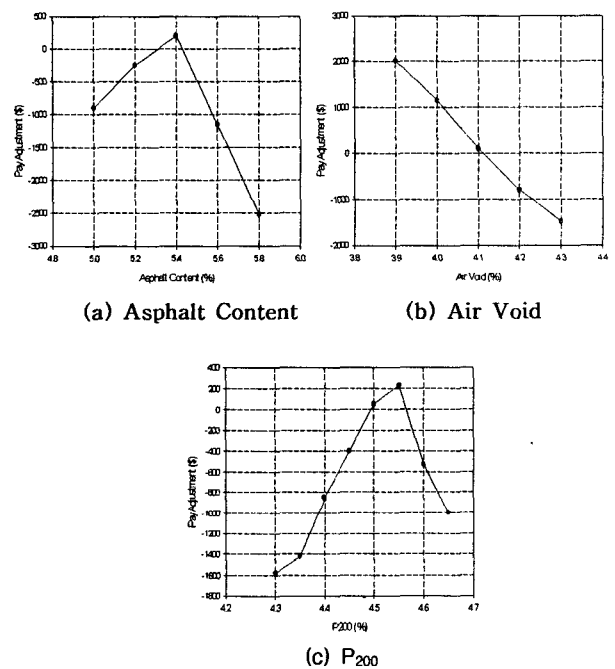


그림 2. 품질특성변수의 변이에 따른 지급조정액의 민감도 분석

하지만, 이러한 민감도 분석은 하나의 품질특성변수만을 고려할 때 유용하며 품질특성변수들 상호간의 작용을 고려하는 하나의 전체 지불조정모델의 개발에는 사용될 수 없다.

## 4.3 지급조정모델 개발

일반적으로 시공단계에서 품질특성변수가 설계단계의 것보다 월등하며 잘 컨트롤된다면 LCC는 설계단계의 것보다 좋을 것임을 예측할 수 있다. 따라서 발주처 입장에서는 유지보수에 드는 비용을 절감할 수 있을 것이다. 다시 언급하면 본 연구의 목적은 도로의 품질이 공용성에 미치는 효과를 직관에 의한 것보다는 과학적인 근거를 바탕으로 정량화 하는 것이다.

앞에서 언급된 시뮬레이션 입력 변수와 유지보수결정나무, 그리고 그림 3의 시스템을 사용하면 LCC<sub>as-dcs</sub>와

LCC<sub>as-con</sub>을 도출하였다.

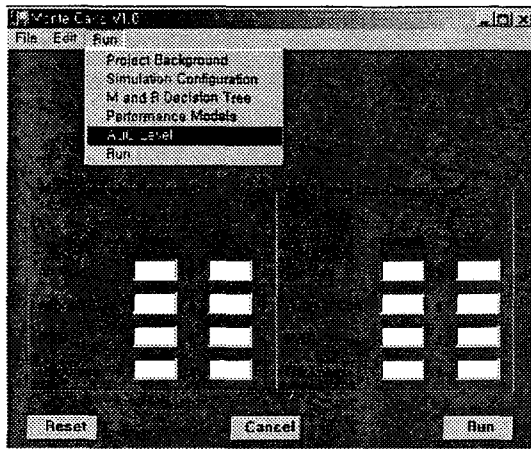


그림 3. LCC<sub>des</sub>와 LCC<sub>con</sub>을 도출하기 위한 표준 시스템

각 시뮬레이션이 반복할 때마다 품질특성변수의 값들은 설계와 시공단계에서 지정된 영역 안에서 무작위로 추출되어 앞서 언급된 도로공용성 예측 모델과 생애주기비용 모델을 사용하여 10,000 번 반복된 결과의 설계단계 LCC<sub>des,mean</sub> 값의 평균과 분산, 그리고 시공단계 LCC<sub>con,mean</sub> 값의 평균과 분산이 결정되었다. 그림 4는 이러한 두 값의 차이를 도식화 한 것이다. 본 연구 사례분석에 의하면 시공사측은 단위 공사 구간 당 \$801 (\$332,020 - \$331,218)의 보너스에 상응하는 만큼의 품질 향상을 가져왔다고 판단된다. 이 가격은 LCCA를 사용하여 그림 2의 개별적인 지급조정모델들의 상호작용을 고려한 광범위한 최적 값이다.

