

인공 신경망을 이용한 플랫 슬래브 주차장 구조물의 등가차량하중계수

Determination of Equivalent Vehicle Load Factors for Flat Slab Parking Structures Using Artificial Neural Networks

곽 효 경* · 송 종 영** · 이 기 장*** · 이 정 원****

Kwak, Hyo-Gyoung · Song, Jong-Young · Lee, Ki-Jang · Lee, Jung-Weon

ABSTRACT

In this paper, the effects of vehicle loads on flat slab system are investigated on the basis of the previous studies for beam-girder parking structural system. The influence surfaces of flat slab for typical design section are developed for the purpose of obtaining maximum member forces under vehicle loads. In addition, the equivalent vehicle load factors for flat slab parking structures are suggested using artificial neural network. The network responses are compared with the results by numerical analyses to verify the validation of Levenberg-Marquardt algorithm adopted as training method in this paper. Many parameter studies for the flat slab structural system show dominant vehicle load effects at the center positive moments in both column and middle strips, like the beam-girder parking structural system.

1. 서 론

널리 사용되는 콘크리트 바닥판 구조물은, 주철근이 일방향으로만 배근되는 일방향 구조계와 양방향으로 배근되는 이방향 구조계로 나눌 수 있으며, 이방향 바닥판 구조계는 크게 기둥과 기둥이 이루는 패널이 주변 보요소에 의해 지지되는 보-거더 구조계와 보요소가 없는 플랫 슬래브 구조계로 구분할 수 있다. 국내에서 설계, 시공되어 온 주차장 구조물은 크게 구조체적인 면에서 보-거더 구조계가 주를 이루어 왔으며, 최근에는 플랫 슬래브 구조계를 갖는 구조물의 시공이 점진적으로 증가하는 추세에 있다. 주지하는 바와 같이 건축법상의 높이 제한 허용 범위 안에서, 최대층수의 건축물을 시공하기 위해서는 각층의 층고를 줄이는 것이 가장 효과적이며, 이러한 요구에 부합되는 구조계가 플랫 슬래브 구조계이다. 플랫 슬래브 구조계는 보-거더 구조계에 비해 시공 시 거푸집형성이 간편할 뿐만 아니라, 경제적이며 보다 효율적으로 공간을 활용할 수 있는 장점이 있는 반면에, 기둥 주변 위험단면에서 전단에 의한 파괴가 발생할 가능성이 높고 파다하중이 작용할 때 발생하는 불균형모멘트 처리가 어려운 단점이 존재한다.

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수연구원
*** 삼성중공업(주) 건축기술팀 부장, 공학박사
**** 삼성중공업(주) 기술연구소 전임연구원

지금까지 보-거더 구조계로 구성된 주차장 구조물에서 차량하중에 대한 영향은 슬래브, 보, 거더 등 주요 구조부재를 중심으로 연구된 바 있으나 [2, 3], 플랫 슬래브 주차장 구조물에서 차량하중의 영향에 대한 연구는 미미한 실정이다. 플랫 슬래브 구조계는 지판 (drop panel)이나 주두부 (capital)의 유무에 따라 플랫 슬래브와 플랫 플레이트로 구분되며, 구조적인 특성상 보-거더 구조계보다 차량에 의한 집중하중영향이 크게 나타날 것으로 예견된다. 그러나 현재 설계단계에서 차량하중은 적절하게 고려되지 못하고 있어, 플랫 슬래브 구조계 자체가 설계단계부터 구조적인 문제를 유발시킬 가능성을 내포하고 있다. 이 논문에서는 플랫 슬래브 구조물에 대한 차량하중의 적용을 위해서 선행되어야 하는 영향면 작성을 포함하여, 기존에 설계/시공된 플랫 슬래브 주차장 구조계의 평면구성 및 관련자료를 토대로 슬래브의 규격을 포함한 지판의 크기, 두께 등 주요 구조변수를 변화시키면서 차량하중을 적용시켜 구조해석을 수행하였으며, 이를 토대로 인공신경망을 이용하여 플랫 슬래브 구조계의 주요 지점에 대한 등가차량하중계수를 제시하였다.

