

지하수의 영향을 고려한 사면 해석 소프트웨어 개발

양형식^{1)*}, 하태욱, 김원범, 최미진, 이진행²⁾

Development of a Rock Slope Analysis Software Considering Ground Water Level

Hyung-Sik Yang, Tae-Wook Ha, Won-Beom Kim, Mi-Jin Choi and Jine-Haeng Lee

Abstract In this study, an artificial neural network was used to predict stability of weak rock slopes with various discontinuities and underground water conditions. Input data were provided by UDEC analyses on 108 cases of representative conditions of different slope heights, angles, discontinuity angles and water levels. The verification shows high correlation ($r^2=0.97$) between analyses and predictions. The program was able to predict safety factors with the same accuracy from unlearned data sets.

KeyWords ground water, rock slope, discontinuities, neural network

초 록 본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 다양한 불연속면과 지하수 조건 하에 있는 연약 암반사면의 안정성을 예측하였다. 입력 자료는 사면의 높이, 경사, 절리면 경사, 지하수위를 달리한 108가지 조건에 대한 UDEC 해석결과를 이용하였고, 이를 인공신경망에 학습시킨 후, 임의의 암반사면을 대상으로 검증 실시하였다. 검증 결과 높은 상관성($r^2=0.97$)을 보여주는 정확한 안전율이 예측되었으며 학습되지 않은 자료에 대해서도 같은 정도의 정확도로 안전율을 산정할 수 있었다.

핵심어 지하수, 암반사면, 불연속면, 인공신경망

1. 서 론

국토의 대부분이 산악지형인 우리나라의 경우 국토의 효율적인 개발을 위하여 도로, 댐, 항만, 터널 및 택지 조성 등 각종 시설물이 점차 증가하는 추세에 있다. 이러한 시설물을 건설하기 위해서는 암반의 절취가 불가피하며 굴착 후 남게 되는 암반 사면을 유지 관리하는 것은 매우 중요한 일이다.

일반적으로 사면의 안정성에 영향을 미치는 요소로는 암반 내 각종 지질학적인 요소, 사면의 기하학적인 형태, 지하수 및 발파 등에 의한 인자들이 있으며, 이 중 사면의 파괴활동 및 발생은 지하수위에 의하여 크게 영향을 받는다(Chowdhury, 1978).

특히 평소에는 안정했던 사면이 집중 호우 기간이나

그 직후에 불안정해지거나 붕괴되는 사례가 매년 수없이 보고·관찰되고 있으며, 우리나라에서도 매년 7~8월의 장마철이나 집중호우기만 되면 산사태나 사면붕괴가 발생하고 있는 실정이다.

이러한 암반사면의 안정성을 사전에 예측하고 유지·관리하기 위하여 여러 방법들이 연구되고 있다. 이 중 불연속면의 특성을 이용한 평사투영법과 역학적 해석법인 한계평형법 등이 주로 이용되고 있으나 정성적이고 국한적인 결과를 보여주는 한계점이 있다. 이에 최근에는 수치해석법을 이용한 안정성 평가방법들이 선호되고 있으나 입력 자료의 선정이나 해석 조건이 까다로운 문제점이 있어 전문적인 지식이 없는 경우에는 잘못된 결과로 유도될 수 있다. 따라서 신뢰성이 있으면서도 경제적이고 신속한 방법의 개발이 필요하다고 본다.

본 연구에서는 대표적인 암반사면 조건을 선정하여 개별요소 수치해석법의 하나인 UDEC(Universal Distinct Element Code, Itasca, 2004)을 통해 사면의 높이, 경사, 절리방향, 지하수위 변동에 따른 사면의 안

¹⁾ 정회원, 전남대학교 건설지환경공학부 교수

²⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일: 2005년 4월 30일

심사 완료일: 2005년 5월 27일

전율을 평가하였다. 획득한 결과는 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)의 학습 자료로 사용하였다. 이를 통해 수치해석법을 통한 안정성 평가에 앞서 평사투영법과 한계평형법과 더불어 개략적이고 신속한 1차 해석의 용도로 미지의 사면조건에 대한 안정성을 평가할 수 있는 사면 해석 소프트웨어 SSEP(Slope Stability Evaluation Program) 모듈을 개발하였다.

