

합리적인 측압계수 결정을 위한 인공신경 전문가 시스템의 개발

Development of an Artificial Neural Expert System for Rational
Determination of Lateral Earth Pressure Coefficient

문 상 호*¹

Moon, Sang-Ho

문 현 구*²

Moon, Hyun-Koo

Abstract

By using 92 values of lateral earth pressure coefficient(K) measured in Korea, the tendency of K with varying depth is analyzed and compared with the range of K defined by Hoek and Brown. The horizontal stress is generally larger than the vertical stress in Korea : About 84 % of K values are above 1.

In this study, the theory of elasto-plasticity is applied to analyze the variation of K values, and the results are compared with those of numerical analysis. This reveals that the erosion, sedimentation and weathering of earth crust are important factors in the determination of K values. Surface erosion, large lateral pressure and good rock mass increase the K values, but sedimentation decreases the K values. This study enable us to analyze the effects of geological processes on the K values, especially at shallow depth where underground excavation takes place.

A neural network expert system using multi-layer back-propagation algorithm is developed to predict the K values. The neural network model has a correlation coefficient above 0.996 when it is compared with measured data. The comparison with 9 measured data which are not included in the back-propagation learning has shown an average inference error of 20% and the correlation coefficient above 0.95. The expert system developed in this study can be used for reliable determination of K values.

요 지

국내에서 계측된 92개의 측압계수를 이용하여 심도에 따른 측압계수의 경향을 분석하고 Hoek &

*1 정회원, 한양대학교 대학원 자원·환경공학과 석사과정

*2 정회원, 한양대학교 공과대학 자원·환경공학과 부교수

Brown이 정의한 측압계수의 범위와 비교하였다. 국내의 측압계수는 1 이상이 84%로 대부분의 경우 수평응력이 연직응력보다 크게 나타났다.

지반의 침식, 퇴적 및 암반 풍화, 횡압력에 의한 측압계수의 변화를 분석하기 위해 탄소성 이론을 적용하고 그 결과를 유한요소해석과 비교하였다. 측압계수는 지표 침식과 횡압력이 크고 암질이 양호할수록 증가하였고 퇴적의 경우에 감소하였다. 본 연구를 통하여 여러 지질작용이 측압계수에 미치는 영향을 파악할 수 있었고, 특히 지하공동의 굴착 심도인 천부 암반에서의 측압계수 변화를 파악할 수 있었다.

다층 역전과 학습 알고리즘을 적용한 인공신경망을 이용하여 측압계수 예측 전문가 시스템을 개발하였다. 학습률, 모멘텀 상수 그리고 은닉층 노드수를 고려하여 실측치와 상관계수 0.996 이상의 매우 높은 추론율을 보이는 모델을 선정하였다. 학습에서 제외한 9개 계측자료로 이 모델을 검증한 결과, 추론오차의 평균은 20%였으며 상관계수도 0.95 이상으로 측압계수를 예측하는데 있어 높은 신뢰성을 보였다.

Keywords : Lateral earth pressure coefficient, Elasto-plasticity theory, Numerical analysis, Geological process, Neural network expert system, Correlation coefficient

1. 서론

현대의 지하구조물은 철도 및 도로터널, 유류 저장시설, 방사성폐기물 처분장 등 그 종류와 형태가 다양하고 불리한 암반조건을 피할 수 없는 상황이 빈번히 발생하기 때문에 설계와 시공에 있어 고도의 기술력이 요구되며 대상암반의 상태와 역학적 성질을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 그 중에서도 현장 암반의 초기응력상태, 특히 연직응력에 대한 수평응력의 비인 측압계수는 구조물의 형상과 크기를 결정할 뿐만 아니라 설계와 시공 전반에 영향을 미치면서 구조물의 안정성을 좌우하는 중요한 인자이다.

이러한 측압계수의 예측을 위하여, 먼저 2장에서는 국내 지질자료를 바탕으로 측압계수의 범위를 결정하고 이를 그래프화하여 국내 측압계수의 경향성을 파악하고자 하였다. 3장에서는 여러 지질활동에 의하여 변하는 측압계수를 역학이론으로부터 유도된 해석해의 분석과 유한요소해석을 병행하여 계측자료에서 나타나는 측압계수의 경향성을 침식, 퇴적, 풍화, 횡압력의 지질활동으로써 해석하고자 하였다. 마

지막으로 4장에서는 인공신경망 기법을 도입한 측압계수 예측 전문가 시스템을 개발하여 앞의 계측자료와 역학모델에서 결여된 측압계수 예측 기능을 보완하고자 하였다.

2. 문헌연구 및 계측자료 분석

측압계수에 대한 연구는 1960년대에 시작되어 현재까지 세계 각지에서 이루어지고 있으며 1980년대 중반에 들어서면서 측압계수에 대한 근본적인 연구가 시작되었다. Wittke(1990)는 층방향 암반에서 다섯 가지 탄성상수의 변화에 따른 측압계수를 연구하였고 Amadei(1996)는 암반의 이방성이 측압계수의 측정과 추정에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Bandis(1983)는 절리의 강성과 간격에 따른 탄성계수의 변화를 연구하였고 Sheorey(1994)는 지각의 불균질성과 심도에 의한 탄성계수 변화와 지각의 열팽창에 의한 측압계수의 거동을 분석하였다.

측압계수의 측정방법으로는 오버코어링(overcoring)에 의한 응력개방법, 플랫잭(flat jack)에 의한 응력보상법, 시추공내에 패커를 삽입하는 수압파쇄법(hydraulic fracturing) 등이 있

다. 이 중 응력개방법은 미국광무국(USBM)의 공경변형법(borehole deformation method)과 남아공 CSIR의 공저변형법(doorstoper method), 공벽변형법(Leeman method)이 있다(김수일 등, 1996). 이러한 방법들로 세계 각지에서 측정된 초기응력 측정결과를 볼 때 연직응력은 일반적으로 암반의 단위중량에 심도를 곱한 값으로 추정할 수 있으나 수평응력은 일정한 상관성이 없어 현장 계측을 통해서만 신뢰성을 확보할 수 있었다. Hoek & Brown (1980)은 세계 각국의 계측자료를 정리하여 축압계수의 범위를 다음과 같이 정리하였다.

