

# 도로포장 표면조사와 FWD정보에 기반한 도심지 도로포장 유지보수 기법 개선방안 연구

이상염  
인덕대학교 건설정보공학과

## A Study of Improvement of Urban Pavement Maintenance Technique based on Pavement Condition Evaluation and FWD Data

Lee, Sangyum

Department of Construction Information Engineering, Induk University

**요 약** 서울시 도로는 교통하중, 도로포장 노후화 및 잦은 굴착복구 등의 열악한 도로조건으로 인하여 도로포장 수명이 기대수명에 미치지 못하여 효율적 도로포장관리(Pavement Management System, PMS)와 적절한 유지보수 시기가 요구된다. 본 연구에서는 도로의 표면상태조사와 FWD(Falling Weight Deflectometer)기반 조사를 통하여 장기 공용성 구간의 보수우선 순위를 선정하고 각 지수에 따른 우선순위의 상관도를 분석하여 명확한 포장상태 평가와 타당한 공법 및 시기의 선정에 도움이 되고자 한다. 이를 위해 서울특별시의 장기 공용성 구간(Long Term Performance Pavement, LTPP)을 활용하여 표면상태조사를 통해 균열, 소성변형, 종단평단성을 측정하였고 서울포장평가지수인 SPI(Seoul Pavement Index)로 포장상태를 나타내었다. 또한 동일 구간에 대해 FWD시험을 통한 처짐량과 코어채취에 의한 포장두께 자료를 이용하여 포장층의 탄성계수를 역산하고 허용 교통량을 산정하여 실제 교통량과 허용 교통량을 비교 후 잔존수명을 추정하였다. 이를 통하여 도출된 포장상태 지수와 포장지지력에 따른 잔존수명을 비교분석하였다. 결과적으로 표면상태지수인 Crack, Rutting, IRI(International Roughness Index) 값들의 보수 우선순위와 지지력에 의한 보수 우선순위를 분석하여 보수 우선순위에 따른 포장상태지수와 포장지지력의 상관성을 검토하였다. 그 결과, 균열과 소성변형에 대하여 R-square 값이 0.65이상으로 상관도가 높은 반면, 종단평탄성과 그 값을 포함한 SPI와의 상관도는 비교적 낮은 수준을 나타내었다.

**Abstract** The objective of this paper is to support accurate pavement condition assessment and decision of proper maintenance method and time by conducting visual inspection and calculating the remaining life of pavement from falling weight deflectometer(FWD) data. Each was implemented in the same long-term performance pavement(LTPP) sections. Visual inspection was executed to measure pavement condition indices such as crack, rutting and international roughness index(IRI) and the Seoul Pavement Index(SPI) was calculated based on these results. The dynamic modulus was back-calculated from the FWD data. The remaining pavement lives were determined from equivalent single axle loading(ESAL) and FWD data. Correlation of maintenance priority by each result value was examined. Consequently, the correlation between remaining life to Crack and Rutting was higher than the other factors or indices because IRI is not related to FWD value and SPI value consists with IRI value and other indices. The R-square value of correlation of FWD with Crack and Rutting was 0.65, which indicated an insufficient correlation. Consequently, when decision of maintenance of method, time, etc. is determined, FWD data have to be considered with Crack and Rutting because of those relations.

**Keywords :** FWD, LTPP, Maintenance Priority Grade, PMS, Remaining Life, SPI,

본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술진흥원 연구비지원(과제번호 R0005668)으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Lee, Sangyum(Induk University)

Tel: +82-10-5213-4677 email: yummy0220@induk.ac.kr

Received October 24, 2016

Revised (1st November 7, 2016, 2nd November 14, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

## 1. 서론

대한민국의 수도인 서울은 세계적인 규모의 도시로 높은 인구 밀도를 나타내며, 그로 인한 방대한 교통량과 도로를 보유하고 있다. 근래의 서울시 도로는 포장의 노후화와 더불어 급증한 상당량의 교통하중 그리고 잦은 굴착복구 등으로 인해 매우 열악한 환경에 놓여 있다. 이는 포트홀, 균열 및 침하, 소성변형 등과 같은 주요 파손을 발생시키며 급격한 공용성능의 저하와 포장수명의 단축을 야기한다. 이로 인한 도로 사용자의 안전 문제와 유지보수 증가에 따른 교통체증 발생과 비용증가는 큰 손실이 되며 효율적 유지보수와 공용성 확보가 요구되는 이유이다.

따라서 구체적인 장기 공용성 향상과 공법의 적용 여부 결정 근거자료로 활용될 수 있는 종합적이며 효율적인 포장체의 평가 분석이 요구된다.

현재 포장상태를 평가하고 유지보수 방법과 시기를 결정하는 대표적인 포장상태조사는 도로표면 조사를 중심으로 이루어지고 있다. 특히, 서울시의 포장상태조사는 장비조사 또는 육안조사(Visual Inspection)를 이용하여 도로표면의 균열(Crack), 소성변형(Rutting), 종단평탄성(International Roughness Index, 이하 IRI)을 종합적으로 고려하여 서울시에서 자체 개발한 SPI(Seoul Pavement Index)로 도로포장상태를 평가하고 이를 유지보수 결정 근거자료로 활용하고 있다[1].

그러나 육안조사를 중심으로 한 포장상태조사는 포장체의 표면 상태를 위주로 평가하므로, 실제 도로포장이 노후화 및 유지보수작업으로 인해 지지력이 저하된 상태이면 조기에 포장이 손상될 가능성이나, 유지보수 결정에 적절한 판단 및 선정에 어려움이 발생한다[1].