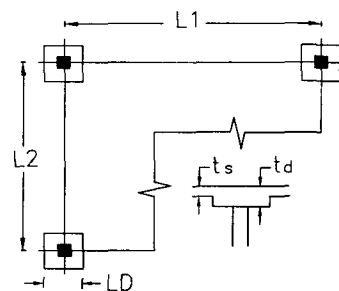
2. 플랫 슬래브의 구조해석

지금까지 수행된 플랫 슬래브 연구의 대부분은 분포하중이 작용하는 경우에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 일부 집중하중이 작용하는 경우에 대한 연구결과는 구조물의 경계조건과 기하형상이 정형화된 경우에 제한되어 있는 실정이다. 이 논문에서는 주차장 구조물로 사용되는 플랫 슬래브 구조계를 해석함에 있어서 다양한 경계조건과 각 구조부재의 강성변화 등을 가장 효과적으로 해석할 수 있는 유한요소법을 사용하였다. 플랫 슬래브의 모델은 회전 자유도를 갖는 변절점 평면응력요소를 사용하였으며, 기둥과 같은 프레임 요소는 보 요소를 이용하여 모델링하였다. 플랫 슬래브의 영향면 검토영역은 플랫 슬래브의 단변, 장변방향에 대해 주열대 기둥 라인, 지판 라인, 중간대 중심라인을 각각 설정하였다. 영향면의 작성은 각각의 검토라인의 기둥면과 지판면, 그리고 중앙점에서 이루어졌는데, 이는 설계시 기둥 중심점의 부재력을 사용하는 것이 아니라, 기둥면의 값을 산출하여 사용하는 것처럼 구조부재의 강성이 변하는 지점의 부재력 거동을 확인하기 위한 것이다.

이 논문에서 고려한 구조변수는 슬래브의 단변, 장변길이, 슬래브의 두께, 지판 두께, 크기 등 다섯가지 변수이며 각 변수의 영역은 표 1에 나타낸 바와 같다.

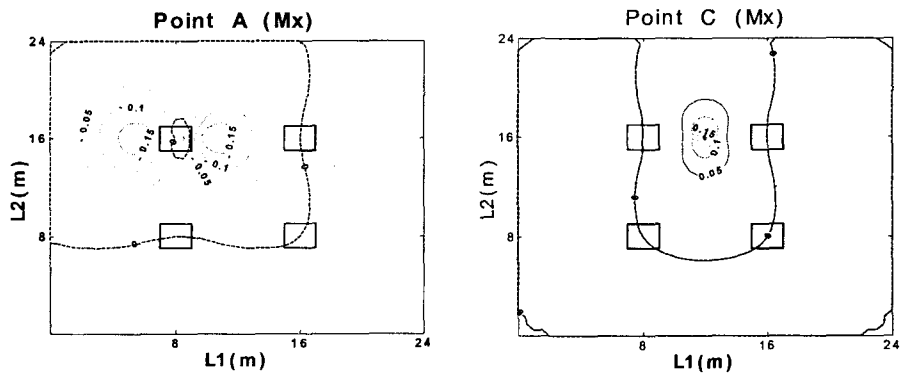
표 1 구조변수의 영역 (단위:m)

구조 변수	변수 영역	개수
단변 길이 (L1)	6, 8, 10, 12	4
변장비 (L2/L1)	1.00, 1.25, 1.50	3
슬래브 두께 (ts)	0.20, 0.25, 0.30, 0.35	4
지판 두께 (td)	1.5×S _{th} , 2.0×S _{th} , 2.5×S _{th}	3
지판 크기 (DS)	1×1, 2×2, 3×3, 4×4	4
총 합		576