$$0.3 + \frac{100}{Z} < K < 0.5 + \frac{1500}{Z} \quad (1)$$

여기서 Z는 심도(m)이고 K는 축압계수이다. 식(1)에 의하면 축압계수는 지표부근의 천

부에서부터 수 km의 심부에 이르기까지 광범위한 분포를 나타내는데 천부의 암반에서는 일반적으로 그 값이 1이상이고 범위도 상당히 넓지만 심도가 깊어질수록 그 값이 0.3~0.5사이로 수렴한다. 그림 1(a)는 국내 학술지와 자원연구소 보고서에서 발췌한 국내 92개 지역의 축압계수를 도시한 것으로 이 중 1이하가 16.25%, 1이상 2이하가 60%, 2이상 3이하가 16.25%, 3이상이 7.5%이고 축압계수의 범위는 다음식과 같다.

$$0.08 + \frac{18}{Z} < K < 1.24 + \frac{153.48}{Z} \quad (2)$$

국내 지질보고서를 바탕으로 신선암과 풍화암의 경계를 국내 지반의 평균인 40m라 할 때, 그림 1(a)의 축압계수는 신선암과 풍화암에서의 축압계수로 구분할 수 있고 그림 1(b)

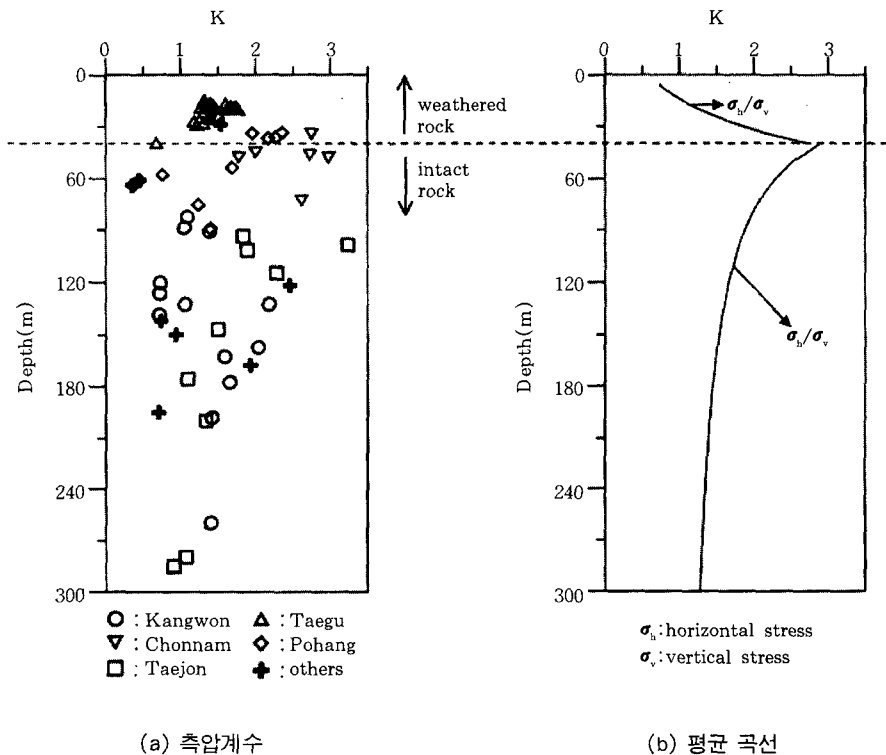


그림 1. 국내 각 지역의 축압계수의 평균 곡선

와 같이 적합곡선(curve fitting)을 통하여 다음의 두 식으로 표현된다.

$$\bar{K}_w = \left(\frac{38.65}{Z + 2.23} \right) e^{\frac{Z - 24.75}{13.69}} \quad (3)$$

$$\bar{K}_i = \frac{Z + 81.99}{Z + 2.23} \quad (4)$$

여기서 \bar{K}_w 는 풍화암의 측압계수, \bar{K}_i 는 신선암에서의 측압계수이다. 측압계수는 식(4)와 같이 지표면에 가까울수록 증가하는데 이는 지각 변동, 지질구조 등에 따라 초기응력 분포가 많은 영향을 받기 때문으로 생각되고 있다. 즉 암반에서의 측압계수는 암반의 풍화, 암반의 역사, 지체응력, 암반내의 불연속면 등에 따라 달라지며 지표면에서 가까울수록 증가하여 1 이상이 된다. 그러나 일반적으로 측압계수를 증가시키는 지각 천부에서의 잠재응력은 지표 풍화, 단층, 습곡 등의 요인에 의하여 해소되므로 풍화대로 추정되는 부분에서의 측압계수는 식(3)과 지표면에 근접할수록 감소하게 된다.

3. 지질작용

지각은 오랜 지질학적 시간을 통하여 지구

내부의 열 에너지에 기인한 지구 내적작용과 태양의 복사 에너지에 의한 지구 외적작용을 받는다. 이 중 지형을 변화시키는 침식과 퇴적 작용, 그리고 지각운동은 암반의 응력을 변화시키는 대표적인 지구 내적작용으로 측압계수의 변화에 지대한 영향을 미친다.

3.1. 침식 및 퇴적이 측압계수에 미치는 영향

그림 2는 침식 및 퇴적의 경우 지반에 작용하는 응력변화를 도시한 것이다. 그림 2(a)와 같이 침식에 의해 연직응력은 감소하지만 수평응력은 연직응력보다 작게 감소하므로 천부암반에서 측압계수는 증가한다. 이와 반대로 그림 2(b)와 같이 퇴적의 경우에는 수평응력의 증가에 비하여 연직응력의 증가가 더 크므로 천부암반의 측압계수는 감소한다.

아래의 그림과 같이 침식과 퇴적시의 응력 변화는 수평방향의 변형률이 0인 경계조건과 탄성체를 가정하여 결정할 수 있다. Goodman(1989)은 초기심도가 Z_0 , 침식심도가 ΔZ 일 때, 침식에 의한 수평응력과 연직응력의 변화를 다음과 같이 계산하였다.

