

## 여굴저항도를 이용한 터널 발파 여굴 관리 시스템

Tunnel Overbreak Management System Using Overbreak Resistance Factor

장형두<sup>1)</sup>\*

Hyongdoo Jang

**초록:** 터널 발파의 최외곽에서 발생할 수 있는 과대 여굴은 작업자 및 장비의 안전에 저해되며 슛크리트 등 지보량의 증가로 공사 비용이 증가시키는 주요 원인이다. 이러한 여굴은 화약 에너지와 암반의 특성 간의 복잡한 발생 메커니즘으로 인해 완벽한 제어가 매우 어렵다. 본 연구는 여굴 발생의 중요한 원인인 암반의 공학적 특성 중 무지보 막장 상태, 단축압축강도, 풍화도 및 불연속면의 특성(빈도, 상태 및 불연속면과 최외곽선과의 각도) 등과 발생한 여굴의 깊이와의 관계를 feed-forward 인공신경망을 통해 분석하였다. 이를 통해 얻어진 각 인자의 가중치를 기초로 여굴저항도(Overbreak Resistance Factor: ORF)를 개발하였다. 더불어 여굴저항도를 이용한 터널 발파 여굴 관리 시스템을 제안한다.

**핵심어:** 터널, 발파, 굴착, 여굴, 여굴저항도

**Abstract:** When tunnel is excavated via drilling and blasting, the excessive overbreak is the primary cause of personal or equipment safety hazards and increasing the cost of the tunnel operation owing to additional ground supports such as shotcrete. The practical management of overbreak is extremely difficult due to the complex causative mechanism of it. The study examines the relationship between rock mass characteristics (unsupported face condition, uniaxial compressive strength, face weathering and alteration, discontinuities- frequency, condition and angle between discontinuities and tunnel contour) and the depth of overbreak through using feed-forward artificial neuron networks. Then, Overbreak Resistance Factor (ORF) has been developed based on the weights of rock mass parameters to the overbreak phenomenon. Also, a new concept of tunnel overbreak management system using ORF has been suggested.

**Keywords:** tunnel, blasting, excavation, overbreak, overbreak resistance factor

### 1 서론

천공-발파 공법을 통한 터널 굴착은 기계식 굴착과 비교해 비교적 빠르고 경제적인 방법으로 세계적으로 널리 적용되는 방법이다. 발파공법을 적용하는 터널 시공은 대상 암반의 지질학적, 지형학적, 및 암반 공학적 특성을 모두 고려하여 설계되며 그 평가는 설계 대비 굴진장, 여굴과 미굴의 정도, 암반의 파쇄도, 버력의 형태로 판단할 수 있다. 암반 파쇄도와 버력의 형태는 좁은 공간에서 적재 및 2 차적 파분쇄 비용에 관련된 평가 인자이다. 노천의 계단식 발파에 비해 높은 비천공장과 비장약량이 사용되는 터널 발파의 특성상 상차작업에 지장을 줄 만한 크기의 대굴 발생의 빈도는 낮다고 할 수 있으나 넓게 분산된 버력이나 비산에 의한 피해를 줄이기 위한 대책이 필요하다. 굴진장은 대상 암반의 지질 공학적 특성과 터널 발파설계 및 심발의 성공 유무와 깊은 관련이 있다.

<sup>1)</sup> Western Australian School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, WA, Australia

\* 교신저자: Hyongdoo.jang@curtin.edu.au

부적절한 심발공 설계, 심발공의 불폭 및 여폭은 확대공 저항선을 단계적으로 증가시키며 발생하는 공 하부 응력집중(전열공의 불폭으로 뒷열 발파공들의 저항선이 설계 정항선보다 길어지며 공 하부에 응력이 점차 집중되는 현상)으로 굴진장이 줄어들게 된다.

터널 발파시 최외곽에서 발생하는 여굴과 미굴은 가장 기본적인 터널 발파 평가 인자로서 공사의 효율성뿐만 아니라 안전성에도 큰 영향을 미친다(Jang et al., 2016). 과도한 여굴은 낙석에 의한 안전사고 위험의 증가, 국부적 응력집중으로 인한 암반 아치 효과 감소로 인한 굴착 터널의 전체적 안정성 감소, 슛크리트 타설 등의 지보량 증가로 인한 공사 지연 및 공사비 증가로 이어진다. 미굴의 경우 통상 브레이커 등을 이용한 기계식 처리공정의 추가로 처리되지만 극심한 미굴의 경우 발파 공정을 반복하여 제거하게 된다. 이러한 공정의 추가는 당연히 공사 지연 및 공사비 증가로 이어진다.

여굴과 미굴은 발파를 적용한 터널 굴착에서 피할 수 없는 현상으로 이들의 원인은 크게 발파 설계 및 시공할 때 발생할 수 있는 오류와 대상 암반의 지질 공학적 특성으로 대별할 수 있다. 이 중 발파설계 및 시공상의 오류에 기인한 영향 인자들은 조정 가능한 것으로 발파공학적 지식과 컴퓨터 제어시스템을 활용한 자동천공기술 등으로 극복이 가능한 것들이다. 예를 들어, 최외곽공에 적용할 수 있는 여러 가지 조절발파 기법에 기초한 발파설계, 디커플링 효과를 극대화하며 외곽공간 인장균열 발생에 필요한 적절한 에너지를 발생시키는 조절발파 전용 폭약, 기폭 초시 오차를 최소화시킬 수 있는 전자뇌관, 천공의 오차를 최소화하는 자동 천공 시스템 등을 적용한다면 발파설계 및 시공상 오류로 기인하는 여굴과 미굴의 발생을 최소화할 수 있다.

