

인공신경망을 이용한 지하채광 확정선의 혼입 예측과 분석 사례연구

장형두, 양형식*

A Case Study of Prediction and Analysis of Unplanned Dilution in an Underground Stopping Mine using Artificial Neural Network

Hyongdoo Jang, Hyung-Sik Yang*

Abstract Stopping method has been acknowledged as one of the typical metalliferous underground mining methods. Notwithstanding with the popularity of the method, the majority of stopping mines are suffering from excessive unplanned dilution which often becomes as the main cause of mine closure. Thus a reliable unplanned dilution management system is imperatively needed. In this study, reliable unplanned dilution prediction system is introduced by adopting artificial neural network (ANN) based on data investigated from one underground stopping mine in Western Australia. In addition, contributions of input parameters were analysed by connection weight algorithm (CWA). To validate the reliability of the proposed ANN, correlation coefficient (R) was calculated in the training and test stage which shown relatively high correlation of 0.9641 in training and 0.7933 in test stage. As results of CWA application, BHL (Length of blast hole) and SFJ (Safety factor of Joint orientation) show comparatively high contribution of 18.78% and 19.77% which imply that these are somewhat critical influential parameter of unplanned dilution.

Key words Stopping method, Unplanned dilution, Artificial neural network, Connection weight algorithm

초 록 스톱핑 채광법은 현재 가장 보편적으로 이용되고 있는 지하 금속광 채광법 중 하나이다. 그러나 채광과정에서 발생하는 확정선의 혼입은 광산 전반의 생산성을 떨어뜨리며 때때로 폐광의 주요 원인을 제공하기도 하여 그 예측과 관리가 시급한 실정이다. 이를 위해 본 연구는 서 호주의 한 지하광산에서 조사한 자료를 바탕으로 인공 신경망(ANN)을 이용하여 보다 신뢰성 있는 확정선의 혼입 예측모델을 제시하였다. 또한, 연결가중 알고리즘(CWA)에 의한 요인분석을 통해 확정선의 혼입의 영향인자에 대한 기여도 분석을 실시하였다. 제안된 확정선의 혼입 예측 ANN 모델의 학습과 시험 단계의 상관계수는 0.9641과 0.7933으로 강한 상관관계를 보였으며, CWA분석결과 발파공 길이(BHL)과 절리 방향 안전계수(SFJ)의 기여도가 18.78% 와 17.99%로 다른 인자에 비해 비교적 중요한 영향인자임을 확인할 수 있었다.

핵심어 스톱핑 채광법, 확정선 외 혼입, 인공신경망, 연결가중 알고리즘

1. 서 론

지하채광의 목적은 인력과 장비의 안전을 확보하며

Received: Jul. 24, 2014

Revised: Aug. 11, 2014

Accepted: Aug. 11, 2014

***Corresponding Author:** Hyung-Sik Yang

(Tel) +82625301724, (Fax) +82625301729

E-Mail) hsyang@jnu.ac.kr

Energy & Mineral Resources Engineering, Chonnam National University, Yongsong-ro 77, Gwangju 500-757, Korea

광산의 경제성을 극대화하는데 있다. 이러한 목적은 최근 급속도로 발전한 광산 관련 기계기술과 컴퓨터 기술의 향상에 따른 광산 설계 최적화 기술 발달에 힘입어 과거에 비해 눈부시게 향상되었으며, 이에 따라 지하채광은 점점 대형화, 자동화되고 있다. 이러한 추세에 힘입어, 지하금속광의 경우 많은 채광법 중 여러 종류의 스톱핑 채광법이 보편화되고 있다. 스톱핑 채광법은 대형화 및 자동화가 용이하며, 광체의 형상이나 주변 지질의 변화에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 방법을 총칭하는 것으로, 중단채광법(sublevel stopping), 충전식

