

고속도로 PMS D/B를 활용한 콘크리트 포장 상태지수(HPCI) 예측모델 개발 연구

Development of HPCI Prediction Model for Concrete Pavement Using Expressway PMS Database

서영찬	Suh, Young-Chan	정회원 · 한양대학교 교통물류공학과 교수 (E-mail : suhyc@hanyang.ac.kr)
권상현	Kwon, Sang-Hyun	한국도로공사 대관령지사 도로안전팀 대리 (E-mail : shk0822@ex.co.kr)
정동혁	Jung, Dong-Hyuk	정회원 · 한양대학교 교통물류공학과 박사과정 · 교신저자 (E-mail : forjdh@hanyang.ac.kr)
정진훈	Jeong, Jin-Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)
강민수	Kang, Min-Soo	정회원 · 한국도로공사 인사처 (E-mail : minsu92@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to develop a regression model to predict the International Roughness Index(IRI) and Surface Distress(SD) for the estimation of HPCI using Expressway Pavement Management System(PMS).

METHODS : To develop an HPCI prediction model, prediction models of IRI and SD were developed in advance. The independent variables considered in the models were pavement age, Annual Average Daily Traffic Volume(AADT), the amount of deicing salt used, the severity of Alkali Silica Reaction(ASR), average temperature, annual temperature difference, number of days of precipitation, number of days of snowfall, number of days below zero temperature, and so on.

RESULTS : The present IRI, age, AADT, annual temperature differential, number of days of precipitation and ASR severity were chosen as independent variables for the IRI prediction model. In addition, the present IRI, present SD, amount of deicing chemical used, and annual temperature differential were chosen as independent variables for the SD prediction model.

CONCLUSIONS : The models for predicting IRI and SD were developed. The predicted HPCI can be calculated from the HPCI equation using the predicted IRI and SD.

Keywords

Concrete pavement, Model, IRI, SD, HPCI, PMS

Corresponding Author : Jung Dong-Hyuk, Manager
Department of Transportation and Logistics Engineering,
Hanyang University, 2nd Eng. Bldg. 55, Hanyangdaehakro,
Sangrok-gu, Ansan-si, Kyeonggi-do, 15588, Korea
Tel : +82.31.419.0552 Fax : +82.31.436.8147
E-mail : forjdh@hanyang.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Oct. 24, 2017 Revised Oct. 24, 2017 Accepted Nov. 28, 2017

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

고속도로의 유지관리 계획은 포장상태를 나타내는 지표인 고속도로 포장 상태지수(HPCI: Highway

Pavement Condition Index)를 기본적으로 활용하고 있다. HPCI는 조사당시의 포장상태를 나타내는 지표로서 이 값이 향후 어떻게 변화할지에 대한 연구는 미흡한 실정이다. HPCI는 유지보수 시기 또는 공법 선정 시 매우 중요한 지표가 되므로 이 값이 향후 어떻게 변화할지를 예측할 수 있다면 예산 투입 시거나 보강공법 결정에 있어 많은 기여가 될 수 있다. 대부분의 포장상태 예측 모델들은 현재의 포장상태와 관계없이 단순히 재령에 따라 HPCI가 어떤 추세를 보이고 있는지를 보여주는 데 그치는 경우가 많다. 그러나 재령이 짧다 하더라도 현재의 포장상태가 나쁘면 앞으로 더 빠른 속도로 나빠질 수 있는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구의 목적은 현재의 HPCI가 주어졌을 때 수년 후의 HPCI를 예측하는데 있으며, 이를 위해 HPCI 식의 주요변수인 국제평탄성지수(IRI: International Roughness Index)와 표면손상(SD: Surface Distress)의 현재값을 알 때 1년 만에 얼마나 나빠지는지 그 변화량을 예측하는 모델을 만들고 이들을 취합하여 궁극적으로 HPCI의 예측이 가능토록 하였다.

2. 문헌고찰

2.1. 포장상태 평가지수

Kwon et. al.(1994)은 국내 처음으로 고속도로 콘크리트 포장상태지수(HPCI)를 개발하여 고속도로 콘크리트포장의 유지보수 우선순위 및 보수공법의 결정에 활용토록 하였으며 그 후 수차례의 보완을 거쳐 오늘의 모델에 이르렀다.

Song and Suh(2001)은 국토 PMS에서 사용 중인 평탄성 모델이 세계은행에서 브라질의 자료를 근간으로 만든 것이며, 국내 특성을 제대로 반영하지 못하고 있음을 착안하여 국내 자료를 바탕으로 한 모델을 제시한 바 있다. 이때 종속변수는 종단 평탄성지수로 하였으며 독립변수는 재령, 교통량, 보조기층의 두께 등을 제시한 바 있다.

Kim et. al.(2009)은 한국형 포장설계법에서 평탄성이 도로포장을 평가하는 가장 중요한 인자이며 설계수명에 큰 영향을 미치고 있음을 강조하고, 기존의 평탄성 모델에서 고려하고 있는 영향인자인 스폴링, 균열, 재령뿐만 아니라 동결지수, 연평균강수량, 교통량 등 다양한 인자들을 검토한 보다 세부적인 평탄성 모델을 제시한 바 있다.

2.3. 포장상태에 영향을 미치는 환경인자 분석

Kim et. al.(2006)은 당시 10여 년 간의 장기 포장

공용성 자료를 축적하고 있는 중부고속도로를 대상으로 장래 교통량과 차종에 따른 등가 축하중 계수를 이용하여 콘크리트 포장의 피로 특성을 파악하여 재료조건, 교통 및 하중조건, 환경조건, 경계조건 등이 충분히 반영된 현장조건에서의 피로파손 모형을 제시하였다.

Yoo and Han(2002)은 포장 장기 공용성 조사로 얻은 많은 신뢰성 있는 데이터로 구축된 합리적인 모델은 포장의 수명을 증진시키고 수명주기비용을 감소시키기 위한 유용한 자료로 사용될 수 있으며 합리적인 모델을 구축하기 위해서는 적절한 방대한 양의 데이터 획득이 필수적이라고 주장하였다. 따라서 고속도로 콘크리트 포장 LTPP구간의 파손상태와 이러한 파손을 유발한 교통 및 환경데이터를 수집하고 분석하였다. 또한 현존하는 파손예측모델에 국내 고속도로의 단면, 교통량과 환경조건을 대입하여 파손상태를 예측하고 모델 적용에서의 문제점을 살펴보고 향후의 발전방향을 검토하였다.

3. PMS 데이터의 수집 및 가공

3.1. 자료 수집 및 분석

고속도로 PMS 데이터는 100m 단위 조사 자료로서 노선, 행선, 차선, 시·종점, IRI, SD, HPCI의 내용을 포함하며 노선마다 2년 주기로 조사가 이루어지고 있다.

3.1.1. 분석 대상구간 선정

고속도로 PMS가 운영되며 조사장비의 변화 등의 이유로 자료의 일관성을 위해 모든 해의 조사 자료를 활용하기보다 조사장비가 동일한 2012년에서 2015년까지의 조사 자료를 사용하였다. 즉, 고속도로의 조사 주기가 2년임을 감안하여 2012년 포장상태가 2014년에 어떻게 변화했는지, 그리고 2013년에 조사된 포장상태가 2015년에 어떻게 변화했는지를 조사하였다. 본 연구에서는 편의상 2012년, 2013년을 전년도, 2014년, 2015년을 후 년도로 분류하여 분석을 진행하였다.

3.1.2. 교량부 및 교량 접속부 영향 최소화

교량부는 일반 토공부와 다른 양상을 보일 수 있어 제외하였다. 또한 교량 접속부의 경우 단차로 인해 평탄성에 영향을 줄 수 있어 해당 구간을 제외하는 것이 보다 정확한 분석을 할 수 있을 것이라고 판단하였으며, 교량 접속부 양단의 100m 구간의 자료는 제외하였다.

3.1.3. 년도별 동일위치 선정 방법

본 연구는 동일구간에 대하여 시간경과에 따른 포장 상태 변화를 분석하는 것이 목적이므로 년도별 조사 자료에서 동일 위치를 선정할 필요가 있다. 그러나 실제로 PMS 조사에 있어서는 조사시마다 위치에 있어 약간의 오차가 있을 수 있으므로 동일 위치를 찾는 것이 중요하다. 이를 위하여 연도별 PMS 데이터에서 교량의 위치를 먼저 찾고 이로부터 충분히 떨어진 곳(본 연구에서는 100m)의 자료들을 분석에 사용하였다.