2. 해석 사면의 조건 선정

2.1 기하학적 및 지하수 조건

본 연구에서는 암반사면의 안정성을 평가하기 위한 조건으로 사면의 높이, 방향, 절리방향, 지하수위 조건들을 달리하여 수치해석을 통해 안전율을 산정하였고, 이를 인공신경망의 학습 자료로 사용하였다.

사면의 구조적인 변수인 사면 높이와 사면 경사는 국내에 분포하는 사면의 대표적인 값으로 선정하였다. Fig 1과 2는 2004년 건설기술연구원에서 발표한 우리나라 사면 중 사면의 높이와 경사의 분포율을 보여주고 있다(한국건설기술연구원, 2004). 위 자료에 의하면 사면 높이는 10 m~20 m의 높이가 45% 정도이고, 사면의 경사는 구성 지반 및 암반 조건에 따라 다양한 분포를 보이나 암반 사면의 경우에 있어서는 1:0.5~1:1.0의 경사가 45% 정도이다. 따라서 본 연구에서 사용된 사면의 높이 및 경사에 대한 변수는 높이 10, 15, 20 m의 세 가지 조건과 구배 1:0.5, 1:0.7, 1:1.0의 세 가지 조건을 적용하였다.

지하수위 적용에 있어서 한국도로공사의 지침에 의하면 암반사면에 대한 우기시의 안전율은 지하수위의 위치가 사면 높이의 절반인 조건에 대해서 검토를 하도록 되어 있다(한국도로공사, 2001). 하지만 최근의 집중 강우의 빈도 및 강우량은 평년의 통계치를 초과하고 있으며, 사면의 안전율 산정은 암반의 역학적 특성이 갖는 불확실성에 의해 안정적인 측면에 주안점을 두고 있는 것을 감안하여 본 연구에서는 지하수위가 지표와 동일한 경우까지 고려하였다. 본 연구에서 고려된 지하수위

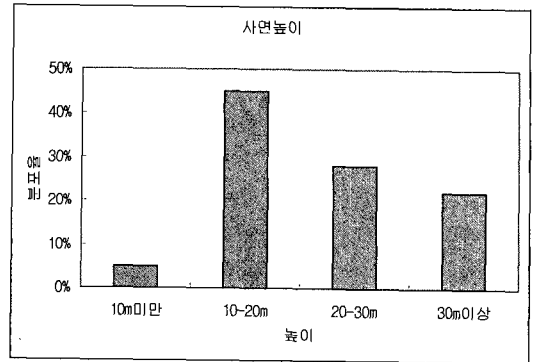


Fig. 1. Distribution of slope height

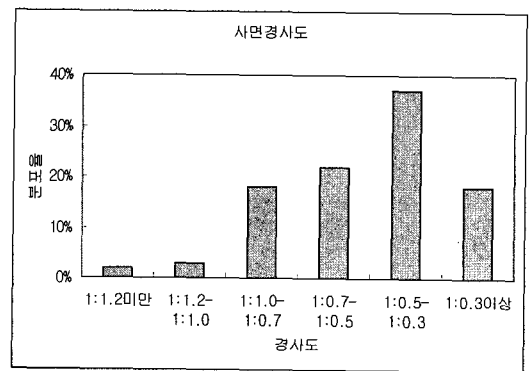


Fig. 2. Distribution of slope angle

의 조건은 지하수위의 위치가 사면의 바닥에 위치하는 경우와 한국도로공사의 설계 지침인 사면높이의 절반 높이에 지하수위가 위치하는 경우 그리고 지표면에 지하수위가 위치하는 경우의 세 가지를 고려하였다.

절리의 경사는 0°, 15°, 30°, 45°의 네 가지 경우를 대상으로 하였다. 이들 조건의 조합에 따라 총 108가지의 해석조건을 선정하였다.

Table 1은 본 해석에서 사용한 수치해석 조건들을 사면의 기하학적 조건과 지하수위 양상으로 나타내고 있다.

Table 1. Geometrical and ground water conditions of slope

slope height	10 m	15 m	20 m	
slope angle	1:1.0	1:0.7	1:0.5	
discontinuity angle	0°	15°	30°	45°
water level				

2.2 입력물성치 선정

암반은 RMR 30인 연암지반으로 암반과 절리의 입력 물성은 Table 2와 3과 같다. 암반의 단위중량은 2.6 tf/m^3 , 포아송비는 0.3으로 하였다.

