

가곡광산 화강암의 크리프 특성

윤용균^{1)*}, 김병철²⁾, 조영도³⁾

Creep Characteristics of Granite in Gagok Mine

Yong-Kyun Yoon, Byung-Chul Kim, Young-Do Jo

Abstract The time-dependent behaviour of rock is very important characteristics which can be utilized as basic input data for underground mine design or in predicting a long-term stability of underground rock mass structures. In this study, creep tests under uniaxial compression were carried out for the granite specimens sampled in Gagok Mine. Burgers model, Griggs and Singh creep laws were used to simulate the measured creep strain. Through comparing the measured creep behaviour with the approximated creep behaviors from Burgers model, Griggs and Singh creep laws, it is shown that Griggs creep law results in the best approximation of granite in Gagok Mine.

Key words Time-dependent behaviour, Creep tests, Burgers model, Griggs creep law, Singh creep law

초 록 암석의 시간의존성 거동은 지하 광산 설계나 지하 암반구조물의 장기 안정성 평가를 위한 기본 입력자료로써 사용되는 매우 중요한 특성이다. 본 연구에서는 가곡광산에서 채취한 화강암 시험편에 대해 일축압축 크리프시험을 실시하였다. 측정된 크리프 변형률을 모사하기 위하여 Burgers 모형, Griggs 크리프법칙, Singh 크리프법칙을 사용하였으며 이 중에서 Griggs 크리프법칙이 가곡광산 화강암의 실제 크리프 변형 거동을 가장 우수하게 모사하는 것으로 나타났다.

핵심어 시간의존성 거동, 크리프시험, Burgers 모형, Griggs 크리프법칙, Singh 크리프법칙

1. 서 론

암석의 시간의존적인 변형 거동을 파악하는 것은 터널, 광산 갱도, 광주 등과 같이 지속적으로 상재하중을 받는 암반 구조물의 장기적인 안정성을 평가하는데 있어 매우 중요하다. 시간의존성 거동을 분석하기 위하여 자주 사용되는 시험으로는 응력완화시험, 크리프시험, 하중속도나 변형률속도를 달리한 재하시험 등을 들 수 있지만, 장기적인 시간의존성 변형 특성을 평가하는데 있어서 크리프시험이 자주 사용된다(Li & Xia, 2000). 화강암과 같은 취성암석에서의 크리프 변형률은 탄성 변형률, 소성변형률, 비탄성적인 팽창의 조합에 의해 발생하며 결과하는 크리프 거동은 1차 크리프(천이 크리

프), 2차 크리프(정상 크리프), 3차 크리프(가속 크리프)의 형태로 나타난다(Boukharov et al., 1995).

측정된 크리프 거동을 안정성 평가에 사용하기 위해서는 적절한 형태의 관계식으로 특성화하는 것이 필요하다. 특성화하는 방법에는 유변학적인 모형을 사용하는 방법과 경험적인 크리프법칙을 사용하는 방법이 있다. 김재동 등(1983)은 Burgers 모형을 적용하였으며, 김영수 등은 Burgers 모형과 Griggs, Li & Xia, Singh 이 제안한 크리프법칙들을 사용하여 크리프 거동을 분석하였다(김영수 등, 2003). 3차 크리프는 적용 응력 수준에 따라 발생하지 않는 경우도 많으며 나타나더라도 순간적으로 발생하기 때문에 측정하기가 쉽지 않아 암석의 크리프 특성 모사에 자주 사용되는 Burgers 모형의 경우 2차 크리프까지만 고려하며 경험적 크리프법칙들의 대부분도 3차 크리프를 포함하지 않는다(Farmer, 1983).

본 연구에서는 20ton 용량의 크리프시험기를 제작하여 크리프시험을 실시하였고, 시험편으로는 가곡광산 선곡갱 주변의 탐사용 시추공에서 채취한 화강암을 사

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과 교수

²⁾ 주한엔지니어링(주)

³⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2010년 10월 18일

심사 완료일 : 2010년 10월 25일

게재 확정일 : 2010년 10월 25일

용하였다. 크리프 응력 수준을 결정하기 위하여 다단계 크리프시험을 실시하였다. 다단계 크리프시험과 예비시험을 통해 단일단계 크리프시험에 적용할 크리프 응력은 무결합 일축압축강도의 60, 71, 82, 93(%)로 하였다. 측정된 크리프 변형 거동을 모사하기 위하여 Burgers 모형, Griggs 크리프법칙, Singh 크리프법칙을 적용하였다.

