



국도유지관리를 위한 포장관리시스템 개발에 관한 연구

Development of Pavement Management System for Highway Maintenance

이 영 욱* 도 명 식** 이 종 달***
 Lee, Young-Wook Do, Myung-Sik Lee, Jong-Dal

Abstract

In this paper, a PMS(Pavement Management System) is presented for the public agency who wish to execute rational repair by referring to asset management information regarding road pavement. The aim of the paper is to provide the decision makers with the planning information regarding maintenance strategies for efficient road pavement management. We found that life cycle cost can be minimized and repair cost in each year fluctuates when repeating repair at the IRI management level. The validity of PMS application presented in this paper is investigated through case studies for conducted for 22 national highway road sections in Korea.

Keywords : *pavement management system, maintenance method, performance estimation, life cycle cost analysis*

요 지

본 연구에서는 효율적인 포장관리를 위해 경제성을 고려하여 생애주기비용(LCC)이 최소가 되는 시점에서 필요한 유지보수공법을 적용할 수 있는 포장관리시스템(PMS)을 개발하여 실제 포장관련 자료를 기반으로 한 유지관리방안을 제시하였다. 나아가 예산제약이 없는 경우를 대상으로 일정한 수준의 도로 서비스수준을 유지하기 위해 필요한 예산은 매년 차이가 있음도 확인하였다. Visual Basic 프로그램으로 개발하여 시스템의 응용성과 실효성의 검증을 위해 22개의 국도포장단면을 대상으로 현장조사를 시행하여 얻은 자료를 바탕으로 포장단면의 장기공용성 추정과 예산범위를 고려한 효율적인 유지관리방안을 제시하였다.

핵심용어 : *포장관리시스템(PMS), 보수공법, 공용성, 생애주기비용분석(LCCA)*

* 정회원 · 대구과학대학 측지정보과 교수
 ** 정회원 · 한밭대학교 토목환경도시공학부 교수
 *** 정회원 · 영남대학교 토목환경공학부 교수, 교신저자



1. 서론

최근 인구의 감소, 환경에 대한 관심의 증가와 경제환경의 불확실성 등으로 인해 새로운 대규모 사회간접시설을 건설하기에는 많은 어려움이 따르고 있으며, 이미 건설되어 운영중인 많은 사회기반시설들이 노령화되어 그 기능을 유지시키기 위하여 유지관리 및 시설물의 갱신 등이 필요하게 되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이미 미국, 유럽 및 일본 등의 선진국을 중심으로 생애주기비용(Life Cycle Cost)을 고려한 투자계획과 이에 따른 의사결정 로직과 비용편익분석(Cost Benefit Analysis)을 이용하여 프로젝트의 실시에 따른 사회전체의 편익과 비용을 비교하여 사회간접자본의 건설 및 유지비용의 판단기준으로 이용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다(Lemer, 2004). 한편 우리나라에서도 국도 및 고속국도에서 이미 운영중인 포장구간을 대상으로 효율적인 관리를 위해 PMS(Pavement Management System)를 도입하여 운영중에 있다(한국건설기술연구원, 2005).

일반적으로 건설공사는 공사의 기획, 설계, 조달, 시공, 유지관리(운영), 해체 및 폐기로 이어지는 생애주기(Life Cycle)를 가지게 되며 각 단계별로 비용이 발생하게 된다. 이 때 생애주기동안 발생하는 비용의 합을 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)이라 하며, 생애주기비용분석(Life Cycle Cost Analysis, LCCA)은 이러한 총비용을 산정하는 방법과 순서를 의미하는 것이다. 미국 연방도로청(FHWA, Federal Highway Administration)에서 발간한 잠정 기술지침서에서는 “프로젝트 대상이 갖고 있는 전체수명 동안의 초기비용과 유지보수, 재시공 등을 포함하는 모든 비용을 할인률을 감안하여 분석함으로써 경제적 가치를 평가하는 과정”이라고 정의하고 있다(최민수 외, 1999).

본 연구에서는 비주얼 베이직 프로그램을 이용하여 개발한 도로포장관리시스템 S/W를 이용하여 국도의 포장단면을 대상으로 현장조사를 시행하여 얻은 자료

를 바탕으로 포장단면의 장기공용성 추정과 유지관리 방안을 마련하기 위한 방안을 제시 하고자 한다.

2. 도로포장관리시스템(PMS) 현황

포장관리시스템(PMS)은 포장에 관련되는 계획, 설계, 건설, 유지, 보수, 평가, 자원, 편익, 연구 등 많은 복잡한 프로젝트를 종합적이고 체계적으로 이용하여 공용기간중의 도로를 관리하는 것으로, 최적의 포장의 질을 최저의 비용을 통해 유지하는데 목적이 있다(Hudson et al., 1997; 도명식 외, 2006).

세계 각국에서는 포장의 유지관리에 대해 많은 관심을 가지고 연구 및 운영중에 있다. 주요 연구내용은 포장의 공용성과 경제성, 생애주기비용, 유지보수 시점 및 공법, 포장설계 등으로 다양하고도 방대한 영역에 대한 연구가 시행중이다.

유지보수에 대한 개념은 단순히 포장에 국한되는 것이 아닌 사회기반시설의 전반적인 도입에 대해서 연구되고 있다. 이러한 개념은 생애주기비용에 근거하고 있기 때문에 초기건설비용부터 유지비용 및 폐기비용까지 다양한 요소들에 대한 신뢰성 있는 분석이 요구된다(Hudson et al., 1997; 이의섭 외, 2000; 최준성, 2006).