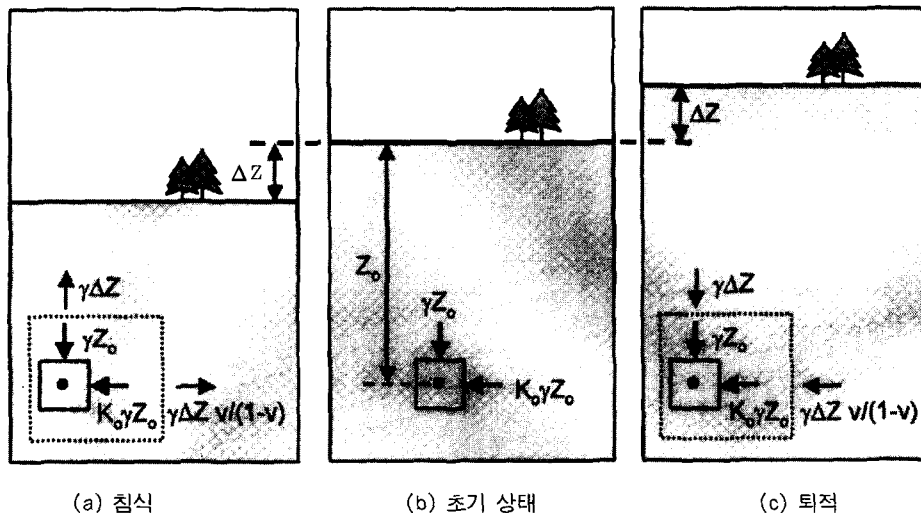


그림 2. 침식과 퇴적이 지중 응력에 미치는 영향

$$\begin{aligned}\sigma_h &= K_o \gamma Z_o - \gamma \Delta Z \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \\ \sigma_v &= \gamma Z_o - \gamma \Delta Z\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 K_o 는 초기 측압계수, ν 는 포아송비이다. 침식의 경우 심도 Z 는 $Z_o - \Delta Z$ 가 되어 수평응력과 연직응력의 비인 측압계수는 다음과 같이 계산된다.

$$K = K_o + \left[\left(K_o - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \Delta Z \right] \frac{1}{Z} \quad (6)$$

위의 식에서 포아송비, 초기 측압계수, 그리고 침식 심도가 증가할 수록 측압계수는 증가한다. 한편 퇴적의 경우, 지중 응력변화는 그림 2(c)와 같고 침식작용과는 반대로 퇴적시 상재하중의 증가로 인해 퇴적 후의 심도 Z 는 $Z_o + \Delta Z$ 가 되어 측압계수는 다음의 식으로 표현된다.

$$K = K_o - \left[\left(K_o - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \Delta Z \right] \frac{1}{Z} \quad (7)$$

이론적인 고찰을 바탕으로 유한요소 프로그램인 Pentagon 2D (Emerald Soft, 1997)를 이용하여 탄소성 유한요소해석을 실시하여 침식 및 퇴적이 측압계수에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그림 3은 모델의 경계조건 및 해석영역으로 총 252개의 요소와 831개의 절점으로 구성하였고, 모델의 해석영역은 폭 1000m, 심도 500 ± 50 m이다. 유한요소모델의 상부는 지표면으로 자유면 조건을 주었고 좌우는 연직변위를 허용하고 수평 변위를 구속하였으며 하부는 수평 변위를 허용하고 연직 변위를 고정하였다. 해석 모델이 정수압상태에 있다는 가정 하에 초기 측압계수는 1로 하였고 해석에

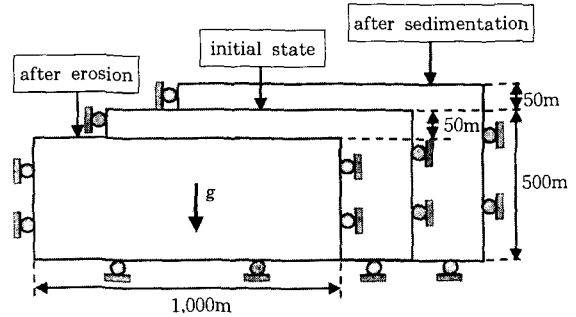


그림3. 침식과 퇴적의 해석에 사용된 모델

사용된 나머지 물성 입력치는 표 1과 같다.

그림 4와 그림 5는 침식 및 퇴적심도를 10m에서 50m까지 변화시켰을 때 이론해와 유한요소해석에 의한 측압계수의 변화로서 포아송비와 초기 측압계수가 심도에 무관하게 일정하다고 가정하였다. 침식의 경우 침식심도가 클수록 측압계수는 증가하고 심도가 깊어질수록 초기 측압계수에 근접하게 된다. 퇴적의 경우 침식과 반대로 퇴적의 정도가 클수록 측압계수는 감소한다.

이론식과 유한요소해석에 의하면 침식과 퇴적시 지각 천부압반에서 측압계수가 무한히 증가하거나 감소하는데 이러한 경향은 침식과 퇴적작용이 활발한 지역에서 압반이 다른 지질작용을 받지 않을 때 나타나게 된다. 그러나 압반은 오랜 지질학적 시간동안 침식, 퇴적, 풍화, 응기가 반복되므로 측압계수는 일정한 범위 내에 존재한다. 본 연구를 통해 침식과 퇴적은 비록 장시간에 걸쳐 일어나지만 측압계수에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 침식과 퇴적의 유한요소해석을 위한 입력 물성치

bulk modulus(GPa)	2	shear modulus(GPa)	1
unit weight(MN/m ³)	0.025	cohesion(MPa)	0.25
friction angle(°)	35	tensile strength(MPa)	0.25

