한국형 콘크리트 포장의 평탄성 모델 개발

Development of IRI-Model for Korea Concrete Pavement

김영규* · 전범준** · 박영훈*** · 윤영미**** · 이승우*****
Kim, Young Kyu · Chon, Beom Jun · Park, Young Hoon · Yoon, Young Mi · Lee, Seung Woo

1. 서 론

한국형포장설계에서 평탄성은 도로포장을 평가하는 가장 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. 이에 따라서 신뢰성 있는 평탄선 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 평탄성 모델에서 고려하고 있는 영향인자인 스폴링, 균열, 재령뿐만 아니라 동결지수, 연평균강수량, 기층조건, 교통량 등 다양한 인자들 검토가 이루어졌으며, 재령의 다양화를 위하여 추가적인 노선을 선별하여 평탄성에 영향을 미치는 인자들에 대한 분석이 이루어졌다.

2. 평탄성 지수 모형의 검토

2.1 평탄성 지수 모형의 고려인자 분석

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

표 1. 평탄성에 영향을 주는 인자

변수 / 평탄성 모델	파손					하중조건 및 개방조건		기후 조건					기층 조건									회귀분석결과		
	가로줄눈단차	가로줄눈	누적줄눈단차	스폴링	균열	재령	등가단축하중(18-kip)	연평균동결융해주기	연평균강수량	연평균습한날의수	LTPP기후지역	동결지수	가로줄눈간격	PCC슬래브두께	PCC탄성계수	기층형태	$P_{0.075}$노상재료비율	평균노상지지력계수	노상형태	길어깨와결속여부	다웰직경	N	R^2	SE (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	64.11in/mi)
AASHTO IRI Model (2002)			○	○	○	○						○					○					183	0.7	22.2in/mi
KPPR 평탄성모델				○	○	○																188	0.237	

* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : kingdom1980@nate.com)
** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : beomjun@nate.com)
*** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : storm_1004@hanmail.net)
**** 정회원 · 로드코리아 연구원(E-mail : transaromi@nate.com)
***** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : swl@kangnung.ac.kr)

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

2.2 평탄성 지수 모형의 개선을 위한 신뢰성 분석작업

2.2.1 평탄성 분석 대상 구간의 선정

본 연구에서는 기존인자(스폴링, 균열, 재령)들과 추가영향인자(동결지수, 연평균강수량, 기층조건, 교통량)를 고려한 데이터베이스 구축작업을 수행함과 동시에 샘플링의 합리화를 위하여 다양한 인자의 폭넓은 변화량이 데이터베이스에 포함 될 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 측대의 확보, 다웰바의 설치, 보수적인 슬래브 두께적용 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 조서결과를 이용하였으며 대상 구간 현황은 다음 그림 1과 표 2에 나타내었다.

그림 1. 분석 대상 구간 현황

표 2. 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

2.2.2 평탄성 영향인자의 적용기준

표 3. 손상의 분류기준

손상종류	손상 개소	발생률(%)
균열	균열발생 슬래브 개소	(손상발생줄눈개소/분석구간 줄눈수)×100
스폴링	스폴링발생 줄눈 개소	(손상발생줄눈개소/분석구간 줄눈수)×100
단면보수	○ 슬래브 중앙에 위치할 경우 균열로 간주 ○ 줄눈부에 인접할 경우 스폴링으로 간주	

본 연구에서는 우선적으로 평탄성에 가장 주요한 영향을 끼칠 것으로 판단되는 스폴링, 균열, 및 단면보수에 대한 기준을 표 3으로 나타냈으며, 이외의 교통량 수정동결지수, 연평균 강수량, 기층조건에 대한 검토가 이루어 졌다.

교량부 및 터널부를 제외한 순수 토공부에 대해서 최소연장 300m이상인 구간을 하나의 섹션으로 정하였으며, 각 섹션별 슬래브 수 및 줄눈 수에 대하여 손상이 발생한 개소를 손상률(%)로 나타내었다.