2. 크리프 거동 및 모사식

2.1 크리프 거동

암석에 일정한 하중이 가해지는 경우 변형률이 계속적으로 증가하는 시간의존성 거동을 크리프라 한다. 암석에 가해지는 응력 수준에 따라 크리프 거동은 달라지게 된다. 안정한 균열의 전파가 조금씩 발생할 만큼의 낮은 응력이 작용하는 경우에는 크리프 속도가 감소하여 파괴가 발생하지 않게 된다. 반대로 불안정한 균열의 전파가 일어날 만큼 큰 응력이 가해지는 경우 크리프 속도가 증가하여 빠른 시간 내에 파괴가 발생하게 된다. 불안정한 균열 전파가 발생하는 응력 보다 약간 작은 응력을 가하는 경우 안정한 균열의 전파가 불안정한 균열 전파로 전이하면서 Fig. 1과 같은 이상적인 크리프 거동을 나타낸다(조태진 외, 2008, Farmer, 1983, Jaeger et al., 2007).

Fig. 1에서 ϵ_0 는 적용 응력에 따른 순간적인 탄성변형률을 나타낸다. 1차 크리프단계(Primary creep)에서는 크리프속도가 감소하고, 2차 크리프단계(Secondary creep)

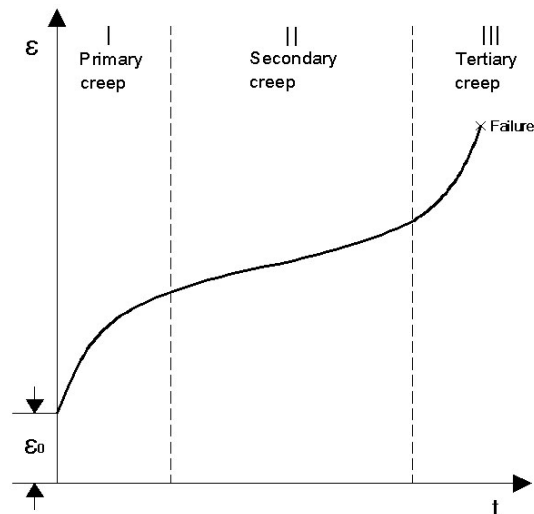


Fig. 1. Idealized creep curve

에서는 크리프속도가 상수로 나타나며, 3차 크리프단계(Tertiary creep)에서는 크리프속도가 증가하여 파괴에 이르게 된다. 1차 크리프단계에서 적용 응력을 제거하는 경우 발생한 크리프 변형률은 완전히 회복되나, 2차 크리프단계에서 적용응력을 제거하는 경우에는 일부만 변형이 회복되고 일부는 영구변형률로 남게 된다.

Fig. 1에 제시된 이상적인 크리프 거동을 모사할 수 있는 관계식은 다음과 같은 형태로 표시될 수 있다(Jaeger et al., 2007).

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1(t) + \mathcal{N} + \epsilon_3(t) \tag{1}$$

여기서 ϵ_0 는 순간적인 탄성변형률, $\epsilon_1(t)$ 는 1차 크리프 변형률, \mathcal{N} 는 2차 크리프 변형률, $\epsilon_3(t)$ 는 3차 크리프 변형률을 나타낸다.

2.2 크리프 모사식

유변학적 모형

암석의 시간의존적인 변형 거동을 설명하기 위하여 탄성을 나타내는 spring 요소체, 점성을 나타내는 dashpot 요소체, 소성을 나타내는 slider 요소체를 적절하게 결합한 유변학적 모형이 자주 사용된다. spring과 dashpot를 직렬로 연결한 Maxwell 모형은 순간적인 탄성변형률과 2차 크리프를 적절하게 모사할 수 있지만 지수적으로 감소하는 1차 크리프를 설명할 수 없다. spring과 dashpot를 병렬로 연결한 Kelvin 모형은 지수적으로 감소하는 1차 크리프와 선형적인 2차 크리프를 잘 나타내지만 순간적인 탄성변형률을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

암석의 크리프 거동을 모사하기 위하여 Maxwell 모형과 Kelvin 모형을 직렬로 연결한 Burgers 모형이 자주 사용된다. Burgers 모형에 σ_0 의 일정 응력이 가해지는 경우 발생하는 총변형률(ϵ)은 Maxwell 모형에 의한 변형률(ϵ_M)과 Kelvin 모형에 발생하는 변형률(ϵ_K)의 합으로 표시된다(Lama & Vutukuri, 1978).

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_M + \epsilon_K \\ &= \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{3\eta_M}t + \frac{\sigma_0}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{3\eta_K}t\right) \right] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 하첨자 M과 K는 각기 Maxwell 모형과 Kelvin 모형을 나타내고, E는 영률, η는 점성계수를 나타낸다.

(2)식에서 $\frac{\sigma_0}{E_M}$ 은 순간적인 탄성변형률, $\frac{\sigma_0}{3\eta_M}t$ 는 2차 크리프, $\frac{\sigma_0}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{3\eta_K}t\right) \right]$ 는 1차 크리프를 나타낸

다. Fig. 2에는 Burgers 모형의 역학적모형과 변형거동이 표시되어 있다.

