

CASE STUDY

수학적 개념 해를 적용한 미고결 암석의 Creep거동 해석

장명환*

한국광물자원공사 자원개발기술팀

Creep Behavior of Unconsolidated Rock with Mathematical Concept Solution

Myoung-Hwan Jang*

Mining & Geotechnical Team, Korea Resources Corporation

*Corresponding author: mhjang@kores.or.kr

Received: January 2, 2018
Revised: January 16, 2018
Accepted: January 19, 2018

ABSTRACT

Burger's model was used to analyze creep characteristics of unconsolidated rock. Burger's model should determine four physical parameters from two pairs of data. In this study, physical parameters of Burger's model were determined by applying mathematical concept solution. Creep was accelerated for three years using the determined physical parameters of the Burger's model for unconsolidated rocks. As a result, the creep behavior showed a continuous deformation behavior without convergence. Therefore, in this mine, it is analyzed that the application of U-Beam is more appropriate than roofbolt in terms of stability.

Keywords: Burger's model, Mathematical concept solution, physical parameters, Creep deformation behavior, Unconsolidated rock

초록

미고결 암석에 대한 Creep 특성을 분석하고자 Burger 모델을 이용하였다. Burger 모델은 자료쌍 $D(u, t)$ 으로부터 4개의 역학적 매개변수를 결정 하여야 한다. 본 연구에서는 수학적 개념 해를 적용하여 매개변수를 결정 하였다. 미고결 암석에 대한 Burger 모델의 결정된 매개변수를 이용하여 Creep을 3년간 가속시켰다. 그 결과 Creep 거동은 수렴이 되지 않고 지속적인 변형거동을 보였다. 따라서 본 광산에서는 Roofbolt 보다 U-Beam 적용이 안정성 측면에서 더 적합 할 것으로 분석 되었다.

핵심어: Burger 모델, 수학적 개념 해, 매개변수, Creep 변형거동, 미고결 암석

서론

미고결 암석에 대한 Creep 시험과 역학적 특성의 규명은 암석 자체의 미고결성 때문에 적용응력의 하중재하, 시험시간의 단기성 등 자료획득과 분석에 어려움이 있다.

대부분의 역학적 모델식은 경험식이나 물리적 의미를 포함하는 모델식으로 이루어진다. 그러나 주어진 자료쌍 보다 많은 물리적 매개변수를 포함하는 모델함수의 최적변수를 결정 하기란 쉽지 않다. 특히 거시적인 관점보다 미시적인 관점에서 세분된 문제를 해



결하고자 할 때는 주어진 자료쌍 보다 더 많은 물리적 변수를 포함하는 모델식에 의한 현상설명이 필요하다.

Burger 모델은 주어진 자료 쌍(ε, t)으로부터 E_m, E_k, η_m, η_k 등의 4개의 역학적 매개변수를 결정하여 Creep의 해석을 실시하는 것으로서 연암의 Creep거동을 잘 묘사 할 수 있다.

본 연구에서는 OO광산의 미고결 암반의 Creep 실험결과에 대하여 Creep 특성을 규명 하고자 수학적 개념해를 적용하여 *Burger* 모델의 매개변수를 구하고 3년 간 가속시켜서 Creep 거동을 분석하여 적정지보재를 선정하고자 하였다.

수학적 개념

제공된 자료 쌍보다 많은 매개 변수들을 결정하기 위해서는 복잡한 수학적 행렬 방정식의 해를 구할 필요가 있다. 이러한 수학적 개념들은 Donald(1999)등 많은 텍스트 들이 있다. 최소자승 문제에서 함수 $f(x)$ 를 최소화 하는 방법은 다음과 같다.

$$\min f(x) = \| F(x) \|^2 = \sum_i F_i^2(x) \quad (1)$$

이런 형태의 함수들은 비선형 모델함수를 계측자료와 적합시킬 때에 유용하다. 공학적인 실험결과와 자료 쌍 $y(x, t)$, 벡터 x , 스칼라 t 에 대한 주어진 모델 함수를 $\varphi(t)$ 라 할 때 실험치와 모델함수 간의 차이를 최소화 하는 관계식은 다음과 같다.

$$\min_{x \in R^n} f(x) = \sum_{i=1}^m (y(x, t_i) - \varphi(t_i))^2 \quad (2)$$

여기서 y 와 φ 는 가중치를 포함한다. 식 (3)의 벡터 $F(x)$ 는 모델식과 실험치의 편차들에 대한 행렬로 표현되며, $F(x)$ 의 행렬식들의 최소값이 되는 φ 함수의 매개 변수를 계산하도록 수학적 연산과정을 프로그램 하여 Creep해석을 하는 것이 본 연구 목적이다. 따라서 φ 함수의 매개변수가 *Burger* 모델의 매개변수가 된다.

$$F(x) = \begin{pmatrix} y(x, t_1) - \varphi(t_1) \\ y(x, t_2) - \varphi(t_2) \\ \dots \\ y(x, t_m) - \varphi(t_m) \end{pmatrix} \quad (3)$$

적용 행렬식

함수 $F(x)$ 의 해를 얻기 위해서는 *Gradient*, *Jacobian matrix*, *Hessian matrix*를 순차적으로 적용하여야 한다.