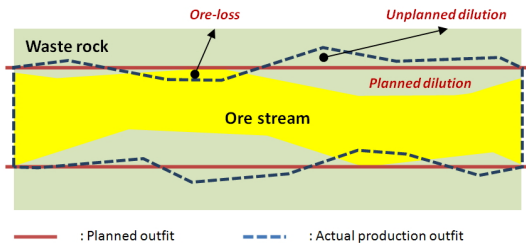


Fig. 1. Schematic view of ore dilution and loss

채광법(cut and fill stoping), 개방식채광법(open stoping), 장공채광법(long-hole stoping) 등이 이에 속한다. 스토핑 채광법의 중요성은 여러 연구결과에서도 확인할 수 있는데, Pakalnis et al.(1996)의 연구결과에 따르면 Canada의 지하 금속광 총 생산량 중 51%가 스토핑 채광법에 의지하고 있으며, 이러한 추세는 지금까지 계속되고 있다. 최근 호주에서의 한 연구결과에 따르면 70%가 넘는 지하금속광산이 스토핑 채광법을 채택하고 있는 것으로 밝혀졌으며(Austrade, 2013) 특히 호주의 대표적인 대형 금속광산의 경우 8곳 중 7곳이 중단, 개방식, 장공 채광법 등의 스토핑 채광법을 채택하고 있다.

이렇듯 보편화된 스토핑 채광법에 의한 채광 시 가장 큰 문제점은 폐석 혼입(dilution)이다. 폐석 혼입은 저품위 광석이나 광체 주변의 폐석에 의한 광체의 오염을 말하는 것으로 확정선 내(planned, 일차 primary 또는 내부internal), 확정선 외(unplanned, 2차 secondary 또는 외부) 폐석혼입과 광체 미회수(ore-loss)로 대별된다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 확정선 내 혼입(planned dilution)과 광체 미회수(ore-loss)는 확정광량(ore reserve)에 포함된 저품위 광석 및 폐석과 광석을 일컫는 것임에 반해 확정선의 혼입(unplanned dilution)은 확정광량에 포함되지 않은 것들을 말한다. 특히 채광과정에서 발생하는 확정선의 혼입, 즉 과굴(overbreak)은 생산 광체의 품위를 떨어뜨림과 동시에 생산과정 전반에 불필요한 작업이 부가되며, 생산 이후의 선광 등 광산과정 전반에 매우 부정적인 영향을 미치는 것으로 때때로 폐광의 주된 이유가 되기도 한다. 확정선의 혼입의 중요성은 항상 대두되어 왔지만 아직도 대부분의 스토핑 채광방식을 채택한 광산은 극심한 확정선의 혼입에 노출되어 있다. 이러한 확정선의 혼입의 제어를 위해 많은 방법들이 제안되어 왔지만 현실적 대안이 되고 있지 못하며, 여전히 과거의 비슷한 채광기록의 검토나 경험에 많은 광산 전문가에 의지하고 있다.

이 연구에서는 인공신경망(artificial neural network)을 이용하여 장공채광이 이루어지는 서호주의 한 지하

금광에서 발생하는 확정선의 혼입을 예측하는 시스템을 구축하였으며, 연결가중법(connection weights approach, CWA)를 통해 확정선의 혼입에 영향을 주는 인자들에 관한 분석을 실시하였다.

2. 대표적인 확정선의 혼입 관리 시스템

천공발파법은 현재까지 가장 경제적인 채광법으로 알려져 있다. 하지만 이 방식에 의한 채광 시 확정선의 혼입은 피할 수 없는 손실로 여겨지며 또한 복잡한 발생 기구로 인해 예측 불가능한 것으로 인식되고 있다. 이러한 확정선의 혼입의 관리를 위해 여러 경험적 방법이 개발되었으며, 그 중 안전도해법(stability graph method, Mathews et al., 1981; Potvin, 1988, 선우춘, 정용복 2005)이 가장 널리 적용되고 있는 방법이다.