경험적 크리프법칙

암석에 대해 실시된 크리프 실험 결과를 모사할 수 있는 다양한 형태의 회귀식이 제시되었지만 그 중에서도 석회암, 활석, 셰일 등에 대한 크리프 시험을 통해 관찰된 1차 크리프와 2차 크리프를 모사할 수 있는 Griggs의 경험적 크리프법칙이 자주 사용되고 있다. Singh은 대리암에 대한 크리프 실험을 통해 멱함수의 형태로 1, 2차 크리프 거동을 모사할 수 있는 식을 제안하였다(Lama & Vutukuri, 1978, Farmer, 1983, Chin & Rogers, 1987).

$$\text{Griggs 크리프법칙; } \epsilon = \epsilon_e + Bnt + Dtm \quad (3)$$

$$\text{Singh 크리프법칙; } \epsilon = at^n \quad (4)$$

여기서 ϵ_e 는 순간적인 탄성변형률, B, D, a, n은 상수이다. 본 연구에서는 Griggs와 Singh이 제안한 크리프법칙을 이용하여 가곡광산 화강암에 대한 크리프 상수를 평가하였다.

3. 시험장치 및 크리프 응력 결정

크리프시험에 사용된 암석시험편을 강원도 삼척시에 위치한 가곡광산에서 채취하였다. 가곡광산은 화강반암과의 접촉부에 형성된 연·아연 스퀴른광상으로 1969년에 영풍광업이 개발하였으며 1987년에 폐광되었다가 현재 재개발을 위한 갱도 배수 및 탐광작업이 진행되고

있다. 가곡광산의 지질구조를 보면 함백향사의 동단부에 속하고 화강편마암을 기저로 하여 이의 상부에 양덕동의 장산규암층, 모봉슬레이트층, 풍촌석회암층, 화절층, 동점규암층, 두무동층이 등이 분포하며 이들을 관입한 화강반암 및 석영반암으로 구성되어 있다(정용복 외, 2010).

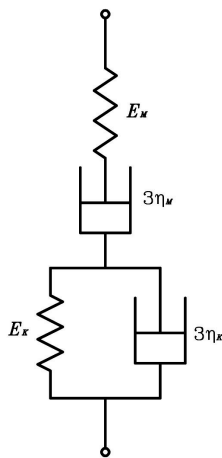
시험편 코어는 선곡갱 주변의 탐사용 시추공 내 172~178m 심도에서 채취한 중립질 백운모 화강암이고, 코어의 직경은 BQ(40mm)이다. Table 1에는 시험에 사용된 화강암의 물성이 표시되어 있고, 물성은 5개 시험편의 평균값이다.

3.1 시험장치

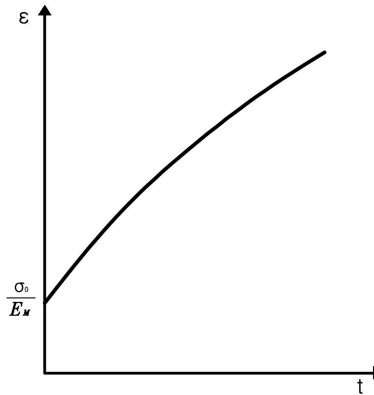
본 연구에서는 일정한 하중을 적용하기가 쉬우면서도 장시간에 걸쳐 하중을 안정적으로 유지할 수 있는 코일

Table 1. Material properties of granite specimens in Gagok Mine

Property	Value	
Specific gravity	2.64	
Absorption ratio (%)	0.13	
Elastic wave velocity (m/s)	P-wave	4,740
	S-wave	3,500
Uniaxial compressive strength (MPa)	171	
Young's modulus (GPa)	38	
Poisson's ratio	0.24	
Brazilian tensile strength (MPa)	12	

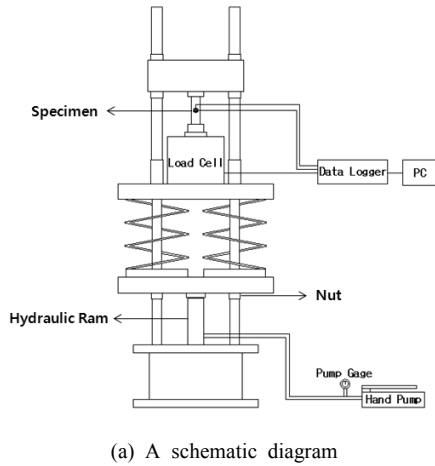


(a) Mechanical model



(b) Creep strain-time curve

Fig. 2. Burgers model



(a) A schematic diagram

(b) A photograph

Fig. 3. An apparatus for creep test(After 김병철, 2010)

스프링방식을 채택하여 크리프 시험기를 제작하였다(Fig. 3 참조). 크리프 시험기에 설치된 시험편에 원하는 하중을 적용하기 위하여 먼저 유압펌프로 소요 하중을 가한 후 적용 하중에 비례하여 스프링이 수축하면 스프링 고정판 하부에 설치된 너트를 조정함으로써 스프링 작용에 의해 일정 하중을 유지할 수 있게 된다. 크리프 시험기에 사용된 유압펌프는 핸드펌프이기 때문에 재하속도를 일정하게 유지하는 것이 용이하지 않았지만 가급적 1MPa/s의 재하속도를 유지하려고 하였다. 크리프 시험기의 최대 하중용량은 20ton이다. 시험편에 발생하는 변형률은 시험편에 부착된 스트레인게이지와 연결된 동적변형률측정기를 이용하여 측정하였으며 sampling time 은 초당 5회로 하였다(김병철, 2010).