$f(x)$ 의 *Gradient* 벡터를 $G(x)$ 라 하면 *Gradient*는 각 변수로의 일차 편미분값으로 구성되는 벡터로 이 벡터는 f 값이 가장 급격하게 증가하는 방향을 나타낸다. 벡터의 크기는 그 증가율의 기울기 정도를 나타내는 것으로 어떤 다변함수 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 가 있을 때 f 의 *Gradient*는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (4)$$

이러한 *Gradient*의 특성은 오차함수의 Mapping에서 지역적으로 선형 근사하거나 *Gradient descent* 함수의 극점을 찾는 용도로 활용할 수 있다.

$F(x)$ 의 $m \times n$ *Jacobian matrix*를 $J(x)$ 라 하면 어떤 $F: R^n \rightarrow R^m$ 함수 $F(x_1, \dots, x_n) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$ 에 대한 *Jacobian* 행렬은 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

다음에 $f(x)$ 의 1차 미분값에 대하여 *Hessian matrix* $H(x)$ 를 계산한다. *Jacobian*, *Gradient*가 모든 함수에 대한 일차 미분을 나타내는 반면 *Hessian*은 함수의 이차 미분을 나타낸다.

$$J_F = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

*Hessian*은 함수의 곡률특성을 나타내는 행렬로서 비선형 방정식의 최적화 문제에 적용된다. 어떤 다변수 함수 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 가 있을 때 f 의 *Hessian* 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

수학적 연산에서 *Hessian*은 임계점(Critical point)의 종류를 판별하는데 활용하며 특정함수의 일차미분이 0이 되는 점을 임계점이라 할 때 함수의 극점(극대, 극소), 안장점(Saddle point) 등이 해당된다.

따라서 *Burger* 모델 함수를 최적화시키기 위한 극점(극대, 극소)을 찾기 위해서는 먼저 그 함수의 일차 미분인 *Gradient*가 0이 되는 지점을 찾는다. 이렇게 찾은 임계점이 극대점 또는 극소점 인지를 구분하기 위한 이차 미분값을 조사하기 위해 *Hessian*을 사용한다.

행렬식의 변환

본 연구에서는 모델식의 매개변수를 결정하기 위하여 수학적인 메커니즘을 통해서 찾을 수 있도록 하였다. 이는 비선형 방정식의 해를 찾는 방법과 유사하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 $F(x)$ 의 $m \times n$ *Jacobian matrix*를 $J(x)$, $f(x)$ 의 *Gradient* 벡터를 $G(x)$, $f(x)$ 의 *Hessian matrix*를 $H(x)$, 각 $F_i(x)$ 의 *Hessian matrix*를 $H_i(x)$ 라고 하면

$$G(x) = 2J(x)^T F(x) \quad (7)$$

$$H(x) = 2J(x)^T J(x) + 2Q(x) \quad (8)$$

여기서

$$Q(x) = \sum_{i=1}^m F_i(x) \cdot H_i(x) \quad (9)$$

Matrix $Q(x)$ 는 x_k 가 최적 해에 근접할 때 잔류값 $\|F(x)\|$ 는 0으로 되는 값의 총 합으로써 $\|F(x)\|$ 는 해가 찾아질 때 아주 작은 값이 되며 *Gauss-Newton* 방법 등이 최적화 과정에 적용된다. *Gauss-Newton* 방법에서 탐색방향의 d_k 는 각 회전수 k 로부터 얻어지며, 선형 최소자승법의 해는 다음과 같이 구한다.

$$\min_{x \in R^n} \|J(x_k) - F(x_k)\|^2 \quad (10)$$

이러한 과정을 통해 최종적으로 *Levenberg-Marquardt* 방법이 비선형 방정식의 해를 탐색을 하며 λ_k 는 d_k 의 크기와 방향을 조절하며 관계식은 다음과 같다.

$$(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k I) d_k = -J(x_k)^T F(x_k) \quad (11)$$

또는

$$(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k \text{diag}(J(x_k)^T J(x_k))) d_k = -J(x_k)^T F(x_k) \quad (12)$$

