

# 고속도로 줄눈 콘크리트 포장의 평탄성 모델 개발

## Development of Roughness-Model for Jointed Plain Concrete Pavements in Express Highway

박 영 훈 Park, Young Hoon  
전 범 준 Chon, Beom Jun  
김 영 규 Kim, Young Kyu  
이 승 우 Lee, Seung Woo

정회원 · (주)바우컨선타트 도로부 사원 (E-mail : gosu0729@naver.com)  
정회원 · Post-Doctoral Researcher, Public Policy Center, University of Iowa (E-mail : najunya@gmail.com)  
정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : kingdom1980@nate.com)  
정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : swl@gwnu.ac.kr)

### ABSTRACT

Roughness is the most important factor to maintain the road performance, and affects greatly on the design life in Jointed Plain Concrete pavements. Also, the factors the evaluate pavement's commonality is the three method such as functionality, safety and structural performance. In evaluating function of road, representative factors is the roughness, which has been used to determine maintenance time as key standard. As research for roughness is absence in pavement design. Applied roughness-model had a low-reliability in Korea. Therefore, it is needed to develop reliable model in road roughness. In this research, uniform specific is applied to distribute them after selecting the concrete pavements. Concrete pavement is divided by sections of 238. Total length of this sections has 281km and account for 16% of total road length in korean concrete pavements for selected sections. Considering the korean roughness-model, the evaluation of roughness is performed for the freezing index, average annual rainfall, condition for the base, the amount of traffic as well as spalling(%), cracking(%), age(year) at the selected section at the selected section. Also, additional sections is selected to evaluate various age which affects on the roughness. As a result of the analysis, it showed that spalling(%), cracking(%), age(year), and the condition of the base affected road roughness. When the correlation with the road roughness was analyzed, the reliable model for road roughness was proposed, and the ratio that can explain road roughness was R<sup>2</sup>-68.8% and P value-0 which is statistically meaningful.

### KEYWORDS

*roughness, spalling, cracking, age, base, the amount of traffic, average annual rainfall, freezing index, serviceability, correlation, IRI-model*

### 요지

평탄성은 도로 공용성을 확보하기 위한 중요한 인자이며, 줄눈콘크리트 포장에서 수명에 큰 영향을 미친다. 포장의 공용성을 평가하는 요소로는 크게 기능성 평가, 안정성 평가 및 구조적 성능 평가가 있다. 기능성 평가 가운데 가장 대표적인 평탄성은 유지보수를 위한 중요한 기준으로 이용되고 있으나 체계적인 연구를 통해 포장 설계시에 적용하기 위한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 신뢰성 있는 평탄성 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 국내 콘크리트포장의 노선별 총 연장 280.93km를 일정기준으로 나누어 238개의 섹션으로 선별하였다. 또한, 현재 국내 평탄성 모델에서 고려하고 있는 영향인자인 스폐링, 균열, 재령뿐만 아니라 동결지수, 연평균강수량, 기층조건, 교통량 등에 대한 검토가 이루어졌으며, 재령의 다양화를 위하여 추가적인 노선을 선별하여 평탄성에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 이루어졌다. 분석결과 스폐링(%), 균열(%), 재령(년), 기층이 평탄성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 통해 평탄성과의 상관관계를 분석한 결과 신뢰성 있는 평탄성 모델이 도출되었으며, 평탄성을 설명할 수 있는 비율은 68.8%로 나타나 통계적으로 유의한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 소입경 골재노출콘크리트포장의 시험시공을 실시하여 초기 공용성을 평가하였으며, 이를 통하여 적정 강도, 저소음 및 적정 미끄럼저항을 확보함을 확인하였다.

### 핵심용어

*평탄성, 스폐링, 균열, 재령, 기층, 교통량, 연평균강수량, 동결지수, 공용성, 상관관계, 평탄성 모델*

# 1. 서론

## 1.1. 연구배경 및 목적

도로설계 및 시공에 있어 평탄성은 도로포장을 평가하는 중요한 인자이며, 설계수명에 큰 영향을 미치고 있다. 포장의 공용성을 평가하는 요소로는 크게 기능성 평가, 안정성 평가 및 구조적 성능 평가가 있다. 기능성 평가 가운데 가장 대표적인 평탄성은 유지보수를 위한 중요한 기준으로 이용되고 있으나 체계적인 연구를 통해 포장 설계시에 적용하기 위한 연구는 미흡한 실정이다. 현재 국외에서는 평탄성의 영향인자를 파악하기 위해서 다양한 연구가 이루어졌으며, 이를 포장설계에 반영하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국외에서 사용되고 있는 평탄성의 영향인자를 분석한 후, 이를 선별하여 실제 평탄성 측정을 통해 수집한 자료와의 상관성 분석을 통해 신뢰성있는 평탄성 모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 기존의 평탄성 모델에서 고려하고 있는 영향인자인 스폴링, 균열, 재령뿐만 아니라 동결지수, 연평균강수량, 기층조건, 교통량 등 다양한 인자들의 검토가 이루어졌으며, 재령의 다양화를 위하여 추가적인 노선을 선별하여 평탄성에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 이루어졌다.

