

도로포장 반응모형에 대한 통계모형 개발[†]

(A Development of Statistical Model for Pavement Response Model)

이 문 섭*, 박 희 문**, 김 부 일***, 허 태 영****

(Moon Sup, Lee, Hee Mun, Park, Boo il, Kim, and Tae-Young Heo)

요약 도로포장 반응모형의 구축을 위하여 새로운 방법론으로 부분최소제곱회귀모형의 활용성을 소개하고 실제 FWD 실험자료에 적용시켰다. 실증분석 결과 일반 다중회귀모형에서 발생된 다중공선성 문제를 부분최소제곱회귀모형을 통하여 해결방안을 제시하였으며, 변환된 자료가 아닌 원시자료를 이용하여 모형을 구축할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

핵심주제어 : 도로 포장체, 비파괴시험장비, 부분최소제곱방법, 포장체반응모형

Abstract The Falling Weight Deflectometer has been widely used in evaluating the structural adequacy of pavement structures. The deflections measured from the FWD are capable of estimating the stiffness of pavement layers and measuring the pavement responses in the pavement structure. The objective of paper is to develop the pavement response model using a partial least square regression technique based on the FWD deflection data. The partial least square regression method enables to solve the multicollinearity problem occurred in multiple regression model. It is also found that the pavement response model can be developed using the raw data when a partial least square regression was used.

Key Words : Falling Weight Deflectometer, Pavement, Partial Least Square Regression

1. 서 론

현재 도로관련 예산의 효율적인 활용 및 포장상태의 적정수준 유지를 위해 고속도로, 국도, 지자체 소유의 도로에서는 포장유지관리시스템(Pavement Management System, PMS)을 도입하여 운영하고 있다. 그러나 기

존에 시행하고 있는 포장유지관리시스템은 포장체의 구조적 상태 평가보다는 표면파손 정도를 근거로 한 기능적 상태 평가에 주력하고 있다(한국건설기술연구원, 2005). 도로포장은 다양한 재료와 단면으로 구성되어 있으나 기존의 포장유지관리시스템에서는 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 기법에 대한 정립이 미비하다. 따라서 아스팔트 포장체의 구조적 평가를 하지 않을 경우 과대/과소 유지보수를 할 수 있으며 포장 파손의 근본적인 문제점을 해결할 수 없다.

본 연구의 목적은 포장의 구조적 상태를 평가할 수 있는 비파괴시험장비(Falling Weight Deflectometer,

[†] 본 연구는 국토해양부의 건설핵심기술연구개발사업인 '도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치 기준 연구'의 연구 수행 결과입니다.

* 한국건설기술연구원 도로연구실, 제1저자

** 한국건설기술연구원 도로연구실, 제2저자

*** 한국건설기술연구원 도로연구실, 제3저자

**** 충북대학교 정보통계학과, 교신저자 (theo@cbnu.ac.kr)

FWD) 치짐값을 이용하여 아스팔트 포장체의 내부 반응에 대한 모형을 개발함에 있다. 이를 위해 FWD 치짐값과 포장체 각 층의 두께를 이용하여 포장체의 탄성계수와 중요 지점의 변형률을 직접 계산할 수 있는 포장체 내부반응에 대한 통계모형을 개발하였다 (Crovetti, et al. 1989). 기존의 연구에서는 포장체 내부반응 모형으로 다중회귀모형을 기반으로 내부반응모형을 개발하였으나 FWD의 원시자료가 아닌 자료를 변환 또는 수정하여 모형을 개발함으로써 원시자료가 가지는 특성을 고려하지 않은 모형 개발을 주로 하였다. 따라서 본 연구에서는 새로운 모형 구축 방법론으로 부분최소제곱회귀모형(partial least square regression model)을 제시하고 이 모형을 통하여 원시자료를 이용한 포장체 내부 반응모형을 개발하고 이 모형을 예측력을 기존의 다중회귀모형과 비교하였다. 부분최소제곱방법의 연구로 Kim(2003a, 2003b, 2004a, 2004b)과 Kim and Moon(2005)은 부분최소제곱회귀방법에 대해 다양한 이론적 내용 및 비교를 다루었으며, 박종선과 정운정(2004)은 금융기관의 운영 위험 예측을 위해 부분최소제곱회귀모형을 이용하였다. 그 외에 부분최소제곱회귀방법은 의학, 화학, 환경학 등에서 매우 유용하게 활용되고 있는 방법이다(김경숙 등, 2008; 송상욱 등, 2002; 유창규 등, 2008). 본 연구에서는 도로포장의 FWD 자료에 대해 부분최소제곱회귀모형의 활용성을 살펴보았다.