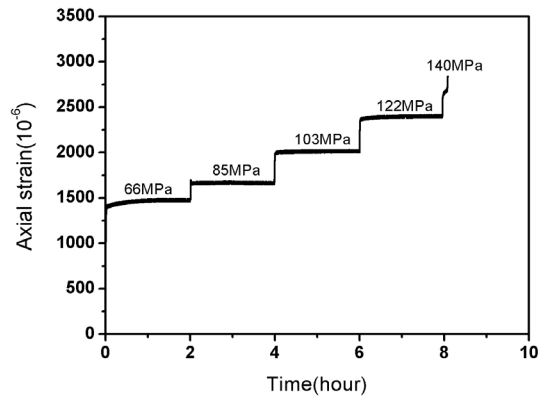


Fig. 4. Multi-step creep test

3.2 크리프 응력 결정

시험편에 적용할 크리프 응력을 결정하기 위해서는 1차 크리프만 나타나고 2차 크리프는 발생하지 않는 크리프한계를 결정할 필요가 있다(정태중, 1996). 크리프 한계를 평가하기 위하여 다단계 크리프시험을 실시하였다. Fig. 4에는 다단계 크리프 시험에 따른 변형 거동이 표시되어 있다. 그림에서 보듯이 5단계에 걸쳐 적용 응력을 증가시키면서 실험을 실시하였다. 각 단계별 적

용 응력인 66, 85, 103, 122, 140MPa은 각기 무결암 일축압축강도의 38, 49, 60, 71, 82%에 해당된다. 각 재하 단계마다 적용 응력을 2시간 동안 유지하였다. 5단계에서는 하중을 증가시킨 후 바로 파괴가 발생하여 전형적인 크리프 특성을 얻을 수 없었다. 그림을 보면 1단계에서는 1차 크리프만 나타나고 2차 크리프는 발생하지 않았으며 2단계에서부터 2차 크리프가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 1단계 적용응력인 66MPa(무결

Table 2. Stress levels applied to specimens

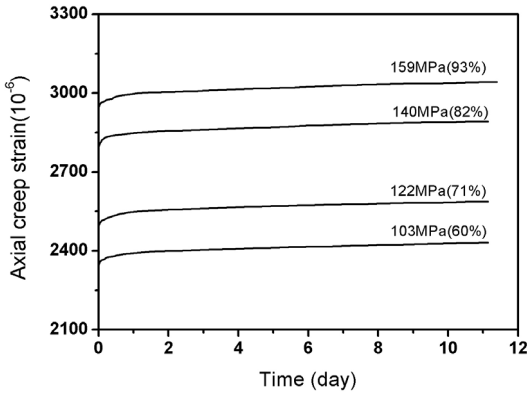
No. of specimens	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Applied stress (MPa)	103	122	140	159
Percentage of applied stress to uniaxial compressive strength of intact rock (%)	60	71	82	93

암 일축압축강도의 38%)과 2단계 적용응력인 85MPa (무결암 일축압축강도의 49%) 사이가 가곡광산 화강암의 크리프한계로 볼 수 있다. 본 연구에서는 다단계 크리프시험과 단일단계 크리프 예비시험 결과를 참조하여 크리프 응력을 결정하였으며 Table 2에는 결정된 크리프 응력이 표시되어 있다.

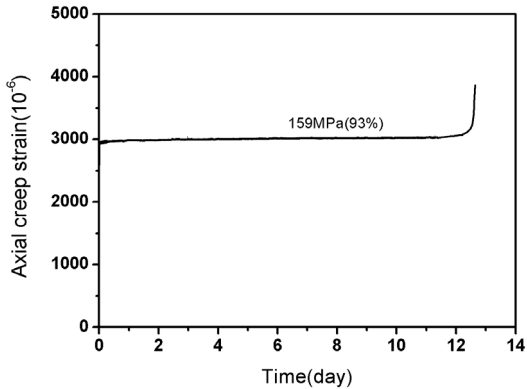
4. 결과 및 고찰

4.1 크리프 변형 거동

본 연구에서 수행한 4개의 크리프 시험에서 무결암 일축압축강도의 93%(159MPa)를 적용한 No. 4 시험편에서만 12.64일만에 파괴가 발생하였다. 예비 실험을 통해 크리프한계 이상의 응력을 적용하는 경우 각 응력 수준에서의 크리프 변형 거동이 상호 유사하다는 점을 고려하여 No. 1, 2, 3 시험편의 경우에는 크리프 응력 지속기간을 11일 정도로 하였다. Fig. 5(a)에는 각 시험편