## 2. 평탄성 지수 모형의 검토

### 2.1. 국제 평탄성 지수(International Roughness Index) 정의

1982년 세계은행(IBRD)의 후원으로 브라질의 수도 브라질리아에서 미국을 포함한 영국, 프랑스, 벨기에, 브라질 등 총 5개국의 전문연구기관들이 공동으로 참여하여 국제 도로 평탄성 실험(International Road Roughness Experiment)이라는 프로젝트를 수행하였다. 이를 통해 국제적으로 통용될 수 있는 평탄성 지수를 개발하였으며, 다양한 종류의 자동식 측정기에서 측정된 결과를 통해 국제 평탄성 지수를 산정할 수 있게 되었다. 국제 평탄성 지수는 평균정류경사라고 하여 25cm간격으로 읽어 들인 각각의 데이터에서 정류경사를 합산하여 평균한 값으로 그 단위는 m/km, in/mi로 나타내며, 이는 자동차 차대의 수직운동 누적값을 자동차가 주행한 거리로 나눈값을 의미한다. 즉, IRI는 자동차 트레일러에 장착된 로드 미터에 의해 측정된 값과 관련 있는 표준 평탄성 측정값이며, Quarter Car simulation으로 차량의 운전자가 느끼는 도로의 노면 요철을 평가하고자 하였다.

### 2.2. 평탄성 지수 모형의 고려인자 분석 및 선정

평탄성 지수 모형을 제안하기 위해서는 평탄성에 영향을 주는 인자에 대한 검토가 요구된다. 표 1은 국내·외의 평탄성 모델에 반영되어 있는 평탄성 영향인자를 나타낸다. 국외 기준인

SHRP P-020(Simpson et al.(1994)), LTPP Data Analysis(Titus-Glover et al.(1999)), FHWA RPPR(yu et al.(1998)), AASHTO IRI Model(NCHRP, 2002)를 통해 평탄성의 영향인자를 분석한 결과를 보면 파손, 하중조건 및 개방조건, 기후조건, 기층조건 등의 다양한 인자들이 평탄성에 영향을 미치고 있다. 반면, 기존 한국형포장설계의 평탄성 모델에서는 스폴링, 균열, 재령만이 고려되어 있어 사용에 한계가 있음을 알 수 있다.

다음 표 1과 표 2는 국외 평탄성 지수 모형을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 국외 기준 및 국내 여건을 고려하여 평탄성 영향인자를 선별하여 데이터베이스를 구축하였다. 국내·외 문헌 조사를 통해 스폴링, 균열은 평탄성에 영향을 미치는 것으로 판단되어 파손조건으로 선정하였으며, 하중조건 및 개방조건으로는 재령, 등가단축하중을 선정하였다. 또한, 국내 기후가 세계 및 동결기간을 가지고 있기 때문에 연평균강수량, 동결지수를 선정하였으며 이 중 강수조건으로 일평균강수량, 장마기간인 6~9월의 연평균강수량 등 다양한 강수조건에 대해서 분석하였다. 기층조건으로는 기층의 형태를 고려하였다. 평탄성에 영향을 주는 인자인 파손, 하중조건 및 개방조건, 기후조건, 기층조건 네 가지가 모두 포함될 수 있도록 영향인자를 선정하여 검토하였다.

### 2.3. 평탄성 지수 모형의 개선을 위한 신뢰성 분석작업

#### 2.3.1. 평탄성 분석 대상 구간의 선정

본 연구에서는 기준인자(스폴링, 균열, 재령)들과 추가영

표 1. 국외 평탄성 지수모형 (한국도로공사, 2001)

기준	국외 평탄성 지수모형
2002 AASHTO	$IRI = IRI_0 + 0.013 \times CRACKED + 0.007 \times \%SPALL + 0.001 \times TFAULT + 0.03 \times SITE$
	고려인자: 균열, 스폴링, 평균준단차, 지역계수 (재령, 동결지수, 노상재료)
SHRP P-200	$IRID = 105.9 + 159.1 \times \left( \frac{AGE}{KSTATIC} \right) + 2.16 \times JTSPAC 'E - 7.127 \times THICK + 13.49 \times EDGESU$
	고려인자: 재령, 역산정적지지력, 준단차, 슬래브두께, 가장자리의 지지상태
LTPP Data Analysis	$IRI = 82.56 + KESAL^{0.4} \times (0.01 \times WETDAYS + 0.72 \times ZONE) + AGE^{0.4} \times (0.00506 \times FI + 1.57 \times 10^{-6} \times E_{PCC} - 3.5 \times SUBGRADE - 3.07 \times DOWELDIA)$
	고려인자: 등가단축하중, 강수조건, 기후조건, 재령, 동결지수, PCC탄성계수 노상형식, 다웰의 직경
FHWA RPPR	$IRI = 99.59 + 2.6098 \times TFAULT + 2.2802 \times TCRACK^3 + 1.8407 \times \%SPALL$
	고려인자: 누적준단차, 균열수, 스폴링률

표 2. 평탄성에 영향을 주는 인자

변수	파손					하중조건 및 개방조건		기후조건					기층조건							회귀분석결과				
	가로 줄눈 단차	가로 줄눈	누적 줄눈 단차	스폴링	균열	재령	등가 단축 하중 (18-kip)	연평균 동결해 주기	연평균 강수량	연평균 습한 날의 수	LTPP 기후 지역	동결 지수	가로 줄눈 간격	PCC 슬래브 두께	PCC 탄성 계수	기층 형태	P <sub>0.0075</sub> 노상 재료 비율	평균 노상 지지력 계수	노상 형태	길어깨와 결속 여부	다웰 직경	N	R <sup>2</sup>	SEE (in/mi)
SHRP P-020 (Simpson et al. (1994))						○	○	○	○			○	○		○		○	○	○			28	0.64	31.29 (in/mi)
LTPP Data Analysis (Titus-Glover et al. (1999))						○	○			○	○	○			○				○		○	155	0.5	22 (in/mi)
FHWA RPPR (yu et al. (1998))	○	○		○																		144	0.61	64.1 (in/mi)
AASHTO IRI Model (2002)			○	○	○	○						○					○					183	0.7	22.2 (in/mi)
KPPR 평탄성 모델				○	○	○																188	0.237	