해석에 사용된 입력물성의 결정과정은 다음과 같다. (한국암반공학회, 2005)

암반분류 값으로부터 암반의 변형계수(E_m)를 구하는 여러 경험식이 있으나 본 논문에서는 RMR이 50 이하이므로 Serafim의 식을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.

$$E_m = 10^{\frac{R-10}{40}} \text{ (GPa)} \tag{1}$$

암반의 일축압축강도(σ)는 RMR의 함수로 표현되는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma = 0.5 \exp(0.06 R) \text{ (MPa)} \tag{2}$$

암반의 일축압축강도는 무결암의 일축압축강도(σ_c)와 Hoek-Brown 파괴기준식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_c \sqrt{s} \text{ (MPa)} \tag{3}$$

Hoek-Brown 파괴조건계수(m, s)는 RMR에 따라 현지 암반 값으로 변환이 가능하기 때문에 이들을 이용한 암반의 Mohr-Coulomb 파괴조건계수 C_m 과 ϕ_m 은 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\phi_m = 2 \tan^{-1} \sqrt{k(\sigma_3)} - 90^\circ \tag{4}$$

$$C_m = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{k(\sigma_3)}}$$

여기서 $k(\sigma_3)$ 는 RMR의 함수로 나타난 m과 s의 함수들이다. 본 연구에서 암반 블록은 위의 식들에 의해 산정된 Mohr-Coulomb 탄소성모델로, 절리는 선형적 전단강도를 나타내는 Coulomb Slip Model(Itasca, 2004)을 적용하였다.

3. 수치해석을 이용한 안전율 산정

3.1 해석모델 조건

본 연구에서 인공신경망 학습을 위한 자료로 UDEC에서 산정된 안전율을 이용하였다. UDEC은 외연적 시간-진행 체계(explicit time-matching scheme)를 통해 불연속면의 거동과 암반 블록의 거동의 두 가지 형태가 동시에 고려가 가능하고, 불연속면의 변위뿐만 아니라 불연속면을 통해 암반 블록의 변형, 중첩, 회전 등의 거동을 평가할 수 있고, 불연속면의 비선형성(hyperbolic behavior)의 거동 평가가 가능하다. 또한 불연속면 상에 존재하는 접촉점들의 분리를 통해 암반 블록의 등 파괴시 발생하는 대변위 양상을 모사할 수 있는 장점이 있다. 2004년에는 암반 블록의 전단강도 뿐만 아니라 절리의 전단강도까지 고려하여 전단강도감소기법(shear strength reduction method)을 통해 안전율을 산정하는 기능이 추가되었다(Itasca, 2004).

Fig. 3은 해석에 사용된 2차원 모델이다. 절리의 방향성은 사면의 방향과 일치하는 일방향성의 절리군을 모사하여 암반사면에서 발생 가능한 암반 블록의 파괴뿐만 아니라 불연속면을 따라 발생할 수 있는 평면파괴 경향까지 함께 고려하였다. 절리군은 사면의 안정성에 가장 불리한 영향을 미칠 수 있는 조건으로 모든 절리는 연속적으로 연결되어 있는 것으로 가정되었으며, 그 간격은 50 cm로 구현하였다. 사용된 암반 블록과 불연속면의 구성 모델은 프로그램의 안전율 산정 기준에 부합하도록 Mohr-Coulomb 탄소성 모델과 Coulomb Slip

Table 2. Input data for physical properties of the rock mass

RMR	γ (tf/m^3)	ν	E (GPa)	σ_t (MPa)	C_m (MPa)	ϕ_m ($^\circ$)	m_i	m	s	σ (MPa)
30	2.6	0.3	3.16	7.54E-2	0.44	30	10	0.82	4.2E-4	3.02

Table 3. Input data for physical properties of the joints

σ_c (MPa)	JRC	JCS	C (tf/m^2)	ϕ_R ($^\circ$)	JKn (MPa/mm)	JKs (MPa/mm)
50	9.4	125.0	2.0	28.0	4.59	6.59

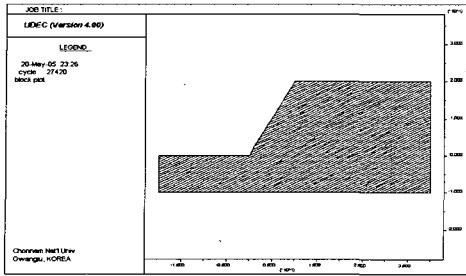


Fig 3. Typical configuration of slope geometry

모델을 각각 이용하였다. 변화되는 각 지하수위 아래 영역은 암반 및 절리가 완전 포화되었다고 가정하여, 블록 및 절리 모두에 간극수압을 분포하였다.