본 연구에서 제안한 부분최소제곱회귀분석 방법은 다중회귀분석과 주성분 분석의 특성을 일반화하고 결합하여 모형을 구축하여 많이 활용되고 있는 분석방법이다. 특히, 부분최소제곱회귀분석은 설명변수들이 많을 시 종속변수를 예측하고자 할 때 매우 유용할 뿐만 아니라 종속변수가 단변량 뿐만 아니라 다변량 종속변수일 때에도 유용하게 활용될 수 있어 종속변수가 여러 개인 포장체 내부반응 모형 구축에 적합하다. 일반적으로 설명변수가 많지 않거나 다중공선성을 가지지 않을 때 다중회귀분석을 이용하여 분석을 하지만, 다중회귀모형의 통계적 가정을 만족시키지 못한다면, 다중회귀분석의 결과는 비효율적이거나 부적당하게 된다. 따라서 설명변수들의 수가 많거나 높은 다중상관성을 보일 시 예측 모형을 구축하는 방법으로 부분최소제곱회귀방법이 유용하게 활용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 도로 포장분야에서 활용되고 있는 포장체 반응모형에 대해

소개하고, 제 3장에서는 포장체 모형으로 일반적으로 많이 활용되고 있는 회귀모형을 소개하였으며, 4장에서는 포장체 반응모형에 대한 일반적인 방법인 회귀모형의 단점을 보완할 수 있는 부분최소제곱방법의 간략한 소개 및 포장체 모형에 대한 적용성을 알아보았으며, 제 5장에서는 실증분석으로 한국건설기술연구원에서 제공한 FWD 자료를 이용하여 부분최소제곱회귀모형을 이용한 포장체 반응모형을 개발하였으며, 기존의 회귀모형과 비교하였다. 마지막 6장에서는 결론을 제시하였다.

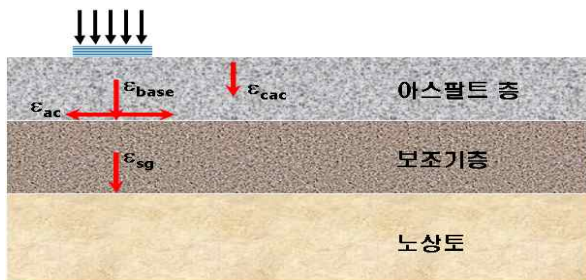
2. 포장체 반응모형의 개발

2.1 포장체 반응모형

포장 지지력 측정 장비는 도로 포장체의 구조적 상태 평가를 위해 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 장비이다. 도로 표면에 충격하중을 재하하여 하중재하 중심 및 중심에서 떨어진 7개의 센서를 이용하여 포장체의 치짐값을 측정한다. 측정된 FWD 치짐값은 도로 포장층의 탄성계수를 역산에 사용되고 도로 포장체의 현재 구조적 상태를 평가할 수 있다. 역산기법을 이용하여 계산된 탄성계수값은 구조해석프로그램의 입력변수로 사용되어 포장층 내부의 반응값인 응력과 변형률을 계산할 수 있다. 포장층 내부의 반응값은 포장 공용성 모형을 통하여 공용중인 도로포장의 향후 잔존수명을 예측할 수 있다. 이러한 역산기법을 이용할 경우에는 예측시에 오차가 발생하며 또한 계산시간이 다소 소요된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위하여 FWD 치짐값을 이용하여 직접 포장체 내부의 응력 및 변형률을 산정할 수 있는 아스팔트 포장체의 내부반응모형을 통계학적 개념을 도입하여 개발하였다.