향인자(동결지수, 연평균강수량, 기층조건, 교통량)를 고려한 데이터베이스 구축작업을 수행함과 동시에 샘플링의 합리화를 위하여 다양한 인자의 폭넓은 변화량이 데이터베이스에 포함될 수 있도록 랜덤하게 구간을 선정하였다. 또한, 남해선, 중부선, 중앙선, 호남선, 영동선 등의 기존 구간과 새로 추가되는 구간인 88선 데이터를 이용하여 다양한 요소를 고려하였다.

국내 고속도로 콘크리트 포장에서도 다양한 손상들이 나타나기는 하지만 축대의 확보, 다웰바의 설치, 보수적인 슬래브 두께 적용 등으로 인해 단차나 블로우업과 같은 형태의 손상은 거의 나타나지 않으며 주로 스폴링, 균열, 표면열화(스케일링) 등이 주된 손상으로 알려져 있다. 표면손상 및 재령과 평탄성과의 상관관계 분석을 위해 사용된 자료는 '2005, 2006, 2007 고속도로 정기 포장상태 조사 및 분석 보고서' ((주)로드코리아)의 데이터를 이용하였으며 대상 구간 현황은 다음 표 3과 그림 1에 나타내었다.

표 3. 분석 대상 구간 현황

노선	총연장 (km)	적용연장 (km)	섹션수 (개)	평탄성평균 (m/km)
계	1572.6	280.93	238	1.98
남해선	169.3	61.23	47	1.97
중부선	323.5	40.26	36	1.65
중앙선	386.1	93.08	74	1.59
호남선	276.3	30.24	25	1.86
영동선	234.4	38.95	36	1.69
88선	183	17.17	20	3.13



그림 1. 분석 대상 구간 현황

### 2.3.2. 평탄성 영향인자의 적용기준

본 연구에서는 우선적으로 평탄성에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단되는 스폴링, 균열, 및 단면보수에 대한 기준을 표 4로 나타냈으며, 이외의 교통량, 수정동결지수, 연평균 강수량, 기층조건에 대한 검토가 이루어 졌다. 교량부 및 터널부를 제외한 순수 토공부에 대해서 최소연장 300m 이상인 구간을 하나의 섹션으로 정하였으며, 각 섹션별 슬래브 수 및 줄눈 수에

대하여 손상이 발생한 개소를 손상률(%)로 나타내었다.

표 4. 손상의 분류 기준 (건설교통부, 2008)

손상종류	손상 개소	발생률(%)
균열	균열발생 슬래브 개소	(균열 발생 슬래브개소/분석구간 슬래브수) × 100
스폴링	스폴링발생 줄눈 개소	(스폴링 발생 줄눈개소/분석구간 줄눈수) × 100
단면보수	- 슬래브 중앙에 위치할 경우 균열로 간주 - 줄눈부에 인접할 경우 스펀링으로 간주	

일반적으로 스펀링(spalling)이란 콘크리트 포장에서 줄눈 또는 균열 부근에서 콘크리트 조각이 떨어져나가는 파손을 뜻한다. 본 연구에서는 현재 국내에서 사용되는 평탄성 모델의 데이터 수집과 동일한 조건을 유지하기 위해서 균열 및 스펀링에 대한 손상을 슬래브 개소로 나타내었으며, 발생률 역시 슬래브의 수에 대한 비율로 정의하였다.

스폴링은 서비스등급에 따라 스펀링 상(스폴링 > 150mm), 중(75mm < 스펀링 < 150mm), 하(스폴링 < 75mm)로 분류되고 있으며, 이에 대한 기준은 그림 2와 같이 줄눈부 윗면 부분의 파손은 평탄성에 영향을 줄 수 있기 때문에 스펀링으로 분류하였으며, 우각부 및 모서리 파손은 평탄성에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단되어 스펀링에서 제외하였다. 또한, 그림 3과 같이 슬래브 중앙의 횡방향 균열 및 슬래브 중앙의 부분보수가 이루어진 부분은 평탄성에 영향을 미칠 것으로 판단되어 균열로 분류하였으며, 단부 균열 및 종방향 균열은 평탄성에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단되어 균열의 분류에서 제외하였다. 또한, 도로포장의 동결심도를 결정하는데 사용하는 값을 설계동결지수라고 하며, 동결지수의 산정은 대상지역의 인근 측후소에서 관측한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간의 평균동결지수로 정하였다. 만일 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대 동결지수를 산정하였다. 연평균강수량에 대해서는 기상청의 일평균 강수량 자료를 사용하였다. 기상청에서 운영 중인 전국 총 76개의 측후소에서 과거 10년 동안의 기상자료를 통하여 산정하였으며, 교통량은 교통량연보를 각 차종별 축하중 분포에 따라 누적 축하중으로 산정하였다. 재령의 경우에는 고속도로 정기 포장상태 조사결과를 이용하여, 준공년도부터 최근 평탄성 조사시점까지로 선정하였다. 이와 같은 평탄성 지수모형의 적용기준을 표 5에 정리하였다. 스펀링률은 조인트부분에서 발생한 스펀링 중 파손등급 상, 중에 해당하는 스펀링을 고려하여 비율로 나타냈으며, 균열율의 경우 횡방향으로 발생한 균열 중 파손 등급 상, 중에 해당하는 균열을 비율로 나타내었다. 연평균강수량의 경우는 고속도로가 건설된 시점의 강수량을 기점으로 마지막 평탄성 조사시점까지의 강수량을 연평균으로 나타내었으며,