본 연구에서는 UDEC을 이용하여 사면의 기하학적인 조건과 절리방향, 지하수위를 달리하면서 전단강도감소 기법에 근거하여 안전율을 산정하였으며, 암반 블록과 절리의 전단강도가 함께 고려되었다(박과 유, 1998, Dawson 등, 1999). 파괴 후 암반 블록의 거동은 수반소성유동법칙(associated plastic flow law)에 의거하였다.

3.2 해석결과

Table 4는 사면의 높이, 경사, 절리방향, 지하수위에 따른 안전율 결과이다. 연구결과, 사면높이와 경사가 중

가할수록 안전율은 감소하며, 절리경사와 지하수위가 증가할수록 안전율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 사면경사와 절리경사가 최대일 때 안전율이 급격히 감소함을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 사면높이 15 m, 사면경사 1:0.5, 지하수위가 사면높이의 1/2인 경우의 절리각도에 따른 전단변형률의 크기 분포와 속도벡터를 나타내고 있다.

(a)에서 (d)로 절리의 경사는 증가하는 형태이며, 이때의 안전율과 파괴 양상 및 전단변형률을 나타낸 것이다. 절리의 경사각이 0°인 경우에는 절리에 따른 사면의 파괴보다 암반 블록의 포화에 따른 저항력의 감소로 파괴가 발생하는 양상을 확인할 수 있으며, 절리의 경사가 증가할수록, 불연속면의 강도 감소에 의해 절리에 의한 평면파괴 양상이 발생함을 알 수 있다.

4.인공신경망

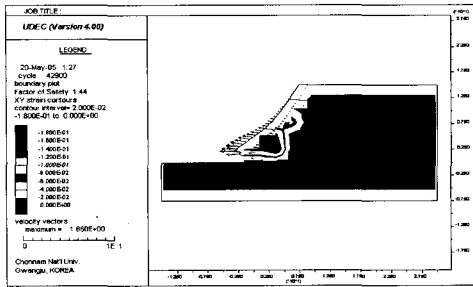
본 연구에 사용된 인공신경망은 오류 역전파 신경망으로서 활성화 함수인 sigmoid함수를 개량한 가속신경망이다. 그 원리와 적용에 대해서는 김과 양(1996)에 소개되어 있다.

4.1 인공신경망 학습

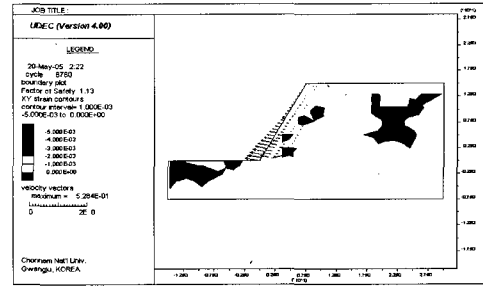
적용한 신경망은 오류 역전파 신경망으로써 입력층, 은닉층, 출력층을 가진 3층 역전파 신경망을 사용하였

Table 9. Results of UDEC analyses

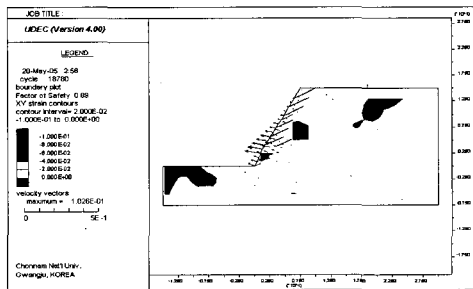
Model #	Slope height (m)	Slope angle (°)	Joint angle (°)	Water level	S.F.
1	10	63	0	0	6.73
2	10	63	0	0.5	1.82
3	10	63	0	1	0.97
4	10	63	15	0	2.62
5	10	63	15	0.5	1.62
∴	∴	∴	∴	∴	∴
50	15	57	0	0.5	1.62
51	15	57	0	1	0.96
52	15	57	15	0	2.39
53	15	57	15	0.5	1.26
54	15	57	15	1	0.73
55	15	57	30	0	1.28
∴	∴	∴	∴	∴	∴
104	20	45	30	0.5	1.13
105	20	45	30	1	0.66
106	20	45	45	0	1.29
107	20	45	45	0.5	1.04
108	20	45	45	1	0.82



