

## 동상방지층의 구조적 평가를 위한 모형 개발

### Development of Model for Structural Evaluation of Anti-Freezing Layer

이 문 섭	Lee, Moon sup	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 · 공학박사 (E-mail : truepath@kict.re.kr)
허태영	Heo, Tae Young	정회원 · 충북대학교 정보통계학과 교수 · 통계학박사 (E-mail : theo@cbnu.ac.kr)
박희문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
김부일	Kim Boo il	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 · 공학박사 (E-mail : bikim@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

The thickness of anti-freezing layer has been empirically determined using the frost depth obtained from the freezing index and has not been generally considered as a structural layer in pavement design procedure. In fact, the anti-freezing layer makes a role in structural layer and enables to reduce the total thickness of pavement system. The objective of this study is to develop the statistical regression model for evaluating the structural capacity of anti-freezing layer using Falling Weight Deflectometer(FWD) test data in asphalt pavements. The FWD testing was conducted at the embankment, cutting, and boundary area of various test sections to estimate the structural capacity of anti-freezing layer in different foundation condition. It is observed from this testing that the center deflections of pavement structure with anti-freezing layer are smaller than those without anti-freezing layer ranging from 0.4 to 82.6%. To determine the variables of statistical model, the correlation study has been conducted between various FWD deflection indexes and the anti-freezing layer thickness. It is found that the  $\Delta BDI(\%)$  ( $\Delta$  Basin Damage Index(%)) is highly correlated with anti-freezing layer thickness. The  $\Delta BDI(\%)$  model were developed for evaluating structural capacity of anti-freezing layer using linear mixed-effect models

#### KEYWORDS

anti-freezing layer, FWD, linear mixed-effect model

#### 요지

현재 도로포장 설계법에 따르면, 동상방지층의 두께는 지역별 온도조건에 따라 결정되는 동결깊이에 의해 결정되며 동상방지층의 지지력은 설계에서 고려되지 않고 있다. 동상방지층을 도로포장체에서 구조층으로 고려할 경우에는 기존 도로포장층의 두께를 감소시킬 수 있으며 보다 경제적인 도로 포장단면을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 동상방지층의 지지력을 평가하기 위한 통계적 모형을 개발하였다. 동상방지층의 구조적 역할을 규명하고 동상방지층 구조적 평가 모형 개발을 위하여 2m 이하 저성토부, 절토부 및 절성경계부 등을 구분하여 포장 하부층에서 Falling Weight Deflectometer(FWD) 시험을 계절별로 수행하였다. 본 시험은 동상방지층의 유무에 따른 지지력 차이를 규명하기 위하여 동상방지층이 있는 구간과 없는 구간으로 구분하여 수행하였다. 본 시험결과, 동상방지층이 설치된 구간에서의 FWD 처짐량이 동상방지층 미설치 구간에 비해 0.4~82.6% 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 지지력을 검증하였다. 다양한 FWD 처짐지수와 동상방지층 두께와의 상관관계를 조사한 결과, 보조기층 파손지수의 차이값( $\Delta BDI$ )과 동상방지층 두께와의 상관도가 가장 높았다. 본 논문에서는  $\Delta BDI$ 값을 선형혼합효과 모형에 적용하여 동상방지층을 구조적으로 평가할 수 있는 모형을 개발하였다.

#### 핵심용어

동상방지층, FWD, 선형혼합효과모형

# 1. 서론

국내 도로포장두께 설계는 미국에서 개발된 AASHTO 설계법, 일본에서 사용하고 있는 TA설계법 등을 주로 사용하고 있다. 그러나 이들 설계법은 각국의 기준에 맞추어 개발되었기 때문에 우리나라 실정에 잘 맞지 않아 설계수명이 실제 도로수명과 차이를 보이고 있다. 동상방지층 설계에서는 기온자료를 분석하여 개발된 동결지수를 근간으로 하여 동결지수와 동결깊이의 상관관계식으로부터 동결깊이를 산정하고 있다(도로설계기준, 2005 ; 도로설계요령, 2002).

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 동토지역의 지역적 기후 조건 특성으로 국내 도로분야에서는 동결융해(Freezing and Thawing)로 인한 피해를 줄이기 위하여 도로포장구조를 설계할 때 노상이 동결하는 것을 방지하기 위하여 동상방지층(Anti-Freezing Layer)을 노상위에 별도로 설치하도록 하고 있다(도로공사표준시방서, 2009).

그러나 도로는 다양한 재료와 단면으로 구성된 구조물이기 때문에 계절 및 재료 물성특성 뿐만 아니라 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재, 기존 동상방지층 설계법에 따르면, 동상방지층은 포장체의 지지력과는 무관하게 온도조건에 따른 동결깊이에 따라 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 내지는 과다설계의 우려가 있다.