수정동결지수는 조사시점의 지역 측후소 데이터를 이용하여 'F-days'로 나타내었다. 교통하중의 경우 차종별 연평균 교통량데이터를 통해 차종별 설계차로 교통량 설정을 위해 방향 및 차로 분배계수를 반영하여 차종별 축하중 분포에 따라 누적 축하중을 산정하였다. 또한, 기층의 경우는 Indicator Variable 분석을 이용하여 쇄석기층일 경우 1, 린기층일 경우 0을 적용하였다.

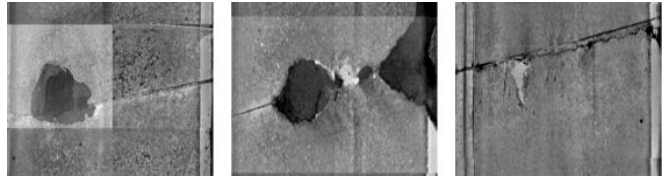


그림 2. 포장손상에 따라 스펀링으로 분류된 사진

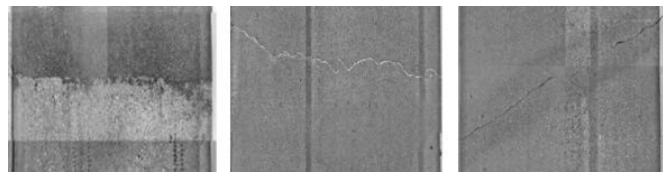


그림 3. 포장손상에 따라 균열로 분류된 사진

표 5. 평탄성 지수 모형의 영향인자 및 적용기준

변수명	적용 기준	
$IRI_0$	초기평탄(m/km)	초기 평탄성을 나타내며 최종 회귀식을 통하여 도출
$\Delta IRI$	공용 개시 후 평탄성(m/km)	공용개시 후의 평탄성 증가 경향을 나타내며 영향인자의 민감도 분석을 통하여 도출
$IRI$	평탄성(m/km)	초기평탄성과 평탄성 증가분의 합을 통하여 도출 ( $IRI = IRI_0 + \Delta IRI$ )
Spalling	스폴링률(%)	총 슬래브 중 스펀링 발생슬래브의 비율(개소)
Cracking	균열율(%)	총 슬래브 중 횡방향 균열 발생슬래브의 비율(개소)
$FI$	수정동결지수 (°F-days)	연장의 시점과 종점을 확인 후 중간지점의 수정동결지수를 적용
PRECIPI	연평균강수량 (mm)	연장의 시점과 종점을 확인 후 중간지점의 연평균강수량을 적용
CAL	누적 축하중	연장의 시점과 종점을 확인 후 교통량을 조사하여 교통량 산정
BASE	기층형태	기층 타입에 따라 린기층과 쇄석기층으로 분류
AGE	재령 (years)	재령의 산정 기준은 준공년도부터 최근 평탄성 조사 시점까지의 기간으로 산정

### 3. 평탄성 영향인자와 평탄성과의 상관관계

표면손상과 평탄성의 상관관계를 분석하기 위하여 평탄성에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자인 균열, 스펀링, 재령, 기층, 연평균강수량, 교통량, 수정 동결지수에 대하여 각각 평탄성과의 관계를 단순한 일차 선형식으로 나타내보았다. 전체 노선별 평탄성과 영향인자들의 상관관계에 대해 분석한 결과는 그림 4~그림 10으로 나타내었다.



그림 4와 그림 5는 전체 노선에 대한 스펙링, 균열의 평탄성 상관관계에 대한 분석 결과이다. 스펙링과 균열이 발생하면 평탄성이 저하되는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 이에 따라 스펙링과 균열은 평탄성에 영향을 미치는 인자로 판단된다.