최근 유지보수에 대한 연구는 소규모 유지보수를 통한 예방적(사전적) 유지보수(PM, Preservation Maintenance)에 집중되고 있다. 예방적 유지보수란 도로파손의 진행이 가속화되기 이전시점을 고려하여 도로상태에 상응하는 공법을 적용하는 방법론으로 도로관리자 비용을 줄이기 위한 주요 대안으로 연구되고 있다. 예방적 유지보수는 대단위 유지보수가 필요하기 이전에 유지보수를 시행하여 생애주기비용을 최소화하는 시스템이라 할 수 있다. 그러나 이를 통해 이용자 만족도(주행성 등)의 증가, 낮은 관리자 비용, 포장상태증가 등을 기대할지라도 정책의 도입까지는 많은 장애물이 있으며, 이 중 가장 큰 문제가 바로 비용-효율적(cost-effective)인 시스템



이라는 것을 증명하는데 객관적인 근거가 부족하다는 것이다. 따라서 비용-효율적인 유지보수방안을 마련하기 위한 최적유지보수 시점 및 재정적인 문제 해결에 대한 노력도 함께 이루어져야 할 것이다 (Peshkin et al., 2004).

대부분의 국가나 지자체에서는 반응적 유지보수(reactive maintenance) 즉, worst first개념을 통해 시공하고 있어 초기에 적은 비용으로 유지가 가능한 도로를 재포장하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 또한 단순히 유지관리비용 측면뿐만 아니라 도로공사로 인한 지체, 교통사고, 환경문제 등 다양한 손해가 발생할 가능성이 상대적으로 크며 이러한 공사 등의 영향을 고려한 연구는 아직 초보적인 수준에 머물고 있는 실정이다.

한편, 초기포장과 보수활동에 따른 공용성의 추정은 LCCA에 큰 영향을 미친다. 이는 도로시설물에 대한 관리자의 보수빈도에 영향을 미치고 다시 관리자비용과 이용자비용에 영향을 미친다. 따라서 LCCA 분석을 위해서는 각 설계대안에 따른 공용성의 수명을 결정하고 그에 따르는 유지보수활동 시기를 결정해야한다. 이러한 결정은 기존의 포장에 대한 장기관찰자료를 토대로 작성하는 것이 가장 바람직한데 미국의 경우 FHWA의 주도하에 장기공용성자료를 분석함으로써 해답을 찾고자 노력중이다.

위와 같이 경제성분석 사례를 살펴본 결과, 도로 및 교통사업의 경제성분석에 대해 국가적인 차원의 연구가 수행되고 기준이 마련되고 있는 외국에 비해, 국내에는 평가지표 및 항목에 대한 국가적인 기준이나 체계가 정립되어있지 않았음을 알 수 있다. 따라서 산재되어 있는 기준들을 통합하고 일괄적으로 적용될 수 있는 판단기준의 정립에 대한 연구가 시급하다 하겠다.

한편, 우리나라의 PMS 구축 및 운영을 살펴보면, 건설교통부에서 1980년대 후반부터 국도유지예산의 효율적인 활용과 포장의 적절한 상태유지를 위해 국도포장관리시스템을 구축하여 운영중에 있다.

현재 수행되고 있는 도로포장관리시스템은 매년

약 3,000km의 일반국도에 대해 조사대상구간을 선정하여 자동노면조사장비(ARAN)를 이용하여 포장상태자료(중단평탄성, 소성변형, 균열)를 수집하고 교통량 및 보수이력 등을 고려한 동질성구간에 대해 포장상태등급을 결정하여 유지보수를 위한 기초자료로 활용하고 있다(한국건설기술연구원, 2005).

3. 대상구간 선정 및 공용성 평가방법

3.1 대상구간 선정

포장의 공용성 예측을 위해 필요한 포장상태자료는 크게 유지보수 전년도, 유지보수 직전, 유지보수

표 1. 대상구간 관련 자료

구간	공용년수		구간 평균 AADT		누적MESAL/ELANE (million/lane)		구간연장 (km)
	일반	특수	일반	특수	일반	특수	
T1-55	4	1	5,500	5,880	0.95	0.28	5.8
T1-53	2	2	12,379	14,948	1.06	1.26	10.2
T1-50	4	2	14,550	14,881	1.40	0.60	3.4
T1-48	3	3	4,559	4,965	2.56	3.00	3.0
T1-13	6	6	3,091	2,468	1.06	0.75	4.2
T1-10	2	5	6,908	6,384	0.46	1.11	5.8
T2-21	3	1	16,290	9,709	1.48	0.42	3.6
T2-18	2	2	17,302	18,327	1.80	1.84	4.0
T2-12	3	2	16,228	20,209	0.87	0.52	8.6
T2-10	6	4	12,757	17,065	3.29	2.12	6.8
T3-49	4	2	8,976	10,654	0.75	0.40	6.0
T3-41	10	2	14,819	17,793	2.14	0.38	4.3
T3-39	4	3	12,610	15,548	0.65	0.85	4.2
T3-35	6	3	4,685	4,108	1.93	0.59	4.0
T3-26	3	4	27,379	27,820	0.71	0.65	1.1
T3-2	2	6	9,879	10,591	0.82	0.38	6.8
T4-18	4	2	2,894	2,726	0.61	0.50	2.1
T4-15	4	3	3,364	2,842	0.62	0.28	1.8
T4-11	4	4	1,979	1,540	0.24	0.15	6.8
T4-9	6	4	5,135	4,964	0.86	0.65	2.9
T4-6	3	4	3,293	3,044	0.45	0.60	3.2
T4-2m	3	5	6,102	9,171	0.73	2.40	4.2



직후로 나눌 수 있으며, 포장의 공용성 평가를 위한 대상구간의 선정을 위해 크게 4가지 요소(교통량, 중차량, 도로의 기하구조, 공용기간)를 고려하여 본 연구에서는 총 22개 구간을 대상으로 도로포장상태를 조사하였으며, 자세한 대상구간의 도로 및 교통관련 자료는 표 1과 같다.

