



뉴럴 네트워크 및 선형 회귀식을 이용한 줄눈 콘크리트 포장의 한계 응력 계산

Calculation Of Critical Stress On Jointed Concrete Pavement By Using Neural Networks & Linear Regression Models

강 태 옥* 류 성 우** 김 성 민*** 조 윤 호****
Kang, Tae Wook Ryu, Sung Woo Kim, Seong Min Cho, Yoon-Ho

Abstract

The finite element method(FEM) was one of tools used to solve problem of previous Concrete Pavement and was applied to Korea Pavement Research Program Study. This study used the ABAQUS and the fortran analysis program to calculate the critical stress on jointed concrete pavement and compared and analyzed the results by using neural networks and linear regression model. In that case, which are not enough analyses by using FEM programs though many input variables, when the results of FEM with NN and linear regression models are compared, there are some differences. The other cases, which are reduced input variables and a lot of analyses each of them, results of Neural Networks(NN) and linear regression models are simulated to them of FEM. But, the result of NN is more exact than them of linear regression at the (0,0), (1,1). On the results of this study, it is suggested that the calculation of stress using NN is more compatible to Korea Pavement Research Program Study.

keywords : structural analysis, ABAQUS, neural networks, linear regression model, sensitivity analysis, critical stress

요 지

기존 콘크리트 포장의 단면 설계 시 발생하는 문제점을 해결하기 위해 유한 요소법(FEM)을 이용하여 것이 하나의 방법론으로 부각되었으며 현재 한국형 포장 설계법 개발 연구에서도 적용 중에 있다. 본 연구에서는 ABAQUS 와 포트란 해석 프로그램을 이용하여 콘크리트 포장의 한계 응력을 계산하였고, 그 결과를 뉴럴 네트워크와 선형 회귀식을 이용하여 비교·분석하였다. 입력 변수가 많지만 다양한 해석을 하지 못하는 경우(입력변수 6개에 대해 81 경우 수 해석)에 대해 구조해석 결과를 뉴럴 네트워크(이하 NN : Neural Networks)와 선형 회귀식으로 비교한 결과, 구조해석 결과와 다소 차이가 있음을 확인하였다. 반면 입력 변수를 줄이되 다양한 경우에 해석한 경우(입력 변수 3개에 대해 343 경우의 수)의 분석 결과, NN 과 선형 회귀식이 구조해석 결과와 매우 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 그래프의 (0,0), (1,1) 부분에서 NN 이 선형 회귀식에 비해 더 정확한 것을 확인하였다. 이와 같은 연구 결과를 통해서 한국형 포장 설계법의 핵심인 응력 계산 모듈을 선형 회귀식보다 좀 더 정확한 NN 으로 해석하는 것을 제안하였다.

핵심용어 : 구조해석, ABAQUS, 뉴럴 네트워크, 선형 회귀식, 민감도 분석

* 비회원·중앙대학교 건설환경공학과 박사과정·010-3008-5143·(E-mail : mac999@hitel.net)
 ** 정회원·중앙대학교 건설환경공학과 박사과정·02-816-0251·(E-mail : htsw@naver.com)
 *** 정회원·경희대학교 토목공학과 조교수·011-378-0140·(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
 **** 정회원·중앙대학교 건설환경공학과 부교수·02-820-5336·(E-mail : yhcho@cau.ac.kr) 교신저자



1. 서론

인간에게 혈관이 산소 및 영양분의 순환로 역할을 하는 것처럼 도로는 국가의 혈관과 같은 기능을 하고 있다. 이러한 도로는 재료적인 면에서 아스팔트 포장 도로와 콘크리트 포장 도로로 구분된다. 국내 초창기 도로 포장은 대부분이 아스팔트를 이용하여 건설하였다. 하지만 아스팔트 도로는 공용기간이 증가함에 따라 바퀴자국, 표면 밀립, 물결모양, 거북등 균열 등의 변형과 균열이 발생하여 잦은 유지보수를 실시해야하는 단점이 있다.

이러한 문제점에 대한 대책으로 콘크리트 포장이 부각되었고, 실제로 88 고속도로, 중부고속도로 등과 같이 고속도로 및 일반 국도의 상당 부분이 콘크리트 포장으로 건설되고 있다. 하지만 이 포장도 종방향 균열, 모서리 파손, 줄눈부 파손 등의 문제가 발생하고 있어 이를 개선하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 이러한 연구 방법 중 하나가 유한 요소법(FEM)을 이용하여 콘크리트 포장 구조해석 모형을 개발해석하고 최적의 두께를 산정하여 예상했던 포장 수명을 확보할 수 있도록 하는 것이다. 이는 경험적이었던 콘크리트 포장 설계의 문제점을 극복하고 보다 경제적이고 공용성이 뛰어난 포장 설계를 할 수 있는 계기를 마련할 것이다.

콘크리트 포장의 구조해석은 누적 손상이론을 적용하는 한국형 콘크리트 포장 설계법에서, 반복 차량 하중에 의한 최대 응력 및 지점을 분석하고 이를 설계 프로그램과 연결시키는 것이 그 목표이다. 본 연구에서는 ABAQUS 및 포트란 해석 프로그램을 이용하여 한계 응력 지점에서의 응력 상태를 살펴보고 이를 뉴럴네트워크, 선형 회귀식의 결과와 비교분석하여 한국형 포장 설계법에의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 연구관련 문헌 조사 및 연구 방향

2.1. 구조해석

유한요소법(FEM)은 연속체로 정의되는 복잡한 형상을 유한요소라는 간단한 기하형상의 집합으로 분할한 후, 하중과 구속조건을 적절하게 고려하여 거동분석을 위한 방정식을 구하고 이 방정식을 풀어 연속체의 반응

을 근사적으로 설명하는데 사용한다. 유한요소법은 1940년대에 항공기 구조해석의 탄성체 문제를 풀이하는 과정에서 처음으로 나타났으며, 1950년대에 강성행렬이 유도되면서 급속히 체계화되었다. 콘크리트 포장에서의 유한요소해석은 1960년대부터 연구가 진행되었으며 1977년 일리노이대학에서 유한요소개념을 도입한 최초의 콘크리트 포장구조해석 프로그램인 ILLISLAB이 개발되었다. 그 후, 다양한 프로그램들이 개발되어 사용 중이다.