Fig. 1. Various over and under-break phenomenon at a tunnel operation in Gumi, Korea

발파를 통한 터널 시공 시 발생하는 여굴과 미굴의 관리함에 있어 가장 큰 어려움은 조절 불가능한, 즉 주어진 대상 암반의 지질 공학적 특성과 발파로 발생하는 충격압력과 폭발적인 가스압에 대한 복잡한 암반 파괴특성이다. 특히 암반의 자체적인 지지력이 부족한 풍화암 또는 불량한 암반의 경우 지질 공학적 특성에 기인한 여굴 및 미굴 발생은 피할 수 없다. 예를 들어 Fig. 1은 경북 구미의 한 터널 시공 현장에서 발생한 전형적인 여굴 및 미굴 발생을 보여준다. 본 터널의 총연장이 275m로 비교적 짧은 터널임에도 불구하고 백악기 퇴적암-주로 석회질 사암-과 쳐트가 수평하게 교차되며 짧은 구간마다 매우 다른 풍화도를 보인다. Fig. 1-(a)의 경우 비교적 양호한 암반에서 매끈한 천반의 외곽공 발파 결과이며 Fig. 1-(c)와 (d)는 다수의 불연속면이 포함된 불량한 암반에 기인한 전형적인 여굴 현상을 보여준다. Fig. 1-(b)는 시공상 오류로 판단되는 천반 외곽공 불발에 기인한 미굴 현상이며 Fig. 1-(e)는 강관 다단 그라우팅이 시공된 구간에 발파 시공 오류로 발생한 미굴현상을 보여준다. 이는 암반 개량 전 불량한 암반을 기준으로 설계된 발파를 그라우팅 시공으로 개량된 암반에 그대로 적용하며 발생한 것으로, 기존 불량한 암반을 기준으로 설계된 전열공이 최외곽공과 전열공 사이의 암반을 충분한 파쇄하지 못하고 개량된 암반에 천공된 외곽공 또한 공들 간 충분한 응력집중을 발현시키지 못해 공발을 일으키거나 전열공 방향의 국부적 균열 및 파쇄대로 에너지가 유실되어 발생한 것으로 판단된다.

여굴저항도(overbreak resistance factor: ORF)는 터널 시공 시 발생할 수 있는 여굴의 가장 주요한 원인인 암반의 지질학적 인자들과 여굴/미굴 발생의 관계를 규명하여 개발된 발파지수(blastability index)이다. 본 연구는 Jang et al. (2019)에 의해 제안된 ORF 를 소개하고 여굴저항도의 현장 적용이 용이하게 하기 위해 개발된 여굴 저항도표를 제공하며 이를 이용한 터널 발파 여굴 관리 시스템을 제안한다.

## 2 터널 발파 여굴관리

2018 년 개정된 터널 굴착 표준 시방서(Korea Construction Standards Center, 2018)에 따르면 터널 굴착 시 발생하는 여굴은 최소로 되도록 시공한다라고 간략하게 기술되어있다. NATM 터널 발파 굴착에 따른 정량적인 여굴 허용량은 공사 발주처에 따라 각각 다른 기준을 설정하고 있는데 2019 국토교통부에서 발간된 건설공사 표준품셈에 터널 천반, 측벽, 그리고 바닥에서 각각 12-19cm, 12-18cm 그리고 10-15cm 로 제안되어 있다.

터널 발파 굴착의 최적화를 위해서는 신뢰할 수 있는 굴착 단면 측정 방법이 필수적이다. 과거 불빛을 이용해 굴착 단면을 투영하여 얻은 자료를 수동적으로 해석한 여굴 측정기술은 1980 년대까지 사용되었다(Fellows, 1976; Franklin et al., 1989; Koppenwallner, 1959; Legge & Alocco, 1982; Thompson et al., 1979). 이후 1980 년대 중반부터 레이저를 이용한 여굴 측정기술이 사용되기 시작하였으며 현재까지 3D 스캐너(Cavity Monitoring System: CMS)등이 빈번하게 현장에서 적용되고 있다(Breytenbach, 1985; Celio & Matthias, 1983; Hagedorn, 1986; Noh et al., 2015). 최근 ICT 기술의 발전으로 입체 사진측량기법(Stereo-photogrammetry) 및 LiDAR(3D 레이저 스캐닝) 기술 또한 터널 여굴 분석에 적극적으로 적용되고 있다 (Gikas, 2012).

터널 굴착으로 발생하는 여굴의 간접적인 분석법도 제안되고 있다. Forsyth and Moss (1990)는 터널 발파로 인한 손상영역을 0-9 까지 나타내는 Draft Condition Rating 방법을 제안하였다. 터널 발파 후 외벽에 남아있는 천공 자국의 길이와 실제 천공장을 비교하여 발파 시공을 평가하는 Half Cast Factor(HCF)는 암반의 질과 특성에 민감하게 변하는 인자이며 풍화암에 적용하기 부적절하나 외곽공 발파 결과에 대한 정량적인 평가를 손쉽게 해 현재까지 적용되고 있다 (Scoble et al., 1996; Singh & Lamond, 1993). 또한 터널 굴착을 평가하는 인자로는 Tunnel Contour Quality Index(TCI)를 들 수 있다. TCI 는 터널 발파 라운드 혹은 전체 터널 연장에 대해 평가가 가능한 지수이며 발파 여굴의 길이, 터널 외곽의 거칠기, 터널 종단에 대한 여굴의 변화 등으로 평가한다(Costamagna et al., 2018; Kim, 2009).