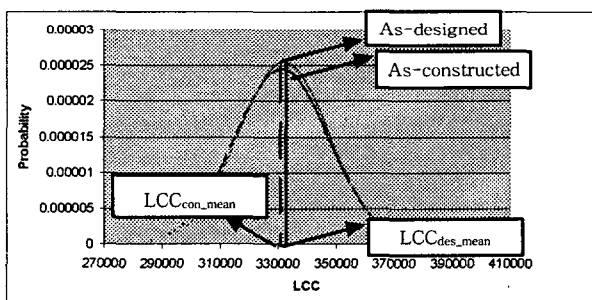


그림 4. LCC<sub>con,mean</sub>과 LCC<sub>des,mean</sub>의 비교

## 5. 결론

본 논문은 미 교통국에서 PRS의 중요 핵심인 지급조정 모델을 개발하기 위한 전체적인 프로세스와 적용 사례 결과 분석을 보여주는 것을 목적으로 한다. 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한 설계단계와 시공단계에서의 LCC의 차를 시공사측에 지불하는 지급액을 조정하는데 사용하였다. 이 접근방식의 적합성을 보여주기 위해서 현재 위스콘신 교통국에서 사용중인 도로관리 관련 시스템에서 실제 데이터를 추출하여 지급조정 모델을 개발한 후 품질 특성 변수와의

민감도 분석을 통하여 모델의 적합성을 보여주었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- \* 현재까지 개발된 도로 수명 예측 모델로부터 도로공용성에 영향을 미치는 품질 특성 변수를 파악할 수 있었다.

- \* 공정한 지급조정모델을 개발하기 위한 선수조건은 재료, 시공, QC/QA, 공용성 측정, 교통량, 그리고 환경 변수 등의 데이터를 도로 선형상의 기준에 맞추어 체계적으로 저장할 수 있는 데이터 베이스이다.

- \* LCC에 근거한 몬테카를로 방식은 도로 공용성 모델 개발과 LCC 비용 산정 계산에 사용되는 여러 변수들의 내재적 변이성을 고려할 수 있다.

- \* 개발된 지급조정 모델은 아스팔트 혼합물의 공극비, 아스팔트 함량비, 미세 골재 함량 (fines) 등의 품질특성변수의 변화에 민감하며 그 변화 관계는 일반적 기대와 일치한다. 이러한 결과는 시공자 측에 품질특성변수의 목적치를 달성하기 위해서 어느 정도 노력을 기울여야 하는지를 나타낸다.

- \* 본 논문에서 제안된 PRS 방법론에 근거하여 개발된 시스템은 좀 더 정확하고 신뢰성 있는 도로 공용성 모델의 개발에 따라 한 층 진보될 수 있으며 향후 교통국에서 계약서를 개발하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- \* 미국의 교통부에서는 A+B 계약과 인센티브 계약, lane rental 등 다양한 계약방식을 통해 공기단축을 유도하고 품질향상과 시공자 측의 전문적인 노하우를 최대한 발휘할 수 있도록 하는 지급조정 계약방식을 사용하려는 노력을 보이고 있다. 본 연구를 비롯한 이러한 다양한 계약방식 등의 사례가 기존체제에 대한 변화를 거부하는 현 고착된 국내 건설제도에 본보기가 되었으면 한다.