이에 따라, 본 연구에서는 도심지 도로파손 원인 분석 및 대응 방안 수립 근거자료로 활용하기 위해 지정된 장기간 공용성 조사구간(Long Term Performance Pavement, 이하 LTPP)을 연구범위로 설정하고, 표면상태 분석인 포장상태조사와 더불어 포장체의 지지력 감소로 인한 파손의 영향을 분석하기 위해 하부상태 분석 방법인 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 활용하는 포장체 평가와 분석을 진행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 표면상태 조사

#### 2.1.1 Long Term Performance Pavement(LTPP)

LTPP는 장기간 포장체의 공용성이 어떻게 변하는지 지속적으로 관측하는 구간으로 파손의 원인과 공법 평가를 위하여 사용된다. 1989년도부터 국토부와 한국도로공사는 도로포장관리체계(Pavement Management System, 이하 PMS) 도입 이후 각 관리도로 특성에 따라 LTPP 구간을 선정하여 평가를 시행하고 있다. 도로 포장 상태에 따라 효율적이며 적절한 평가를 시행하기 위해 LTPP 구간을 일반 조사 분석(General Performance Study, GPS)구간과 특이 조사 분석(Specific Pavement Study, SPS) 구간으로 나누어 수행하고 있다. 특이 조사 구간은 파손이 과도하게 발생하거나 특수공법이 적용된 구간으로 일반조사 구간과 마찬가지로 현장 포장상태, 포장 재료의 물성 시험 등의 분석을 장기간 지속적으로 수행하여 정보를 DB형태로 수집 및 관리하여 파손의 원인분석, 공법 평가, 유지보수 공법 선정에 적극 활용한다.

서울시에서도 장기간 도로포장 상태(공용성)를 일정 기간 동안 지속적으로 관측, 포장층의 물성, 환경인자, 교통하중 등과의 상관관계를 밝혀, 파손원인 분석, 공법 평가 등에 활용하고자 LTPP 구간을 선정을 선정하였다. 2012년도에 선정된 LTPP구간은 서부간선(목동교~오목교), 올림픽대로(여의교~서울교) 등 19개 노선에 23개 구간 총 35.3km이다. 이 구간에 대하여 자동포장상태 조사장비를 활용하여 소성변형, 균열, 평탄성에 대한 2012년 1차 조사 이후 추적조사를 시행해오고 있다[2].

도로포장 하부상태와 표면상태 분석결과를 도심지 도로파손 원인분석 및 대응방안 수립 근거자료로 활용하기 위해 지정된 장기공용성 조사구간의 활용 필요성이 제기되었다. 그러나 도로함몰 등 도시안전에 관련된 긴급현안으로 인해 LTPP 구간의 조사가 원활히 진행되지 못하였다. 따라서 본 연구는 총 19개 노선 23개소의 LTPP구간에 대해 노면상태평가와 현장코어채취를 통한 포장체 두께 조사 그리고 FWD를 통한 구조적 지지력 평가 및 잔존수명을 산정하여 도로 포장체의 전반적인 표면과 하부상태를 평가 분석하였다. Table 1.에서와 같이 LTPP 구간의 총연장은 35.3km이고, 도시고속도로(6개소), 주간선도로(7개소), 보조간선도로(6개소), 중앙버스전용차로(3개소)로 구성되어 있다. 총 23개소 LTPP구간의 재

포장(보수)년도는 2005년~2011년도로 평균 공용기간은 6.2년이며, 보수재료는 일반, 개질 재생, 배수성 아스팔트포장 재료를 적용하였다[2].

**2.1.2 Seoul Pavement Index (SPI)**

서울시는 효율적인 도로포장관리체계(PMS)의 성공적인 구축을 위해서 자체 개발한 SPI를 사용하여 포장상태를 평가하고 하고 있다. SPI는 포장의 상태를 0~10점으로 정량적으로 표현하며 값이 클수록 우수한 포장상태이다. Table 2.에서와 같이 Crack, Rutting, IRI 값을 이용하여 보수 기준에 근거하여 산출식을 개발하였다. 또한 Table 3.에서와 같이 도로등급과 보수규모의 영향도 고려하였다[1].

**Table 1.** LTPP Sections

Section	Road Type	Length (m)	Recent Maintenance	Material
Seobu Expressway1	Urban Expressway	1,100	2010	HMA
Olympic highway1	Urban Expressway	1,280	2008	HMA
Gangbyeon Expressway1	Urban Expressway	2,020	2007	Porous
Seobu Expressway2	Urban Expressway	2,450	2006	Recycle
Olympic highway2	Urban Expressway	2,700	2011	Recycle
Gangbyeon Expressway2	Urban Expressway	3,250	2009	Porous
Gangbyeon Expressway3	Urban Expressway	3,250	2009	Modified
Siheungdaero	Arterial Road	530	2008	HMA
Gwanangno	Arterial Road	210	2010	Porous
Banpodaero	Arterial Road	880	2009	HMA
Susaengno	Arterial Road	1,300	2007	Modified
Yangcheon-gil	Arterial Road	480	2005	Recycle
Hoam-gil1	Arterial Road	1,400	2011	HMA
Hoam-gil2	Arterial Road	1,200	2011	Modified
Omongno	Arterial Road	1,760	2008	Porous
Jinheungno	Minor Artery Road	2,200	2011	HMA
Sindaebang-gil	Minor Artery Road	620	2010	Porous
Gangseoro	Minor Artery Road	200	2011	HMA
Gonghang-daero	Minor Artery Road	1,180	2006	HMA
Dobongno	Minor Artery Road	870	2008	Recycle
Daebangno	Minor Artery Road	1,500	2009	Recycle