최근까지 터널의 발파 굴착으로 인한 여굴을 줄이기 위한 많은 노력이 있었다. 천공의 오차나 발파공 패턴 설계의 오류는 여굴발생의 중요한 인자이다. 이들은 제어가 가능한 것으로 점보드릴의 자동 천공 시스템과 전자뇌관의 사용으로 여굴 발생은 억제될 수 있다. 이외에도 노치홀을 이용한 발파기술 및 워터젯을 이용한 터널 외곽 자유면 형성기술 등 다양한 방법이 최근까지 제안되고 있다(Jeong et al., 2007; Oh et al., 2013). 여굴 발생에 큰 영향을 미치며 제어할 수 없는 암반의 공학적 특성 인자에 대한 연구도 계속되었는데 그 대표적인 연구로는 2002 년 제안된 터널 여굴 제어를 위한

발파암 분류를 들 수 있다(Lee et al., 2002). 이 발파암 분류법은 터널 굴착선 최외곽을 5 ~ 6 개로 구분하고 여굴의 형성에 밀접한 관련이 있는 6 개 요소(균열 정도, 일축압축강도, 불연속면 간격, 불연속면 방향, 간극과 충전물)에 따라 가중치를 두어 점수를 배분하였다. 제안된 방법의 특징은 발파암 분류에 따라 외곽공의 간격 및 장약밀도 등 발파설계의 기준을 제공하는 점이다.

### 3 여굴저항도 개발 개요

터널 시공 시 발생하는 여굴의 원인은 크게 조절 가능한 인자 즉, 발파 설계 및 시공 시 발생할 수 있는 오류와 조절 불가능한 대상 암반의 지질 공학적 특성으로 대별될 수 있다. 서론에서 설명했듯이 현대의 발파기술은 조절 가능한 인자의 영향을 최소화할 만큼 발전을 거듭하며 터널 단면의 형상, 크기, 및 굴진장에 따라 어느 정도 표준화되었다. Jang et al. (2019)에 의해 소개된 암반의 여굴저항도(Overbreak Resistance Factor: ORF)는 터널 발파 굴착 시 조절 불가능한 대상 암반의 특성과 여굴 및 미굴 발생의 관계를 분석한 것이다.

Fig. 2. Concept of Overbreak Resistance Factor (ORF) development

Fig. 2 에서 보이듯 굴착 대상 막장에 대해 분석된 여굴저항도는 그 수치에 따라 표준화된 터널 발파설계의 조절을 가능케 해 시공 시 발생할 수 있는 여굴과 미굴(over and under-break: uneven break)량을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.1 여굴 자료 수집

연구를 위한 자료는 일본의 Ando-HAZAMA 사가 시공한 Shin-Hakoishi 터널 현장에서 수집되었다. 대상 암반은 중생대 쥐라기에 형성된 비교적 견고한 슬레이트와 쳐트로 중경암 내지 경암으로 국부적 풍화와 지하수가 존재한다. 열극과 열리가 터널 축과 평행한 남동 방향으로 잘 발달하였다. 터널은 표층으로부터 240 ~ 260m 구간에 높이 6.97m 폭 14.50m 의 상부반단면을 선 굴착하는 방법으로 시공되었다. 상부 반단면은 막장의 암반 상태에 따라 1.5 ~ 3.0m 의 굴진장을 유지하였다. 컴퓨터 자동천공시스템을 적용하여 45mm 발파공 기준 대략 100 ~ 120 공 의 천공수로 V-cut 과 SB 공법을 적용한 가장 일반적인 발파패턴으로 굴착되었다. 최외곽공의 저항선 대비 공간거리(Space/Burden)는 1.14 를 유지하였으며 전 막장에 대해 지포장된 에멀전화약(ULTEX®,  $\rho = 1.25$ ,  $\phi 35$ , VOD = 5800m/s)을 장약하였으며 심발공, 확대공 및 최외곽공의 장약밀도는 각각 평균 0.69, 0.66 및 0.59 kg/m 을 유지하였다. Fig. 3 은 497 번 막장의 상부반단면에 대한 전형적인 막장 지질조사 및 천공 패턴을 보여준다.

ORF 는 암반의 공학적 특성과 여굴 및 미굴의 상관 관계에 관한 인자이다. ORF 의 독립변수인 막장의 지질 공학적 자료는 일본 토목학회의 지침(The standard specification for tunnelling (Shuichi, 2007))을 통해 조사되었다. Table 1 에 보이듯 무지보 막장 상태( $F_f$ ), 단축압축강도( $F_s$ ), 풍화도( $F_w$ ) 및 불연속면( $F_d$ )의 4 개의 지질 공학적 특성에 대해 조사가 이루어졌으며 여굴에 발생에 주요한 영향인자인 불연속면에 대한 특성의 경우 그 빈도, 상태 및 불연속면과 최외곽선과의 각도에 대한

조사가 더불어 이루어졌다. ORF 의 모든 독립변수는 1 부터 10 사이의 값으로 가중치 없이 표준화되었다.

Fig. 3. Face mapping and typical blasting pattern of top heading of section 497 of Shin-Hakoishi Tunnel.

Table 1. List of input factors of the overbreak resistance factor

$F_f$	A	Unsupported face condition
$F_s$	B	Uniaxial compressive strength
$F_w$	C	Face weathering and alteration
	D	Discontinuities- frequency
$F_d$	E	Discontinuities – condition
	F	Angle between discontinuities and tunnel contours

발파 후 여굴 및 미굴의 깊이는 CMS(Cavity Monitoring System)를 통해 조사되었으며 총 30 개의 막장의 좌우 및 천반에 대한 분석으로 총 90 개의 지질 공학적 특성과 미굴 및 여굴에 대한 자료가 수집되었다.

