

계측 자료의 비선형최소자승법을 이용한 파괴시간 예측

윤용균^{1)*}, 김병철²⁾, 조영도³⁾

Failure Time Prediction by Nonlinear Least Square Method with Deformation Data

Yongkyun Yoon, Byoungchul Kim, Youngdo Jo

Abstract Time-dependent behavior is a basic mechanical property of rocks. Predicting the failure time of rock structures by analyzing the time-dependent characteristic is important and problematic. It is tried to predict the failure time of tunnel, slope & laboratory creep test specimen from measured displacement(or strain) and rate with relationship suggested by Voight($\dot{\Omega} = A\Omega^\alpha$, where Ω is a measurable quantity such as strain & displacement and A & α are constants). A & α are estimated through applying the nonlinear least square method to the single and double integrated Voight's equations and utilized to predict the failure time. Predicted failure time is in accordance with real one except minor error. Linear inverse rate method applied to creep strain and rate yields a poor linear correlation of data and precision of predicted failure time is not better than methods using strain and rate.

Key words failure time, nonlinear least square method, linear inverse rate method

초 록 암석의 시간 의존적 거동은 기본적인 역학적 특성으로서 시간 의존적으로 거동을 분석하여 암반구조물의 파괴시간을 예측하는 것은 매우 중요하다. Voight가 제안한 재료 파괴 예측식($\dot{\Omega} = A\Omega^\alpha$, 여기서 Ω 는 변형률이나 변위와 같은 측정 가능한 물리량이고 A & α 는 상수이다)을 이용하여 터널, 사면 및 실내 크리프 시험으로부터 측정된 변위나 변형률로부터 파괴시간을 예측하고자 하였다. Voight식을 1차 및 2차 적분하여 구한 변위속도 및 변위식에 비선형최소자승법을 적용하여 A & α 를 구하였으며 이들 상수는 파괴시간을 예측하는데 사용되었다. 예측된 파괴시간은 실제 파괴시간과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 크리프 변형률과 변형률속도에 선형역속도법을 적용하여 구한 예측 파괴시간은 변형률과 변형률속도를 이용하여 구한 파괴시간보다 오차가 큰 것으로 나타났다.

핵심어 파괴시간, 비선형최소자승법, 선형역속도법

1. 서 론

사면이나 터널과 같은 암반구조물이 파괴되는 경우 파괴시간을 미리 예측할 수 있다면 돌발적인 파괴에 따른 인적 및 물적 피해를 예방하는데 매우 유용할 것이다. 암반 구조물의 변형은 시간 의존적으로 발생하는 경향이 많기 때문에 시간에 따라 발생하는 변형을 관찰

함으로써 파괴를 예측하는 것이 가능하다.

Fukuzono는 실내 사면 파괴 실험을 통해 파괴 직전에 발생하는 변위가속도가 변위속도의 함수로 표현되는 파괴 예측식을 제안하였으며, 파괴시간을 예측할 수 있는 역속도법(Inverse velocity method)을 제시하였다(Fukuzono, 1990). Voight는 사면 파괴 예측에만 사용되는 Fukuzono식을 재인식하여 재료의 일반적인 파괴 과정을 설명할 수 있는 파괴 예측식을 제안한 후 화산 폭발 시기를 예측하는데 사용하였다(Voight, 1988, 1991). 또한 Sousa는 Voight가 제안한 일반적인 파괴 예측식에 다양한 곡선적합기법을 적용하여 크리프 거동이 나타나는 사면들의 파괴시간을 예측하였다(Sousa, 1996).

잠재적으로 위험한 암반 구조물은 파괴 시점 이전의 변형이 파괴의 최종단계에 도달하면 가속되는 특성을

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과 교수

²⁾ 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과

³⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2009년 12월 10일

심사 완료일 : 2009년 12월 21일

게재 확정일 : 2009년 12월 22일

보여준다. Fukuzono나 Voight가 제안한 파괴예측식은 주로 사면 파괴시간을 예측하는데 이용되었지만 암석이나 터널과 같은 암반 구조물의 변형 거동이 크리프 특성을 보인다면 파괴 예측식을 사용하여 파괴시간을 예측하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 사면 파괴나 화산 폭발 예측에 주로 사용되어온 Voight가 제안한 파괴예측식이 터널의 붕괴나 암석의 크리프 파괴 시기 예측에 적용될 수 있는지를 파악하기 위한 해석을 실시하였다. 미국 방사성 폐기물 지하 저장 시설인 Waste Isolation Pilot Plant내의 공동에서 측정된 수직변위 자료(권상기 외, 1999)와 이탈리아 Vajont 댐 사면에서 측정된 변위 자료(Sousa, 1996), 실내 크리프 시험을 통해 얻어진 크리프 변형률 자료에 비선형최소자승법을 적용하여 분석을 실시한 후 얻어진 예측된 파괴시간과 실제 파괴시간을 비교하여 예측 방법의 적합성을 평가하였다.

2. 파괴 예측식

Fukuzono 등은 대규모 사면 모델 실험을 통해 파괴 직전의 변위가속도의 로그값과 변위속도의 로그값은 선형적인 관계가 있음을 알아냈으며, 변위가속도와 변위속도와의 관계를 다음과 같이 표시하였다(Fukuzono, 1990).

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left(\frac{dx}{dt} \right)^m \quad (1)$$

여기서, x 는 표면 변위, t 는 시간, 변수 A 와 m 은 상수이다.