포장공법별로는 특수포장 22개 자료(SMA 6개구간, CRM 4개구간, PMA 6개구간, PBS 6개구간), 일반포장 22개 자료를 대상으로 종단평탄성(IRI m/km)을 현장에서 조사하였으며, 기 발표된 논문과 동일한 자료를 이용하였음을 밝히며, 일반포장과 특수포장의 구간연장은 동일하다(도명식 외, 2007).

3.2 공용성 평가

도로포장의 공용성을 나타내는 지수는 다양하다. 보통 포장의 상태 및 파손지표로 쓰이는 것은 균열(Crack, %), 소성변형(rutting, mm), 라벨링(ravelling, %), 가장자리파손(edge break, m²), 포트홀(pothole, 개), 종단평탄성(IRI, International Roughness Index, m/km)으로 이중 종단평탄성은 포장의 종합지표로도 많이 쓰인다(Aggarwal et al., 2004).

포장의 장기공용성을 평가하기 위해 현장포장의 상태자료를 바탕으로 악화과정을 예측하여야 한다. 초기포장과 보수활동에 따른 공용성의 추정은 LCCA에 큰 영향을 미친다. 이는 도로시설물에 대한 관리자의 보수빈도에 영향을 미치고 다시 관리자 비용과 이용자비용에 영향을 미친다. 따라서 LCCA 분

석을 위해서는 각 설계대안에 따른 공용성의 수명을 결정하고 그에 따르는 유지보수활동시기를 결정해야 한다. 이러한 결정은 기존의 포장에 대한 장기관찰 자료를 토대로 작성하는 것이 가장 바람직하다. 현장 자료를 이용하여 공용성 추세분석에 필요한 각 시점별 포장상태의 자료에 대해 크게 유지보수 전년도 유지보수 직전, 유지보수 직후로 나뉘게 된다.

본 연구에서 포장파손추정과정은 확률과정을 따른다고 가정하여 현시점의 포장수준지표(IRI)를 초기값으로 하여 기대치 Path방법을 이용하여 파손추정을 하였다.

기대치 Path방법이란 장애의 파손수준을 정확하게 예측하기는 거의 불가능하므로 여러 포장파손 프로세스의 경로의 기댓값을 취하는 형태로 시간경과와 함께 기능수준이 감소하는 것을 직선의 형태로 표현한 것을 말한다(Kobayashi et al., 2007).

도로의 공용성을 나타내는 지표는 국가나 지역별로 다양하다. 특히 미국을 중심으로 한 지역의 PSI(Present Serviceability Index)와 세계은행에서 개발한 HDM-4에서 주로 이용하고 있는 IRI(International Roughness Index), 일본에서 주로 사용하는 MCI(Maintenance Control Index) 지표 등이 있다.

IRI는 포장의 평탄성에 대한 지표로 도로의 주행감과 밀접한 관계가 있다. 평탄성은 노면성상에 따라 주행의 안전과 쾌적성, 운행비용 등에서 상당한 영향을 미친다. 평탄성의 기준은 세계적으로 공통된 기법을 정립하기 위하여 1982년 세계은행의 후원으로 미국을 포함한 서방 5개국이 참여하여 국제평탄성지수(IRI)란 국제기준을 설정하여 노면의 평탄성을 평가하였다.

IRI는 자동차나 트레일러에 장착된 로드 미터(road meter)에 의해 측정된 값과 관련 있는 표준 평탄성 측정값으로 균열이나 소성변형처럼 육안조사 혹은 간단한 장비로 조사가 불가능하며, 차량에 ARAN이란 장비를 장착한 후 실제 대상구간에 주행하여 공용지표값을 산출한다.

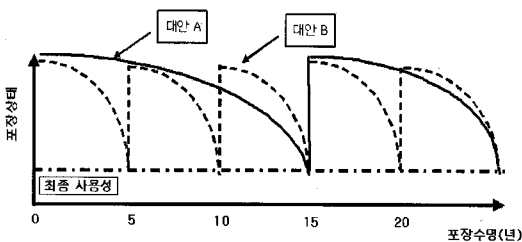


그림 1. 설계 대안에 따른 공용성의 변화



PSI지표는 미국 일리노이주 오타와 근교에서 1950년대 중반에 실시한 AASHO 도로시험에서 포장표면상태를 평가하는 지표로서 개발한 기법이다. 포장 표면에 외형상 나타나는 여러 파손이 차량이용자에게 어떠한 영향을 미치는가를 수식화하여 나타낸 것이다. 포장노후정도에 따라 포장(도로면)의 공용기능 정도를 평가할 수 있는 지표를 설정하여 그 값에 따라 포장표면의 우열상태를 평가하였다.