포장에서의 구조해석은 다양한 입력 변수들과 공용성 인자들을 연결해 주는 매개체 역할을 한다. 한국형 포장 설계법에서도 같은 맥락에서 구조해석을 수행하고 실제 설계 프로그램에 적용 및 활용하고 있다. 하지만 이러한 하위 개념의 구조해석 프로그램들을 상위 개념의 설계 프로그램에 접목시켜 포장단면을 설계 및 해석할 경우 컴퓨터 런타임이 오래 걸리는 단점이 있다. 이러한 이유로 다양한 경우에 대해 사전에 구조해석을 하고, 그 결과를 이용하여 회귀식을 만들거나 다른 수치해석 기법을 이용하여 해석 시간을 단축 시키기 위한 노력을 하였다. 본 연구에서도 콘크리트 포장의 한계 응력을 산정하기 위해 다양한 경우에 대한 해석을 수행하고 결과를 선형 회귀식과 NN 에 접목시켜 응력 예측의 정확도를 살펴본다.

2.2 신경망이론

2.2.1. 개요

인간의 뇌는 수많은 신경세포들이 거미줄처럼 연결되어 있는 신경망 구조를 이루고 있다. 이러한 인간 뇌의 신경망 구조를 모델링 한 것이 NN이다. 컴퓨터의 발달과 더불어 인간과 같이 계산하고 판단하며, 인식할 수 있는 신경망의 구현을 위하여 많은 노력이 있는데, 최근 패턴인식, 의사결정 등에서 특히 가속화되고 있다. 이는 신경망이 어떤 문제에 대해 훌륭한 솔루션을 제공하며, 전통적인 기법으로 해결할 수 없었던 문제들의 해결 가능성을 보여 주기 때문이다.

신경망은 예제를 통하여 학습되는데 입력 값과 그에 대한 목표 값으로 이루어진다. 이런 예제들로부터 내부적인 연결강도를 조정하는데 일반적으로 예제의 집합은

내부적인 연결강도들이 점차로 조정될 수 있도록 여러 번 반복하여 제공된다. 즉 다른 알고리즘은 미리 정해진 절차에 따라 수행되는데 비하여 신경망은 입력 값과 목표 값에 따라 결과를 낼 수 있도록 학습하는 것이다.

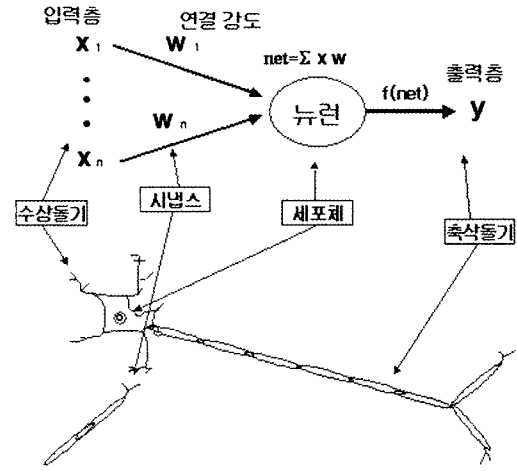
다음 <그림 1>은 기본적인 신경망 모형을 나타낸다. 뉴런의 'net' 란 입력 x 와 연결 강도 w 의 가중합을 의미이며 활성화 함수(Activation function)는 최종 출력을 위한 함수로 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$y = f(\sum x w) \quad (1)$$

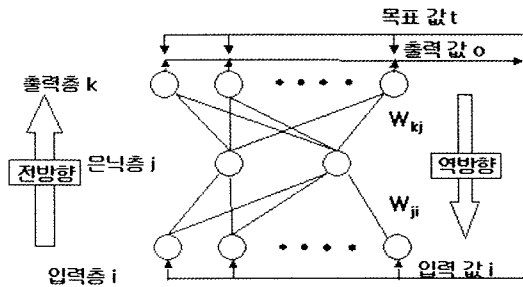
최초의 신경망 모델은 McCulloch - Pitts 모델로 1943년 W. McCulloch와 W. Pitts에 의해 제시되었는데 논리 기능을 수행하기 위해 뉴런간의 결합에 가중치를 주고, 뉴런의 반응 여부를 결정하는 임계치를 설정하여 가중합이 임계치보다 높으면 반응하도록 구성되었다. 1958년에는 F. Rosenblatt에 의해 개발된 Perceptron 모델은 외부 자극에 대해 가중 입력을 받아 반응한다. 연결강도를 조정하기 위해 반복적 학습 방법을 사용하며 선형 분리가 가능한 문제 해결에만 사용될 수 있었고 1960년대에 B. Widrow와 M. Hoff에 의해 델타 학습법에 의해 학습되는 ADALINE 모델을 개발하여 학습 능력을 극대화하였다. 그러나 1970년대에 비선형 문제 적용 시 Perceptron 이론의 한계가 발견되면서 신경망의 연구가 급속히 침체되었다가 1982년에 Hopfield에 의해 순환 신경망 구조의 연상 메모리가 가능한 Hopfield 모델이 개발되었다. 이것이 계기가 되어 많은 연구가 진행되었는데 자율 학습 방법의 일종인 SOM(Self Organizing Map), 양방향 연상 작용이 가능한 BAM (Bidirectional Associative Memory), 그리고 현재 가장 많이 적용되는 Back-Propagation 모델 등이 개발되었다.