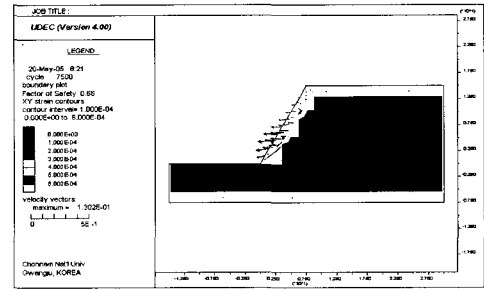
(a) joint angle of 0°(S.F.=1.44)



(b) joint angle of 15°(S.F.=1.13)



(c) joint angle of 30°(S.F.=0.89)



(d) joint angle of 45°(S.F.=0.66)

Fig. 4. Results of SF calculation with UDEC under variation of joint angle(slope height : 15m, slope grade 1:0.7 and water table position : half of slope height).

다. 각각의 입력패턴과 목적패턴은 각각 5개와 7개의 항목으로 구성되었다. 입력패턴은 각각의 항목에 실측 값을 0과 1사이의 소수값으로 변환하여 적용하였으며, 목적패턴은 입력패턴과 같은 패턴으로 구성하였다. 출력층은 사면의 안전율과 안전, 불안전의 적부 판정을 하기위해 2개의 항목으로 구성하였다.

각각의 학습주기는 하나의 입력패턴과 목적패턴이 신경망에 주어진 후, 학습알고리즘에 따라 패턴 오차를 구하여 출력패턴과 목적패턴의 차이를 줄이는 방법으로 학습이 진행되었다. 학습이 종료되는 시점은 패턴 오차의 합인 시스템 오차가 0.002에 도달할 때까지 5000회 단위로 학습을 수행한 후 종료하였다.

4.2 사면문제에 대한 검증

암반사면의 높이, 경사, 절리방향, 지하수위를 인공신경망에 적합한 0~1사이의 입력데이터로 변환한 후 이

를 데이터베이스화하고 학습과정을 수행하였다. 조사된 데이터의 각 패러미터는 최대, 최소, 중간 값을 기준으로 한계범위를 선정하였으며 변환된 108개의 데이터는 무차원 실수형으로 처리하였다.

Fig. 5는 암반사면 해석 프로그램 SSEP(Slope Stability Evaluation Program)의 한 모듈로서 개발된 인공신경망의 실행 모양이다. Fig. 6은 인공신경망의 학습진행 과정을 보여주고 있다.

학습이 완료된 후 학습에 적용하였던 108개의 사례 중 임의로 대상을 선정하여 안전율을 예측하였다. Fig. 7은 안정성 평가와 예측 결과의 회귀분석 결과이며, $r^2=0.973$ 의 높은 상관관계를 나타내었다. Fig. 8은 안정성 판정 결과이며 수치해석 결과와 인공신경망 해석의 결과가 정확하게 일치하는 것을 보여주고 있다.