Voight는 사면 파괴 과정을 설명하는 (1)식이 최종 파계 단계에서 재료의 거동을 설명하는 일반적인 파괴 예측식의 특수한 경우라 파악하고 일정한 응력과 온도 조건 하에서 암석, 흙, 콘크리트, 플라스틱, 얼음, 금속과 같은 재료의 파괴 거동을 설명하는 일반적인 관계식을 제안하였다(Voight, 1988, 1989, Sousa, 1996).

$$(\dot{\Omega})^{-\alpha} \cdot \ddot{\Omega} - A = 0 \Rightarrow \ddot{\Omega} = A \cdot (\dot{\Omega})^\alpha \quad (2)$$

여기서 Ω 는 측정 가능한 물리량으로서 변위뿐만 아니라 변형률, AE 발생 횟수 등을 포함한다. $\dot{\Omega}$ 와 $\ddot{\Omega}$ 는 측정된 물리량의 속도 및 가속도를 나타내고, A 와 α 는 상수로서 α 는 파괴의 최종 단계에서 가속 증가에 대한 척도를 나타낸다.

(2)식을 적분하면 속도($\dot{\Omega}$)에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$\alpha < 1$ 인 경우,

$$\dot{\Omega} = [A(\alpha-1)(t_s - t) + (\dot{\Omega}_s)^{(1-\alpha)}]^{-\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3)$$

$\alpha > 1$ 인 경우,

$$\dot{\Omega} = [A(\alpha-1)(t_f - t) + (\dot{\Omega}_f)^{(1-\alpha)}]^{-\frac{1}{1-\alpha}} \quad (4)$$

여기서 t_s 는 임의의 시간, $\dot{\Omega}_s$ 는 임의의 시간 t_s 에서의 속도, t_f 는 파괴시간, $\dot{\Omega}_f$ 는 파괴 시 속도를 나타낸다.

$\alpha > 1$, $\alpha \neq 2$ 인 경우에 대해 (2)식을 이중적분하면 (4)에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Omega = \Omega_o + \frac{1}{A(\alpha-2)} \{ [A(\alpha-1)(t_s - t_o) + (\dot{\Omega}_s)^{(1-\alpha)}]^{-\frac{2-\alpha}{1-\alpha}} - [A(\alpha-1)(t_s - t) + (\dot{\Omega}_s)^{(1-\alpha)}]^{-\frac{2-\alpha}{1-\alpha}} \} \quad (5)$$

여기서 t_o 는 임의의 시간, Ω_o 는 임의의 시간 t_o 에서의 Ω 를 나타낸다.

임의의 시간 $t = t_s$ 에서 $\dot{\Omega} = \dot{\Omega}_s$ 인 경우 파괴시간(t_f)을 (4)식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_f = t_s + \frac{(\dot{\Omega}_s)^{(1-\alpha)} - (\dot{\Omega}_f)^{(1-\alpha)}}{A(\alpha-1)} \quad (6)$$

(6)식에서 $\dot{\Omega}_f \rightarrow \infty$ 로 가정하는 경우 $(\dot{\Omega}_f)^{(1-\alpha)} \rightarrow 0$ 이 되어 (6)식으로부터 $\dot{\Omega}_f$ 가 무한대인 경우의 파괴시간(t_s)을 구할 수 있다.

$$t_s = t_s + \frac{(\dot{\Omega}_s)^{(1-\alpha)}}{A(\alpha-1)} \quad (7)$$

A, α 는 (2)식을 로그($\dot{\Omega}$)-로그($\ddot{\Omega}$)로 나타낸 후 회귀분석하여 구할 수도 있고, (3), (4)식이나 (5)식을 풀어 구할 수도 있다. A, α 를 구한 후 이를 (6)식이나 (7)식에 대입하여 파괴시간을 계산한다.

3. 비선형최소자승법

3.1 자료 처리

사면이나 터널에서 측정된 변위는 연속적으로 증가하는 경향을 보이기도 하지만 변위가 증가하다 감소하는 불연속적인 변형 거동을 나타내기도 하는데 이 경우 변위속도나 변위가속도는 음의 값을 나타낸다. 변위속도가 음의 값으로 계산되는 것을 방지하기 위하여 변위 값이

이전 변위 값보다 작은 경우 변위 측정 자료에 smoothing 기법을 적용하여 변위 값들이 연속적으로 증가하도록 조정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 측정된 변위 값이 이전 변위 값보다 더 작다면 그 둘의 평균값을 대신하여 사용하는 평균화기법을 적용하여 초기 변위 자료에 대한 smoothing을 실시하였다(Sousa, 1996).

$$\begin{aligned} \Omega_{i+1} < \Omega_i \text{인 경우,} \\ \Omega_i = \frac{\Omega_{i+1} + \Omega_i}{2}, \quad t_i = \frac{t_{i+1} + t_i}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 i 는 1부터 n 까지의 초기값을 나타낸다. 측정 자료가 변위로 주어진 경우 smoothing된 변위 값들에 다음 식과 같이 유한차분을 적용하여 변위속도를 구한다.

$$\dot{\Omega}_j = \frac{\Omega_{i+1} - \Omega_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad t_j = \frac{t_{i+1} + t_i}{2} \quad (9)$$

여기서 i 는 1부터 n 까지의 smoothing기법이 적용된 이후의 값을, j 는 1부터 $n-1$ 까지를 나타낸다.