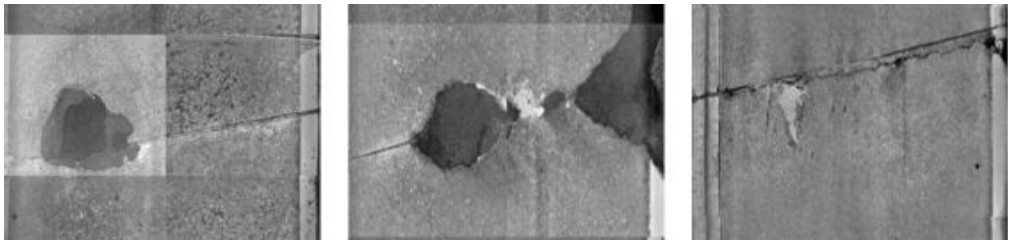

그림 2. 포장손상에 따라 스폴링으로 분류된 사진

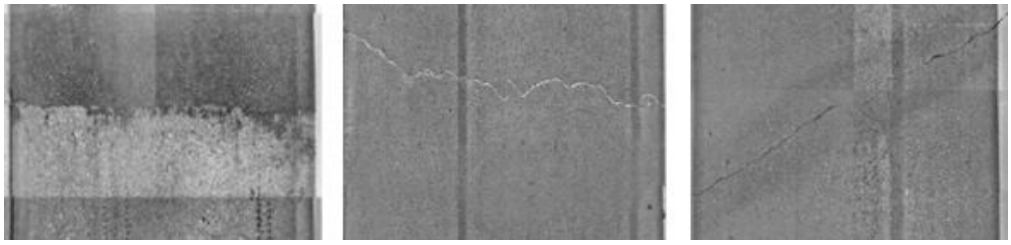

그림 3. 포장손상에 따라 균열로 분류된 사진

위의 그림 2와 같이 줄눈부 휠패스 부분의 파손은 평탄성에 영향을 줄 수 있기 때문에 스폴링으로 분류하였으며, 그림 3과 같이 슬래브 중앙의 횡방향 균열은 균열로 분류하였으나, 단부균열 및 종방향 균열은 평탄성에 미치는 영향이 없다고 판단하여 균열의 분류에서 제외하였다.

표 4. 평탄성 지수 모형의 영향인자 및 적용기준

변수명		적용기준
IRI0	초기평탄성 (m/km)	초기 평탄성을 나타내며 최종 회귀식을 통하여 도출
ΔIRI	공용 개시 후 평탄성 (m/km)	공용개시후의 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	스폴링율(%)	총 슬래브 중 스폴링 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
PRECIIPI	연평균강수량(mm)	연장의 시점과 종점을 확인 후 중간지점의 연평균강수량를 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

도로포장의 동결심도를 결정하는데 사용하는 값을 설계동결지수라고 하는데 동결지수의 산정은 대상지역

의 인근 측후소에서 관측한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간의 평균동결지수로 정하였으며 만일 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대 동결지수를 산정하였다. 또한, 연평균강수량에 대해서는 기상청의 일평균 강수자료를 사용하였다. 기상청에서 운영 중인 전국 총 76개의 측후소에서 과거 10년 동안의 기상자료를 통하여 산정하였으며, 교통량은 교통량연보를 각 차종별 축하중 분포에 따라 누적축하중으로 산정하였다. 재령의 경우에는 고속도로 정기 포장상태 조사결과를 이용하여, 준공년도부터 최근 평탄성조사 시점까지로 선정하였다. 이와 같이 평탄성 지수모형의 적용기준은 표 4로 나타내었다.

3. 평탄성 영향인자와 평탄성과의 상관관계

표면손상과 평탄성의 상관관계를 분석하기위하여 평탄성에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자인 균열, 스폴링, 재령, 기층, 연평균강수량, 교통량, 수정 동결지수에 대하여 각각 평탄성과의 관계를 가장 단순한 선형식으로 나타내보았다. 전체 노선별 평탄성과 영향인자들의 상관관계에 대해 분석한 결과는 그림 4~그림 7으로 나타내었다.

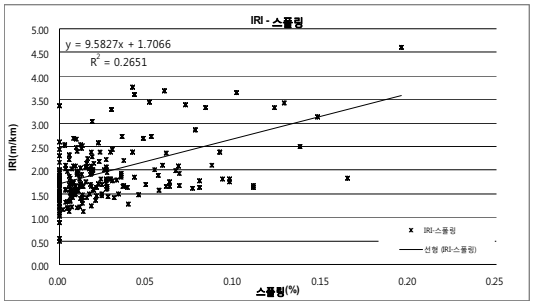

그림 4. 스폴링과 평탄성의 상관관계

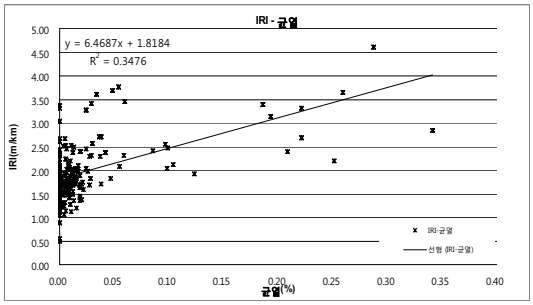

그림 5. 균열과 평탄성의 상관관계

그림 4와 그림 5는 전체 노선에 대한 스폴링, 균열의 평탄성과 상관관계에 대한 분석 결과이다. 스폴링과 균열이 발생하면 평탄성이 저하되는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 이에 따라 스폴링과 균열은 평탄성에 중요한 영향인자로 판단된다.