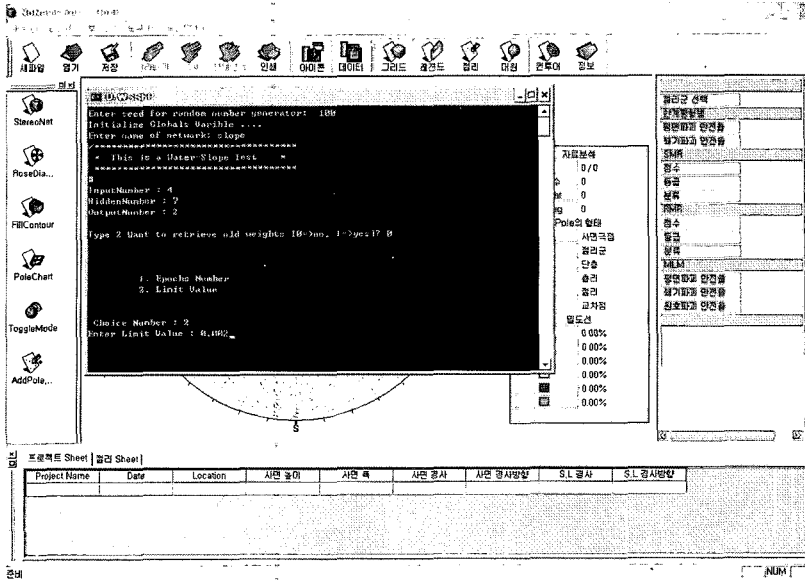


Fig. 5. Artificial neural network analysis in program

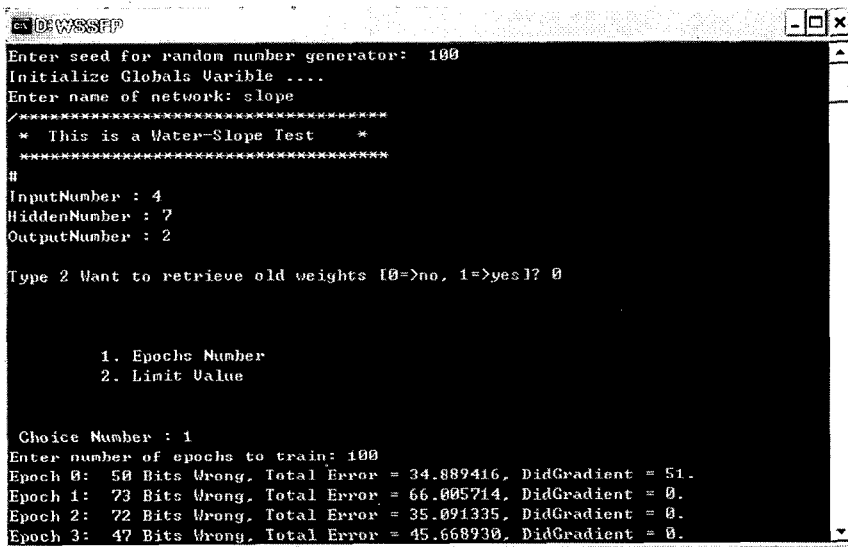


Fig. 6. Artificial neural network process

5. 프로그램 적용

본 절에서는 임의의 암반사면 조건을 대상으로 인공신경망을 이용한 안전율을 산정하였고 UDEC 해석 결과와 비교, 검증하였다.

Table 5는 적용한 사면조건이다.

Fig. 9~13은 수치해석 결과로서 각 조건에 따른 전단

변형률을 나타낸다.

Fig. 12와 13에서 평면파괴 거동을 보이고 있다.

Table 6은 5가지 해석조건을 인공신경망 입력변수로 변환한 것으로서 Table 5로부터 다음 식을 이용하여 산정하였다.

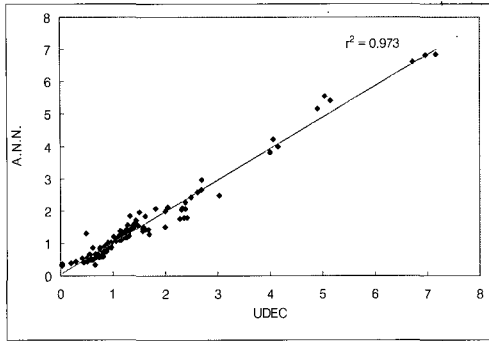


Fig. 7. Relationship between results of UDEC and artificial neural network ($r^2=0.973$)

$$x_0 = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

인공신경망을 적용하여 해석한 결과 값과 수치해석을 통해 획득한 안전율 값은 Table 7과 같으며 Fig. 14~15와 같이 학습 데이터에 대한 예측과 마찬가지로 높은 상관도와 안전/불안정성을 판정할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 지하수위와 사면의 기하학적 조건을 고려한 인공신경망 프로그램이 타당한 결과 값을 보여줌을 확인할 수 있었다. 따라서 한계평형법이나 평사투영법과 함께 1차적인 해석의 방법으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결론

본 연구에서는 암반사면의 기하학적 및 지하수 조건에 따른 안정성 문제를 인공신경망에 적용한 프로그램 모듈을 개발하였다. 2004년 한국건설기술연구원에서 발표한 자료를 근거로 암반사면의 108가지 조건을 산정하였고, 개별요소법(UDEC)을 이용하여 안정성을 평가한 후 이를 바탕으로 인공신경망에 학습과 해석을 실시하였다.