안전도해법은 수리반경(hydraulic radius: 채광장 벽면의 면적/둘레)에 따른 안전계수(stability number, N)를 도출한 것으로 채광장 벽면의 안정상태를 판단하는 방법으로써, 이해가 쉽고 현장에서 적용이 용이한 장점이 있다. 여기서 안전계수 N은 Potvin(1988)에 의해 수정되었으며 다음과 같이 정의된다.

$$N' = Q' \times A \times B \times C \quad (1)$$

여기서 N'는 수정된 안전계수, Q'는 수정된 Q 치(Barton, 1974)를 의미하며 A, B와 C는 각각 응력, 절리 방향(joint orientation)과 중력 계수(gravity factor)를 뜻한다.

안전도해법은 많은 학자들에 의한 수정과정을 거쳐 현재에 이르렀다. Nickson(1992)은 케이블 볼트(cable bolt)의 효과를 도입시켰으며, Clark(1998)은 새로운 인자인 ELOS(equivalent linear overbreak/slough)를 이용한 채굴적 설계 방법을 개발하였다. 중력 계수 C는 Hadji-georgiou et al.(1995)와 Clark and Pakalnis(1997)에 의해 수정되었으며, Suorineni et al.(1999)는 단층에 관련된 인자를 제안하였다. Fig. 2는 Nickson(1992)이 제안한 안전도해법을 조사대상 광산에 적용한 예를 보여준다.

안전도해법을 적용하는 대부분의 지하 금속광산에서, 채굴적 설계 시 자료점이 안전영역(stable zone)에 위치하도록 기본설계를 변경함으로써 채굴적 벽면의 안정성을 피하게 된다. 하지만 Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 대부분의 자료들이 지보 전이영역(supported transition zone)을 기점으로 안전영역에 위치하면서도 과도한 과굴을 나타냄을 확인할 수 있다.

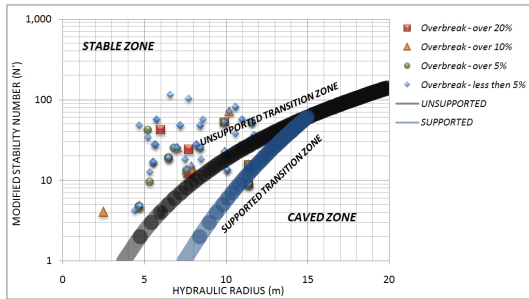


Fig. 2. Application of stability graph method at the investigated mine with 91 datasets

안전도해법의 단점 또한 많은 연구자들에 의해 지적 되어 왔다. Martin et al.(1999)은 채굴적의 경사에 따른 원거리 응력의 변화가 다루어지지 않았음을 지적하였으며, Potvin and Hadjigeorgiou(2001)는 이 방법이 암 반돌출(rock burst)과 같은 현상에 적용하기 부적당하다고 보고하였다. 또한, 채굴 순서에 따른 응력의 변화, 발파와 관련된 요소 및 채굴적 벽면의 노출시간 등 많은 부분이 고려되지 않았음을 알 수 있다. 이는 안전도해법만으로는 확정선의 혼입의 관리나 제어에 어려움을 따른다는 반증으로 볼 수 있다. 그러나 현재 안전도해법 외에 현장에 적용 가능한 대안이 없기 때문에 적절한 관리시스템의 구축이 시급한 실정이다.

3. 자료조사 및 분석

확정선의 혼입 관리 시스템은 적절한 예측시스템의 구축으로부터 그 해답을 찾을 수 있으며, 이를 위해서는 가능한 모든 영향인자에 대한 조사가 필요하다. 본 연구는 장공채광법을 채택하고 있는 서호주의 한 지하 금광을 대상으로 지질학적, 발파설계 및 채굴적 설계에 관한 15개의 영향인자에 대한 조사를 실시하여 총 101개의 자료 점을 확보하였다. 확정선의 혼입 예측시스템에 사용된 15개의 영향인자에 대한 정보는 Table 1에 정리되어 있다.

