

도로포장 관리를 위한 시스템 개발

Road Pavement Management System Application

도명식¹⁾ · 이영욱²⁾ · 이종달³⁾ · 장민균⁴⁾

Do, Myungsik · Lee, Younguk · Lee, Jongdal · Jang, Minkyun

1) 국립한밭대학교 토목환경도시공학부 조교수 mado@hanbat.ac.kr

2) 대구과학대학 측지정보과 부교수 ywlee@tsc.ac.kr

3) 영남대학교 토목도시환경공학부 교수

4) 영남대학교 교통 및 GIS연구실 연구원 bearo@hanmail.net

목 차

I. 서론

II. 도로포장관리시스템(PMS)

III. 도로의 공용성 지표

IV. 대상구간 선정 및 공용성 평가방법

V. 도로포장 관리시스템 개발 및 적용

VI. 결론

참고문헌

I. 서론

인구의 감소 추세 및 고령화와 환경에 대한 관심의 증가 등으로 인해 새로운 대규모 사회간접시설을 건설하기에는 어려움이 따르고 있으며, 이미 건설되어 운영 중인 많은 사회기반 시설들이 노령화되어 그 기능을 유지시키기 위해 유지관리 및 시설물의 보수 등이 필요하게 되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

우리나라는 지난 수십 년간 도로율을 높이기 위해 도로건설에만 주력을 해 왔었다. 반면에 도로관리는 한정된 예산 하에서 반응적 즉, 사후 처방적 유지보수에 그쳐 운영자 비용이 과다하게 지출되고 도로의 질적 수준은 개선되지 않은 상황의 악순환만 반복되어 왔다. 한편, 도로 포장의 유지와 복구는 관리자의 경험에 많이 의존하고 있는 실정이므로, 효율적인 포장관리를 위해서는 좀 더 과학적 접근법이 필요하며 근본적 운영체제의 개선이 요구되는 시점이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 국도의 포장단면을 대상으로 시행한 현장조사에서 획득한 자료를 바탕으로 포장의 장기 공용성 추정과 효율적인 포장유지관리 방안을 마련하기 위한 방법제시하고, 이를 위해 개발된 도로포장 관리시스템을 소개하고자 한다.

II. 도로포장관리시스템(PMS)

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

일반적으로 도로포장의 보수는 유지와 수리

(수선)로 구분할 수 있다. 유지는 긴급한 수리 등 공용성능을 유지하거나 약간 향상시킬 목적으로 하는 행위를 말하며, 수리(수선)는 포장의 파손이 심해 통상의 유지공법으로 양호한 노면을 유지할 수 없는 경우 구조강화 등 근본적인 대책을 이용하여 대폭적으로 공용성능을 회복하도록 하는 행위를 말한다.

대부분의 국가나 지자체에서는 반응적 유지보수(reactive maintenance) 즉, 'worst first' 개념을 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.

이미 미국, 유럽 및 일본 등의 선진국에서는 생애주기비용(LCC: Life Cycle Cost)을 고려한 투자에 대한 의사결정과 비용편익분석(Cost Benefit Analysis)을 이용하여 프로젝트의 실시에 따른 사회전체의 편익과 비용을 비교하여 사회간접자본의 건설 및 유지비용의 판단기준으로 이용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다(Jiang et. al., 2000; Lemer, 2004).

한편 우리나라의 경우 건설교통부에서 1980년대 후반부터 국도 유지 예산의 효율적인 활용과 포장의 적절한 상태 유지를 위해 국도포장관리시스템을 구축하여 운영 중에 있다.

현재 수행되고 있는 도로포장관리시스템은 매년 약 3000km의 일반국도에 대해 조사대상구간을 선정하고 있으며, 자동노면조사장비(ARAN: Automatic Road ANalyzer)를 이용하여 포장상태자료(중단평탄성, 소성변형, 균열)를 수집하고 교통량 및 보수이력 등을 고려한 동질성구간에 대해 포장상태등급을 결정하여 유지보수를 위한 기초 자료로 활용하고 있다(한국건설기술연구원, 2005).