연구결과, 학습자료에 대한 안전율 값 예측은 수치해

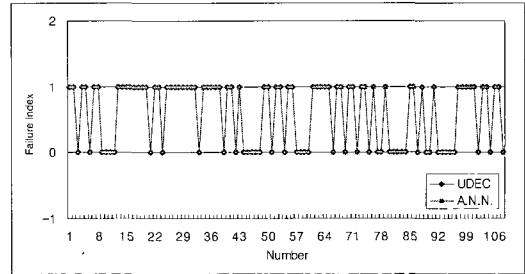


Fig. 8. Stable/unstable decision

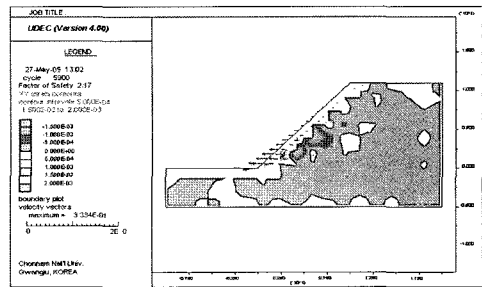


Fig. 9. Case 1 (S.F.=2.17)

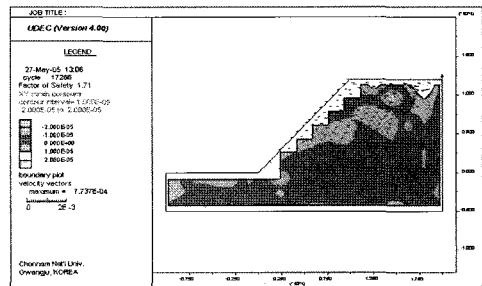


Fig. 10. Case 2 (S.F.=1.71)

Table 5. Analysis conditions (5 case)

Case #	Slope height (m)	Slope angle (°)	Joint angle (°)	Water level
1	11	48	10	0.5
2	12	50	20	0.5
3	14	54	25	0.5
4	16	58	35	0.5
5	18	61	40	0.5

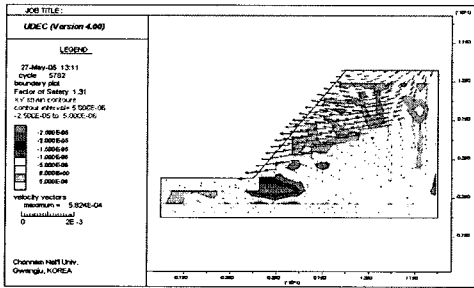


Fig. 11. Case 3 (S.F.=1.31)

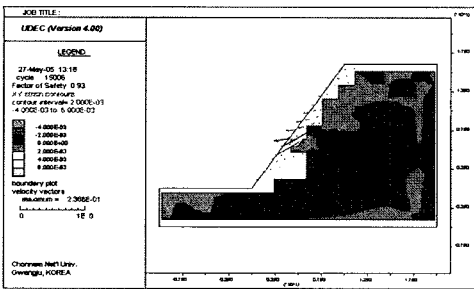


Fig. 12. Case 4 (S.F.=0.93)

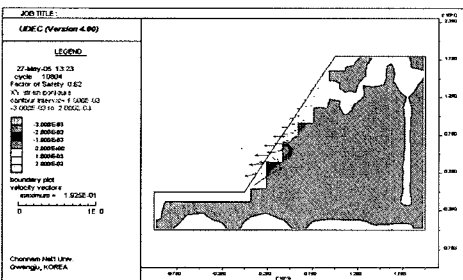


Fig. 13. Case 5 (S.F.=0.62)

