도로포장 유지보수 전략에 따른 기대수명과 보수비용산정

Estimation of Life Expectancy and Budget Demands based on Maintenance Strategy

한대석* · 도명식**

Han, Dae-Seok · Do, Myung-Sik

Abstract

Road pavement requires repetitive maintenance works to maintain satisfactory service level to the public. However, the repetitive maintenance works upon deteriorated pavement structure make negative effects to deterioration speed. It often leads to inefficient use of limited budget. For that reason, the pavements require reconstruction work to recover their original performance. Recently, construction demands in the Korean national highway have already been reached to maximum level, and the aged pavements start to demand much more reconstruction works. However, in the real world, road agencies have often been confused when they determine maintenance design for such aged road sections due to budget constraint. It is because there is no reliable long-term maintenance strategy that supports their decision making. To support their decision making, this paper aimed to suggest the best maintenance strategy considering changing process of pavement performance by repetitive maintenance works. As an analysis method, probability distribution and hazard function to estimate the life expectancy were adopted, and then the results were used for long-term life cycle cost analysis with deterministic or Monte-Carlo method under various scenarios. As an empirical study, the Korean national highway data that has long-maintenance history data since 1986 has been applied. Last, this paper considered quality assurance of maintenance work to improve maintenance quality. These could be important information as a part of long-term maintenance strategy of pavement.

Keywords : *Pavement management, Life expectancy of maintenance work, Reliability and quality assurance, Reconstruction timing, Life cycle cost analysis, Korean national highway*

요 지

도로포장은 충족되어야 하는 서비스 수준을 유지하기 위해 반복적인 유지보수를 필요로 한다. 그러나 노후화된 하부구조와 반복적인 유지보수는 포장의 파손속도를 가속화시키기도 하며, 이는 한정된 예산의 효율성을 저해하는 요소가 될 수 있다. 따라서 본래의 기능을 유지하기 위해 도로의 재포장이 주기적으로 요구된다. 특히, 국도는 그 건설수요가 한계점에 다다랐으며, 노후로 인해 재포장 및 유지관리의 필요가 점점 증가하고 있는 시점이다. 그러나 도로관리자들은 예산의 한계로 이러한 노후포장에 대해 재포장 및 효율적인 유지관리를 시행하기에 많은 어려움을 겪고 있다. 이는 의사결정에 필요한 장기적인 유지보수 전략의 부재 때문이라 할 수 있다. 이에 본 논문은 반복적인 유지보수로 인한 포장의 상태변화를 고려한 유지보수 전략을 도출하여 관리자들의 의사결정에 도움을 주고자 하였다. 분석을 위해 포장관리시스템(PMS)이 도입된 1986년부터 장기간 누적된 국도의 유지보수 이력데이터를 활용하였으며, 방법론으로는 유지보수 횟수에 따른 수명분포 도출 및 위험률(hazard) 함수의 변화과정을 분석한 후, 이 결과를 근거로 다양한 유지보수 대안들에 대해 중장기 유지보수비용을 산정하였다. 이를 위해 포장파손과정의 불확실성을 고려하고, 도로관리자들에게 보다 실용적인 정보를 제공하기 위해 확률론적 방법(몬테카를로기법)을 추가로 도입하였다. 또한, 신뢰성 이론을 활용하여 유지보수에 대한 품질보증과 관련된 정보도 도출하고자 하였다. 이러한 정보는 장기유지보수전략 수립에 중요한 정보로 활용할 수 있다.

핵심용어 : 포장관리, 유지보수의 기대수명, 신뢰성 및 품질보증, 재포장주기, 유지보수비용 산정, 국도

1. 연구의 배경과 목적

도로는 막대한 투자가 필요한 공공재로써 물자 및 사람의 이동에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 국가 전체 사회간접자본의 가치에서도 50% 이상을 점유하고 있다(Do and Kwon, 2009). 한국의 국도네트워크는 경제성장기를 거치면

서 급속도로 확장되었으나, 1990년대부터 그 건설 수요가 점점 줄어들기 시작하여 현재는 도로 건설이 거의 제자리걸음이다. 즉, 건설이 아닌 유지관리의 시대가 도래한 것이며, 이런 유지관리행위를 보다 효율적이면서도 비용도 절감할 수 있는 “자산관리시스템(Asset Management System)”의 중요성이 부각되고 있다. 도로자산관리시스템의 핵심은 1) 도로

*정회원 · Osaka대학 토목공학전공 · 박사후연구 · 공학박사 (E-mail : hands@civil.eng.osaka-u.ac.jp)

**정회원 · 교신저자 · 한밭대학교 도시공학과 · 교수 · 공학박사 (E-mail : msdo@hanbat.ac.kr)

의 파손과정에 대한 원인을 파악하고, 2) 이에 필요한 비용 및 효과를 분석하여 도로관리정책의 효율화를 도모하는 것이라 할 수 있으며, 이런 일련의 과정들은 종종 생애주기비용분석(Life Cycle Cost Analysis: LCCA)으로 대표된다. 이제는 도로관리자들이 공학적인 관점뿐만 아니라 자산관리 측면에서도 전략을 수립하고 시행할 필요가 있는 것이다.

도로포장은 양질의 서비스수준을 유지하기 위해 주기적인 유지보수가 필요하다. 그러나 공용기간이 길어짐에 따라 하부구조가 노후되고, 노후가 진행된 포장 위에 수행되는 반복적 유지보수는 기대만큼 그 효과를 나타내지 못한다(PIARC, 2000). 이런 점들을 개선하기 위해 도로의 재포장이 주기적으로 요구되나, 도로관리자들은 예산의 한계로 고비용을 요구하는 재포장에 관해 부담을 느끼게 된다. 이는 의사결정에 필요한 장기적인 유지보수 전략, 즉, 시기적절한 재포장은 오히려 장기적으로 예산절감(혹은 이용자 및 사회적 환경비용의 절감)에 유익하다는 정보가 없기 때문이다. 이에 본 논문에서는 반복적 유지보수로 인한 포장성능의 변화과정을 고려한 유지보수전략을 도출하여 도로관리자들의 의사결정을 돕고자 하였다.

본 연구를 위해 포장관리시스템(Pavement Management System: PMS)이 도입된 1986년부터 장기간 누적된 국도의 유지보수 이력데이터를 활용하였다. 방법론으로는 유지보수 종류(재포장, 덧씌우기)와 유지보수 횟수(덧씌우기 1, 2, 3회)별로 기대수명의 분포도출 및 위험률(hazard) 함수의 변화과정을 분석 후, 이 결과를 활용하여 결정론적 방법과 확률론적 방법(몬테카를로 시뮬레이션)으로 구분하여 중장기 유지보수비용을 산정하였다. 또한, 신뢰성 이론을 활용하여 유지보수작업의 품질보증과 관련된 정보도 도출하고자 하였다.

본 연구는 1) 완벽하지 못한 데이터의 수집으로 그간 활용하지 못했던 유지보수 이력데이터의 활용과, 2) 다주기 기대수명에 대한 접근, 3) LCCA에 확률론적인 기법을 도입, 4) 재포장에 관련한 유지보수 전략을 제시하는 데 중점을 두었다. 이것들은 정보적 차원뿐만 아니라 도로자산관리를 위한 분석기법 측면에서도 그 의미가 있다고 할 수 있다. 또한, 분석결과로 제시된 재포장 주기는 그간 범용적으로 사용되어 오던 “설계수명 20”년에 대한 고찰과도 연관지어 해석될 수 있는 의미있는 결과라 할 수 있다.