프로그램 작성

Burger모델의 매개변수 결정은 연구특성에 따라 김영수(2003)등의 해석적인 방법이나 Hong(2004), Yoon (2010)등에 의한 Curve fitting의 방법들을 적절하게 이용할 수 있다. 본 연구에서는 많은 측정자료들에 의하여 전체 Creep의 왜곡현상을 최소화하기 위한 단계적 분석을 위해서 수학적 개념해를 적용하였다. 프로그램 작성을 위하여 *IMSL Library*와 *FORTTRAN*을 이용하였다. Creep 해석을 위한 *Burger*모델은 식 (13)과 같다. 식에서 E_k, η_k 는 Kelvin의 물리적 상수로서 탄성계수와 점성계수이고, E_m, η_m 는 Maxwell의 물리적 상수로서 탄성계수와 점성계수이다.

$$F_{n,Burger} = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{E_K} [1 - \exp(-\frac{E_K}{\eta_K} t)] \quad (13)$$

본 연구에서는 실험치와 모델식 간의 최소편차가 되기 위한 최종 해를 얻기 위한 적합도로 식 (14)과 같은 변수 SSQ 를 적용하였다.

$$SSQ = F(1)^2 + F(2)^2 + \dots + F(n)^2 \quad (14)$$

$$F(n) = x_n - F_{n, Burger} \quad (15)$$

식 (14), (15)에서 x_n 은 n 번째 실험값, $F_{n, Burger}$ 는 *Burger* 모델에 의한 n 번째 계산값을 나타낸다. 전체 자료쌍에 대한 비선형 방정식의 매개변수를 결정한 후 그때 SSQ 의 결과가 10^{-7} 보다 작은 값이 될 때까지 실험치를 차례대로 대입하여 연산하도록 하였다. x_1 이 결정되면 x_1 이전의 자료는 *Dummy*가 되도록 하였으며 이는 *Creep* 시험의 초기 재하 과정에서 많은 수의 자료값을 기록하게 되는데 이러한 값들이 전체적인 *Creep* 시간에 대한 왜곡 현상을 줄 수 있기 때문이다.

E_k, η_m, η_k 의 각 변수는 E_m 값을 구한 자료쌍을 x_1 으로 하여 *Burger* 모델의 변수 3개 이상을 동시에 만족할 때 각 매개 변수 값과 SSQ 값을 구하고 계산이 종료되도록 하였다.

Fig. 1은 본 연구의 연산 프로그램의 흐름도를 나타낸 것으로서 각 단계는 다음과 같은 특성을 가지고 순차적인 연산을 실시한다.

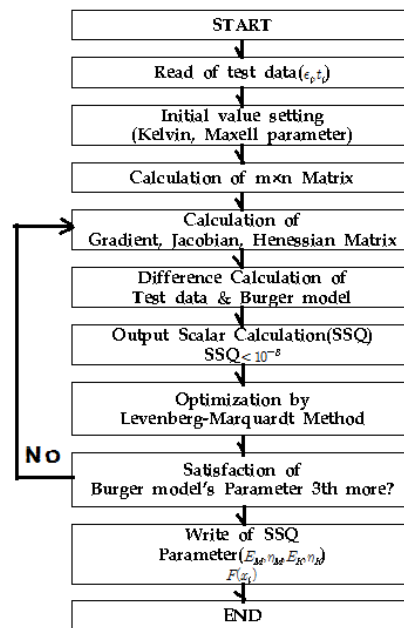


Fig. 1. Flow chart for decision of Burger model's parameters

- ① *Creep* 실험에서 입력자료 쌍은 변형률(ϵ , %)과 그 때의 시간(t , min)과 자료 수(m)
- ② *Kelvin*, *Maxwell* 변수의 초기 값으로 100~10,000 값을 임의로 세팅
- ③ 시험 자료 수를 행(m), 매개 변수를 열(n)로 하는 $m \times n$ Matrix 구성
- ④ $m \times n$ 행렬에 대한 *Gradient*, *Jacobian*, *Hessian matrix*에 의하여 편미분값 계산
- ⑤ 결정된 *Burger* 모델식에 의한 계산값과 실험치에 대한 편차계산
- ⑥ *Burger* 모델 변수를 만족치 않으면 *Gradient*, *Jacobian*, *Hessian matrix*를 재계산

- ⑦ Levenberg-Marquardt에 의한 Burger 모델의 비선형식의 최적화
- ⑧ SSQ 연산 범위($10^{-7} \sim 10^{-8}$)에 들어올 때 까지 반복
- ⑨ 각 변수와 SSQ, F값들을 인쇄하고 프로그램을 끝냄.