**Table 2.** SPI Equation and Maintenance Criteria[3]

Content	Equation		Criteria
Crack	10-(1.667*Cr0.38)		10%
Rutting	10-(0.267*RD)		15mm
IRI	Urban Expressway	10-(0.8*IRI)	5m/km
	Arterial Road	10-(0.727*IRI)	5.5m/km
	Minor Artery Road	10-(0.667*IRI)	6m/km

**Table 3.** Road Type and Maintenance Scale Coefficient[3]

Road Type Coefficient(K1)			
Road Coefficient	Urban Expressway	Arterial Road	Minor Artery road
K1	0.32	0.11	0
Maintenance Scale Coefficient(K2)			
Maintenance Scale Coefficient	Under 0.5km	0.5~1.0km	Over 1km
K2	1.0	0.990	0.980

$$SPI^* = (SPI - K_1) \times K_2$$

**2.2 포장상태 분석**

**2.2.1 Falling Weight Deflectometer (FWD)**

FWD 시험은 대표적인 비파괴시험(NDT, Non-Destructive Testing)으로 포장의 구조적 지지력 및 견전성을 평가한다. 도로 표면에 순간적인 충격 하중을 전달한 후 포장체의 처짐량을 측정하며 NDT 방법 중에서도 처짐에 근거한 시험법(Deflection Basin Method)이다 [4]. 표준 시험 방법은 ASTM 4694-96(Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impulse Load Device)를 준수한다[5]. 본 연구에서는 haversine의 하중 파형을 나타내며 표준 재하하중, 재하 시간 그리고 재하판의 직경은 각각 40kN, 30ms, 그리고 300mm로 설정하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 FWD 장비는 서울시 품질시험소에서 보유한 KUAB사의 제품이며 10개 노선 20개 구간에 각 3회 측정하여 현장시험을 진행하였다.

**2.2.2 FWD를 활용한 도로 공용성 분석 사례**

텍사스 교통국은 도로포장유지관리시스템(Pavement Management Information System, PMIS)을 현재 도입 적용하고 있다. FWD 정보를 이용한 탄성계수의 역산정

은 포장체의 두께 정보가 필요하다. 이 시스템에는 포장체의 총 두께 정보는 제공되나 각 층별 두께 정보는 존재하지 않는다. 이를 극복하기 위해 텍사스 교통국은 구조적 강성지수(Structural Strength Index, SSI)를 사용하나, 추가적으로 구조적 강성지수를 보완하기 위한 상대강도계수(Structural Number, SN)와 구조적 상태지수(Structural Condition Index, SCI)를 사용하며, 이는 또한 포장의 평가 도구로써 유지보수형식의 결정 자료로 활용된다[6].

인디애나 주에서는 FWD 정보와 더불어 GPR (Ground Penetrating Radar) 정보를 활용하여 포장체의 구조적인 상태를 평가하고 있다. 합리적인 도로포장 유지관리를 위해 포장의 구조적 상태 정보뿐만 아니라 포장체의 두께 정보를 관리하는 시스템도 구축하여 운영하고 있다[7].

**2.2.3 포장잔존수명 역산 탄성계수의 산정 방법**

본 연구에서는 현장 시험을 통해 얻어진 FWD 결과, 현장 채취코어를 통해 확인한 아스팔트층의 두께, 그리고 서울시도의 일반적인 보조기층 설계두께 30cm를 입력값으로 설정하여 Modulus 5.0을 통해 탄성계수를 역산하였다. 탄성계수는 각 포장층의 구조적 상태와 지지력 평가 시에 사용되며, 잔존수명 예측의 입력변수로 이용된다. Fig.1과 같이 잔존수명의 산정절차가 진행된다.

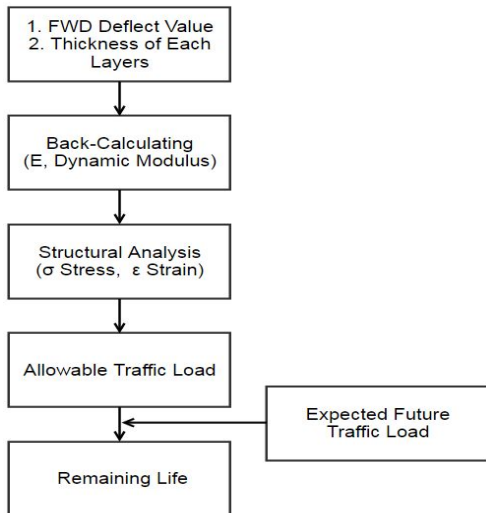


Fig. 1. Flow Chart of Remaining Life Estimation

아스팔트는 온도에 따라 물성변화가 크기 때문에 탄성계수를 기준온도에 맞게 보정할 필요가 있다. 본 연구에서는 기준온도를 20℃로 설정하였고 유효탄성계수는 식(1)을 사용하여 결정하였다.

$$E' = ATAF \times EI \tag{1}$$

여기서,  $E'$ 와  $EI$ 는 각각 유효탄성계수와 온도 보정 전 탄성계수를 의미하며  $ATAF$ (Asphalt Temperature Adjustment Factor)는 온도보정계수이다. 온도보정계수의 산정식은 식(2)와 같다[8].

$$ATAF = 10^{slope \times (T_r - T_m)} \tag{2}$$

$slope$ 는 온도와 탄성계수의 변화관계에서 기울기를 의미하며,  $T_r$ 와  $T_m$ 은 각각 아스팔트층의 기준온도와 측정온도(℃)를 나타낸다. 본 연구에서는 기울기 값은 FHWA(Federal Highway Administration)에서 제시한 -0.021을 사용하였다[8].