2. 기존문헌 고찰

약 20여 년 전부터 미국을 중심으로 “자산관리”란 용어가 대두되기 시작했다. 초기의 자산관리는 도로 인프라의 개발, 유지보수, 운영, 개선을 보다 체계적으로 수행하기 위해 민간부문에서 먼저 도입이 시도되었으나, 점점 노후화되어 가는 도로 인프라시설, 관련 예산의 삭감 등으로 국가적 차원에서 자산관리에 대한 필요성이 대두되었다(Fwa, 2006). 한편, 자산관리 시스템은 도로이용자, 이해관계자, 예산결정자, 도로관리자 간의 의사소통을 돕는 도구로 활용되어 왔다(USDOT, 1999). 자산관리시스템은 사회간접자본시설의 노후과정에 대한 분석과 효율 최대 혹은 비용 최소 등의 목적합수를 만족하는 전략 및 비용분석 등, 흔히 말하는 생애주기비용분석이 주요항목이라 할 수 있다. 최근의 연구동향을 살펴보면, 과거 관리자중심의 생애주기비용분석에서 점점 이용

자 및 사회적 환경비용 항목에 대한 접근이 늘고 있으며, 이러한 연구들 대부분은 포장상태의 개선이 차량의 주행특성을 변화시켜 사회적 환경비용에 영향을 준다는 접근방법을 따르고 있다(도명식 등, 2006; 한대석 등, 2007; Han, 2011; PIARC, 2000). 당연히, 연구의 핵심은 도로 인프라의 공용성 혹은 파손과정의 예측이다. 도로포장의 파손과정은 불확실성이 매우 심각하여 결정론적인 방법보다는 통계·확률적 기법이 보다 많이 활용되고 있으며, 최근에는 계량경제학, 금융공학, 산업공학분야에서 많이 활용되는 마르코프 연쇄(Markov chain) 과정과 위험률 이론(Hazard theory), 마르코프체인-몬테카를로(Markov chain Monte Carlo) 기법을 활용한 베이지안(Bayesian) 예측모형 등을 포장관리의 현실에 맞게 개량·변형·혼합한 기법이 소개되면서 점점 자산관리 기법이 고도화되어가고 있다(Kobayashi 등, 2012; 도명식, 2010; Han, 2011; Nam 등, 2009; Yang 등, 2006; Madanat and Ben-Akiva, 1994).

이러한 포장파손과정 예측모형에서 얻어진 결과를 바탕으로 장기 생애주기비용분석이 가능하게 된다. 생애주기비용분석은 분석범위를 관리자비용에 국한하면 상대적으로 분석이 간편해지지만, 이용자 비용 및 사회적 환경비용까지 그 범위를 넓히게 되면 모델의 개발뿐만 아니라 활용에도 많은 어려움이 있다. 또한, 현실에는 많은 변수가 매우 복잡하게 혼재되어 있기 때문에 이것들의 메커니즘을 정확하게 반영한 생애주기비용모델을 개발한다는 것은 하나의 큰 도전이라고도 할 수 있다. 한 예로 세계은행(World Bank)과 세계도로협회(PIARC)에서 1960년대부터 지속적인 노력으로 개발한 HDM-4(Highway Development and Management-4) 모형도 활용 및 보정의 어려움, 요구데이터의 비현실성, 모델 자체의 경직성으로 분석가 및 지역실정에 맞게 조정하는 과정(customization and calibration)에 많은 문제점을 드러내고 있다(Han 등, 2012b).

한편, 신뢰성 이론(reliability theory)은 주로 산업공학에서 품질관리 및 사후서비스 정책 등의 결정에 많이 활용되었으며, 의료분야에서도 환자의 상태변화과정을 분석하기 위해 주로 사용되어 왔다(정해성, 1997; 김종걸 등, 2000). 그러나 최근에는 자산관리분야에서도 도로수명의 분포 도출을 통해 평균기대수명, 특정시점에서의 (혹은 특정시점까지의) 파손율 또는 신뢰도를 예측하는 등, 도로유지보수 전략을 수립하기 위한 방법론으로 활용되고 있다(도명식, 2010; 도명식 등, 2010; Tsuda 등, 2006; Kobayashi 등, 2010b). 이런 노력들로 인해 자산관리분야는 과거 HDM-4나 RealCOST, MicroPaver, RoSy SYSTEM 등 상용화 프로그램에 의존하던 시대에서, 점차 자신의 실정에 맞는 자기화된(customized) 시스템을 개발하는 방향으로 흐르고 있다. 이러한 움직임은 도로관리환경에서의 이질성을 고려하기 위한 바람직한 현상으로, 미국, 일본, 한국 등은 물론 베트남, 인도네시아, 말레이시아 등 개발도상국에서도 이어지고 있다.

3. 연구 방법 및 자료

3.1. 연구방안의 결정

포장의 파손과정에 대한 연구성과들의 특성을 살펴보면, 마

르코프 연쇄 과정과 위험률 이론을 중심으로 보통 유지보수 한 주기 내에서의 포장의 파손과정과 기대수명을 예측하는데 주요 목적을 두고 있다(Tsuda 등, 2006; Kobayashi 등, 2010a; Nam, 2009; Han 등, 2012a). 즉, 기존의 분석과정을 도입하게 되면 “재포장 기준에 도달하는 데까지 걸리는 시간은 y 년” 혹은 적용방법에 따라 “유지보수가 y 년 지연되면 재포장이 필요”라는 결과를 얻게된다. 그러나 이러한 유형의 결론은 공학적, 통계적 관점에는 의미가 있을 수 있으나, 유지 관리적 입장에서 바라보면 비현실적인 결론으로 여겨질 수 있다. 일반적으로 재포장이 필요한 수준까지 포장상태가 악화되도록 방지하지 않기 때문이다. 이에 본 연구에서는 보다 현실적인 정보제공을 위해 “ x 번째 유지보수 시에는 재포장이 필요”라는 결론이 유도되도록 연구방안을 설정하였다. 이를 위해서는, 신설포장 부터 유지보수 1회, 2회, ..., x 회로 이어지는 다 주기 기대수명에 대한 접근이 요구된다. 그러나 단순히 다 주기 기대수명에 대한 정의만으로 최적대안을 선정하기에는 무리가 있다. 보수방법(재포장과 덧씌우기)에 따라서 유지보수단가의 차이가 존재하기 때문이다. 즉, 기대수명과 보수비용의 함수관계를 고려한 생애주기비용 분석이 불가피하다.

일반적인 생애주기비용 분석에서는 기대수명을 상수로 정의하는 결정론적 방법을 따르고 있기 때문에 분석결과가 단일 값으로 제시된다. 이런 경우, 도로관리자의 측면에서 가장 큰 이슈인 예산배정에 대한 불확실성을 고려할 수 없게 된다. 이에 본 연구에서는 몬테카를로 기법을 활용하여 포장 파손과정의 불확실성을 고려한 예산의 신뢰구간정보 제공하고자 하였다. 몬테카를로 기법을 활용하기 위해서는 기대수명을 샘플링하는 과정이 필요하므로, 다 주기 기대수명의 정의방법도 확률분포이론을 활용하였다. 한편, 생애주기비용의 항목으로 다양한 요소들이 고려될 수 있으나(Goodman and Hastak, 2006; Han, 2011; PIARC, 2000), 본 연구에서는 데이터의 특성상 연도별 포장상태를 예측하는 과정이 포함될 수 없으므로, 포장상태를 함수로 한 다양한 비용항목의 예측이 불가능하였다. 이에 본 연구에서의 생애주기비용은

“유지보수비용”으로 한정하기로 한다.

본 연구에서 필요한 과정은 1) 다주기의 기대수명예측과 2) 결정론적, 확률론적 유지보수비용분석으로 한정될 수 있으나, 기대수명에 대한 확률분포가 확보되었다는 점을 활용하여 신뢰성 이론의 적용도 추가적으로 시도하였다. 이를 통해 포장파손특성에 관련된 보다 다양한 정보를 얻을 수 있으며, 유지보수시공에 대한 품질보증 관련 정보도출이 가능하기 때문에, 의미 있는 분석과정이라 할 수 있다. 본 연구의 분석 흐름을 그림 1에 요약하였다.