3.1.4. 아스팔트 구간 및 유지보수 구간 제거

본 연구는 유지 보수가 없는 콘크리트 구간이 향후 어떻게 변화할지에 대한 예측 모델을 결정하는데 목적이 있다. PMS 데이터 상의 AP토공부는 기존 포장이 아스팔트인 경우와 콘크리트 포장 위 아스팔트 덧씌우기 또는 재포장 등의 개량공법이 적용된 경우로 나눌 수 있으며, 분석대상구간에서 제외하였다. 또한 유지보수 실적자료를 이용하여 해당 사항을 재검토하여 기존 콘크리트 구간 중 유지보수 실적이 없는 구간만을 선정하였다.

3.1.5. 환경 및 교통 인자

첫째, 재령은 2012, 2013년을 기준으로 하였으며, 1개 노선일지라도 완공년도에 따라 다양한 재령이 존재할 수 있으므로 이를 반영하여 분석하였다.

둘째, 교통량은 AADT(Annual Average Daily Traffic)이며, 수집된 데이터를 차로 수로 나누고 3년간의 평균값을 사용하였다. 포장 관리 측면에 ESAL(Equivalent Single Axle Load)값을 이용하는 것이 보다 타당할 수 있으나, 모델을 사용하는 실무자 입장에서 ESAL 값을 적용하는 것은 상당한 제약이 따른다. 이러한 편리성과 모델의 적용성을 고려하여 AADT를 이용할 수 있도록 분석을 진행하였다.

셋째, 제설제 사용량은 지사별로 수집된 자료로서, 1개 지사가 여러 노선을 관리하는 경우 분석 대상 노선의 제설제 사용량을 반영하기 어려운 문제점이 있을 것으로 판단하여 제설제 사용량을 각 관할 지사의 연장으로 나누었으며, 3개년 자료의 평균값을 사용하였다.

넷째, ASR 등급 및 발생구간 자료는 한국도로공사의 자료를 적용하였으며 등급의 경우 1등급이 ASR로부터 가장 양호한 상태이고 4등급이 가장 불량한 상태이다.

다섯째, 환경인자 8가지(평균기온, 연교차, 강수량,

강수일수, 눈일수, 신적설, 영하일수) 기상자료는 분석 지점 인근의 관측소 데이터를 기상청 국가기후데이터센터 홈페이지(<http://sts.kma.go.kr>)를 통해 수집하였으며, 2012년부터 2015년의 평균값을 사용하였다.

3.2. 수집 자료 가공

3.2.1. 분석 대상구간 선정

PMS 데이터는 동일 구간에 대하여 매 2년마다의 자료가 구축되어 있다. 그러나 본 연구에서는 모델의 정확도와 예측력을 높이기 위해 1년간의 변화량을 필요로 하였고 이를 위해 전 년도와 후 년도 사이의 값을 선형으로 가정하고 추정하여 사용하였다.

일반적으로 별다른 유지보수가 없었다면 IRI와 SD 값은 높아지는 것이 일반적이다. 이러한 판단을 바탕으로 후 년도 자료에서 해당 값이 낮아지는 지점은 잘못된 데이터 또는 유지보수가 된 지점으로 간주하고 제외하였다.

3.3. PMS 데이터 수집 및 가공 결과

PMS 데이터 수집 및 가공 과정을 거쳐 약 22,320개 지점에서 총 322개의 지점을 특정하였다. 해당 지점의 환경 및 교통인자 자료와 IRI, SD 변화량을 추가하여 Database를 구축하였다. 또한, 총 322개 지점 중 각 인자별 같은 값의 경우는 각각의 평균을 구해 Fig. 1~Fig. 12와 같이 단순화하여 그래프로 나타내었다.

4. IRI와 SD 변화량의 상관관계 분석

4.1. IRI 변화량과 각 인자들의 상관관계

IRI 변화량과 각 인자들의 상관관계를 분석하였으며 상관관계 그래프는 분석을 용이하게 하고 이해를 돕기 위해 각 인자별 같은 값에서 나타나는 IRI 변화량의 평균을 구해 나타냈다.

4.1.1. IRI 변화량과 현재 IRI의 상관관계

Fig. 1의 그래프는 IRI 변화량과 현재 IRI의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 양의 상관관계를 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 현재 IRI가 커질수록 IRI 변화량이 커지는 결과를 도출할 수 있었다.

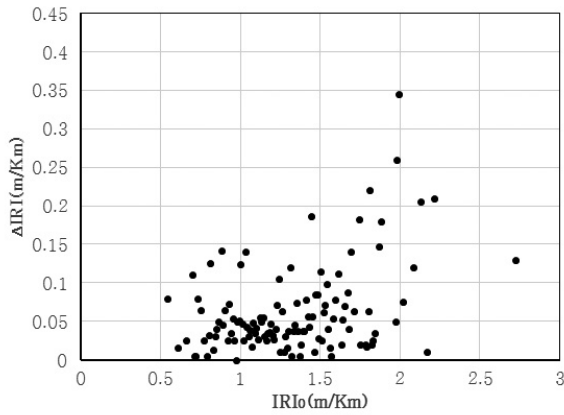


Fig. 1 Relationship between Δ IRI and Present IRI

4.1.2. IRI 변화량과 재령의 상관관계

Fig. 2의 그래프는 IRI 변화량과 재령의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 양의 상관관계를 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 재령이 오래될수록 IRI 변화량이 커지며 이는 재령이 포장 결함에 영향을 미침을 알 수 있었다.

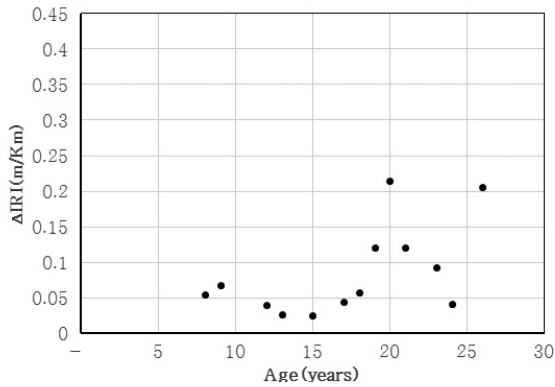


Fig. 2 Relationship between Δ IRI and Age

4.1.3. IRI 변화량과 AADT의 상관관계

Fig. 3의 그래프는 IRI 변화량과 AADT와의 상관관

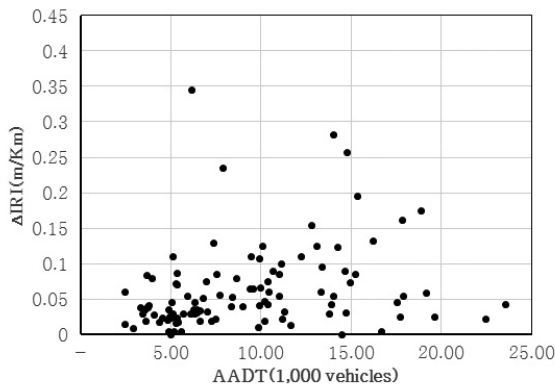


Fig. 3 Relationship between Δ IRI and AADT

계를 나타낸 것이다. 그래프에서 대체적으로 양의 상관관계가 보이거나 일부 데이터에서 상관관계가 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있었다, 특히 남해고속도로의 경우 교통량이 비교적 적음에도 불구하고 현재 IRI 평균값이 높았으며 이는 ASR의 영향으로 판단되었다.

4.1.4. IRI 변화량과 제설제 사용량의 상관관계

Fig. 4의 그래프는 IRI 변화량과 제설제 사용량의 상관관계를 나타낸 것이다. 제설제 사용량의 경우 그래프로 관계를 나타내기 어려웠으며 통계분석을 실시하여야 할 것으로 판단하였다.