아스팔트 콘크리트 포장

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + \overline{sv}) - 0.01 \sqrt{(c + p)} - 0.21 \overline{RD}^2 \quad (1)$$

시멘트 콘크리트 포장

$$PSI = 5.41 - 1.8 \log(1 + \overline{sv}) - 0.05 \sqrt{(c + 3.3p)} \quad (2)$$

여기서,

PSI : 서비스지수(공용지수)

c : 포장의 균열(콘크리트 포장 $m/1000m^2$, 아스팔트 포장 m^2/m^3)

p : 패칭 면적($m^2/1000m^2$)

RD : 바퀴자국(cm) 소성변형깊이

\overline{sv} : 도로 요철의 분산 평균

시험도로 개통시에는 물론 균열도 없고, 처짐도 없고, 팻칭도 없으나, 평탄성에 대한 요철의 평균분산은 어느 정도 나타난다. 따라서 초기에는 식 (1)과 (2)에 따라 거의 5.0에 가까운 값을 얻을 수가 있다. 즉 PSI값이 5.0에 가까울수록 노면상태는 좋다. 그러나 공용개시 이후 시일이 경과함에 따라 그 값은 5.0 이하 값으로 낮아진다.

어느 일정기간이 지나면 이력곡선의 변곡점에서 급격하게 저하된다. 특히 콘크리트포장에서는 심하게 나타나고 있다. 이러한 한계값 즉 $PSI=2.5$ 또는 2.0 을 기준으로 포장노면의 성능을 개선 할 필요가 있다. 도로의 기능등급에 따라 다르게 적용하고 있다 (남영국, 2004).

PSI와 IRI의 관계는 미국의 여러 주와 브라질, 남아프리카 공화국 등지에서 그 상관식을 적용한 바가 있고, 두 관계의 상관성에 대한 연구결과에 따른 식이 여러 식 있으나 본 연구에서는 현장에서 측정된 종단평탄성(IRI)를 이용하여 PSI치를 추정하는 Paterson이 제안한 관계식을 채택하였다 (Paterson, 1987; 남영국, 2004).

$$PSI = 5.0e^{-(0.18IRI)} \quad (3)$$

4. 도로포장 관리시스템의 개발

4.1 포장관리시스템의 구성

본 연구에서 구축한 도로포장 유지관리 시스템은 그림 2와 같이 크게 데이터 입력 및 관리를 하는 데이터관리시스템, 포장파손예측과정과 최적관리수준을 계산하는 Simulation 시스템, 그리고 분석된 결과를 그래프로 표현하는 출력시스템으로 구성되어져 있다.

Data의 입력 및 관리하는 데이터 관리시스템은 도로망 전반에 관한 조사자료를 통합·관리하는 구간 Data부분과 이용자비용이라고 할 수 있는 차량군에

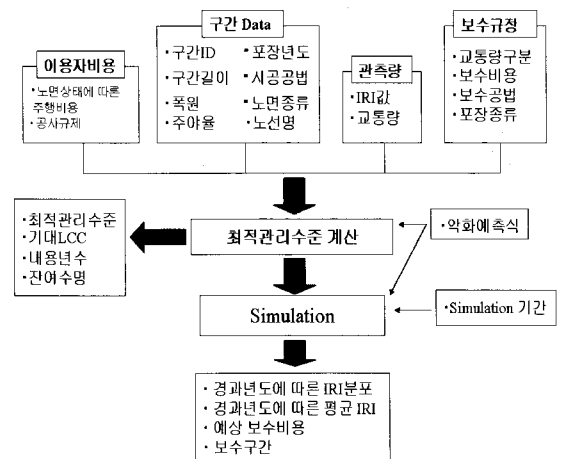


그림 2. 도로포장관리시스템의 구성



대한 노면상태에 따른 차량주행비용 및 공사규제에 대한 이용자비용, 관리자비용이라고 할 수 있는 보수 공법의 세부기준에 대한 보수규정 시스템으로 구성 되어 있다.

보수공법판정 시스템은 각각의 교통량(L, A, B, C, D)과 보수공법(덧씌우기, 절삭 덧씌우기, 재포장)에 따라 보수단가를 산정하였다. 한편 L은 대형차교통량(대/일/방향)이 100미만이며, A, B, C, D는 각각 100~250, 250~1000, 1000~3000, 3000이상에 해당하도록 대형자동차의 크기별로 분리하였다.

우선 IRI값에 따라 보수를 해야 하는 임계값을 설정하였다. IRI값이 4(IRI이면 재포장을, 3.5(IRI/4이면 절삭 덧씌우기, 3(IRI/3.5 값을 가지는 구간에 대해서는 덧씌우기 보수공법을 적용하도록 하였다 (도명식 외, 2007).

한편, 보수공법에 따른 보수단가는 한국건설기술연구원(2005)의 자료에는 절삭 덧씌우기에 대한 보수단가만 명기되어 있으며, 공법별 단가가 문헌별로 차이가 있어 본 연구에서는 절삭 덧씌우기의 보수단가를 기준으로 기존 연구사례를 근거로 산정하였다 (Kobayashi et. al., 2007).

세 번째는 최적관리수준을 계산하는 부분으로 파손 프로세싱을 추정하는 파손추정시스템과 도로포장의 장기공용성을 추정하는 시스템으로 구성되어 있다. 파손수준의 예측치를 근거로 유지보수구간의 우선순위를 결정하는 의사결정 시스템은 공용성 및 경제성 평가에 근거한 의사결정을 지원하는 부분이다.