3.2 A, α 의 결정

(3)식과 (5)식은 변수 A, α 에 대해 비선형적인 관계를 나타내기 때문에 비선형회귀법을 적용하여 A, α 를 구할 필요가 있다. 회귀식을 도출할 수 있는 여러 방법 중에 대표적으로 사용되는 것이 최소자승법이다. 최소자승법은 회귀식으로부터 계산된 값과 측정값과의 차이를 제곱하여 모두 더한 값, 즉 잔차의 제곱합이 최소가 되도록 최적의 회귀식을 결정하는 방법이다.

(5)식을 이용하여 A, α 를 결정하는 경우 (5)식은 회귀 모형이 된다. (5)식을 회귀식의 변수로 이루어진 함수로 변환하여 표현하면 다음과 같다(Sousa, 1996).

$$\Omega(t_i) = a_4 - \frac{1}{a_1(1+a_2)} \{ [a_1 a_2 (t_o - t_*) + a_3^{a_2}]^{1+\frac{1}{a_2}} - [a_1 a_2 (t - t_*) + a_3^{a_2}]^{1+\frac{1}{a_2}} \} \quad (10)$$

여기서 $a_1 = A$, $a_2 = 1 - \alpha$, $a_3 = \dot{\Omega}_*$, $a_4 = \Omega_o$ 이다. 측정값을 Ω_i 라 하면 잔차의 제곱합(E)은 다음과 같이 표시된다.

$$E = \sum_{i=1}^n [\Omega_i - \Omega(t_i)]^2 \quad (11)$$

잔차의 제곱합이 최소가 되기 위해서는 회귀식의 변수인 $a_j (j=1, 4)$ 에 대한 E의 편미분값이 0이 되어야 된다.

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0 \quad (12)$$

(12)식을 해석학적으로 풀어 해를 구하기는 어렵기 때문에 수치해석적으로 (11)식이 최소가 되는 a_j 를 구해야 된다. 본 연구에서는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용하여 a_j 를 구하였다(Sousa, 1996).

측정 자료로 변위속도가 주어지고 (3)식을 이용해 A, α 를 구하는 경우 (3)식이 회귀식이 되며 (3)식을 회귀식의 변수로 표현된 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{\Omega}(t_i) = [a_1 (t_* - t) + a_3^{a_2}]^{\frac{1}{a_2}} \quad (13)$$

여기서 $a_1 = A(\alpha - 1)$, $a_2 = 1 - \alpha$, $a_3 = \dot{\Omega}_*$ 이다. a_j 를 구하는 과정은 변위 측정값이 주어진 경우와 동일하다.

4. 비선형최소자승법의 적용 예

미국의 초 우라늄 방사성 폐기물 지하처분시설인 Waste Isolation Pilot Plant 내의 한 공동에서 측정된 수직 변위 자료(권상기 외, 1999)와 1963년에 붕괴된 이탈리아 Vajont 댐 사면의 한 지점에서 측정된 변위 측정 자료(Sousa, 1996) 및 실내 크리프 시험을 실시하여 구한 크리프 변형률에 비선형최소자승법을 적용하였다. 회귀 분석을 통해 A 와 α 값을 구하고 예상 파괴시간을 결정하여 실제 파괴시간과 비교함으로써 비선형최소자승법의 적합성을 평가하였다.

4.1 Waste Isolation Pilot Plant(WIPP)

Waste Isolation Pilot Plant(WIPP)는 미국의 방위할 동에서 발생하는 초 우라늄 방사성 폐기물을 처분하기 위한 저장시설로서 다년간에 걸쳐 각종 안정성 실험이 실시되었다. 이 시설은 New Mexico주 남동쪽에 위치해 있으며 약 650 m의 깊이의 압염층에 존재한다. 본 연구에서는 높이 4 m, 폭 10 m인 시설 내의 한 공동에서 측정된 수직 변위 자료를 사용하여 파괴시간을 예측하기 위한 비선형최소자승법의 현장 적용성을 평가하였다.

그림 1은 공동 내에서 측정된 수직 변위 변화 거동을 나타낸 것으로 파괴 직전까지 측정된 변위 자료를 보여 준다. 그림을 보면 전형적인 크리프 거동이 나타남을 알 수 있으며 1차, 2차 크리프뿐만 아니라 현장 측정에서는 보기 어려운 3차 크리프 거동이 잘 나타나고 있다. 이 공동은 변위 측정이 시작된 이후 2856일째인 1991년 2월 4일에 파괴되었다. 파괴시간을 예측하기 위한 분석대상 기간으로 2차 크리프의 마지막 부분과 파괴

직전까지의 3차 크리프 구간을 포함하는 2780.3~2844.7 일을 선정하였다.

그림 2(a)는 시간에 따른 변위의 변화 양상을 보여준다. 그림에서 원 기호는 실제 측정 변위 값, 실선은 비선형최소자승법에 따른 적합 곡선, 점선은 실제 파괴시간을 나타낸다. 해석 결과에 따르면 $A=1.2$, $\alpha=1.694$ 로 나타났고 2860.3일이 지난 뒤 파괴될 것으로 예측되어 실제 파괴시간인 2856일과는 4.3일 정도의 오차를 보인다. 그림 2(b)는 그림 2(a)에 제시된 변위 자료를 (9)식을 이용해 변위속도로 전환한 후 비선형최소자승법을 적용한 결과를 나타낸다. 변위속도를 계산할 때 smoothing기법을 적용하지 않은 변위 자료를 이용하였다. 해석 결과 $A=2.02$, $\alpha=1.926$ 로 나타났다. 예측 파괴시간은 2858.8일로 해석되어 실제 파괴시간과는 2.8일의 차이를 타나내 변위 자료를 이용하는 것보다 좀더 정확한 결과를 보여주었다.