본 연구에서는 현재까지 개발된 가장 우수한 포장 지지력 측정 장비 중 하나인 Falling Weight Deflectometer (FWD) 이용한 도로 동상방지층의 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하여 동상방지층의 구조적 효과를 나타낼 수 있는 모형 개발에 목적을 두고 있다.

## 2. 현장 FWD 시험을 통한 동상방지층 지지력 조사

### 2.1. 현장 시험구간

도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치 기준 연구에서는 시험포장 구간을 국내 전 지역에 걸쳐 구축하였으며, 북부 지역과 남부 지역으로 구분하여 구축하였다(국토해양부, 2010). 북부 지역의 동결지수  $650^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  미만에 대하여  $350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} \sim 450^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  3개 지역과  $450^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} \sim 550^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  3개 지역,  $550^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} \sim 650^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  3개 지역

에 대하여 25 단면(절토부 9개 단면, 절성경계부 9개 단면 및 저성토부 7개 단면)을 구축하였다. 남부 지역은 동결지수  $350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  미만에 대하여  $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  이하 3개 지역과  $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{일} \sim 350^{\circ}\text{C}\cdot\text{일}$  3개 지역에 대하여 16개 단면(절토부 6개 단면, 절성경계부 6개 단면 및 저성토부 4개 단면)을 구축하였다.

### 2.2. FWD 시험

FWD 시험은 각각의 포장단면에 대한 구조적 성능을 평가하기 위해 수행되었다. FWD 시험을 통해 각 위치별 표면 처짐량 데이터를 수집하였다. 재하하중은 4ton, 8ton, 12ton으로 하였으며, 각각의 포장단면별 전국 17개 현장에 대하여 보조기층면에서 FWD 시험을 수행하였으며, 그림 1은 시험포장구간의 단면 및 FWD 실험 위치를 보여주고 있다. 각각의 단면은 동상방지층이 있는 구간과 없는 구간으로 구분하여 계측센서를 기준으로 양쪽 2m 구간에서 실험을 수행하였다. 그림 2는 FWD 시험 장비의 형상을 보여주고 있다.

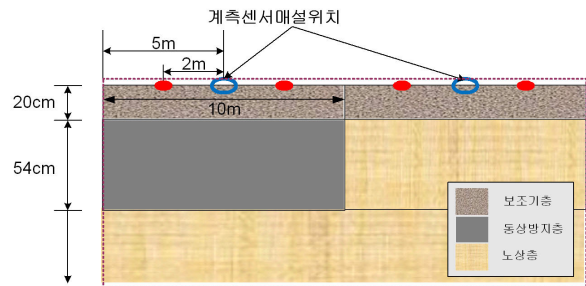


그림 1. 시험포장 구간의 예

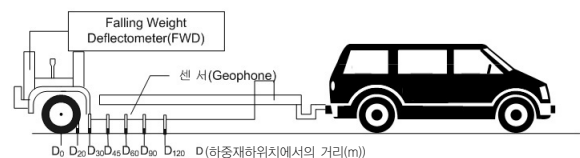


그림 2. FWD 장비 형상

표 1은 FWD 시험을 위한 조건 및 기간을 보여주고 있다. 포장체의 동결 및 융해조건에서 동상방지층 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하기 위하여 3단계로 구분하여 FWD 시험을 진행하였다. 1단계는 동결 및 융해에 대한 기준값으로 온도  $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 에서 시험을 수행하였다. 2단계는 대기 온도가 최저로 내려가는 시기에 수행하였으며, 3단계는 노상의 함수비가 가장 높고 올라가는 시기에 시험을 수행하였다. 노상의 함수비는 현장에 매설된 계측자료를 이용하여 시험 날짜를 결정하였

다. 현장시험은 1년에 최소 3회를 기본으로 매년 시험을 수행하여 동상방지층 유·무에 따른 구조적 특성을 지속적으로 분석할 예정이다.

표 1. FWD 시험 조건 및 기간

단계	조 건	시험수행 기간	기 타
1단계	가을철 (10~20℃)	10월 말	
2단계	기온이 최저로 내려간 시기	1월 말	대기온도가 최저로 내려갔을 시기
3단계	융해시기	3월 말	노상의 함수비가 최고로 올라갔을 시기

### 2.3. FWD 처짐지수 분석

FWD 처짐량을 통하여 산정될 수 있는 FWD 처짐지수는 시간에 따른 포장체의 거동변화를 관측하기 위해 사용되어졌다.

표 2는 본 논문에서 검토한 다양한 FWD 처짐지수를 보여주고 있다. SCI는 상부 기층과 보조기층을 대표하기 위한 것인데 반하여 BDI는 상부 노상을 대표한다. 또한 SDI는  $D_{610}-D_{1524}$ 로서 정의되며, SI는  $D_{305}-D_{1524}$ 로 정의된다. 이는 기층으로부터 노상까지 전체 표면층 아래의 상태를 대표하는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 지수들은 포장체의 구조적 특성을 쉽게 구해서 판단할 수 있는 지표로 사용된다. 본 연구에서는 아래와 같이 FWD 시험의 처짐량 지수를 이용하여 처짐량 비를 계산하였으며, 이를 이용하여 동상방지층 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하였다. 각각의 지수별 처짐량의 비는 동상방지층의 두께가 증가할수록 증가하는 경향을 보여야한다. 이렇게 증가하는 경향은 동상방지층의 구조적 효과가 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 지수별 처짐량비 산정방법을 식(1)~식(7)에서 보여주고 있다.