네 번째 출력부분에서는 경제성 평가에 따른 포장 유지관리비용에 대한 매년 추정예산을 그래프로 나타내 주는 부분이다.

본 연구에서 개발된 도로포장관리시스템에 이용될 경제성 분석지표로는 편익비용비(B/C)를 도입하였으며, 관리자비용이라 하면 유지보수비용으로 국한되며, 이용자비용은 차량유지비용과 통행시간비용의 합으로 산정하였다.

$$B/C = \frac{\tilde{J}(z) - J(Z; z^*)}{F(z)} \quad (4)$$

$$\tilde{J}(z) = c(z)V + \frac{F(z(t+1))}{1+a} + \frac{J(Z; z^*)}{1+a} \quad (5)$$

$$J(Z; z^*) = \sum_{i=0}^{\hat{\theta}(z^*, z)} \frac{c(z(t)V}{(1+a)^t} + \frac{F(z^*)}{(1+a)^{\hat{\theta}(z^*, z)}} + \frac{J(Z; z^*)}{(1+a)^{\hat{\theta}(z^*, z)}} \quad (6)$$

여기서,

$c(z)$: IRI = $z(t)$ 일 때의 이용자비용

$z(t)$: t 년의 관측 IRI값

$F(z^*)$: IRI 관리수준 (z^*)에서의 유지보수비용

$\hat{\theta}(z^*, z)$: IRI값이 z 에서 z^* 까지 경과년수

V : AADT

어느 도로구간의 유지보수의 시행유무에 따른 경제성(편익)을 해당시점에서 유지보수를 하지 않고 1년간 방치하고 다음년도에 수리를 하는 경우의 기대 LCC와 최적의 시점에서 유지보수를 한 경우 얻어지는 기대LCC(expected Life Cycle cost)의 차이로 정의하자.

여기서 기대LCC는 생애주기비용의 평균값이다. 1년간 방치한 경우의 기대LCC를 $J(z)$, 최적의 타이밍에 유지보수를 한 경우의 기대LCC를 $J(Z; z^*)$ 라 하면, 편익은 $\tilde{J}(z) - J(Z; z^*)$ 라 정의할 수 있다. 단, 여기서의 B/C의 비는 통상 경제성 분석에서 사용하는 비율이라기 보다는 유지보수비용대비 편익의 비가 큰 순서를 확인하기 위한 기준임을 밝힌다.

4.2 도로포장 관리시스템을 이용한 공용성 평가 및 경제성분석

본 연구에서는 22개의 포장단면의 자료를 기반으로 100m를 1개의 구간으로 나누어 총 2,038개 구간(연장 203.8km)의 포장 및 교통량 관련자료의 DB를 구축하였다.

그리고 서로 다른 시점에서 구한 데이터를 기반으로



로 장래의 포장의 상태를 추정하기 위해 IRI지표를 이용하여 포장파손 추정식을 추정하였다.

현장조사를 통해 얻어진 IRI자료와 일반포장과 특수포장의 IRI값을 이용하여 시간의 경과에 따른 장기파손예측을 위해 선형회귀분석법을 이용하였다. 일반포장과 특수포장의 공용년수별 IRI값(y)의 선형회귀식을 구한 결과는 아래와 같다.

$$y = 0.0914x + 2.775 \quad (\text{일반포장}) \quad (7)$$

$$y = 0.0841x + 2.8966 \quad (\text{특수포장}) \quad (8)$$

여기서, x: 년수

한편, 식(7)과 (8)의 의미를 살펴보기 위해 기존 연구결과들과 비교해보기로 한다. 먼저 R²의 값이 약 0.4로 기존의 연구결과와 큰 차이가 없는 것으로 판단된다(권수안 외, 2002).

또한 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 HDM-3에서 제시하고 있는 덧씌우기 두께별 유지보수의 효과는 두께가 두꺼울수록 유지보수의 효과가 좋은 것으로 나타났으며, 유지보수후의 종단평탄성을 추정하는 식은 식(9)와 같다(Morosiuk et al., 2000).

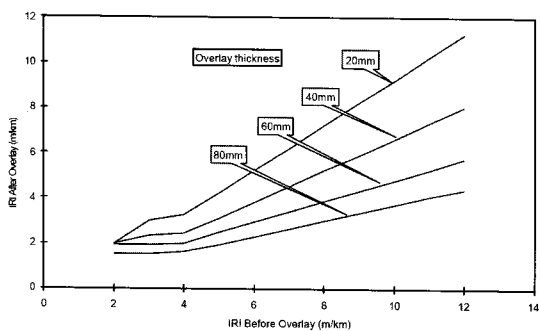


그림 3. 덧씌우기 두께에 따른 유지보수 효과 (Morosiuk et al., 2000)

$$RI_a = 3.85 - \frac{\min(H, 80) + \min(H, 40)}{52} + \frac{28 \max(RI_b - 3.85, 3.85)}{\max(H, 28)} \quad (9)$$

여기서,

RI_a = 유지보수 후의 종단평탄성(m/km)

RI_b = 유지보수 전의 종단평탄성(m/km)

H = 덧씌우기 두께

표 2. 보수단가(단위: 원/m²)

보수공법\교통량	L	A	B	C	D
채포장(고급포장)	52340				
재포장(재간이포장)	22240				
덧씌우기	9160				
절삭덧씌우기	13085				

한편, 태국의 경우 50mm 덧씌우기를 한 경우 유지보수후의 종단평탄성은 식(10)과 같으며, 트리니다드의 경우에는 40mm 덧씌우기를 기본으로 했을 때 이전 종단평탄성에 영향없이 거의 평행선형관계가 나타났다($RI_a = 2.5$).