### 3.2 여굴 예측 모델 개발

어떠한 현상의 독립변수의 종속변수에 대한 영향은 예측 모델을 개발함으로써 추론할 수 있다. 물론 예측 모델의 신뢰도는 변수 간 민감도 조사에 지대한 영향이 있으므로 통계학적으로 유의한 모델 개발이 필요하다. 본 연구는 Table 1 에 소개된 6 개 ORF 독립변수와 각 자료와 쌍을 이루는 종속변수, 즉 여굴량(mm) 간의 모델 구축을 위해 선형회귀 및 가우시안 회귀 모델을 적용하였다. 두 모델의 상관계수(R)는 각각 0.55 및 0.59 이었으며 평균 제곱근 오차(RMSE) 또한 84.49 및 81.70 으로 예측 모델로서의 유의성은 확보되지 않았다.

본 연구의 유의한 모델 개발을 위해 역전파 신경망 모델이 적용되었다. 신경망은 MATLAB 을 이용하여 코딩되었으며, hyperbolic tangent 함수를 전달함수로 하고 conjugate gradient algorithm 을 학습함수로 구성하였다. 민감도 조사의 신뢰도를 높이기 위해 hidden layer 의 뉴런 수를 달리한 총 5 개의 ANN 모델이 개발되었다. 각 ANN 모델의 training, validation, 및 test 단계는 전체 자료의 70%, 15%, 및 15%가 무작위로 배정 후 진행되었으며 그 결과는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4. Regression graphs of test and training results of model 1 to 5. (Str.: Artificial Neuron Network model structure of input-hidden-output, R: correlation coefficient, RMSE: Root Mean Square Error)

### 3.3 여굴에 대한 암반인자의 민감도 분석

개발된 5 개의 신경망 모델의 입력인자(ORF 독립변수 즉 암반의 지질 공학적 특성)와 출력인자(ORF 종속변수 즉 여굴량)에 대한 민감도 분석을 위해 Profiling Method (Lek et al., 1996)가 적용되었다. Profiling Method 는 신경망 모델의 목적 독립변수의 최솟값부터 최댓값까지의 값을 변화시키되 다른 독립변수의 값은 일정 간격으로 고정한 상태에서 종속변수의 변화로 목적 독립변수의 종속변수에 대한 민감도를 분석하는 방법이다. Fig. 5 는 A 를 독립 종속변수에 대한 다른 종속변수의 최저값에

대한 민감도 분석의 예와 Profiling Method 를 통해 분석된 전체 ORF 독립변수들에 대한 민감도를 보여준다. Profiling Method 에 대한 자세한 내용은 Jang (2014)과 Jang et al. (2016)을 참고하기 바란다.

Fig. 5. An example of Profiling Method application on the subject-dependent variable A and the results (Details of input factors refer to Table 1)

분석 결과 평균 29%의 민감도를 보인 불연속면과 최외곽선과의 각도(F)가 여굴 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 암반의 단축압축강도(B) 또한 평균 27%로 여굴 발생에 주요한 요인으로 나타났다. 다음으로 불연속면의 상태(E)와 빈도(D)가 각각 평균 14%와 13%의 여굴 발생에 대한 민감도를 나타냈다. 암반의 풍화도(C)와 무지보 막장 상태(A)는 각각 평균 9%와 8%로 암반의 다른 특성에 비해 대체로 낮은 민감도를 나타냈다. 특히 불연속면에 관련된 인자들(D, E 와 F)의 민감도는 총 56%로 여굴 발생에 불연속면이 미치는 영향은 매우 큰 것으로 분석되었다.

### 3.4 여굴저항도표 개발

민감도 분석을 통해 얻은 6 개 여굴 발생 인자들의 민감도를 가중치로 하여 초기의 표준화된 자료 값에 대입 후 가중치가 대입된 인자들의 자료 값을 얻었다. 가중치가 대입된 자료의 6 개 인자의 합은 0 부터 100 의 값을 가지며 이를 여굴저항도(Overbreak Resistance Factor: ORF)라 명명하였다. Fig. 6 은 계산된 ORF 값과 실제 여굴량을 도표화 한 것이다.

연구를 위한 자료 수집이 1 개의 현장에서 이루어져 Fig. 6 에서 보듯 대부분의 ORF 값이 40 ~ 80 사이에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 그럼에도 ORF 값이 커질수록 실측된 여굴의 깊이가 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. ORF 와 여굴 사이의 선형 회귀 모델 (P value: 9.51E-7)의 상부 99.90% 신뢰 구간을 고려해 Table 1 의 여굴저항도표를 도출하였다.

Fig. 6. Weighted-datasets formulation by applying the sensitivity results to the unweighted-datasets

Table 2. The ORF grade chart with five grades and possible range of overbreak and underbreak

ORF grade	ORF value	Range of OB and UB (mm)		Note
I	100 ~ 81	-200	200	Manageable level of OB and UB
II	80 ~ 61	-100	300	Moderate OB or low UB
III	60 ~ 41	0	400	High to moderate OB
IV	40 ~ 21	100	500	High OB
V	20 ~ 0	200	Over 600	Massive OB

ORF: Overbreak Resistance Factor, OB: Overbreak, UB: Underbreak

여굴저항도표는 0 부터 100 의 값을 가지는 여굴저항도를 20 단위로 구분하는 5 등급으로 구성하였으며 등급별 발생할 수 있는 여굴과 미굴의 깊이를 제안하고 있다. 본 연구를 통해 제안된 여굴저항도의 현장 적용을 위해 여굴저항도 관측지의 예를 부록으로 실었다. 여굴저항도는 여굴의 깊이와 조절이 불가능한 암반의 공학적 특성들 사이의 관계에 의해서 개발되었으며 조절 가능한 발파설계와 관련된 인자는 고려되지 않았다. 그러므로 제안된 여굴저항도표의 현장적용 시 컴퓨터를

통한 자동천공 및 본 연구에 적용된 외곽공의 폭약 밀도(0.59 kg/m)를 고려하여야 한다. 또한 터널 최외곽공에 대한 정밀폭약이 적용될 경우 ORF 1 ~ 2 등급에서는 미굴과 여굴이 최소화되는 매우 양호한 결과가 예상된다. ORF 3 등급의 암반은 외곽공에 정밀폭약이 적용되더라도 저항선을 늘리거나 전열공의 장약밀도를 줄이는 등의 조치가 필요하며 ORF 4 ~ 5 단계의 암반은 정밀폭약의 장점이 발휘되기 어려울 것으로 판단된다. 제안된 여굴저항도는 정밀폭약의 적용한 사례가 포함되지 않은 것으로 이에 대한 사례 연구 또한 필요하다.