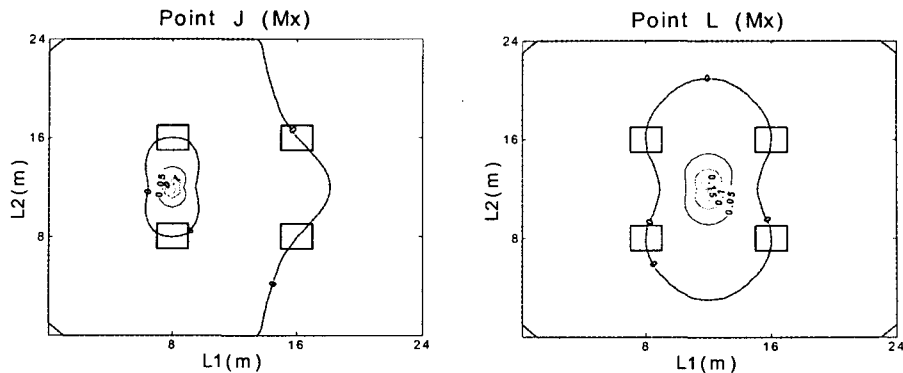


3. 플랫 슬래브의 영향면

주차장 구조물에 작용하는 차량하중은 이동하중으로써 최대 부재력을 유발하는 재하위치가, 부재력의 종류가 정모멘트인지 부모멘트 인지에 따라서 변하게 된다. 이와 같이 플랫 슬래브에서 최대 부재력을 유발하는 하중의 위치를 결정하기 위해서는 보 요소와 같은 일차원 부재에 대한 영향선의 이차원 확장적인 영향면을 이용하는 것이 용이하다. 이 논문에서는 플랫 슬래브에서 차량하중이 최대 부재력을 일으키도록 적용하기 위한 영향면을 설정한 구조검토영역에 대하여 각각 작성하였다. 그림 1은 슬래브의 단변길이가 8m이고, 슬래브의 두께가 0.2 m, 지판의 두께가 0.4 m, 지판의 크기가 2m 2m인 정방형 슬래브의 주요지점에 대한 영향면을 나타낸 것이다. 부모멘트 부재력이 지배적으로 발생하는 기둥 주위를 살펴보면, 기둥면 (Point A)의 경우에는 기둥을 중심으로 대칭모양임을 알 수 있다. 영향면을 살펴보면 중간대의 경우 기둥면에서 일반적으로 분포하중이 작용하는 경우에는 부모멘트가 발생하나, 차량과 같이 이동하중이 작용하는 경우에는 반대로 정모멘트 부재력이 유발될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 영향면상에서 나타나는 등고선을 살펴보면, 부재력의 방향과 평행한 방향으로 등고선의 경사가 급하게 감소함을 알 수 있으며, 부모멘트 부재력보다 정모멘트 부재력의 경우, 종거값이 높은 영역이 좁게 분포함을 알 수 있다. 따라서, 이로부터 차량하중의 집중하중영향이 정모멘트 부재력의 경우에 크게 나타남을 알 수 있다. 중간대의 중심라인의 영향면을 살펴보면 기둥과 기둥을 잇는 중심선상에 보나 거더와 같은 지지부재가 존재하지 않는 까닭에, 기둥 끝단면과 지판 끝단면의 경우도 중앙부의 슬래브와 유사하게 하중이 작용하면 양의 부재력을 유발시키는 영역이 존재한다. 하중의 부분재하 영향 (pattern loading effect)을 살펴보면, 주열대 중앙점 (Point C)의 경우 인접한 기둥에 의해 형성되는 상, 하 패널에 작용하는 하중만이 양의 영향을 나타내며, 중간대 중앙점 (Point L)은 중앙점을 포함하는 한 패널만이 양의 영향을 나타냄을 알 수 있다.