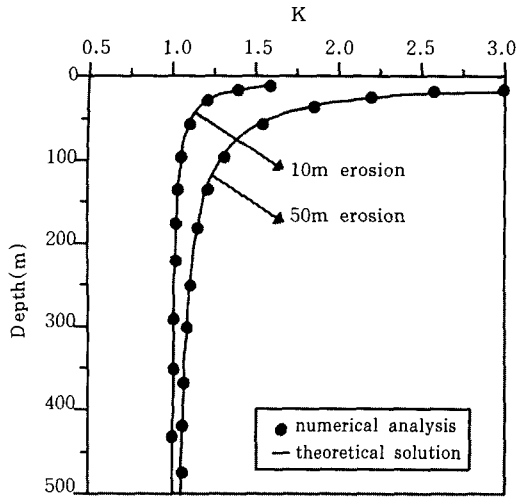


그림 4. 침식 심도에 따른 축압계수 변화

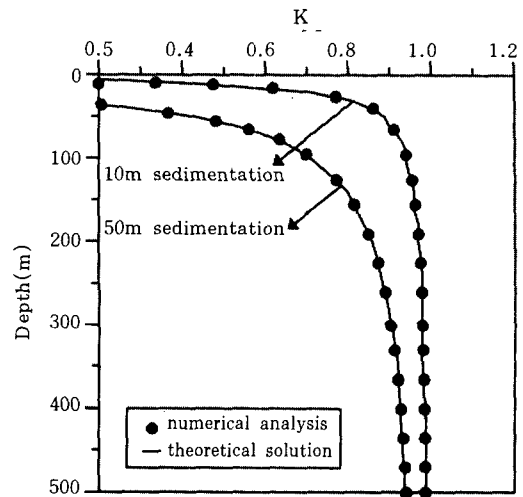


그림 5. 퇴적 심도에 따른 축압계수 변화

3.2. 풍화 및 횡압력이 축압계수에 미치는 영향

지각운동의 근원으로는 대륙판 및 해양판의 이동, 마그마 관입이나 화산활동 등을 들 수 있다. 이러한 지각운동은 지반에 횡압력을 증가시키고 응력상태가 낮은 지표부근의 지반을 파쇄하여 단층, 절리, 전단파쇄대 등을 발생시킨다. 이들 불연속면의 생성은 암반의 풍화작용을 촉진시킴으로써 암석의 결합강도(bonding strength)를 저하시키고 궁극적으로 암반의 응력 유지기능을 상실케 한다. 본 연구에서는 이러한 일련의 과정을 이론해와 유한요소해석을 통하여 분석하고자 하였다.

Timoshenko & Goodier(1982)에 의한 탄성 이론에서 응력해를 구하는 2차원 문제를 풀기 위해서는 평형 미분방정식의 해를 구해야 하고 그 해는 주어진 경계조건을 만족해야 한다. 일반적인 힘 평형방정식에서 물체력(body force) Y만이 작용하는 경우에 평형 미분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

상기의 응력 요소를 구하기 위하여 탄성변형을 고려하여야 하고 이는 세 변형률 요소로 표현되는 적합방정식으로 나타낼 수 있다. 이 적합방정식은 평면변형률 조건에서 Hooke의 법칙에 의한 변형률과 응력의 관계로 표현되며 물체력이 물체의 자중에 의해서만 발생할 때 다음과 같은 응력 요소들의 관계로 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\partial Y}{\partial y} \right) \quad (9)$$

이러한 2차원 문제의 해는 물체력이 없거나 상수일 때 미분 방정식의 합으로 나타낼 수 있다. 방정식의 해는 2차 Airy응력함수 ϕ 를 도입하여 풀 수 있는데, 물체력 Y가 $\rho g y$ 일 때 다음과 같은 세 가지 응력요소로 표현된다.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \rho g y, \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \rho g y, \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (10)$$

여기서 ρ 는 물체의 단위부피 당 체적, g 는 중력 가속도이다. 해석모델의 경계에 수직 방향의 압축력과 전단력이 작용하지 않고 수평의 압축력(c)이 작용한다고 할 때 수평방향 및 수

직방향의 응력은 식(11)과 같다. 이러한 탄성 모델에 등분포 하중이나 선형 증가하중이 작용할 때 탄성 이론식에 의한 수평응력과 연직응력은 일정한 기울기(ρg)를 가지고 심도에 따라 증가한다(단, 압축응력은 (-), 인장응력은 (+)).

$$(\sigma_x)^e = -c - \rho gy, (\sigma_y)^e = -\rho gy \quad (11)$$

지중의 암반은 삼축압축상태로 존재하는데, 지표면에 근접할수록 연직응력으로 생각되는 봉압이 감소하므로 최대하중 이후의 변형은 변형률 연화(strain softening)에 가까워지고 파괴 후 응력 전달의 기준이 되는 잔류응력도 감소한다. 또한 지표면에 근접할수록 풍화의 정도가 심해져서 암반내의 불연속면이 증가하는데, 이는 봉압의 감소와 더불어 암반의 강도를 저하시키는 요인이 된다. 소성이론은 이러한 일련의 작용에 의해 지중 응력의 전달 및 유지기능이 상실되었다고 가정할 때, 파괴기준을 적용하여 유도할 수 있다. 먼저, Mohr-Coulomb 파괴기준에서 수평방향의 응력이 최대 주응력일 때 소성영역에서의 파괴기준식은 다음과 같다(Hoek 등, 1995).

$$(\sigma'_x)^p = (\sigma_c)_r + k_r (\sigma'_y)^p \quad (12)$$

여기서 $(\sigma_c)_r$ 은 소성암반의 일축압축강도, k_r 은 소성암반에서 최대, 최소 주응력의 기울기, $(\sigma'_x)^p$, $(\sigma'_y)^p$ 는 소성범위내의 x 및 y 방향의 응력이다. 이 때 $(\sigma_c)_r$ 과 k_r 은 다음과 같다.

$$(\sigma_c)_r = \frac{2c'_r \cos \phi'_r}{1 - \sin \phi'_r}, k_r = \frac{1 + \sin \phi'_r}{1 - \sin \phi'_r} \quad (13)$$

여기서 c'_r 는 소성암반의 점착력, ϕ'_r 는 소성암반의 내부마찰각이다. 계측자료와 유한요소해석에서 검증된 바와 같이 탄성영역과 소성영역의 경계면에서 연직응력이 동일하다고 가정할 때 소성영역에서의 수평응력과 연직응력은 다음과 같다.

$$(\sigma'_x)^p = (\sigma_c)_r + k_r \rho gy, (\sigma'_y)^e = \rho gy \quad (14)$$

일반적으로 완전히 풍화가 진행되어 생성되는 토사의 측압계수는 1보다 작으므로 상기의 식들은 토사의 측압계수를 결정할 때 사용할 수 없고 Jaky, Brooker & Ireland가 제시한 다음의 식에서 유효 내부마찰각(ϕ')을 이용하여 구할 수 있다.(Das, 1990).

$$K = 1 - \sin \phi' \quad (15)$$

$$K = 0.95 - \sin \phi' \quad (16)$$

이론해를 바탕으로 그림 6과 같이 지표에서 심도 40m까지 물성이 표 2와 같이 선형으로 증가하는 모델에 횡압력이 작용하는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 탄소성 유한요소해석은 Pentagon 2D를 이용하였고 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하여 모델의 좌측 A-A'에서의 측압계수 변화를 분석하였다. 심도에 따른 횡압력의 선형 증가로 지표에서 횡압력이 1.2MN/m에서 2.4MN/m, 해석 최대심도에서 횡압력이 4.8MN/m에서 6MN/m으로 변하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 중, 이론해와 유사하게 소성대가 약 40m까지 발생하는 경우는 횡압력이 심도에 따라 2MN/m에서 5.6MN/m으로 증가하는 경우였다.

