

화강암의 열 크립 거동에 관한 연구

장명환¹⁾ · 양형식²⁾

A Study on the Thermal Creep Behavior of Granite

Myoung-Hwan Jang and Hyung-Sik Yang

ABSTRACT In order to get the information of the deformational behavior of rock masses with time in waste disposal repository, it is necessary to measure the relationships between stress and strain and time for temperature. A creep law is used in conjunction with the elastic moduli to calculate stress and displacement following waste emplacement. Exponential-time law's parameters consist of stress and temperature. In this study, thermal creep test was carried out for Whangdeung granite. The measured creep deformation behavior was well explained by exponential time law and generalized Kelvin's rheological model. Mechanical coefficients for exponential-time creep law showed the clear tendency of temperature dependent while those for Kelvin's model didn't.

1. 서 론

지하구조물에서 장·단기적인 목적에 따라 안정성을 확보하기 위해서는 암반변형의 시간의존성을 예측하는 것이 매우 중요하다. 이러한 목적을 충족시키기 위한 시험법¹⁾과 그 해석기법^{2,3)} 및 거동식들이⁴⁾ 연구되었으며, 국내에서도 김재동 등⁵⁾에 의하여 사암에 대한 크립 거동의 유변학적 연구가 수행된 바 있다.

그러나 열응력하 크립거동실험 및 그 해석은 비교적 열전도 계수가 높은 암염^{6,7)}에서 주로 수행되었고 일반 결정질 암석에서는 거의 실시되지 않았다.

크립거동에 영향을 미치는 인자들은 내적 및 외적인 요인들로 대분할 수 있다. 내적인 요소로서 암석을 구성하고 있는 입자들의 크기, 입자의 분포, 수분함량, 공극, 불순물 등이 있으며, 외적요소로는 작용응력, 변형률속도, 온도 등이 있다.⁸⁾ 일반적으로 외적인 요소는 실험실 및 현장실험을 통해서 그 메카니즘의 조사가 가능하나 내적인 요소는 주어진 범위, 구조 등에 대하여 일정한 것으로 가정하는 경우가 보통이다.

연암에서 크립은 온도에 매우 민감한 것으로 나타났는데 암염에 대한 고온 크립실험에서 실온으로부터 약 100°C까지 가열했을 때 크립속도가 약 2배 정도 증가한 것으로 보고되었고⁹⁾, oil을 배태한 세일의 고온 크립

실험에서는 온도가 50°C에서 250°C로 증가함에 따라 2차 크립속도가 크게 증가한 것으로 보고되었다.¹⁰⁾ 경암에 대하여 장기간 크립실험이 300°C 이상까지 수행되었는데 이때의 온도는 유체의 상변화를 촉진시켜 변형률속도를 증가시킨 것으로 보고되었고, 화강암에 대한 고온단축압축 크립실험에서 상온으로부터 100°C까지는 변형률이 온도의 영향을 거의 받지 않았으나 200°C 이상에서는 변형률속도가 증대되는 것으로 보고된 바 있다.¹¹⁾

암석의 시간의존거동은 일정변형률에 대한 응력의 변화를 다루는 응력완화에 대한 해석과 일정응력하에서 변형을 다루는 크립거동에 대한 2가지 해석으로 설명할 수 있다. 전자의 방법은 일정 변형률하 시간에 대하여 응력감소율을 측정하는 것으로 보수유지가 정확한 servo 시스템에 의한 실험이 필수적인 반면, 후자의 방법은 하중적용방법의 다양성으로 인하여 실험장치나 과정에 있어 비교적 용이하고 현지암반의 응력조건에도 더욱 가깝다.

본 연구에서는 황등화강암을 이용하여 고온하 단축 압축 크립실험을 실시하고 그 결과를 온도의 인자를 포함하고 있는 지수-시간식^{12,13)}과 온도의 인자를 포함하

1) 정희원, 대한광업진흥공사 기술연구소 선임연구원

2) 정희원, 전남대학교 자원공학과 부교수

고 있지 않은 유변학적 모델중에서 일반화된 켈빈식의 상수를 수치해석적으로^{14,15)} 구하고 그 해석모델을 제시하고자 하였다.

2. 크립 거동식

암석에 대한 크립거동의 해석에 대해서는 많은 연구가 수행되었으나 온도변수가 고려된 연구는 많지 않다.

온도의 영향에 의한 크립거동에서 크립이 거의 일어나지 않는 수준의 일정응력하 일정변형률 속도의 저온에서는 시간에 따라 변형률속도도 일정하지만, 온도가 증가함에 따라 변형률속도가 증가하며, 저온에서 일정한 변형률을 보이는 응력수준이라도 고온인 경우에는 응력완화현상이 일어나는 것이 보통이다.