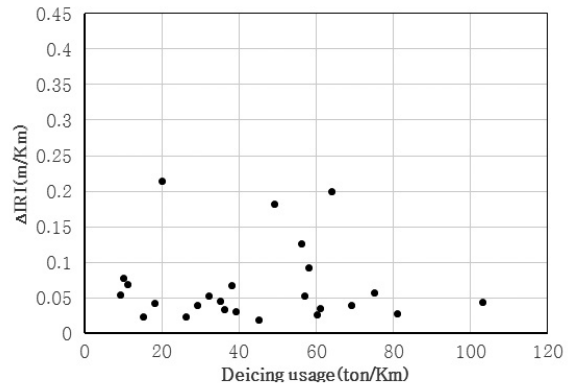


Fig. 4 Relationship between Δ IRI and Deicing Salt Usage

4.1.5. IRI 변화량과 ASR 등급의 상관관계

ASR 결함은 시멘트 중의 알칼리 성분과 골재 내의 반응광물이 반응하여 겔을 형성하고, 외부로부터 유입된 수분에 의해 겔이 팽창하면서 균열 및 박리현상을 유발하는 화학반응으로 콘크리트 포장에 나타나는 결함이다. 최근 ASR 결함에 대한 관심이 높아지고 있으며 특별한 관리가 필요한 것으로 파악되어지고 있다.

Fig. 5의 그래프는 IRI 변화량과 ASR 등급과의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 양의 상관관계를 확인

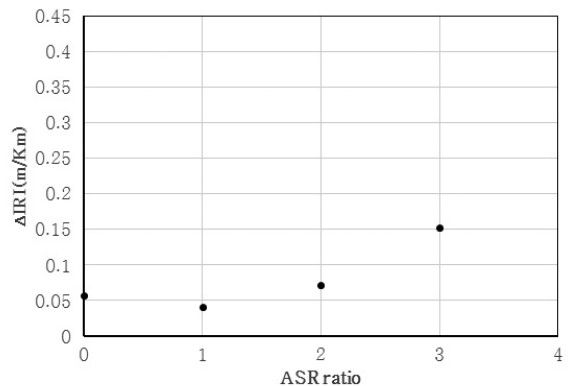
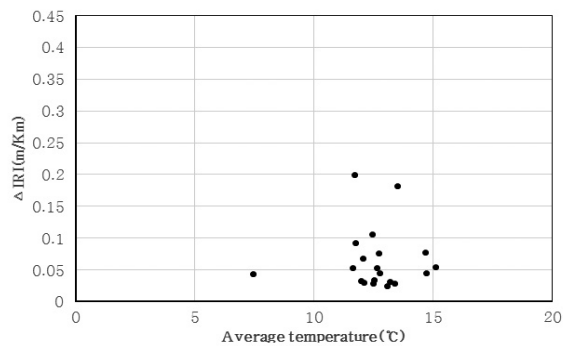


Fig. 5 Relationship between Δ IRI and ASR Severity

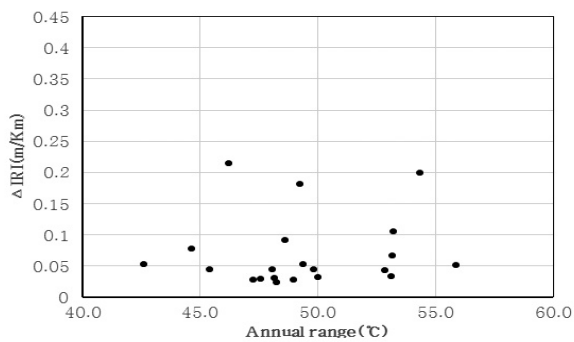
할 수 있었으며, ASR 등급이 커질수록(포장 상태가 불량해질수록) IRI 변화량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

4.1.6. IRI 변화량과 각 환경인자간 상관관계

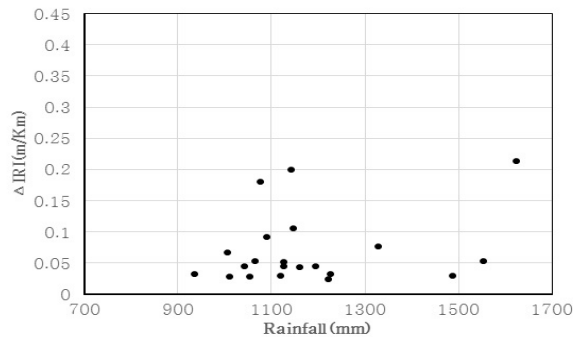
Fig. 6의 그래프는 IRI 변화량과 7가지 환경인자(a) : 평균기온, (b) : 연교차, (c) : 강수량, (d) : 강수일수, (e) : 눈일수 (f) : 신적설, (g):영하일수]간의 상관관계를 나타낸 것이다. (a), (e), (f) 그래프에서는 IRI 변화량과의 특별한 상관관계를 찾을 수 없으며, (b), (c), (d), (g)는 IRI 변화량 약한 양의 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다. IRI 변화량과 환경인자간의 경우 그래프 상으로 상관관계를 판단하기 힘들었으며 통계분석을 통해 보다 면밀한 상관관계를 도출하여야 할 것으로 판단되었다.



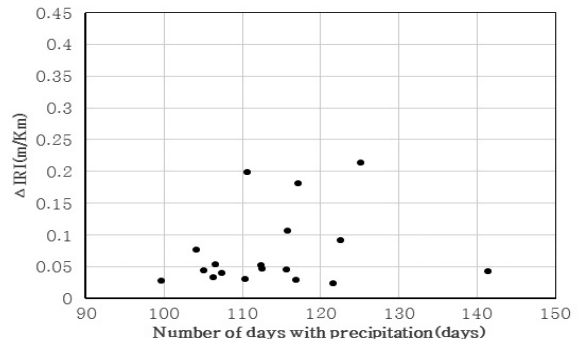
(a) Relationship between ΔIRI and Average Temperature



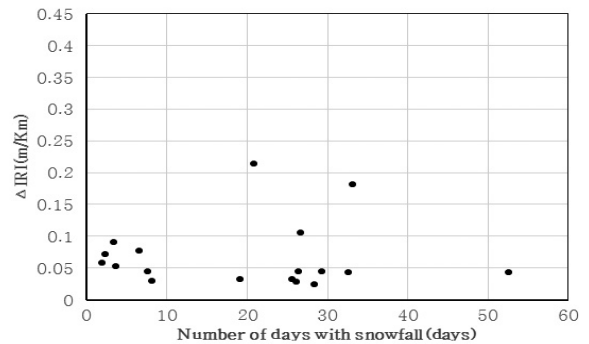
(b) Relationship between ΔIRI and Annual Temperature Difference



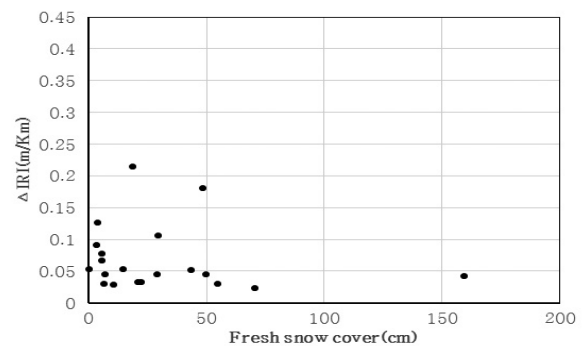
(c) Relationship between ΔIRI and Rainfall



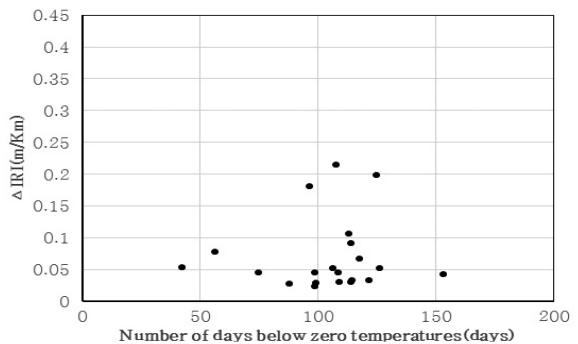
(d) Relationship between ΔIRI and Number of Days with Precipitation



(e) Relationship between ΔIRI and Number of Days with Snowfall



(f) Relationship between ΔIRI and Snowfall



(g) Relationship between ΔIRI and Number of Days Below Zero Temperatures

Fig. 6 Relationship between ΔIRI and Environmental Factors

4.2. SD 변화량과 각 인자들의 상관관계

SD 변화량과 각 인자들의 상관관계를 분석하였으며 상관관계 그래프는 분석을 용이하게 하고 이해를 돕기 위해 각 인자별 같은 값에서 나타나는 SD 변화량의 평균을 구해 나타냈다. SD 변화량의 경우 각 인자들간의 상관관계를 그래프 상으로 파악하기 힘들었으며, 보다 명확한 상관관계를 도출하기 위해 통계 분석이 필요할 것으로 판단되었다.