본 모형을 사용하면 역산시 발생할 수 있는 오차를 최소화할 수 있으며, 반응계산시 소요시간을 단축시킬 수 있다. 도로 포장체 반응모형을 개발하기 위하여 먼저 FWD를 이용한 포장체의 치짐과 포장체 내부 반응값과의 상관관계를 규명하였다. 아스팔트 포장체에서 발생하는 결정적 반응(critical pavement response)은 아스팔트층 하부의 인장변형률, 아스팔트층의 중앙, 보조기층의 상부, 노상층의 상부에서 발생하는 압축변형

를 들 수 있다(그림 1). 이와 같은 변형률값은 <표 1>과 같이 도로포장의 주요파손인 피로균열 및 소성 변형에 밀접한 관련이 있으며 또한, 도로 포장체의 공용성 (pavement performance) 예측에도 매우 중요한 인자이다.



<Fig 1> 아스팔트 포장체에서의 결정적 반응값

<Table 1> 공용성에 미치는 변형률 요소

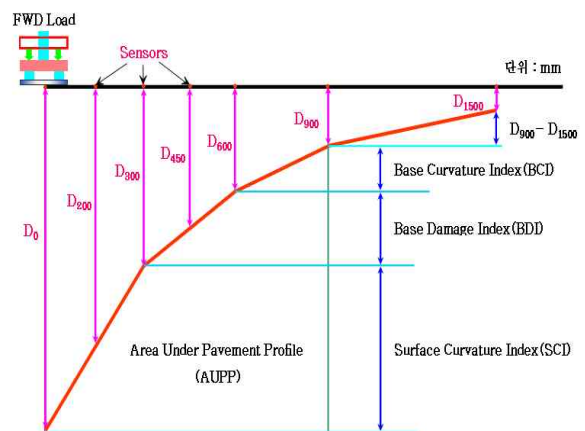
변형률 요소	공용성 인자
아스팔트 하부의 인장변형률 (ϵ_{ac})	피로균열
아스팔트 중앙의 압축변형률 (ϵ_{cac})	소성변형
보조기층 상부의 압축변형률 (ϵ_{base})	소성변형
노상토 상부의 압축변형률 (ϵ_{sg})	소성변형

2.2 포장체 처짐계수

FWD 하중을 포장 표면에 재하하면 <그림 2>와 같이 표면 처짐곡선(deflection basin)이 발생하게 된다. 계측된 표면 처짐곡선으로부터 다양한 포장체 처짐계수(deflection basin parameter)를 구할 수 있고, 각 계수는 포장체 각 층에 대한 특성을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 포장체 처짐계수는 <그림 2>에 정의하였으며, 이러한 포장체 처짐계수와 포장체 반응과의 상관관계를 고려하여 포장체 내부반응모형을 개발하였다.

3. 회귀모형을 통한 반응모형

회귀분석은 관찰된 연속형 변수들 사이의 관계에



<Fig 2> FWD 하중에 따른 처짐곡선의 발생

있어서 한 변수를 원인으로 하고 다른 변수들을 결과로 하여 원인변수들과 결과변수 사이의 선형식을 구하고 그 식을 이용하여 원인변수들의 변수값들이 주어졌을 때, 결과변수의 변수값을 예측하는 기본적인 통계적 분석방법이며, 회귀모형의 가정 중 첫 번째는 정규성과 등분산성, 즉, 독립변수의 고정된 어떤 값에 대하여 종속변수는 정규분포를 따르며, 독립변수의 값에 관계없이 종속변수의 분산은 일정하다. 두 번째는 독립성, 즉, 종속변수는 통계적으로 서로 독립이어야 한다. 즉, 한 관측값이 다른 관측값들에 영향을 받아서는 안된다. 마지막 가정으로서는 선형성으로 독립변수와 종속변수 사이의 관계는 선형이다. 이러한 기본가정을 만족시키면서 종속변수 Y 를 설명하는데 k 개의 변수인 $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]$ 를 도입할 때 다중회귀모형은 아래의 식과 같이 정의 된다.

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (1)$$

여기서, $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k]$ 는 추정되어야 할 회귀계수들이며, ϵ 는 서로 독립이고, 정규분포를 따르는 오차항이며, β_j ($j = 1, 2, \dots, k$)는 j 번째 독립변수 X_j 의 회귀계수를 의미한다. 그러나 위와 같은 다중선형회귀모형은 독립변수들 간에 선형종속관계, 혹은 거의 선형종속관계가 성립될 때 다중공선성(multicollinearity)이 발생한다. 이러한 다중공선성은 회귀분석 결과를 왜곡시켜 특정 독립변수의 종속변수에 대한 독립적인 효과를 측정하는 것이 불가능해진다. 공선성이 있는 회귀계수는 자료의 미세한 변화, 회귀식에서 미세한

변수의 추가나 삭제에 매우 민감하게 반응하여 매우 커다란 표준오차를 가지게 되고 통계적 유의성을 감소시킨다. 따라서 설명변수가 많거나 상관성이 존재할 때 부분최소제곱방법을 이용하여 위에서 언급한 문제점들을 해결함과 동시에 모형의 성능을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 다음 장에서 부분최소제곱방법과 부분최소제곱회귀모형에 대하여 설명하도록 하겠다.