또 암석의 시간에 따른 암반 및 암석의 변형거동 정보를 얻기 위하여 암석의 습윤상태, 온도, 단층, 절리, 틈 등과 같은 불연속성 인자들을 포함하는 응력과 변형률 형태를 시간에 대하여 측정할 필요가 있으며, 이러한 관계들은 매우 복잡하기 때문에 가능한 간단히 응력과 변형률의 상태를 유지시키는 것이 필요하다.

2.1 지수시간식

암석에 대한 열크립 거동을 예측하기 위하여 암염과 같이 열전도가 높은 암석에서 크립거동을 표현하기 위하여 응력과 온도에 대한 지수시간식이 이용되었다. 이 식은 방사성 폐기물 지층처분장 설계를 위한 구조물의 장기간 동안의 안정성 연구에서 이용되었다. 크립에 의한 변형률을 시간(t)의 함수로 표시하면

$$\epsilon = \epsilon'_{ss}t + e_a \{1 - \exp(-\zeta t)\} \quad (1)$$

과 같다. 여기서 ϵ 는 크립의 축변형률, e_a 는 1차 크립시 점근하는 초기탄성변형률, ζ 는 완화계수를 의미하는 것으로 이들 세변수는 응력과 온도에 영향을 받는다.

ϵ'_{ss} 는 2차 크립변형률속도를 나타내는 것으로

$$\epsilon'_{ss} = A \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\epsilon'_{ss} = A (\sigma_1 - \sigma_3)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

과 같이 표현된다. σ 는 적용응력(MPa)이고, σ_1 과 σ_3 는 주응력(MPa), T는 절대온도(K), A, n, Q/R은 회기변수이다. 변수중 Q/R은 기체상수에 대한 변형역학의 속도

를 조절하는 작용에너지의 비로 해석되기도 한다. 이러한 형태의 변형률속도는 물리적 과정에 기초한 것으로 암염에서 열크립실험에 대한 변형거동을 예측하기 위하여 처음으로 적용되었다. 회기변수 n은 $\ln(\epsilon'_{ss}) - \ln(\sigma)$ 상의 기울기로 구할 수 있으며, 식(3)은 무차원 값으로

$$\epsilon'_{ss} = A' \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \right)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 σ_c 는 시료의 단축압축 강도이다.

2.2 유변학적 모델

암석의 크립거동을 예측하기 위한 유변학적 모형은 응력-변형률-시간-항복거동을 현상적으로 표현할 수 있다는 장점이 있으며 spring, dashpot, slider 및 brittle yield 요소 등 4가지 유형의 요소체를 이용한다.

이러한 유변학적 모형도 적절한 수정작업을 하지 않고는 직접적인 예측을 할 수 없으며, 전단 및 법선응력, 온도, 암석의 내부구조에 대한 설명이 어렵고, 기본적인 크립 메카니즘을 명확하게 제공하지 못한다. 이러한 한계에도 불구하고 유변학적 모형은 탄성, 점성, 소성, 항복요소들에 대한 거동을 분해할 수 있고, 이들 요소들을 직렬, 병렬, 또는 여러가지 유형으로 조합한 다양한 요소체들의 변수들로서 폭넓은 암석의 거동을 예측할 수 있기 때문에 크립거동을 체계적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다.

또 암석의 종류에 따라 유변학적 모형을 이용한 많은 연구가 수행되었는데 탄주 등의 연암에 대한 크립거동은 Maxwell 요소와 Kelvin 요소를 직렬로 연결한 Burgers 모델식이 적용되었고, 일반 암석에 대해서는 일반화된 Kelvin모델 식(5)이 적용되었다.

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_k} + \frac{\sigma_0}{E_m} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_m}{\eta_k} t\right) \right\} \quad (5)$$

σ_0 (MPa)는 적용응력이며, E_m (MPa) 및 E_k (MPa)는 spring의 탄성계수, η_k (poise)는 dashpot의 점성을 의미한다.

3. 실험 및 장치

3.1 시료의 물리·역학적 특성

대상시료의 기본적인 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성실험을 실시하였다. 각 물성치는 3~5회의 실험을 평균한 것이고, 이중 접선탄성계수와 포아송비는 실온 25°C의 실험조건하에서 load cell과 strain gauge로부터 측정된 전과정 응력-변형률선도로부터 단축압축강도의 50% 수준에서 3회 측정하여 평균한 값이다. 그 결과 단위중량은 0.0263 MN/m³, 겉보기 공극률 0.28%, P파 전파속도 3710 m/sec, 단축압축강도 189 MPa, 압열인장강도 9 MPa, 탄성계수 41.49 GPa, 포아송비 0.18 등으로 나타났다.