표 2. FWD 지수

FWD 지수	공 식
Deflection at Load Plate(D0)	D0
Base Curvature Index(BCI)	$D_{610}-D_{914}$
Surface Curvature Index(SCI)	$D_0-D_{305}$
Basin Damage Index(BDI)	$D_{305}-D_{610}$
Subgrade Damage Index(SDI)	$D_{610}-D_{1524}$
Subsurface Index(SI)	$D_{305}-D_{1524}$

Dx 는 하중판으로부터 xmm에서 측정된 표면 처짐  
일반적인 이격거리는 0, 305, 610, 914, 1524mm(LTPP, 2000)

$$\Delta D0(\%) = \frac{D0-D0^*}{D0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, D0 = 동상방지층이 없는 구간의 D0

D0\* = 동상방지층이 있는 구간의 D0

$$SCI = D0 - D30 \quad (2)$$

여기서, D0 = 재하판 중심의 처짐

D30 = 재하판으로부터 30cm 떨어진 지점의 처짐

$$\Delta SCI(\%) = \frac{SCI-SCI^*}{SCI} \times 100 \quad (3)$$

여기서, SCI = 동상방지층이 없는 구간의 SCI

SCI\* = 동상방지층이 있는 구간의 SCI

$$BCI = D65 - D90 \quad (4)$$

여기서, D65 = 재하판으로부터 65cm 떨어진 지점의 처짐

D90 = 재하판으로부터 90cm 떨어진 지점의 처짐

$$\Delta BCI(\%) = \frac{BCI-BCI^*}{BCI} \times 100 \quad (5)$$

여기서, BCI = 동상방지층이 없는 구간의 BCI

BCI\* = 동상방지층이 있는 구간의 BCI

$$BDI = D30 - D65 \quad (6)$$

여기서, D30 = 재하판으로부터 30cm 떨어진 지점의 처짐

D65 = 재하판으로부터 65cm 떨어진 지점의 처짐

$$\Delta BDI(\%) = \frac{BDI-BDI^*}{BDI} \times 100 \quad (7)$$

여기서, BDI = 동상방지층이 없는 구간의 BDI

BDI\* = 동상방지층이 있는 구간의 BDI

### 3. FWD 시험결과

#### 3.1. 동상방지층 유·무에 따른 처짐량 변화

그림 3은 17개 현장 중 수안보 현장에 대하여 FWD 시험을 통해 측정된 처짐량 데이터 추이를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 동상방지층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되었다.

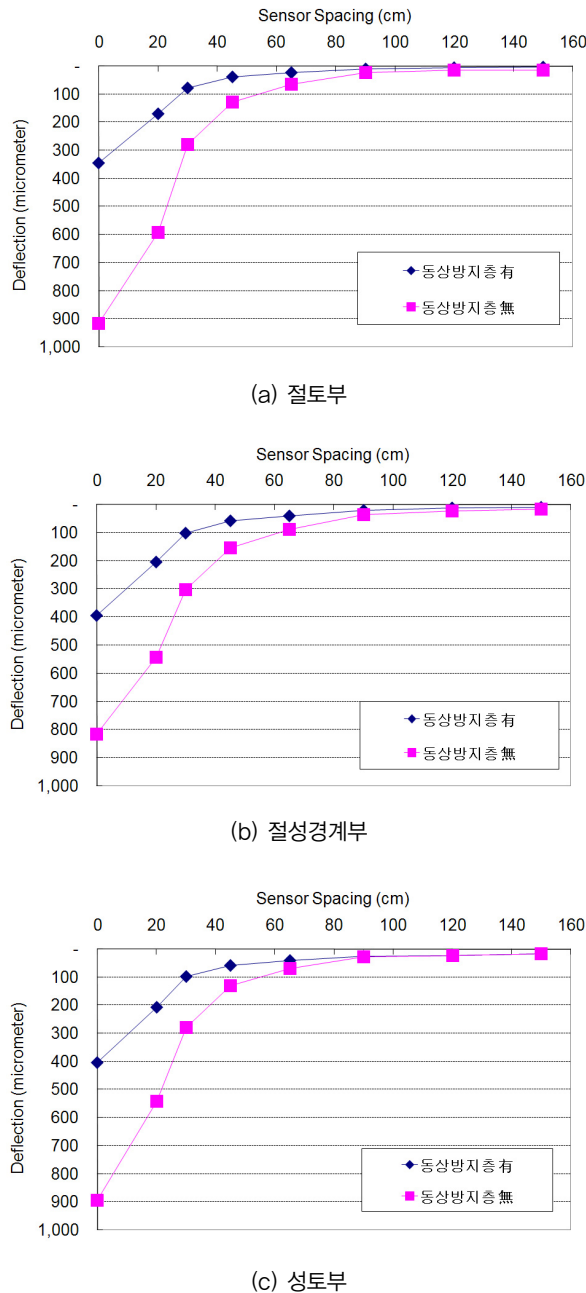


그림 3. FWD 처짐량 데이터 비교(수안보)