4. 부분최소제곱회귀모형

종속변수와 설명변수간의 회귀분석을 하기 위해 이전에는 다중회귀분석으로도 쉽게 분석을 할 수 있었지만 자료의 변수가 방대하게 늘어나거나 변수간의 상관성이 강하게 나타남에 따라 다중회귀분석에서는 설계행렬에서 비정칙성 문제가 나타나게 되어 회귀분석에서 다중공선성이라는 문제가 야기됨에 따라 설명변수에 대한 계수의 추정값의 정확도가 문제시 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 설명변수들 간의 상관성이 강하고 잡음이 많이 함유된 다차원 자료를 비상관의 저차원의 모형으로 재구축하고 해석하기 위해 주성분분석이 도입되었다. 즉, 설명변수들에 주성분분석을 적용한 후 얻어진 요인값들을 비상관의 저차원의 설명변수로 설정하고 이를 종속변수와 회귀모형을 설정함으로써 주성분회귀분석을 활용하였다. 이는 다중회귀분석에서 발생했던 다중공선성 문제를 해결하게 되었으나 설명변수들의 변동만을 설명하는 요인값을 구하여 이를 단순히 종속변수와 회귀모형으로 설정을 하였기 때문에 결과적으로 설명변수와 종속변수와의 관계를 나타내는데 한계가 있게 되었다. 따라서 설명변수들 간의 분산을 잘 설명하면서 종속변수와의 상관성도 최대화할 수 있는 방법을 생각하게 되었는데 이 방법이 바로 부분최소제곱회귀방법이다.

이러한 부분최소제곱회귀분석은 다중선형회귀분석의 확장으로 다중회귀분석에서의 통계적 가정들을 공유하며, 설명변수들의 수가 많거나 매우 높은 다중공선성을 가질 때 예측 모형을 만드는 방법이다. 부분최소제곱회귀분석은 설명변수들 간의 관계들을 이해하고자 하는 것보다는 종속변수들의 예측을 목적으로 하고 있으며, 부분최소제곱방법은 설명변수와 종속변수 행렬 사이에 최대의 공분산을 가지는 스코어행렬

(score matrix)과 주성분 행렬 또는 로딩행렬(loading matrix)을 결정하여 설명변수와 종속변수 사이의 관계를 정립하는 차원축소(dimension reduction) 방법이다. 이러한 주성분회귀분석에 이론적 바탕을 두고 설명변수와 종속변수의 관계를 짓는 방법이 바로 부분최소제곱방법이며, 부분최소제곱회귀모형은 위에서 언급한 문제들을 가장 잘 해결할 수 있는 방법이다. 식 (1)의 회귀모형과는 달리 종속변수와 설명변수 자료들에 대하여 동시에 주성분 분석을 실시하여 종속변수의 주성분 점수 또는 스코어 행렬과 설명변수의 주성분 점수 또는 스코어 행렬 사이에 대하여 회귀모형을 구축하는 방법이다. 부분최소제곱회귀모형을 간략히 식으로 표현하면 설명변수 X 와 종속변수 Y 는 각각 스코어 행렬, $T \in R^{n \times p}$, $U \in R^{n \times d}$ 와 주성분 행렬 또는 로딩 행렬, $P \in R^{m \times d}$, $Q \in R^{p \times d}$ 로 분해 할 수 있다.

$$X = TP^T + E_X = \sum_{j=1}^d t_j p_j^T + E_X \quad (2)$$

$$Y = UQ^T + E_Y = \sum_{j=1}^d u_j q_j^T + E_Y \quad (3)$$

여기서 d 는 부분최소제곱의 성분에 대한 차수이며, $E_X \in R^{n \times m}$, $E_Y \in R^{n \times p}$ 는 잔차행렬이다. 식 (2)와 식 (3)과 같은 모형을 통하여 종속변수 Y 에 대한 주성분의 잔차인 E_Y 를 가능한 한 작게 하여 Y 의 예측 성능을 극대화 하면서 동시에 X 와 Y 의 관계를 잘 나타낼 수 있도록 스코어 행렬과 로딩 행렬을 정의한다.