**2.2.4 포장체의 잔존수명 분석**

본 연구에서 도로포장의 잔존수명을 예측하기 위해 역학적-경험적 설계 방법(Mechanical Empirical Pavement Design Guide, MEPDG)의 개념을 사용하였다. Fig.1과 마찬가지로 FWD 정보와 코어 채취 정보를 사용하여 포장층의 탄성계수를 역산하였다. 이를 통하여 포장체의 현재 구조적 상태를 규명하고, 이 값들과 구조해석 프로그램인 KENLAYER를 사용하여 응력과 변형률을 계산하였다. 포장체 구조해석 시 아스팔트 탄성계수는 FWD 역산 탄성계수 결과의 85%값을 사용하였고 보조기층 두께는 300mm로 가정하였다.

포장체 내부 응력과 변형률 계산을 4계절로 나누어 수행하였으며 겨울철, 봄과 가을, 여름철의 대표온도를 각각 6℃, 25℃, 45℃로 가정하였다.

포장체의 허용교통량을 산정하기 위해서는 하중의 수 ( $N_f$ )가 중요한 인자로 사용된다. 본 연구에서는 수직변형률과 노상의 회복탄성계수간의 연관성이 중요하다고 판단하여 미국 아스팔트 협회(Asphalt Institute)[9]의 산정식을 참고하여 아스팔트층의 피로균열과 노상층의 소성변형을 계산하기 위해 각각 식(3), (4)를 사용하였다 [10].

$$N_f = 0.0796(\epsilon_{ac})^{-3.291}(E_{ac})^{-0.854} \quad (3)$$

$$N_f = 1.077 \times 10^{18} \left( \frac{10^{-6}}{\epsilon_{sg}} \right)^{4.4843} \quad (4)$$

$\epsilon_{ac}$ 와  $E_{ac}$ 는 각각 아스팔트층 하부의 인장변형률과 탄성계수를 나타내며,  $\epsilon_{sg}$ 는 노상층 상부의 압축변형률을 의미한다.

등가단축하중(ESAL)은 혼합교통의 다양한 영향인자를 일원화하기 위해 표준축하중(18,000lb)으로 환산한 축하중을 말한다. AASHTO 포장 설계(1993)에서는 표준단축하중과 임의 축하중과의 관계를 나타내는 등가단축하중환산계수(ESALf)를 결정하여, 환산누계등가교통량을 산정한다[11]. 환산누계등가교통량을 산정하기 위해 본 연구에 적용된 등가단축하중(ESAL)의 산정은 아래의 식(5)를 적용하였다. 트럭계수는 AASHTO 설계법에서 제시하고 있는 자료인 도심지역 Other Principal 트럭계수를 참고하였다[9].

$$ESAL = (ADT)(T)(TF)(G)(Y)(L) \times 365 \quad (5)$$

일평균교통량(ADT)은 Table 4.에 구간별로 나타나고 이 구간은 추후 허용교통량 산정에 사용될 구간만을 선별하였고 식(5)의 입력변수는 Table 5.에 나타내었다.

**Table 4.** Average Daily Traffic Volume

Section	Time of Maintenance	ADT
Seobu Expressway	2010	117,926
Olympic highway	2011	254,497
Gwanangno	2010	32,696
Siheungdaero	2010	138,937
Gwanangno2	2011	105,549
Gonghangno	2011	63,317
Yangcheon-gil	2011	26,080
Hoam-gil1	2010	56,929
Hoam-gil2	2011	45,851
Gonghang-daero	2010	63,317

**Table 5.** Input Variables

Variable	Description	Value
$T$	Truck Ratio (%)	10
$TF$	Truck Factor	0.23
$G$	Growing of Traffic	4
$Y$	Design life (Year)	20
$L$	Line Distribution Factor	0.7

도로포장의 잔존수명은 현재까지 공용기간을 포함한 총 수명을 계산하고 연평균교통량이 허용교통량에 먼저 도달하는 기간을 잔존수명으로 결정하였다.

## 2.3 분석 결과

### 2.3.1 표면상태조사결과

Table 6.은 총 19개 노선 23개소(보수재료별 구분 시 25개소)로 LTPP구간의 표면상태조사결과이다. Crack, Rutting, IRI 값의 평균은 각각 4.4, 6.4, 2.9를 나타내며, 그 값들을 이용하여 SPI를 산출하였고, 평균 SPI는 7.1로 나타났다.

**Table 6.** Pavement Condition

Section	Pavement Condition			
	Crack (%)	Rut (mm)	IRI (mm/m)	SPI
Seobu Expressway1	1.1	3.2	2.0	8.1
Olympic highway1	0.1	1.1	1.6	8.6
Gangbyeon Expressway1	5.7	9.1	3.1	6.6
Seobu Expressway2	1.5	4.3	2.2	7.6
Olympic highway2	3.3	5.9	2.7	7.2
Gangbyeon Expressway2	0.8	2.6	1.8	8.3
Gangbyeon Expressway3	0.8	2.6	2.0	8.1
Siheungdaero	2.8	5.2	3.5	6.9
Gwanangno	2.6	6.5	2.9	7.2
Banpodaero	1.4	3.8	2.8	7.6
Susaengno	4.9	7.4	2.3	7.1
Yangcheon-gil	4.1	5.7	2.7	7.0
Hoam-gil1	3.0	4.6	3.4	7.2
Hoam-gil2	3.6	5.6	2.4	7.3
Omongno	4.3	3.3	2.9	7.3
Jinheungno	11.9	14.7	3.3	5.7
Sindaebang-gil	3.5	4.5	3.7	6.9
Gangseoro	2.7	4.4	2.3	7.9
Gonghang-daero	12.0	9.9	4.0	5.8
Dobongno	16.5	17.9	2.5	5.5
Daebangno	5.6	6.5	3.0	6.9

다음 Table 7.와같이 도로등급별 SPI 구분 결과 도시고속도로가 가장 높은 SPI를 보이고 주간선도로, 중앙버스전용차로, 보조간선도로 순으로 나타나, 도로중요도 순으로 유지관리 되고 있으며, 버스전용차로의 경우는 일반적으로 인지되고 있는 바와 같이 저속 중차량 버스축하중의 영향 등으로 파손이 빈번히 일어나 가장 낮은 유지관리 수준임을 유추할 수 있다.