## 참고문헌

1. Anderson, D.A., Luhr D.R., and Charles E.A. (1990). Framework for Development of Performance-Related Specifications for Hot-Mix Asphalt Concrete. NCHRP Report 332. Transportation Research Board, Washington, D.C.
2. Chamberlain, W. (1995). Performance-Related Specifications for Highway Construction and Rehabilitation. NCHRP Synthesis 212. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington, D.C.
3. Federal Highway Administration (FHWA). (1997). Performance-Related Specifications: A Cooperative Effort to Improve Pavement Quality. Rep. No. FHWA SA-97-098. Washington, D.C.
4. Garvey P. R. (2000). Probability Methods for Cost Uncertainty Analysis: A system engineering perspective, New York: Marcel Dekker, Inc.
5. Hoerner Todd. Dec, 1998, Performance-related Specs lead to better Pavements, Concrete Construction.
6. Keith D. Herbold., (2000). Using Monte Carlo

Simulation for Pavement Cost Analysis, Public Roads. 64(3). <<http://www.tfhrc.gov/pubrds/nov00/lifecycle.htm>>

7. Lee, Y. H., A. Mohseni, and M. I. Darter. (1993). Simplified Pavement Performance Models. Transportation Research Record 1397, TRB, Washington, D.C., 7-14.

8. Lin, Huang-Hsiung. (1999). Development of a new framework for a performance-based specification on asphalt pavement design. PhD Thesis. University of Texas at Austin, USA.

9. Morgan, M. G., and Henrion M. (1990). Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis, New York: Cambridge University Press.

10. NCHRP 9-15. (1998). Quality Characteristics and Test Methods for Use in Performance-related Specifications of Hot-Mix Asphalt Pavements

11. <<http://www4.trb.org/trb/crp.nsf/All+Projects/NCHRP+9-15>> NCHRP 9-20. (1998). Performance-related Specifications for Hot-Mix Asphalt Construction.

12. <<http://www4.trb.org/trb/crp.nsf/All+Projects/NCHRP+9-20>> NCHRP 9-22. (2000). Beta Testing and Validation of HMA PRS.

<<http://www4.trb.org/trb/crp.nsf/All+Projects/NCHRP+9-15>>

13. Ohrn L. Greg and Cliff Schexnayder. (1997). Effect of Performance-Related Specification on Highway Construction. Practice Periodical on Structural Design and Construction.

14. Performance Related Specifications Workshop. (2000). Final Report to Florida Department of Transportation. Federal Highway Administration (FHWA), Orlando, FL.

15. Roberts F.L. et al. (1996). Hot Mix Asphalt Material, Mixture Design and Construction, 2nd Edition. National Center for Asphalt Technology.

16. Schexnayder Cliff, and Ohrn L. Greg. (1997). Highway Specifications Quality versus Pay, J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 123(4), 437-443.

17. Transportation Research Circular Number E-C010 (1999). Glossary of Highway Quality Assurance Terms. National Research Council. Washington, D.C.

18. Walls, J, III, and Smith, MR. (1998). Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design. Draft Interim Technical Bulletin. Rep. No. FHWA-SA-98-079. Washington. D.C.

19. Wisconsin State Highway Plan 2020. (2000). Wisconsin Department of Transportation

20. 최재호, "Framework of Developing Performance-related Specifications at WisDOT", PhD Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 2002

---

### Abstract

The development of a Pay Adjustment (PA) procedure for implementing Performance-related Specifications (PRS) is known to be a difficult task faced by most State Highway Agencies (SHAs) due to the difficulty in such areas as selecting pay factor items, modeling the relationship between stochastic variability of pay factor items and pavement performance, and determining an overall lot pay adjustment. This led to the need for an effective way of developing a scientific pay adjustment procedure by incorporating Life Cycle Cost Analysis (LCCA) embedded Monte Carlo approach. In this work, we propose a prototype system to determine a PA specifically using the data in the pavement management information systems at Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) as an exemplary to other SHAs. It is believed that the PRS methodology demonstrated in this study can be used in real projects by incorporating the more accurate and reliable performance prediction models and LCC model.

**Keywords :** Pay Adjustment, Life Cycle Cost Analysis (LCCA), Performance-related Specifications, Monte Carlo Method

---