III. 도로의 공용성

도로의 공용성을 나타내는 지표는 국가나 지역별로 다양하다. 특히 미국을 중심으로 한 지역의 PSI(Performance Service Index)와 세계

은행에서 개발한 HDM-4에서 주로 이용하고 있는 IRI(International Roughness Index)와 일본에서 주로 사용하는 MCI(Maintenance Control Index) 지표 등이 있다.

PSI는 미국 일리노이주 오타와 근교에서 1952년부터 10년간 AASHO 도로시험에서 포장의 표면 상태를 평가하는 지표로서 개발한 기법이다. 포장 표면에 외형상 나타나는 여러 현상이 차량주행에 어떠한 영향을 미치는가를 수식화하여 나타낸 것이다(남영국, 2006).

각 포장종류에 따라 PSI를 구하는 식이 다르며 아스팔트 콘크리트포장과 시멘트 콘크리트포장의 경우를 정리하면 아래와 같다.

1) 아스팔트 콘크리트 포장인 경우

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

2) 시멘트 콘크리트 포장인 경우

$$PSI = 5.41 - 1.80 \log(1 + sv) - 0.05 \sqrt{(c + 3.3p)}$$

여기서, c: 포장의 균열(콘크리트 포장 m/1000 m², 아스팔트 포장 m²/m²)
 p: 패칭 면적(m²/1000m²)
 RD: 바퀴자국(cm) 소성변형깊이
 sv: 도로 요철의 분산 평균

시험도로 계통 시에는 물론 균열도 없고, 처짐도 없고, 패칭도 없으나, 평탄성에 대한 요철의 평균분산은 어느 정도 나타난다. 따라서 초기에는 거의 5.0에 가까운 값을 얻을 수가 있다. 즉 PSI값이 5.0에 가까울수록 노면상태는 좋다고 볼 수 있다. 그러나 공용개시 이후 시일이 경과함에 따라 그 값은 5.0 이하 값으로 낮아진다. 어느 일정기간이 지나면 이력곡선의 변곡점에서 급격하게 저하되며, 특히 콘크리트포장에서는 심하게 나타나고 있다. 이러한 한계 값 즉 PSI=2.5 또는 2.0을 기준으로 포장노면의 성능을 개선 할 필요가 있으며, 도로의 기능등급에 따라 다르게 적용하고 있다(남영국, 2006).

<표 1> PSI 공용평가지수표

공용지수 (PSI)	노면상태	적용구분(공용한계)
5~4	아주 좋음	
4~3	좋음	
3~2	보통	2.5: 자동차전용도로(고속도로)
2~1	나쁨	2.0: 지방도
1~0	아주 나쁨	1.5: 읍면도(설계속도 40km/h이하)

한편, IRI란 포장의 평탄성에 대한지표로 도로의 주행감과 밀접한 관계가 있다. 평탄성은 노면성상에 따라 주행의 안전과 쾌적성, 운행 비용 등에서 상당한 영향을 미친다. 평탄성의 기준은 세계적으로 공통된 기법을 정립하기 위하여 1982년 세계은행(IBRD)후원으로 미국을 포함한 서방 5개국이 참여하여 국제평탄성지수(IRI)를 국제기준으로 설정하여 노면의 평탄성을 평가하였다.

IRI를 구하는 방법은 균열이나 소성변형처럼 육안조사 혹은 간단한 장비로 조사가 불가능하며, 차량에 ARAN이란 장비를 장착한 후 실제 대상구간을 주행하여 공용지표값을 산출한다. 100m간격으로 Update하게 되며 Bump수를 기준으로 산정한다(남영국, 2006).