4.2.1. SD 변화량과 현재 SD의 상관관계

Fig. 7의 그래프는 SD 변화량과 현재 SD의 상관관계를 나타낸 것이다. SD의 경우, 0을 포함한 다양한 값을 갖는 데이터가 다수 존재하여 그래프 상으로 명확한 관계를 판단하기 어려웠다.

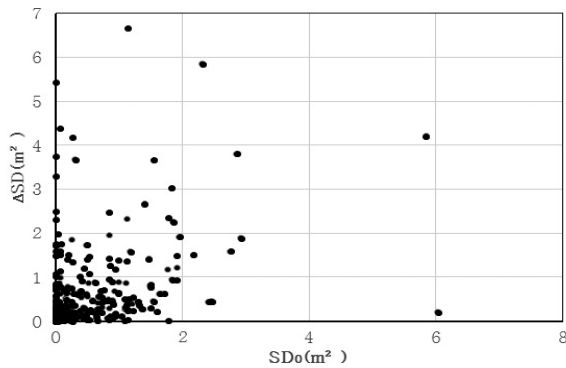


Fig. 7 Relationship between Δ SD and Present SDo

4.2.2. SD 변화량과 재령의 상관관계

Fig. 8의 그래프는 SD 변화량과 현재 SD의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프의 결과와 같이 명확한 상관관계가 있다고 판단하기에는 어려움이 따른다.

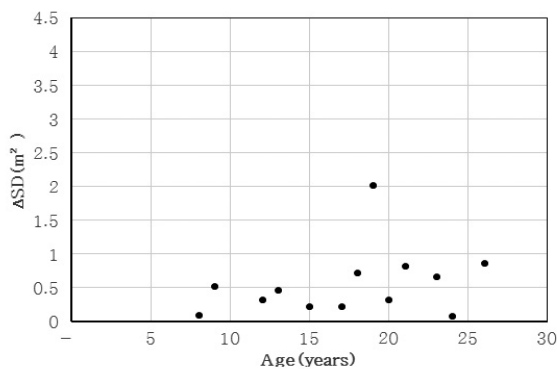


Fig. 8 Relationship between Δ SD and Age

4.2.3. SD 변화량과 AADT의 상관관계

Fig. 9의 그래프는 SD 변화량과 AADT의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프의 결과와 같이 명확한 상관관계가 있다고 판단하기에는 어려움이 따른다.

를 나타낸 것이다. 그래프의 결과와 같이 명확한 상관관계가 있다고 판단하기에는 어려움이 따른다.

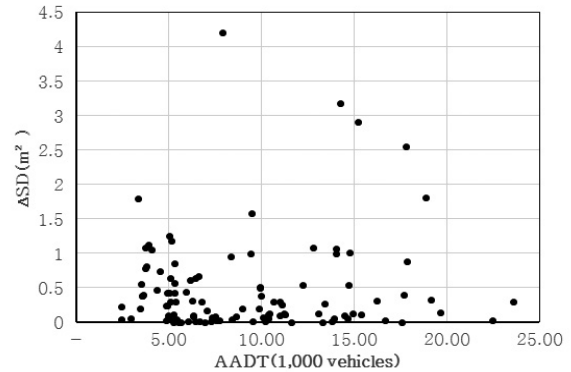


Fig. 9 Relationship between Δ SD and AADT

4.2.4. SD 변화량과 제설제 사용량의 상관관계

Fig. 10의 그래프는 SD 변화량과 제설제 사용량의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프의 결과와 같이 명확한 상관관계가 있다고 판단하기에는 어려움이 따른다.

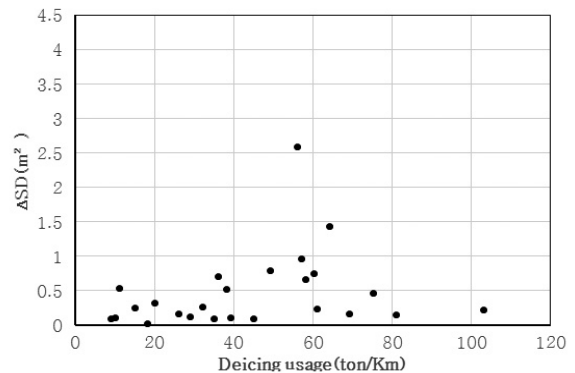


Fig. 10 Relationship between Δ SD Deicing Salt Usage

4.2.5. SD 변화량과 ASR 등급의 상관관계

Fig. 11의 그래프는 SD 변화량과 ASR 등급의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프의 결과와 같이 명확한 상

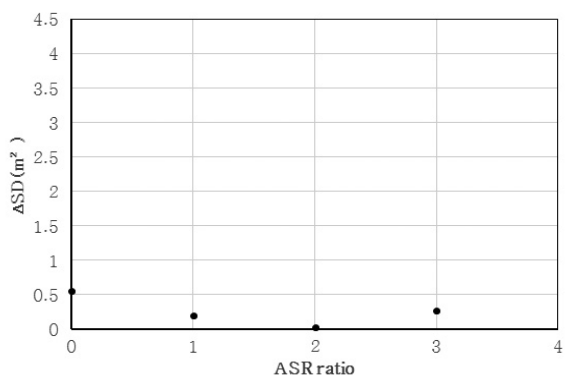
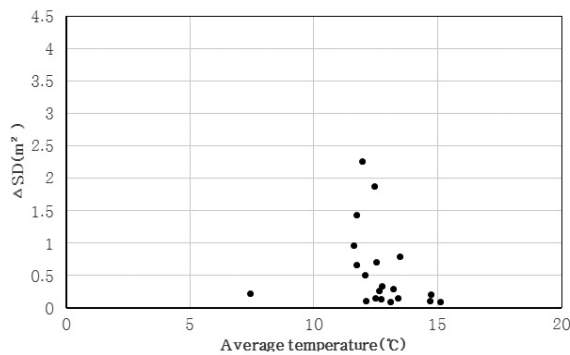


Fig. 11 Relationship between Δ SD and ASR Severity

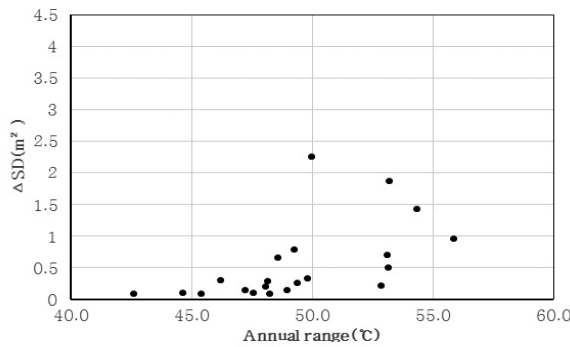
관관계가 있다고 판단하기에는 어려움이 따른다.

4.2.6. SD 변화량과 각 환경인자간의 상관관계

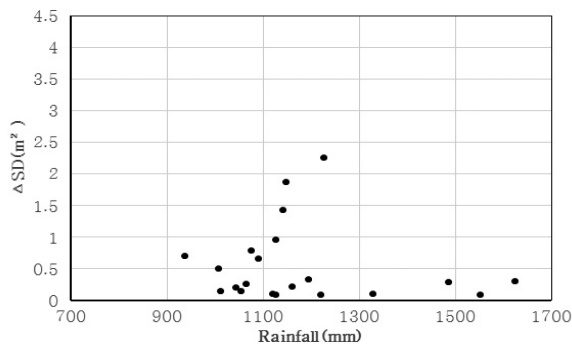
Fig. 12의 그래프는 SD 변화량과 7가지 환경인자(a) : 평균기온, (b) : 연교차, (c) : 강수량, (d) : 강수일수, (e) : 눈일수 (f) : 신적설, (g):영하일수]간의 상관관계를 나타낸 것이다. (a), (c), (e), (f) 그래프에서는 SD 변화량과의 특별한 상관관계를 찾을 수 없으며, (b), (d), (g)는 SD 변화량 약한 양의 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다. SD 변화량과 환경인자간의 경우 다른 인자들과 마찬가지로 그래프 상으로 상관관계를 판단하기 힘들었으며 통계분석을 통해 보다 면밀한 상관관계를 도출하여야 할 것으로 판단되었다.