2.2.2. BP(Back-Propagation) 알고리즘

BP 알고리즘은 다양한 분야에 가장 널리 활용되는 학습 알고리즘으로 최소자승(Least Mean Square) 알고리즘의 비선형적 확장이다. Rumelhart의 연구팀이 1980년대 후반에 제안한 것으로 선형문제만 해결할 수 있는 퍼셉트론 모델의 제한점들을 극복했다.



<그림 1> 뉴런의 구성도



<그림 2> BP 알고리즘 구조

기본 원리는 입력층의 각 유니트에 입력패턴을 주면, 전방향으로 진행하며 이 신호는 각 유니트에서 변환되어 은닉층으로 전달되고 출력층에서 신호를 출력한다. 이 출력값을 목표값과 비교하여 오차를 감소시키도록 후방향으로 진행하면서 각 뉴론간에 연결 강도를 조정한다.

다음 <그림 2>는 BP 알고리즘의 구조를 나타낸 것이다. P번째 학습에서 입출력 쌍(Input/Output Pattern)인 노드 i에서 노드 j로의 연결강도 변화는 다음 식 (2)와 같다.

$$\Delta_p W_{ji} = \eta(t_{pj} - o_{pj})i_{pj} = \eta \delta_{pj}i_{pi} \quad (2)$$

여기서,

t_{pj} = p번째 목표치 출력층 패턴의 j 성분

o_{pj} = p번째 입력층 패턴으로부터 산출된 출력 값 j



성분

$\delta p_j = tp_j - op_j$ 는 목표치와 실제출력의 오차

Δp_{Wji} = 입력층 뉴트 i로부터 출력층 뉴트 j에의 연결강도 변화량

식 (2)는 p번째 패턴의 오차제곱의 합을 각각의 연결강도로 미분한 값이 연결강도 변화량에 비례한다는 이론에 근거하여 산출된 공식으로 일반화된 델타 법칙이라고 한다.

본 연구에서도 BP 알고리즘을 적용한 NN을 이용하여 응력 해석에 대한 비교·분석을 진행하였다

3. 구조해석을 통한 한계응력 지점의 데이터 해석

3.1. 구조해석 프로그램

본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 구조해석을 수행하였다.

첫 번째는 다양한 콘크리트 포장의 구조해석에 사용되는 입력 변수를 6가지로 설정하고 각각의 변수에 대하여 입력값을 3가지씩으로 단순화하였다. SPSS 프로그램내의 직교설계 틀을 이용하여 해석의 경우를 81개로 축소시킨다. 이는 모든 경우에 대하여 해석할 경우 해석 시간이 오래 걸리기 때문에 한국형 포장 설계법에서도 DB 구축에 문제가 되기 때문이다. 각 해석 조건을 타 프로그램에 비해 상대적으로 해석 시간이 오래 걸리는 ABAQUS 프로그램을 이용하여 해석하였다.

두 번째는 입력 변수를 전자와 달리 3개로 축소하고 각 입력 변수에 대하여 입력값을 각각의 변수에 대해 7개로 확대했다. 모든 해석 조건(7×7×7=343)에 대하여 해석시간이 매우 짧은 포트란 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였다.

3.2. ABAQUS 틀 이용한 구조해석

ABAQUS를 이용한 구조해석은 요소망을 생성하는 것에 따라 해석 소요 시간의 차이가 있으며 본 해석에서는 세분화된 요소망을 사용하였기 때문에 시간이 오래 걸린다. 하지만 해석의 정확도가 상대적으로 높은 장점이 있

어 다음과 같은 연구를 수행하였다.

3.2.1 해석 범위 결정 및 요소망 생성

해석 단면은 일반적으로 시공되는 콘크리트 포장 단면을 사용하였다. 이는 다양한 인자들에 대한 민감도 분석을 하기위해 기본 포장 단면에 대한 해석이 필요한 것이기 때문이다. 해석 범위는 종방향 콘크리트 슬래브 3개(3.6m×6.0m), 길어깨(1.0m×18.0m), 다웰바/타이바를 모사하였다. 린콘크리트층 이하의 하부 구조는 스프링 요소를 사용하여 이를 모사하였기 때문에 복합 지지력 계수(K)를 적용하였다.

해석에 사용된 유한 요소는 쉘요소로써 S4R5를 이용하였다. 쉘요소는 3차원 요소에 비하여 상대적으로 정확도는 낮지만 다양한 경우에 대한 해석 시간을 단축할 수 있기 때문에 본 구조해석에 적용하였다.

3.2.2. 한계 응력 지점 확인

가. 요소망 생성 및 포장층 입력변수

한계응력 지점을 확인하기 위해 모형에 입력되는 포장층의 물성은 <표 1>과 같이 일반적으로 구조해석에 사용되는 대표값을 적용하였다. 단, 복합 지지력은 린콘크리트가 적용된 콘크리트 포장의 하부층 복합 지지력 산정식의 결과값을 사용하였으며 대기 온도 및 포장체의 온도에 대한 고려는 하지 않았다.