한편, 일본의 (구)건설성에서 발표한 대표적인 포장의 공용성 지표로 MCI가 있다. 도로포장의 물리적 서비스 수준을 나타내는 기능수준은 바퀴패임, 금, 포장재료, 요철, 소음, 도로의 구배 등으로 규정하지만, 현실적으로 바퀴패임, 금, 요철만으로 포장의 기능수준(약화수준)이 평가된다. 일본의 경우 이용할 수 있는 데이터에 따라 MCI값을 적용하거나 아래 식 가운데 최악의 값을 MCI로 선정하고 있다.

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2}$$

$$MCI_0 = 10 - 1.5IC^{0.3} - 0.3D^{0.7}$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3}$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7}$$

여기서, C: 금 비율(%), D: 바퀴 패임량(mm),
σ: 종단요철량(mm)

만약 MCI<3이면 시급히 수리가 필요한 상태이며, 4이하이면 수리가 필요, 5이하이면 바람직한 관리수준으로 판단하고 있다.

또한 완전한 포장인 경우 MCI는 10이지만, 현실적으로 이상적인 포장은 존재할 수 없기 때문에 수리직후의 MCI값과 신규도로정비를 마친 직후의 MCI값을 9.0으로 보고 있다(Kobayashi et al., 2007).

PSI와 IRI와의 관계는 미국의 여러 주와 브라질, 남아프리카공화국 등지에서 그 상관식을 적용한 바 있고, 두 관계의 상관성에 대한 연구결과에 따른 식이 여러 식이 있다. 본 연구에서는 Paterson이 제안한 관계식인 PSI를 이용하였다.

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

IV. 대상구간 선정 및 공용성 평가방법

1. 대상구간 선정

포장의 공용성 예측을 위해 필요한 포장 상태자료는 크게 유지보수 전년도, 유지보수 직전, 유지보수 직후로 나눌 수 있으며, 포장의 공용성 평가를 위한 대상구간의 선정에 대해 크게 4가지 요소(교통량, 중차량, 도로의 기구조, 공용기간)를 고려하여 대상구간을 선정하였다.

본 연구에서는 총 22개 구간을 대상으로 도로포장 상태를 조사하였으며, 포장공법별로는 특수포장 22개 자료(SMA 6개구간, CRM 4개구간, PMA 6개구간, PBS 6개구간), 일반포장 22개 자료를 대상으로 종단평탄성(IRI m/km)을 현장에서 조사하였으며, <표 2>는 조사된 특수포장과 일반포장 구간의 도로정보를 나타낸 것이다.

또한, PSI를 구하기 위해 동일구간에 일반포장과 사후 특수포장으로 재시공된 구간을 대상으로 현장조사를 하여 각 구간에 대한 IRI값을 관측하였다. 일반포장 22개구간과 특수포장 22개구간으로 조사된 IRI 공용성 데이터와 Paterson이 제안한 관계식을 이용하여 PSI로 환산한 값을 사용하였다.