(a) Creep curves measured for about 11 days



(b) Creep curve for No. 4 specimen measured to failure

Fig. 5. Creep strain vs. time

에 대한 크리프 변형 거동이 표시되어 있고, Fig. 5(b)에는 파괴 시까지 측정된 No. 4 시험편의 크리프 변형 거동이 나타나 있다. 그림을 보면 각 시험편에 1차 및 2차 크리프가 발생하였으며, No. 4 시험편의 경우 3차 크리프도 나타났음을 알 수 있다. No. 1, 2, 3, 4 시험편에 크리프 하중을 적용하는 순간 발생한 순간적인 탄성변형률은 각기 2319, 2469, 2769, 2919($\mu\epsilon$)로 나타났다. 적용 응력과 순간적인 탄성변형률 간의 관계가 Fig. 6에 표시되어 있으며 그림에 제시된 회귀식으로부터 순간적인 탄성변형률은 적용 응력수준에 의존함을 알 수 있다.

4.2 경험적 크리프법칙에 대한 크리프 상수

각 시험편에서 측정된 크리프 변형 거동에 Griggs와 Singh의 크리프법칙을 적용한 결과가 Fig. 7에 표시되어 있다. 그림에서 보듯이 Griggs와 Singh 크리프법칙은 실제 크리프 거동을 잘 묘사하는 것으로 나타났다. Table 3에는 각 크리프법칙에 대한 크리프 상수가 표시되어 있다. Griggs 크리프법칙과 Singh 크리프법칙의 적용에 따른 결정계수(R^2)를 비교해 보면 Griggs 크리프법칙을 적용한 경우가 Singh 크리프법칙을 적용한 경우보다 결정계수가 더 큰 것으로 나타나고 결정계수의 크기도 1에 가까워 실제 크리프 변형 거동을 묘사하는데 대단히 적합하다는 것을 알 수 있다.

Griggs 크리프법칙에 있는 상수 B, D는 응력에 의존하기 때문에 적용 응력 수준이 증가함에 따라 증가할 것으로 예상된다. Table 3을 보면 D는 응력에 따라 전반적으로 증가하는 것으로 나타나지만 B는 응력 수준과 뚜렷한 연관성을 보이지 않는다. Singh 크리프법칙의 상수인 a도 크리프 응력에 따라 증가해 응력의존성