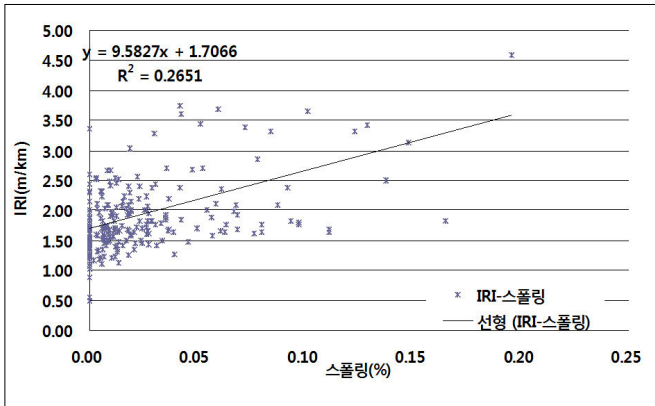


그림 4. 스펙링과 평탄성의 상관관계

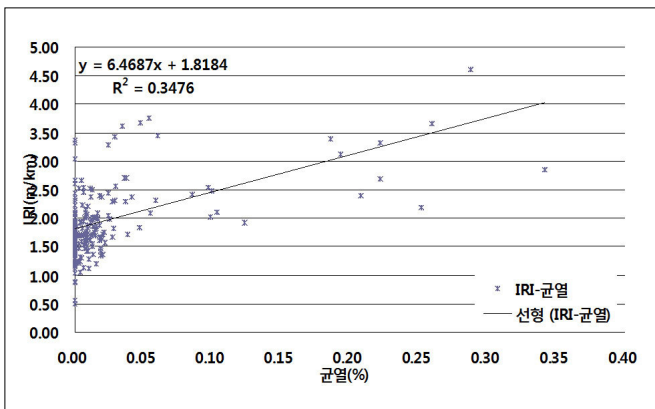


그림 5. 균열과 평탄성의 상관관계

그림 6은 전체 노선에 대한 재령과의 상관관계를 분석한 결과이다. 재령이 길어질수록 평탄성이 저하되는 경향을 보이는 것으로 분석되었으며, Indicator Variable를 통하여 린기층과 쇄석기층의 상관관계를 분석한 결과는 그림 7로 나타났다. 분석 결과 쇄석기층은 린기층에 비해 평탄성의 저

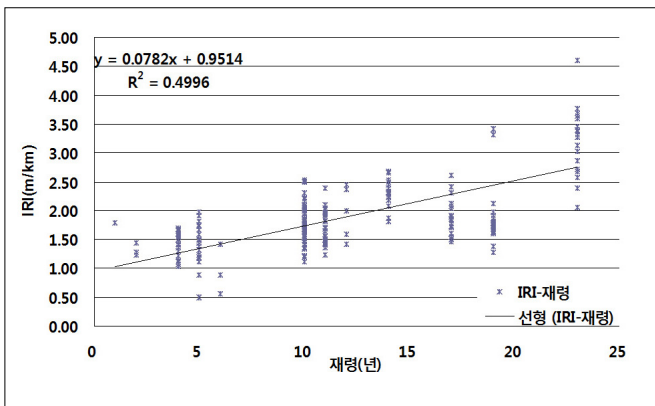


그림 6. 재령과 평탄성의 상관관계

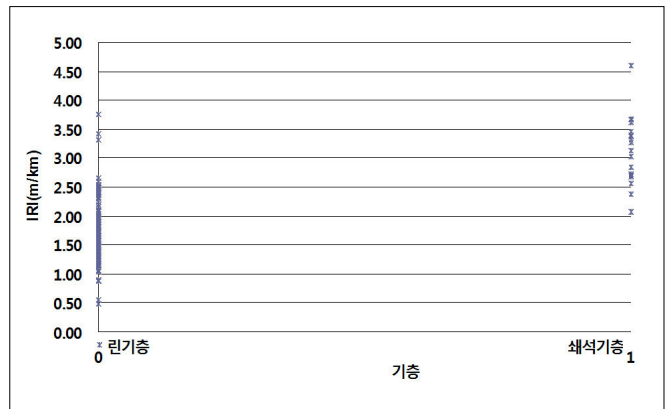


그림 7. 기층과 평탄성의 상관관계

감에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었으며, 기층의 종류에 따라서 평탄성에 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 이에 따라 재령 및 기층은 평탄성에 영향을 미치는 인자로 판단된다.

그림 8~10은 평탄성과의 상관성을 분석한 결과 누적하중 중, 연평균강수량 및 수정동결지수는 평탄성 증가 및 감소에 따라 미치는 영향이 매우 낮은 것으로 분석되었다.

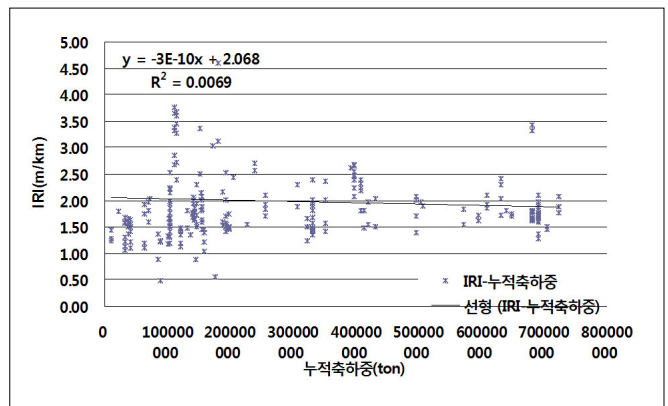


그림 8. 누적하중과 평탄성의 상관관계

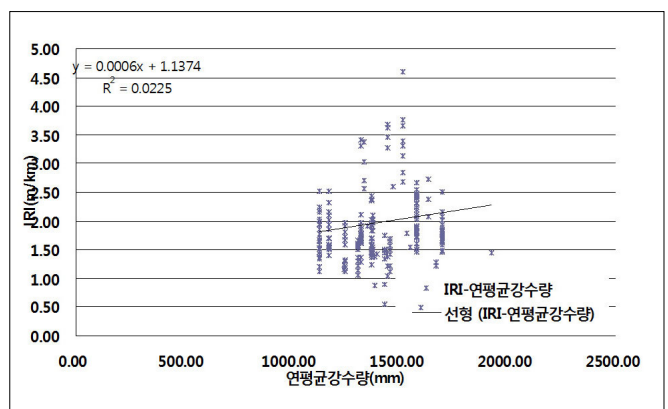


그림 9. 연평균강수량과 평탄성의 상관관계

(그림 계속)