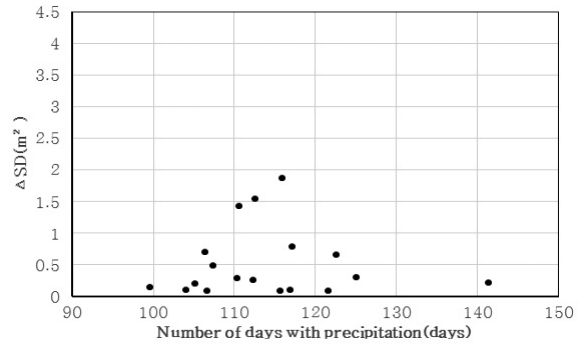
(a) Relationship between ΔSD and Average Temperature



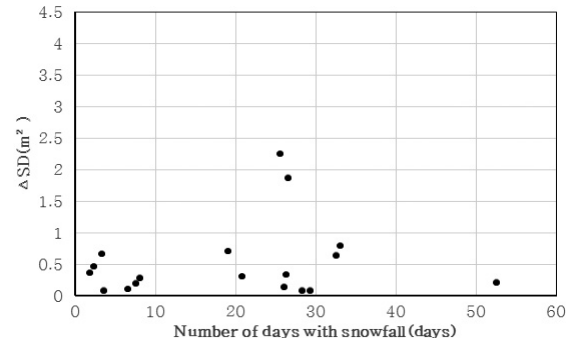
(b) Relationship between ΔSD and Annual Temperature Difference



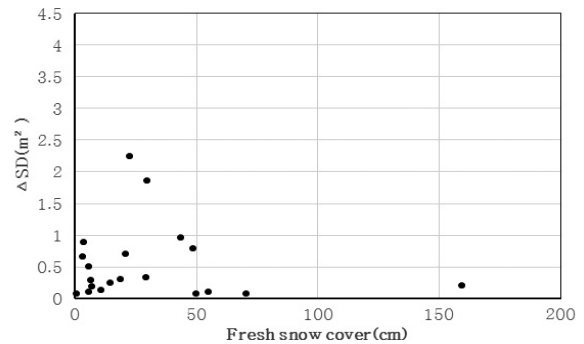
(c) Relationship between ΔSD and Rainfall



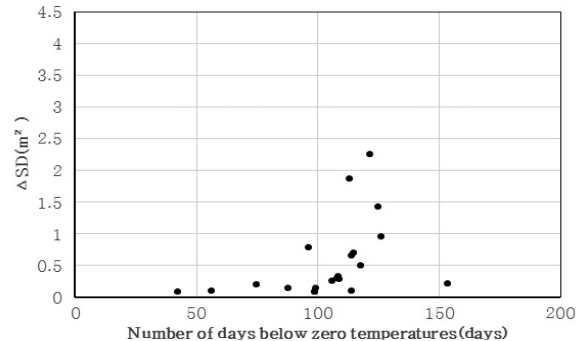
(d) Relationship between ΔSD and Number of Days with Precipitation



(e) Relationship between ΔSD and Number of Days with Snowfall



(f) Relationship between ΔSD and Fresh Snowfall



(g) Relationship between ΔSD and Number of Days Below Zero Temperatures

Fig. 12 Relationship between ΔSD and Environmental Factors

5. IRI와 SD 변화량의 예측모델의 개발

5.1. 모델의 기본 개념 및 형태

본 연구를 통해 도출된 IRI, SD 예측모델은 각 지수의 변화량을 예측하는데 그 목적이 있다. 현재 상태의 IRI 또는 SD의 예측모델을 통해 도출된 변화량을 합하면 알고자 하는 년도의 값을 예측할 수 있다. 모델의 기본 형태는 아래 식과 같으며 본 연구의 결론으로 IRI, SD 변화량 예측 모델을 제시하고자 한다.

$$IRI_1 = IRI_0 + \Delta IRI$$

where, $IRI_1 = IRI$ after 1 year

$$IRI_0 = \text{Present } IRI$$

$$\Delta IRI = IRI \text{ annual variation}$$

$$SD_1 = SD_0 + \Delta SD$$

where, $SD_1 = SD$ after 1 year

$$SD_0 = \text{Present } SD$$

$$\Delta SD = SD \text{ annual variation}$$

5.2. 지사별 IRI, SD 변화량 그룹화

PMS 데이터 분석을 통해 각 지사별로 특수한 지점들이 있음을 파악할 수 있었고 이러한 특성을 데이터 분석에 적용하기 위해 각 지사별로 IRI, SD 변화량을 한 개의 값으로 나타내는 것이 적합할 것으로 판단하였다. 이를 위해 아래 Table 1과 같이 IRI, SD 변화량을 지사별 평균값으로 사용하였다.

Table 1. Result of Grouping Variation of IRI, SD by Branch

Line no.	Branch	IRI variation	SD variation	Line no.	Branch	IRI variation	SD variation
1	Gumi	0.0393	0.3217	15	Ham-pyeong	0.0244	0.2405
1	Daegu	0.0427	0.1059	15	Hwa-sung	0.0234	1.769
1	Yang-san	0.0431	0.3333	50	Gunpo	0.0422	1.1144
1	Yeong-Dong	0.068	1.1346	50	Dae-gwan-ryeong	0.032	0.0833
10	Sun-chun	0.1363	0.3923	50	Wonju	0.0889	0.9644
10	Jinju	0.3247	0.0386	50	Icheon	0.1303	1.8485
35	Muju	0.0252	1.3672	45	Sanju	0.0444	0.646

35	San-chung	0.0192	0.5585	45	Sanju	0.0193	1.2803
35	Icheon	0.1383	0.419	45	Chang-nyeong	0.0504	0.3631
35	Jin-cheon	0.1169	1.0355	45	Chung-ju	0.0616	0.5265
100	Si-heung	0.0194	0.1912	55	Gunwi	0.0313	0.647
15	Dang-Jin	0.0282	0.1607	55	Yeong-ju	0.0236	0.7825
15	Bo-ryeong	0.0451	0.3533	55	Jae-chun	0.038	0.0502
15	Buan	0.0163	0.4583	55	Hong-chun	0.0375	1.2583

5.3. 회귀분석을 위한 독립변수의 선정

분석에 고려된 독립변수는 현재 IRI와 SD, 재령, AADT, ASR 등급, 제설제 사용량, 평균기온, 연교차, 강수량, 강수일수, 눈일수, 적설량, 영하일수이며 종속 변수인 IRI와 SD 변화량과의 피어슨 상관계수(0.1 이상)와 다중공선성(VIF 값 10 이하), 그리고 변수별 유의 수준(0.05 이하)를 고려하여 변수를 선정하였다. 이를 통해 IRI 변화량의 경우 현재 IRI, 재령, AADT, 연교차, 강수일수, ASR 등급을 회귀분석 대상 독립변수로 선정하였으며, SD 변화량의 경우 현재 SD, 현재 IRI, 제설제 사용량, 연교차를 독립변수로 선정하였다.

5.4. IRI 변화량 통계 분석 및 예측 모델

5.4.1. IRI 변화량과 변수별 피어슨 상관계수

IRI 변화량과 각 변수간의 상관관계를 알아보기 위해

Table 2. ΔIRI and Pearson Correlation Coefficient by Variable

Pearson's correlation coefficient, N=322 H0: $\rho=0$ in assumption $\text{Prob} > r $		
Independent variable	Pearson's coefficient	Significant probability
Age	0.59	< .0001
AADT	0.46	< .0001
# of days with snowfall	-0.30	< .0001
Present IRI	0.29	< .0001
Annual Range	0.22	< .0001
# of days of precipitation	0.21	0.0002
Deicing usage	0.17	0.0018
ASR ratio	0.14	0.013
Average temperature	-0.055	0.33
# of days below zero temperature	-0.052	0.36
Present SD	0.024	0.66
Amount of precipitation	-0.020	0.72
Rainfall	-0.01	0.86

피어슨 상관계수를 산출하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

5.4.2. 변수별 잔차 분석

잔차의 이분산성 검정과 설명변수의 다차항이 필요한지를 알아보기 위해 잔차분석을 아래 Fig. 13 산점도를 통해 수행하였다. 재령의 경우 이차곡선의 형태가 나타나 이차항이 필요할 것으로 판단되어 제곱항을 사용하였다.