3.2 분석 데이터

일반적으로 도로포장의 기대수명과 관련된 연구에서는 도로표면상태의 시계열자료 혹은 FWD(Falling Weight Denominator) 등에서 확보된 강도자료 등을 활용하게 되나, 본 연구에서는 자료확보의 한계로 유지보수 이력자료만을 활용하였다. 여기에는 보수시점, 당시의 포장구조 및 표면상태(즉, 유지보수기준), 시행된 유지보수공법, 보수단가, 시공자 등이 포함되지만, 본 연구를 위해 확보 가능한 자료는 오직 “보수시점(시행년도)”뿐이었다. 따라서 포장설계상태 및 유지보수기법, 교통량, 기후조건 등 내/외부 변수를 고려한 기대수명 간의 관계는 고려할 수 없었으며, 모든 공법을 포함하는 평균적인 의미에서의 분석이 불가피하다. 유지보수 공법별, 횡수별로 더 많은 그룹을 만들어 분석을 시행하면 유지보수전략수립에 보다 구체적이고 의미 있는 결과를 도출할 수 있지만, 그룹 수의 증가는 확률구조 분석 시 샘플 수 부족으로 이어짐을 쉽게 예상할 수 있으며, 분석 대안도 수없이 많아지는 경향을 띠게 된다. 이는 보다 장기적이고, 체계적인 자료가 축적되었을 때 가능하며, 무엇보다 전문적으로 다룰 필요가 있기 때문에 연구과제로 남겨두겠다. 참고로 평균적인 의미에서의 분석이 이루어지는 경우, 유지보수 시점 간의 차이인 관측수명은 모든 독립변수의 영향이 고려된 종속변수로 인식되며, 독립변수는 기대수명의 분산을 부분적으로 설명하는 정보적인 역할을 하므로, 결국 종속변수의 기대치에는 변함이 없다.

본 논문에서는 실측 유지보수 시점 간의 차이를 “관측수명”으로, 분석과정에서 예측된 수명은 “기대수명”으로 정의하기로 한다. 또한, “재포장”은 포장의 하부층까지 개선한 보수유형으로 정의하며, 복구(rehabilitation) 수준에서 가장 일반적인 보수공법인 덧씌우기를 통칭 “유지보수”라 칭하기로 한다. 이러한 정의를 기준으로 각 샘플들은 1) 신설포장 및 재포장, 2) 유지보수로 1차 그룹핑(grouping)이 가능해지며, 유지보수는 반복횟수에 따라 다시 1회, 2회, ..., x 회로 세부 그룹핑이 이루어진다. 즉, 한 구간에서 다수의 샘플이 수집될 수 있다. 다만, 도로신설 후 현재까지 1회도 유지보수가 없었던 구간과, 마지막 유지보수로 부터 현재까지의 경과시간은 (즉, 잠재샘플들) 분석에서 제외하였다. 각 샘플이 포함하는 두 시점을 차이인 관측수명 $\bar{L}$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다(식 (1), (2), 그림 2 참조).

$$\bar{L}(G^k) = [\tau_{(M_n, G_{n+1})}^k - \tau_{G_n}^k | k \in G] \quad (1)$$

$$\bar{L}(M_n^k) = [\tau_{(M_{n+1}, G_{n+1})}^k - \tau_{M_n}^k | k \in M] \quad (2)$$

그림 1. 연구의 흐름도

여기서, L : 관측수명

G : 신설포장 혹은 재포장

M : 유지보수

n : 유지보수횟수($n = 1, \dots, \infty$)

τ : 유지보수 시행년도

G^k, M_n^k : 그룹 별 샘플($k=1, \dots, K; G=1$), ($k=1, \dots, K; n=1, \dots, N; M=1$)

본 연구를 위해 이용된 국토데이터는 2010년을 기준으로 집계된 가장 최근 자료이다. 자료를 확인한 결과 가장 오래된 건설기록은 1965년으로 국토 포장관리시스템(PMS)이 도입되기 이전인, 1986년 이전에 시행된 도로신설 및 유지보수횟수는 총 808회, 여기서 유지보수는 단 59회뿐이었다. 이는 자료 전체의 18.15% 수준으로, 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 1986년도 이후의 자료만을 활용하였다. 자료처리 과정을 확보된 샘플은 총 2,354개(쌍)로, 기존연구(도명식, 2010)에서 경기도 일대 8년간의 유지보수데이터를 활용한 것에 비교할 때 시간적, 공간적으로 범위가 넓은 뿐 아니라, 샘플수 측면에서도 보다 의미 있는 자료라 할 수 있겠다. 표 1에 본 연구에 사용된 데이터의 간단한 통계치를 정리하

표 1. 신/재포장 및 유지보수 반복횟수 별 자료정리

항목	신설/재포장	유지보수(M_n)				
	G	M_1	M_2	M_3	M_4^*	M_5^*
샘플수 $n(k)$	1,353	695	245	47	11	3
평균(년) μ	9.97	6.28	6.37	5.4	6.36	7.33
표준편차 σ	3.89	2.48	2.57	2.07	2.46	1.15
분산 σ^2	15.17	6.15	6.62	4.29	6.05	1.33

비고: *샘플수의 부족으로 분석에서 제외

였다.

표 1에서 보이는 바와 같이, 유지보수의 유형 및 횟수에 따라 관측수명에 차이가 있음을 알 수 있다. 한편, M_4 와 M_5 그룹은 샘플수가 11개, 3개밖에 확보되지 않아 통계적 의미가 없으므로 분석대상에서 제외하였다. 이는 이제까지 주로 3회~4회제 유지보수가 이루어진 구간은 주로 재포장을 시행했거나, 혹은 도로개통 후 4회~5회 유지보수가 시행될 만큼 공용기간이 긴 도로가 많지 않기 때문이다.

4. 유지보수 종류에 따른 기대수명과 신뢰성

4.1 유지보수의 종류와 횟수에 따른 기대수명 산정

먼저, 유지보수종류 및 횟수에 따른 관측수명의 특성을 살펴보기 위해 각 그룹의 상대도수분포도와 각 분포의 평균과 분산(μ, σ^2)에서 도출한 정규분포의 확률밀도함수를 비교해 보기로 한다. 그림 3은 유지보수 방법(재포장과 유지보수) 및 유지보수 횟수별 도로구간의 수명분포를 나타내고 있으며, 확률분포의 형태가 정규분포와 유사함을 알 수 있다.

수명자료들이 통계적으로 정규분포에 근사하는지를 보다 정확하게 확인하기 위해 A-D(Anderson Darling) 검정을 수행하여 정규성을 검증하였다(Anderson and Darling, 1952). 여기서 A-D검정은 Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von, Kuiper,

그림 3. 재포장/유지보수 횟수별 상대도수분포와 정규분포의 확률밀도비교

표 2. Anderson-Darling 정규성 검정결과

항목	G	M ₁	M ₂	M ₃	비고
A* ²	2.0083	1.3316	1.0984	1.0928	μ, σ^2 이 알려진 경우
신뢰수준*	5%	15%	15%	15%	

참고: *신뢰수준 15% = 1.610, 10% = 1.933, 5% = 2.492, 2.5% = 3.070, 1% = 3.857 (Stephens, 1974)

Watson, Shapiro-Wilk 통계치 중에서도 가장 강력한 방법으로 알려져 있다(배도선 등, 1999; Stephen, 1974). A-D 검정은 분포의 중심을 기준으로 양 방향의 급간을 쌍으로 하여 표준화 점수를 비교하는 방식이며, 산출방법은 식 (3), (4)와 같다.

$$A^2 = -n(Z) - \frac{1}{n(z)} \sum_{i=1}^{n(z)} (2n(Z) - 1) [\ln \Phi(Z) + \ln \{1 - \Phi(Z_{n+1-i})\}] \quad (3)$$

$$A^{*2} = \begin{cases} A^2 \left(1 + \frac{4}{n(z)} - \frac{25}{n(z)^2} \right), & \mu, \sigma^2 \text{ are known} \\ A^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,

A^2, A^{*2} : A-D 검정의 통계치

Z: 표준화 점수 ($Z = (t - \mu) / \sigma$)

i: 급간(본 연구에서는 년도)($i = 1, \dots, n$)

표 2에 나타난 바와 같이, 각 그룹의 A-D 통계치 A^{*2} 가

모두 높은 수준에서 정규성을 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 각 그룹의 기대수명 기대치는 정규분포의 분포함수의 특징에 따라 $E(\hat{L}) = \mu$ 로, 분산은 $V(\hat{L}) = \sigma^2$ 로 쉽게 구할 수 있다. 이를 활용하여 각 유지보수 방법 및 횟수별 기대수명의 확률밀도함수와 분포함수를 비교해 보았다(그림 4 참조).