**Table 7.** Pavement Condition by Road Type

Road Type	SPI	Crack	Rut	IRI
Urban Expressway	7.8	1.9	4.1	2.2
Arterial Road	7.2	3.3	5.3	2.9
Minor Artery road	6.4	8.9	10.0	3.1
Bus Lane	6.6	3.0	6.1	4.0

또한, 보조간선도로의 경우, 소성변형과 균열이 주 파손원인인 반면, 중앙버스전용차로는 평탄성과 소성변형이 주 파손원인으로 나타났다. 이는 보조간선도로의 경우 도로의 유지보수 주기가 주간선도로나 도시고속도로보다 상대적으로 긴 반면 교통량의 차이는 크지 않기 때문에 노화에 의한 균열과 소성변형이 가장 큰 파손의 원인으로 판단되며, 버스전용차로의 경우는 버스가 서행하거나 정지하는 정류장과 교차로 주변 등의 소성변형 때문에 평탄성에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

**2.3.2 코어채취와 처짐량 결과**

전반적인 노면상태 조사결과는 양천길(양천향교역) 구간을 제외한 대부분의 구간에 걸쳐 포장상태가 양호하다. 그러나 실제로는 포장상태가 표면상태 조사 결과보다 열악하여 유지보수기간이 도달되지 않았더라도 시민의 통행안전을 위해 긴급히 절삭 재포장 되었거나, 또는 긴급포장 등으로 인해 유지보수 이력 자료가 미비한 구간들로써 보수년도와 조사시점의 SPI가 차이가 발생한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 공용 후 5년 경과된 구간(2010년에서 2011년 사이)중 도시고속도로, 주간선도로, 보조간선도로, 중앙버스전용차로에 대해 대표 재료인 일반아스팔트 콘크리트와 개질아스팔트 콘크리트 포장 재료가 적용된 위의 Table 8.에서의 코어채취 결과를 보드시 피 총 10개 노선 20개의 해당구간만을 대상으로 현장 코어채취 및 FWD 지지력 조사를 시행하였다. 서부간선

의 경우는 층별 구분이 어려워 확인이 불가하였고, 공항대로는 하부 포장층 재발견으로 심도의 정확도가 낮아졌다.

**Table 8.** Core Data

Section	Distance (from start point)	Total Thickness (cm)	Surface (cm)	Interlayer (cm)	Base (cm)
Seobu Expressway	400m	23	6	9	8
	800m	23.5	-	-	-
Olympic highway	900m	23	7.1	7.8	8.1
	1800m	25.5	4	10.3	11.2
Gwanangno	70m	21.9	5	6.4	10.5
	140m	21.3	4	9	8.3
Siheungdaero	200m	28	7	5	16
	400m	28	7	5	16
Gwanangno2	400m	15.6	6.3	4.2	5.1
	800m	13.3	4.8	4.8	3.7
Gonghangno	400m	21	6	8.2	7.3
	800m	20.3	4	8.9	7.4
Yangcheon-gil	700m	21.8	5.5	7.9	8.4
	1400m	15.9	4.7	5.1	6.1
Hoam-gil1	200m	21.9	5	7.5	9.4
	400m	19	5	6	8
Hoam-gil2	100m	23	6.3	6.9	9.8
	200m	14.3	6.3	5.8	2.2
Gonghang-daero	400m	17.1	6.2	4.3	6.6
	800m	26.4	5	10	11.4

코어채취와 마찬가지로 LTPP구간 10개 노선 20개 구간에 대하여 FWD 시험을 실시하였다. FWD 시험은 100m 마다 3회 실시하여, 하중재하판 중앙의 D0센서와 하중재하판 중앙에서 150cm 이격된 거리에 위치한 D7센서에서 측정된 처짐값을 취득하였다. 평균값, 표준편차, 변동계수를 구하여 다음 Table 9.에 나타내었다.

Table 9.에서 D0은 아스팔트 포장층 전체의 지지력을 의미하며, D7은 노상층의 지지력을 의미한다. D0의 경우, 평균 처짐값이 377 $\mu$ m이며, 공항대로를 제외한 대부분의 구간의 변동계수가 35%이하로 지점별 변동성이 적은 것으로 나타났다. D7의 경우에는 평균 처짐값이 28~80 $\mu$ m이나 과반 이상의 구간에서 변동계수가 35% 이상으로 지점별 변동성이 심한 것으로 나타났다.