그림 7(a)와 그림 7(b)는 표 2와 같이 입력 물성치가 변할 때 이론해와 유한요소해석에 의한 측압계수 변화이다. 소성영역에서의 수평응력과 연직응력의 변화는 원형공동에서 소성영역 발생시 접선 및 법선 응력의 변화와 유사한 경향을 보인다. 즉 연직응력은 소성영역과 탄성영역에서 동일하게 증가하는 경향을 보였으

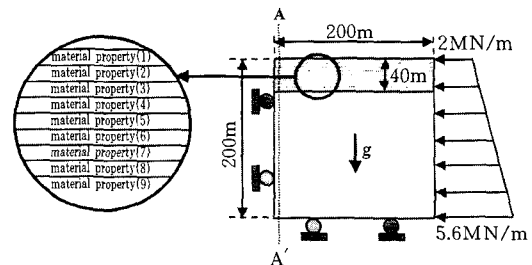
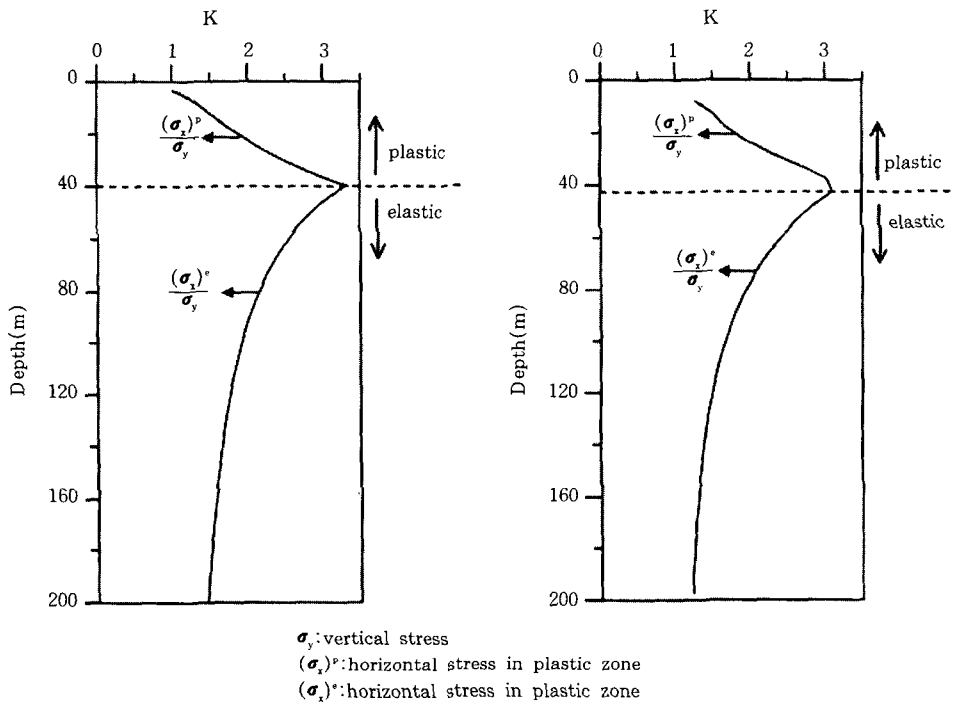


그림 6. 풍화와 횡압력의 영향 분석을 위한 모델

표 2. 풍화와 횡압력 분석을 위한 압력 물성치

depth(m)	theoretical analysis				finite element analysis			
	elastic			plastic	elastic			plastic
	0	~	40	40~200	layer 1	~	layer 8	layer 9
bulk modulus(GPa)	-			-	0.05	linear increase	0.444	0.5
shear modulus(GPa)	-			-	0.025		0.222	0.25
unit weight(MN/m ³)	0.02	linear increase	0.025	0.025	0.02		0.0244	0.025
cohesion(MPa)	0		0.1	0.1	0		0.087	0.1
friction angle(°)	0	30	30	30	0		26.25	30
tensile strength(MPa)	-			-	0		0.087	0.1
boundary force(MN/m)	-			2.3	2		2.72	2.72~5.6



(a) 이론해 결과

(b) 유한요소해석 결과

그림 7. 탄성영역과 소성영역에 가해진 횡압력에 의한 축압계수 변화

나 수평응력은 소성영역에서 탄성영역과 소성영역의 경계까지 증가하다 그 이후에는 증가폭이 둔화된다. 본 연구를 통하여 횡압력의 크기에 따라 축압계수가 민감하게 변화하며, 횡압

력에 의하여 암반에 내재된 응력은 단층이나 습곡에 의하여 해소되지 않는 한 암반내의 응력변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 인공지능망 전문가 시스템

전문가 시스템은 인공지능(artificial intelligence)의 응용분야 중의 하나로서 전문가가 가지고 있는 지식을 인위적으로 컴퓨터에게 부여하여 그 방면에 비전문가라 할지라도 전문가의 지식을 이용하여 원하는 결과를 얻는 일종의 자문형 컴퓨터 시스템이다. 전문가 시스템은 지식의 무한 복제 및 전달이 가능하므로 암반공학분야와 같은 특정 분야의 복잡한 문제를 해결할 수 있는 전문기술자의 사고능력 및 이에 대한 전문가의 지식을 모방, 구현함으로써 비전문 기술자가 소수의 전문 기술자만이 수행할 수 있는 업무를 수행할 수 있도록 도와준다. 또한 전문가 시스템의 일반적인 구성을 살펴보면 지식기반에 전문가의 지식을 저장하고 이 지식 기반을 바탕으로 추론된 결과를 관계형 데이터베이스에서 저장 및 가공하여 사용자가 원하는 형식을 사용하여 원하는 결과를 얻도록 구성되어 있다(배규진 등, 1998).