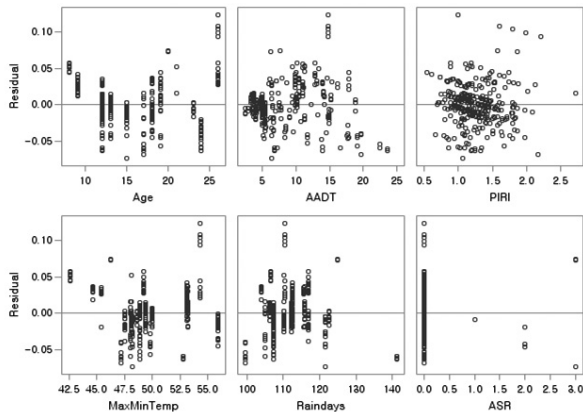


Fig. 13 Result of Residual Analysis by Explanation Variable of ΔIRI Prediction Model

5.4.3. 통계분석 및 예측 모델

아래 Table 3은 선택된 설명변수를 이용한 통계분석 결과이다. IRI 변화량의 분석결과, 모든 변수가 다중공선성에 문제가 없었으며 유의확률에도 크게 문제가 없는 것으로 분석되었다.

Table 3. Result of ΔIRI by SAS Analysis

R-square		0.65				
Variable	DF	Parameter estimate	Standard error	t Value	Pr > t	Variance inflation
Intercept	1	- 0.43	0.041	-10.59	<.0001	0
Present IRI	1	0.024	0.0052	4.63	<.0001	1.07
Age	1	0.00015	0.000011	13.83	<.0001	1.12
AADT	1	0.0039	0.00034	11.26	<.0001	1.10
ASR ratio	1	0.017	0.0047	3.65	0.0003	1.09
Annual range	1	0.0033	0.00053	6.34	<.0001	1.06
# of days of precipitation	1	0.0020	0.00027	7.26	<.0001	1.08

위의 통계분석 결과에 따라 도출된 IRI 변화량 예측 모델은 아래 식과 같으며 변수에 대한 자세한 설명을 포함하였다.

$$\Delta IRI = -0.43 + 0.024IRI_0 + 0.00014AGE^2 + 0.0039AADT + 0.017ASR + 0.0033TR + 0.002RAIN$$

$$R^2 = 0.65$$

where, ΔIRI = 1년간 IRI 변화량(m/km)

IRI_0 = 당해년도 IRI(m/km)

AGE = 당해년도 재령(년)

TR = 연교차(°C), Temperature Range

$RAIN$ = 강수일수(일), #of days of precipitation

5.4.4. ΔIRI 모델의 적정성 검증

본 연구에서는 개발된 ΔIRI 모델의 적정성을 비교하기 위하여 Line of Equality를 활용하였다. 예측된 IRI 값의 경우 실제 관측값과 비교적 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 아래 Fig. 14와 같다.

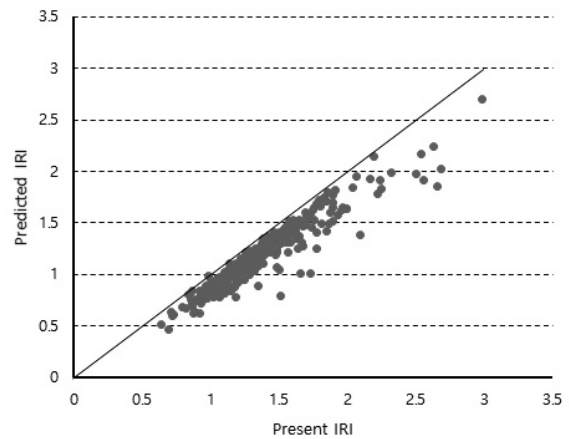


Fig. 14 Line of Equality of ΔIRI Models Developed

5.5. SD 변화량 통계 분석 및 예측 모델

5.5.1. SD 변화량과 변수별 피어슨 상관계수

SD 변화량과 각변수 간 상관관계를 분석하기 위해 피어슨 상관계수를 산출하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Δ IRI and Pearson Correlation Coefficient by Variable

Pearson's correlation coefficient, N=322 HO: Rho=0 in assumption Prob> r		
Independent variable	Pearson's coefficient	Significant probability
Annual range	0.45	< 0.001
# of days below zero temperature	0.45	< 0.001
Deicing chemical	0.41	<0.001
Average temperature	-0.36	< 0.001
# of days of snowfall	0.30	< 0.001
Present IRI	0.18	0.0012
Present SD	0.15	0.0083
Age	0.12	0.028
ASR ratio	-0.093	0.094
# of days of precipitation	0.077	0.17
Rainfall	0.017	0.76
Fresh snow cover	-0.015	0.79
AADT	-0.01	0.85

5.5.2. 변수별 잔차 분석

잔차의 이분산성 검정과 설명변수의 다차항이 필요한지를 알아보기 위해 잔차분석을 아래 Fig. 15 산점도를 통해 수행하였다. 연교차와 제설제 사용량에 이분산성이 관찰되어 이를 해결하기 위해 종속변수를 로그 변환하였다.

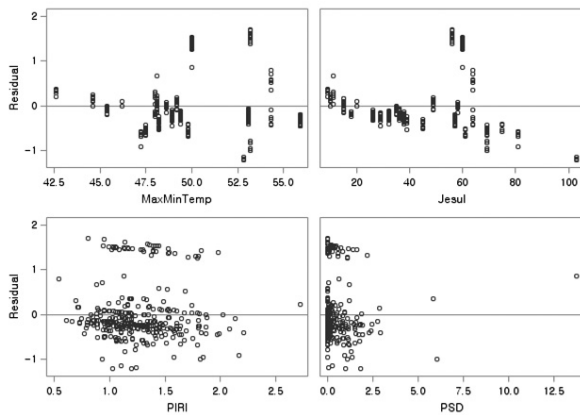


Fig. 15 Result of Residual Analysis by Explanation Variable of Δ SD Prediction Model

5.5.3. 통계분석 및 예측 모델

Table 5는 선택된 설명변수를 이용한 통계분석 결과이다. SD 변화량의 분석결과, 모든 변수가 다중공선성에 문제가 없었으며 현재 SD 변수의 경우 앞서 언급했던 유의확률 기준 0.05를 넘지만 공학적 유의성을 감안하여 변수로 사용하였다.

Table 5. Result of Δ IRI by SAS Analysis

R-square		0.47				
Variable	DF	Parameter estimate	Standard error	t Value	Pr > t	Variance inflation
Intercept	1	- 12.15	0.79	-15.48	<.0001	0
Present IRI	1	0.56	0.15	3.87	0.0001	1.02
Present SD	1	0.083	0.044	1.87	0.062	1.03
Deicing chemical	1	0.0077	0.0025	3.07	0.0023	1.24
Annual range	1	0.20	0.016	12.28	<.0001	1.24

위의 통계분석 결과에 따라 도출된 SD 변화량 예측 모델은 아래 식과 같으며 변수에 대한 자세한 설명을 포함하였다.

$$\Delta SD = e^{-12.15 + 0.56IRI_0 + 0.083SD_0 + 0.0077DC + 0.20TR}$$

else,

$$\begin{aligned} \text{Log}(\Delta SD) = & -12.15 + 0.56IRI_0 + 0.083SD_0 \\ & + 0.0077DC + 0.20TR, \quad R^2 = 0.47 \end{aligned}$$

where, ΔSD = 1년간 SD 변화량

IRI_0 = 당해년도 IRI(m/km)

SD_0 = 당해년도 SD(m²)

DC = 제설제 사용량(ton/km), Deicing Chemical

TR = 연교차(°C), Temperature Range

5.5.4. Δ SD 모델의 적정성 검증

Fig. 16은 Δ SD 모델의 Line of Equality 분석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 많은 데이터들이 Line of

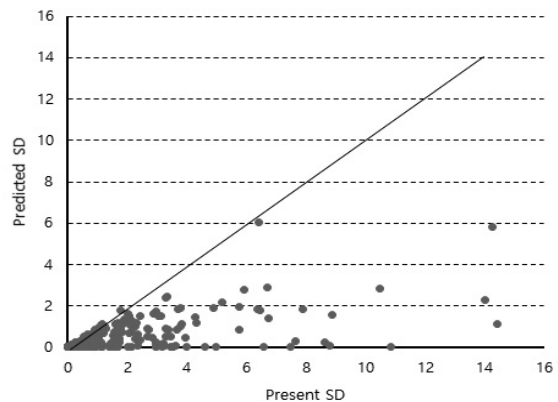


Fig. 16 Line of Equality of Δ SD Models Development

Equality의 아래쪽으로 분포하여 예측치의 정확도는 비교적 낮은 것으로 예상할 수 있다.