이러한 부분최소제곱회귀분석의 장점은 설명변수와 종속변수의 주성분점수를 이용하여 회귀분석을 하기 때문에 다중공선성과 비정칙 행렬의 문제가 발생하지 않을뿐더러 설명변수와 종속변수에게 서로 정보를 공유하고 기여의 정도를 가중치를 주어 조정하기 때문에 기존의 회귀분석이나 주성분회귀분석에서 발생되었던 문제들이 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

5. 실증분석

5.1 조사자료 설명 및 분석 방법

부분최소제곱회귀모형은 일반적으로 설명변수가 변수가 많고 그들 간에 심한 상관관계가 존재하여 다중공선성 문제 발생 시 다른 방법에 비해 좋은 성능을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 FWD 시험을 이용하여 계측된 포장체 표면 처짐값은 아스팔트 포장체의 구조적 평가를 위한 귀중한 정보를 제공한다. 포장체의 공용성은 일반적으로 표면의 소성변형이나 균열의 정도를 계측하여 결정할 수 있다. 이 장에서 포장체의 표면처짐값의 원자료(raw data)를 이용하여 포장체의 공용성 예측할 수 있는 모형을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 일반적으로 다중회귀모형에서 수행하는 우선 종속변수와 독립변수들의 표준편차가 크고 독립변수간들의 높은 상관성으로 인하여 기인된 다중공선성을 제거하기 위하여 변수제거를 하지 않고 기존의 원시자료를 이용하여 분석을 하였다. 또한 자료의 정규성을 만족시키고 등분산을 가정을 만족시키기 위하여 Box-Cox 변수변환을 실시하여 정규성 가정을 만족시킨 후 부분최소제곱회귀모형을 통하여 분석하였다.

5.2 분석결과

본 연구에서는 설명변수와 종속변수들 간의 각각의 상관성을 파악하기 위하여 상관분석을 실시하였다. <그림 2>에서와 같이 설명변수의 경우 원시자료인 $D_0, D_{200}, D_{300}, D_{450}, D_{600}$ 간의 상관관계와 종속변수인 피로균열 ϵ_{ac} (ACTEN)와 소성변형 $\epsilon_{cac}, \epsilon_{base}$ (STRNBASE), ϵ_{sg} (STRNSUB)간의 상관관계를 파악하였다. 특히, 설명변수들 간의 상관관계가 높다는 것은 다중공선성이 존재함을 알 수 있다. <표 2>에서과 같이 부분최소제곱회귀모형을 구축하기 위하여 설명변수로 사용된 원시자료인 FWD 처짐값인 $D_0, D_{12}, D_{24}, D_{36}, D_{60}$ 간의 상관관계를 파악한 결과 각각 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 설명변수의 다중공선성 여부를 파악하기 위하여 분산팽창계수와 허용오차를 확인하였다. 그 결과 분산팽창계수는 매우 큰 값으로 나타났으며, 허용오차는 매우 작아 다중공선성이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 원자료를 이용한 일반적인 다중회귀모형은 문제점을 가지고 있다. 따라서 원시자료를 통한 기존의 다중회귀분석은 여러 가지 문제점이 발생할 것으로 예

상된다. 결과적으로 부분최소제곱방법을 통하여 다중공선성의 영향력을 배제하고 종속변수의 상관성까지도 모형에 포함될 수 있는 모형이 필요하다.

<Table 2> 원시자료인 설명변수들 간의 상관분석

설명변수	D_0	D_{12}	D_{24}	D_{36}	D_{60}
D_0	1	0.956**	0.866**	0.723**	0.541**
D_{12}		1	0.960**	0.842**	0.649**
D_{24}			1	0.955**	0.795**
D_{36}				1	0.921**
D_{60}					1

** P < 0.01, * P<0.05

<표 3>에서는 종속변수로 사용된 포장체 반응, 즉 변형율 간의 상관관계를 파악하였다. 설명변수와 마찬가지로 종속변수들 간에도 강한 상관관계가 존재함을 알 수 있어 각각의 종속변수에 대한 회귀모형보다는 종속변수의 상관성을 고려한 다변량 회귀모형을 통하여 예측을 하는 것이 더욱 바람직 할 것이다. 그러나 앞서 살펴 본것과 같이 설명변수 내에서도 강한 상관성이 존재하므로 다변량회귀모형과 주성분분석을 결합한 부분최소제곱회귀 방법이 가장 좋은 예측모형을 제공할 것이다.