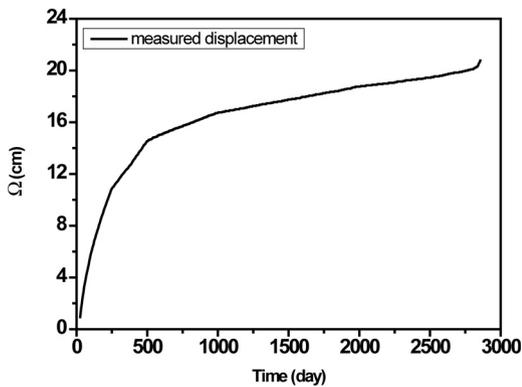
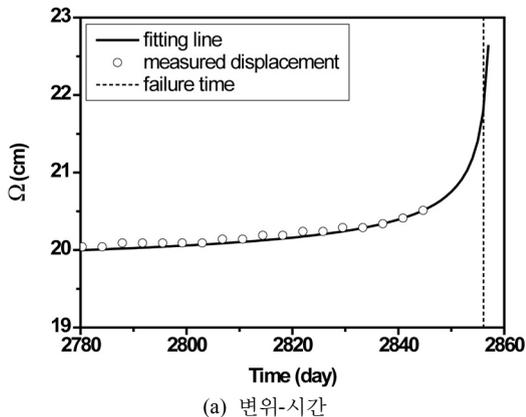


그림 1. Waste Isolation Pilot Plant 내 공동에서 측정된 수직 변위



(a) 변위-시간

4.2 Vajont 댐 사면

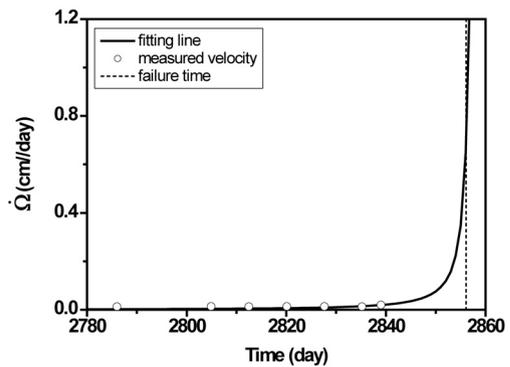
Vajont 댐은 이탈리아에 위치한 댐이다. 댐 완공 후 상류의 저수량이 증가하면서 저수지의 왼쪽 사면이 붕괴되면서 약 $250 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 토사가 저수지 안으로 무너져 내려 댐 월류가 발생되었고 이로인해 댐 하류에 있던 마을이 물에 잠겨 약 2000명이 사망하였다. 파괴된 사면은 석회암층으로 이루어져 있고 미끄러짐은 대부분 층리면을 따라 발생하였다. 본 연구에서는 파괴된 사면의 한 지점에서 측정된 변위 자료를 해석 자료로 이용하였다.

그림 3(a)은 변위-시간 간의 관계를 나타낸 그래프이다. 해석 결과 $A=0.0407$, $\alpha=1.97$ 로 나타났다. A, α 를 이용하여 구한 예측 파괴시간은 282.8일로 실제 파괴시간인 281.9일과는 0.9일의 차를 보였다. 그림 3(b)에는 smoothing기법을 적용하여 변환한 변위 자료를 이용하여 구한 변위속도의 변화를 시간에 따라 도시한 결과가 표시되어 있다. $A=0.0382$, $\alpha=2.01$ 로 나타났으며 예측된 파괴시간은 282.4일로 분석되어 실제 파괴시간과는 0.5일의 차이를 보여 변위를 이용한 예측 결과보다는 정확한 결과를 보이지만 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

4.3 크리프 시험

실내 크리프 시험을 수행하여 3차 크리프 곡선을 획득하고 파괴 예측 해석을 실시하였다.

시험에 사용된 크리프 시험장치는 유압으로 하중을 가하고 적용된 하중을 강성 스프링으로 유지하는 방식으로 용량은 20톤이다. 삼척시 가곡면 덕동리에 위치한 가곡광산 탐광용 시추 코어에서 획득한 화강반암을 사용하여 크리프 시험용 시험편을 제작하였으며, 시험편의 일축압축강도는 171 MPa로 나타났다.