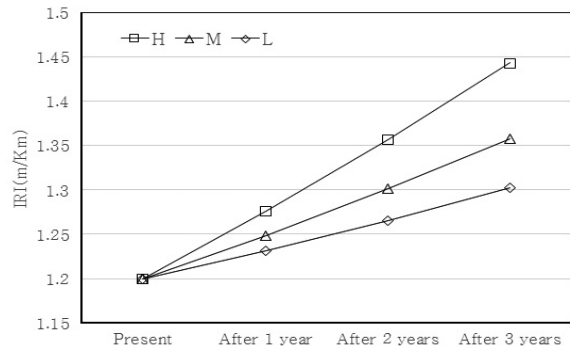
6. 예측 모델의 민감도 분석 및 활용방안

6.1. 민감도 분석

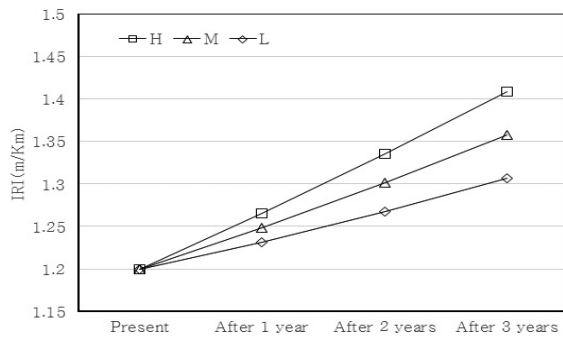
연구에서는 각 인자들의 양측 10% 데이터를 제외하고 중앙값을 M으로 하고 최댓값과 최솟값을 H, L로 하되 M값을 기준으로 같은 값만큼 떨어진 값을 지정하여 L, M, H를 결정하였다. 이를 이용해 M값을 고정하고 개별 변수가 H일 경우와 L일 경우를 산출하여 3년 후의 IRI와 SD값의 차이를 분석하였다.

6.1.1. IRI 예측 모델의 민감도 분석 결과

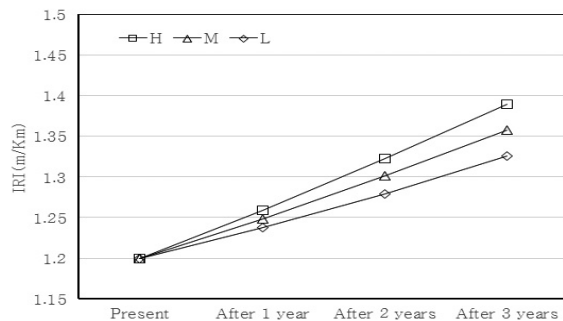
IRI 예측 모델의 변수별 민감도 분석 결과는 Fig. 17의



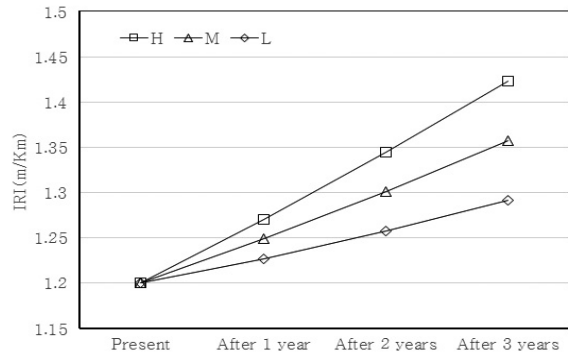
(a) Age



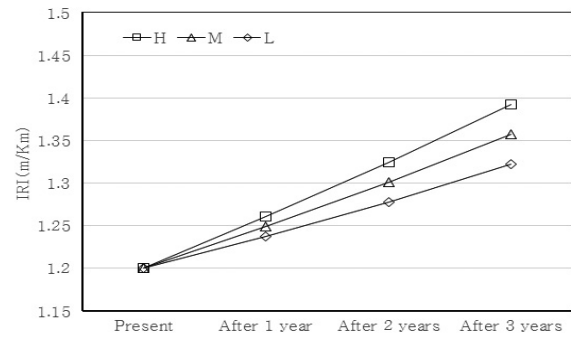
(b) ASR



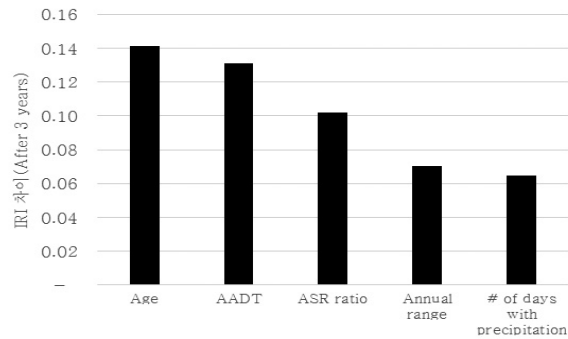
(c) Number of Days with Precipitation



(d) AADT



(e) Annual Range



(f) IRI Increased After 3 Years

Fig. 17 Result of Sensitivity Analysis of IRI Prediction Model

Table 6. Detail of Variables Used Sensitivity Analysis in IRI Model

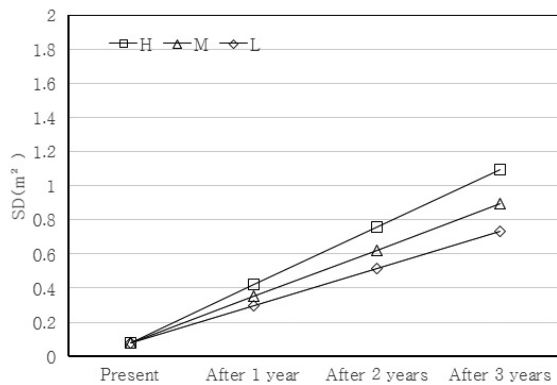
Variable	H	M	L
Age(years)	19	13	7
AADT(1,000 vehicles)	12.1	6.5	0.9
ASR ratio	2	1	0
Annual temp diff(°C)	52.9	49.4	45.8
# of days of precipitation	115.9	110.5	105.1

(a)~(e)와 같으며 (f)에 3년 후의 각 변수가 H일 경우와 L일 경우의 IRI 값 차이를 나타내었다. 민감도 분석에 사용된 변수별 상세 자료는 Table 6에 정리하였다.

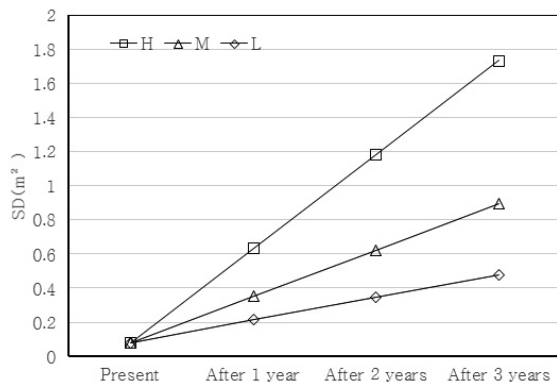
재령, AADT, ASR 등급, 연교차, 강수일수 순으로 IRI값의 차이가 큰 것으로 나타났으며 이러한 결과를 바탕으로 재령이 IRI 예측 모델에 가장 큰 영향을 미친다는 결과를 도출할 수 있었다.