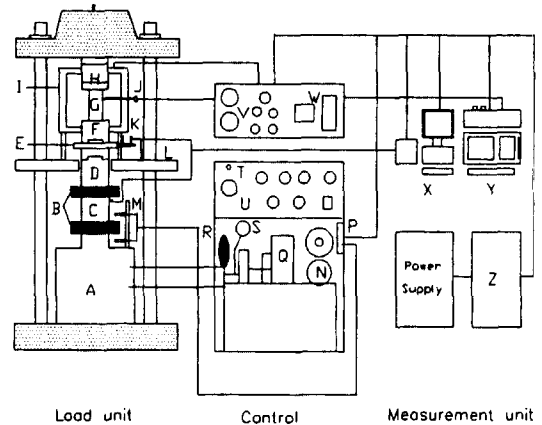
3.2 크립 시험장치

크립시험은 일정하중을 장기간 유지해야 한다는 제약조건이 있다. 하중장치는 시편의 변위에 관계없이 필요한 하중을 쉽게 가할 수 있고 유지시킬 수 있어야 한다. 또 변위 측정은 선형센서(LVDT)에 의한 방식이 주로 이용되나 레이저빔을 이용한 holographic 시스템도 이용되고 있다.¹⁶⁾ 일정하중을 유지시키기 위한 방법으로는 유압을 이용한 가압장치, 스프링, 사하중, screw jack에 의한 하중유지장치 등이 있는데 어느 것이나 적용하중에 대하여 2% 내의 안정성이 있어야 한다.^{17,18)}

장기하중을 가장 안정적으로 유지할 수 있는 방식은 사하중을 이용하는 방법인데, 이는 비교적 작은 하중을 가할 때는 적당하다. 그러나 경암과 같은 시료를 대상으로 하여 응력수준이 높아지면 유압에 의한 하중제어가 필연적이다. 크립시험중 비교적 안정적인 자료를 검출하기 위해서 실험조건에 대한 feedback 신호로 변위에 따른 일정하중조건을 선형적으로 유지할 수 있는 servo 타입의 시험기가 많이 이용되나 장기간 하중을 유지할 경우에 정전 등에 대한 보수유지가 어렵고, 반응시간이 유한하기 때문에 취성적 성질이 큰 시료에서는 변위에 대한 하중유지 시간이 느린 것으로 보고되었다.¹⁹⁾

본 연구에서는 일정압력유지가 비교적 간단한 방법인 질소충전 accumulator를 이용하여 유압램(φ200 mm)에 압력을 가함으로써 공시체에 일정하중을 가하고 정전시에 accumulator 내부압으로 일정압력으로 유지할 수 있는 크립시험기를 제작하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 고온 크립시험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 그림에서 (D)는 고온조로부터 load cell에 전달되는 열전달을 완화하기 위하여 열 차단용 sus 합금을 이용하여 제작하였고, (E)는 시료의 한쪽 끝에서 변위를 측정하기 위하여 시편하부에 설치

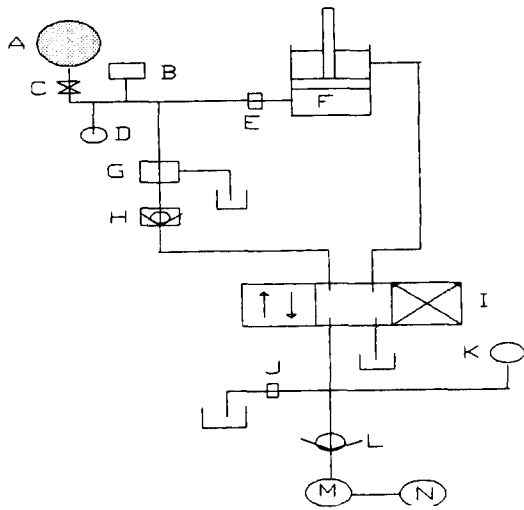


- (A) Hydraulic cylinder (B) Joint set (C) Load cell
- (D) Sus plate (E) Displacement measuring cantilever
- (F) Lower plate (G) Specimen
- (H) Spherical seat and upper plate
- (I) High temperature chamber (J) Thermocouple
- (K) Linear sensor and dial gauge (L) Support plate
- (M) Upper and lower limit (N) Hydraulic pump
- (O) Motor (P) Electro control box (Q) Hydraulic main unit
- (R) Accumulator (S) Pressure sensor and gauge
- (T) Automatic and manual switch (U) Operating control unit
- (V) H.T.C. control box (W) Programmable temp. controller
- (X) Load & Displacement. measuring system
- (Y) Temperature recording system (Z) A.V.R

Fig. 1. Diagram of thermal creep test system.