그림 4에서 보듯이 포장체의 특성(온도, 지역 등)에 따라 일부 시험 구간에서 약 400 $\mu$ m 이상으로 동상방지층 유·무에 따른 차이를 보여주고 있다. 하지만, 그림 4에서 보듯이 80% 이상인 대부분의 시험 구간에서 200

$\mu$ m 이내에서 차이를 보여주고 있다.

포장 단면별로 살펴보면, 절토부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 1.0~82.6% 정도 감소하며, 절성경계부에서 동상방지층이 있는 경우에 처짐량 값이 약 0.5~82.2% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 성토부의 경우에는 동상방지층이 있는 경우 처짐량 값이 약 0.4~82.5% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

즉, 이와 같이 동상방지층은 포장체의 상태에 따라서 구조적인 효과가 크게 나타나며 구조적인 역할을 담당하고 있는 것으로 확인할 수 있었다.

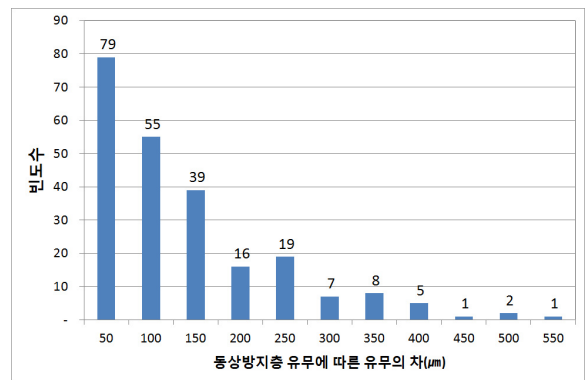


그림 4. 동상방지층 유·무에 따른 DO 차이에 따른 빈도수

### 4. 동상방지층 두께와 FWD 지수 분석

그림 5~그림 8은 상기 식(1)~식(7)을 이용하여 동상방지층 두께 변화와 동상방지층 유·무에 따른 구조적 효과에 대한 분석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이  $\Delta DO(\%)$ ,  $\Delta SCI(\%)$ ,  $\Delta BCI(\%)$ 의 결정계수는 각각 0.0907, 0.1362, 0.1331로 동상방지층 두께와 모형의 적합성이 낮은 것으로 나타났다. 반면,  $\Delta BDI(\%)$ 의 결정계수는 0.4387로 다른 포장 지수들보다 동상방지층 두께와 모형의 적합성이 높은 것으로 나타났다. 즉, FWD를 이용한 동상방지층 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하는 지수로는 BDI가 가장 적절한 것으로 나타났다. 표 1에서 보듯이 FWD 시험을 매년 3회 이상 시험을 수행하여, 그림의 포장지수 분석은 약 1.5cycle(5회) 시험결과를 바탕으로 나타난 결과이다. 향후 다양한 포장 상태 변화(온도, 지역, 포장 두께 등)에 따라서 시험을 수행하여 포장 지수에 대한 특성 분석을 지속적으로 수행할 예정이다.

#### 4.1. 통계분석을 통한 $\Delta BDI$ 모형 개발

본 연구에서는 동상방지층의 지지력 검증을 위해 다양

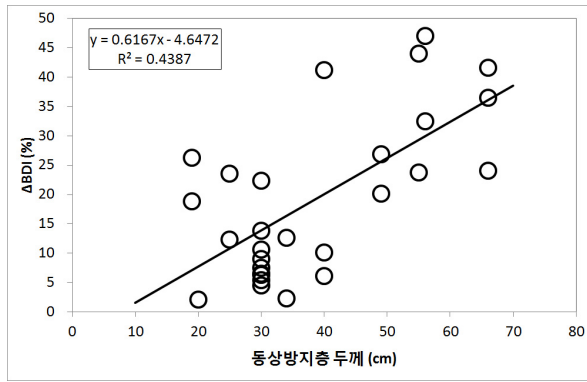


그림 5. 동상방지층 두께에 따른 ΔBDI(%)

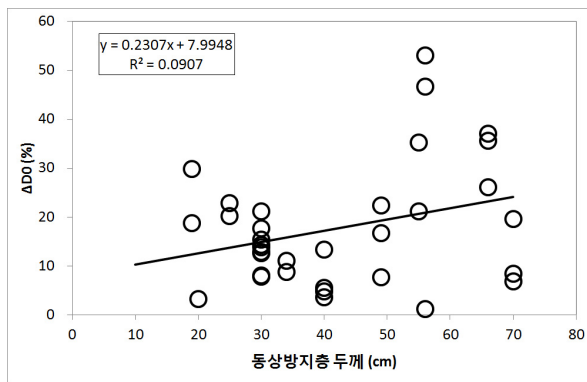


그림 6. 동상방지층 두께에 따른 ΔDO(%)