4.1. NESLEC의 구성

본 연구에서 개발된 측압계수 평가 전문가 시스템 NESLEC(Neural network Expert System for Lateral Earth pressure Coefficient)은 암반의 정성적 자료와 정량적 자료를 전산화하고 신경회로망 모델로 구현한 전문가 시스템이다. NESLEC은 역전파 학습 알고리즘을 채용한 다층 퍼셉트론에 해당되는데 통상 이러한 구조를 가진 신경망을 다층 역전파 신경망(multi-layer back-propagation neural network)이라 한다.

역전파 신경망은 그림 8과 같이 학습단계(learning phase)와 산출단계(production phase)로 구성된다. 먼저 학습단계에서는 입력 패턴과 목적패턴이 다수의 입출력 쌍으로 주어지고 이 입출력 쌍의 관계를 잘 표현해 주도록 연결 강도의 크기를 수정한다. 하나의 입력패턴에 대한 조정과정이 끝나면 새로운 입출력

쌍이 주어지고 같은 과정으로 학습을 반복함으로써 입출력간의 상관관계를 잘 묘사해줄 수 있는 연결강도를 구한다. 산출단계에서는 필요로 하는 결과에 대한 입력만 주어지면 이러한 상관관계에 의해서 출력이 계산된다(문현구, 1994).

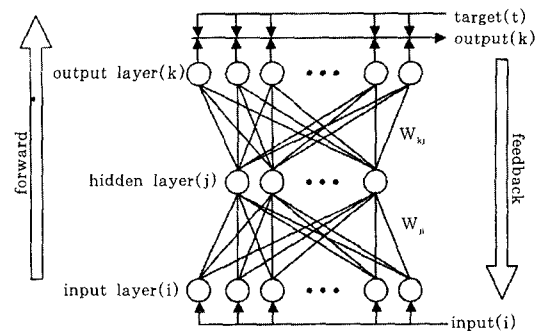


그림 8. 다층 역전파 신경망 구조

데이터 베이스 입력자료는 표 3과 같이 일반적인 현장계측에서 손쉽게 구할 수 있는 7가지 입력 노드와 3가지 출력 노드로 구분하였고 자원연구소 보고서와 국외자료(Lindner & Halpern, 1978)에서 수집된 95개의 자료를 86개의 학습자료와 9개의 테스트 자료로 구분하였다.

NESLEC은 그림 9와 같이 크게 현장계측 데이터 베이스 시스템, 인공지능망 시스템, 측압계수 평가 시스템으로 구성하였다. 현장계측 데이터 베이스 시스템은 계측자료 분석시스템과 연계하여 현장에서 수집되는 측압계수 관련 자료들을 관리, 분석, 활용할 수 있도록 하였다. 인공지능망 학습 시스템은 다양한 인공지능망 모델을 쉽게 설계하여 학습시킬 수 있도록 하였으며, 사용자가 학습추이를 가시적으로 볼 수 있도록 하였다. 측압계수 평가 시스템에서는 연직응력 및 수평응력을 추론하고, 이를 Sheorey(1994)의 이론식 및 계측자료의 평균인식(3) 및 식(4)와 비교하였다.

4.2. NESLEC의 검증

표 3. NESLEC의 입력 및 출력변수

input	local property	location	1. latitude, 2. longitude
		3. environment	(a) outcrop, (b) mine, (c) boring, (d) excavation
		4. lithology	(a) sedimentary rock, (b) igneous rock, (c) metamorphic rock
		5. method of measurement	(a) hydraulic fracturing, (b) stress relief, (c) stress compensation
	measuring technique and data	6. rock property	modulus of elasticity
		7. depth	measured depth
		1. vertical	measured or calculated value
output	stress	horizontal	2. maximum, 3. minimum

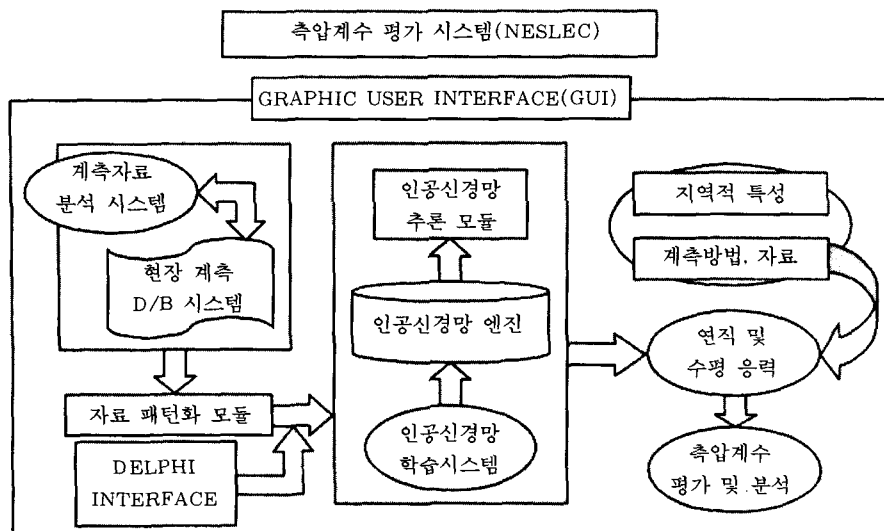


그림 9. NESLEC의 구성

인공신경망의 추론효과를 높이기 위하여 은닉층 수, 은닉층 노드수, 학습률, 모멘텀 상수 등 신경망 변수에 대한 적절한 설계가 요구된다. 일반적으로 은닉층이 단층인 경우에는 단순한 비선형 분리문제도 해결할 수 없는 단점이 있고 은닉층이 3개 이상인 경우에는 이론상 어떠한 형태의 패턴인식 영역도 형성할 수 있으나 학습시간과 학습횟수가 기하급수적으로 증가하여 불량한 신경망의 추론효과를 초래할

수도 있어(배규진 등, 1998) 본 연구에서는 은닉층의 수를 2개로 하였다.

학습률과 모멘텀 상수는 학습의 능률뿐만 아니라 신경망의 추론에 영향을 미치는데 학습률을 0.1에서 0.5, 모멘텀 상수를 0.5에서 0.9까지 변화시킨 결과, 수렴에 큰 영향을 미치지 못하였다. 따라서 학습률이 작을수록 학습이 성공적으로 이루어지므로 학습률을 0.1, 학습의 진동방지와 신속성을 위하여 모멘텀 상수를

0.9로 하고 은닉층의 노드수를 변화시키며 최적의 은닉층을 설계하였다.