<Table 3> 종속변수들 간의 상관분석

종속변수	ACTEN	STRNBASE	STRNSUB
ACTEN	1	0.978**	0.786**
STRNBASE		1	0.757**
STRNSUB			1

** P < 0.01, * P<0.05

5.3 다중공선성

회귀모형을 분석하는 과정에서 독립변수들간의 상관관계수가 매우 높을 때, 한 독립변수를 모형에 추가하거나 기존의 변수를 제거하는 것이 추정된 회귀계수의 크기나 부호에 큰 변화를 줄 때, 중요한 영향을 가질 것이라 예상되는 독립변수에 대한 검정결과가 유의하지 않게 나타날 때, 추정된 회귀계수의 부호가 기존 연구나 이론적인 면에서 알려진 부호와 상반될 때에는 독립변수들 사이의 다중공선성을 조사해 보아야

한다. 이러한 다중공선성의 정도를 알아보기 위하여 분산팽창계수(Variance Inflation Factor, VIF)가 많이 활용된다. 분산팽창계수는 j 번째 회귀계수의 추정량인 β_j 에 대한 분산팽창계수 VIF_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, j = 1, 2, \dots, k$$

여기서 R_j^2 은 X_j 를 종속변수로 하고 나머지 변수를 독립변수로 하는 회귀모형에서의 결정계수를 의미하여, VIF는 독립변수 사이에서 발생하는 다중공선성으로 인한 분산의 증가를 의미한다. 일반적으로 k 개의 VIF_j 중 가장 큰 값이 5에서 10을 넘으면 다중공선성이 있다고 할 수 있다.

<Table 4> 설명변수들의 분산팽창계수 및 허용오차

설명변수	분산팽창계수 (허용오차)
D_0	31.43 (0.032)
D_{12}	523.41 (0.002)
D_{24}	1368.34 (0.00073)
D_{36}	587.87 (0.0017)
D_{60}	33.24 (0.030)

<표 4>에서와 같이 설명변수의 다중공선성 여부를 파악하기 위하여 분산팽창계수와 허용오차를 확인하였다. 그 결과 분산팽창계수는 매우 큰 값으로 나타났으며, 허용오차는 매우 작아 다중공선성이 발생된 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 원자료를 이용한 일반적인 다중회귀모형은 문제점을 가지고 있다.

5.4 모형 비교

포장체 내부반응모형은 원시자료인 처짐값을 입력으로 하여 아스팔트 하부의 인장변형률, 아스팔트 중앙의 압축변형률, 보조기층 상부의 압축변형률, 노상도 상부의 압축변형률에 대해서 각각 개발하였으며, 각각의 다중회귀모형과 부분최소제곱회귀모형의 회귀계수의 추정값은 <표 5> 와 <표 6>에 제시하였다. 다중회귀모형과 부분최소제곱회귀모형의 기본 논리는 회귀분석이지만, <표 5>에서 보는 것과 같이 분석과정

상의 차이로 인하여 추정된 모수의 값이 다르게 나타난다. 특히, 부분최소제곱회귀모형의 경우 우선 설명변수와 종속변수에 대하여 주성분분석을 실시하여 얻어진 두 변수들의 잠재요인을 도출하여 이를 다시 변수값으로 변환하여 분석하기 때문에 전통적인 다중회귀모형과 비교하며, 추정된 회귀계수의 값에서 다소 차이가 존재함을 알 수 있다. <표 5>에서와 같이 다중회귀모형의 경우 세 종속변수에 대하여 설명변수의 회귀계수값이 일관성 없이 나타난 반면 <표 6>의 부분최소제곱회귀모형의 경우 회귀계수의 추정값이 세 종속변수에 대하여 D_0, D_{12}, D_{24} 는 양의 계수값을 가지며, D_{36}, D_{60} 은 음의 계수값을 가져 일관성 있게 추정되었다. 이는 다중회귀모형의 경우 다중공선성으로 인하여 추정된 회귀계수의 값이 편의(bias)되어 있기 때문이며, 부분최소제곱회귀모형의 경우 다중공선성을 배제한 추정된 회귀계수 값이기 때문이라고 여겨진다.