<표 2> 대상구간의 상세정보

ID	국도 번호	시 점	종 점	시행년도 (일반/특수)	차로 /사공
T1-55	23	지방도697분기	원동교A1	1999/2004	4/2
T1-53	28	지방도925분기 안강대교 A2	국지도68분기 안강 IC	2000/2003	4/2
T1-50	17	대전시계(뒤) (현도교A2)	지방도591분기(뒤) (매봉교A1+1.500)	1998/2003	4/2
T1-48	19	산동육교A1+2.739	전남/전북도계	1998/2002	4/2
T1-13	30	지방도710분기 +0.200	국도1분기(변산축)	1992/1999	2/2
T1-10	45	국도39분기	삼거리 A1	1996/1999	2/2
T2-21	26	(구)국도29분기 (앞)-1.400	군산 IC	1999/2004	4/2
T2-18	28	안강IC교	국도7분기(앞)	2000/2003	4/2
T2-12	38	안성IC + 0.100	평택시계(뒤)+10.400	1999/2003	4/2
T2-10	14	부산시계(뒤) +6.542	일광/장안읍면계	1993/2001	4/2
T3-49	45	충남/경기도계 +0.200	평택시계(앞) 군문교A1	1999/2003	4/2
T3-41	17	청원IC+4.300	청주시계(앞)0.600	1992/2002	4/4
T3-39	14	통영시(뒤)	국도77분기(앞)	1997/2002	4/2
T3-35	37	동평교A1+2.103	국도4분기(전북)	1995/2002	2/2
T3-26	1	송탄시(뒤) 신장교 A2	권위교A1	1997/2001	4/2
T3-2	17	국도 39분기	국도39분기+6.800	1993/1997	2/2
T4-18	36	비호천교A2	청주시계(앞)	1998/2003	4/4
T4-15	29	청성교A1	청성교A1+1.770	1997/2002	2/2
T4-11	31	포항시계(뒤)3.721 +6.670	지방도68분기	1996/2001	2/2
T4-9	38	국도29분기(양진) +0.100	대호방조계A1	1994/2001	2/2
T4-6	4	국도40분기(뒤)	국도40분기(뒤) -3.177	1997/2001	2/2
T4-2	14	설창교A1+3.502 인현삼거리	김해시계	1997/2000	4/2

2. 공용성 평가

각 도로구간의 포장에 대한 기술적 상태, 과거의 수리실적, 수리비용 등을 실제 관측하여 얻은 관측 Data를 이용하면 각 구간의 공용성을 쉽게 알 수 있지만, 포장의 실제 관측은 미리 정해진 시간간격으로 실시되는 경우가 대부분이기 때문에 공용성을 위한 관측값이 항상 구해지는 것은 어렵다. 따라서 과거 관측값의 결과에 근거로 하여 현 시점에서의 도로 공용성을 추정하여야 한다.

이에 대해 Kobayashi et al.(2007)에서는 이러한 공용성 추정을 악화프로세스의 기대치 path를 이용하는 방법을 제안하였다. 기대치 path란 장래의 악화수준을 정확하게 예측하기는 거의 불가능하므로 여러 악화 프로세스의 경로의 기댓값을 취하는 형태로 시간경과와 함께 기능수준이 감소하는 것을 직선의 형태로 표현한 것을 말한다.

본 연구에서는 이러한 악화프로세스의 기대

치 path를 이용하여 대상구간에 대한 PSI의 공용년수별 분포를 구하였고, 이를 바탕으로 일반포장과 특수포장의 공용년수별 PSI 선형회귀식을 구한 결과, 일반포장 구간과 특수포장 구간은 각각 $y=-0.0482x+3.0502$, $y=-0.0459x+3.1427$ (x: 년수)으로 구하였다.

V. 도로포장 관리시스템 개발 및 적용

1. 도로포장 관리시스템 개발

본 연구에서 구축한 도로포장 관리시스템은 크게 Data의 입력 및 관리 부분과 Simulation, 그리고 출력부분으로 이루어져 있다.

Data의 입력 및 관리는 도로망 전반에 관한 조사 자료의 데이터를 통합 관리하는 구간 Data부분과 차량군에 대한 노면상태에 따른 차량주행비용 및 공사규제에 대한 이용자 비용, 수선공법의 세부기준에 대한 수선규정 시스템으로 구성되어 있다.

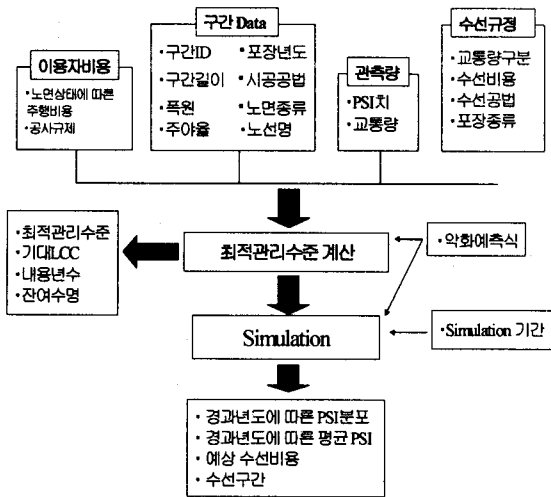
노면상태에 따른 차량주행비용은 노면 상태에 따른 차량군의 차종별(대형차, 소형차) 주행비용(연료비, 기타)을 단위비용으로 환산하였으며, 공사규제에 의한 이용자비용은 차량주행비용과 시간손실비용에 대해 각 4가지 규제(감속, 정지, 정체, 공사규제)에 대해 단위비용으로 환산하여 구축하였다.