학습조건으로는 하나의 패턴오차를 10^{-5} 로 가정하였을 때 86개 학습자료에 대한 패턴오차를 합한 시스템오차가 8.6×10^{-4} 일 때를 학습이 종료되는 시점으로 정하였다. 또한 학습 횟수가 10만회 이상이 될 때를 학습의 종료 시점으로 정하였다. 그림 10은 은닉층 노드수를 각각 7, 14, 28, 49로 증가시켰을 때 시스템 오차를 도시한 것이다.

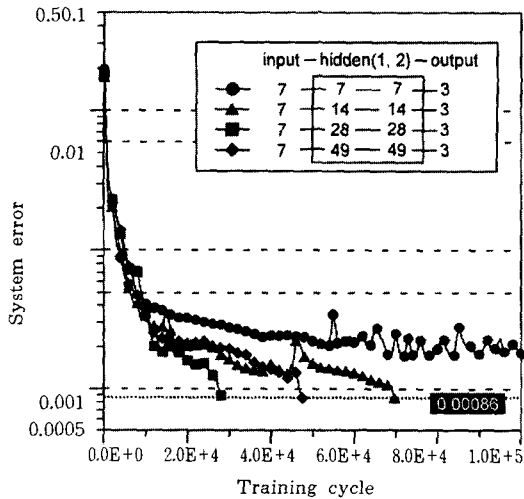


그림 10. 학습횟수의 증가에 따른 각 은닉층 구조의 시스템 오차 변화

은닉층의 노드수가 각각 7, 14, 28로 증가할수록 오차의 수렴정도는 빨라지고 학습능률도 높아진다. 하지만 은닉층의 노드수가 28개 이상으로 증가할수록 오차의 수렴정도는 느려지고 학습능률도 저조한 것으로 나타났다. 이와 같이 은닉층의 노드수가 일정량 이상으로 증가하면 학습의 효율이 저하되므로 학습의 능률을 고려하여 은닉층의 노드수를 각각 28개로 하였다.

실측값과 추론값의 관계는 상관관계분석(correlation analysis)을 통하여 표현할 수 있다. 상관관계분석은 연구하고자 하는 변수들

간의 관련성 여부와 그 정도를 분석하기 위해 사용하는 기법으로 두 변수간의 관련성을 표현하기 위하여 Pearson의 상관계수(r)가 사용된다. 실측값과 추론값을 각각 변수 X, Y 라 하고 두 변수의 평균을 각각 \bar{X}, \bar{Y} 라 하면 두 변수간의 선형관련정도를 나타내는 상관계수는 다음과 같이 계산된다.

$$r = \frac{\sum[(Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})]}{\sqrt{[\sum(Y_i - \bar{Y})^2][\sum(X_i - \bar{X})^2]}} \quad (17)$$

여기서 Pearson의 상관계수는 -1에서 1까지의 값을 지닌다. 두 변수간의 상관계수의 절대값이 1이면 완전한 상관관계, 0.9이상이면 매우 높은 상관관계, 0.7에서 0.8이면 상관관계가 높다고 말할 수 있으며, 0.5에서 0.6이면 보통의 상관관계 그리고 0.4이하이면 약한 상관관계가 있다고 할 수 있다(전충영 & 최이규, 1996). 그림 11은 3가지 출력 각각의 상관관계를 나타낸 것으로 추론에 의한 3가지 출력은 모두 0.996이상의 매우 높은 상관관계를 보였고 평균 추론오차는 14%였다.

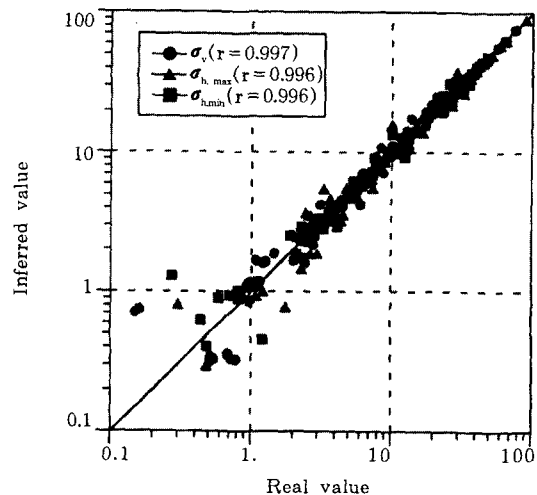


그림 11. NESLEC 학습자료의 실측값과 추론값 비교

4.3. NESLEC의 적용

본 연구에서 구축한 인공 신경망은 7개의 입력노드와 28개의 이중 은닉노드, 3개의 출력노드로 구성하였고 학습률과 모멘텀 상수는 각각 0.1과 0.9이다. NESLEC의 적용을 위하여 학습에서 제외한 9개의 지질 자료를 선정하고

이를 Sheorey(1994)의 이론식과 국내 지반의 계측자료 평균인 식(3) 및 식(4)와 비교하였다. 표 4는 추론된 응력값을 이용하여 연직응력에 대한 평균 수평응력의 비로 계산된 측압계수 및 그에 따른 오차율이다.

표 4. 시험자료의 적용 결과 비교

No.	measured K value	NESLEC		Sheorey		Eq.(3) & Eq.(4)	
		K value	error(%)	K value	error(%)	K value	error(%)
1	1.716	1.171	31.734	1.43	16.668	1.139	33.642
2	1.480	1.394	5.793	1.688	14.053	1.260	14.876
3	0.846	0.879	3.944	5.436	542.54	1.726	104.00
4	0.514	0.354	31.105	0.497	3.182	1.839	258.07
5	2.361	1.776	24.770	2.246	4.880	1.203	49.035
6	1.325	1.142	13.716	1.42	7.210	1.137	14.189
7	1.235	1.733	40.256	8.394	579.54	2.423	96.174
8	2.977	2.96	2.386	7.867	164.27	2.588	13.076
9	1.073	1.37	27.750	2.09	94.855	1.283	19.577

표 4에서 $x_1 \sim x_7$ 및 y 는 다음과 같다.

x_1 :latitude (°)

x_2 :longitude (°)

x_3 :measured environment:1. outcrop, 2. mine, 3. boring, 4. excavation

x_4 :lithology:1. sedimentary rock, 2. igneous rock, 3. metamorphic rock

x_5 :method of measurement:1. hydraulic fracturing, 2. stress relief, 3. stress compensation

x_6 :modulus of elasticity(GPa)

x_7 :measured depth(m)

y :lateral earth pressure coefficient

은닉층의 노드수에 따라 차이를 보였지만 학습능률이 우수한 은닉층 노드수 28개의 신경망 모델은 인공신경망에 의한 결과와 계측값과의 평균오차가 20%로서 Sheorey(1994)가