#### 4 여굴저항도를 이용한 터널 발파 여굴 관리 시스템 개요

미래의 터널 자동 발파 시스템 또는 무인 터널 발파 시스템의 구축을 위해서는 대상 암반에 대한 정확한 분석과 예상되는 주변 암반의 손상을 평가하고 이를 발파 설계에 반영하는 능동적 시스템이 요구되며 Jang et al. (2019)에 의해 제안된 여굴저항도는 이러한 시스템 구축에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 여굴저항도는 소개된 여굴저항도표를 통한 수동적인 암반 손상의 판단뿐만 아니라 영상이나 레이저 및 라이다(Lidar)를 이용한 자동 암반 분류 시스템과 결합하여 실시간으로 터널 외곽 암반의 손상을 예측할 수 있는 자동시스템으로 개발될 수 있다. Fig. 7은 자동 암반 분류 시스템과 ORF를 결합한 실시간 여굴 예측 시스템의 일례를 보여준다.

Fig. 7. A concept of real-time overbreak evaluation using auto ORF system

#### 5 결론

현재까지 발파를 이용한 터널의 굴착은 TBM(tunnel boring machine)등을 이용한 기계식 굴착 보다 경제적이며 공사 규모와 관계없이 다양한 암반 상황에 적용될 수 있는 장점이 있다. 이러한 발파를 이용한 터널 굴착의 가장 큰 문제점은 굴착면 최외곽 암반의 손상 즉 여굴 및 미굴이며 이들은 터널 발파 굴착 성패에 가장 중요한 영향을 미친다. 본 논문은 Jang et al. (2019)에 의해 제안된 여굴저항도(overbreak resistance factor: ORF)를 소개하고 이를 이용한 터널 발파 여굴 관리 시스템으 제안하였다.

여굴저항도는 여굴 발생의 중요한 인자이며 제어할 수 없는 대상 암반의 공학적 특성과 여굴 발생의 상관 관계에 대한 연구를 통해 여굴발생을 예측하고 아울러 터널 발파 설계에 대한 조절을 통해 여굴을 제어할 수 있도록 한다. 여굴저항도 개발을 위한 자료는 일본의 Shin-Hakoishi 터널 현장에서 수집되었으며 이는 6 개의 독립변수(무지보 막장상태( $F_f$ ), 단축압축강도( $F_s$ ), 풍화도( $F_w$ ) 및 불연속면( $F_d$ )의 특성 - 빈도, 상태 및 불연속면과 최외곽선과의 각도)와 1 개의 종속변수(여굴의 깊이)를 포함한다. 조사된 독립변수의 값은 0 부터 10 까지로 표준화시킨 후 역전파 인공신경망을 이용해 5 개의 여굴 예측 모델을 구축하였다. 개발된 5 개의 여굴 예측 모델의 독립변수들과 종속변수간의 민감도는 Profiling Method 를 통해 실시되었으며 그 결과 불연속면에 관련된 인자들( $F_d$ )의 여굴에 대한 영향이 56%로 나타났다. 민감도 분석을 통해 얻은 인자들의 가중치를 표준화된 자료에 대입하여 그 합을 여굴저항도라고 명명하였다. 여굴저항도는 여굴의 깊이가 깊어질수록 작아지는 역비례관계를 보이며 이들의 선형분석을 통해 5 등급의 여굴저항도표를