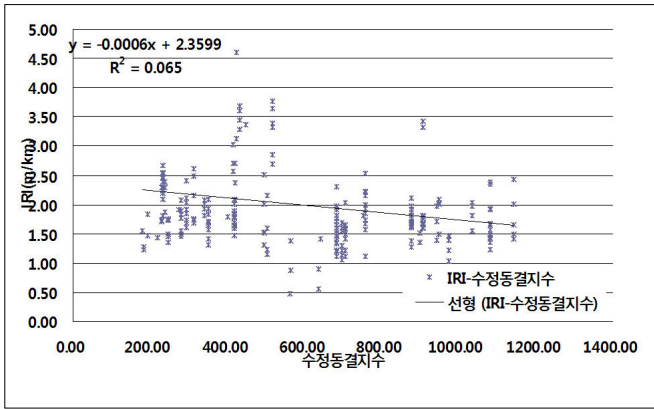


그림 10. 수정동결지수와 평탄성의 상관관계

본 연구에서는 평탄성 저하와 관련된 영향인자를 선정한 후, 영향인자에 대한 검토를 수행하였다. 검토된 영향인자는 재령, 스펀링, 균열, 기층, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량이며, 상관성 분석을 통해 재령, 스펀링, 균열, 기층은 평탄성과의 상관성이 나타났으나, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량은 평탄성에 미치는 영향이 미미함을 확인할 수 있었다. 스펀링의 발생이 많을수록 평탄성은 저하되는 것으로 나타났으며, 균열 역시 발생이 많을수록 평탄성이 저하되는 것으로 나타났다. 또한 점진적으로 재령이 지남에 따라 평탄성이 저감되는 것으로 분석되었다.

## 4. 결과 분석

### 4.1. ANOVA분석을 통한 적합성 판단

본 연구를 통해 개발된 평탄성 모델에 대한 IRI와 스펀링(%), 균열(%), 재령(년), 기층과의 상관관계를 분석한 결과 평탄성 모델이 도출되었다. 또한, P-value가 0.00으로 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 개발된 평탄성 모델의 다양한 통계 명령과 함께 잔차를 사용하여 통계적 가정을 확인하였다. 그림 11은 정규 확률도를 나타내며 이는 비정규성을 탐지한다. 그래프 모양이 거의 직선을 이루면서 잔차가 정규분포를 따르는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 잔차 대 적합치를 나타내며, 일

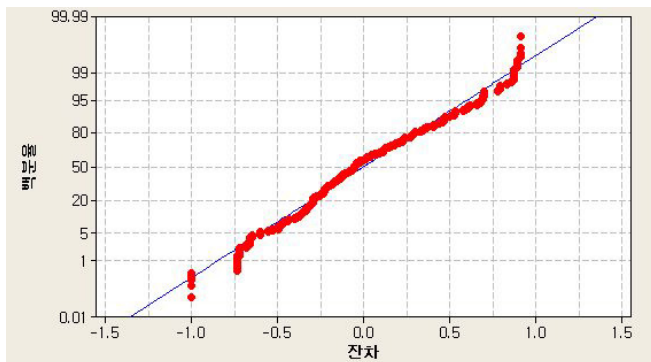


그림 11. 개발된 평탄성 모델의 정규 확률도

정하지 않은 분산, 고차항누락, 특이치를 탐지한다. 잔차는 0주위에 랜덤하게 흩어질수록 정확함을 나타내며, 개발된 평탄성 모델의 경우 비교적 안정적임을 알 수 있다.

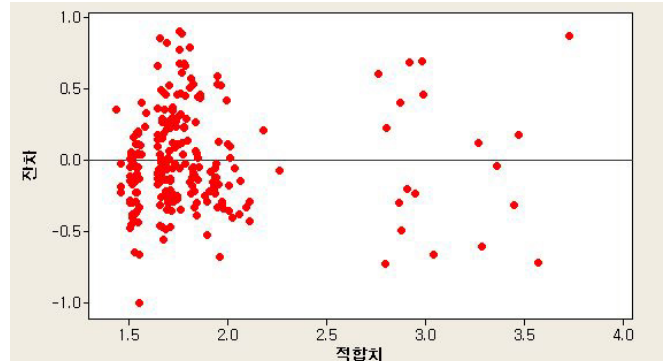


그림 12. 개발된 평탄성 모델의 잔차 대 적합치

그림 13은 잔차 히스토그램이다. 이는 여러 개의 정점, 특이치, 비정규성 등을 탐지한다. 본 연구를 통해서 개발된 평탄성 모델의 잔차 히스토그램은 근사적으로 대칭을 이루고 종모양을 이루며, 데이터의 상관성이 있음을 알 수 있다. 그림 14는 잔차-관측치 순서를 나타내며, 보통 시간에 대한 잔차의 종속성을 탐지한다. 잔차는 명확한 패턴이 나타나지 않으며, 본 연구에서 개발된 평탄성 모델 역시 특이한 패턴이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

