# 개질 재생아스팔트 혼합물 사용에 따른 생애주기비용 분석 연구

이상염* · 문성호**

# Study on the Life Cycle Cost Analysis Related to the Usage of Modified Recycling Asphalt Concrete Mixture

Sangyum Lee* · Sungho Mun**

**요약** : 초기비용 및 할인율의 적용과 더불어 미래에 발생될 포장의 표면처리 비용을 고려한 생애주기비용을 분석(LCCA)함에 있어 다양한 개질 재생아스팔트에 대해 공용수명의 기간 동안 총비용을 산정하였다. 여기서 이용된 LCCA 방법으로서 순현재가치의 해석 접근을 통해 개질 재생아스팔트 혼합물의 순환골재 사용비율에 따른 생애주기비용을 구하였다. 또한 비용분석을 위해 일반아스팔트 혼합물과 더불어 순환골재 사용비율에 따른 개질 재생아스팔트 혼합물에 대한 LCCA에 있어 초기시공 이후 잦은 절삭 덧씌우기에 따른 공용성 감소모델을 이용하여 보다 현실성 있게 본 연구에 적용하였다. 결과적으로 도로이용에 있어 총 40년간의 생애주기비용 분석을 통해 30%의 순환골재를 이용한 개질 재생아스팔트 혼합물 가장 좋은 선택이라는 결과를 도출하였다.

**주제어** : 생애주기비용 분석, 개질 재생아스팔트, 순현재가치, 유지보수

**ABSTRACT** : Life cycle cost analysis(LCCA) was used for evaluating the total economic worth of several modified recycling asphalt concrete mixtures by analyzing initial costs and discounted future cost, such as maintenance of resurfacing costs, over the life of the project year. For simplicity, an analysis technique of the net present value in LCCA was chosen for making better investment decisions in terms of the percent usage of recycling aggregate for modified recycling asphalt concrete mixtures. Through the LCCA of modified recycling asphalt concrete mixtures as well as dense-graded asphalt concrete mixture, the performance reduction model of resurfacing was applied in order to take the reliable resurfacing cycles into consideration in this study. As a result, the 30% usage of recycling aggregate was found as the best decision up to the 40 years of roadway's serviceability.

**Key Words** : Life Cycle Cost Analysis, Modified Recycling Asphalt Concrete Mixture, Net Present Value, Maintenance

* 서울시청 도시안전실 도로관리과 주무관(Director, Road Management Divison, Seoul Metropolitan Government)

** 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수(Assistant Professor, Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology), 교신저자(E-mail: smun@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-9014)

## Ⅰ. 서론

건설산업에 있어 경쟁력 강화 추진의 영향으로 인하여 정부에서는 공공건설사업의 효율성을 개선하기 위한 목적으로 선진국에서 시행되고 있는 설계VE(Value Engineering) 제도와 LCC(Life Cycle Cost) 개념을 도입하고 대규모 공공투자사업의 저비용-고효율 구조로의 체질개선을 위하여 지난 1999년 3월에 「공공건설 사업효율화 종합대책」에서 설계VE 제도 도입과 LCC 검토 의무화 방안을 마련하였으며, 대규모 공공사업에 대한 기획단계에서는 타당성조사에 대한 표준지침(김훈, 2001)을 공공사업 전반에 보편적으로 적용되는 일반지침과 수송, 댐, 항만 등 분야별로 구분하여 적용되는 부문별 지침으로 나누어 제시하였다.

이에 포장분야의 설계, 시공, 유지관리에 있어서도 기존 자료를 이용하여 초기건설비, 유지관리비, 철거 및 폐기비용 등 LCC 분석에 필수적인 항목들의 개념과 적용방법이 요구되고 있다.

이와 더불어 본 연구에서 수행한 폐자원인 아스팔트 재활용에 있어서는 환경오염문제의 해결과 재정 확보를 위한 방안이며 제도에 있어서도 2009년도 '건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률'의 개정으로 폐아스팔트의 재생아스팔트 사용 의무화가 추진됨에 따라 서울시 차원의 성능 개선 등이 시급히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 앞으로 재생아스팔트 사용비중을 높이고 재생아스팔트의 재료특성을 개선하고자 개발된 개질 재생아스팔트에 있어 재생아스팔트 사용비율에 따른 LCC 분석을 본 연구에서 수행하였다. 개질 재생아스팔트는 기존에 취약한 수분저항성 및 피로균열을 증진시키기 위해 개질첨가제를 투여하여 생산한 혼합물이다. 특히 연구의 객관화를 위해 기존에 사용되었던 LCC 종류를 살펴보고 LCC 산정방법을 고찰하였다. 특히 LCC 산정에 있어 할인율이 중요하게 작용하는데 보다 정확한 할인율을 산정하기 위해 한국은행의 경제통계연보 자료를 이용하였다. 또한 기존 재생아스팔트보다 성능이 우수한 개질 재생아스팔트에 대한 LCC 평가를 수행하고자 한다.