나. 차종별 입력 형태

재하 하중은 한국형 포장 설계법의 세부 연구 중의 하나인 교통 하중 정량화 연구를 통해 제시된 <표 2>의 값을 사용하였다. 해석에 사용된 차종은 3종~8종까지로 각 차량의 재원은 <그림 3>와 같다. 차량을 모델링하는 과정에서, 동일한 축내에서도 타이어 압력이 다르지만 해석을 위하여 동일하다는 가정을 세웠으며, 하중 재하 면적은 모형에 적용하기 위하여 20cm×25cm의 정사각형 면적으로 가정하였다. 하중 재하 위치에 있어서 길어깨 부분으로 주행방향으로 재하된 경우들에 대해 1~5, 일반적인 차량의 주행 위치의 주행방향으로 재하된 경우들에 대해서는 6~10으로 표기하였다.

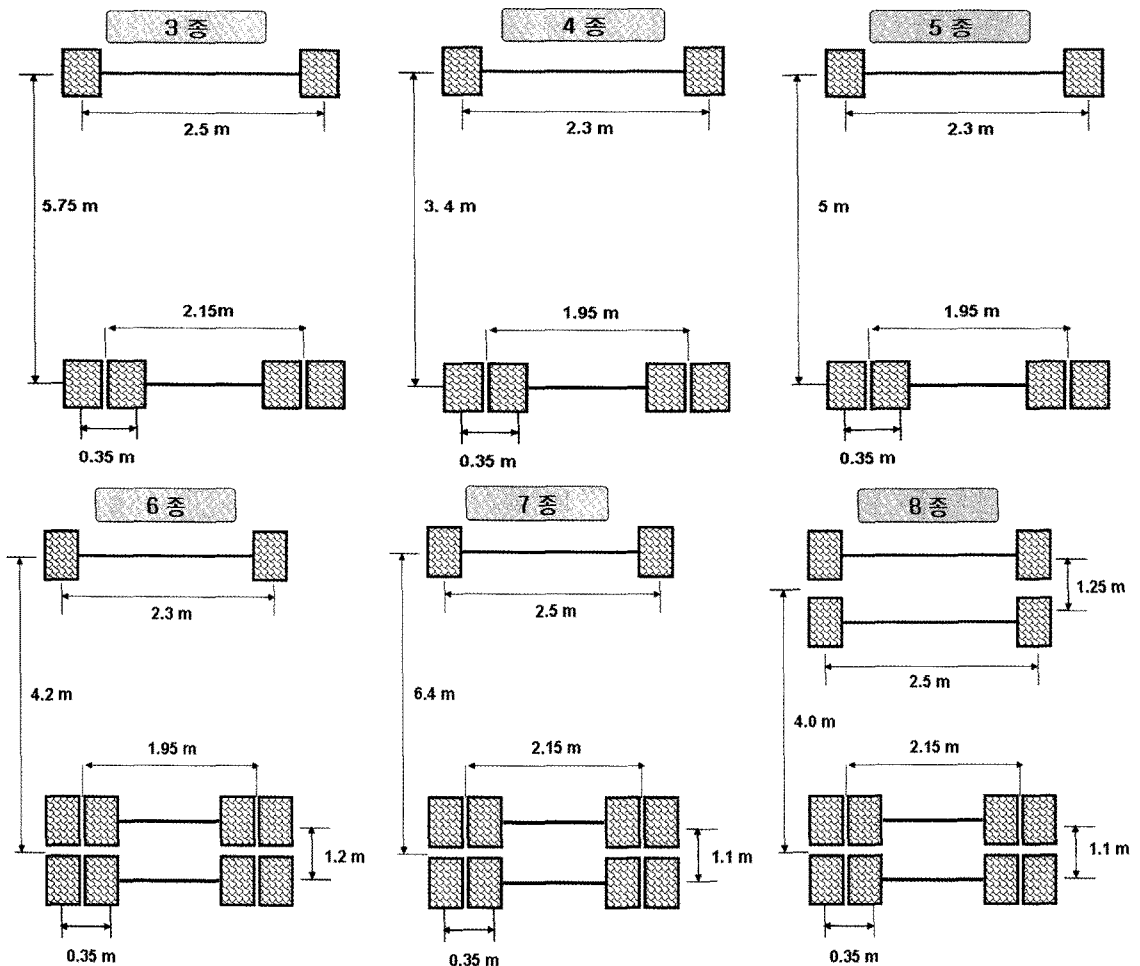


〈표 1〉 해석에 적용된 재료 물성

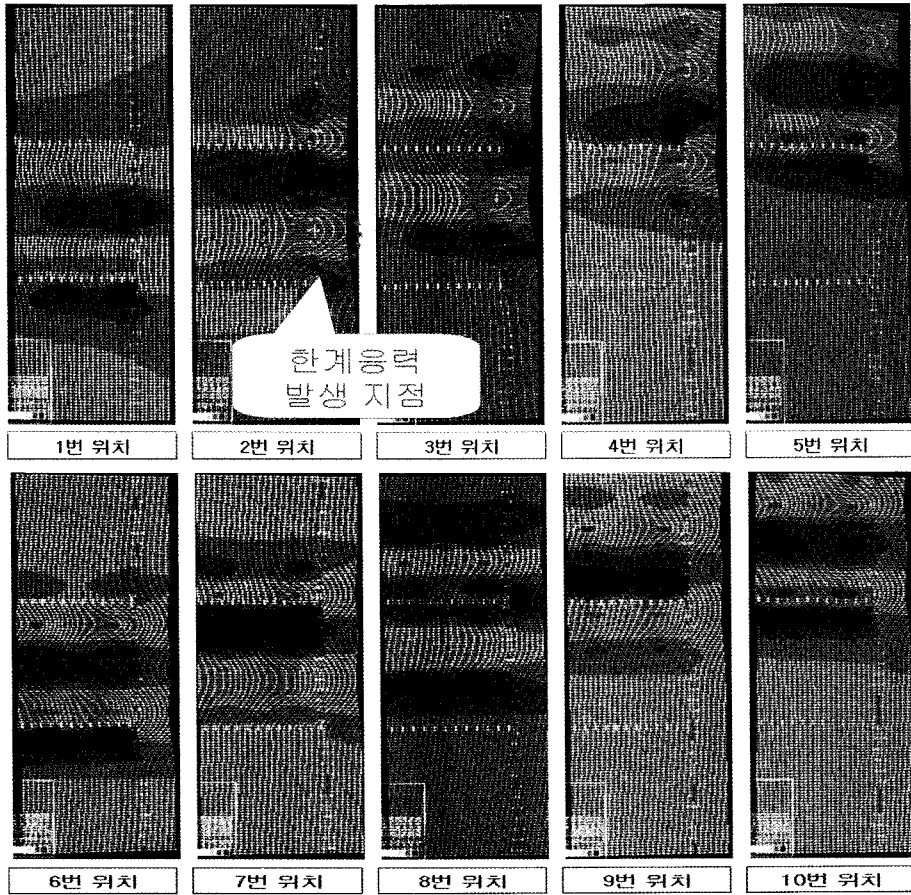
포장층	물성 항목	물성값
콘크리트층	탄성계수	27 GPa
	단위중량	2.4 t/m ³
	포아손비	0.15
복합 지지력(K)	지지력 계수	395 MPa/m
길어깨	탄성계수	25 GPa
	단위중량	2.3 t/m ³
	포아손비	0.17

〈표 2〉 차종별 타이어 압력

구분	차종에 따른 타이어 압력 (×10000 Pa)											
	3종		4종		5종		6종		7종		8종	
	앞	뒤	앞	뒤	앞	뒤	앞	뒤	앞	뒤	앞	뒤
1	39.2	39.2	9.2	3.6	18.1	10.3	37.6	16.4	45.8	21.2	23.7	24.2
2	49.0	44.1	12.4	7.5	26.8	18.2	55.0	41.8	54.5	35.4	32.3	40.9
3	58.8	49.0	28.3	20.8	32.5	24.7	72.2	45.4	62.7	33.2	41.1	40.8
4	68.6	53.9			51.1	39.5	83.5	44.1	71.7	38.7	45.2	42.7
5							88.4	43.8	83.0	45.5	48.9	46.7 4



〈그림 3〉 차종별 차량 재원



〈그림 4〉 하중 재하 위치별 응력 쿼터 (차중 6중, 하중크기 5-탄뎀축 위치)

다. 한계응력 지점 확인