Fig. 2는 본 연산 과정의 검증을 위하여 OO광산에 대하여 Jacques(1994)에서 실시한 Creep 시험자료를 이용하여 Burger 모델의 매개 변수를 계산한 것을 나타낸 것으로서 SSQ가 최소가 되는 최적해를 1174회 반복 계산 후 완료된 것을 나타낸 것이다. 실험 자료는 자료획득 시간 간격이 불균일 함에도 Fig. 4~Fig. 12와 같이 좋은 Curve fitting 결과를 보여주었다.

```

*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
*** WARNING ERROR (IER = 39) FROM IMSL ROUTINE ZXSSQ
SIG = 14.750
Load stress= 1.11 SPRING ELAST= 0.43E+03
8OUT
IER = 0.
X = 2873.434 , 3.4444580E+07, 166548.0
SSQ = 7.1521555E-08,
F = -1.3166573E-05, 1.1411100E-04, 9.9940225E-05, 7.6300697E-05, 3.2952521E-05, -3.1031435E-05, -7.1436167E-05,
-7.4791256E-05, -5.7884958E-05, -5.7123136E-05, -4.1667838E-05, -4.9683731E-06, 1.7297454E-05, 4.9563359E-05, 3.8626604E-05,
4.0892512E-05, 4.3158419E-05, 3.2221666E-05, 4.4487417E-05, 4.6753325E-05, 2.5816727E-05, 2.6148977E-05, 3.1701988E-05,
-4.3398235E-05, -4.1132327E-05, -4.9803173E-05, 24*0.0000000E+00
XJAC = 150*0.0000000E+00
XJTJ = 6*0.0000000E+00
Ln 1174, Col 66
    
```

Fig. 2. Output of creep analysis by mathematical concept solution

미고결 암석의 Creep 거동

OO광산은 미고결 암반층으로 광체의 강도가 2 MPa 이하로 매우 작고, 암반굴착시 대변형에 의한 지보시기와 유지 등이 매우 어려운 실정이다. 본 광산은 Fig. 3과 같이 하부로부터 역암, M3, Interburden(IE)(화산각력암, 응회암), M3a, Interburden(응회암, 사암 교호대), 사암, M3aa, 응회암, 역암순으로 복잡한 지질구조를 가지고 있다.

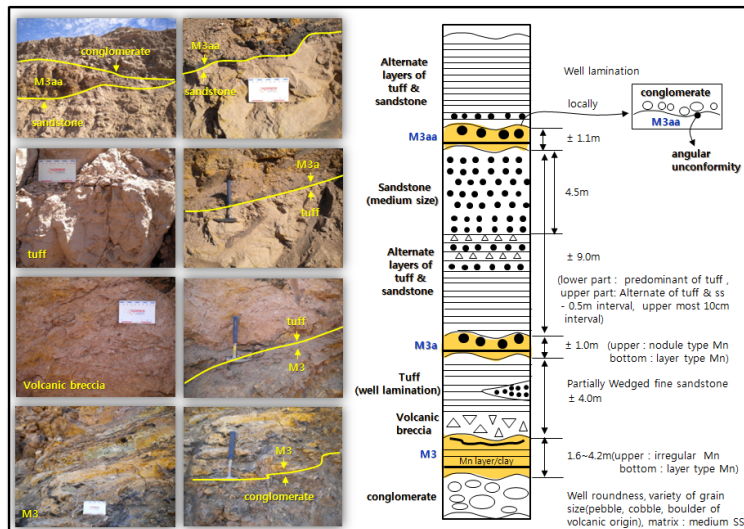


Fig. 3. Stratigraphic columnar section of OO Mine

Manto3 (M3)

M3는 점토질 암석의 미고결층으로 함수율이 30~40% 정도가 되는 암층으로서 Creep 시험결과에 대한 주요 매개변수는 Table 1과 같다. Creep 거동은 Fig. 4~Fig. 6과 같이 실험치(◆)와 계산치(○)가 잘 부합되고 있음을 보여주고 있다.

표에서 σ_{ca} 는 Creep 적용응력을 SR(Strength ratio)은 Creep 적용응력을 일축압축 강도로 나눈 값이다. Burger 모델에 의한 계산치와 실험값은 SSQ가 평균 10^{-7} 범위 이하에서 잘 부합되는 것으로 분석되었다. M3의 경우 평균 적용응력이 일축압축 강도의 30% 이내에서 Creep 거동이 발생하였으며, 10% 수준에서도 Creep이 발생한 것으로 분석되었다.