**Table 9.** FWD Deflection Result

Section	D0 Center Deflection ( $\mu\text{m}$ )			D7 150cm Deflection ( $\mu\text{m}$ )		
	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
Seobu Expressway	230.0	43.2	18.8	45.3	16.6	36.6
Olympic highway	202.3	56.4	27.9	28.3	8.1	28.7
Gwanangno	472.7	145.7	30.8	78.7	46.6	59.3
Siheungdaero	410.8	86.5	21.1	53.7	15.6	29.1
Gwanangno2	256.0	47.7	18.6	28.4	5.0	17.7
Gonghangno	431.4	140.9	32.7	58.7	21.4	36.4
Yangcheon-gil	371.6	88.8	23.9	63.3	29.2	46.1
Hoam-gil1	527.9	170.7	32.3	50.9	14.7	28.9
Hoam-gil2	441.0	86.1	19.5	42.7	19.6	45.9
Gonghang-daero	427.3	199.0	46.4	55.8	14.5	26.0
Average	377.1	106.50	27.20	50.58	19.13	35.47

**2.3.3 잔존수명의 산정 결과**

다음의 Table 10.은 ADT 자료를 이용하여 실제 연평균 교통량을 산정하고 등가단축하중을 계산하였으며 그리고 구간별 피로균열과 소성변형에 의하여 파손되기까지의 허용교통량을 산정하였다. 그리고 총 수명을 계산하고 공용기간을 제외한 잔존 수명을 결정하였다.

FWD처짐값과 아스팔트층 포장두께를 이용하여 역산한 아스팔트층, 보조기층, 노상층의 탄성계수를 사용하여 LTPP구간 포장의 허용교통량을 계산하여 현재까지의 공용기간을 포함한 총수명과 잔존수명을 예측하였다. 이 구간의 잔존수명은 1~5년으로 결정되었다. 특히 올림픽대로, 공항대로, 시흥대로, 호암길 구간에서 잔존수명이 2년 이하로 산정되어 이 구간들의 포장은 단면 보수가 다른 구간에 대비하여 우선적으로 시행되어야 할 것으로 판단된다.

**Table 10.** Estimation of Remaining Life

Section	ESALs	Allowable Traffic Load (Crack)	Allowable Traffic Load (Rutting)	Total Life (Year)	Remaining Life (Year)
Seobu Expressway	832,284	3,675,337	500,283,525	9.4	4.4
Olympic highway	1,796,157	1,997,900	186,120,201	5.1	1.1
Gwanangno	115,377	419,709	12,474,593	8.6	3.6
Siheungdaero	490,286	219,152	13,670,695	5.5	0.5
Gwanangno2	372,465	955,157	80,335,573	6.6	2.6
Gonghangno	223,434	291,133	11,317,216	5.3	1.3
Yangcheon-gil	92,030	388,686	21,261,915	8.2	4.2
Hoam-gil1	200,892	327,435	29,547,343	6.6	1.6
Hoam-gil2	161,800	244,008	13,512,974	5.5	1.5
Gonghang-daero	223,434	216,420	8,391,925	6.0	1.0

**2.3.4 보수 우선순위 결정**

다음 Table 11.과 Table 12.와 같이 LTPP구간의 10 개 노선 중 먼저 보수가 필요한 구간의 순위를 결정해 등급을 나누어 보았다. 계산된 잔존수명과 표면상태 (IRI, Rutting, Crack, SPI)를 통한 보수우선 순위 등급 결과이다.

**Table 11.** Maintenance Priority Grade(Main Factor)

Section	FWD Data		SPI	
	Remaining Life(Year)	Maintenance Priority Grade	SPI Value	Maintenance Priority Grade
Seobu Expressway	4.4	10	8.1	10
Olympic highway	1.1	3	7.2	5
Gwanangno	3.6	8	7.2	4
Siheungdaero	0.5	1	7.0	3
Gwanangno2	2.6	7	7.2	6
Gonghangno	1.3	4	7.3	7
Yangcheon-gil	4.2	9	7.3	8
Hoam-gil1	1.6	6	6.9	2
Hoam-gil2	1.5	5	7.9	9
Gonghang-daero	1.0	2	6.8	1

Table 12. Maintenance Priority Grade(Individual Factor)

Section	IRI		Rut		Crack	
	IRI (mm/m)	Priority Grade	Rut (mm)	Priority Grade	Crack (%)	Priority Grade
Seobu Expressway	2.0	10	3.2	10	1.1	10
Olympic highway	2.7	7	5.9	3	3.3	6
Gwanangno	2.9	4	6.5	2	2.6	9
Siheungdaero	2.7	6	5.7	4	4.1	3
Gwanangno2	3.4	3	4.6	6	3.0	7
Gonghangno	2.4	8	5.6	5	3.6	4
Yangcheon-gil	2.9	5	3.3	9	4.3	1
Hoam-gil1	3.7	1	4.5	7	3.5	5
Hoam-gil2	2.3	9	4.4	8	2.7	8
Gonghang-daero	3.4	2	6.9	1	4.2	2

보수우선순위등급 결과는 지지력 기반 순위 등급과 다른 표면 상태에 따른 순위 결과와는 일부 상이함을 알 수 있다. 예로, 시흥대로와 같이 지지력기반의 잔존수명이 적어 보수 우선순위가 높더라도 표면상태 결과는 우수한 상태인 경우가 존재한다.

2.3.5 우선순위의 상관도 분석

Fig. 2에서와 같이 각각의 표면상태 지수 기반의 보수 우선순위등급과 지지력을 기반의 우선순위등급을 비교 분석해보았다.

그러나 구간 중 일부구간에서는 포장상태에 미치는 영향이 타 구간과는 다르다고 판단하여 제외하였다. 관악로는 터널 출구로 인한 감속구간에 해당하여 비교적 포장손상이 같은 교통량에 비해 많이 발생할 가능성이 매우 높았고, 양친길은 도로인접구간 공사로 인해 3차로 중 최 외측 1개차로가 통제되어 3차선의 우회전차량과 기존 교통량이 2개의 차로로 모여 포장층의 부담이 증가 하였으므로 기존의 다른 구간과는 특이구간으로 판단되어 제외하였다.