지질학적 영향인자 중 SFJ(절리 방향 안전인자, safety factor of joint orientation)는 각각의 채굴적 벽면에 대한 안정성을 평사투영(stereographic projection)을 통해 0.00(안전)부터 1.00(위험)로 정량화시킨 것으로 Lim and Yang(2004)의 연구를 기반으로 조사된 것이다. 확정선의 혼입의 평가는 계획된 채굴적 입체 모델과 굴착 후 공동감지시스템(cavity monitoring system, CMS)을 통해 얻어진 체적을 비교하여 정량적으로 얻어졌다. 또한 지질학적, 발파설계 및 채굴적 설계에 관한 영향인자들은 채광장 설계도, 지질 및 역학조사서와 채광장 연결 개발도(stope reconciliation) 등의 현장 광산 자료에 의해 조사되었다. CMS에 의한 확정선의 혼입 평가 및 영향인자 조사자료에 관한 예가 Fig. 3a와 b에 도시되어 있다.

Table 1. Details of fifteen unplanned dilution causative factors

Category	Abbreviation	Note	Range of data
Geological factor (6)	SFJ	Safety factor of Joint orientation - stereograph method	0.10 ~ 0.90
	AQ	Adjusted Q-value	5.00 ~ 27.00
	ASGM	Rock stress factor (A) - stability graph method	0.20 ~ 1.00
	BSGM	Joint orientation factor (B) - stability graph method	0.20 ~ 0.95
	CSGM	Gravity adjustment factor (C) -stability graph method	0.20 ~ 9.00
	K	Average horizontal to vertical stress ratio -K	1.74 ~ 2.19
Blasting factor (5)	BHL	Length of blast hole (m)	3.80 ~ 25.00
	DHW	Dip between blast hole and stope wall (°)	0.00 ~ 122.00
	PF	Powder factor (kg/tonne)	0.15 ~ 0.69
	SBR	Ratio between toe space and ring burden	0.57 ~ 1.60
	ED	Density of explosive (g/cm ³)	0.91 ~ 1.00
Stope design factor (4)	HR	Hydraulic radius- stability graph method	2.50 ~ 11.74
	TPT	Total planned tonne of stope (tonne)	1456 ~ 53130
	VR	Void ratio of stope - volume of void per TPT (%)	12.80 ~ 300.00
	APR	Aspect ratio (width/height)	0.47 ~ 4.17
Unplanned dilution		Percentage of unplanned dilution per TPT (%)	0.00 ~ 45.00

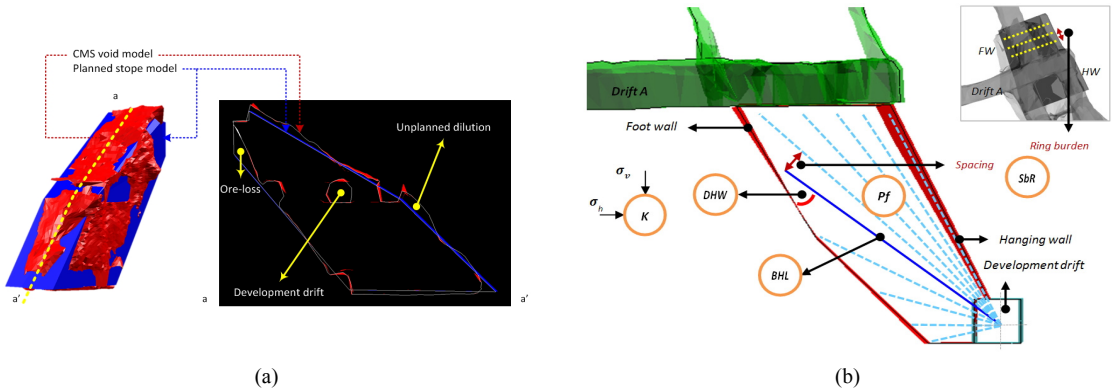


Fig. 3. Overview of some of data collection on slope

현장조사를 통해 얻어진 다변량 자료의 신뢰수준을 향상하기 위하여 이상치(outlier)에 대한 조사가 카이 제곱 검증(χ^2 plot method)를 통해 실시되었다. Garrett (1989)에 의해 제안된 이 방법은, 정규분포된 p 개의 독립변수를 가진 다변량 자료는 p -자유도를 가진 카이제곱 분포(χ_p^2)를 따른다는 통계적 공리를 전제로 한 것으로 신뢰할 수 있는 다변량 자료의 이상값 조사방법으로 인식되고 있다. Garrett의 카이 제곱 검증의 적용을 위해서 Mahalanobis distance(MD)의 계산이 선행되어야 한다(Mahalanobis, 1936). Euclidean distance와 달리, MD는 자료의 공분산을 고려한 거리측정방법으로써 p -차원의 다변량 자료 $x_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 에 대해 다음과 같이 계산된다.