개발하였다. 이를 통해 발파 굴착으로 발생할 수 있는 여굴 깊이에 대한 기준을 제시하였다. 본 연구에서 소개된 여굴저항도는 공경  $\varnothing 45$  및  $0.56 \text{ kg/m}$  의 장약밀도를 갖는 에멀전 폭약에 대한 연구 결과로 향후 다양한 폭약 종류 및 밀도에 대한 연구가 지속되어야 한다. 또한 이는 미래에 개발될 터널 자동 발파 시스템 등의 최외곽 암반 손상에 대한 평가에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Breytenbach, G., 1985, The measurements of dilution in massive ore body mining with the aid of a pulsating laser distancemeter, *Journal of the Institute of Mine Survey*, 23, 55-60.
- Celio, T. and Matthias, H., 1983, PMS2 a fast automatic profile recorder for underground surveys, Paper presented at the In Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Rotterdam, Netherlands
- Costamagna, E., Oggeri, C., Segarra, P., Castedo, R. and Navarro, J., 2018, Assessment of contour profile quality in D&B tunnelling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 75, 67-80.
- Fellows, S., 1976, Tunnel profiling by photography, *Tunnels & Tunnelling*, British Tunnelling Society, 8, 70-73.
- Forsyth, W. and Moss, A., 1990, Observations on blasting and damage around development openings, Paper presented at the Proc. 92nd CIM Annual General Meeting.
- Franklin, J. A., Ibarra, J. T. and Maerz, N. H., 1989, Blast overbreak measurement by light sectioning, *International journal of mining and geological engineering*, 7, 4, 323-331.
- Gikas, V., 2012, Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation, *Sensors*, 12, 8, 11249-11270.
- Hagedorn, H., 1986, Electronic profile measuring system for tunnels and slopes, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 19, 2, 89-97.
- Jang, H., 2014, Unplanned dilution and ore-loss optimisation in underground mines via cooperative neuro-fuzzy network, PhD, Curtin University, Australia.
- Jang, H., Kawamura, Y. and Shinji, U., 2019, An empirical approach of overbreak resistance factor for tunnel blasting, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103060.
- Jang, H., Topal, E. and Kawamura, Y., 2016, Illumination of parameter contributions on uneven break phenomenon in underground stoping mines, *International Journal of Mining Science and Technology*, 26, 6, 1095-1100.
- Jeong, D.-H., Moon, S.-J., An, D.-J., Jeong, W.-J., Kim, E.-K. and Kim, D.-G., 2007, A Study on Notch Bit System for Controlling Blast Vibration and Over-break in Rock Mass, Tunnel and underground space, 17, 3, 216-224.
- Kim, Y., 2009, Tunnel contour quality index in a drill and blast tunnel: definition, analysis and effects, PhD, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Koppenwallner, F., 1959, Lichtschnitt-Profilmessung in Stollen, *Geologie und Bauwesen* 50-58.
- Korea Construction Standards Center, 2018, KCS 27 20 00 :2018: Korea institute of civil engineering and building technology.
- Lee, T.-R., Kim, D.-H. and Seo, Y.-H., 2002, A Study on the Development of the Rock Blastability Classification and the Methods for Minimizing Overbreak in Tunnel, *Explosives & blasting*, 20, 3, 25-38.
- Legge, F. and Alocco, V., 1982, Malawi- Driving a 9 m Diameter Power Conduit with Low Cover at Nkula Falls, *Civil Engineering Contractor(Johannesburg)* 16, 10, 31.
- Lek, S., Delacoste, M., Baran, P., Dimopoulos, I., Lauga, J. and Aulagnier, S., 1996, Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology, *Ecological Modelling*, 90, 1, 39-52.
- Noh, Y.-S., Kim, J.-K., Ko, Y.-H., Kim, S.-J., Chung, S.-K. and Yang, H.-S., 2015, A Study on Assessment of Advance and Overbreak in Underground Excavation Utilizing 3D Scanner, *Explosives & blasting*, 33, 4, 1-6.



- Oh, T.-M., Cho, G.-C. and Ji, I.-T., 2013, Effects of free surface using waterjet cutting for rock blasting excavation, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 15, 1, 49-57.
- Scoble, M., Lizotte, Y. and Paventi, M., 1996, Rock mass damage from blasting: characterization and impact, Vol. 225-235. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.
- Shuichi, Y., 2007, *Standard Specifications for Tunneling—2006: Mountain Tunnels*, (978-4-8106-0567-9). Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers.
- Singh, S. P. and Lamond, R., 1993, Investigation of blast damage and underground stability, Paper presented at the 12th conference on ground control in mining, Sudbury Ontario.
- Thompson, D., McKown, A., Fournery, W. and Sperry, P., 1979, Field evaluation of fracture control in tunnel blasting, Washington DC: Office of Rail and Construction Technology.

## 부록

Example of Overbreak Resistance Factor (ORF) record sheet for tunnel based on the study

### Tunnel Information

Tunnel name		Location	
Overburden	m	Type of Rock	
Status of special condition			

### Overbreak Resistance Factor (ORF) score description

Parameters		Range of values				
$F_f$	A – Unsupported face condition before scaling	Good Standing – withstands hammer blows	Standing – Crumbles with hit by a hammer	Standing – Crumbles with hit lightly by a hammer	Barely stand – immediate support required	Face collapses or flows out
	Rating	8 - 6	5 - 3	2	1	0
$F_s$	B – Uniaxial Compressive strength	> 150 MPa	150 – 100 MPa	100 – 50 MPa	50 – 20 MPa	< 20 MPa
	Rating	27 - 21	20 - 14	13 - 8	7 - 1	0
$F_w$	C – Face weathering and alteration	Fresh, unweathered	Slight discolouring along rifts; Slightly weathered	General discolouring; Moderately weathered	Complete discolouring; Highly weathered	Soil, clay, fractured, unconsolidated
	Rating	9 - 8	7 - 5	4 - 3	2 - 1	0
$F_d$	D – Discontinuities frequency	>1m	1 – 0.5 m	0.5 – 0.2 m	0.2 m – 5 cm	<5 cm; fracture unconsolidated
	Rating	13 - 11	10 - 7	6 - 4	3 - 1	0
	E – Discontinuities condition	Tight	Partially opened; hard filling	Opened; hard filling	Opened; soft filling	Opened; clay, unconsolidated filling
	Rating	14 - 12	11 - 8	7 - 5	4 - 1	0
	F – Angle difference between discontinuities and tunnel contour	0° (Parallel)	0° - 20°	20° - 45°	45° - 70°	70° - 90°
	Rating	29	28 - 22	21 - 14	13 - 7	6 - 0

$F_f$ : Face condition factor,  $F_s$ : Strength factor,  $F_w$ : Weathering factor,  $F_d$ : discontinuities factor

### Sectional ORF score

Section		Left Wall	Left shoulder	Top	Right Shoulder	Right wall
ORF	A					
$F_f$	B					
$F_s$	C					
$F_w$	D					
$F_d$	E					
	F					
ORF sum						
ORF grade						

### Possible range of over and underbreak of ORF grades

ORF grade	ORF value	Range of OB and UB (mm)		Note
I	100 ~ 81	-200	200	Manageable level of OB and UB
II	80 ~ 61	-100	300	Moderate OB or low UB
III	60 ~ 41	0	400	High to moderate OB
IV	40 ~ 21	100	500	High OB
V	20 ~ 0	200	Over 600	Massive OB

OB and UB donate overbreak and underbreak respectively

List of Figure:

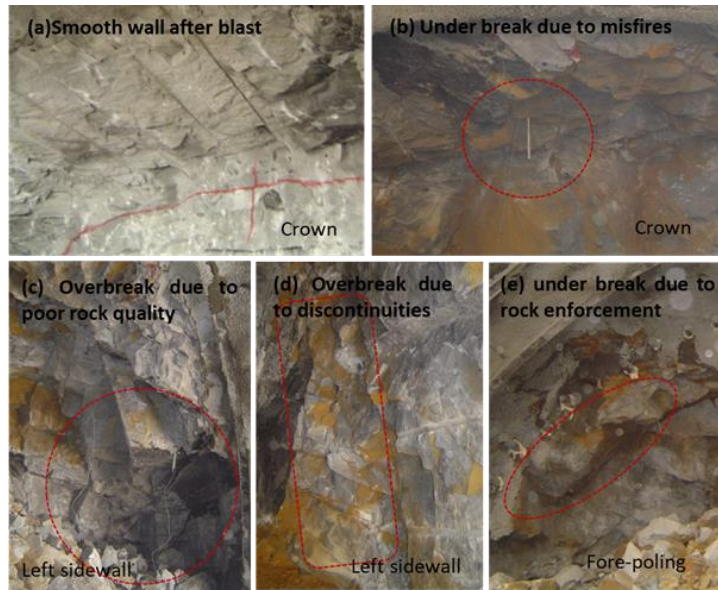


Fig. 8. Various over and under break phenomenon at a tunnel operation in Gumi, Korea

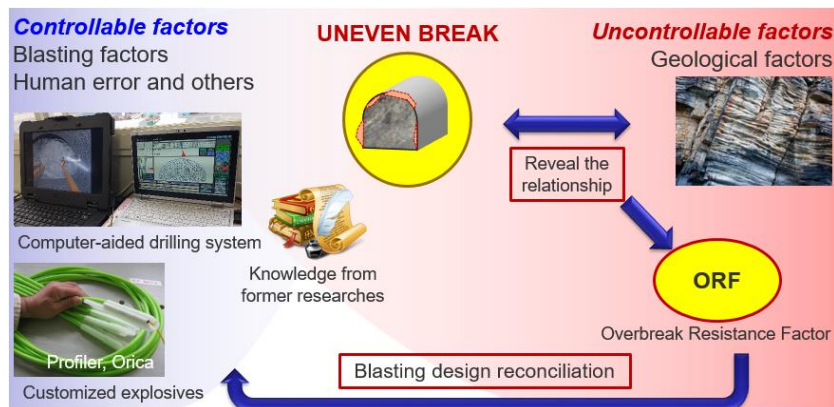


Fig. 9. Concept of Overbreak Resistance Factor (ORF) development

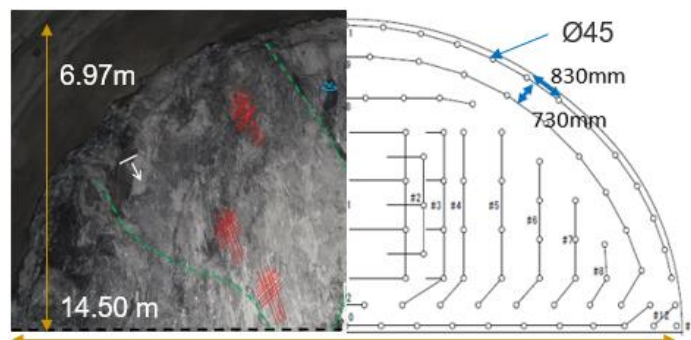


Fig. 10. Face mapping and typical blasting pattern of top heading of section 497 of Shin-Hakoishi Tunnel.