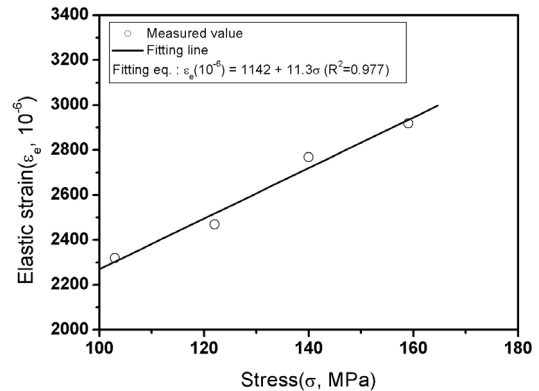


Fig. 6. Relation between creep stress and instantaneous elastic strain

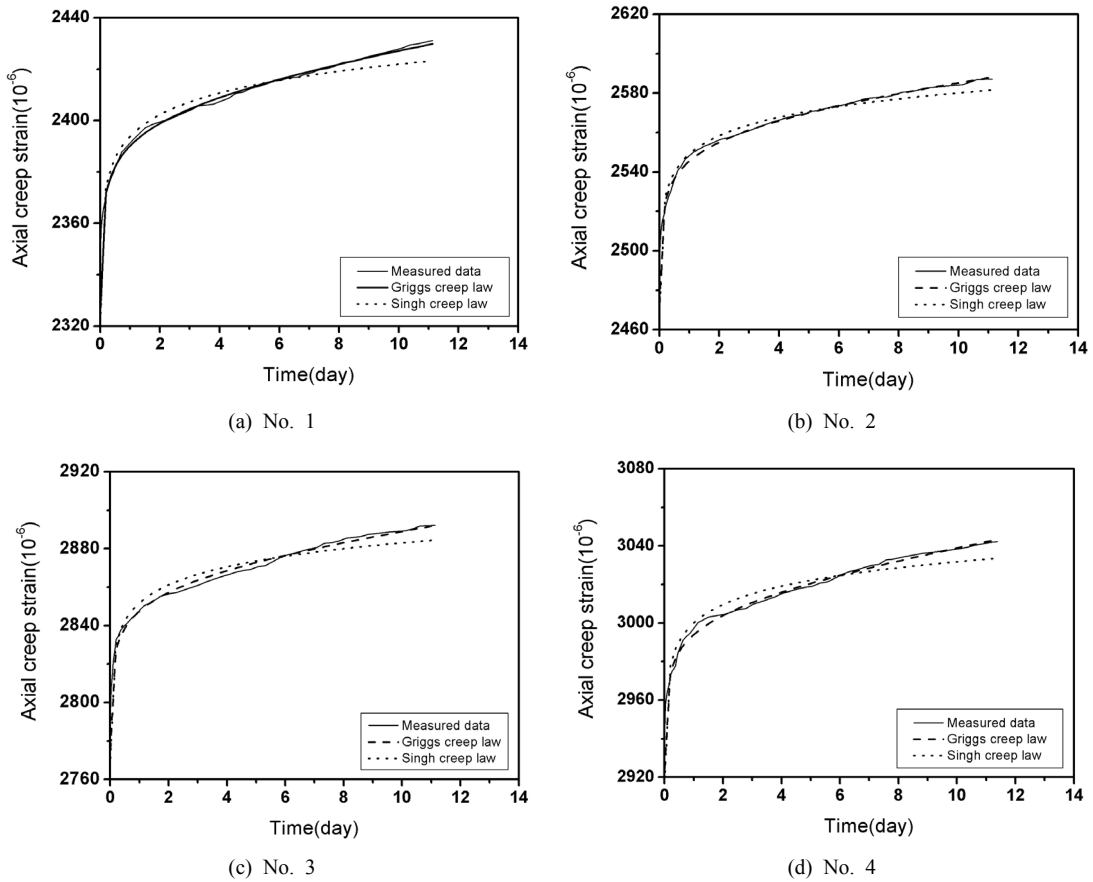


Fig. 7. Fitting curves approximated by Griggs and Singh creep laws

Table 3. Creep constants for empirical creep laws

No. of specimens	Griggs creep law				Singh creep law		
	ϵ_c (10^{-6})	B (10^{-6})	D (10^{-6})	R^2	a (10^{-6})	n	R^2
No. 1	2,389	10.40	1.44	0.996	2,394	0.0051	0.986
No. 2	2,544	11.66	1.42	0.996	2,549	0.0052	0.988
No. 3	2,846	11.58	1.63	0.995	2,852	0.0047	0.984
No. 4	2,992	11.13	2.13	0.996	3,000	0.0046	0.977

상수임을 알 수 있지만 n의 경우에는 명확한 경향을 보이지 않는다.

1차 크리프 단계에서 2차 크리프 단계로 천이하는 경우 천이점에서는 1차 크리프의 기울기와 2차 크리프의 기울기가 같아질 것으로 예상되기 때문에 $d(Bnt)/dt = d(Dt)/dt$ 의 관계로부터 2차 크리프 시작 시간을 알 수 있다(조래훈과 김교원, 2009). Table 3에서 보듯이 Griggs 크리프

법칙이 실제 크리프 거동을 잘 묘사하기 때문에 Griggs 크리프법칙으로부터 구한 1차 크리프와 2차 크리프 항에 상기의 관계를 적용하여 2차 크리프 시작 시간을 계산하면 No. 1, 2, 3, 4 시험편 각각에 대해서 2차 크리프 시작 시간은 각기 7.2일, 8.2일, 7.1일, 5.2일 인 것으로 나타났다. 대체적으로 적용 응력 수준이 높을수록 1차 크리프에서 2차 크리프로의 천이가 빨라짐을 알 수

있다. 이러한 결과는 다단계 재하시험에서 하중수준이 높을수록 대체적으로 2차 크리프로의 천이시간이 빨라진다는 결과(조래훈과 김교원, 2009)와 유사한 것으로 나타났다.

4.3 Burgers 모형의 유변학적 상수

Fig. 8에는 측정 자료에 Burgers 모형의 지배방정식 (식 (2))을 적용한 결과가 표시되어 있다. Fig. 8에 제시

된 회귀식을 이용하여 구한 Maxwell 모형과 Kelvin 모형의 유변학적 상수가 Table 4에 나타나 있다. Burgers 모형의 유변학적 상수들 중 탄성계수인 E_M 과 E_K 는 크리프 하중이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 점성계수인 η_M 과 η_K 는 No. 3 시험편의 경우만 제외하면 응력에 따라 증가하는 것으로 나타나 Burgers 모형의 유변학적 상수들은 응력에 의존한다고 판단할 수 있다.