단, 스웨덴의 경우 타국보다 약간 낮은 수준의 회귀식(11)을 제시하고 있다(Morosiuk et al., 2000).

$$RI_a = 1.87 + 0.25RI_b \quad (10)$$

$$RI_b = 0.55 + 0.29RI_a \quad (11)$$

즉, 종단평탄성의 초기값의 범위가 국가와 지역별로 차이가 나지만 0.5~4.0의 범위를 보이는 것으로 보아 본 연구에서 도출된 결과도 타당하다고 판단된다.

IRI의 매년 변화율의 경우에는 HDM의 경우에는 덧씌우기 후의 종단평탄성변화율(ΔRI)로 구해지며 아래 식으로 산정한다(Morosiuk et al., 2000).

$$\Delta RI = \max \left\{ \begin{array}{l} 0, a_0 [\min(a_1, RI_{bw}) - a_2] + \\ a_3 \max[0, (RI_{bw} - a_1)] \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI$$

$$RI_{bw} = \max(1.0, RI_{ap})$$

$$a_1 = \max\{4.0, 2.1 \exp[0.019(HSNEW_{aw})]\}$$

$$a_2 = 1 + 0.018 \max[0, (100 - HSNEW_{aw})]$$

$$a_3 = \min\{a_0, \max(0, (0.01(HSNEW_{aw}) - 0.15))\}$$



여기서,

RI_{bw} = 덧씌우기 전의 종단평탄성(m/km)

RI_{aw} = 덧씌우기 후의 종단평탄성(m/km)

RI_{ap} = 사전유지보수후의 조정된 종단평탄성(m/km)

$HSNEW_{aw}$ = 덧씌우기의 두께

a_0 : 유지보수효과 한계점(최저점)

a_1 : a_0 - a_2 상태의 유지보수효과 기울기

a_2 : 유지보수효과 변환점

a_3 : a_2 상태 이후의 유지보수효과 기울기

본 연구에서 도출된 덧씌우기 이후의 종단평탄성의 차이는 일반포장이 특수포장보다 조금 더 큰 것으로 나타났으며, 실제 관측데이터를 기초로 한 것이므로 단순계산으로 도출하는 방식보다 훨씬 객관성을 나타내는 결과라 판단된다.

장기공용성을 기반으로 한 효율적인(경제적인) 포장단면의 유지관리시스템의 목적은 예산수준과 기대 LCC와 도로포장의 정상적인 평균기능수준의 관계를 파악하고자 함이다. 도로망전체의 파손과정은 기대치 path를 따른다고 가정(Kobayashi et al., 2007)하고 초기시점을 2005년 9월로 설정하고 1개월을 기준단위로 50년간에 걸쳐 도로망의 보수과정을 재현하였다. 초기시점이라 함은 분석시작시점이 될 수도 있고 조사년도를 기준으로 할 수 있지만 본 연구에서는 조사년도를 기준으로 초기시점을 설정하였다.

포장의 상태에 따른 최적공법선정 및 그에 수반되는 예산의 추정을 위해 다음과 같은 과정을 거쳤다.

- ① 각 도로구간의 최적임계기능수준을 구함.
- ② 2005년 9월 시점의 IRI를 각 도로구간의 초기 IRI로 설정.
- ③ 초기시점의 IRI값이 최적임계기능수준 보다 낮은 도로구간에는 바로 포장을 보수함.
- ④ 시점을 1개월 갱신함.
- ⑤ 기대치 path에 따라 각 도로구간의 IRI를 갱신함.
- ⑥ 갱신된 IRI값이 최적임계기능수준 보다 작게

된 도로구간에서는 바로 포장을 보수함.

⑦ 위 과정을 50년간 지속함.

한편, 임계기능수준과 LCC의 관계를 살펴보기 위해 임의의 단위(폭 7m, 구간연장 100m)구간을 선정하여 임계기능수준별 LCC 금액을 비교해 보았다. 대형차교통량이 비교적 많은 임의구간(교통량 D구간)의 경우 그림 4에서와 같이 최적임계기능수준은 3.0에서 최소 LCC가 33.47억으로 나타났다.

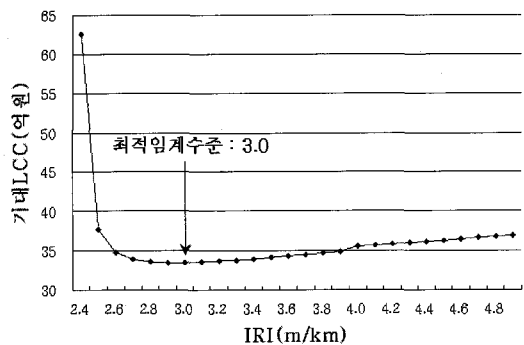


그림 4. 최적임계수준과 기대 LCC와의 관계

표 3. IRI변화에 대한 기대LCC

IRI(m/km)	기대LCC(억원)	IRI(m/km)	기대LCC(억원)
2.4	62.5720	3.7	34.4787
2.5	37.6962	3.8	34.6698
2.6	34.7713	3.9	34.8948
2.7	33.9299	4.0	35.5493
2.8	33.6068	4.1	35.6734
2.9	33.5024	4.2	35.8333
3.0	33.4706	4.3	35.9968
3.1	33.5200	4.4	36.1628
3.2	33.6255	4.5	36.2966
3.3	33.7358	4.6	36.4645
3.4	33.8954	4.7	36.6323
3.5	34.1520	4.8	36.7995
3.6	34.3300	4.9	36.9326

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최적 IRI수준보다 포장상태가 좋은 IRI에서 유지보수를 시행하면



불필요한 예산이 과다 지출됨을 알 수 있으며, 반대로 파손이 많이 진행된 상태에서 유지보수를 시행하는 것도 마찬가지로 결과가 도출됨을 알 수 있다.