수선규정 시스템은 각각의 교통량(L, A, B, C, D)에 따라, 수선공법(덧씌우기, 절삭 덧씌우기, 재포장)에 따라 수선단가를 산정하였다.

최적관리수준 계산에서는 악화프로세스를 추정하는 악화추정시스템과 도로포장의 장기 공용성을 추정하는 시스템으로 구성이 되어 있다. 악화수준의 예측치를 근거로 유지보수 구간의 우선순위를 결정하는 의사결정 시스템은 공용성 및 경제성 평가에 근거한 의사결정을 지원하는 부분이다.

출력부분에서는 경제성 평가를 위한 관리회계 부분과 장기 공용성을 파악할 수 있는 그래프 부분으로 이루어져 있다. 관리회계부분은 분석 결과에 따른 포장 유지관리비용에 대한 매년 추정예산을 나타내 주는 부분으로 효율적인 유지관리 예산을 집행할 수 있도록 도와준다.

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



<그림 1> 도로포장 관리시스템(PMS) 구성

2. 도로포장관리 시스템 적용

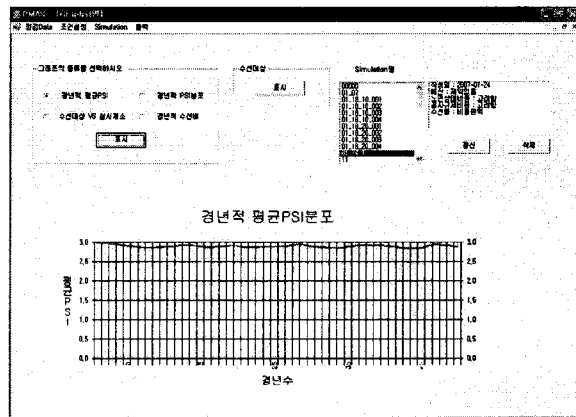
Paterson이 제안한 관계식을 이용하여 얻어진 일반포장과 특수포장의 PSI값을 기대Path 방법으로 계산된 선형회귀식을 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션의 기본적인 분석조건으로 분석기간을 50년으로 하였다. 또한 도로포장 실제 데이터를 이용하여 추정한 장기 공용성 수준을 예산의 확보와의 관련성을 알아보기 위해 1) 필요한 예산을 매년 확보할 수 있는 예산제약이 없는 상태와 2) 현재 포장관리를 위한 예산확보 방법인 매년 일정하게 확보된 예산으로 유지관리 하는 상태로 구분하여 적용해 보기로 한다.

1) 예산제약이 없는 상태

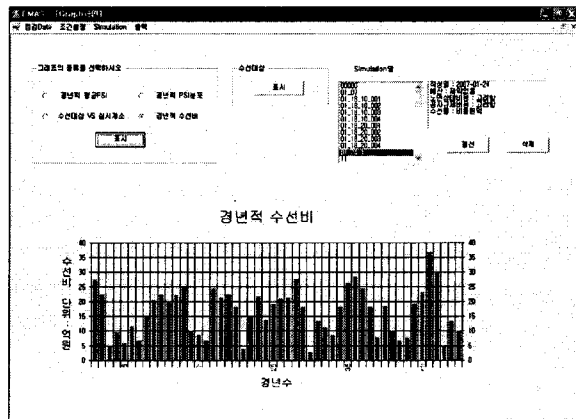
포장의 유지보수를 위해 필요한 예산을 매년 확보할 수 있도록 예산제약이 없는 경우의 시뮬레이션 결과를 <그림 2>와 <그림 3>에 나타내고 있다. 여기서 알 수 있는 바와 같이, PSI값이 평균 3.0~2.8 사이의 양호한 서비스 수준을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