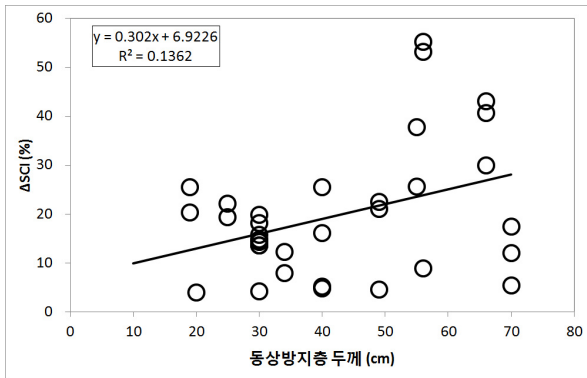


그림 7. 동상방지층 두께에 따른 ΔSCI(%)

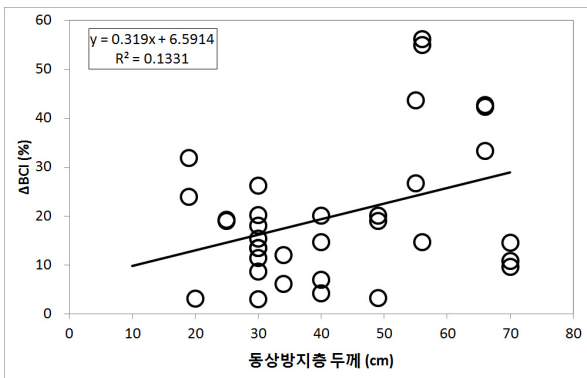


그림 8. 동상방지층 두께에 따른 ΔBCI(%)

한 통계적 방법을 이용하여 동상방지층의 효과성을 확인할 목적으로 하고 있다. 본 연구에서는 표 3에서와 같이 종속변수로는 ΔBDI(%)를 사용하였고, 지역, 포장형태, 동상방지층 유·무, 포장체 두께, 보조기층 두께, 동상방지층 두께, 포장체 전체 두께를 독립변수로 사용하였다.

또한 ΔBDI(%) 자료를 사용한 종속변수와 반복 실험의 평균값을 이용한 다양한 모형 개발을 통해 가장 적합한 모형을 확인하였다. 또한 설명변수를 범주형 자료로 구분한 방법과 범주형으로 구분하지 않은 변수로 구분하여 예측력을 높이는 모형을 선택하였다.

표 3. 통계분석에 사용된 변수

구 분	내 용
Region	17개 시험 구간
Type	절토부, 절성경계부, 저성토부
Anti_Freezing	동상방지층 유·무
AC_Thickness	포장층 두께
SG_Thickness	보조기층 두께
Anti_Thickness	동상방지층 두께
Total_Thickness	전체 두께
ΔBDI(%)	포장지수

본 연구에서는 ΔBDI(%)에 영향을 주는 독립변수들을 확인하기 위해 기존의 선형회귀모형과 지역적으로 실험을 한 계측 자료를 통한 자료의 분석을 위해 임의효과를 포함한 혼합모형을 통해 예측값을 계산하였다.

선형 고정 효과 모델은 포장층의 두께와 포장 형태 그리고 동상방지층의 유·무 사이의 관계 모델을 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (8)$$

여기서,  $Y = \Delta BDI(\%)$

$X =$  설명변수

$\beta =$  모수 또는 계수

$\epsilon =$  램덤오차,  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 을 의미한다.

선형혼합효과모형은 강수량, 토양, 고도 그리고 다른 관찰 할 수 없는 지형 특성과 같은 지역 특성 요인에 의해 발생하는 임의효과를 고려한다. 임의효과는 선형모델의 절편에 포함된다. 선형 혼합 효과 모델은 식 (9)와 같이 선형 고정 효과 모델로부터 수정할 수 있다.

$$Y = (\alpha + a) + X\beta + \epsilon \quad (9)$$

여기서,  $X$  = 고정효과 또는 임의효과의 설명변수

$\alpha$  = 절편의 고정부분

$a$  = 임의부분(예, 지역 특성 요인), 다양한 지역을 포함하고 *i.i.d.*  $N(0, \Omega)$ 로 가정함

$\beta$  = 모수 또는 계수

$\epsilon$  = 램덤오차,  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 을 의미한다.