(a) 주열대 중심라인



(b) 중간대 중심라인

그림 1 정방형 슬래브의 영향면

4. 신경망을 이용한 등가차량하중계수의 산정

최근에 들어 구조공학 분야에서도 구조물의 최적화 문제에서, 진동제어에 이르기까지 광범위하게 신경망을 적용하는 연구가 진행되어 왔으며, 특히 신경망 이론은 입력 시스템과 출력 시스템간의 연관성이 존재하지만 이를 규명하는 뚜렷한 규칙이 존재하지 않는 경우에 매우 효율적으로 적용할 수 있다. 신경망 이론의 주요 장점은 주어진 문제에 대한 의미있는 해의 도출을 일련의 예제의 학습으로부터 수행할 수 있으며, 학습에 이용되는 자료는 이론적인 값은 물론, 실험값 또는 이들의 조합이 될 수 있으며, 특히 쉽게 정량화 되지않는 영향인자 요소를 갖는 문제에 대해 매우 효율적인 결과를 도출할 수 있는 점들이 있다. 기존의 보-거더 구조계에서 등가차량하중계수를 주요 구조변수의 함수로 회귀분석을 통해 제시하였으나, 플랫 슬래브의 경우에는 고려해야 하는 변수의 수가 증가함은 물론, 전체 자료의 수가 급증하여 다중회귀분석을 적용하여서는 만족할 만한 결과를 얻기가 어려우므로, 이 논문에서는 비선형 다중회귀분석법의 대안으로 신경망 이론을 적용하였다. 사용한 신경망 기법은 가장 널리 사용되고 있는 역전파 알고리즘을 이용한 다층 퍼셉트론 신경망 구조이다. 일반적으로 주어진 문제마다 최적의 학습 알고리즘의 선택은 각각 다르지만, 이러한 학습 알고리즘을 결정하는데는 문제의 복잡성, 훈련 데이터의 개수, 신경망 구조의 가중치와 임계값의 개수, 목표 에러의 크기, 그리고 주어진 문제가 패턴인식에 유사하느냐, 함수 근사화문제에 유사하느냐 등 여러가지 요소에 의존한다. 여러 구조변수에 따른 등가차량하중계수의 제안과 같은 회귀분석문제는 함수 근사화 영역에 포함되며, 이 경우 Levenberg-Marquardt 알고리즘이 그 수렴성이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있다. 기본적인 신경망 이론은 여러 참고문헌에서 자세히 다루고 있으므로, 여기서는 간략히 이 논문에서 사용된 L-M 알고리즘을 중심으로 살펴보면, 다층 신경망에서 각 층의 출력값은 전단계 층의 입력값이 되며, 이는 다음 식과 같이 표현된다.

$$a^{m+1} = f^{m+1}(W^{m+1}a^m + b^{m+1}) \quad \text{for, } m = 0, 2, \dots, M-1 \quad (1)$$

여기서, W 는 신경망의 가중치 벡터, b 는 임계값 벡터, f 는 전이함수, a 는 신경망의 출력값, 그리고 M 은 신경망에서 사용된 전체 은닉층의 개수를 각각 의미한다.

다음 식과 같이 회귀분석과 같은 함수 근사화 문제에서, 목표값 (t)와 신경망의 출력값 (a)와의 차이의 평균제곱의 합을 최소화하는 알고리즘이 사용된다.

$$F(X) = E(e^2) = E[(t-a)^2] \quad (2)$$

이때, 평균제곱의 합은 k 단계에서 에러의 제곱으로 변환시키면, 다음식을 얻게 된다.

$$\hat{F}(X) = (t(k)-a(k))^T \cdot (t(k)-a(k)) = e^T(k) \cdot e(k) \quad (3)$$

역전과 알고리즘의 가장 간단한 방법은 다음 식 (4)와 같이 신경망의 가중치와 임계값을 목적함수가 가장 빠르게 감소하는 방향, 즉 미분값의 음의 방향으로 갱신하는 방법이며, 이를 반복하여 원하는 목표치에 도달하거나 최대 반복회수에 도달할 때까지 되풀이하는 방법이다.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k g_k \quad (4)$$

여기서, x_k 는 k 번째 반복과정에서의 가중치와 임계값 벡터이며, α_k 는 학습률, g_k 는 gradient를 각각 의미한다.