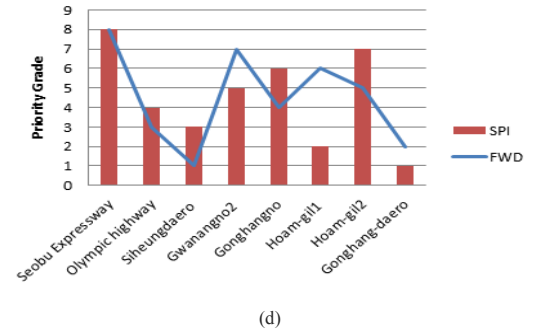
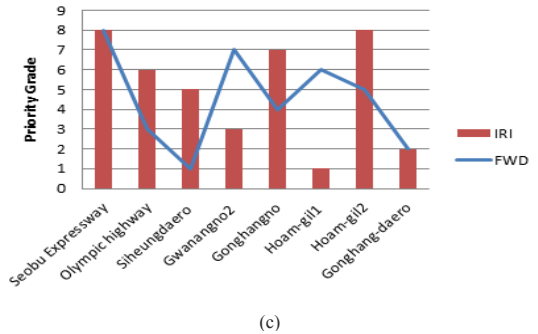
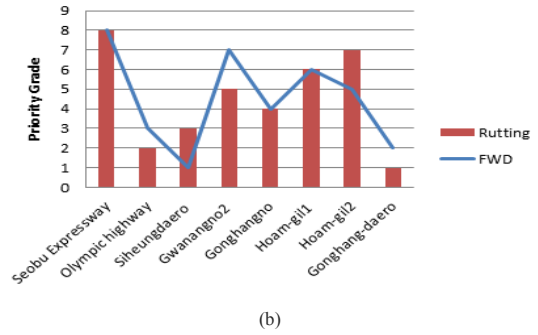
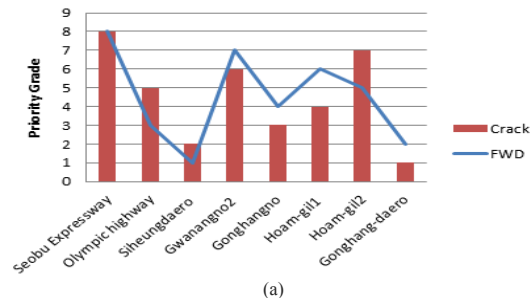
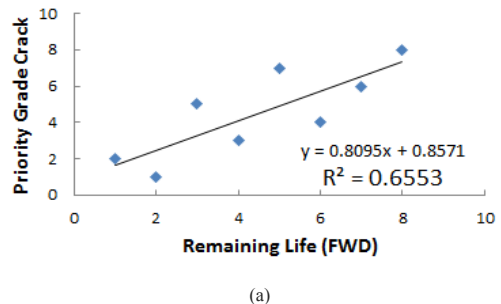


Fig. 2. Analysis of Priority Grade with Index (a) Analysis of Priority Grade with Crack (b) Analysis of Priority Grade with Rutting (c) Analysis of Priority Grade with IRI (d) Analysis of Priority Grade with SPI





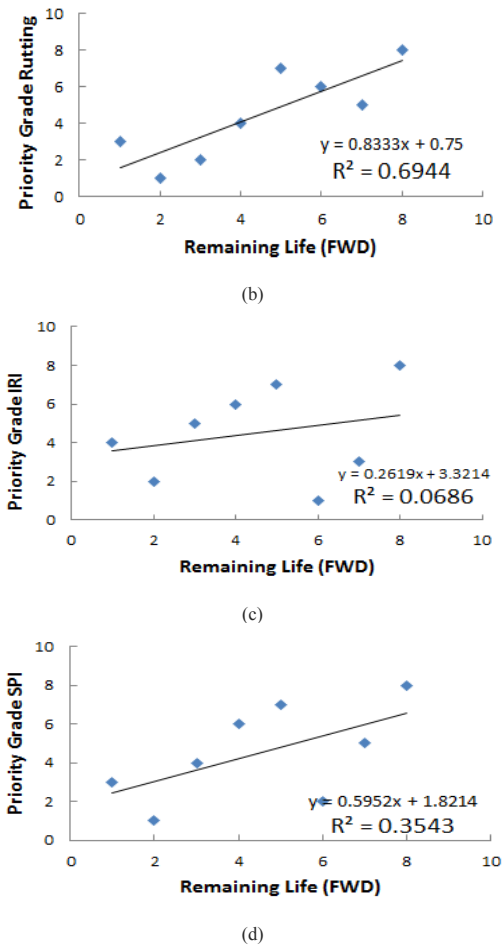


Fig. 3. Correlation of Index Priority Grade with FWD (a) Correlation of Crack Priority Grade with FWD (b) Correlation of Rutting Priority Grade with FWD (c) Correlation of IRI Priority Grade with FWD (d) Correlation of SPI Priority Grade with FWD

특이구간을 제외한 각 구간 표면상태 지수 기반의 보수 우선순위등급과 지지력을 기반의 우선순위등급을 비교 분석해보았고 위의 Fig. 3에 나타내었다.

특이구간을 제외한 구간에 대해 지지력과 육안조사결과과는 Crack과 Rutting에 대해서 R-square값이 0.65이상으로 상관도가 높은 수준으로 나타나고 있다. 이는 본 연구에서 사용한 파손모형이 피로균열과 소성변형을 중심으로 해석되어 잔존수명을 결정하였기 때문에 IRI(중단 평탄성)의 경우 하부 지지력과는 상관도가 매우적은 수준으로 나타났고 SPI의 경우도 Rutting, Crack, IRI가 모

두 포함된 지수이므로 상관도가 비교적 낮아지는 것으로 나타났다.