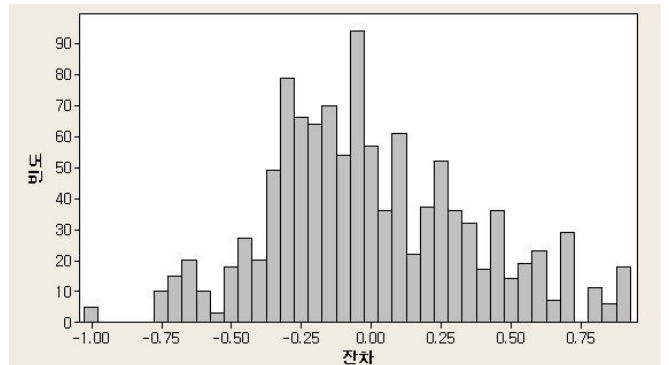


그림 13. 개발된 평탄성 모델의 잔차히스토그램

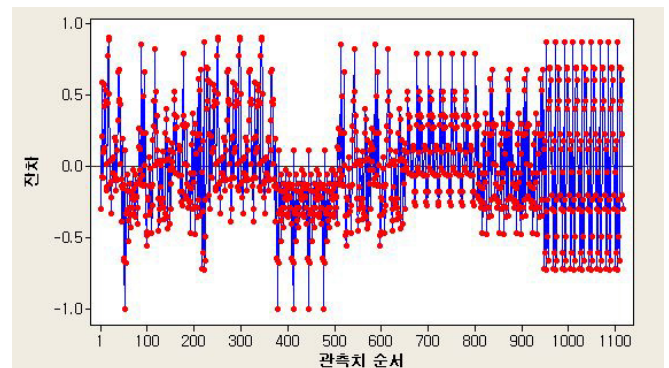


그림 14. 개발된 평탄성 모델의 잔차 대 순서

## 4.2. 평탄성 모델 도출

스폴링, 균열등과 같은 파손이 점점 악화되면서 포장의 평탄성도 영향을 받게 되어 승차감이 점점 불량해져서 일정 기준을 초과하게 되었을 때는 포장의 공용수명이 다한 것을 보게 되는데 이러한 평탄성 또는 승차의 불량을 균열율, 스폐링률 그리고 재령, 기층을 이용하여 예측하였다. 앞에서 분석된 바와 같이 표면손상 또는 재령이 증감됨에 따라 점진적으로 *IRI*가 저감되는 경향을 보이며, 편차 및 상관계수가 상관성을 보임을 알 수 있으나, 이를 100% 증명하지는 못하고 있다. 이는 표면손상 및 재령 등 하나하나가 개별적으로 평탄성에 영향을 미치는 것이 아니라 여러 가지 변수들에 의해 평탄성이 변화되는 것을 의미한다. 이에 따라 평탄성의 영향인자 중 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 7가지 요인에 대해서 주요노선 중 재령(1~23년)이 다양한 구간을 선별하여 총 238개 섹션을 회귀분석하였다. 예측 모형의 결과 초기 *IRI*는 회귀분석을 통하여 1.41m/km가 도출되었다. 이는 국내 고속도로 신설 콘크리트 포장의 초기 평탄성 측정값과 유사함을 보인다. 도출된 평탄성 모델의 초기 *IRI*는 회귀분석을 통하여 나온 상수항으로 나타내었다. 본 연구에서는 각 변수들의 데이터 특성을 파악한 결과 종속독립이고 잔차의 정규성과 등분산성을 만족하므로 회귀분석을 통해 상관관계를 파악하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 이에 각 독립변수들에 대해 회귀분석을 실시 한 후 변수들끼리의 조합을 통해 다중회귀분석을 실시하여 최종 회귀식을 통해 도출하였다.

$$IRI = 1.41 + 0.0235AGE + 2.17Spalling(\%) + 1.88Cracking(\%) + 0.811Base$$

*IRI*와 스폐링(%), 균열(%), 재령(년), 기층과의 상관관계를 분석한 결과 위와 같이 회귀식이 도출되었으며, *P* 값이 0.00으로 이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 또한, *IRI*를 설명할 수 있는 비율은 68.8%로 높은 신뢰도를 보인다.

그림 15와 표 6은 실제 측정된 *IRI*와 다중회귀분석을 통하여 산출된 예측 *IRI*를 비교 분석한 결과이다.

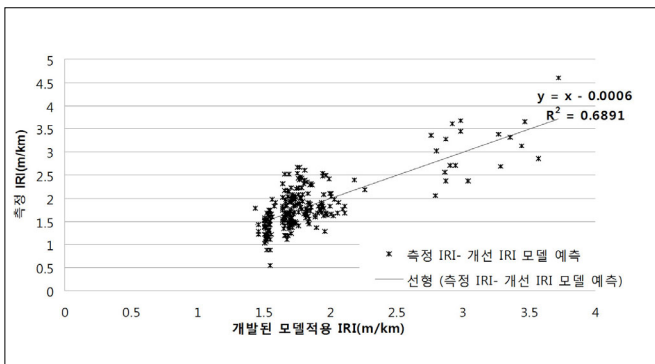


그림 15. 측정 *IRI*와 개발된 평탄성 모델의 상관성 분석

표 6. *IRI*와 평탄성 영향인자의 상관성 분석 결과

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
상수	1.409	0.031	45.18	0.00
스폴링(%)	0.024	0.003	9.03	0.00
균열(%)	2.166	0.359	6.03	0.00
재령	1.881	0.225	8.34	0.00
기층	0.811	0.045	18.02	0.00