(b) 변위속도-시간

그림 2. Waste Isolation Pilot Plant 측정 자료에 비선형최소자승법을 적용한 경우

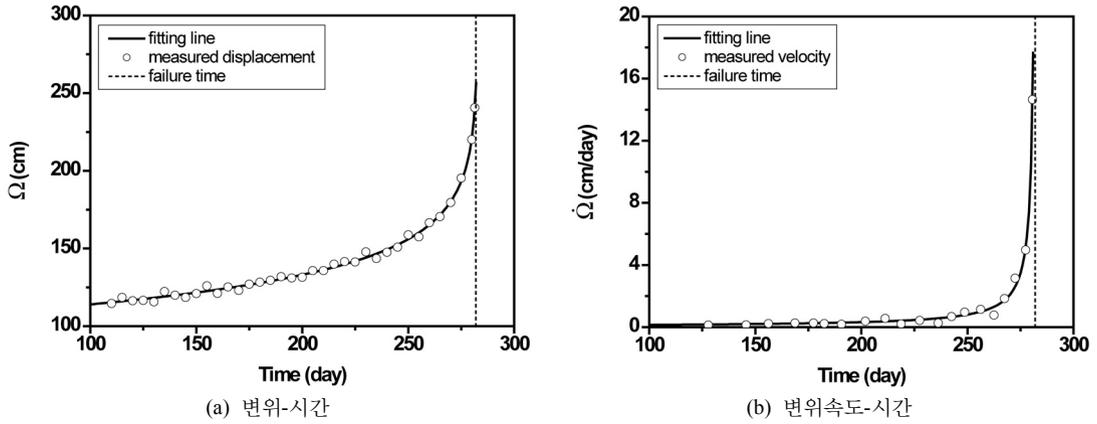


그림 3. Vajont 댐 사면의 측정 자료에 비선형최소자승법을 적용한 경우

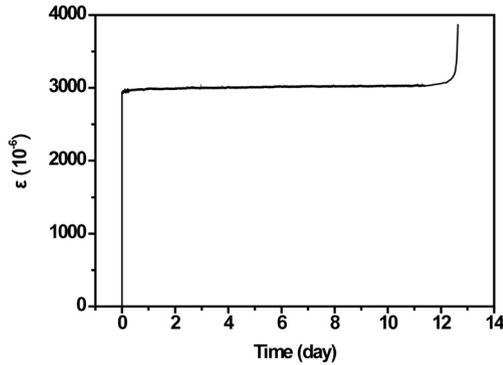


그림 4. 크리프 시험 결과

크리프 시험은 일축압축강도의 93%에 달하는 일정 하중을 가하여 수행하였다. 크리프 시험 결과 12.64일 만에 파괴가 발생하였다. 그림 4에 크리프 시험 결과가 표시되어 있다. 그림에서 시간 ‘0’에서 직선으로 표시된 부분은 탄성변형률을 나타낸다. 그림을 보면 탄성변형률과 3차 크리프가 상대적으로 크게 나타나 1, 2차 크리프는 나타나지 않는 것처럼 보이지만 1, 2차 크리프 구간만 확대하여 보면 1, 2차 크리프도 나타남을 알 수 있다.

파괴시기를 예측하는데 크리프 시험 시작부터 파괴 시까지의 전 기간에 걸쳐 측정된 자료가 필요하지는 않기 때문에 본 연구에서는 2차 크리프 구간의 마지막 단계와 파괴 직전까지의 3차 크리프 구간을 포함하는 11.389~12.603일을 분석 대상으로 선정하였다. 그림 5(a)에는 시간에 따른 변형률의 변화 양상이 표시되어 있다. 해석 결과 $A = 0.2174$, $\alpha = 1.584$ 로 나타났고, 예측 파괴시간은 12.64로 해석되어 실제 파괴시간과 정확하게 일치하였다. 그림 5(b)에는 그림 5(a)에 제시된 변형

률을 변형률속도로 전환하여 구한 변형률속도-시간 간의 그래프가 표시되어 있다. 변형률 측정 자료가 계속 증가하는 양상을 보이기 때문에 변형률속도를 구함에 있어 smoothing 기법을 적용하지 않았다. 분석 결과 $A = 0.9828$, $\alpha = 1.397$ 로 나타났으며 예측 파괴시간은 12.68일로 조사되어 실제 파괴시간 12.64일과는 약간의 차이를 보였다.

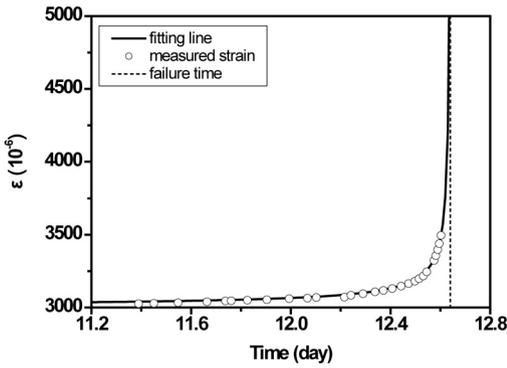
5. 토 의

5.1 측정 자료의 측정 기간에 따른 예측 파괴시간의 변화

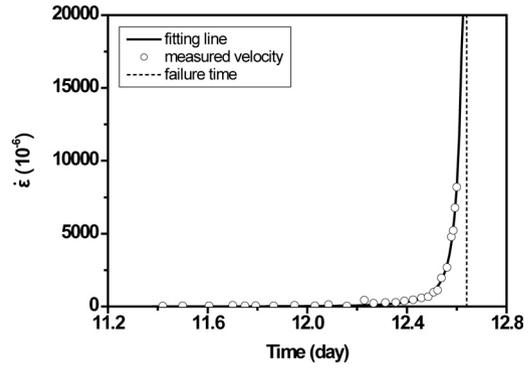
실내에서 시험을 하는 경우에는 3차 크리프까지 측정 하는 것이 가능하지만 현장 측정의 경우 계측 장비의 망실이나 인위적인 측정 오류에 의해 3차 크리프가 나타나는 기간까지 측정이 불가능한 경우가 발생한다. 따라서 파괴가 발생하는 어느 시점까지 측정 자료가 확보 되어야 실제 파괴시간에 근접하는 예측 파괴시간 결과를 얻을 지를 평가할 필요가 있다.