$$MD_i = ((x_i - t)^T C^{-1}(x_i - t))^{1/2} \quad (2)$$

여기에서, t 와 C 는 각각 독립변수의 평균값벡터 및 공분산벡터를 나타낸다. 이로써 101 자료점을 갖는 15개 변수의 χ_{15}^2 는 다음의 Fig. 4와 같이 도시되며, 자료점

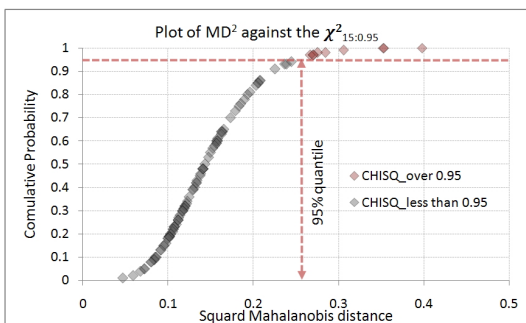


Fig. 4. Plot of MD^2 against χ_{15}^2 for 101 datasets

중 최상위 5%(10 자료점)의 값은 통계적 이상치로 봐도 무방하다.

10개의 이상치가 제외된 후 확정선의 혼입의 선형회귀분석모델의 결정계수(R^2)값이 0.411로 이상치를 포함한 모델($R^2 = 0.311$)에 비해 데이터의 신뢰성이 향상되었음을 알 수 있다.

4. 확정선의 혼입 예측 인공지능 모델링

인공지능시스템(ANN: artificial neural network)은 병렬처리추론이 가능한 일종의 기계 학습 모델로서 그 기능이 인간의 뇌와 유사한 것을 말한다. ANN model은 입력, 은닉과 출력층으로 구성되고 각 층에 위치된 최적화된 수의 계산점(computational node: artificial neuron)들은 인접 층의 계산점들과 산술적 가중치로 연결된다. Fig. 5에는 본 연구에서 사용된 ANN의 구성을

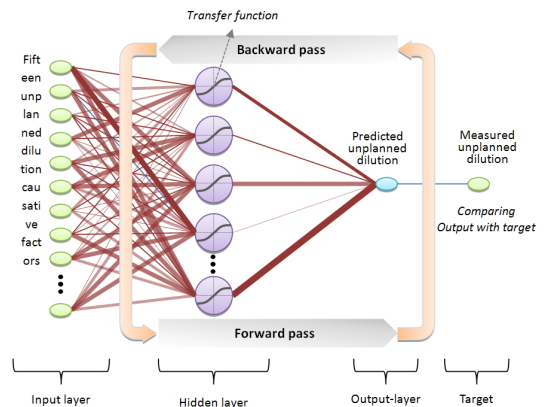


Fig. 5. Configuration of proposed unplanned dilution prediction ANN model

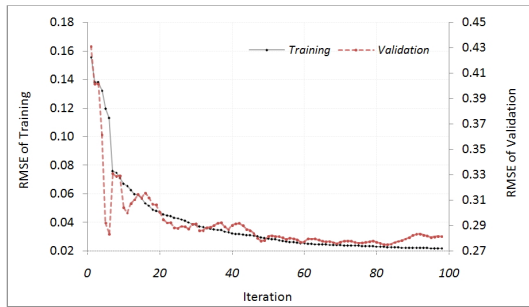


Fig. 6. Variation of root mean square error in training and validation process

보여준다.