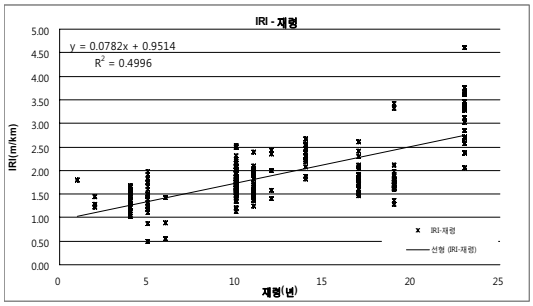

그림 6. 재령과 평탄성의 상관관계

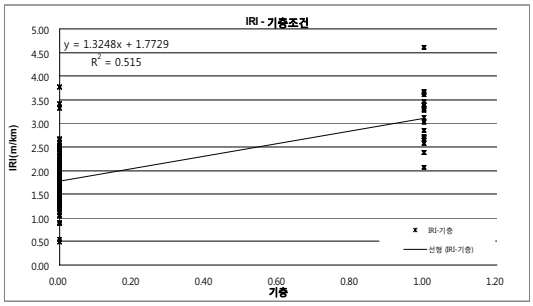

그림 7. 기층과 평탄성의 상관관계

그림 6은 전체 노선에 대한 재령과의 상관관계를 분석한 결과이다. 재령이 길어질수록 평탄성이 저하되는 경향을 보이는 것으로 분석되었으며, 그림 7은 린기층과 쇄석기층에 따라 평탄성에 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 이에 따라 재령 및 기층은 평탄성에 영향인자로 판단된다. 또한, 평탄성과의 상관성 분석결과 누적축하중, 연평균강수량 및 수정동결지수는 평탄성 증가, 감소에 따라 미치는 영향이 매우 낮은 것으로 분석

되었다.

본 연구에서는 평탄성 저하와 관련된 영향인자를 선정한 후, 영향인자에 대한 검토를 수행하였다. 검토된 영향인자는 재령, 스폴링, 균열, 기층, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량이며, 상관성 분석을 통해 재령, 스폴링, 균열, 기층은 평탄성과의 상관성이 나타났으나, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량은 평탄성에 미치는 영향이 미비함을 확인 할 수 있었다. 스폴링의 수가 많을 수록 평탄성은 저감되는 것으로 나타났으며, 균열 역시 수가 많을수록 평탄성이 저감되는 것으로 나타났다. 또한 점진적으로 재령이 지남에 따라 평탄성이 저감되는 것으로 분석되었다.

4. 결과 분석

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, 스폴링율 그리고 재령, 기층을 이용하여 예측하였다. 앞에서 분석된 바와 같이 표면손상 또는 재령이 증감됨에 따라 점진적으로 IRI가 저감되는 경향을 보이며, 편차 및 상관계수가 상관성을 보임을 알 수 있으나, 이를 100%로 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 평탄성에 영향을 미치는 요인 중 가장 큰 영향을 미치는 7가지 요인에 대해서 주요노선 데이터 중 재령이 1년에서 23년까지 총 238개 구간을 회귀분석하여 교통개방 후 IRI의 변화량을 측정하여 다음과 같은 IRI 변화 예측 모형을 도출하였다. 본 연구에서는 각 변수들의 데이터 특성을 파악한 결과 종속독립이고 잔차의 정규성과 등분산성을 만족하므로 회귀 분석을 통해 상관관계를 파악하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 이에 각 독립변수들에 대해 회귀분석을 실시 한 후 변수들끼리의 조합을 통해 다중회귀분석을 실시하여 회귀식을 통해 도출하였다.

$$IRI = 1.41 + 0.0235재령 + 2.17스폴링율 + 1.88균열율 + 0.811기층$$

IRI와 스폴링(%), 균열(%), 재령(년), 기층과의 상관관계를 분석 한 결과 아래와 같이 회귀식이 도출되었으며, P값이 0.00으로 이는 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 또한, IRI를 설명할 수 있는 비율은 68.8%로 나타났다.

5. 결 론

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, 스폴링, 재령, 기층, 수정동결지수, 교통량, 연평균강수량의 상관관계를 분석한 결과 스폴링이나 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 나타났다.
3. 콘크리트포장의 초기평탄성은 다중회귀분석을 통하여 산정하였으며, 이에 따라 초기평탄성은 1.41로 나타났다.
4. 다중회귀분석을 통해 IRI예측식을 도출한 결과 IRI는 재령, 스폴링, 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 나타났다. (초기평탄성 : 1.41)

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

본 연구를 통하여 개선된 평탄성 모델이 개발됨에 따라 도로의 포장 수명을 예측하고 이를 설계에 반영함으로써 신뢰성 있는 한국형포장설계가 이루어질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건교부 수탁과제인 한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선 연구의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. (주)로드코리아(2005), 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
2. (주)로드코리아(2006), 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
3. (주)로드코리아(2007), 고속도로 포장상태 조사 및 분석 보고서
4. 건설교통부(2007), “공용성 평가 모형 개발 연구”, 한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구
5. 교통량 정보 제공시스템 : http://www.road.re.kr
6. 기상청 기상연보 제공 시스템 : http://www.kma.go.kr