<Table 5> 원자료를 사용한 다중회귀모형에 대한 회귀계수의 추정값

설명변수	종속변수		
	ACTEN	STRNBASE	STRNSUB
상수항	3.9947**	7.7460**	1.9010**
D_0	0.3774**	0.0485*	0.0255**
D_{12}	0.4707**	4.9844**	-0.1582**
D_{24}	0.5850*	-8.7739**	0.7373**
D_{36}	-0.7123*	7.2852**	-0.5465**
D_{60}	-1.4335**	-6.0699**	-0.1517**

** P < 0.01, * P<0.05

<Table 6> 원자료를 사용한 부분최소제곱회귀모형에 대한 회귀계수의 추정값

설명변수	종속변수		
	ACTEN	STRNBASE	STRNSUB
상수항	3.9317**	7.2241**	1.9490**
D_0	0.3648**	0.6631**	0.0034*
D_{12}	0.4891**	0.8815**	0.0465*
D_{24}	0.4084**	0.7068**	0.0431*
D_{36}	-0.1572**	-0.3764**	-0.0014*
D_{60}	-2.1165**	-4.1111**	-0.1581**

** P < 0.01, * P<0.05

5.5 분석결과 비교

기존의 포장체 연구에서는 우선 종속변수와 독립변수들의 표준편차가 크고 독립변수간들의 높은 상관성으로 인하여 기인된 다중공선성을 제거하기 위하여 변수제거 및 변수변환을 이용하였으며, 변수 제거를 위해서는 허용한계값과 그 역수인 분산팽창요인값을 통하여 각 종속변수들과 상관관계가 가장 높은 변수들을 모형 안에 채택하고 나머지 변수들은 제거함으로써 다중공선성 문제를 해결 하였다.

본 절에서는 다중공선성 문제를 해결하기 위하여 변수선택 및 변환을 하여 얻어진 다중회귀모형과 원자료를 이용한 부분최소제곱회귀모형의 예측값에 대한 비교를 실시하여 부분최소제곱회귀모형의 우수성을 입증하였다.

<Table 7> 평균절대오차백분율(%)을 통한 예측력 비교

모형	종속변수		
	ACTEN	STRNBASE	STRNSUB
회귀모형	5.44	5.98	4.65
부분최소제곱회귀모형	3.34	4.01	3.22

개발된 예측 모형의 평가를 위하여 <표 7>에서는 평균절대오차백분율의 통계적 측도를 이용하여 비교하였다. 분석결과 다중회귀모형과 부분최소제곱회귀모형의 예측력에 있어 다중회귀모형보다 부분최소제곱회귀모형이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 통계적 모형을 도로포장반응모형개발을 위한 시스템에 이식하여 활용하여 효과성을 살펴보면 좋을 것으로 판단된다(강태구 등, 2010; 임성한 등 2009).

6. 결론

본 연구에서는 도로포장 반응모형을 통한 예측기법으로 부분최소제곱회귀모형을 제시하였다. 분석결과에서 보는 바와 같이 다중회귀모형은 다중공선성의 문제가 발생하며 이러한 다중공선성의 문제를 해결하기 위하여 원자료를 사용하지 않고 변수를 제외하거나 변환하는 등의 수정을 가하여 문제를 해결하였으나