또한 <그림 3>에서 일정한 포장의 서비스 수

준을 유지하기 위해서 필요한 예산은 매년 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 현재와 같이 매년 일정한 금액의 예산을 배당하는 방식으로는 효율적인 포장의 유지보수가 이루어지기 어려울 수 있다. 따라서 향후 장기적인 예산 확보와 효율적인 지출을 위한 회계시스템에 대한 연구도 필요함을 알 수 있다.



<그림 2> 경년적 PSI 수준의 변화



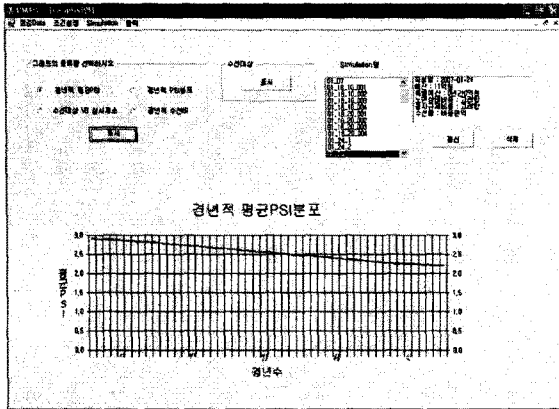
<그림 3> 경년적 수선비용 분포

2) 매년 일정한 예산배정의 경우

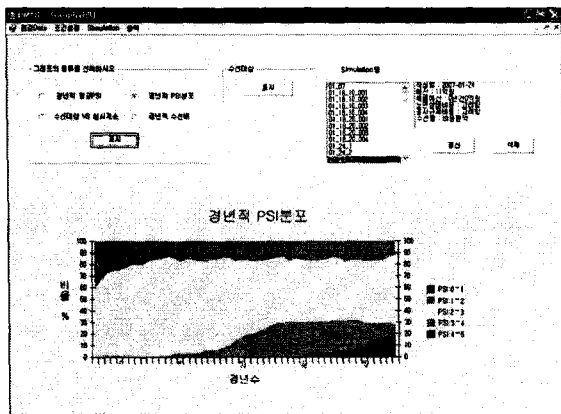
현재 대부분의 국가나 지자체에서는 매년 일정한 금액의 유지보수비가 예산에서 배정되어 이를 기초로 유지보수를 시행하고 있다. 즉, 장기적인 관점에서 교통환경의 변화, 대상 도로 네트워크의 범위 등을 고려하기 보다는 과거 배정된 예산을 기준으로 유지보수예산을 배정하고 있는 실정이다. 따라서 장기적으로 필요한 예산의 추이를 분석하여 효율적으로 예산이 배정된다고 할 수 없다.

본 연구를 통해 개발한 도로포장유지관리를 위한 시스템에서 산출된 매년 필요한 유지예산

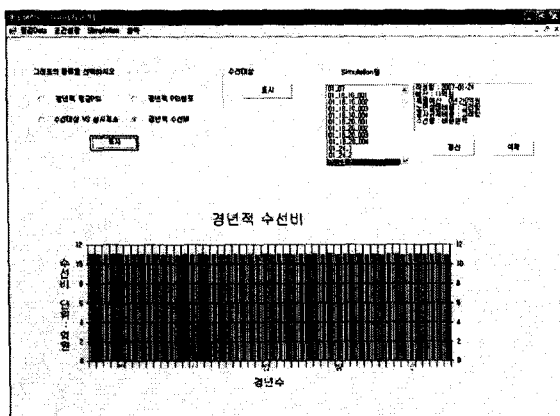
14억원의 20%를 차감한 11억원의 예산이 배정된 경우를 시뮬레이션해 보았다. 그 결과 <그림 4>에서 보는 바와 같이 PSI값이 시간이 지날수록 떨어져 포장상태가 악화되어가는 것을 알 수 있었다.