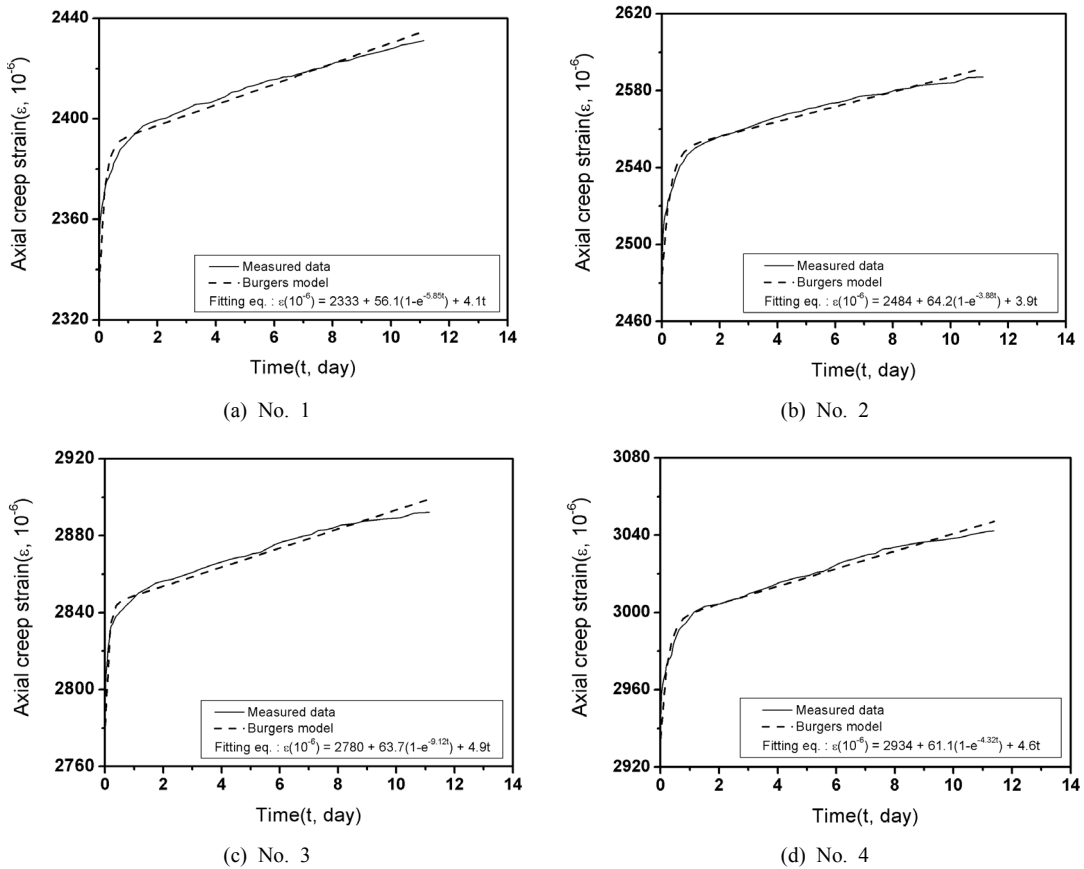


Fig. 8. Fitting curve approximated by Burgers model

Table 4. Rheological constants for Burgers model

No. of specimens	Rheological constants				
	E_M (GPa)	η_M (10^3 GPa · day)	E_K (10^3 GPa)	η_K (10^3 GPa · day)	R^2
No. 1	44	8.36	1.84	0.105	0.975
No. 2	49	10.5	1.90	0.163	0.979
No. 3	50	9.4	2.20	0.080	0.984
No. 4	54	11.6	2.60	0.201	0.979

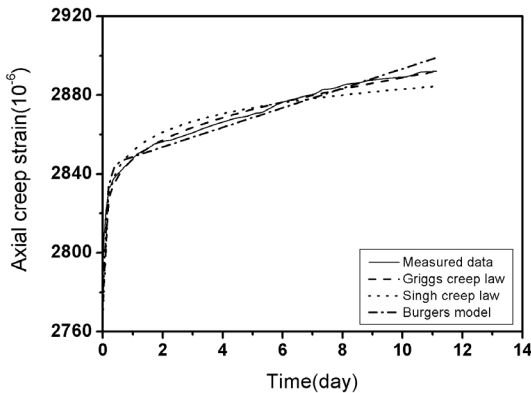


Fig. 9. Fitting curves approximated by Griggs & Singh creep laws, and Burgers model for No. 3 specimen