그림 4는 유지보수 방법 및 반복횟수에 따라 수명분포의 특징이 변화하고 있음을 잘 보여주고 있다. 요약해보면, 신설포장/재포장 그룹을 기준으로 유지보수 횟수가 증가함에 따라 확률분포의 분산이 작아짐과 동시에 좌측으로 평균수명이 이동함을(즉, 악화속도가 빨라짐을) 확인할 수 있다. 특히 신설포장/재포장 그룹과 유지보수 그룹들 간의 확률구조의 차이가 뚜렷하였다. 한편, 1차, 2차 유지보수는 분포형태와 평균수명이 거의 동일하나, 3회차 보수부터는 그 수명이 짧아짐을 알 수 있다.

여기서, 기대수명의 차이가 포장의 내구 부조의 악화가 아닌, 외부요인일 가능성을 확인하기 위해 각 그룹의 교통하중 강도를 비교해보았다. 유지보수 방법별로 교통하중을 비교해 본 결과 악화속도가 가장 빨랐던 3회차 유지보수 그룹의 45 구간 중(이상치로 여겨지는 두 구간을 제외) MESAL(Million Equivalent Single Axle Loads)의 평균이 0.121로 전체평균 0.123과 거의 동일하였으며, 표준편차도 0.119로 전체평균 0.123과 같은 수준으로 나타났다. 즉, 그룹별 기대수명의 차이는 외부요인인 교통하중보다는 보수방법 및 공용기간에 대

그림 4. 신설/재포장 및 유지보수 횟수별 확률밀도 및 분포함수

표 3. 유지보수 종류별/횟수별 기대수명 및 기존연구와의 비교

유지보수		G	M_1	M_2	M_3	예측방법 데이터특성
본 연구		9.97 (3.90)*	6.28 (2.48)	6.37 (2.57)	5.40 (2.07)	- 관측치의 확률분포 기댓값 - 유지보수 이력 정보 - 1965~2010; 국도전체
도명식 (2010)	상**	7.896(1.944)	9.110(3.540)			- 신뢰도(대수정규/최대우도)이론 - 유지보수 이력 정보 - 1999~2008; 수원과 의정부지역
	중	7.181(1.944)	7.809(2.965)			
	하	6.511(1.517)	7.318(3.315)			
Han 등, (2012a)		6.49				- 베이지안 마르코프 위험률 - 노면상태 조사정보 - 2007~2010; 국도전체
Kobayashi 등, (2010a)		9.21				- 마르코프 위험률 - 노면상태 조사정보 - 2003~2006; 국도전체

비고: *표준편차, **교통하중 (MESAL; Million Equivalent Single Axle Load) 기준

한 하부구조의 노후에서 비롯되었다고 해석할 수 있다.

한편, 본 연구에서 도출된 기대수명의 정합성을 검토하기 위해 기존 연구성과와 비교해 보기로 한다. 표 3은 한국 국도의 포장데이터를 기반으로 기대수명을 분석한 대표적 사례와 분석방법을 요약한 것이다.

연구성과별로 연구의 배경(분석방법, 대상지역, 이용한 데이터의 양과 특성 등)이 상이함을 참작하면, 기대수명의 절대 값을 그대로 비교하기에는 무리가 있으나, 그간의 연구결과가 6~10년임을 고려할 때, 본 연구의 추정결과도 (5.4~9.97년) 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

다만, 본 연구와 다소 유사한 성격을 띠고 있는 기존연구(도명식, 2010)에서 신설/재포장보다 덧씌우기의 기대수명이 더 길게 분석된 점은 본 연구결과와 상반된다. 본 연구에서 사용된 데이터가 시간적-공간적으로 더욱 광범위한 결과라 해석될 수 있으나, 기존연구에서 최근의 자료만을 사용했다는 점에서 최근의 추세, 즉, 포장공법 및 유지보수 기술의 진보를 더 잘 반영하고 있다고도 해석 가능하다. 이에 대한 보다 면밀한 분석은 향후 연구과제로 남기기로 한다.

4.2 유지 보수 횟수와 공용 기간에 따른 신뢰성

산업공학분야에서는 생산품질관리 및 품질보증기간을 산정하는 방안으로 신뢰성 이론을 주로 활용하고 있다(김종걸 등, 2000; 나춘수 등, 2010). 일반적으로 제품수명의 분포특성에 따라 지수(exponential)분포, 와이블(Weibull)분포, 대수 정규(log-normal)분포, 정규분포와 감마(Gamma)분포 등을 이용하게 된다. 신뢰도 이론에서는 특정시점에서의 상태변화 가능성을 나타내는 확률밀도 함수(Probability Density Function; PDF)와 이들의 누적분포 누적분포함수(Cumulative Distribution Function: CDF), 그리고 이 두 가지 함수를 동시에 고려한 위험률 함수(hazard function)를 다루게 된다. 본 연구에서는 더 쉬운 이해를 돕기 위해 확률밀도함수를 순간파손함수 $f(t)$ 로, 누적분포함수를 누적파손함수 $F(t)$ 로 정의하기로 하며, 파손되지 않고 그대로 이용 가능한 확률은 공용가능함수 $R(t)$ 로 칭하기로 한다.

본 논문에서는 표 2와 그림 3을 통해 유지보수 방법별 수명 데이터가 정규분포에 근사함을 확인하였으므로, 정규분포에 근거한 확률밀도함수를 도출하기로 한다. 여기서 정규분포는 연속형 분포이므로, 식 (5), (6)을 통해 표준정규분포로 변환하여 도출된다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}Z(t)^2\right) \quad (5)$$

$$Z(t) = \frac{t-\mu}{\sigma} \sim N(0,1) \quad (6)$$

여기서,

$f(t)$: 시간 t 에서의 순간파손함수

$z(t)$: 시간 t 에서의 표준화 점수($-\infty < t < \infty$)

여기서 도출된 확률밀도함수를 이용하면 누적파손함수, 공용가능함수 및 위험률 함수를 산정할 수 있다. 여기서 위험률 함수란 특정시간 t 까지 상태변화가 없다가 단위시간 Δt 에 변화(파손 등)할 확률을 말한다. 이 세 가지 함수들 간의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = \Phi\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}Z(t)^2\right)\right\} \quad (7)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(t)dt = 1 - \Phi\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}Z(t)^2\right)\right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t \leq T \leq t + \Delta t | T > t]}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}Z(t)^2\right)}{\sigma \left[1 - \Phi\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}Z(t)^2\right)\right\}\right]} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$\Phi(\cdot)$: 표준정규분포의 누적분포함수

$F(t)$: 누적파손함수

$R(t)$: 공용가능함수

$\lambda(t)$: 위험률함수

Δt : 단위시간

도로관리분야 측면에서 생각한다면 $F(t)$ 는 t 시점에서 전체 도로 중 몇 %의 도로가 유지보수를 필요로 하는지를 나타내며, 파손함수 $f(t)$ 의 적분으로 계산된다. 이 확률에 기대비용을 고려하면 통계적 의미에서의 필요예산 예측이 가능하다. 공용가능함수 $R(t)$ 은 이와 반대 개념이므로 $1-F(t)$ 로 간단히 계산되며, 몇 % 도로가 유지보수 없이 활용이 가능한가에 대한 정보를 제공하게 된다. 위험도 함수는 특정시점 t 에서의 순간적인 파손확률을 나타내므로, 한 해 예산과 깊은 관계를 가진다. 한편, 신뢰도 분석에서는 보통 신뢰 수준 p 에서의 백분위 수 $t_{p(50)}$ (보통 B_p 로 표기)를 많이 활용하게 되는데, 이는 식 (10)~(11)로 표현할 수 있다. 참고로, 각 그룹의 기대수명은 정규분포의 성질에 따라 기댓값인 μ 로도 구해질 수도 있지만, 신뢰도 분석에서는 백분위 수의 중앙값 $B_{p(50)}$ 으로도 구해질 수 있다.

$$F(t_p) = \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}Z(t_p)^2\right)\right) = p \quad (10)$$

$$t_p = \mu + \{\sigma \cdot \Phi^{-1}(p)\} \quad (11)$$

여기서, p = 신뢰 수준

식 (11)에서 $\Phi^{-1}(p)$ 는 일반적으로 z_p 를 사용하기도 한다. 본 연구에서는 B_5 , B_{10} , B_{50} , B_{90} , B_{95} 수명과 $R(t=5)$, $R(t=10)$ 을 비교하였다(표 4 참조). 여기서 B_5 , B_{10} 은 대상 도로구간의 불신뢰도가 각각 5%와 10%에 도달하는 시점을 나타낸다.