있는 그대로의 원자료를 가지고 이러한 문제를 해결하기엔 한계가 있다는 것을 의미한다. 따라서 다중회귀모형의 다중공선성 문제를 해결하고 원자료를 이용하여 모형을 구축하는 부분최소제곱회귀를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 강태구, 이재관, 김미아, 박찬근, 허태영, 통계패키지와 Active Server Page를 이용한 통계분석 웹 킷엔츠 개발. 한국산업정보학회논문지, 15(1), pp. 109-114, 2010.
- [2] 김경숙, 오미라, 백장선, 손영숙, "순차적 부분최소제곱 회귀적합에 위한 시간경로 유전자 발현 자료의 결측치 추정", 응용통계연구, 21(2), pp. 275-29, 2008.
- [3] 박종선, 정윤정, "부분최소제곱회귀의 응용 - 금융기관의 운영위험 예측 사례", 성균관대학교 응용통계연구소 논문집, 2005.
- [4] 송상옥, 이동연, 김구희, 윤인섭, "커널 부분최소자승법을 이용한 화학공정의 모니터링, 화학공학의 이론과 응용", 8(2), pp. 2925-2928, 2005.
- [5] 유창규, 최상옥, 이인범, "공정 모니터링 기술의 최근 연구 동향", Korean Chemical Engineering Research, 46(2), pp. 233-247, 2008.
- [6] 임성한, 김현식, 허태영. 국도상의 지능형교통시스템의 효과성분석에 관한 연구. 한국산업정보학회논문지, 14(4), pp. 205-212, 2009.
- [7] 한국건설기술연구원, 2004 도로포장관리시스템, 최종보고서, 2005.
- [8] AASHTO, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 1986.
- [9] Crovetti, J. A., Shahin, M. Y. and Touma, B. E., "Comparison of Two Falling Weight Deflectometer Decives, Cynatest 8000 and KUAB 2M-FWD, Nondestructive Testinf of Pavements and Backcalculation of Moduli", ASTM STP 1026, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp 59-69, 1989.
- [10] Kim, J. D., "Alternative Expressions of

Regression Vector for ordinary Least Squares, Principal Component Regression and Partial Least Squares Regression”, Journal of the Korean Data Analysis Society, 5, pp. 17-26, 2003.

- [11] Kim, J. D., "Interpreting PLSR and PCR Solutions via Moore-Penrose Generalized Inverse”, Journal of the Korean Data Analysis Society, 5, pp. 199-210, 2003.
- [12] Kim, J. D., "A General Solution of Generalized Ridge Regression for Non-orthogonal Explanatory Variables”, Journal of the Korean Data Analysis Society, 6, pp. 129-144, 2004.
- [13] Kim, J. D., "Comparison of Regression Methods using Eigenvector Bases”, Journal of the Korean Data Analysis Society, 6, pp. 205-218, 2004.
- [14] Kim, J. D. and Moon, S., "Connecting Partial Least Squares Regression and Generalized Ridge Regression”, Journal of the Korean Data Analysis Society, 7, pp. 61-71, 2005.



이 문 섭 (Moon Sup, Lee)

- 비회원
- 2001년 2월 : 강원대학교 지역기반 공학과 (학사)
- 2003년 2월 : 강원대학교 지역기반 공학과 (석사)
- 2010년 8월 : 강원대학교 지역기반공학과 (박사)
- 2002년 11월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원
- 관심분야 : 아스팔트 포장 재료, FWD 조사 및 분석, 현장 시공 및 품질관리



박 희 문 (Hee Mun, Park)

- 비회원
- 1996년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (학사)
- 1998년 8월 : Texas A&M 대학교 토목공학과 (석사)
- 2001년 12월 : North Carolina State 대학교 토목공학과 (박사)
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 (연구위원)

• 관심분야 : 아스팔트 포장 재료, FWD 조사 및 분석



김 부 일 (Boo il, Kim)

- 비회원
- 1990년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (학사)
- 1992년 8월 : 연세대학교 토목공학과 (석사)
- 1992년 8월 : 한국건설기술연구원 (연구원)
- 1997년 7월 : 한국건설기술연구원 (수석연구원)
- 2003년 8월 : 미국 플로리다대학 토목공학과 (박사)
- 2003년 11월 - 현재 : 한국건설기술연구원 (연구위원)
- 관심분야 : 아스팔트 포장 재료



허 태 영 (Tae-Young Heo)

- 종신회원
- 1999년 8월 : 충북대학교 통계학과 (학사)
- 2001년 5월 : 미국 노스캐롤라이나 주립대학교 통계학과 (석사)
- 2005년 8월 : 미국 노스캐롤라이나주립대학교 통계학과 (박사)
- 2005년 10월 ~ 2007년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2007년 9월 ~ 2011년8월 : 한국해양대학교 데이터정보학과 조교수
- 2012년 10월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통계학과 부교수
- 관심분야 : 응용통계, 공간통계, 교통통계, 환경통계, IT통계

논문 접수일 : 2012년 05월 21일

1차수정완료일 : 2012년 06월 26일

게재확정일 : 2012년 07월 06일