Table 1. Parameters of Burger's model to Manto 3 creep test

Division	Description	σ_{ca}	SR	Maxwell		Kelvin		SSQ
				E_m (MPa)	η_m (Mpa)	E_k (MPa)	η_k (Mpa)	
M3(O1)	Manto3-Ore	0.58	0.13	3.20E+02	7.85E+06	2.58E+03	6.35E+04	3.32E-09
M3(O2)	Manto3-Ore	0.94	0.21	2.70E+02	1.82E+06	2.92E+03	4.93E+04	2.99E-09
M3(O3)	Manto3-Ore	0.53	0.53	6.50E+01	2.34E+06	3.26E+02	2.53E+04	4.46E-07
Average		0.68	0.29	2.18E+02	4.00E+06	1.94E+03	4.60E+04	4.53E-07

Manto3a (M3a)

M3a는 M3광체를 기준으로 Interburden(IB) 바로 위층에 얇게 분포하는 층으로서 암반 굴착후 쉽게 분리가 될 수 있는 제일 취약한 층이다. Creep 실험결과에 대한 주요 매개변수는 Table 2와 같고 Creep 거동에 대한 Curve fitting 결과는 Fig. 7~Fig. 9와 같다. Burger 모델에 의한 계산치와 실험값은 SSQ가 평균 10^{-7} 범위 이하에서 잘 부합되는 것으로 분석되었다. M3a의 경우 평균 적용응력이 일축압축강도의 60% 이내에서 Creep 거동이 발생 하였으며, 40% 수준에서도 Creep이 발생한 것으로 분석되었다.

Table 2. Parameters of Burger's model to Manto 3a creep test

Division	Description	σ_{ca}	SR	Maxwell		Kelvin		SSQ
				E_m (MPa)	η_m (Mpa)	E_k (MPa)	η_k (Mpa)	
M3a(C1)	Clay siltstone	1.11	0.50	4.30E+02	2.65E+07	2.87E+03	1.67E+05	7.15E-08
M3a(C2)	Clay siltstone	1.11	0.43	4.20E+02	2.46E+07	1.63E+03	9.02E+05	3.80E-08
M3a(C3)	Clay siltstone	2.16	0.83	3.20E+02	9.44E+06	2.99E+03	1.84E+05	1.21E-07
Average		1.46	0.59	3.90E+02	2.02E+07	2.50E+03	4.17E+05	2.30E-07

Interburden (IE)

Interburden은 M3와 M3a의 중간 층으로 두께가 매우 불규칙한 1.8~4.2 m 정도의 두께를 가지고 있다. Creep 시험결과에 대한 Burger 모델의 주요 매개변수는 Table 3과 같고 Creep 거동에 대한 Curve fitting 결과는 Fig. 10~Fig. 12와 같다. 그림에서 Burger 모델에 의한 계산치와 실험값은 SSQ가 평균 10^{-7} 이하에서 잘 부합되는 것으로 분석되었다. Interburden의 경우 평균 적용응력이 일축압축 강도의 40% 정도에서 Creep 거동이 발생하였으며, 27%~60% 수준에서도 Creep이 발생하는 등 Creep의 범위가 제일 컸다.

Table 3. Parameters of Burger’s model to Interburden creep test

Division	Description	σ_{ca}	SR	Maxwell		Kelvin		SSQ
				E_m (MPa)	η_m (Mpa)	E_k (MPa)	η_k (Mpa)	
IB(T1)	Tuff	1.11	0.31	4.00E+02	1.82E+07	1.57E+03	3.35E+05	9.86E-08
IB(T2)	Tuff	2.16	0.60	4.40E+02	2.06E+07	5.22E+03	1.44E+06	2.83E-08
IB(T3)	Tuff	0.53	0.27	2.20E+01	2.62E+06	1.43E+02	1.50E+04	8.00E-07
Average		1.27	0.39	2.87E+02	1.38E+07	2.31E+03	5.96E+05	9.27E-07