## Ⅱ. LCC 종류

LCC 분석은 앞으로 발생될 비용을 고려해야 됨에 따라 다양하고 불확실한 요소들로 인해 예측에 어려움이 있다. 이에 합리적이며 현실적인 예측을 위해서는 부분적인 가정이 필요하며 이들 가정은 과거 이력자료 또는 해당 정보 등으로 보편적인 개연성을 지니게 하는 방법이 필요하다. LCC 분석 방법에 있어서는 다음과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다: 1) LCCA(Life Cycle Cost Analysis)는 분석대상과 구조적 성능 및 특징이 비슷한 시설물로부터 수집된 시공 및 유지에 관한 실제자료를 이용하여 계획시설물의 생애비용(Life Cost)을 추정하는 방법으로 해석목적에 따라 적합하도록 데이터의 보정이 요구된다. 2) LCCP(Life Cycle Cost Planning)는 여기서 사용되는 핵심단어인 Planning과 밀접한 관계로 이루어지는 LCC 방법으로 설계과정에서 설계도면으로 표현되는 설계정보를 이용하고 총비용을 산정하는 방법으로서 설계 및 견적 전문가의 의견자료에 근거하여 비용을 예측하므로 정확한 비용예측이 가능하도록 다양한 자료의 수집과 처리 등을 위한 일관성 있는 접근방법이 요구된다. 3) LCCM(Life Cycle Cost Management)는 관리에 주안점을 두는 LCC 방법으로서 현재 사용 중인 시설물

과 기타 부속물에 대한 최적관리비용(Optimized Management Cost)을 결정하는 방법으로 LCCA에서 산정된 유지관리비용을 토대로 시설물 또는 부속물의 용도를 변경함으로써 유지관리비용을 감소할 수 있는 방안을 도출하는 것이다.

위에서 언급한 LCC 분석기법은 경제적인 요소에 근거하기 때문에 최종 의사결정에는 안전(Safety), 신뢰(Reliability), 운영(Operability)과 환경요인 등의 비경제적인 요소를 고려할 필요가 있다. 즉 설계, 건설 및 유지관리, 폐기처분 비용, 환경 및 경영적 요소를 고려한 LCC 분석을 수행할 수도 있다. 이와 관련해서 〈표 1〉은 Life Cycle Cost 분석에 의한 공동주택의 최적설계 방법론에 관한 연구에서 정리한 LCC 종류를 보여주고 있다(박태근, 1992). 본 연구에서 수행한 방법은 상위개념의 LCC를 수행하였다.

## Ⅲ. LCC 산정

LCC 분석이란 기본적으로 대안이 갖는 분석기간 동안 시간의 경과에 따라 어떠한 경제적 영향을 만들어 내는가를 평가하는 것이다. 즉 서로 다

〈표 1〉 LCC 분석기법 종류 및 내용

| 구분 | 분석기법 종류 | 내 용 |
|---|---|---|
| 상위개념 | LCC (Life Cycle Cost) | 시설물의 기획·설계단계, 건설단계, 사용 및 유지관리 단계, 폐기처분단계에서 발생되는 모든 비용의 총계로서 금리와 물가변동률의 영향을 고려하여 경제성을 검토하는 기법 |
| | LCA (Life Cycle Assessment) | 환경결과에 대한 기술적인 선택을 이해하는 "요람에서 무덤까지(Cradle to Grave)"의 접근방식으로 목적물의 생애주기 동안 서로 다른 단계에서 환경에 영향을 주는 폐기물의 발생, 사용된 재료와 천연자원의 물리적인 투입을 보고하는 분석 및 측정방법으로 환경에 대한 영향에는 자원이용, 건강, 생태영향 등이 포함됨 |
| | LCM (Life Cycle Management) | 시설물의 Life Cycle에 걸쳐 종합적인 효용의 증대를 위해 하위개념의 모든 세부적인 생애비용 절감을 고려하여 최적의 대안을 선택하는 기법으로 시설물의 가치증대, LCC 절감, 생애자원사용량 등의 감소가 핵심 |
| 하위개념 | $LCCO_2$ (Life Cycle $CO_2$, 생애이산화탄소 발생량) | 토목분야보다 주로 냉·난방 등의 설비가 포함되어 있는 건축분야에서 적용되며 건축물의 생애주기 동안 지구 온난화에 영향을 미치는 가스를 이산화탄소로 환산한 발생량으로 평가하는 기법으로 탄소량(C)으로 환산하는 경우도 있으며 이를 생애탄소발생량이라고 함 |
| | LCE (Life Cycle Energy, 생애에너지사용량/ 생애화석자원사용량) | 건축물 등의 생애주기 동안 에너지 사용량의 총계로서 분석하는 기법 |
| | LCL (Life Cycle Labor, 생애노동사용량) | 건축물의 생애주기 동안 노동력 사용량의 총계로서 분석하는 기법 |
| | LCR (Life Cycle Resource, 생애자원사용량) | 건축물의 생애주기 동안 사용되는 자원사용량의 총계로서 검토 및 분석하는 기법 |
| | LCI (Life Cycle Inventory) | LCA는 목표설정, 분석방향 및 LCI 데이터의 수집 및 평가의 한 단계로서, LCI data는 System과 관련된 자원이용, 에너지 및 환경에의 방출량(공기, 물, 부산물, 폐기물 등)을 정량화한 데이터 |