#### 4.1.1. 선형회귀모형

$\Delta BDI(\%)$ 의 자료를 가지고 일반화선형모형 중 회귀모형을 통해 모형을 구축하였다. 본 모형에서 사용된 종속변수는  $\Delta BDI(\%)$ 이며, 독립변수로는 포장층 두께, 보조기층 두께, 동상방지층 두께를 이용하였으며, 본 자료는 실험장소, 실험일시, 실험위치가 다르기 때문에 실험을 통해 얻어진 실험값의 변동이 매우 크음을 알 수 있다.  $\Delta BDI$ 는 포장층 두께, 보조기층 두께, 동상방지층 두께를 설명변수를 사용하였으며 각 두께를 범주형 자료로 변환하여 모형에 포함시켰다. 또한 각 변수들 간의 교호효과(Interaction effect)가 존재하는 것으로 판단하여 2차항의 교호효과를 모형에 추가로 포함하여 모형을 구축하였다. 표 4는  $\Delta BDI(\%)$ 의 선형회귀모형을 이용한 예측 모형을 보여준다. 그림 9는 실험값과 모형으로부터 계산된 예측값과의 상관도를 보여준다.

표 4. 2수준 교호효과를 반영한  $\Delta BDI(\%)$  예측 모형

모수	수준	추정값	표준오차	t-값	P-값
Intercept		47.73079	14.70496	3.25	0.002
AP	15	26.12995	51.29202	0.51	0.6124
AP	16	15.36296	37.96806	0.4	0.6873
AP	20	6.823075	24.75214	0.28	0.7838
AP	21	-6.34376	24.01311	-0.26	0.7926
AP	25	21.37993	28.15786	0.76	0.4508
AP	27	-8.6698	13.42373	-0.65	0.521
AP	28	-18.1375	16.10848	-1.13	0.2649
AP	30	-0.69266	32.32863	-0.02	0.983
SG	20	-31.3744	16.97983	-1.85	0.0698
SG	25	-12.3021	21.64512	-0.57	0.572
SG	30	-46.4103	27.51047	-1.69	0.0971
SG	37	-24.8226	16.97983	-1.46	0.1493
ANTI	10	-2.57008	21.22479	-0.12	0.904
ANTI	18	-24.9692	22.4622	-1.11	0.271
ANTI	20	-4.49942	23.25059	-0.19	0.8472
ANTI	25	-5.82326	23.25059	-0.25	0.8031

ANTI	30	9.961645	18.00983	0.55	0.5823
ANTI	49	2.498266	16.97983	0.15	0.8835
ANTI	56	25.68277	13.42373	1.91	0.0607
ANTI	66	11.18358	26.84747	0.42	0.6786
TYPE	1	-43.3303	20.79596	-2.08	0.0417
TYPE	2	-25.4602	12.00655	-2.12	0.0383
AP*TYPE	16_1	26.70859	42.02294	0.64	0.5276
AP*TYPE	16_2	5.739713	24.01311	0.24	0.8119
AP*TYPE	20_1	25.87896	20.79596	1.24	0.2184
AP*TYPE	21_1	57.30591	24.01311	2.39	0.0204
AP*TYPE	21_2	33.44681	16.97983	1.97	0.0537
AP*TYPE	25_1	75.51189	24.75214	3.05	0.0035
AP*TYPE	27_1	7.671377	22.4622	0.34	0.734
AP*TYPE	28_1	32.90058	23.01691	1.43	0.1583
AP*TYPE	28_2	42.5085	17.19077	2.47	0.0164
AP*TYPE	30_1	25.40793	24.01311	1.06	0.2945
SG*TYPE	25_1	-7.09447	21.22479	-0.33	0.7394
SG*TYPE	30_1	67.61569	24.75214	2.73	0.0084
SG*TYPE	30_2	37.65649	20.09081	1.87	0.066
ANTI*TYPE	25_1	-45.0515	21.81099	-2.07	0.0434
ANTI*TYPE	49_1	11.12942	24.01311	0.46	0.6448
ANTI*TYPE	56_1	-21.2477	18.00983	-1.18	0.243
ANTI*TYPE	56_2	-11.9612	17.19077	-0.7	0.4894
ANTI*TYPE	66_1	20.10487	35.00482	0.57	0.568

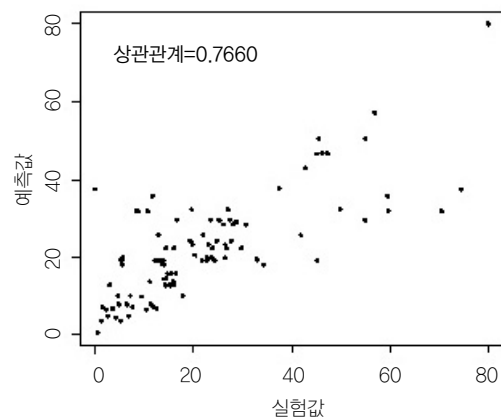


그림 9. 실험값과 모형으로부터 계산된 예측값과의 상관도

#### 4.1.2. 선형혼합효과모형

선형혼합효과모형은 실험을 통해 얻어지는 계측 자료의 지역적 특성과 실험의 불연속에 대한 시간의 임의효과를 동시에 고려할 수 있으나 현장 시험 조건상 시간의 임의효과성을 배제하고 지역적 임의효과만을 고려한 모형을 통해  $\Delta BDI(\%)$ 에 대한 모형을 구축하고 예측값을 제시하였으며, 실제 예측값과 실제값의 상관관계를 통해 가장 적합한 모형을 선택하였다.