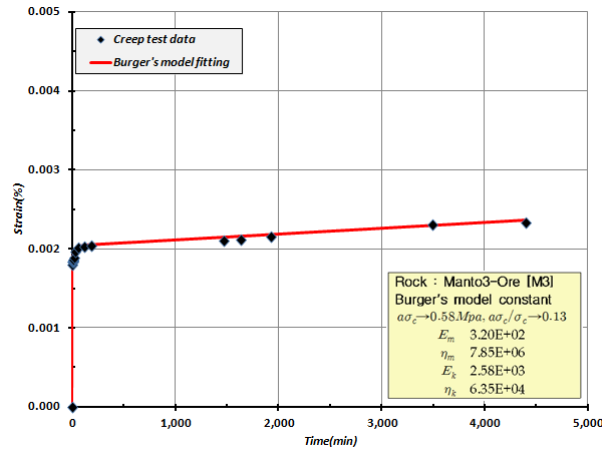


Fig. 4. Creep curve fitting to **M3(O1)**

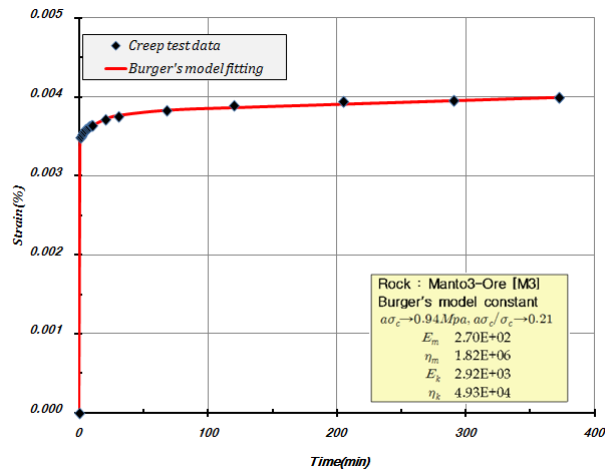


Fig. 5. Creep curve fitting to **M3(O2)**

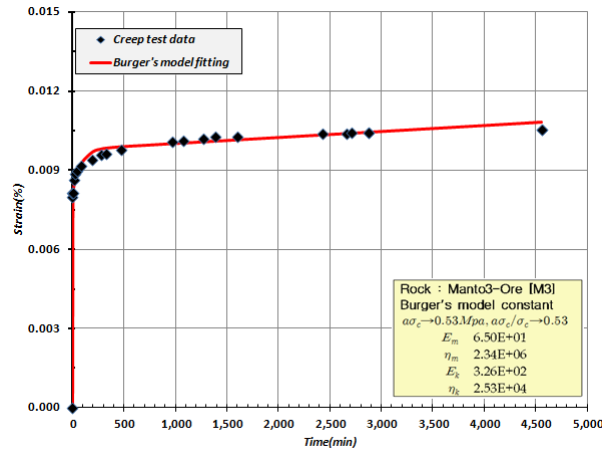


Fig. 6. Creep curve fitting to $M3(O3)$

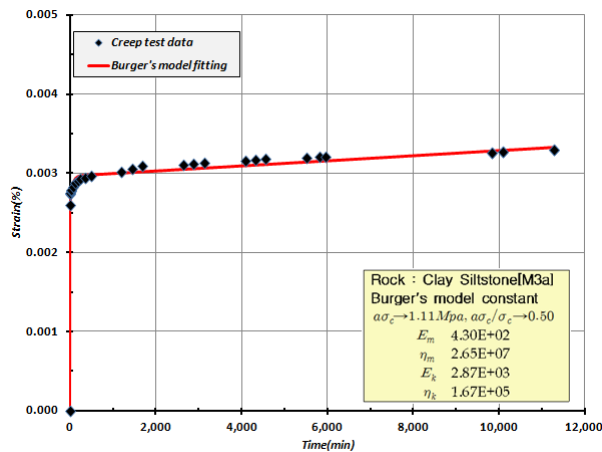


Fig. 7. Creep curve fitting to $M3a(C1)$

3년 가속에 의한 Creep 변형률

OO광산은 미고결 암반층에서 개별광산을 최대 3년 까지 개발하는 것으로 한다. 이 기간동안 대변형에 적합한 최적 지보재 선정 을 위하여 개발구역내 *Burger*모델에 대한 암종별 매개변수를 적용하여 3년간 가속시켰을 때 변형률을 분석하였다. 단일 시험에 대 한 매개변수들의 편차를 줄이고자 각 층서의 암종에 대한 3개씩의 실험값 들의 평균값을 적용하였다.

그 결과 Fig. 13과 같이 본 광산의 채광구역내 주요한 암석의 변형률들은 수렴이 되지 않고 계속적으로 변형률 증가가 되는 것으 로 분석되었다.

특히 광체 $M3$ 는 약 6개월(250,000 min) 정도에서 변형률 5% 까지 도달하여 심각한 *Squeezing* 현상을 발생할 수 있는 것으로 분 석되었다.