른 상이한 시점에서 발생되는 비용을 어느 기준점에서 동일한 화폐가치로 환산하여 산술적 합계를 통해 평가하고자 하는 것이다. 그러나 미래에 발생되는 비용은 불확실한 시간 가치로 인해 인플레이션에 따른 화폐가치의 변동이 발생하고 이러한 미래비용의 지불규모를 분석하기 위해 현재와 미래 비용을 공통시점으로 환산하여 분석하는 일반적인 방법으로 현재가치법과 연등가액법이 이용된다. 본 연구에서는 Huang(2004)이 제안한 현재가치법을 사용하여 LCC를 산정하였다. 현재가치법과 연등가액법은 다음과 같다. 1) 현재가치법(Present Value Method)은 현재와 미래의 모든 비용을 현재 시점의 가치로 변환하여 LCC를 산정한다. 즉 초기비용은 이미 현재가로 표시되어 있으므로 미래에 발생되는 반복비용과 비반복비용은 식 (1) 및 (2)에 따라 계산된다.

$$P_v = C_A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = C_A \times (\text{연등가액계수}^{-1}) \quad (1)$$

$$P_v = C_F \frac{1}{(1+i)^n} = C_F \times (\text{현재가치계수}) \quad (2)$$

여기서, $i$는 할인율, $n$은 연수, $P_v$는 현재가치, $C_A$는 $n$년간에 걸쳐 계속되는 일정한 최종비용, 그리고 $C_F$는 $n$년 후의 최종비용이다. 2) 연등가액법(Annual Equivalent Cost Method)은 초기비용과 반복비용 그리고 비반복비용 모두를 매년의 비용으로 변환하는 방법으로 모든 LCC를 매년 균등비용으로 나타내기 위해 사용하는 기법이다. 따라서 반복비용 자체는 이미 연등가액으로 표시되고 있으므로 변환을 필요로 하지 않고 초기비용과 비반복비용은 식 (3)에 의해 연가로 변환될 수 있다.

$$A_e = P_I \left[ \frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n - 1} \right] = P_I \times (\text{연등가액계수}) \quad (3)$$

여기서, $A_e$는 연등가액이고 $P_I$는 초기비용이다.

## 1. LCC 분석방법

LCC 분석방법으로는 확정적 접근방법과 확률적 접근방법으로 구분될 수 있으며 다음과 같다. 1) 확정적 접근방법(Deterministic Approach)은 LCC 분석을 위한 입력변수의 불확실성, 변동성을 고려하지 않은 간단한 접근방법으로 미국 상무부 산하 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 사용하는 방법이며 미국 연방도로청(FHWA)에서도 사용되고 있다. 2) 확률적 접근방법(Probabilistic Approach)은 LCC 분석을 위한 입력변수의 불확실성, 변동성을 고려하는 방법이다. 이러한 확률적 접근방법은 비용항목의 발생가능성뿐 아니라 비용항목이 발생 가능한 전체 범위에서 비용을 Monte Carlo 시뮬레이션 등을 이용하여 해석하는 방법이며 많은 불확실성을 고려할 때 이용된다.

## 2. LCC 해석기간

AASHTO(American Association of State Highway & Transportation Officials) 포장설계에 있어서 포장구조에 대한 시간적인 개념은 공용기간(Performance Period)과 해석기간(Analysis Period)으로 LCC 분석을 위한 분석기간과는 차이가 있다. 공용기간이란 초기 포장구조가 최초 보수(Initial Rehabilitation)를 필요로 하기 바로 전까지의 기간을 말하며, 어느 보수시점에서 다음

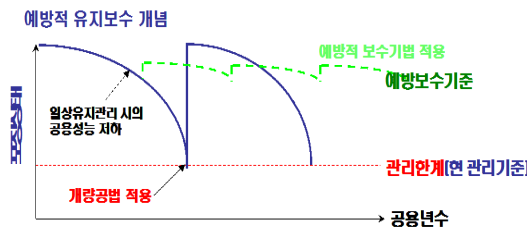
보수시점 사이의 기간을 의미하기도 한다. 공용기간의 설정은 경험과 정책적인 범위 내에서 결정하며 포장 재료의 물리적 요소, 사회적 요구 및 기술적인 사항 등에 의해서 변화된다.

AASHTO 포장 설계법에서 갖는 독특한 공용성 개념으로 정해지는 공용기간은 경험적-역학적 공용성 기간에 근거해 회귀방정식으로 정의되고 있으며 이는 위에서 언급한 초기 보수시점까지의 기간을 산정할 수 있다. 경제성 분석을 위한 유지관리비용은 다양한 포장설계 대안이 요구된다. 즉, 해석기간은 설계수명(Design Life)과 유사한 개념으로 LCC 분석에서 갖는 분석기간과 같다. 또한 LCC 분석을 위해서는 해석기간을 각각의 포장 대안들이 갖는 공용기간보다 길게 설정하여 최소한 번 이상의 유지관리 및 보수가 포함되도록 함으로써 각 대안의 장기정책을 평가하는 것이 적절하다. 〈표 2〉는 1986 AASHTO 도로포장 설계지침서에서 제시하고 있는 해석기간이다.