3중~8중 차량을 위치별로 같이 재하한 결과, 〈그림 4〉와 같이 일반적으로 최대 응력은 차량의 바퀴가 재하된 곳에서 발생하였다. 이는 온도에 의한 하중을 고려하지 않았고 단지 슬래브 자중과 차량 하중만을 고려하여 해석한 결과이기 때문이다. 각 위치별에 따른 응력을 비교한 결과, 종방향으로는 슬래브 도입부에서, 횡방향으로는 길어깨 부분인 2번째 경우에서 최대 인장응력이 발생하였다.

3.2.3. 직교 설계를 이용한 NN 및 선형 회귀식 Data 산출

각 입력변수를 모두 고려하여 구조 해석을 실시한 것은 정확한 응력값을 구하기 위해 필요한 작업이지만 주

어진 시간과 여건을 고려하였을 때 필요한 요인만을 산출하여 해석하는 것이 더 효율적이다. 따라서 본 연구에서는 직교 요인 설계가 가능한 상용 통계 프로그램 SPSS를 이용하여 〈표 3〉과 같은 입력변수에 대하여 요인 설계를 하였다. 본 연구에서는 일반적인 조향축인 싱글축의 싱글 타이어에 대한 해석을 수행하여 응력값을 살펴 보았다.

〈표 3〉 직교설계를 위한 각 입력 변수의 물성값

줄눈 폭 (m)	줄눈 길이 (m)	접지압 (Pa)	탄성 계수 10 GPa	슬래브 두께(c m)	K (Pa/m)
3	6	98,007	1	25	81,434,138
3.6	7	686,046	2.5	30	244,302,413
4.2	8	1,274,085	4	35	407,170,689

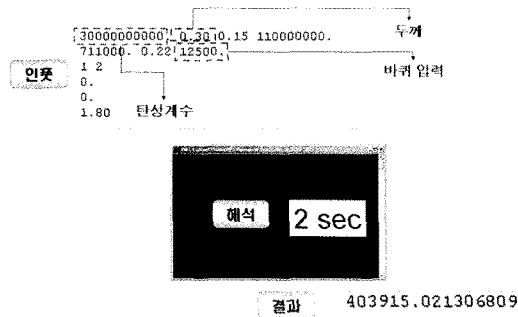


3.3. 포트란 프로그램을 이용한 구조해석

본 연구에서 사용한 포트란 프로그램은 경희대학교에서 개발한 것으로 해석시간이 2초 이내로 소요되어 매우 빠른 해석을 수행할 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

3.3.1. 구조해석

〈그림 5〉는 본 연구에서 사용한 구조해석의 해석 흐름도이다. 먼저 인풋 파일에 콘크리트 탄성계수, 표층 두께, 포아손비, 노상 지지력, 축하중, 축간 거리, 바퀴 압력 등의 입력 변수의 값을 입력한다. 그 다음 실행 파일을 클릭하면 2초 이내에 응력해석 결과가 간단히 나타난다. 본 프로그램은 ABAQUS와 달리 한계응력이 발생하는 위치에 대한 연구를 미리 수행하여 그 위치가 설정돼 있으므로 조건에 따른 해석을 바로 수행할 수 있는 장점이 있다. 여기서 고려한 해석의 입력 변수는 두께, 탄성계수, 바퀴압력이다. 변수의 범위는 각 입력 변수를 각각 7가지의 경우로 구분하였기 때문에 이 범위를 고려하여 〈표 4〉와 같이 설정하였다.