L-M 알고리즘은 보다 빠른 수렴속도를 얻기 위해 개발된 뉴턴법의 근사화방법의 하나이며, 목적함수의 이차 도함수값을 사용하여, 수렴성이 높은 반면에 다른 방법에 비해 상대적으로 많은 메모리를 요구하는 단점이 있다.

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (5)$$

여기서, J 는 가중치와 임계값에 대한 에러의 Jacobian 행렬을, e 는 신경망의 에러를, I 는 단위행렬을, μ 는 스칼라상수를 각각 의미한다.

신경망의 학습에서 주의할 점은 신경망 구조가 학습 데이터를 일반화하지 않고, 단순히 기억하는 오류에 빠지 않도록 도모하는것이다. 인공신경망 구조의 적절한 절점수를 결정하는 방법에는 Baum-Haussler 규칙, Vapnik-Chervonenkis의 차원이론 등 여러 가지 방법이 있으며, 일반적으로 주어진 기지변수 (known)의 수보다 결정되어야 할 신경망 구조의 미지변수 (unknown)의 개수가 커지는 경우에, 과적합현상이 발생하게 된다. 따라서 신경망의 구조에서 결정되어야 할 미지수의 개수를 기지의 훈련패턴의 수보다 작게 하는 경우에, 신경망이 데이터를 기억하는데서 벗어나 일반화시키는 것을 보장하게 된다.

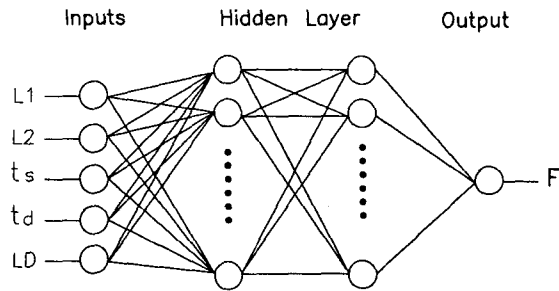
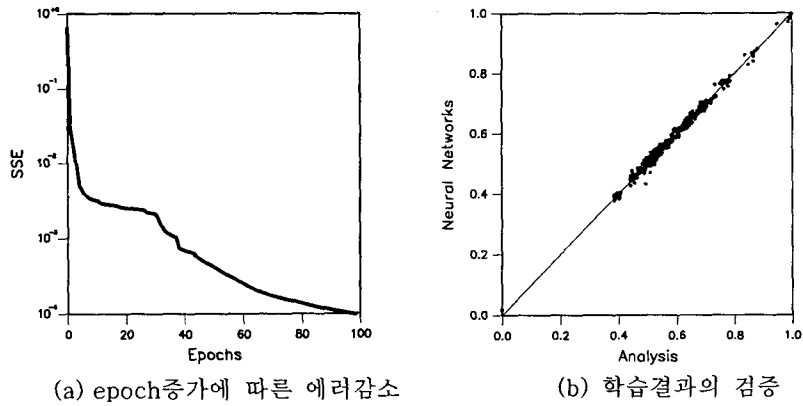