S = 0.365 R-Sq = 68.9% R-Sq(adj) = 68.8%

표 7은 최량 부분 집합의 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 지정한 예측변수를 사용하여 가장 적합한 회귀 분석 모형을 찾아내는 절차이며, 부분 집합 모형에서는 실제로 회귀 계수를 추정하고 완전 모형보다 작은 분산으로 미래의 반응을 예측할 수 있다. 본 연구에서 예측 변수가 있는 모형이 가장 적합한 것으로는 *R*<sup>2</sup>(*Adj*) 값이 68.8 값이 가장 높고, S는 0.36544가 가장 낮으며, Mallows CP가 5.0으로 예측 변수와 상수의 개수가 가깝다. 또한, 항수가 다른 모형을 비교하는 경우 일반적으로 *R*<sup>2</sup>보다 *R*<sup>2</sup>(*Adj*)를 사용하는 것이 좋다. 이를 통해 본 연구에서는 최적 인자를 결정하였으며, 인자별 상관은 기층, 재령, 균열, 스폐링 순으로 나타난 것을 알 수 있다.

표 7. 최량 부분 집합 회귀분석

변수	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>Adj</i> )	Mallows CP	S	재령	스폴링률	균열율	기층
1	60.7	60.7	291.4	0.41013				X
1	48.4	48.3	733.1	0.47022	X			
1	24.8	24.8	2.0	0.56800		X		
1	38.0	38.0	2.0	0.51526			X	
2	65.1	65.0	138.2	0.38698			X	X
2	64.5	64.5	157.4	0.38994	X			X
2	53.6	53.5	3.0	0.44615	X	X		
2	58.4	58.3	3.0	0.42227	X		X	
2	42.9	42.8	3.0	0.49493		X	X	
2	64.3	64.3	3.0	0.39111		X		X
2	65.1	65.0	3.0	0.38698			X	X
3	67.9	67.8	39.3	0.37120	X		X	X
3	67.0	66.9	72.6	0.37653	X	X		X
3	59.8	59.7	4.0	0.41521	X	X	X	
4	68.9	68.8	5.0	0.36544	X	X	X	X

## 5. 결론

포장의 기능적 평가를 수행하기 위하여 평탄성에 대한 방대한 데이터를 분석하여, 데이터베이스를 구축하였고, 각 노선별 평탄성 및 영향인자들의 분석을 통하여 평탄성 경향에 대한 상관성을 분석하였다. 또한 균열, 스폐링, 재령, 기층, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량의 상관관계를 분석한 결과 스폐링이나 균열이 발생할 경우 평탄성이 저하되는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 재령이 길어질수록 평탄성이 저하되는 것으로 나타났다.

1. 본 과업의 평탄성 지수모형 개발에서는 노선별 다양한 특성을 고려하기 위하여 기존 평탄성 모델에서 고려되지 못한 재령의 다양성 확보를 위하여 88선을 추가한 결과 평탄성과 재령과의 상관성이 크게 존재하는 것으로 나타났다.
2. 기존 평탄성 모델에서는 균열구간만의 데이터를 통해 평탄성을 조사하였으나, 본 과업에서는 균열구간뿐만 아니라 무균열 구간에 대한 조사 및 분석이 이루어졌으며, 이에 따라 평탄성 모델의 신뢰성이 증진된 것으로 판단된다.
3. 콘크리트포장의 초기평탄성은 다중회귀분석을 통하여 산정하였으며, 이에 따라 초기평탄성은 1.41m/km로 도출되었다.
4. 다중회귀분석을 통해 IRI예측식을 도출한 결과 IRI는 재령, 스폐링, 균열, 기층과의 상관성이 큰 것으로 나타났으며, 이에 대한 상관분석 결과 R-sq는 68.8%로 매우 신뢰도가 높음을 나타내었다. 본 연구에서 제안하는 평탄성 지수 모형은 아래와 같이 도출하였다.

$$IRI = 1.41 + 0.0235AGE + 2.17Spalling(\%) + 1.88Cracking(\%) + 0.811Base$$

본 연구를 통하여 국내 평탄성 모델이 개발됨에 따라 도로의 포장 수명을 예측하고 이를 설계에 반영함으로써 신뢰성 있는 줄눈 콘크리트 포장의 평탄성 모델이 개발되었다. 또한, 향후 국내 스폐링 모형 및 균열 모형과 연계하여 적용할 수 있는 연구가 진행될 수 있을 것이라고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 수탁과제인 한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선 연구의 일부 성과물로 이에 감사를 포함합니다.

## 참고 문헌

- 한국도로공사 도로공사연구소, 2001, "콘크리트포장의 파손 예측모델 개발(I)"
- (주)로드코리아, 2005, 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
- (주)로드코리아 2006, 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
- (주)로드코리아, 2007, 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
- 건설교통부, 2004, "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구 - 콘크리트 포장 설계법 개발"
- 건설교통부, 2007, "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구 - 공용성 평가 모형 개발 연구"
- 건설교통부, 2008, "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구 - 공용성 평가 모형 개발 연구"
- 교통량 정보 제공시스템 : <http://www.road.re.kr>
- 기상청 기상연보 제공 시스템 : <http://www.kma.go.kr>

접 수 일 : 2009. 9. 9  
 심 사 일 : 2009. 9. 17  
 심사완료일 : 2010. 4. 5