결정계수로만 본다면 Burgers 모형, Griggs 크리프법칙, Singh 크리프법칙 중 Burgers 모형이 실제 크리프 거동을 묘사하는데 제일 불량한 것으로 나타나지만 직접적인 비교를 위해 No. 3 시험편에 대한 크리프 거동을 묘사한 결과가 Fig. 9에 표시되어 있다. 그림을 보면 Griggs 크리프법칙이 실제 크리프 거동을 거의 정확하게 묘사하는 것으로 나타나고 있다. Burgers 모형과 Singh 크리프법칙이 예측한 크리프 변형률 곡선은 전반적으로 실제 크리프 거동으로부터 벗어나고 있음을 알 수 있다. Burgers 모형의 경우 1차 크리프 단계에서는 실제보다 작은 크리프 변형률을 2차 크리프 단계에서는 실제보다 큰 크리프 변형률을 예측하고, Singh 크리프법칙은 Burgers 모형과 반대의 경향을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 가곡광산 시추용 코어에서 획득한 화강암 시험편을 대상으로 크리프 시험을 실시하였다. 크리프시험에 사용된 시험장치는 코일스프링방식을 이용한 것으로 하중용량은 20톤이다. 다단계 크리프시험을 통해 단일단계 크리프시험에 적용할 크리프 응력을 결정하였으며 그 크기는 무결암 일축압축강도의 60, 71, 82, 93(%)로 하였다. 측정된 시간에 따른 크리프 변형률을 묘사하기 위하여 유변학적 모형 중 암석의 크리프 거동을 기술하는데 자주 사용되는 Burgers 모형을 선정하였으며, 경험적 크리프법칙 중 Griggs 크리프법칙과 Singh 크리프법칙을 사용하였다. 이들 모형과 크리프법칙으로부터 얻어진 유변학적 상수 및 크리프 상수들은 장기간 유지 관리가 필요한 운반경도의 안정성을 평가하는데 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 크리프시험으

로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 일정 응력을 가하는 순간 발생하는 순간적인 탄성변형률은 응력의 크기에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) Griggs 크리프법칙에 있는 상수 중 2차 크리프의 기울기를 나타내는 상수 D는 대체적으로 적용 응력수준에 의존하는 것으로 나타났다.
- 3) Griggs 크리프법칙을 이용하여 1차 크리프에서 2차 크리프로의 천이시간을 계산한 결과 적용 응력 수준 60, 71, 82, 93(%) 시험편 각각에 대해서 7.2일, 8.2일, 7.1일, 5.2일로 나타나 대체적으로 적용 응력수준이 높을수록 1차 크리프에서 2차 크리프로의 천이가 빨라지는 것으로 나타났다.
- 4) Burgers 모형의 유변학적 상수들은 적용 응력수준에 따라 대체적으로 증가하는 것으로 나타나 응력에 의존하는 것으로 판단할 수 있다.
- 5) Burgers 모형, Griggs 크리프법칙, Singh 크리프법칙 중 Griggs 크리프법칙이 가곡광산 화강암의 실제 크리프 변형 거동을 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호 : 2008RRD11P0330202009)로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김병철, 2010, 암석의 크리프 특성 및 크리프 변형률에 비선형 최소자승법을 적용한 파괴 시간 예측, 세명대학교석사학위논문, 46p.
2. 김영수, 정성관, 차주석, 방인호, 2003, 대구지역 세일의 크리프 특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 13.2, pp. 100-107.
3. 김재동, 이정인, 김재국, 1983, 삼척탄좌 상하반사암의 Creep 거동에 관한 유변학적 연구, 대한광산학회지 20, pp. 153-160.
4. 정용복, 선우춘, 박찬, 이병주, 천대성, 이동길, 조영도, 2010, 폐광산 개발을 위한 암반공학적 광산 안정성 평가. 2010 한국암반공학회 추계학술발표회 발표집, pp. 129-132.
5. 정태중, 1996, 의성 소분지에 분포하는 백악기 사암의 크리프 시험, 한국지구과학회지 17.2, pp. 109-118.
6. 조래훈, 김교원, 2009, 다단계 재하시험에 의한 함안층 적색 세일의 크리프특성, 지질공학회지 19.2, pp. 165-175.
7. 조태진, 윤용균, 이연규, 장찬동, 2008, 21C 암반역학, 건설정보사, pp. 232-233.
8. Boukharov, G.N., M.W. Chanda and N.G. Boukharov,

- 1995, The three processes of brittle crystalline rock creep, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 32.4, pp. 325-335.
9. Chin, H-P. and J.D. Rogers, 1987, Creep parameters of rocks on an engineering scale, Rock Mech. Rock Eng. 20, pp. 137-146.
10. Farmer, I., 1983, Engineering behaviour of rocks(2ed), Chapman & Hall, London, pp. 120-128.
11. Jaeger, J.G., N.G.W. Cook and R.W. Zimmerman, 2007, Fundamentals of rock mechanics(4ed), Blackwell Publishing, Singapore, pp. 268-270.
12. Lama, R.D. and V.S. Vutukuri, 1978, Handbook of mechanical properties of rocks(Vol. 3), Trans Tech Publications, Clausthal, pp. 215-246.
13. Li, Y. and C. Xia, 2000, Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, pp. 467-475.



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 공학사
 2010년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과 공학석사
 Tel: 031-478-5510
 E-mail: netun@naver.com
 현재 주한엔지니어링(주) 사원



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 광물자원연구본부 자원탐사개발연구실 책임연구원