그림 4에 표시된 크리프 시험 결과를 이용하여 측정 자료의 기간에 따른 예측 파괴시간의 정확성 정도를 평가하였다. 그림 5(a)에 2차 크리프의 마지막 부분과 파괴 전까지의 3차 크리프 구간의 변형률을 포함하는 전 측정 기간(11.389~12.603일)에 대한 결과가 표시되어 있기 때문에 여기서는 3차 크리프가 시작되기 직전이면 서 2차 크리프 마지막 구간에 해당되는 11.389~12.407일과 3차 크리프가 시작되는 구간인 11.389~12.546일을 분석 대상으로 하였다.

그림 6(a)는 3차 크리프가 시작되기 직전까지의 측정 기간(11.389~12.407일)에서 측정된 변형률에 대한 분석 결과를 나타내며 $A = 0.054$, $\alpha = 1.85$ 이고 예상 파괴시간

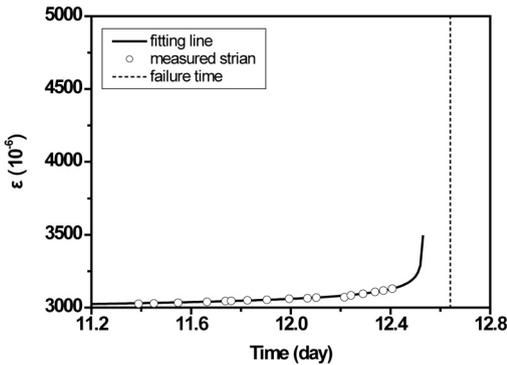


(a) 변형률-시간

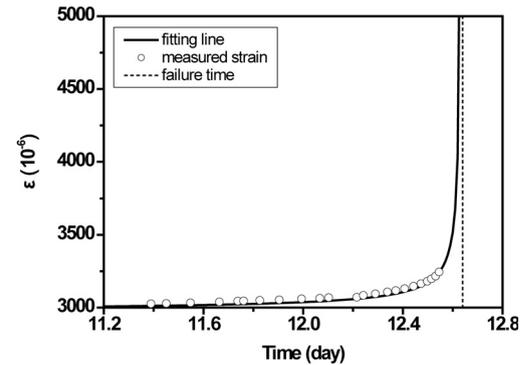


(b) 변형률속도-시간

그림 5. 크리프 변형률 자료에 비선형최소자승법을 적용한 경우

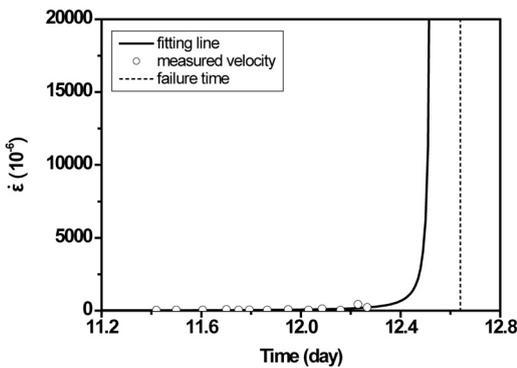


(a) 측정기간이 11.389~12.407일인 경우

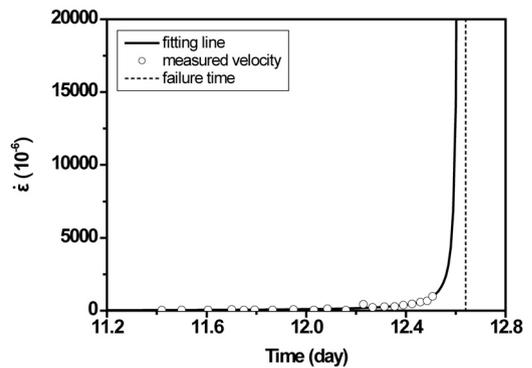


(b) 측정기간이 11.389~12.546일인 경우

그림 6. 크리프 변형률 측정기간에 따른 예측 파괴시간의 변화



(a) 측정기간이 11.42~12.27일인 경우



(b) 측정기간이 11.42~12.51일인 경우

그림 7. 크리프 변형률속도 측정기간에 따른 예측 파괴시간의 변화

은 12.53일로 나타나 실제 파괴시간인 12.64일과 상당한 차이를 나타낸다. 그림 6(b)에는 3차 크리프가 시작되는 구간까지의 측정 기간(11.389~12.546일)에 대한 분석 결과가 표시되어 있다. $A=0.2191$, $\alpha=1.583$ 이고

예상 파괴시간은 12.64일로 나타나 실제 파괴시간과 일치하는 것으로 분석되었다.

그림 7(a)에는 그림 6(a)에 제시된 변형률-시간 결과를 변형률속도-시간으로 전환하여 분석한 결과가 표시

되어 있고, 분석 기간은 3차 크리프가 시작되기 직전 구간인 11.42~12.266일이다. $A=0.186$, $\alpha=1.639$ 이고 예측 파괴시간은 12.48일로 나타나 실제 파괴시간과는 상당한 차이를 보였다. 그림 7(b)에는 3차 크리프가 시작되는 구간인 11.42~12.507일에서 측정된 변형률속도-시간 분석 결과가 표시되어 있다. $A=0.0542$, $\alpha=1.784$ 로 분석되었으며 예측 파괴시간은 12.62일로 나타나 실제 파괴시간에 근사한 것으로 평가되었다.