〈그림 5〉 포트란 프로그램의 해석 흐름도

〈표 4〉 해석 조건 (343 경우)

구분	탄성계수 (10GPa)	두께 (cm)	타이어 압력 (Pa)
1	2.7	27	550,000
2	2.8	28	570,000
3	2.9	29	590,000
4	3.0	30	610,000
5	3.1	31	630,000
6	3.2	32	650,000
7	3.3	33	670,000

4. 선형 회귀식 및 NN 을 이용한 한계응력의 산출 결과 비교

다음은 구조해석 결과를 이용하여 SPSS 프로그램으로 선형 회귀식을 개발하였고 MATLAB 의 NN 을 트레이닝 시켰다. 선형 회귀식과 NN 에 인풋 변수들을 입력하여 이에 대한 민감도를 분석하였다.

4.1. 데이터의 표준화, 선형 회귀식 개발

MATLAB 의 입력변수, 결과는 일반적으로 0~1 혹은 -1~1 사이의 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서 사용한 구조해석의 입력 변수들과 해석 응력값들을 0~1 사이의 값으로 표준화하였다. 방법은 해당 항목에 대하여 범위값(최대값-최소값)을 구하고 이 값으로 각각의 값을 나누는 것이다. 표준화된 값은 MATLAB에서 NN 을 트레이닝 하고 SPSS 프로그램에서 선형 회귀식을 만드는 데 사용하였다.

SPSS 통계 프로그램을 이용하여 다음과 같은 선형 회귀식들을 만들었다.

1. 응력(81개 경우)

$$= 1.006 \times 10^{-2} + 0.06667 \times \text{폭} + 0.05481 \times \text{길이} + 0.5581 \times \text{하중} + 0.122 \times \text{탄성계수} - 0.145 \times \text{두께} - 7.9 \times 10^{-2} \times K$$

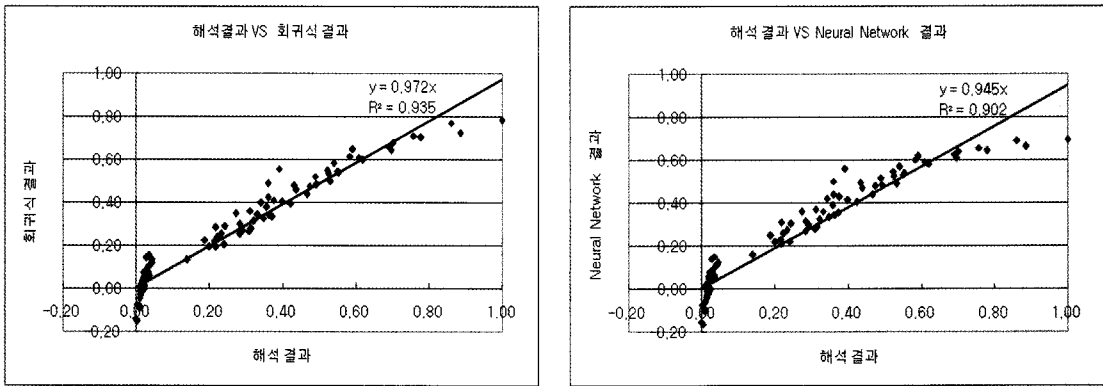
2. 응력(343개 경우)

$$= 0.43 - 0.473 \times \text{두께} + 0.4 \times \text{하중} + 0.116 \times \text{탄성계수}$$

4.2. 81 개 데이터 해석

4.2.1. 해석 결과의 비교

81개의 구조해석 결과에 대하여 실제 해석 결과와 선형 회귀식, NN 과의 결과를 살펴보았다. 회귀식이나 NN 를 이용해서 추정된 결과가 실제 구조해석을 통해 산출한 응력 결과와 일치할 경우 그 기울기가 "1" 이 된다. 〈그림 6〉에서 알 수 있듯이 선형 회귀식의 결과는 0.9728, NN 의 경우 0.9457로 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 도표의 원점 부분에서 선형 회귀식이나 NN의 데이터들이 압축 응력을 받고 있는 것으로 추정되지만 실제