ANN의 학습은 반복적인 forward와 backward 처리를 통해 모델에 최적화된 연결강도를 구하는 것이다. 입력층의 각 뉴런을 통해 입력된 데이터는 다음 층과 연결된 가중치(connection weight)와 은닉 및 출력 뉴런에 삽입된 전달함수(transfer function)를 이용한 순방향 처리를 통해 확정선의 혼입을 예측하게 된다. 역방향 처리에서는 순방향처리에서 예측된 값과 실측값의 오차를 최소화시키기 위하여 정해진 학습알고리즘을 통해 기존의 연결가중치를 갱신하게 된다. 본 연구에서는 많은 종류의 인공지능시스템 학습알고리즘 중 결합 경사도 알고리즘(conjugate gradient algorithm, CGA) (Hestenes & Stiefel, 1952)을 이용하여 확정선의 혼입 예측 모델을 구현하였다. CGA는 기존의 steepest decent, Gauss-Newton(Osborne, 1992) 및 Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963)에 비해 비교적 신속하면서도 안정적인 것으로 알려져 있다.

이상치 제거를 통해 얻은 91개의 자료점은 ANN의 학습을 위하여 0.60, 0.25와 0.15의 비율로 학습, 검증과 시험 데이터군으로 무작위 분리되었다. 학습 데이터군은 ANN의 학습에 이용되며 검증 데이터군은 각 반복의 유효수준의 검사에 사용된다. 학습이 종료된 후 최적화된 ANN 모델은 학습에 사용되지 않은 시험 데이터군을 통해 일반화 유무를 판단할 수 있다. 본 연구에서 제안된 ANN 모델은 100회의 반복학습이 이루어졌으며 Fig. 6는 학습 중 계산된 학습 및 검증과정의 표준편차(root mean square error, RMSE)의 변화를 보여준다.

Fig. 6에서 학습과 검증 과정의 RMSE는 시작 후 20 반복까지 급속하게 감소한다. 이후 100 반복까지 점진적으로 감소하여 최종적으로 0.021 및 0.275의 값을 보인다. 학습과정이 종료된 후 최적화된 모델의 유의성은 예측된 확정선의 혼입과 실측된 확정선의 혼입의 비교

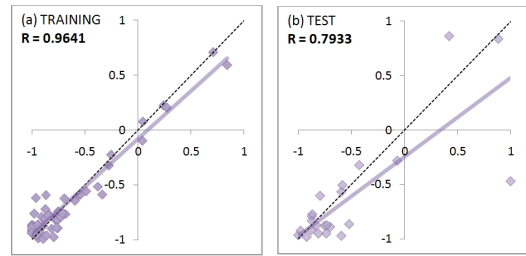


Fig. 7. Correlation test of training and test stage of the proposed ANN model

로 알아볼 수 있으며, Fig. 7에 보이는 것과 같이 학습과 시험 단계의 상관계수 R은 0.9641과 0.7966으로 강한 상관관계를 보였다.

5. 확정선의 혼입 요인 분석

발파에 의해 암반에서 발생하는 확정선의 혼입은 매우 복잡한 발생기구를 가지고 있다. 채굴적 주변의 암석역학 및 지질공학적 특징은 물론 발파설계 및 채굴적 설계 등 거의 모든 인자의 영향을 받는다고 할 수 있으며, 또한 발생인자들끼리의 복합적인 역학관계를 고려할 때 정확한 확정선의 혼입 발생기구의 연구는 많은 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 극복하고자, 본 연구에서는 최적화된 확정선의 혼입 예측 ANN 모델을 기반으로 채택된 15개의 확정선의 혼입영향인자의 기여도에 대한 분석이 시도되었다.

최적화된 ANN모델의 연결강도를 기반으로 한 입력-출력 기여도 분석에는 Olden and Jackson(2002)이 개발한 연결가중치법(connection weight approach, CWA)을 통해 실시되었다. CWA는 각 입력(독립변수)의 출력(종속변수)에 대한 기여도를 ANN의 모델 내부의 연결된 강도의 곱으로 나타낸 것이다. 한 예로, 입력(i)의 출력(k_1)에 대한 기여도(I_{i,k_1})는 다음과 같은 구해진다.

$$I_{i,k_1} = \sum_{j=1}^m w_{j,i} w_{k_1,j} \quad (3)$$

여기서 i, j, k 와 m 은 입력, 은닉, 출력과 은닉 뉴런의 갯수를 뜻한다.