각 수명을 B_{50} (즉, 기대수명)을 분모로 해서 그 비율을 살펴보면 B_5 는 0.34~0.37, B_{10} 은 0.48~0.51, B_{90} 은 1.49~1.52, B_{95} 는 1.63~1.66으로 나타났다. 즉, 현재 신뢰성 분석에서 품질보증이나 정책입안에 많이 활용되고 있는 B_{10} 을 적용한다면, 품질보증의 기준이 되는 시점이 기대수명의 약 절반이 되는 시점임을 알 수 있다. 나아가 대상구간의 불신뢰도가 90%가 되는 시점인 B_{90} 을 참조하면, 오직 10%의 도로구간만이 기대수명의 1.5배의 성능을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 분석결과는 향후 품질보증제도의 기준마련이나 유

표 4. 보수의 종류 및 횡수별 백분위수 및 신뢰도 함수

그룹	B_5	B_{10}	B_{50}	B_{90}	B_{95}	$R(t=5)$	$R(t=10)$
G	3.56(0.36)*	4.98(0.50)	9.97	14.96(1.50)	16.37(1.64)	0.8990	0.4968
M_1	2.20(0.35)	3.10(0.49)	6.28	9.46(1.51)	10.36(1.65)	0.6974	0.0669
M_2	2.14(0.34)	3.07(0.48)	6.37	9.67(1.52)	10.60(1.66)	0.7030	0.0792
M_3	2.00(0.37)	2.75(0.51)	5.4	8.06(1.49)	8.81(1.64)	0.5774	0.0132

비고: *괄호 안의 실수는 평균수명 B_{50} 을 분모로 한 비율

지보수 시공업체의 선정 및 관리에 활용할 수 있다.

한편 $R(t=5, 10)$ 의 분석결과를 살펴보면, 신설/재포장 그룹 내 구간들은 5년까지 약 90%, 10년까지는 약 50%의 구간이 유지 보수없이 이용가능함을 보여준다. 그러나 유지 보수 그룹 내 구간들은 5년까지는 대체로 양호한 상태를 보여주지만, 10년까지 유지보수 없이 사용할 수 있는 비율은 6.7~7.9%, 특히 3차 유지보수 그룹에 속해있는 도로들은 겨우 1.3%만이 살아남는 것을 확인할 수 있다. 또한, $\Delta R(t) = 5, 10$ 가 상당히 큰 점은 유지보수 후 5~10년 사이에 파손이 집중적으로 발생함을 나타내며, 이는 공용기간이 5년 이상인 도로들에 대한 집중적 상태조사를 통해 유지보수지연을 최소화할 필요가 있음을 말해준다.

5. 확률론적 방법론을 이용한 유지보수 전략

5.1 분석대안 및 분석옵션의 정의

본 절에서는 유지보수 기법과 반복적 유지보수에 따라 기대수명의 변화한다는 분석결과를 기반으로, “몇 번의 유지보수 후에 재포장하는 것이 가장 경제적인가?”에 대한 결론을 유도 할 수 있도록 분석 대안을 설정하였다. 참고로, 자료의 한계(유지보수 상세정보의 누락)로 인해 다양한 유지보수 공법을 활용한 대안설정이 불가능했으며, 그룹별 기대수명의 분포특성이 유지보수 3회차까지 확보된 점을 고려하여 이하의 5가지 유지보수 대안을 설정하였다.

- 1) 대안 G : 계속 재포장만 시행($G_1, G_2, \dots, G_n$)
- 2) 대안 $GM1$: 유지보수 1회 이후 2회차에 재포장(... $G_1, M_1, G_2, M_2, G_3, \dots$)
- 3) 대안 $GM2$: 유지보수 2회 이후 3회차에 재포장(... $G_1, M_1, M_2, G_2, M_1, M_2, G_3, \dots$)

4) 대안 GMB : 유지보수 3회 이후 4회차에 재포장(... $G_1, M_1, M_2, M_3, G_2, M_1, M_2, G_3, \dots$)

5) 대안 GMK : 계속 유지보수만 시행($M_1, M_2, \dots, M_n$)

즉, 각 대안의 정의에 따라 재포장의 주기가 각각 “9.97년, 16.25년, 22.62년, 28.02년, 무한대”로 해석이 가능하다. 한편, 계속 유지보수만 수행하는 GMK 대안의 경우, 3회 이후의 기대수명이 정의되지 못한 관계로 3회차의 기대수명(5.4년)이 계속 이어지는 것으로 가정하였다.

유지보수비용예측은 두 가지 방법으로 시행되었다. 첫 번째는 각 그룹의 기대수명이 상수로 고정된 상태로 예측되는 결정론적인 방법으로 가장 간단하면서도 일반적인 방법이다. 두 번째인 확률론적 방법에서는 몬테카를로기법을 활용하여 각 그룹의 수명분포에서 기대수명을 샘플링하는 방법을 적용하였다. 이를 통해 포장기대수명의 불확실성과 유지보수전략을 동시에 고려한 유지보수비용의 기댓값과 범위를 비교할 수 있다.

분석기간은 도로포장의 거시적 경제성 분석 시 일반적으로 사용되는 40년으로 하였다(한대석 등, 2007; 도명식 등, 2006). 범용적으로 사용되어 온 “설계수명 20년”을 고려할 때, 분석기간도 20년이 되어야 한다고 여겨질 수 있으나, 본 논문에서는 재포장 대안을 포함한 다 주기의 유지보수전략을 고려하는 만큼 분석기간이 충분히 길어야 할 필요가 있다. 더 긴 분석기간의 적용도 고려해 보았으나, 너무 긴 분석기간은 오히려 신뢰도에 영향을 주는바 일반적인 40년으로 설정하였다.

본 연구에서 제시한 방법론에 대한 응용 가능성은 대전지 방국토관리청 관할의 424구간으로 한정하여 검증하였다. 이는 전국을 대상으로 하게 되면, 지역별 보수비용의 오차(차이) 등을 구체적으로 파악할 수 없기 때문이다. 한편, 분석 시 각 구간의 초기소속그룹(현재 몇 번째 유지보수 중에 있

표 5. 유지보수비용분석에 적용된 분석옵션 및 필요항목의 요약

항목	내 용	비 고
분석기간	40년	설계수명의 2배 수준
대상구간	424구간	대전청관할 전체구간
분석대안	$G, GM1, GM2, GM3, GMK$	대안에 따라 재포장의 주기변화
비용정의	관리자비용 = 유지보수비용 - 잔존가치(옵션)	
분석방법	- 결정론적 기법: 분포의 기댓값을 활용 - 몬테카를로 기법: 분포의 가능 값을 샘플링(옵션)	몬테카를로 반복횟수 = 1,000회
주요결과	- 재포장주기를 고려한 관리전략 - 관리전략별 유지보수비용의 기댓값 및 범위	
할인율 및 유지 보수 단위비용	- 할인율: 5.5% - 유지보수비용(만원): 유지보수(덧씌우기 50mm) = 5,024만원/차로/km, 재포장(기층보수 50mm + 재포장 50mm) = 8,236만원/차로/km	- 이자율(국토해양부, 2007) - 보수단위비용(한국건설기술연구원, 2009)

는지)은 과거 보수 이력을 참조하여 결정하였다. 단위비용의 경우, 유지보수는 가장 일반적으로 시행 중인 “50mm 덧씌우기”로 정의하였다. 재포장의 경우 “안정 기층 50mm (ESAL>2000인 경우 70mm) 보수 + 50mm 재포장” 기준이 마련되어 있으나(한국건설기술연구원, 2003), 각 구간의 교통하중 수준을 확인한 결과 “안정 기층 70mm 보수” 기준을 필요로 하는 구간은 전체도로 중 14% 수준인 점을 참작하여 “안정 기층 50mm 보수”의 단위비용을 일괄적으로 적용하였다. 유지보수비용 분석에 적용된 옵션 및 필요한 항목들을 표 5에 요약하였다.