〈표 2〉 1986 AASHTO 포장설계 해석기간

| 도로조건 | 해석기간(년) |
|---|---|
| 교통량이 많은 도시부 도로 | 30 ~ 50 |
| 교통량이 많은 지방부 도로 | 20 ~ 50 |
| 교통량이 적은 포장도로 | 15 ~ 25 |
| 교통량이 적은 사리도(농업용도로) | 10 ~ 20 |

이와 더불어 미국 FHWA(1998)에서 발행된 「Life Cycle Analysis in Pavement Design」에서는 LCC 분석을 위한 기간이나 대안들은 합리적인 설계전략과 관련된 장기비용의 차이를 반영하여 평가할 수 있도록 충분한 시간범위를 두도록 하고 있다. FHWA에서는 1996년 9월에 LCCA 정책설명에서 모든 포장계획(신설, 복구, 재포장)에 최소 35년이라는 분석기간을 권장하면서 분석기간 범위는 30~40년이 타당한 것으로 보고하고 있다. 〈그림 1〉은 포장설계 대안에서 포장 공용수명에 대한 분석기간의 예를 나타낸 것이다.




〈그림 1〉 포장설계 대안에 대한 분석기간(예)

## 3. 할인율

할인율은 돈의 시간가치(Time Value)를 나타내는 계수로서 발생시기가 서로 다른 비용을 일정한 기준시점으로 등가환산(等價換算)하여 시간경과에 따른 물가변동효과를 고려하며, 할인율 종류는 다음과 같이 분류될 수 있다. 1) 명목할인율(Nominal Discount Rate)은 인플레이션 효과를 포함한다. 2) 실질할인율(Real Discount Rate)은 인플레이션 효과를 포함하지 않는다. 할인방법은 분석대상의 LCC, 투자비용 지출시기에 따른 시간가치 및 기회비용 등을 고려하여 의미 있는 비용의 누락 없이 처리한다. 여기서 실질할인율은 이자율과 물가상승률을 고려하여 결정함에 따라 본 연구에서는 실질할인율을 이용하여 해석하였다. 식 (4)는 명목할인율과 실질할인율의 상관관계를 나타낸다.

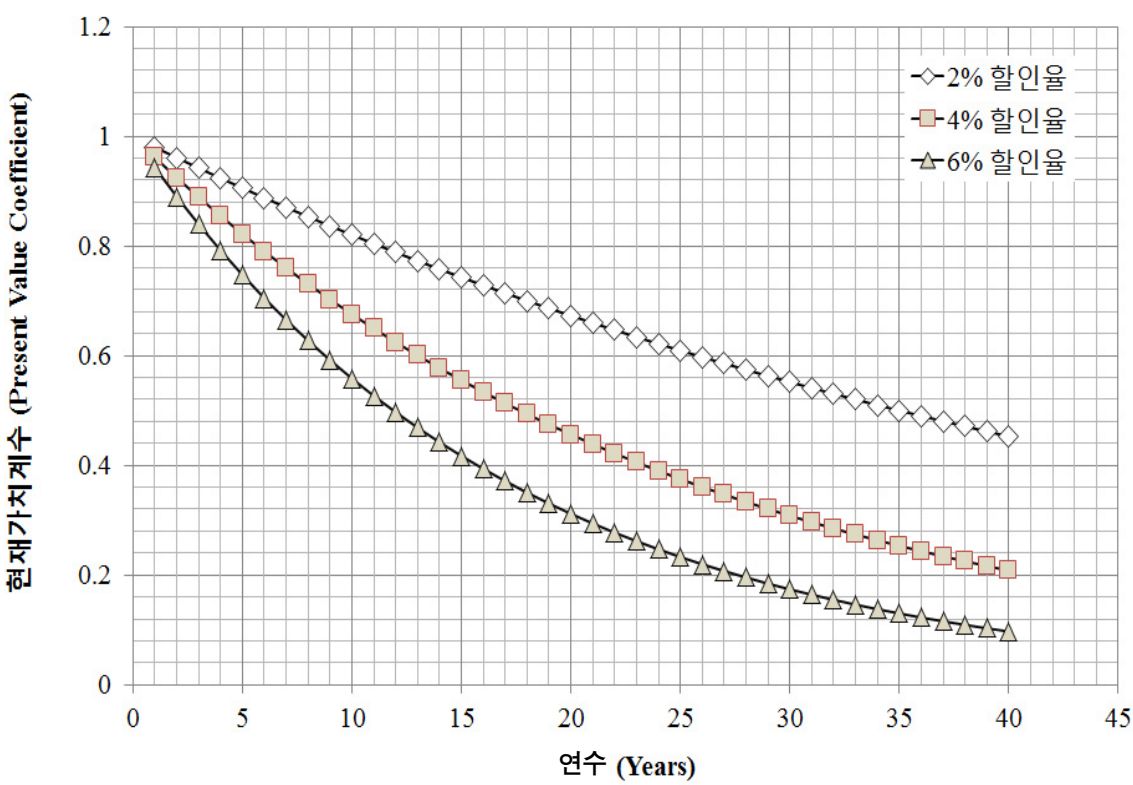
$$I_R = \frac{(1+I_N)}{1+F} - 1 \qquad (4)$$

여기서, $I_R$은 실질할인율, $I_N$은 명목할인율, 그리고 $F$는 인플레이션이다.