CWA로 분석된 15개의 입력에 대한 출력, 즉 확정선의 혼입에 대한 기여도는 Fig. 8에 도시되어 있다.

총 15개의 확정선의 혼입 발생 영향인자 중 BHL, DHW, AQ, CSGM 및 APR은 음의 상관관계를 나타내었으며, 그 중 BHL은 18.78%로 가장 큰 기여도를 보였다. SFJ와 HR 또한 17.99%와 11.77%의 비교적 큰

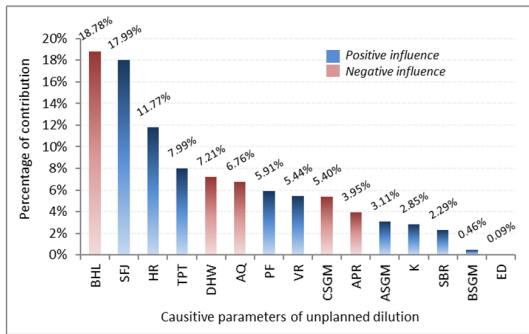


Fig. 8. Contribution of fifteen inputs on unplanned dilution for the optimized ANN model

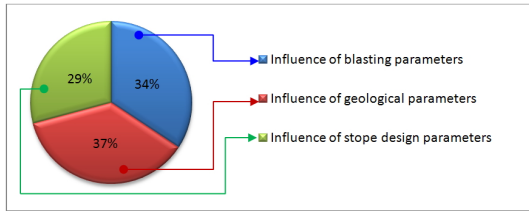


Fig. 9. Parameter contribution analysis based on three main categories

양의 기여도를 갖은 것으로 분석되었다. TPT, PF 및 VR은 7.99%, 5.91% 및 5.44%의 양의 기여도를 보였으며, DHW, AQ와 CSGM은 7.21%, 6.76% 과 5.40%의 음의 기여도를 나타내었다. 그 이외의 영향인자, 즉 APR, ASGM, K, SBR, BSGM 그리고 ED는 4.00% 이하의 비교적 낮은 기여도를 갖는 것으로 분석되었다.

CWA 결과를 바탕으로, 확정선의 혼입의 영향인자 범주별 분석 또한 실시되어 Fig. 9에 도시되어 있다.

Fig. 9에서 지질학적, 발파 및 채광 설계 카테고리에는 각각 37%, 34% 및 29%의 기여도를 보인다. 이 결과로써 확정선의 혼입은 채광장 설계인자보다 채굴적 주변의 지질학적 인자 및 발파설계인자에 더 영향을 받는 것으로 판단된다. 지질학적 인자는 불변의 조건임을 감안할 때, 확정선의 혼입의 제어는 지질학적 인자를 고려한 발파설계의 변경으로 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

스토핑 채광법은 현재 가장 대표적인 지하금속 채광 방법으로 그 적용 빈도가 계속 증가하는 추세이다. 스토핑 채광법의 적용 시 가장 중요한 제어요소는 채광 시 발생하는 확정선의 혼입으로 이는 광산 전반의 생산성에 큰 영향을 미치며 때때로 폐광의 결정적인 요인으

로 작용하기도 한다. 현재 스토핑 채광법을 채택한 대부분의 광산은 안전도해법을 통해 확정선의 혼입의 예측 및 제어를 시도하고 있지만 이러한 시스템의 신뢰성 및 예측능력은 매우 낮은 것으로 보고되고 있다. 본 연구는 이러한 확정선의 혼입의 제어 시스템 구상의 일환으로서 호주의 한 지하광산에서 조사한 자료를 바탕으로 인공 신경망(ANN)을 이용한 확정선의 혼입 예측 시스템을 개발하였다.