5.2 분석과정

결정론적 방법과 확률론적 예측과정의 분석과정은 전반적으로 크게 다르지 않으나, 기대수명을 결정하는 메커니즘에서 차이가 존재한다. 전반적 시뮬레이션 과정을 그림 5에 요약하였다.

결정론적 방법은 3장에서 도출된 각 그룹의 기대수명들을 설정된 대안에 맞추어 차례대로 발생시키며 분석기간에 다다를 때까지 누적시켜 나간다. 당연히, 시뮬레이션의 반복 없이 1회로 그 결과가 확정되기 되며, 그림 5에서 우측에 있는 샘플링과정이 필요하지 않게 된다. 결정론적인 방법에서의 기대수명은 식 (12)를 통해 결정된다.

$$\hat{L}(G_m) = \mu(G) \quad (12a)$$

$$\hat{L}(M_n) = \mu(M_n) \quad (12b)$$

그림 5. 분석의 흐름(확률론적 방법론을 기준)

반면에, 확률론적 방법론에서는 각 분포의 특성치, 즉 평균 μ 와 분산 σ^2 을 활용해 샘플링하는 방식으로 기대수명을 도출한다. 본 연구에서의 기대수명은 근사분포를 모두 정규분포로 가정했기 때문에 확률변수 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 에 따르는 것으로 정의된다(식 (13) 참조).

$$\hat{L}(G_m) \sim N(\mu(G_m), \sigma^2(G_m)) \quad (13a)$$

$$\hat{L}(M_n) \sim N(\mu(M_n), \sigma^2(M_n)) \quad (13b)$$

식 (13)과 같이 특정한 분포에서 “가능값”을 무작위하게 샘플링하는 과정을 몬테카를로기법이라 한다. 도출된 샘플은 하나의 점에 불과하지만, 이 샘플들을 모아 히스토그램을 작성하면 결국 분포의 확률밀도 함수와 같은 분포형태를 갖게 된다. 여기서 정규분포를 따르는 샘플들은 균일분포(Uniform distribution)에서 추출된 두 난수 $U_1, U_2 \sim U(0, 1)$ 를 박스몰러 알고리즘(Box-Muller algorithm; B-M) 혹은 폴라추출법(polar method)을 활용하여 추출할 수 있다. 두 방법은 모두 정규분포에서 도출된 변수의 선형화가 가능하다는 점, 즉, $X \sim N(\mu, \sigma^2) \rightarrow Y = \mu + \sigma X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 를 활용한 방법이다.

B-M 알고리즘(Box and Muller, 1958)은 균일분포에서 추출된 두 난수 U_1, U_2 를 활용하여, 독립인 두 표준변수 X_1, X_2 를 식 (14)와 식 (15)를 통해 계산한다.

$$X_1 = \sqrt{-2\ln U_1} \times \cos(2\pi U_2) \quad (14)$$

$$X_2 = \sqrt{-2\ln U_1} \times \sin(2\pi U_2) \quad (15)$$

다음으로 여기서 도출된 X_1, X_2 와 데이터의 평균과 표준편차 선형식에 대입하여 계산한다. ‘cos’와 ‘sin’의 계산이 불편하다면, 폴라예측법을 활용하는 것이 편리하다(Bell, 1968; Knopp, 1969). 폴라예측법의 과정을 정리하면 다음과 같다.

1) $U_1, U_2 \sim U(0, 1)$ 의 샘플링

$$2) St \sim \begin{cases} V_1 = 2U_1 - 1 \\ V_2 = 2U_2 - 1 \\ St = V_1^2 + V_2^2 \end{cases}$$

3) $St > 1$ 면 단계 1)로 돌아감. 그렇지 않으면 단계 4)로,

$$4) X_1 = \sqrt{\frac{-2\ln St}{St}} \times V_1, X_2 = \sqrt{\frac{-2\ln St}{St}} \times V_2 \text{의 계산}$$

5) X_1, X_2 를 각각 $Y = \mu + \sigma X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 에 대입

상기 방법을 활용하여 보수 대안에서 정의된 순서에 따라 그에 해당하는 분포에서 난수들을 발생, 누적시키면서 기대수명을 연장해 나간다. 시뮬레이션의 정지는 누적수명 $\sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}(G_m, M_n)$ 가 분석기간 P 를 만족(경과)시킬 때까지 지속한다. 샘플링된 $\hat{L}(G_m), \hat{L}(M_n)$ 은 그에 해당하는 유지보수비용을 발생시키게 되는데, 이를 현재 가치로 계산하기 위해 할인율을 적용한다. 여기서, 누적수명은 보통 소수로 나타나는데, 유지보수는 해당 다음연도에 실행한다고 가정하여 보수년도는 정수로 나타내기로 한다(예: 25.8 = 26년). 즉, 할인율을 적용하는 경과 연도 $p(p = 1, \dots, P)$ 도 정수로 적용하게 된다.

이렇게 수명을 연장하며 P 까지 진행하면 항상 마지막 연

도에 잔존비용(salvage cost)이 발생한다. 여기서 잔존비용은 분석기간종료 전 마지막 유지보수의 미사용기간에 대한 반환비용으로 정의할 수 있다. 물론 장기간에 걸쳐 비용의 할인을 지속시키면 무시할 수준까지 규모가 작아지기 마련이나, 분석의 특성상, 특히 결정론적 방법에서는 많은 구간이 분석기간의 후반부에 일률적으로 유지보수를 시행할 가능성이 존재하는 만큼 분석의 신뢰성을 높이기 위해 이를 분석에 포함하기로 한다. 잔존비용의 계산은 식(16)과 같다.

$$C(R) = \left[\frac{C(G_{m-1}^p, M_{n-1}^p)}{(1+r)^p} \right] \left[\frac{\sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}(G_m, M_n) - P}{\hat{L}(G_{m-1}, M_{n-1})} \right] \sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}(G_m, M_n) \geq P \quad (16)$$

여기서,

$C(R)$: 분석종료 전 마지막 유지보수의 잔존비용

G_{m-1}^p, M_{n-1}^p : 분석기간 종료 전 p 년도에 실행된 마지막 유지보수

P : 분석기간($p = 1, \dots, P$), ($P = 40$)

r : 할인율 ($=0.055$)

식 (16)에서 우변의 첫 번째 항인 $[C(G_{m-1}^p, M_{n-1}^p)/(1+r)^p]$ 은 분석기간이 끝나기 전 마지막에 수행된 유지보수비용에 할인율을 고려한 비용이며, 두 번째 항은 분석기간의 종료로 인해 유지보수의 기대수명 중에서 사용되지 않은 비율을 나타낸다. 따라서 분석 대안 i ($i = 1, \dots, j$)별 유지보수비용 $C_i(AC)$ 는 유지보수 비용에서 잔존가치를 제외한 값으로 정의되며, 이는 식 (17)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} C_i(AC) &= \sum_{s=1}^S C_i^s(G_m, M_n) - C_i^s(R) \\ &= \sum_{s=1}^S \sum_{G_m=1}^{\infty} \sum_{M_n=1}^{\infty} \left[\frac{C_s(G_m^p, M_n^p)}{(1+r)^p} \sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}_s(G_m, M_n) \geq P \right] \\ &\quad - \left[\frac{C_s(G_{m-1}^p, M_{n-1}^p)}{(1+r)^p} \right] \\ &\quad \left[\frac{\sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}(G_m, M_n) - P}{\hat{L}(G_{m-1}, M_{n-1})} \right] \sum_{m,n=1}^{\infty} \hat{L}_s(G_m, M_n) \geq P \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,

$C_i(AC)$ = 분석대안 i 의 (잔존가치가 제외된) 유지보수비용

식 (17)을 통해 도출된 총 유지보수비용은 대안 간의 우위를 비교하는 데 간단히 활용 가능하지만, 장기적인 할인율의 고려 때문에 수치 자체만으로 그 의미가 쉽게 유추·해석되기 어렵다. 이에 본 연구에서는 유지보수비용을 연평균 동등가치로 표현하는 EUAC(Equivalent Uniformed Annual Cost)지표를 도입하였다(Blank and Tarquin, 2002). 이는 분석기간 P 동안 유지보수 대안 i 를 수행하는 데 필요한 연평균 예산으로, 식 (18)을 통해 간단히 계산할 수 있다.

$$EUAC(C_i) = C_i(AC) \frac{r(1+r)^P}{(1+r)^P - 1} \quad (18)$$

여기서,

$EUAC(C_i)$: 유지보수 대안 i 의 연평균 유지보수비용

5.3 분석결과

본 절에서는 결정론적 방법과 확률론적 방법을 이용하여 산출된 대안별 유지보수비용을 비교해보기로 한다. 대안 간 비교는 연간 평균관리자비용(EUAC)을 주요 기준으로 하며, 먼저 결정론적 방법을 통해 도출된 결과를 표 6과 그림 6에 요약하였다.