그림 2 사용된 인공 신경망의 구조

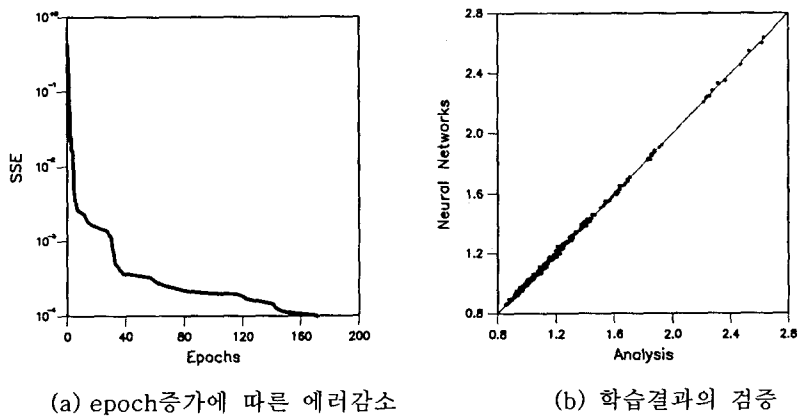
이 논문에서는 다섯가지 주요 구조변수의 영향을 효과적으로 반영하기 위하여, 그림 2와 같이 두 개의 은닉층으로 이루어진 신경망 구조를 갖는 다층 역전파 신경회로망을 이용하여 분포하중이 작용하는 부재력에 대한 차량하중이 작용할 때의 부재력의 비로 정의되는 등가차량하중계수를 제안하였다.



(a) epoch증가에 따른 에러감소

(b) 학습결과 검증

그림 3 x-방향 주열대 부모멘트 지점



(a) epoch증가에 따른 에러감소

(b) 학습결과 검증

그림 4 x-방향 중간대 정모멘트 지점

신경망 학습의 검증은 학습에 참여하지 않은 검증용 데이터와 학습된 결과를 포함하여 신경망 결과와 해석값과의 비교를 통해서 이루어졌으며, 그 결과는 그림 3~4와 같다. 그림 3, 4는 각각 x 방향 주열대 부모멘트 지점과 중간대 중앙부의 정모멘트 지점에 대한 것이다. 그림에서 나타나는 바와 같이, L-M (Levenberg-Marquardt) 알고리즘을 적용한 결과가 매우 만족할만한 정확도를 나타낼 수 있으며, 그 수렴성도 매우 뛰어남을 알 수 있다. 참고로 중간대 중앙부 정모멘트에 대한 데이터를 이용하여 일반적으로 널리 사용되는 학습방법의 하나인 국부 최소점에 수렴되는 현상을 방지하기 위해 모멘텀과 또한 학습률을 학습정도에 따라서 변화시키는 모멘텀-변화학습률법 (momentum-variable learning rate)과 비교한 결과는 표 2와 같다. 표에서 나타나는 바와 같이 L-M 알고리즘이 보다 적은 수의 노드 수를 갖으면서도, 수렴속도가 오히려 모멘텀-변화학습률법보다 현저히 뛰어남을 알 수 있다. 따라서, 이 논문의 경우와 같이 비교적 많은 패턴의 입력데이터를 갖는 비선형 회귀분석문제의 경우에는 L-M 알고리즘을 사용한 다층 신경망기법이 매우 효율적인 학습 방법임을 알 수 있다. 등가차량하중계수를 살펴보면, 주열대와 중간대의 중앙부 정모멘트 부재력의 경우 차량하중이 지배적이며, 또한 지판의 크기가 증가할수록 등가차량하중계수가 증가함을 알 수 있다. 이는 분포하중의 경우에는 지판의 크기 증가에 따른 슬래브의 경계조건에 큰 영향을 받지만, 차량하중과 같은 집중하중의 경우에는 경계조건변화에 큰 영향을 받지 않기 때문인 것으로 판단된다.