확정선의 혼입의 복잡한 발생기구를 최대한 구현하기 위하여 지질학적, 발파설계 및 채굴적 설계에 관한 15개의 영향인자를 ANN에 적용하였으며, 그 결과 학습과 시험 단계에서 각각 0.9641과 0.7933의 비교적 강한 상관계수(correlation coefficient: R)를 얻었다. 기존의 안전도해법의 낮은 신뢰성을 감안한다면 이러한 결과는 ANN을 이용한 혼입 제어 시스템의 가능성을 보여준 것이다.

영향인자의 확정선의 혼입에 대한 기여도 분석은 CWA를 통해 실시되었으며, 그 결과 BHL과 SFJ가 18.78%와 17.99%로 다른 인자에 비해 비교적 큰 기여도를 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 기여도 분석의 결과는 현장의 채굴적 설계 시 참고자료로 반영될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Austrade, 2013, *Underground Mining*. GPO Box 5301, Sydney NSW: Commonwealth of Australia, 32p.
2. Barton, N., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6.4, 189.
3. Clark, L. and R. Pakalnis, 1997, *An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hanging walls and footwalls*. Paper presented at the Presentation at 99th Canadian Institute of Mining annual conference, Vancouver, BC.
4. Clark, L. M., 1998, Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting. M.Sc. thesis, University of British Columbia, Vancouver, 357p.
5. Garrett, R. G., 1989, The chi-square plot: a tool for multivariate outlier recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 32.1-3, 319-341.
6. Hadjigeorgiou, J., J. Leclair and Y. Potvin, 1995, An update of the stability graph method for open stope design. *CIM Rock Mechanics and Strata Control session, Halifax, Nova Scotia*, 14-18.
7. Hestenes, M. R. and E. Stiefel, 1952, Methods of conjugate gradients for solving linear systems: J. of Research of the National Bureau of Standards, 49.6, 409-436.
8. Levenberg, K., 1944, A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*,

- 2, 164-168.
9. Lim, S.S. and H.S. Yang, 2004, An analysis of plane failure of rock slopes by quantified stereographic projection, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41.3, 505.
 10. Mahalanobis, P. C., 1936, On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences (Calcutta)*, 2, 49-55.
 11. Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 11.2, 431-441.
 12. Martin, C., D. Tannant, S. Yazici and P. Kaiser, 1999, *Stress path and instability around mine openings*. Proc. 9th, ISRM Congress on Rock Mechanics, 1-5.
 13. Mathews, K., E. Hoek, D. Wyllie and S. Stewart, 1981, Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock. *CANMET DSS Serial No: 0sQ80-00081*, Ottawa.
 14. Nickson, S. D., 1992, *Cable support guidelines for underground hard rock mine operations*. University of British Columbia M.Sc. thesis, University of British Columbia, 239p.
 15. Olden, J. D. and D. A. Jackson, 2002, Illuminating the "black box": a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. *Ecological modelling*, 154.1, 135-150.
 16. Osborne, M. R., 1992, Fisher's method of scoring. *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, 99-117.
 17. Pakalnis, R., R. Poulin and J. Hadjigeorgiou, 1996, *Quantifying the cost of dilution in underground mines*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.
 18. Potvin, Y. and J. Hadjigeorgiou, 2001, The stability graph method for open-stope design. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 8307 Shaffer Parkway, Littleton, CO 80127, USA, 2001.*, 513-520.
 19. Potvin, Y., 1988, Empirical open stope design in Canada.
 20. Sunwoo C, Jung Y.B., 2005, Stability Assessment of Underground Limestone Mine Openings by Stability Graph Method, *Tunnel & Underground Space* 15(5): 369-377.
 21. Suorineni, F., D. Tannant and P. Kaiser, 1999, Fault factor for the stability graph method of open-stope design. *Trans. IMM A-Mining Industry*, 108, A92-A104.

장형두



2003 목포대학교물리학과학사
2011 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: Hyongdoo.jang@Curtin.edu.au;
hyongdoo.jang@gmail.com
현재 호주커턴대학 (Department of Mining and Metallurgy Engineering, Western Australian School of Mines, Curtin University) 박사과정

양형식



서울대학교 대학원 자원공학과 박사

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