표 6, 그림 6과 같이 GM2 즉, “2회 유지보수 후에 3회 차에 재포장을 시행하는 대안”이 가장 경제적인 것으로 나타났다. 한편, 계속 재포장을 하는 유지보수 대안 G가 가장 많은 유지보수비용을 필요한 것으로 나타났으며, 매년 유지보수만 시행하는 대안도 상대적으로 비경제적인 대안임을 알 수 있었다. 한편, 잔존가치는 총유지보수 비용대비 4~7% 수준으로, 대안 간 잔존비용 간의 차이가 대안간 우위를 바꿀만한 수준은 아니었다.

확률론적 방법에서는 각 분석 대안별로 1,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 결과를 도출하였다. 대안별 EUAC의 예측 흐름과 확률밀도함수를 그림 7, 그림 8에 나타내었다.

그림 7은 각 시뮬레이션별 예측결과를 사슬형태로 이어놓은 것으로, 예측경향을 파악하는 데 일반적으로 참조되는 그 래프이다. 예측된 하나하나의 값은 독립이며 이전 단계에 영향을 받지 않는다. 여기서 각 유지보수 대안별 연쇄사슬의 상하 진동 폭은 필요예산의 불확실성에 기인하며, 연쇄 사슬의 상하위치에 따라 대안의 우세가 시각적으로도 확인할 수 있다.

그림 8에서는 대안별 유지관리비용의 확률밀도가 비교되고

표 6. 결정론적 방법을 통한 유지보수비용분석결과

(단위: 백만 원)

보수대안	총관리자 비용	EUAC	총 유지 보수횟수	잔존가치
G	144,954	9,034	1,696	7.18%
GM1	138,762	8,648	1,992	6.84%
GM2	135,739	8,459	2,120	5.33%
GM3	136,501	8,507	2,203	4.14%
GM4	140,637	8,765	2,840	4.69%

그림 6. 유지보수 전략별 관리비용(EUAC)의 예측

그림 7. 몬테카를로 기법을 활용한 연평균 필요예산의 예측흐름도

그림 8. 대안별 연평균 필요예산의 확률밀도비교

있다. 그림 8에서도 역시 그래프의 좌우 위치에 따라 시각적으로 대안 간 우세를 판단할 수 있다. 참고로, 각 확률밀도 그래프들은 (대안 G를 제외하고) 하나의 분포가 아닌, 특성이 다른 여러 개의 분포에서 복합적으로 추출된 샘플들을 기반으로 도출된 결과이다. 그림 8에서 각 대안별 확률밀도형태가 정규분포와 유사한점을 감안, 정규분포의 3 시그마규칙(three-sigma rule: 68-95-99.7)에 대입하여 필요예산의 신뢰구간을 살펴보기로 한다(표 7 참조).

표 7의 기대비용을 참조하면, 결정론적 분석결과와 같이 GM2 대안이 가장 경제적, 대안 G가 가장 비경제적인 대안으로 예측되었고, 대안의 순위도 모두 같게 분석되었다. 이는 두 분석에서 같은 분포를 사용한 만큼 예측 가능한 결과이다.

본 논문에서 적용된 유지보수기준 및 옵션들이 실제 대전청의 유지보수과정을 정확히 묘사했다고는 보기 어려우나, 거시적인 관점에서 실제 예산과 비교해 보기로 한다. 먼저 대전지방국토관리청의 도로관리자가 “GM2” 대안을 따른다고 할 때, 장기적 연평균 소요예산의 기대치는 약 88억 원

수준이며, 표준편차 1σ 범위에서 87.1억 원~89.5억 원 수준임을 알 수 있다(표 7 참조). 이 예산수준은 대전청의 최근 5년간(2006~2011)의 평균 유지보수 비용인 87억 원과 유사한 수준이며 표준편차범위 내에 있다. 그러나 대전청의 각 연도별 실제 예산수준은 그 편차가 매우 커서 신뢰구간을 벗어나는 예산도 존재하였다. 이는 본 논문에서 고려하지 못한 다른 요인이 현실적 예산편성에 반영되고 있다고 간접적으로 해석된다. 마지막으로, 결정론적 방법과 비교하여 잔존 가치가 약간 작게 산정된 점과 유지보수 비용이 상대적으로 과대 추정된 점은, 확률적 추정과정에서 나타난 보다 현실적인 결과라 할 수 있다.

본 논문에서는 몬테카를로기법을 기대수명에 한하여 활용하였으나, 분포의 특성이 확보 가능한 모든 변수에 적용이 가능하므로 불확실한 요소가 복합적으로 관계하는 포장관리 분야에 그 활용성이 매우 높다고 할 수 있으며, 이러한 정보들은 도로관리자는 물론 예산결정자에게도 활용성이 높은 가치 있는 정보가 될 것으로 기대된다.

6. 결 론

본 연구에서는 반복적인 유지보수로 인한 포장 기대수명의 변화를 살펴보고, 그에 상응하는 유지보수 전략을 도출하여 도로관리자의 의사결정을 돕고자 하였다. 분석을 위해 1986년부터 장기간 누적된 국도 구간의 유지보수 이력데이터를 활용하였으며, 신설/재포장, 1회차, 2회차, 3회차 유지보수로 구분하여 기대수명의 변화과정을 분석 후, 이 결과를 활용하여 다양한 유지보수 대안의 소요예산을 기준으로 우위를 비교하였다. 본 연구에서 도출된 연구성과를 요약하면 다음과 같다.

먼저, 유지보수 방법 및 반복에 따라 기대수명의 확률구조가 변화함을 확인하였다. 신설/재포장을 기준으로 유지보수 횟수가 증가함에 따라 확률분포의 분산이 작아짐과 동시에 기대수명이 감소하는 추세를 보였다. 여기서, 각 그룹 기대수명의 확률분포는 모두 정규분포에 근사하였으며, 기대수명의 기대치는 각각 신설/재포장이 9.97년, 1회차 보수 6.28년, 2회차 보수 6.37년, 3회차 보수는 5.40년으로 기존 연구성과들과 유사하였다. 한편, 신설포장/재포장 그룹과 유지보수 그룹들 간 기대수명의 차이는 뚜렷하였으나, 유지보수그룹들 간의 차이는 확인하지 않았다. 다만, 3회차 보수부터는 그 수명이 조금씩 짧아지기 시작함을 알 수 있었다.

신뢰성 이론을 활용하여 백분위 수 기대수명을 분석해 본

표 7. 확률론적 방법을 통한 유지보수비용 분석결과 (단위: 백 만원)

대안	기대비용(EUAC)			연평균 관리자비용(EUAC)의 신뢰구간					
	평균	표준편차	잔존가치	$\mu-3\sigma$	$\mu-2\sigma$	$\mu-1\sigma$	$\mu+1\sigma$	$\mu+2\sigma$	$\mu+3\sigma$
G	9,512	126	5.15%	9,055	9,263	9,383	9,643	9,856	9,755
GM1	9,109	123	4.48%	8,682	8,861	8,986	9,233	9,475	9,348
GM2	8,832	120	4.18%	8,497	8,598	8,708	8,947	9,267	9,074
GM3	8,918	120	3.93%	8,572	8,680	8,798	9,045	9,254	9,160
GM4	9,117	114	2.97%	8,761	8,884	9,007	9,230	9,474	9,343

참고: $1\sigma = 68.26\%$, $2\sigma = 95.44\%$, $3\sigma = 99.73\%$

결과, 품질보증이나 서비스정책 입안에 많이 활용되고 있는 B_{10} 수명을 기준으로 한 품질 보증기준은 그룹별 기대수명의 약 50% 수준인 것으로 분석되었다. 또한, $R(t=5, 10)$ 의 결과를 통해 각 유지보수 그룹들은 5년까지는 대체로 양호한 생존율을 보여주지만, 10년까지 유지보수 없이 공용될 도로의 비율은 겨우 6.7~7.9% 수준임을 확인하였다. 이를 간접적으로 해석하면 대략 공용연수 5년 이후에는 집중적인 포장상태조사(monitring)가 필요함을 의미한다.