예측 파괴시간이 실제 파괴시간에 근접하기 위하여 어느 시점까지 측정된 자료가 필요한지를 분석한 결과 2차 크리프 구간에서 측정된 결과를 사용하는 경우 변형률 또는 변형률속도를 사용한 해석에서 모두 예측된 파괴시간이 실제 파괴시간과 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 3차 크리프 구간에 해당되는 기간에서 측정된 변형률 자료를 사용하는 경우 11.389~12.546일과 11.389~12.603일에 예측된 파괴시간이 실제 파괴시간과 정확히 일치하는 것으로 나타나 파괴 직전까지가 아닌 3차 크리프 구간이 일부라도 포함된 측정 자료를 얻는 경우 실제 파괴시간에 근접한 예측 파괴시간을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 변형률과 변형률속도를 이용한 예측 파괴시간을 비교하면 변형률을 사용하는 경우가 좀 더 정확한 파괴시간을 예측할 수 있었다.

5.2 역속도법(Inverse velocity method)과의 비교

파괴시간을 예측함에 있어 파괴 예측 함수의 상수인 A, α 를 구해 (6)식이나 (7)식을 이용하여 파괴시간을 해석학적으로 구하는 방법도 있지만 역속도-시간 간의 그래프를 이용한 도해법을 적용하여 구할 수도 있다.

측정 물리량의 속도를 구하는 식인 (3)식의 역수를 취하면 역속도-시간에 대한 관계식을 다음 식과 같이 구할 수 있다(Voight, 1988, 1989, Sausa, 1996).

$$(\dot{\Omega})^{-1} = \frac{1}{[A(\alpha-1)(t_* - t) + \dot{\Omega}_*^{(1-\alpha)}]^{1/(1-\alpha)}} \quad (14)$$

$$= [A(\alpha-1)(t_* - t) + \dot{\Omega}_*^{(1-\alpha)}]^{-\frac{1}{\alpha-1}}$$

(14)식에서 $\alpha > 1$ 인 경우 $t_* = t_f$, $\dot{\Omega}_* = \dot{\Omega}_f$ 라 가정하여 (14)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\dot{\Omega})^{-1} = [A(\alpha-1)(t_f - t) + \dot{\Omega}_f^{(1-\alpha)}]^{-\frac{1}{\alpha-1}} \quad (15)$$

상기 식에서 파괴 시 속도를 $\dot{\Omega}_f \rightarrow \infty$ 로 하는 경우 $(\dot{\Omega}_f)^{(1-\alpha)} \rightarrow 0$ 이 되어 (15)식은 Fukuzono가 제안한 역속도-시간 식과 동일하게 된다(Fukuzono, 1990). $\alpha < 2$ 인 경우 (15)식에 따른 그래프는 아래로 볼록한 형태를

보이고, $\alpha > 2$ 인 경우에는 위로 볼록한 형태를 나타낸다. $\alpha = 2$ 인 경우는 그래프가 직선의 형태를 나타낸다.

다양한 재료의 크리프 시험에 따른 결과뿐만 아니라 측정된 사면 표면 변위의 경우에도 $\alpha \approx 2.0$ 인 경우 (Voight, 1989, Fukuzono, 1990)가 많기 때문에 $\alpha = 2$ 로 가정하는 것이 가능하다. 또한 파괴 시의 속도($\dot{\Omega}_f$)가 무한대에 가까울 것이라고 가정하면 파괴 시 역속도($\dot{\Omega}_f^{-1}$)는 0에 가깝게 된다. 따라서 $\alpha = 2$, $(\dot{\Omega}_f)^{-1} = 0$ 인 조건을 (15)식에 대입하면 역속도-시간 간의 선형식을 얻을 수 있다.

$$(\dot{\Omega})^{-1} = A(t_f - t) \quad (16)$$

(16)식은 역속도-시간 간의 그래프를 이용하여 사면의 파괴시간을 예측하는 도해법을 처음으로 제안한 Fukuzono의 역속도법과 동일하다. 역속도법은 측정된 변위를 역변위속도로 전환한 후 이들 점들을 직선으로 연결하여 시간 축과 교차하는 점을 찾아 파괴 시간을 결정하는 방법이다(Fukuzono, 1990), 절차가 단순한 관계로 사면의 파괴시기를 예측하는데 자주 사용되고 있다(Crosta & Agliardi, 2003, Petley, 2004, 정용복 외, 2008, 신미경 외, 2009).

측정된 역속도 값들이 흩어져 나타나는 경우 역속도법을 그대로 적용할 수는 없기 때문에 본 연구에서는 선형회귀분석을 이용하였다. 그림 5(b)에 제시된 변형률속도를 역변형률속도로 전환한 후 선형회귀분석을 적용한 결과가 그림 8에 표시되어 있다. 회귀분석 결과 예측 파괴시간은 12.73일로 나타났다. 실제 파괴시간은 12.64일이고, 변형률과 변형률속도를 가지고 예측한 파괴시간은 각기 12.64일, 12.68이기 때문에 역속도법을 이용하여 예측한 파괴시간이 가장 큰 오차를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그림 8을 보면 파괴 시점에 인접한