선형회귀모형과 같은 제반 변수들을 이용하여 선형혼합효과모형을 구축하였으며, 표 5는 선형혼합효과모형을 이용한 예측 모형 결과를 보여준다.

표 5에서와 같이 선형혼합효과모형의 경우 모형이 선형 회귀모형보다 매우 단순함을 알 수 있다. 즉, 포장층 두께, 보조기층 두께, 동상방지층 두께와 형태만 알고 있으면 쉽게 예측값을 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 그림 9에서와 같이 상관관계가 0.6411로 복잡한 모형보다는 낮음을 알 수 있다. 그림 10은 실험값과 선형혼합효과모형으로부터 계산된 예측값과의 상관도 및 상관관계를 나타낸다.

표 5. 선형혼합효과모형을 통한  $\Delta BDI(\%)$  예측 모형

모수	추정값	표준오차	자유도	t-값	P-값
Intercept	4.3101	1.1990	61	3.5947	0.0372
AP	0.04211	0.03163	133	1.3313	0.2309
SG	-0.07136	0.02753	133	-2.5920	0.0381
ANTI	0.01815	0.01151	133	1.5769	0.2143
TYPE1	-0.3923	0.2950	133	-0.1329	0.5883
TYPE2	0.0286	0.2993	133	0.0955	0.9891
TYPE3	0	.	.	.	.

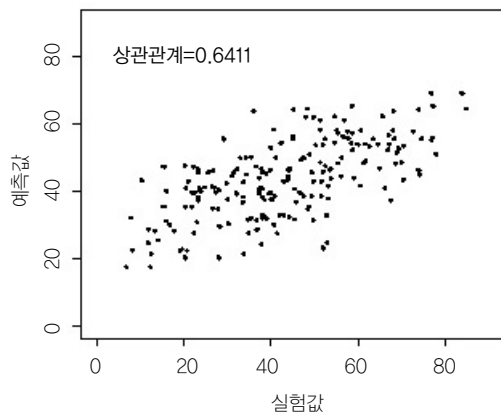


그림 10. 실험값과 모형으로부터 계산된 예측값과의 상관도 및 상관관계

#### 4.1.3. $\Delta BDI$ 모형 개발

본 논문에서는 선형회귀모형과 선형혼합효과모형을 통한  $\Delta BDI(\%)$ 에 대한 모형을 구축하였다. 구축한 모형을 토대로  $\Delta BDI(\%)$ 에 영향을 주는 요인들을 확인하고 그에 따른 예측값을 계산하여 실제 관측값과의 비교를 실시하였다. 기존의 선형회귀모형의 경우 모형이 복잡하다는 단점과 함께 실제 적용이 어려운 반면에 혼합효과 모형은 계측자료의 성질을 잘 반영하여 지역적 변동을 임의효과로 반영하여 모형을 구축할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 또한 모형이 단순화되어 쉽게 실제 현

장에 적용할 수 있다.

이와 같이 예측 모형은 실제적으로 현장에서 적용하기 쉽게 하기 위하여 모형을 분리하지 않고 한 가지 모형으로 제안하였다. 절토부, 절성경계부 등 포장 단변별로 예측 모형을 구분하여 예측 모형을 개발하면 측정값과의 관계가 더 높게 나타난다. 하지만, 여러 가지 모형으로 개발이 된다면 현장 적용성이 떨어지는 단점을 가지게 되어 한 가지 모형으로 압축하여 개발하였다.

실험값과 모형으로부터의 예측값의 상관관계를 최대한 높이기 위해 2차 교호효과까지 고려한 모형을 이용하여 상관관계가 매우 높아짐을 알 수 있으나, 모형이 복잡하면 이해하기 힘들며, 향후 적용성에 문제가 있다. 따라서 교호효과를 고려하지 않은 모형을 통해 적합해본 결과 상관관계가 0.2~0.3정도 감소함을 알 수 있다.