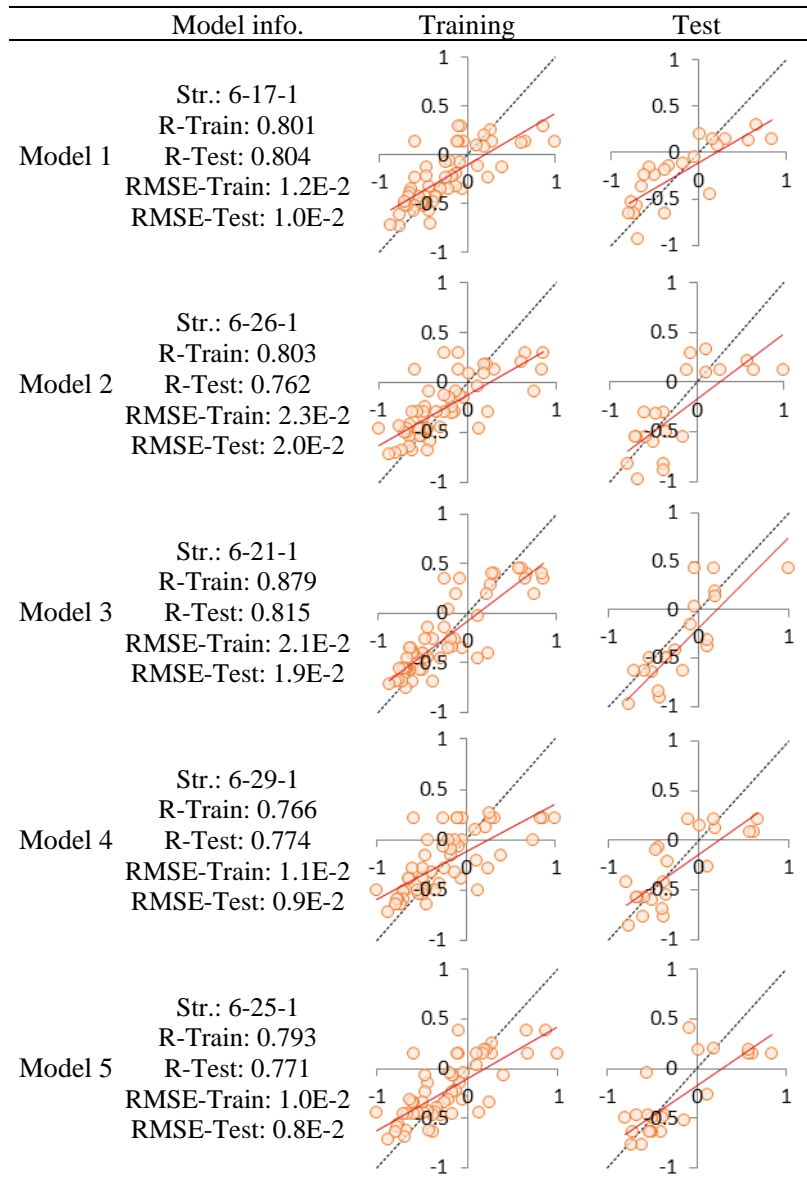


Fig. 11. Regression graphs of test and training results of model 1 to 5. (Str.: Artificial Neuron Network model structure of input-hidden-output, R: correlation coefficient, RMSE: Root Mean Square Error)

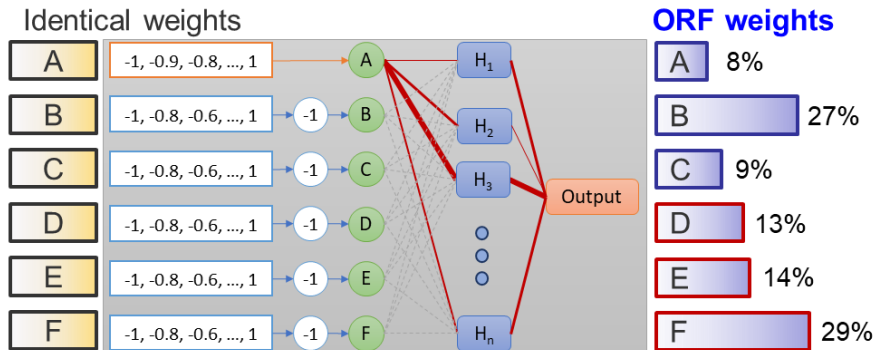


Fig. 12. An example of Profiling Method application on the subject-dependent variable A and the results (Details of input factors refer to Table 1)

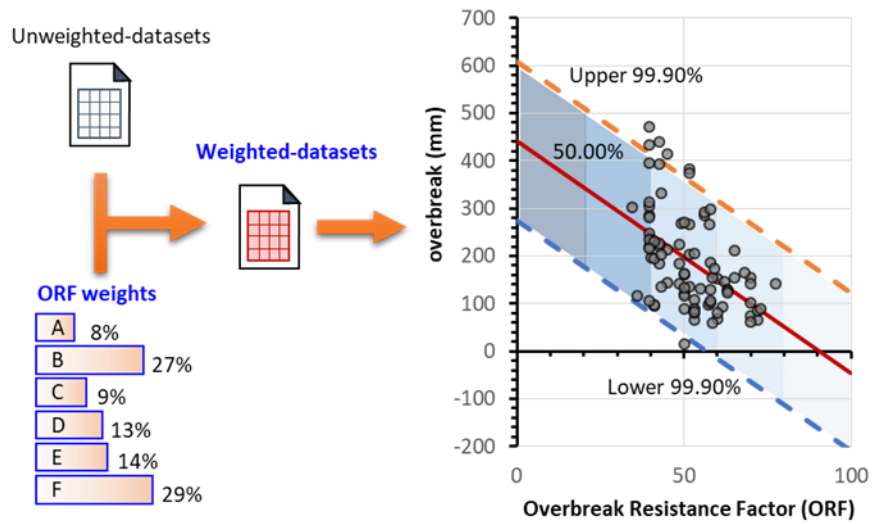


Fig. 13. Weighted-datasets formulation by applying the sensitivity results to the unweighted-datasets

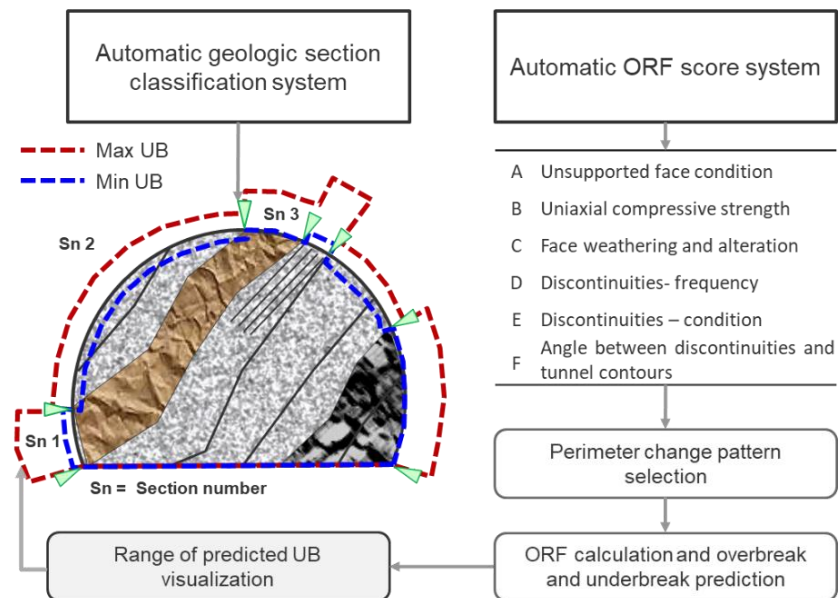


Fig. 14. A concept of real-time overbreak evaluation using auto ORF system