한편, 포장의 유지보수를 위해 필요한 예산을 매년 확보할 수 있다는 조건으로 즉, 예산제약이 없는 경우를 가정하여 50년 분석기간으로 22개 국도구간의 총 2,038개 구간(연장 203.8km)의 포장대상으로 매년 필요로 하는 예산의 수준 등 분석결과를 살펴보기로 한다.

먼저, 그림 5와 같이 모든 대상구간의 효율적인 유지보수를 위해 예산제약이 없는 경우에는 IRI값이 평균 2.5~2.8 사이의 양호한 도로포장상태를 유지할 수 있음을 알 수 있었으며, 평균 IRI는 약 2.7임을 확인하였다.

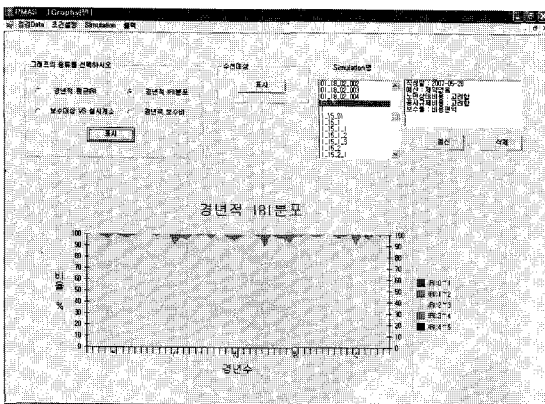


그림 5. 경년적 IRI 분포도

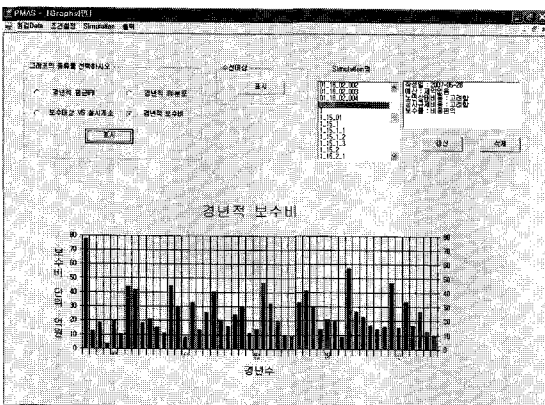


그림 6. 경년적 보수비용 추이

한편, 예산제약이 없는 경우 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 기대 LCC를 최소로 하기 위해 필요한 각 년도별 필요한 보수비용은 년평균 22억이며, 매년 매우 큰 폭으로 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 초기년도에 큰 예산이 필요함을 알 수 있는데 이는 기대 LCC를 최소로 하기 위해 초기년도에 많은 구간에서 유지보수가 필요함을 의미하는 것으로 해석할 수 있다.

현재의 대부분의 국가나 지자체에서 시행하고 있는 사회간접자본(SOC)의 유지관리를 위한 예산책정 및 배정방식인 정책제가 아닌 매년 어느 일정수준의 포장상태를 유지하기 위한 예산의 크기는 매년 큰 폭으로 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 과거의 예산금액을 기준으로 배정되는 예산시스템을 개선하기 위한 노력과 연구가 필요함을 의미한다. 즉, 현재 매년 일정하게 편성되어 있는 도로유지보수 예산의 장기추정이 가능하며, 이를 바탕으로 도로의 건설 및 유지보수 예산편성을 위한 의사결정에 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

분석기간 50년에 대한 매년 보수대상 구간수가 그림 7에 나타나 있으며 이는 그림 6의 보수비용 추이와 비슷한 패턴을 가지고 있다.

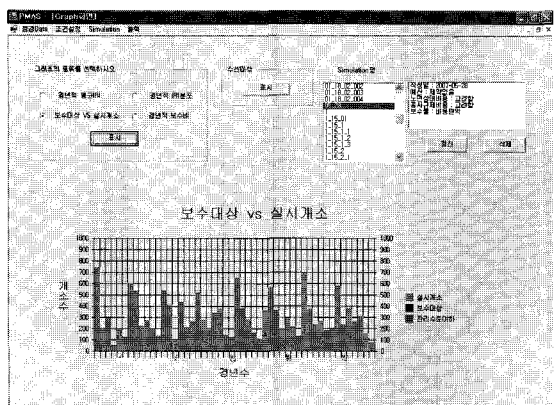


그림 7. 보수대상 및 실시할 구간 수

그림 8과 그림 9에는 도로의 서비스 수준을 일정하게 유지하기 위해 1,2년차에 보수가 필요한 도로구간의 우선순위를 나타내고 있다. 이것을 기초로 매



년 가장 시급히 유지보수가 필요한 구간의 리스트를 작성할 수 있으며, 장기적인 유지보수의 범위도 예산과 함께 파악할 수 있게 된다. 따라서 도로관리자 입장에서는 필요한 예산의 수준과 함께 유지보수를 위한 의사결정에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