IB , $M3a$ 는 시간에 대하여 변형률이 $M3$ 보다 상대적으로 적은 *Creep* 거동을 보였으나, 하부의 $M3$ 층이 변형이 되면 *Roofbolt* 등 이 시공되는 IB 의 *Roofbolt* 체결층도 함께 *Creep* 거동을 함으로써 전체적으로 단면축소가 될 것으로 분석된다. 이렇게 *Creep* 변형

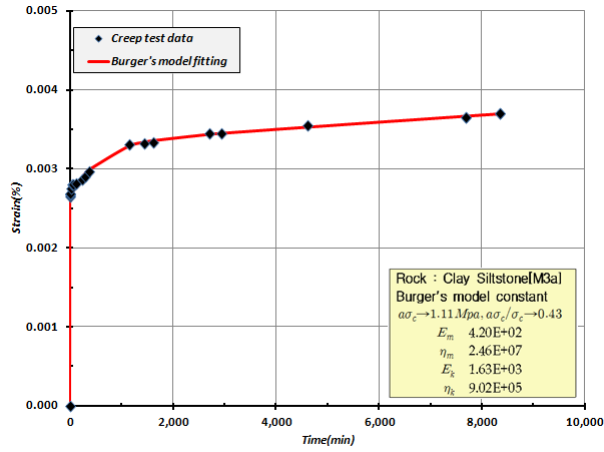


Fig. 8. Creep curve fitting to *M3a* (C2)

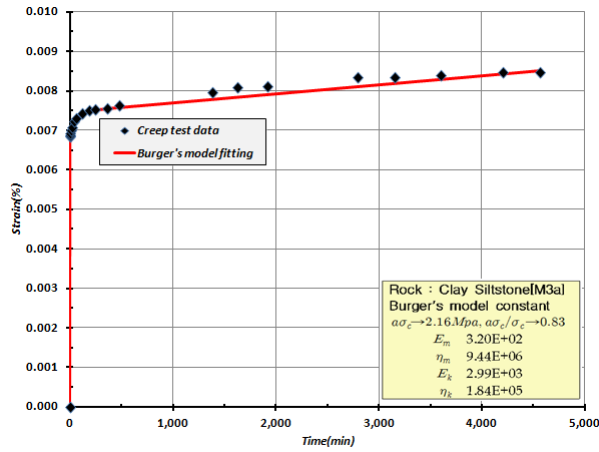


Fig. 9. Creep curve fitting to *M3a* (C3)

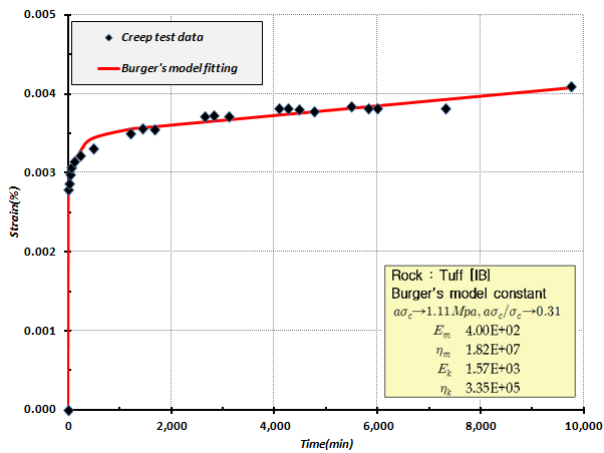


Fig. 10. Creep curve fitting to *IB* (T1)

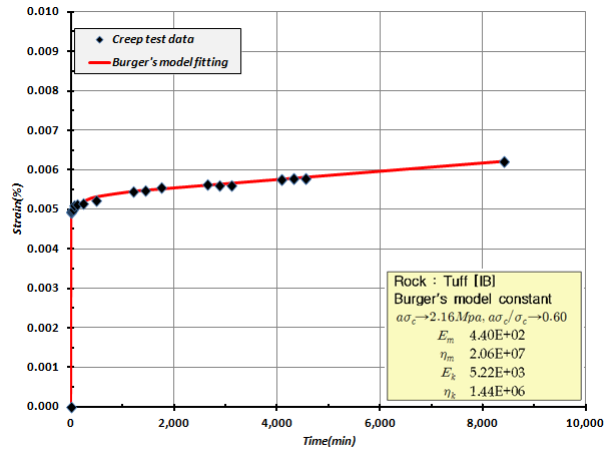


Fig. 11. Creep curve fitting to IB(T2)

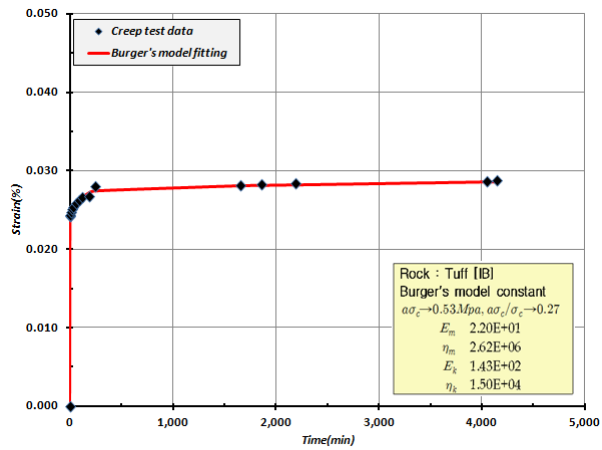


Fig. 12. Creep curve fitting to IB(T3)