TYPE(1: 절토부, 2: 절성경계부, 3: 저성토부)별로 모형을 구축하면 조금 더 좋은 결과를 얻을 수 있으나 모형이 세분화되면 향후 적용성에 문제가 있어 설명변수에 TYPE 변수를 추가하여 전체적으로 하나의 모형을 구축하였다. 식 (10)은 혼합효과 모형을 이용하여  $\Delta BDI(\%)$ 를 예측하는 모형을 보여준다.

$$\Delta BDI(\%) = 4.3101 + 0.04211 \times AP - 0.07136 \times SB + 0.01815 \times ANTI - 0.3923 \times TYPE I + 0.0286 \times TYPE II \quad (10)$$

여기서, AP : 아스팔트층 두께(cm)

SB : 보조기층 두께(cm)

ANTI : 동상방지층 두께(cm)

TYPE I : 절토부 (O : 1, X : 0)

TYPE II : 절성경계부 (O : 1, X : 0)

표 6은 현장에서 시공되는 포장체의 층별 두께 범위를 보여 주고 있으며, 각 층별로 1cm씩 변화시켜서 94,570가지의 포장체에 대해서 식 (10)을 이용하여 분석한 결과를 그림 11에서 보여주고 있다. 그림에서 보듯이  $\Delta BDI(\%)$ 의 67%가 10~25% 사이에서 나타났다.

이것은 아스팔트층의 두께가 매우 얇거나, 동상방지층의 두께가 많이 두꺼운 경우를 제외하고, 일반적으로 적용하는 포장체 대부분은 일정한 범위내에서 구조적 효과를 나타낸다는 것을 보여준다.



표 6. 모형에 적용된 입력변수 범위

구 분	두께(cm)
아스팔트층	10~35
보조기층	10~35
동상방지층	10~70
포장 타입	절토부, 절성경계부, 저성토부

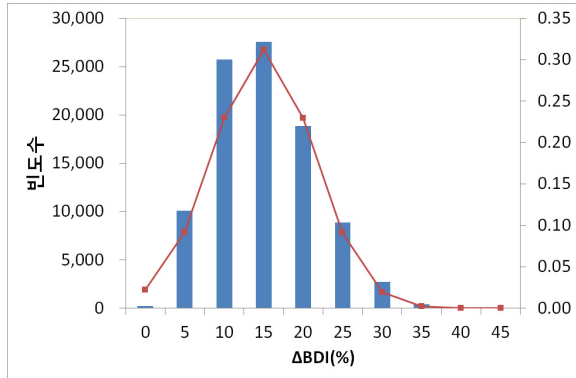


그림 11. 포장체별 ΔBDI(%) 모델 적용결과

## 5. 결론

본 논문은 FWD를 이용한 도로 동상방지층의 유·무에 따른 구조적 효과를 분석하여 동상방지층의 구조적 효과를 평가할 수 있는 모형 개발에 목적을 두고 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. FWD 시험결과 동상방지층이 있는 경우 동상방지층이 없는 경우보다 처짐량 값이 절토부는 약 1.0~82.6%, 절성경계부는 0.5~82.2%, 저성토부는 0.4~82.5%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
2. 동상방지층이 있는 경우 동상방지층이 없는 경우에 비해 처짐량이 작게 측정되어 동상방지층이 포장체에서 구조적 역할을 담당하는 것으로 나타났다.
3. FWD 포장 지수 분석 결과, ΔBCI, ΔD0, ΔSCI는 동상방지층 두께 증가에 따라서 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 하지만, ΔBDI는 동상방지층 두께 증가에 따라서 다른 지수들 보다 높은 상관관계를 보여 주어 동상방지층의 구조적 효과를 분석하는데 가장 적절한 지수로 나타났다.

4. 선형 회귀모형의 경우 모형이 복잡하다는 단점과 함께 실제 적용이 어려운 반면에 선형 혼합효과 모형은 계측자료의 성질을 잘 반영하고 모형이 단순화되어 쉽게 실제 현장에 적용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 선형 혼합효과 모형을 이용하여 아래와 같이 모델을 개발하였다.

$$\Delta BDI(\%) = 4.3101 + 0.04211 \times AP - 0.07136 \times SB + 0.01815 \times ANTI - 0.3923 \times TYPE I + 0.0286 \times TYPE II$$

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 '도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치 기준 연구'의 연구 수행 결과입니다.

## 참고 문헌

- 한국도로교통협회(2005), 도로설계기준  
 한국도로공사(2002), 도로설계요령  
 국토해양부(2009), 도로공사표준시방서  
 국토해양부(2010), "도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치 기준 연구(1차년도)" 연구보고서  
 Van Deusen, D., Schrader, C., Bullock, D., and Worel, B.(1998), "Springtime Thaw Weakening and Load Restrictions in Minnesota", *Transportation Research Record No.1615*, pp 21-31.  
 Lukanen, E. O., Stubstad, R., and Briggs, R. C.(2000), "Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavements", *FHWA Report RD-98-085*, Federal Highway Administration, McLean, VA.  
 DeBruin, P. W., Visser, Alex T., and Jordan, Gerrit J. (2002), "Modeling the Changes in Pavement Layers During Rehabilitation and the Effect of These Changes on the Structural Capacity". *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*. New York, NY: June.  
 LTPP(2002), "Repeat data sets for single test point/time on some SMP test sections". U.S. FHA.  
 (접수일 : 2012. 1. 10 / 심사일 : 2012. 1. 16 / 심사완료일 : 2012. 5. 15)