년도	우선순위	보수구간ID
1	1	1937
1	2	1938
1	3	1939
1	4	1940
1	5	1941
1	6	1942
1	7	1943
1	8	1944
1	9	1945
1	10	1946
1	11	1947
1	12	1948
1	13	1949
1	14	1950
1	15	1951
1	16	1952

그림 8. 경년적 보수 우선순위(1년째)

년도	우선순위	보수구간ID
2	1	744
2	2	745
2	3	746
2	4	747
2	5	748
2	6	749
2	7	750
2	8	751
2	9	752
2	10	753
2	11	754
2	12	755
2	13	756
2	14	757
2	15	758
2	16	759

그림 9. 경년적 보수 우선순위(2년째)

5. 결론

본 연구에서는 국도의 포장단면의 자료를 토대로 포장의 공용성 추정과 효율적 유지관리를 위한 최적 기능수준 선정과 필요한 예산산정을 위해 개발된 시스템의 소개 및 응용가능성을 살펴보았다.

효율적인 포장관리를 위해 경제성을 고려하여 생

애주기비용(LCC)이 최소가 되는 시점에서 필요한 유지보수공법을 적용할 수 있는 시스템을 개발하여 실제 포장관련 자료를 기반으로 분석대상구간의 공용IRI자료를 이용하여 일반포장과 특수포장에 대한 IRI예측 선형회귀식을 도출하여 개발한 시스템에 적용함으로써 유지관리방안을 제시하였으며, 분석기간을 50년으로 하고 포장유지보수를 위해 필요한 예산을 매년 확보할 수 있다는 조건하에서 시뮬레이션을 한 결과 분석기간 동안 IRI값이 평균 2.9~3.3 사이의 양호한 도로포장상태를 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 도로포장상태를 양호하게 유지하기 위해 보수해야할 구간수와 필요한 예산은 매년 차이가 있음을 확인하였다.

현재의 대부분의 국가나 지자체에서 시행하고 있는 사회간접자본(SOC)의 유지관리를 위한 예산책정 및 배정방식인 정액제가 아닌 매년 어느 일정수준의 포장상태를 유지하기 위한 예산의 크기는 매년 큰 폭으로 차이가 있음을 알 수 있다.

예방적 유지보수라는 측면에서 평균 IRI를 2.7정도로 양호한 포장관리를 위해 분석기간 동안 각 연도별 보수해야할 구간수와 우선구간순위를 도출할 수 있었다.

또한 본 연구를 통해 개발된 도로포장관리시스템을 이용하면 도로관리자가 효율적인 포장관리를 위한 의사결정에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 장기공용성 자료가 축적되고 우리나라 실정에 맞는 단가자료 등이 확보된다면 충분한 응용가능성을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

권수안·정경영·서영찬(2002) 국도 아스팔트포장의 특수 포장 적용을 위한 교통량 기준제안 연구, 한국도로포장공학회 논문집 제4권 3호, 25-33.

남영국(2004) 도로포장공학, 구미서관

도명식·한대석·유인균·이수형 (2006) LCC를 고려한 내유동포장의 공용성 및 경제성 분석에 관한 연구, 대



- 한토목학회 논문집 제26권 5D, pp.783-796.
- 도명식·한대석·이종달·이영욱 (2007) HDM을 활용한 국도 포장 유지보수 공법에 대한 경제성 평가, 대한토목학회논문집, 제27권 3D, pp.311-323.
- 이의섭 외(2000) 건설구조물의 체계적인 LCC분석, 토목학회지 제48권 제1호.
- 최민수 외(1999) 건설사업의 LCC분석기법 및 적용방안, 한국건설산업연구원.
- 최준성(2006), 예방적 유지관리의 필요성 및 예방적 유지보수공법 소개, 한국도로학회지 제8권1호, pp.13-21.
- 한국건설기술연구원(2005) 2004 도로포장관리시스템 최종보고서.
- Aggarwal, S., Jain, S.S., Parida, M. (2004), *Pavement Management System For A National Highway Network In India*, Proc. of 6th International Conference on Managing Pavement, Vol.II, 597-611.
- Peshkin, D.G., Hoerner, T.E., Zimmerman, K.A.(2004), Optimal Timing of Pavement Preventive Maintenance Treatment Applications, NCHRP Report 523, TRB.
- Hudson, W. R., Hass, R. and Uddin, W. (1997) *Infrastructure Management*, McGraw-Hill.
- Kobayashi, K., Ejiri, R., Do, M. (2007) Pavement Management Accounting System, *J. of Infrastructure Systems*,(forthcoming)
- Lemer, A.C. (2004) *Public Benefit of Highway System Preservation and Maintenance*, NCHRP Synthesis 330, TRB, pp.3-13.
- Morosiuk, G., Riley M.J. and Odoki, J. B. (2000) *Modelling Road Deterioration and Works Effects*, PIARC.
- Paterson, W.D.O. (1987) *Road Deterioration and Maintenance Effects*, World Bank Publications, Washington, USA.
- Paterson, L.L., and Scullion T.,(1990), Information systems for road management: draft guidelines on system design and data issues. *Infrastructure and Urban Development Department Report INU77*. Washington DC, The World Bank.
- Robinson, R. (2006) Life cycle costing of highway. in Bull. J. W. (eds), *Life Cycle Costing for Construction* pp.53-85, Taylor & Francis.

접 수 일: 2007. 9. 19
심 사 일: 2007. 9. 20
심사완료일: 2007. 11. 30