위 방법은 미국 예산관리국에서 추천하는 방법으로 분석대상의 경제적 가치를 파악하는 데 있어 인플레이션에 대한 투기 심리를 피할 수 있기 때문에 공학 분야에서 주로 사용한다. 〈그림 2〉는 할인율에 따른 미래비용의 현재가치를 나타내는 것으로 20년의 경과시점에서 할인율 2% 적용 시에는 현재가치의 68% 정도이나, 4%일 경우는 46% 그리고 6%인 경우는 31% 정도에 그치게 된다.

즉, 할인율이 높으면 시간의 흐름에 따라 미래비용의 현재가치가 매우 낮아지며 반대로 할인율을 낮게 설정하면 장래에 발생되는 비용의 가치가 현재시점에서 크게 적용되어지는 것을 볼 수 있다.

할인율의 결정은 물가상승률과 이자율의 정확한 예측이 전제되어야 하나 이는 국내의 중·장기 경제전망에 대한 자료부족과 과거의 경제자료 또한 생동적인 경제동향을 추정하기 곤란한 점 등으로 매우 어려운 문제이다. 즉 초기투입 비용과 장기간에 걸쳐 발생하는 유지관리 및 보수비용 그리고 수익 등의 효과를 고려하는 데 있어 할인율의 변화에 따라 LCC 분석결과가 상당히 민감하게 작용한다. 따라서 본 연구에서는 식 (4)를 근거로 1997년 이후의 과거 경제지표로부터 소비자 물가지수와 시중은행의 정기예금금리에 의해 구한 실질할인율을 적용하기 위한 판단으로 〈표 3〉과 같이 실질할인율을 산정하였다.




〈그림 2〉 할인율과 시간경과에 따른 비용가치 변화

〈표 3〉 실질할인율 산정현황(1997~2011)

| 연도 | 정기예금금리(%) | 물가상승률(%) | 실질할인율(%) |
|---|---|---|---|
| 1997 | 10.59 | 4.4 | 5.93 |
| 1998 | 13.39 | 7.5 | 5.48 |
| 1999 | 7.05 | 0.8 | 6.20 |
| 2000 | 7.08 | 2.3 | 4.67 |
| 2001 | 5.46 | 4.1 | 1.31 |
| 2002 | 4.71 | 2.8 | 1.86 |
| 2003 | 4.15 | 3.5 | 0.63 |
| 2004 | 3.75 | 3.6 | 0.14 |
| 2005 | 3.57 | 2.8 | 0.75 |
| 2006 | 4.36 | 2.2 | 2.11 |
| 2007 | 5.01 | 2.5 | 2.45 |
| 2008 | 5.67 | 4.7 | 0.93 |
| 2009 | 3.23 | 2.8 | 0.42 |
| 2010 | 3.18 | 3 | 0.17 |
| 2011 | 3.69 | 4 | -0.30 |
| 평균 | **5.66** | **3.4** | **2.18** |

자료: 한국은행 경제통계시스템(www.korea.go.kr)

위 표에서와 같이 실질할인율을 구하기 위한 한국은행 경제통계시스템에서 제공하는 경제조사 자료를 1997년부터 2011년까지의 실질할인율 산정으로 2.18%를 구하였다. 여기서 명목할인율은 정부에서 발행하는 장기채권의 이율을 사용하는 것이 원칙이나, 우리나라는 미국 등 선진국과 같이 정부가 채권시장의 이율을 주도하고 있지 못하기 때문에 시중의 보통은행에서 제시하는 정기예금금리를 사용하였다. 이와 더불어 국가별 공공시설물에 대한 적용할인율은 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉 국가별 적용할인율

| 국 가 명 | 할 인 율(%) | 비 고 |
|---|---|---|
| 미 국 | 2~10 | |
| 영 국 | 5~8 | |
| 독 일 | 3 | |
| 스 위 스 | 2 | |
| 기타 개발도상국 | 6~8 | |

위에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 할인율 변화는 〈표 3〉과 같이 -0.3~6.2% 범위에 있고, 여기서 구한 평균값인 2.18과 더불어 미국 및 독일에서 제안하는 할인율인 3%를 이용하여 본 연구에서는 개질 재생아스팔트 사용비율에 따른 LCC를 산정하였다. 결정된 할인율인 3%는 〈표 3〉에서 보는 바와 같이 평균 물가상승률과 평균 실질할인율 사이의 값이다. 따라서 이를 근거로 할인율 3%를 결정하였다.