표 2 학습 알고리즘의 비교 (중간대 중앙부 정모멘트의 경우)

알고리즘	신경망 구조	최대 epoch	Time (sec)
(1) 모멘텀+ 변화학습률법	5-7-7-1	136,284	1740
(2) L-M 알고리즘	5-5-5-1	172	28
비 교 (1)/(2)		792	62

5. 결 론

이 논문에서는 플랫 슬래브 구조계를 중심으로 차량하중에 대한 영향을 연구하기 위하여 필수적인 플랫 슬래브 구조계의 영향면에 대한 연구를 수행하였으며, 또한 설계 분포하중이 작용하는 경우의 구조변수 변화 따른 플랫 슬래브 구조계의 거동특성을 살펴보았다. 이를 위해, 먼저 기존의 설계, 시공된 플랫 슬래브 주차장 구조물을 중심으로 주요 구조 변수인 슬래브의 단변 길이, 변장비, 슬래브 두께, 지판의 두께, 지판의 크기 등을 결정하였으며, 차량하중은 보-거더 구조계에 대한 연구에서 설정된 2.4 Ton 설계기준차량하중을 사용하였다. 또한 Levenberg-Marquardt 학습법을 이용한 다층신경망을 이용하여 플랫 슬래브 구조계의 등가차량하중계수를 제시하였다. 신경망 적용 결과, 이 논문과 같이 많은 입력패턴을 갖는 비선형 회귀분석의 경우, L-M 알고리즘이 수렴성과 정확도가 매우 뛰어남을 알 수 있었다. 플랫 슬래브 구조계의 등가차량하중계수를 살펴보면 주열대와 중간대의 중앙점에서 차량하중에 대해 취약할 가능성이 많음을 예상할 수 있었다. 또한 분포하중이 작용할 때, 구조변수변화에 의한 부재력 거동특성 연구를 통하여, 고려하는 구조변수 가운데에 부재력의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 구조변수는 지판의 크기이며, 슬래브의 두

계와 이에 대한 지판의 상대적인 두께비와 같은 변수는 처짐량에는 영향을 미치나, 부재력의 변화에는 그 영향이 미미함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 삼성중공업 (주) 건설부문 기술연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 건설교통부제정, 1999.
2. 광효경, 송종영, “주차장 구조물 슬래브의 등가차량하중계수에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 17권,I-4호,pp.529-540, 1997.
3. 광효경, 송종영, “주차장 구조물의 보와 거더의 등가차량하중계수에 관한 연구”, 전산구조공학 회논문집, 10권 3호, pp.203-216, 1997.
4. 이완훈, 면내 회전자유도를 가진 변이 평면 셸요소의 개발과 이를 이용한 적응적 체논 세분화, 한국과학기술원박사학위논문, 1994.
5. Adolf Pucher, ‘Influence Surface of Elastic Plates’, Springer-Verlag Wien, 1977.
6. El-Kassas, E.M.A., Mackie, R.I., and El-Sheikh, A.I. (2001), Using neural networks in cold-formed steel design, Computers & Structures, Vol.79, No.18, pp.1687-1696.
7. Flood, I. and Kartam, N., Neural Networks in Civil Engineering I: Principles and Understanding, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.8, No.2, pp.131-148, 1994.
8. Gamble, W. L., Moments in Beam Supported Slabs, J. of ACI, 1972, 69, No 3, 149-157.
9. Hagan, M. T., Demuth, H. B., and Beale, M., Neural Network Design, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
10. Jirsa, J. O., Sozen, M. A., and Siess, C. P., Pattern Loading on Reinforced Concrete Floor Slabs, Journal of Structural Division, ASCE, Vo.96, No.ST4, pp.1117-1137, 1969.
11. Kwak, H. G., Song, J. Y., Live Load Factors for Parking Garage Members, Structural Safety, Vol.22, No.3, pp.251-279., 2000.
12. Kwak, H. G., Song, J. Y., Live Load Design Moments for Parking Garage Slabs Considering Support Deflection Effects, Computers & Structures, Vol.79, No.19, pp.1735-1751., 2001.
13. KSCE, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, Korea Society of Civil Engineers, Seoul, 1995.
14. Vapnik, V. N. and Chervonenkis, A. Y., On the uniform convergence of relative frequencies of events to their probalities, Theory of Probablility and its Applications, Vol.16, No.2, pp.264-280, 1971.