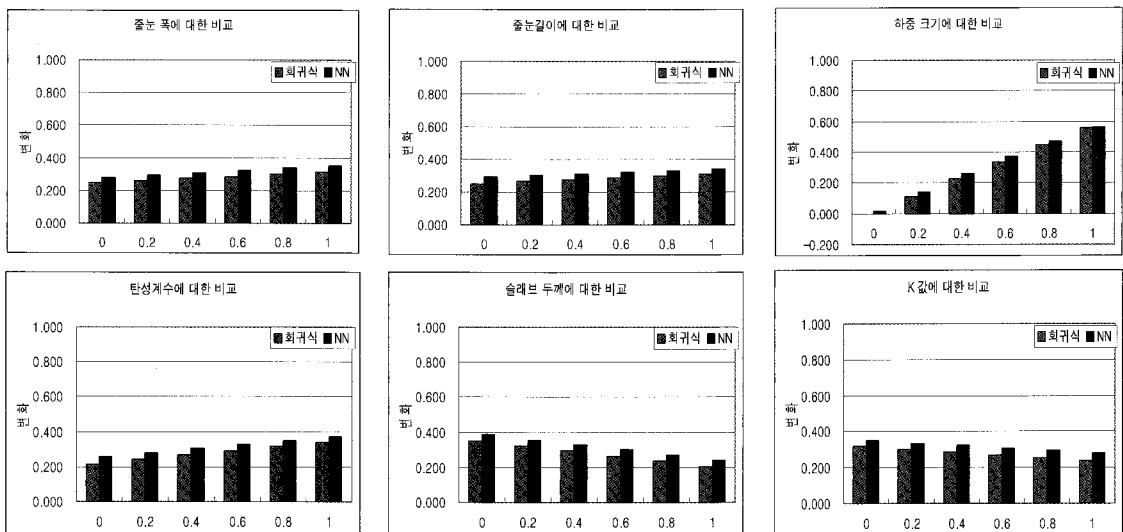
〈그림 6〉 구조해석 결과와 선형 회귀식 결과(좌), 구조해석 결과와 NN 결과의 비교(우)

해석 결과는 인장 응력이 발생하였다. 하지만 두 방법 간의 차이는 상대적으로 매우 적은 것을 알 수 있다. 이와 같이 입력 변수의 수가 많고 각 변수내의 해석 경우의 수가 적을 때에는 선형 회귀식이나 NN의 해석 결과는 실제 구조해석 결과와 다소 차이가 있지만 두 방법론의 결과에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

4.2.2. 민감도 분석

각각의 입력 변수들에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 수행하는 변수를 제외한 타 변수들은 평균값(0.5)를 적용하였다. 그 결과를 〈그림 7〉에 나

타내었다. 분석 결과, 줄눈 폭이나 줄눈 깊이는 응력의 결과에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 슬래브의 탄성계수와 하부 지지력 K 값이 유사한 영향력을 갖는 것으로 해석되었다. 이는 슬래브의 탄성계수의 범위 설정이 K 값의 변화범위보다 상대적으로 좁은 영역에 설정되었기 때문으로 판단된다. 재하 하중의 크기가 가장 큰 영향을 미치며 그 다음으로는 슬래브 두께임을 알 수 있었다. 전체적으로 NN의 응력 해석결과가 선형 회귀식 해석 결과보다 약 12% 더 크게 발생한 것으로 판단된다.



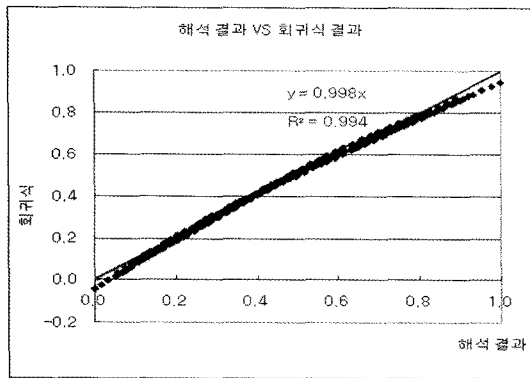
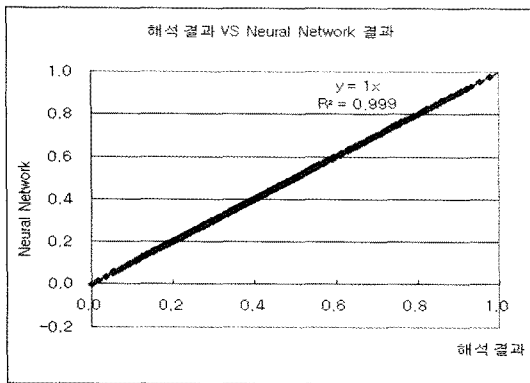
〈그림 7〉 민감도 분석 결과(81 개의 데이터 기준)

4.3. 343 개 데이터 분석

4.3.1. 해석 결과의 비교

다음은 직교 설계를 하지 않은 대신, 입력 변수를 줄이고, 변수별 해석의 경우를 늘려 모든 조건에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

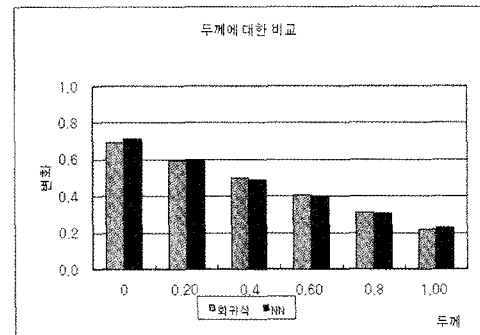
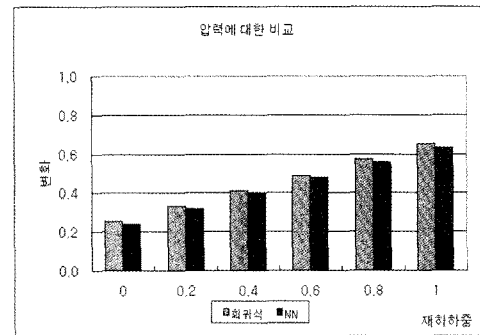
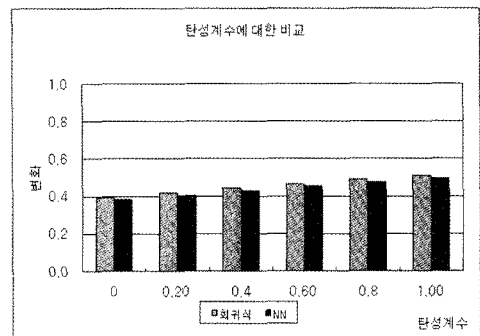
〈그림 8〉에서 알 수 있듯이 데이터의 수가 커질수록 선형 회귀식이나 NN의 추정 결과가 실제 해석 결과와 매우 유사해지는 것을 알 수 있다. 하지만 그 정확도는 NN의 경우, 기울기가 “1”이며 R2도 0.999 이상으로 나타났지만 선형 회귀식의 경우 기울기가 “0.9986”으로 나타났다. 그리고 회귀식의 경우 원점 (0, 0)에서는 압축응력이 일부 경우에 대해 발생하였고 (1, 1)의 위치 부분에서 오차가 다른 구간에 비해 커진 것을 알 수 있다.