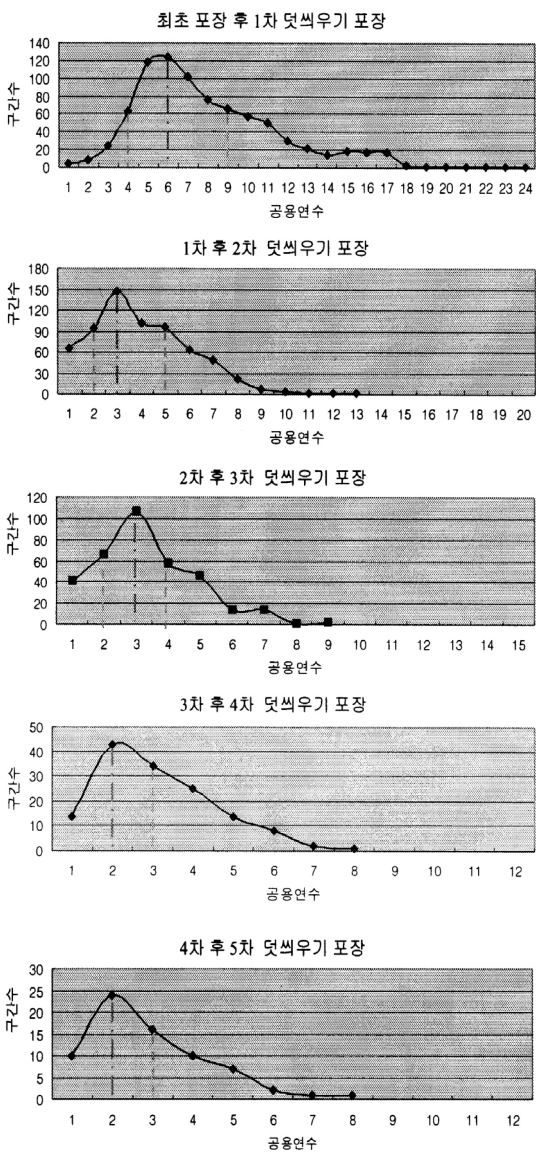
## 4. 재포장에 따른 공용연수 저하모델

서울시 포장도로의 상태는 잦은 굴착 및 복구, 그리고 재포장으로 실제적인 수명예측이 불가능한 실정이다. 현재 포장도로의 유지관리를 위해 기존 포장부에 대한 재포장을 선별적으로 실시하고 있으나 전체적으로는 포장도로 보수예산 범위내에서 획일적인 방식의 성능개선이 이루어지고 있다.

일반적인 유지보수는 아스팔트 표층 5cm 절삭 후 덧씌우기 재포장이 시행되고 있는데, 이는 구조적인 성능의 증가 없이 평탄성 등의 기능적인 시스템 수준을 향상 혹은 유지시키고 있을 뿐이다. 그러나 이러한 접근 방법은 재포장의 횟수가 거듭될수록 기존 포장도로를 조기에 파손시키며 노후화를 촉진시키는 요인을 제공하고 있다. 임영환(2003)의 연구에 따르면 일반국도의 경우, 덧씌우기가 적용된 구간을 대상으로 최초 건설 후 덧씌우기 횟수별로 〈그림 3〉과 같은 포장공용기간의 분포를 알 수 있다. 따라서 본 데이터를 이용한 LCC를 서울시 포장도로에 적용하고자 한다.

최초 포장 이후 1차 덧씌우기까지의 공용연수는 평균 6년 정도이며, 1차 덧씌우기 후 2차 덧씌

우기까지가 평균 3년, 3차부터 4차까지가 2년 정도의 기간이 소요되었다(임영환, 2003). 즉, 덧씌우기 횟수가 증가함에 따라 차후 유지보수까지의 포장 소요수명이 점차 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 획일적인 구역 차원(Network Level)의 유지보수나 포장의 파손과 손상에 대한 구간별(Project Level) 유지보수가 아닌 일률적인 표층




〈그림 3〉 덧씌우기 횟수에 따른 일반국도 포장의 공용연수(임영환, 2003)

재포장만이 시행됨에 따라 포장수명이 점차적으로 감소하고 있는 것으로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 개질 재생아스팔트의 LCC 비용 산정에 있어 임영환(2003)의 연구에서 보여주는 형태의 공용수명을 이용하여 개질 재생비율에 따른 LCC를 산정하였다.

## Ⅳ. 개질 재생비율에 따른 LCC 산정

개질 재생아스팔트의 활용도를 높이고자 표층용으로 시험시공을 시행하여 그 현장 혼합물에 대해 간접인장강도, 터프니스 및 수침 후 인장강도비를 측정하였다. 시험시공과 관련해서는 2회에 걸쳐 실시하였고 1차 시험시공구간은 화랑대역 방향인 봉화산역 인근도로이며 1차로에는 총혼합물 중량에서 순환골재 사용량이 10%, 30% 시공되었으며, 2차로에는 순환골재 50%를 사용하여 개질 재생아스팔트를 포장하였다. 본 1차 시험시공의 표층 포설 두께는 5cm였다. 2차 시험시공구간은 누원초교 인근도로이며 2개의 차로에 대하여 순환골재가 50% 함유된 개질 재생아스팔트 혼합물을 사용하여 표층 5cm를 시공하였다.