<그림 4> 경년적 PSI 수준의 변화



<그림 5> 경년적 PSI 분포



<그림 6> 경년적 수선비

<그림 5>에는 시간의 경과에 따른 전 포장구간을 대상으로 PSI의 비율을 나타내고 있다.

즉, 초기에 양호했던 포장의 상태가 점차 PSI가 (0-1)과 (1-2)의 비율이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 일정한 도로의 서비스 수준을 유지하기 위해 필요한 유지보수 예산이 배정되지 않을 경우 매년 적절한 유지보수가 시행되지 못함으로 인해 도로포장의 상태는 개선되어지지 않고 공용성이 점차 악화됨을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 도로의 포장관리가 한정된 예산 하에서 반응적 유지보수에만 그쳐 운영자 비용이 과다하게 지출되고 도로의 질적 수준은 개선되지 못하는 한계점을 지적하면서, 포장의 유지와 복구가 관리자의 경험에만 의존하고 있는 실정에서 효율적이고 체계적인 포장관리를 위해 과학적인 접근을 통해 근본적인 운영체계의 개선을 이루고자 함이 목적이다.

나아가 유지보수의 일시적인 해결뿐만 아니라 유지비용의 자산관리 측면에서도 고려할 수 있는 시스템 구축을 위한 방안을 제시하고자 한다.

본 연구의 분석대상으로 포장의 공용성 평가를 위한 대상구간의 선정에 대해 교통량, 중차량, 도로의 기하구조, 공용년수를 고려하여 대상구간을 선정하였으며, 또한 중단평탄성(IRI)의 현장자료가 명확하며, 공용년수 기간 동안의 교통량자료가 확보된 총 22개구간을 대상으로 경년적 PSI에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션의 기본적인 분석조건으로 분석기간을 50년으로 하고, 실제로 현장조사를 통해 구한 도로포장관련 데이터와 장기공용성 추정을 위해 기대치 path법을 이용하였다.

개발된 시스템의 응용가능성을 분석하기 위해 유지보수에 필요한 예산과 공용성의 관련성을 살펴보았다. 특히 필요한 예산이 배정되는 경우에는 일정한 수준의 공용성이 확보됨을 알 수 있었으며, 필요한 예산은 매년 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 필요한 예산보다 적은 예산이 투입되면 초기년도에는 어느 정도 유지보수의 효과를 볼 수 있지만, 시간이 지날수록 서비스 수준은

크게 악화되어짐을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 매년 반응적으로 일정하게 편성되어 온 도로의 유지보수 예산 배정의 문제점을 확인할 수 있었으며, 장기적으로 필요한 예산 추정이 가능하여, 이를 바탕으로 도로 건설 및 유지보수 예산편성에 효율성을 기할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 남영국(2006) 도로포장공학, 구미서관
2. 도명식 외, (2006) LCC를 고려한 내유동포장의 공용성 및 경제성 분석에 관한 연구, 대한토목학회 논문집 제26권 5D
3. 한국건설기술연구원(2005) 2004 도로포장관리시스템 최종보고서.
4. Hudson, W. R., Hass, R. and Uddin, W. (1997) *Infrastructure Management*, McGraw-Hill.
5. Jiang, M., Corotis, R.B., Ellis, H. (2000) Optimal life-cycle costing with partial observability, *J. of Infrastructure Systems*, 6(2), 56-66.
6. Kobayashi, K., Ejiri, R., Do, M. (2007) Pavement Management Accounting System, *J. of Infrastructure Systems*, (in review)
7. Lemer, A.C. (2004) *Public Benefit of Highway System Preservation and Maintenance*, NCHRP Synthesis 330, TRB, 3-13.