〈그림 8〉 구조해석 결과와 NN(좌), 구조해석 결과와 선형 회귀식 결과의 비교(우)

4.3.2. 민감도 분석

본 해석 결과에 대해서도 민감도 분석을 수행하였다. 〈그림 9〉에서 알 수 있듯이 재하하중의 변화에 따라 응력의 변화가 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 81 개의 데이터에 대한 민감도 분석 결과와 동일한 것이다. 그 다음은 슬래브 두께, 콘크리트 탄성계수 순으로 나타났다. 여기서는 전체적으로 NN의 응력 추정 결과가 선형 회귀식의 응력 추정 결과보다 평균 2%정도 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 수행한 결과와 상반된 것이다.



〈그림 9〉 민감도 분석 결과(343 개의 데이터 기준)



4.3. 선형 회귀식 결과와 NN 결과 비교

81개의 데이터와 342 가지 데이터를 이용하여 NN 과 선형 회귀식을 이용하여 비교한 결과를 살펴보면 결과를 비교해 보면 다음과 같은 내용을 알 수 있다.

(1) 데이터 수가 적을 때에는 NN 및 선형 회귀식 결과와 실제 해석 결과와 차이가 있었다. 때문에 민감도 분석 결과과 두 방법 간에 차이가 발생하였다. 하지만 분포도 및 그래프 형태나 R2 등을 고려했을 경우 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

(2) 데이터의 수가 많은 경우에는 NN 및 선형 회귀식 결과와 실제 해석 결과 사이의 차이는 매우 작았다. 하지만 데이터의 (0, 0), (1, 1) 부분에서 선형 회귀식 결과는 해석 결과와 다소 차이가 발생하였다. 민감도 분석 결과, 데이터가 적은 경우에 비해 차이가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

(3) 한국형 포장 설계법에서는 많은 입력 변수와 각 경우에 다양한 해석을 수행해야 하기 때문에 오차율이 작은 NN 를 이용하여 구조해석을 수행하는 것이 보다 나은 방향으로 판단된다.

5. 결론

ABAQUS 와 포트란 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행한 결과를 바탕으로 NN과 선형 회귀식을 이용하여 한계응력을 추정한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) ABAQUS 를 이용한 구조해석 결과, 한계응력은 대부분 바퀴 하중이 재하되는 곳에서 발생하였으며 최대 응력 지점을 확인하였다. 이에 근거하여 NN 및 선형 회귀식 개발을 위한 자료를 확보하였다.

(2) 81개의 데이터를 이용하여 실제 구조해석 결과와 NN 및 선형 회귀식과의 비교한 결과, 실제 결과와는 다소 차이가 있었다. 특히 표준화된 데이터의 원점 부분에서는 압축응력이 발생하는 경우도 있었다. 민감도 분석을 수행했을 경우, 재하하중이 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며 상대적으로 줄눈 폭과 줄눈 길이는 큰 영향을

주지 못하는 것이 확인되었다. 전체적으로 선형 회귀식 보다 NN 응력 결과가 더 크게 발생하였다.

(3) 343 개의 데이터에 대한 분석 결과 NN과 선형 회귀식이 매우 유사한 결과가 나타나는 것을 알 수 있었으며 NN 의 경우 거의 해석 결과와 동일한 것을 알 수 있었다. 민감도 분석 결과, 재하 압력이 가장 큰 영향을 미쳤으며 두께, 콘크리트 탄성계수 순으로 나타났다.

(4) 자료의 수가 많아질수록 NN이 선형 회귀식 결과보다 실제 구조해석 결과와 근사해지는 것을 알 수 있었다. 이에 근거하여 한국형 포장 설계법의 구조해석 모듈을 선형 회귀식 보다는 NN을 이용하여 해석하는 것이 보다 정확한 결과를 도출할 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의해 작성되었습니다.

참고문헌

1. "한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구". 건설교통부, 2003. 10
2. Hibbitt, "ABAQUS/Standard User's Manual, Volume II". Karlsson & Sorensen, Inc, 2000
3. Hwang, "Pavement Analysis and Design".
4. 조윤희, 한상기, 김준형, "콘크리트 포장의 하부 지지력계수 산정식 개발". 1999, 12
5. "중하중 교통도로의 신속 개방형 대보수 및 덧씌우기 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공 기술 개발". 중앙대학교, 2004, 1
6. 이동현, "일반 국도 PMS 데이터 분석에 관한 연구(신경망 기법을 이용한 유지 보수비 추정)". 중앙대학교, 2001, 12
7. 김용수, "MATLAB 입문과 활용". 높이깊이

접 수 일 : 2008. 6. 16

심 사 일 : 2008. 6. 20

심사완료일 : 2008. 9. 2