생애주기비용분석(유지보수비용분석)에서는 최적 재포장 주기를 분석하기 위해 5가지 유지보수 시나리오를 가정하여 확률론적/결정론적 시뮬레이션을 시행한 결과, “2회 유지보수, 3회차에 재포장 시행”하는 대안이 가장 경제적인 대안으로 분석되었다. 이는, 재포장의 주기가 22~23년임을 나타내며, 현재 범용적으로 사용 중인 “설계수명 20년”과 유사한 결과로 해석된다.

마지막으로, 대전지방국토관리청의 구간을 대상으로 적용성을 검증한 결과, 최적 유지보수 대안을 따르는 경우 연평균 소요예산의 기대치는 약 88억 원 수준이었으며, 표준편차 범위에서 87.1억 원~89.5억 원으로 나타났다. 이는 대전청의 최근 5년간의 평균 유지보수 비용과 거의 유사한 수준임을 확인하였다.

본 연구에서는 장기간 누적된 유지보수 이력데이터를 활용하여 다주기 유지보수 기대수명에 대한 분석을 시도하였으며, 결정적/확률적 생애주기비용분석을 통해 재포장과 관련된 유지보수 전략을 제시하였다. 향후 연구에서는 자료의 한계로 고려되지 못했던 다양한 보수공법 및 포장설계구조가 기대수명에 미치는 영향을 고찰할 필요가 있다. 나아가, 각 구간의 다양한 외부조건을 고려하여 이질적인 파손특성에 대한 접근도 향후 연구로써 큰 가치가 있을 것이다. 한편, 기대수명 외에도 포장관리분야에 존재하는 다양한 변수들을 동시에 확률적으로 접근하는 연구도 포장관리분야의 불확실성을 설명하는 데 중요한 연구라 하겠다. 마지막으로, 관리자 입장에서 보다 유용성이 뛰어난 단기(연도별)예산관리시스템과 중장기 예산계획수립에 핵심적 정보를 제공할 수 있는 관리회계정보시스템에 대한 연구도 시급하다.

참고문헌

건설교통부(현 : 국토해양부)(2007) **교통시설 투자평가지침**.
고승곤, 양완연(1998) **일반통계학**, 교우사.
김종걸, 최영진, 정승연(2000) 보증기간을 고려한 대수정규분포를 따르는 시장자료의 신뢰성 분석, **한국신뢰성학회 추계학술대회**, 한국신뢰성학회, pp. 299-311.
나춘수, 정병수(2010) AHP-기반으로 보증클레임의 위험등급 결정, **한국산학기술학회 논문집**, 한국산학기술학회, 제12권 제12호, pp. 5097-5106.
도명식(2010) 신뢰성 개념을 이용한 포장의 평균수명 및 신뢰도 예측, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권 제5호, pp. 497-504.
도명식, 권수안(2010) 신뢰성 개념을 이용한 적정 포장 수명분포 선정, **한국도로학회 논문집**, 한국도로학회, 제12권 제1호, pp. 61-69.
도명식, 한대석, 유인균, 이수형(2006) LCC를 고려한 내유동포장의 공용성 및 경제성 분석에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권 제5호, pp. 783-796.

도명식, 한대석, 이종달, 이영욱(2007) HDM을 활용한 국도 포장 유지보수 공법에 대한 경제성 평가, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3호, pp. 311-323.
배도선, 전영록(1999) **신뢰성 분석**, 아르케.
정해성(1997) 비모수적 근사를 이용한 수정된 정기검사정책의 결정, **품질경영학회지**, 품질경영학회, 제25권 제1호, pp. 173-181.
한국건설기술연구원(2009) **2008 도로포장관리시스템 최종보고서**, 한국건설기술연구원.
한국건설기술연구원(2003) **2002 도로포장관리시스템 최종보고서**, 한국건설기술연구원.
한대석, 도명식, 김성현, 김정환(2007) 이용자 및 사회환경비용을 고려한 포장유지 대안의 생애주기비용분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제6호, pp. 727-740.
Anderson, T. W. and Darling, D. A. (1952) Asymptotic theory of certain “goodness-of-fit” criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 23, No. 2, pp. 193-212.
Bell, J. R. (1968) Algorithm 334: normal random deviates, *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM)*, Vol. 11, No. 7, pp. 498-499.
Blank, L. and Tarquin, A. (2002) *Engineering Economy (5th eds.)*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
Box, G. E. P. and Muller, M. E. (1958) A note on the generation of random normal deviates, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 29, No. 2, pp. 610-611.
Do, M. and Kwon, S. (2009) Current status and perspectives of asset management in South Korea, *Proc. of International Workshop on Asset Management Implementation in Asian Countries*, Kuala-Lumpur, Malaysia.
Federal Highway Administration (FHWA) (1998) Life-cycle cost analysis in pavement design: In search of better investment decisions, *Technical Report of Federal Highway Administration*, Washington, D.C.
Fwa, T. F. (2006) *The handbook of highway engineering*, Taylor & Francis Group, LLC, London.
Goodman, A. S. and Hastak, M. (2006) Infrastructure planning handbook: planning, engineering, and economics, McGRAW-Hill with American Society of Civil Engineers (ASCE) press, Virginia.
Han, D. (2011) *Development of open-source hybrid pavement management system for an international standard*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Japan.
Han, D., Kaito, K. and Kobayashi, K. (2012a) Application of Bayesian estimation method with Markov hazard model to improve deterioration forecasts for infrastructure asset management, *KSCE J. of Civil Engineering*. (In review)
Han, D., Kobayashi, K., and Do, M. (2012b) Section-based multi-functional calibration method for pavement deterioration, *KSCE J. of Civil Engineering*. (In review)
Knopp, R. (1969) Remark on algorithm 334 [G5]: normal random deviates, *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM)*, Vol. 12, No. 5, pp. 275-281.
Kobayashi, K., Do, M., and Han, D. (2010a) Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting, *KSCE J. of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 341-351.
Kobayashi, K., Kaito, K., and Nam, L.T. (2010b) Deterioration forecasting model with multistage weibull hazard functions, *J. of Infrastructure Systems, ASCE*, Vol. 16, No. 4, pp. 282-291.
Kobayashi, K., Kaito, K., and Nam, L. T. (2012) A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model for infrastructure management, *Transportation Research: Part B*, (Accepted).
Madanat, S. and Ben-Akiva, M. (1994) Optimal inspection and

- repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 55-62.
- Nam, L. T. (2009) *Stochastic optimization methods for infrastructure management with incomplete monitoring data*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Japan.
- Nam, L. T., Thao, N. D., Kaito, K., and Kobayashi, K. (2009) A benchmarking approach pavement management: Lessons from Vietnam, *J. of Infrastructure Planning Review, JSCE.*, Vol. 27, No. 1, pp. 101-112.
- Permanent International Association of Road Congress (PIARC) (2000) *Highway development and management series: Vol. 1~7*, The World Road Association, 92055 La Defense, France.
- Stephens, M. A. (1974) EDF Statistics for goodness of fit and some comparisons. *J. of the American Statistical Association*, Vol. 69, No. 347, pp. 730-737.
- Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K., and Kobayashi, K. (2006) Estimating Markovian transition probabilities for bridge deterioration forecasting, *J. of Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE.*, Vol. 23, No. 2, pp. 241-256.
- U.S. Department Of Transportation (USDOT) (1999) *Asset Management Primer*, Publication No: FHWA-IF-00-010, Washington, D.C.
- Yang, J., Lu, J. J., Gunaratne, M., and Dietrich, B. (2006) Modeling crack deterioration of flexible pavements: Comparison of recurrent Markov chains and artificial neural networks, *J. of Transportation Research Board, ASCE.*, No. 1974, pp. 18-25.

(접수일: 2012.2.21/심사일: 2012.4.4/심사완료일: 2012.5.17)