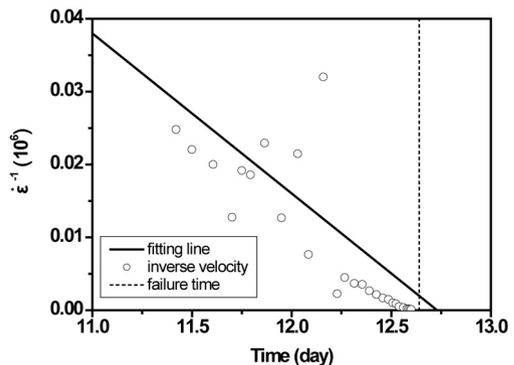


그림 8. 역속도법에 따른 예측 파괴시간

시간대에서 측정된 자료들은 선형적인 경향을 나타내지 않기 때문에 이들만을 가지고 회귀분석을 하는 경우에는 좀 더 정확한 파괴시간을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

역속도법은 간편하게 파괴시간을 예측할 수 있다는 장점이 있지만 측정된 역속도 값들이 흩어져 있거나 진동하는 형태로 나타나는 경우 선형적인 거동을 나타내는 구간을 선택하기가 어렵고, 선택된 구간에 따라 예측 파괴시간이 달라진다는 단점을 가지고 있다. 또한 실제 파괴 시의 속도($\dot{\rho}_f$)는 유한한 값을 갖지만 역속도법에서는 무한한 값을 갖는 것으로 가정하기 때문에 실제 파괴시간보다 예측 파괴시간이 더 늦게 나타나는 덜 보수적인 결과를 도출하게 된다.

6. 결론

본 연구에서는 암반 구조물의 파괴를 예측하기 위하여 암석의 역학적 특성중 하나인 시간 의존적 변형 거동을 이용하였다. 시간 의존적인 변형과 변형속도 자료에 비선형최소자승법을 적용하여 파괴예측식의 매개변수인 α 와 A 값을 구하였다. 이를 이용하여 암반 구조물의 예측 파괴시간을 계산하고, 실제 파괴시간과의 비교를 통해 파괴예측식의 적합성을 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) Waste Isolation Pilot Plant내의 한 공동에서 측정된 수직변위 자료를 분석한 결과 변위 및 변위속도를 이용하여 예측된 파괴시간이 각기 2860.3일 및 2858.8일로 나타나 실제 파괴시간인 2856일과 비교하면 차이가 없는 것으로 나타났다.
- 2) 이탈리아 Vajont 댐 사면에서 측정된 변위 자료에 대한 해석 결과 변위와 변위속도를 이용하여 예측된 파괴시간은 각기 282.8일과 282.4일로 나타나 실제 측정된 파괴시간인 281.9일과 비교할 때 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.
- 3) 실내 크리프 시험 결과를 이용한 파괴시간 분석 결과 예측 파괴시간은 12.64일, 변형률속도를 이용한 예측 파괴시간은 12.68일로 나타나, 각 예측방법이 실제 파괴시간 12.64일과 비교하여 높은 정확성을 보였다.
- 4) 측정 기간에 따른 파괴시간 예측의 정확성을 알아보기 위하여 2차 크리프 구간만 포함하는 경우와 3차

크리프 초기 부분을 포함하는 측정기간에 대해서 크리프 시험 결과를 분석한 결과 2차 크리프 구간만 포함된 자료를 분석하는 경우 상당한 오차가 발생하는 것으로 나타났으며, 3차 크리프 구간의 일부라도 포함된 측정 자료를 얻는 경우 실제 파괴시간에 근접한 예측 파괴시간을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

- 5) 역속도법을 실내 크리프 시험 결과 분석에 적용한 결과 비선형최소자승법을 적용한 경우보다 예측 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지·자원기술 개발사업(제2세부과제)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권상기, 강철형, 최종원, 1999, 미국 Waste Isolation pilot plant에서의 시간변형 거동 예측, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 9.3, pp. 175-184.
2. 신미경, 엄정기, 조태진, 2009, 모형실험을 통한 암반사면의 파괴거동분석 및 파괴시기예측, 2009 한국암반공학회 학술발표회 논문집, pp. 37-44.
3. 정용복, 선우춘, 이종범, 2008, 대규모 노천 석탄광산의 한계사면높이 결정과 사면파괴 예측을 위한 계측자료 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 18.6, pp. 447-456.
4. Crosta, G.B. and F. Agliardi, 2003, Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements, Can. Geotech. J.40, pp. 176-191.
5. Fukuzono, T., 1990, Recent studies on time prediction of slope failure, Landslide News 4, pp. 9-12.
6. Petley, D.N., 2004, The evolution of slope failures: mechanisms of rupture propagation, Natural Hazards and Earth System Sciences 4, pp. 147-152.
7. Sousa, J., 1996, Nonlinear regression modelling and forecasting of accelerating slope deformation, Ph. D. Dissertation, The Pennsylvania State University.
8. Voight, B., 1988, A method for prediction of volcanic eruptions, Nature 332, pp. 125-130.
9. Voight, B., 1989, A relation to describe rate-dependent material failure, Science 243, pp. 200-203.
10. Voight, B. and R.R. Cornelius, 1991, Prospects for eruption prediction in near real-time, Nature 350, pp. 695-698.



윤용균

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 043-649-1318
E-mail: yoon63@semyung.ac.kr
현재 세명대학교 소방방재학과 교수



김병철

2007년 세명대학교 자원환경공학과 공
학사
Tel: 043-649-7379
E-mail: netun@naver.com
현재 세명대학교 대학원 환경안전시스
템공학과 석사과정



조영도

1977년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1982년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2007년 광운대학교 화학공학과 공학박사
Tel: 042-868-3223
E-mail: jyd@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구
본부 자원탐사개발연구실 책임연구원