제안한 식의 평균오차 159%와 국내 지반의 계측자료 평균값인 식(3) 및 식(4)의 평균오차 67%에 비하여 낮은 오차를 보였다. 그림 12는 연직응력, 최대수평응력, 최소수평응력의 상관관계를 나타낸 것으로 추론에 의한 연직응력, 최대수평응력, 최소수평응력은 각각 상관계수 0.958, 0.952, 0.977의 매우 높은 상관관계를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 합리적인 측압계수의 산정에 있어 먼저 계측자료의 분석을 통하여 측압계수의 경향을 파악하고자 하였고 이론적인 연구와 유한요소해석을 통하여 측압계수 변화의 메카니즘을 구현하였으며 인공신경망을 통하여 측압계수 결정기준을 마련하고자 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

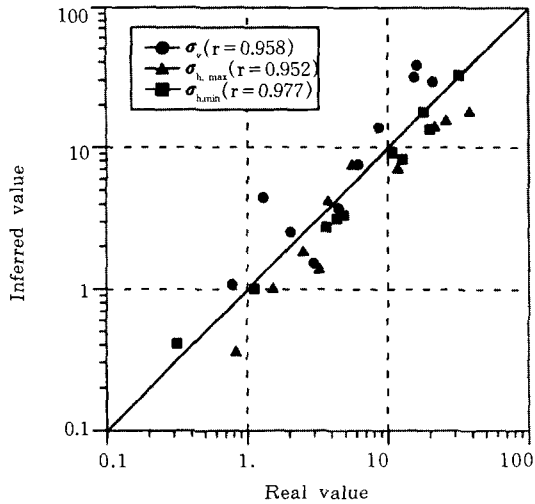


그림 12. NESLEC에 적용된 시험자료의 실측값과 추론 값 비교

국내에서 계측된 92개의 측압계수를 이용하여 심도에 따른 측압계수의 경향을 분석하였다. 이 자료를 풍화암과 신선암으로 나누었을 때 풍화암에서는 천부로 근접할수록 측압계수가 작아지고 신선암에서 천부로 근접할수록 측압계수가 커진다. 국내에서 계측된 92개의 측압계수 중 1이상이 약 84%로 대부분의 경우 수평응력이 연직응력보다 크게 나타남을 알 수 있었고, 일반적으로 전산해석에서 사용되는 0.5에서 1사이의 값은 과소하게 적용되고 있음을 알 수 있었다.

침식과 퇴적은 측압계수를 변화시키는 주요 요인으로, 침식의 경우 상부암반의 제거로 연직응력이 감소하고 측압계수는 증가한다. 이와 반대로 퇴적의 경우 상재하중의 증가로 연직응력이 증가하여 측압계수는 감소한다. 지반내의 횡압력은 지각이동, 화산의 분출과 관입 등의 지질운동에 의하여 발생하는데 이론해의 분석과 유한요소해석 결과, 암질이 저하된 지표천부의 풍화대에서는 응력의 전달기능이 저하되어 측압계수가 감소하였다.

본 연구를 통하여 여러 지질작용이 측압계

수에 미치는 영향을 알 수 있었고, 특히 지하 공동의 굴착 심도인 천부 암반에서 횡압력에 의한 측압계수 변화를 파악할 수 있었다.

인공신경망을 이용하여 다층 역전과 학습 알고리즘을 적용한 측압계수 예측 전문가 시스템을 개발하였다. 86개의 학습자료를 7개의 입력 노드와 3개의 출력노드로 구분하였고 최적의 신경망 모델을 구축하기 위하여 학습률, 모멘텀 상수 그리고 은닉층 노드수를 고려한 신경망변수 연구를 통하여 실측치와 상관계수 0.996 이상의 매우 높은 추론율을 보이는 모델을 선정하였다. 이 모델에 학습에서 제외된 9개의 계측자료를 적용한 결과, 평균 추론오차는 20%로서 Sheorey가 제시한 식의 평균오차 159%와 식(3) 및 식(4)에 의한 평균오차 67%에 비하여 훨씬 낮게 나타났으며, 따라서 본 연구에서 개발한 인공신경망은 측압계수의 추정에 있어 상대적으로 높은 신뢰성을 갖고 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 연구비(KOSEF-981-0403-013-2) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김수일, 배규진, 문홍득, 김창용, 이성원(1996), 터널, *지반공학 시리즈(7)*, 한국지반공학회, p. 663.
2. 문현구(1994), 불연속 암반내 굴착 및 보강설계를 위한 신경망 모델 개발, 한국과학재단, p. 85.
3. 배규진, 김창용, 신휴성, 홍성완(1998), *지하생활공간 개발요소기술 연구-지반굴착 기술분야(V)-*, 한국건설기술연구소, p. 274.
4. 전충영, 최이규(1996), *SPSSWIN을 이용한 통계분석*, 무역경영사, p. 474.
5. Amadei, B.(1996), "Importance of Anisotropic When Estimating and Measuring Insitu Stress

- in Rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol 33, No. 3, pp. 293~325.
6. Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.(1983), "Fundamentals of Rock Joint Deformation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol 20, No. 6, pp. 249~268.
 7. Das, B.M.(1990), *Principles of geotechnical engineering*, PWS-KENT, p. 665.
 8. Emerald Soft Consulting(1997), PENTAGON 2D(ver.97.02) Manual, Korea.
 9. Goodman, R.E.(1989), *Rock mechanics*, John Wiley & Sons, p. 562.
 10. Hoek, E. and Brown, E.T.(1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, p. 525.
 11. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.(1995), *Support of underground Excavations in Hard rock*, Balkema, p. 527.
 12. Lindner, E.N. and Halpern, J.A.(1978), "In-Situ Stress in North America : A Compilation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 183~203.
 13. Sheorey, P.R.(1994), "A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, No. 1, pp. 23~34.
 14. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.(1982), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, p. 567.
 15. Wittke, W.(1990), *Rock mechanics Theory and Application with Case Histories*, Springer-Verlag, p. 1075.

(접수일자 1998. 10. 31)