위에서 언급한 순환골재 사용비율에 따른 간접인장강도, 터프니스 및 수침 후 인장강도비는 〈표 5〉와 같이 현장혼합물에 대해 측정하였다. 최근 집중적인 강우강도가 빈번하게 서울시에서 발생하고 있어 일반적인 재생아스팔트의 최대 취약점인 수분민감성 즉 물에 대한 저항성이 약하다는 관점으로 본 결과를 분석해 보면 여기서 주목해야 될 실험값은 수침 후 인장강도비이다. 본 수침 후 인장강도비는 다음의 식을 이용해서 구함에 따라 물에 대한 저항성이 어느 정도인지를 알 수 있는 실험인자이다.

$$\text{수침 후 인장강도비} = \frac{\text{수분처리공시체의 인장강도}\,(N/mm^2)}{\text{건조공시체의 인장강도}\,(N/mm^2)} \quad (5)$$

따라서 본 LCC 분석에 있어 수침 후 인장강도비에 근거하여 순환골재 사용비에 따른 재료를 다음과 같이 평가하였다. 일반적으로 표층으로 활용되는 일반밀입도 아스팔트 포장의 경우 수침 후 인장강도비가 0.75인 재료가 주로 현장에서 포설된다(이경하 외, 2006). 이런 근거로 〈표 5〉에서 보는 바와 같이 누원초교 및 봉화산 인근도로에서 시공된 순환골재 사용비가 50%인 경우와 유사하다고 볼 수 있다. 또한 누원초교와 봉화산 인근에서 시험시공함에 있어 각각 다른 시기에 시공함에 따라 봉화산(순환골재 50%)과 누원초교(순환골재 50%)의 실험물성값에 있어 어느 정도 편차가 있음을 〈표 5〉에서 알 수 있다.

일반밀입도 아스팔트 포장의 수침 후 인장강도비가 0.75로 가정했을 때 그에 따른 개질 재생아스팔트에 있어 순환골재 사용비 비교 결과는 다음의 〈표 6〉에서 알 수 있다. 예를 들어 10%의 순환골재를 사용한 개질 재생아스팔트의 경우 수침 후 인장강도비가 0.91임에 따라 0.91/0.75는 1.21의 성능비를 얻을 수 있다.

〈그림 3〉과 〈표 6〉에 근거해서 순환골재 사용량에 따른 1차, 2차, 3차 등의 덧씌우기에 대한 공용기간을 〈표 7〉과 같이 나타내었다. 본 공용성은 〈표 6〉의 각각의 비에 근거하여 계산한 가정이 있다. 예를 들어 50% 순환골재는 일반아스팔트와 같은 공용성을 가지므로 〈표 7〉과 같이 덧씌우기에 따른 공용기간을 6년, 3년, 2년으로 가정할 수 있다. 본 자료의 근거는 임영환(2003)의 연구에서 일반아스팔트 공용성 데이터에 근거하며 또한

〈표 5〉 순환골재 사용비에 따른 공용성 분석자료

| 시험시공구간 | 누원초교 (순환골재 50%) | 봉화산 (순환골재 10%) | 봉화산 (순환골재 30%) | 봉화산 (순환골재 50%) | KS 기준 |
|---|---|---|---|---|---|
| 터프니스 (N×㎜) | 21320 | 17264 | 17433 | 17892 | 8000 이상 |
| 수침 후 인장강도비 | 0.79 | 0.91 | 0.86 | 0.74 | 0.7 이상 |

〈표 6〉 수침 후 인장강도비를 이용한 일반아스팔트의 성능 대비 개질 재생아스팔트의 성능비

| $\frac{\text{10\% 순환골재 강도비}}{\text{일반아스팔트 강도비}}$ | $\frac{\text{30\% 순환골재 강도비}}{\text{일반아스팔트 강도비}}$ | $\frac{\text{50\% 순환골재 강도비}}{\text{일반아스팔트 강도비}}$ |
|---|---|---|
| 1.21 | 1.15 | 1.00 |

〈표 7〉 순환골재 사용비 및 덧씌우기에 따른 공용성

| 구 분 | 10% 순환골재 | 30% 순환골재 | 50% 순환골재 |
|---|---|---|---|
| 초기포설 - 1차 덧씌우기 | 7.3년 | 6.9년 | 6년 |
| 1차 - 2차 덧씌우기 | 3.6년 | 3.5년 | 3년 |
| 2차 - 3차 덧씌우기 | 2.4년 | 2.3년 | 2년 |
| 3차 덧씌우기 이후 | 2.4년 | 2.3년 | 2년 |

〈표 8〉 일반아스팔트 및 순환골재 사용량에 따른 개질 재생아스팔트 단가

| 일반아스팔트 | 10% 순환골재 사용 | 30% 순환골재 사용 | 50% 순환골재 사용 |
|---|---|---|---|
| 68,500원/톤 | 80,000원/톤 | 73,000원/톤 | 71,000원/톤 |