따라서 다중회귀분석을 통하여 상관성이 높은 균열과 소성변형 인자를 동시에 고려했을 때 잔존수명에 미치는 영향을 평가한 결과, 다음의 table 와 같이 다중상관계수 (Multiple R)은 0.864441, R<sup>2</sup>는 0.747259, y절편 (Intercept)은 0.414474 이었다.

즉 소성변형과 균열 각각의 단일변수에 따른 잔존수명 예측결과와의 R<sup>2</sup>인 0.65, 0.69인 것보다 두 인자가 동시 고려된 다중변수에 따른 R<sup>2</sup>=0.75로 더 높은 상관성을 나타내었다. 따라서 포장상태 평가시 소성변형 및 균열과 함께 FWD조사에 의한 치짐값을 함께 고려하여, 보다 정확한 보수우선순위를 찾아낼 수 있을 것이다.

Table 13. Multi Regression Analysis Result for Rutting and Crack

Regression Statistics	
Multiple R	0.864441
R Square	0.747259
Adjusted R Square	0.646162
Standard Error	1.457061
Observations	8

(Intercept = 0.414474)

### 3. 결론

현재 포장 표면상태를 나타낸 지수만을 고려하여 유지보수를 시행한 경우 하부 구조적 능력이 불량하여 예상보다 빠른 포장손상이 나타날 가능성이 높다. 즉, 도로의 위치, 교통량, 노상상태 등 각각의 환경조건이 다르므로 표면상태(Visual Inspection) 결과만으로는 도로포장 상태를 정확히 판단하기가 어렵다. 따라서 추가적으로 지지력 기반의 공용성 평가모형 개발 및 적용이 선행되어야할 과제이기는 하지만, 포장 유지보수 우선순위 결정시 표면상태조사(Rutting 및 Crack 파손정도) 결과와 함께 지지력 기반의 FWD 조사 분석 결과를 함께 반영한다면, 상대적으로 더욱 적절한 시기와 대상구간에 유지보수가 시행됨으로, 공용성이 개선된 안전한 도로포장을 시민에게 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 선정되어 있는 LTPP구간의 경우는 기존 도로에 적용된 공법의 배합설계, 포장두께 및 시공연도, 주기적인 포장 표면상태 및 하부상태 조사결과, 교통량 등 정확

한 초기값이 누락되어 있어 도로조건에 따른 공법의 특성, 포장표면상태 변화에 따른 공용수명 감소정도 등의 데이터를 통한 적정 유지보수 공법 및 보수시기 판단을 위한 신뢰성 있는 결과를 제공하기 어렵다.

따라서 대표노선 선정 후 LTPP구간으로 지정하고 시공 예정구간의 코어를 채취하여 기존 포장의 두께 및 하부상태를 파악하여야 한다. FWD 조사를 실시하여 하부층의 지지력을 계절별로 조사하고, 정확한 교통량을 산정, 자동포장 표면상태 조사장비를 활용하여 노면결함 결과와 함께 시공 시 적용공법의 배합설계 자료에서부터 시공구간의 단면두께 설계자료, 시공 시 유의사항 등 유관된 상세자료를 DB화하여 추적조사를 지속적으로 실시해야 한다. 즉, 하부상태 조사 분석 결과와 함께 표면상태 조사 분석 결과를 통합관리하고, 지속적인 장기 공용성 추적조사 결과를 활용하여 다양한 조건에 따른 도심지 도로포장의 공용성에 대한 문제점을 분석 평가하고 그 결과를 통해 내구성 및 공용수명 증진방안을 제시할 수 있을 것이다.

## References

- [1] The Seoul Institute, Policy project research report, Development of Integrated Pavement Management Policies in Seoul, Vol. 12, pp. 1-191, 2011.
- [2] Seoul Metropolitan Government Pavement Research Center, Evaluation on Sub-layer of Long-Term Pavement Performance Sections Analysis Research Report, Quality Inspection Office Division, Seoul Metropolitan Government, 2015.
- [3] Seoul Metropolitan Government, Condition Survey and Pavement Evaluation Report, 2013.
- [4] R. Foinquinos, "Dynamic Nondestructive Testing of Pavements", *Geotechnical Eng Center University of Texas at Austin*, Report No. GR95-4, 1995.
- [5] Annual Book of ASTM Standards, ASTM D 4694-96, Standard Test Method for Deflections with a falling weight type impulse load device. Section 4, Volume 04.03, 1996.
- [6] Z. Zhang, G. Claros, L. Manuel, I. Damjanovic, "Evaluation of The Pavement Structural Condition at Network Level Using Falling Weight Deflectometer (FWD) Data", The 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington. D. C, 2003.
- [7] A. Noureldin, K. Zhu, S. Li, D. Harris, "Network Pavement Evaluation With Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar", *Transportation Research Board 1860*, pp. 90-99, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1860-10>

- [8] E. O. Lukanen, R. Stubstad, R. Briggs, "Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement," *FHWA, U.S. Department of Transportation*, FHWA-RD-98-085, 2000.
- [9] Asphalt Institute, Thickness Design-Asphalt Pavement for Highway & Street, Manual Series No. 1, 1991.
- [10] Huang, Y, "Pavement Analysis and Design", *Prentice Hall. University of Kentucky*, 1993.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

## 이 상 염(Sang-Yum Lee)

[정회원]



- 2000년 8월 : 경희대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 12월 : 미국 North Carolina State Univ. (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 2015년 3월 : 서울특별시청 도로관리과 및 도로포장 연구센터
- 2015년 4월 ~ 현재 : 인덕대학교 건설정보공학과 조교수

<관심분야>

건설재료, 도로포장 유지관리, 도로합물