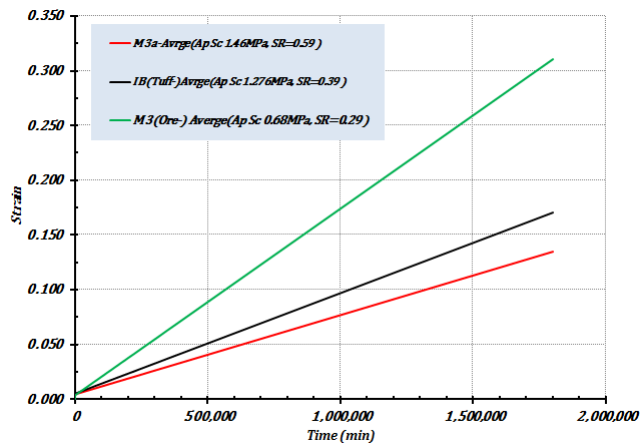


Fig. 13. Creep behaviors by accelerated creep condition for 3 years

률이 증가하는 임반에서 하중유지에 유리한 지보재가 U-beam이다. U-Beam은 대변형 지반에서 작용하중이 지보재의 지보능력을 초과할 때 지보재 자체의 연결장치가 슬라이딩을 일으켜 지보재는 파괴되지 않고 갱도단면 축소만 다소 일어나도록 설계되기 때문에 과지압하 변형률이 큰 갱도유지에 유리하다.

이러한 Creep 거동은 광체 **M3**의 변형거동이 광산의 안정성에 미치는 영향이 제일 크다는 것을 의미한다. 실제로 OO광산은 측면의 Swelling, 바닥의 Heaving 등이 Roof의 컨트롤 보다 더 어려웠다. 따라서 본 광산에서는 Roofbolt에 의한 지보보다는 U-Beam을 이용하여 갱도유지를 하는 것이 더 적절할 것으로 판단되었다.

결론

미고결 암석에 대한 Creep 특성을 분석 하고자 수학적 개념 해를 적용하여 매개 변수를 결정 하였다. 그 결과 일반적인 방법보다 쉽게 물리적 변수들을 결정할 수 있었으며, Curve fitting도 시험값과 계산치들이 서로 잘 부합되었다.

미고결 암석에 대한 Creep 해석결과 광체인 **M3**는 적용응력이 일축압축 강도의 평균 30% 수준에서 Creep 변형이 지속되었고, Roofbolt 등의 체결이 가능한 **IE, M3a** 층의 Creep은 적용응력이 평균 일축압축 강도의 60%, 40% 수준에서 Creep 변형이 계속되었다.

M3, M3a, IE에 대한 3년간 Creep 가속 조건에서 Creep 거동은 수렴하지 않고 지속적인 Creep 변형 거동을 하였다. 특히 광체인 **M3**는 약 6개월(250,000 min) 정도에서 변형률 5% 까지 도달하여 심각한 Squeezing 현상을 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

IB, M3a는 시간에 대하여 변형률이 **M3** 보다 상대적으로 적은 Creep 거동을 보였으나, 하부의 **M3**층이 변형이 되면 Roofbolt 등이 시공되는 **IB**의 Roofbolt 체결 층도 함께 Creep 거동을 함으로써 전체적으로 갱도의 단면 축소가 될 것으로 분석된다.

따라서 본 광산에서는 Roofbolt에 의한 지보 보다는 과지압하 변형률이 큰 갱도유지에 유리한 U-Beam을 적용하여 갱도유지를 하는 것이 더 적절할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 한국광물자원공사의 자체 연구과제인 “미고결 점토질 연약암반의 물리·역학적 특성을 고려한 채광설계 연구”의 일환으로 수행되었음.

Reference

- Donald W. Marquardt, 1963, An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol.11 431-441.
- Hong JS and Jeon S., 2004, Characteristics of Creep Deformation Behavior of Granite under Uniaxial Compression, Tunnel & Underground Space, 14.1, 69-77.

Jacques, Whitford and Associates Limited, 1994, Geotechnical Testing Program BOLEO Copper Project, 15p.

Kim YS, Jung SK, Cha JS, Bang CI, 2003, The Creep Behavior of Shale in Daegu Area, Tunnel & Underground Space, 13.2, 100-107.

Yoon, Y. and Jo Y., 2010, Prediction of Failure Time of Tunnel Applying the Curve Fitting Techniques, Tunnel & Underground Space, 20.2, 97-104.