6.1.2. SD 예측 모델의 민감도 분석 결과

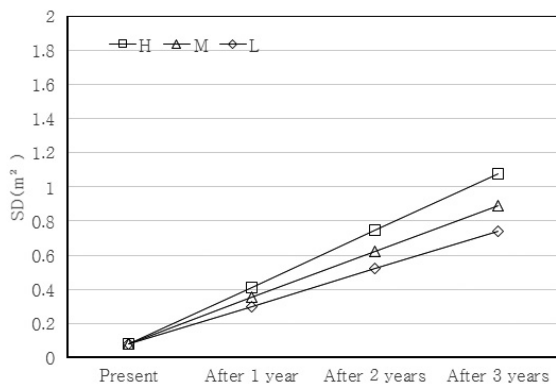
SD 예측 모델의 변수별 민감도 분석 결과는 Fig. 18의 (a)~(c)와 같으며, (d)에 3년 후의 각 변수가 H일 경우와 L일 경우의 SD 값 차이를 나타내었다. 민감도 분석에 사용된 변수별 상세 자료는 아래 Table 7에 정리하였다.



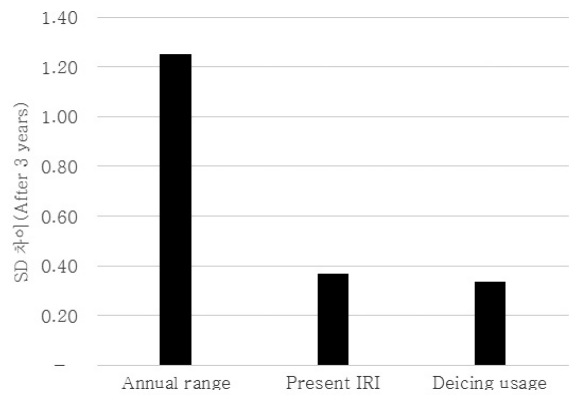
(a) Present IRI



(b) Annual Range



(c) Deicing Usage



(d) Difference Value of SD After 3 Years

Fig. 18 Result of Sensitivity Analysis of SD Prediction Model

Table 7. Detail of Variables Used Sensitivity Analysis in SD Model

Variable	H	M	L
Present IRI(m/Km)	1.60	1.20	0.80
Deicing Usage(ton/Km)	65.12	38	11.63
Annual range(°C)	52.9	49.4	45.8

연교차, 현재 IRI, 제설제 사용량 순으로 SD값의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 바탕으로 연교차가 SD 예측 모델에 가장 큰 영향을 미친다는 결과를 도출할 수 있었다.

6.2. 예측 모델의 적용

6.2.1. HPCI 산출식 및 예측 모델의 활용 방안

현재 사용되고 있는 콘크리트 포장의 HPCI 산출식(한국도로공사, 2014)은 다음과 같으며, HPCI값은 클수록 포장상태가 양호함을 나타낸다.

$$HPCI = 5 - 0.8 \times IRI^{0.7} - 0.85 \times \log(1 + 10 \times 2.5 \times SD)$$

해당 산출식에 예시 상황을 제시하고 본 연구를 통해 도출된 예측 모델을 적용하여 활용 방안을 제시하고자 하였다. 다음은 예시 상황이며, AADT에 따라 포장 상태의 향후 변화 추이를 Fig. 19에 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 효율적인 포장관리가 될 수 있도록 하는데 이바지할 것으로 사료된다.

Fig. 19는 AADT를 중앙선 홍천지사 내 상위 값(6.57, 천대)과 하위 값(3.71, 천대)으로 구분하고 모든 변수의 값이 동일할 때 비교한 것이다. 현재 한국도로공사의 유지보수 기준을 HPCI값이 2.5라 할 때 재령 18

년일 때에는 두 지점 모두 HPCI값이 3.27이나 AADT에 따라 상위 지점은 19년째에 보수가 필요하며 하위 지점은 22년째에 보수가 필요함을 Fig. 19를 통해 알 수 있다.

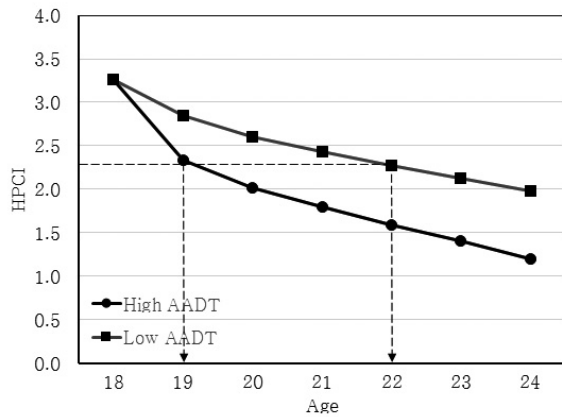


Fig. 19 Application Example of HPCI Model (Changes of Pavement Condition by AADT)

7. 결론

본 연구에서는 고속도로 PMS 데이터베이스를 분석하여 IRI와 SD 예측 모델을 제시하고 이를 이용해 앞으로 하는 년도의 고속도로 포장상태 지수(HPCI)를 예측할 수 있도록 하였다. 모델의 독립변수로서 고려된 변수들은 재령, AADT, ASR 등급, 제설제 사용량, 평균기온, 연교차, 강수량, 강수일수, 눈일수, 적설량, 영하일수 등을 포함하였으며, 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. IRI, SD 변화량의 SAS 분석 결과, IRI 변화량의 경우 재령, AADT, 현재 IRI, 연교차, 강수일수, ASR 등급과 상관관계를 보였으며 이를 반영해 모델을 제시하였다. SD 변화량의 경우 연교차, 제설제 사용량, 현재 IRI, 현재 SD와 상관관계를 보였으며, 이를 이용해 모델을 제시하였다.
2. IRI에 대한 통계 분석 결과, 재령, AADT, 현재 IRI, 연교차, 강수일수, ASR 등급 순으로 상관성을 보였으며, 통계분석 결과 모든 변수가 공학적, 통계적으로 유의한 것으로 판단되었다.

3. SD에 대한 통계 분석 결과, 연교차, 제설제 사용량, 현재 IRI, 현재 SD 순으로 상관성을 보였으며 PMS 데이터 분석 및 통계분석 결과 현재 SD를 제외한 모든 변수가 공학적, 통계적으로 유의하였다.
4. 통계분석 결과, 연교차의 경우 IRI, SD 변화량 모두에서 중요한 설명변수로 나타났다. 연교차가 클수록 콘크리트 슬래브의 수축과 압축 거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며 평탄성과 표면손상에 영향을 줄 것으로 사료된다.
5. IRI, SD 예측 모델의 민감도분석 결과, IRI 변화량 예측 모델은 재령의 영향을 가장 크게 받았으며 SD 변화량 예측 모델은 연교차의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다.
6. 예시를 통해 본 연구의 IRI, SD모델의 활용방안을 제시하였다.

REFERENCES

- Jain, S., Aggarwal, S., and Parida, M. (2005). "HDM-4 Pavement Deterioration Models for Indian National Highway Network." *J. Transp. Eng.*, 10.1061/(ASCE) 0733-947X (2005) 131:8(623), pp.623-631.
- Kim, S. G., Choi, S. Y., Yoon, K. K. (2006). "Proposal of Fatigue Damage Model for Concrete Pavement Using Long Term Pavement Performance Data." *International Journal of Highway Engineering*, pp.119-1261.
- Kim, Y. K., et al. (2009). "Development of IRI-Model for Korea Concrete Pavement." *International Journal of Highway Engineering*, pp.111-116
- Korea Expressway Corporation (2014). *Highway Pavement Condition Survey and Analysis(HPMS Part)*.
- Kwon, S. A., Kim, N. H., Suh, Y. C. (2000). "A Study on Development of the Concrete Pavement Condition Index." *Journal of the Korean Society of Pavement Engineers*. Vol 2.No.3 , pp.145-1531.
- Lee, I. H. (2014). *EASYFLOW REGRESSION*, HanNaRae, Seoul Korea.
- Song I. J., Suh, Y. C. (2001). "Development of Pavement Roughness Deterioration Model for Korea National Highway." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol.21 No.5-D, pp.635-6421.
- Yoo, T. S., Han, S. H. (2002). "Distress and Environmental Data Analysis for Highway LTPP Sections of JCP." *Korean Society of Civil Engineers*, pp.1058-10611.