〈표 9〉 혼합물 종류에 따른 순현재가치 추정

| 사용기간(년) | 일반아스팔트 혼합물 (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(10%) (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(30%) (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(50%) (원/톤) | 사용기간(년) | 일반아스팔트 혼합물 (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(10%) (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(30%) (원/톤) | 개질 재생아스팔트 혼합물(50%) (원/톤) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0(조기비용) | 68,500 | 80,000 | 73,000 | 71,000 | 24.2 | | | 35,699 | |
| 6 | 57,368 | | | 59,461 | 25.3 | | 37,871 | | |
| 6.9 | | | 59,531 | | 26 | 31,763 | | | 32,922 |
| 7.3 | | 64,473 | | | 26.5 | | | 33,353 | |
| 9 | 52,500 | | | 54,416 | 27.7 | | 35,278 | | |
| 10.4 | | | 53,680 | | 28 | 29,940 | | | 31,032 |
| 10.9 | | 57,965 | | | 28.8 | | | 31,161 | |
| 12 | 48,045 | | | 49,798 | 30 | 28,221 | | | 29,252 |
| 12.7 | | | 50,152 | | 30.1 | | 32,862 | | |
| 13.3 | | 53,995 | | | 31.1 | | | 29,113 | |
| 14 | 45,287 | | | 46,939 | 32 | 26,601 | | | 27,572 |
| 15 | | | 46,856 | | 32.5 | | 30,611 | | |
| 15.7 | | 50,297 | | | 33.4 | | | 27,199 | |
| 16 | 42,687 | | | 44,245 | 34 | 25,074 | | | 25,989 |
| 17.3 | | | 43,776 | | 34.9 | | 28,515 | | |
| 18 | 40,237 | | | 41,705 | 35.7 | | | 24,412 | |
| 18.1 | | 46,853 | | | 36 | 23,635 | | | 24,497 |
| 19.6 | | | 40,899 | | 37.3 | | 26,562 | | |
| 20 | 37,927 | | | 39,311 | 38 | | | 23,742 | |
| 20.5 | | 43,644 | | | 38 | 22,278 | | | 23,091 |
| 21.9 | | | 38,211 | | 39.7 | | 24,743 | | |
| 22 | 35,750 | | | 37,054 | 40 | 20,999 | | | 21,766 |
| 22.9 | | 40,655 | | | 40.3 | | | 22,181 | |
| 24 | 33,697 | | | 34,927 | **순현재가치(원/톤)** | **670,507** | **654,324** | **633,966** | **694,978** |

50% 순환골재가 이와 유사한 성능비를 〈표 6〉에서 보여줌에 따라 〈표 7〉과 같이 공용성을 산정할 수 있었다.

아스팔트 혼합물에 대한 톤당 단가는 〈표 8〉과 같이 정리하였으며 일반아스팔트 혼합물 가격의 근거는 2012년 조달청에 납품하는 자료이며 개질 재생아스팔트의 경우는 순환골재 사용량에 따른 재료절감과 더불어 개질화에 따른 비용상승 등을 고려하여 톤당 가격을 결정하였다. 결과적으로 총 40년에 대한 LCC를 분석하였으며 〈표 9〉에 보는 바와 같이 식 (2)에 근거하여 해당되는 연도의 현재가치를 계산하였다.

즉 〈표 9〉에서의 40년간 LCC 분석을 통해 알 수 있듯이 다양한 개질 재생아스팔트의 순현재가치를 볼 때 순환골재를 30% 이용하였을 때가 가장 좋은 것임을 알 수 있다. 그 다음으로는 10%의 순환골재를 이용하였을 때이며 50% 순환골재를 활용한 개질 재생아스팔트의 경우는 최악의 선택인 LCC 해석결과를 얻을 수 있다.

## Ⅴ. 결론

건설산업에 있어 LCC 개념의 도입과 더불어 대규모 공공투자사업의 저비용-고효율 구조로의 개선 관련 소개의 장에서 언급한 것처럼 1999년 3월에 「공공건설 사업효율화 종합대책」에서 설계 VE 제도 도입과 LCC 검토 의무화 방안이 마련되었고 이와 관련하여 포장분야의 설계, 시공, 유지관리에 있어 기존 자료를 이용하여 초기건설비, 유지관리비, 철거 및 폐기비용 등 LCC 분석에 필수적인 항목들의 개념과 적용방법이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에는 아스팔트 혼합물 생산 및 유지관리만을 고려한 LCC 산정을 고려하였으며 측정방법으로는 현재가치법을 이용하였다. LCC 해석기간에 있어서는 서울특별시의 여건을 고려하여 AASHTO 도로포장 설계지침서에서 제안하는 40년을 고려하였으며 할인율의 산정은 실질할인율에 근거해 한국은행 경제통계시스템 자료를 이용한 3%를 적용하였다. 또한 재포장에 따른 공용연수 저하모델을 이용하여 최종적으로 일반아스팔트 혼합물의 LCC와 더불어 순환골재 사용비에 따른 개질 재생아스팔트 혼합물에 대한 LCC를 산정하였다. 그 결과로 30% 순환골재를 이용하였을 때 경제적인 효과가 가장 큰 LCC를 산정할 수 있음을 알았다.

## 참고문헌

김훈, 2001, 「LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구」, 건설교통부/시설안전기술공단.

박태근, 1992, "Life Cycle Cost 분석에 의한 공동주택의 최적설계 방법론에 관한 연구", 서울대학교 박사논문.

이경하 · 박은용 · 조성환, 2006, "아스팔트 혼합물의 수분민감 특성 연구", 「한국도로학회 학술발표회 논문집」, 67~70.

임영환, 2003, "일반국도 PMS의 Project Level 개선과 Network Level 개발 연구", 중앙대학교 박사학위 논문.

FHWA, 1998, *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design*, FHWA-SA-98-079, U.S.DOT.

Huang, Y. H., 2004, *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

www.korea.go.kr(한국은행 경제통계시스템, 2011, 「경제조사자료」)

원 고 접 수 일 : 2012년 4월 19일
1차심사완료일 : 2012년 5월 25일
2차심사완료일 : 2012년 6월 20일
최종원고채택일 : 2012년 7월 2일