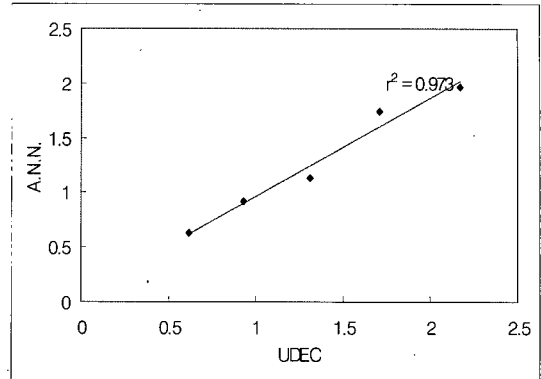


Fig. 14. Relationship between analysis and predictions ($r^2 = 0.973$)

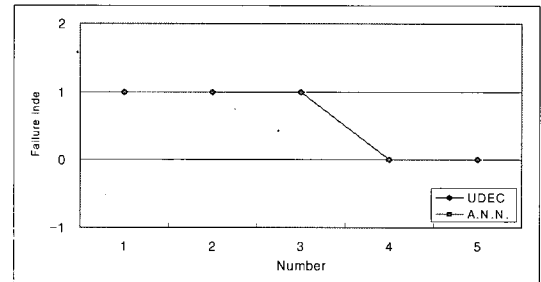


Fig. 15. Stable/unstable prediction

석 결과값과 $r^2 = 0.97$ 이상의 높은 상관도를 보여주었으며, 안전/불안정 적부판정 결과는 100 %의 정확도를 보여주었다. 또 학습하지 않은 자료에 대한 적용 결과도 동등한 정도의 정밀도로 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 (주)베이스 소프트웨어가 참여한 산학협동재단의 연구 과제 “지하수의 영향을 고려한 사면 해석 소프트웨어 개발” 지원으로 이루어졌으며 도움을 준 회사

Table 6. Artificial neural network input data conversion of numerical analysis data

Case#	Slope height (m)	Slope angle (°)	Joint angle (°)	Water level
1	0.1	0.2	0.2	0.5
2	0.2	0.3	0.4	0.5
3	0.4	0.5	0.6	0.5
4	0.6	0.7	0.8	0.5
5	0.8	0.9	0.9	0.5

Table 7. Comparison of safety factors by UDEC and artificial neural network

Case #	Safety Factor		Failure	
	UDEC	A.N.N.	UDEC	A.N.N.
1	2.17	1.97	yes	yes
2	1.71	1.74	yes	yes
3	1.31	1.13	yes	yes
4	0.93	0.92	no	no
5	0.62	0.63	no	no

와 재단의 관계자들에게 감사드립니다. 문헌자료의 수집과 토의를 함께 한 대학원생 정주환, 김용곤 군에게도 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남수, 양형식, 1996, 가속신경망에 의한 암반물성의 추정, 터널과 지하공간 6.4, 316-325.
2. 박연준, 유광호, 1998, 편재절리모델을 이용한 절리 암반사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간 8.4, 287-295.
3. 한국건설기술연구원 홈페이지, 2004, www.kict.re.kr/institute/project_total_original.asp, 도로철토사면 유지관리시스템 개발 및 운용.
4. 한국도로공사, 2001, 도로공사설계실무편람.
5. 한국암반공학회, 2005, 암반공학 수치해석, 건설정보사, 15-20.
6. Chowdhury, R.N., 1978, Slope Analysis, Elsevier Scientific Publishing Company.
7. Dawson, E.M., W.H. Roth and A. Drescher, 1999, Slope Stability Analysis by strength reduction, Geotechnique, 49.6, 835-840.
8. Itasca, 2004, UDEC(Universal Distinct Element Code) User's Manual 3. 117-120.

양 형 식



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과
학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

하 태 욱



2000 전남대학교 공과대학 자원공학과
학사
2003 전남대학교 대학원 지구시스템공
학과 석사

E-amil htw8646@yahoo.co.kr
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공
학과 박사과정

김 원 범



2002 전남대학교 공과대학 자원공학과
학사
2004 전남대학교 대학원 지구시스템공학
과 석사

E-amil hp96042345@nate.com
현재 전남대학교 공과대학 조교, 박사과정

최 미 진



2003 조선대학교 공과대학 자원공학과
학사
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공
학과 석사

E-amil wangle@hanmail.net
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공
학과 박사과정

이 진 행



2005 전남대학교 공과대학 자원공학과
학사

E-amil snail0@hanmail.net
현재 베이스스 소프트 사원
전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석
사과정