한 cantilever이다. (K)는 변위를 측정하기 위한 변위 측정기(10⁻³ mm)와 $\frac{2}{1000}$ mm의 정밀도로 10 mm 까지 측정할 수 있는 선형센서이다. (M)은 크립 시험중 돌발적인 시료의 파괴시 가압실린더의 상승으로 인한 고온조의 파손을 방지하기 위하여 설치한 상·하한 유압실린더 정지 스위치이다. (J)는 고온조 내의 온도를 감지하기 위한 열전대(K-type)이고, (R)은 유압실린더에 일정압력을 유지시키기 위한 질소충전 accumulator이다. (S)는 accumulator의 압력을 일정하게 유지시키기 위한 전자식 압력감지 센서와 accumulator 내의 압력을 나타내는 압력게이지이다. (V)는 고온조 내의 온도계측 스위치이고 (W)는 프로그래머블 온도조절기이다.

(X)는 크립시험기의 하중과 변위를 측정하는 장비로서 동변형을 증폭기와 12-bit A/D converter를 장착한 486-PC로 이루어졌다. (Y)는 시험기간중 고온시험조 내의 온도변화를 기록하기 위한 super data logger (일본 SANEI 사, 7VO8) 장치이고, (Z)는 자료기록장치



- (A) Accumulator
 (B) High and Lower pressure measuring sensor
 (C) Pressure control valve
 (D) Accumulator pressure gauge
 (E) Speed control valve (F) Hydraulic cylinder
 (G) Pressure Reducing valve (H) Pilot & check valve
 (I) Solenoid valve (J) Relief valve
 (K) Pressure gauge (L) Check valve
 (M) Hydraulic pump (N) Motor

Fig. 2. Diagram of creep hydraulic system.

및 크립 시험장비에 일정전압을 공급하기 위하여 설치된 A.V.R. 장치이다.

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 크립시험기의 유압전달 회로를 나타낸 것이다. 유압펌프(M)로 accumulator(A)에 압력을 가하도록 유압모터를 가동시키고, 압력센서(B)를 조정하여 accumulator 내의 압력을 상한값과

하한값으로 설정한다. 상한값은 accumulator 용량의 80% 정도인 240 kgf/cm^2 에 설정하고 하한값은 load cell에서 검출한 값이 원하는 하중으로 유지되는 압력보다 약 10% 정도 높도록 solenoid valve(I)를 조정 후 relief valve를 조정하여 유압실린더 내 압력을 유지시킨다.

4. 실험 및 고찰

황등화강압에 대한 열 크립실험으로 하중조건을 파괴강도에 대하여 약 45, 65, 75% 정도의 압력인 90, 120, 140 MPa로 설정하고 온도조건은 실온, 100°C , 200°C 로 설정하였다. 본 연구에서 사용한 화강암과 비슷한 조직과 조성의 국내 화강암에 대한 열파괴연구결과와 설정온도가 1시간 이상 유지되는 경우 대체로 시험편내 온도구배에 의한 영향이 무시될 수 있는 것으로 보고되었다.²⁰⁾ 본 연구에서는 설정온도까지 가열속도를 2°C/min 로 하여 120분의 유지시간을 두고 크립장치의 하중재하를 실시하였다.

황등화강압에 대하여 온도변화에 따른 열 크립거동을 해석하고자 온도의 함수를 포함하고 있는 지수-시간식과 온도의 함수를 포함하고 있지 않은 유변학적 모델식으로 일반화된 Kelvin 모델식을 적용하였다. 계수결정은 실험치와 이론식 및 역학적 모형식과의 편차를 최소로 하는 최소자승법에 의한 비선형 적합방정식의 최적해를 구함으로써 결정하였으며, 수치해를 얻기 위하여 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하였다.

Table 1은 지수시간식에 의하여 결정된 계수들을 나타낸 것으로서 입력자료는 시간 $t(\text{min})$, 변형률과 설정

Table 1. Parameters of exponential time law

σ (MPa)	A	n	$\frac{Q}{R}$	Temp. ($^\circ\text{C}$)	ϵ'_{ss}	e_a	ξ
90	5.11E-05	0.74	3774	25	9.95E-09	2.85E-03	1.00
				100	5.65E-08	3.19E-03	1.82
				200	4.88E-07	3.70E-03	1.36
120	6.03E-08	0.53	147	25	4.85E-07	4.52E-03	3.18
				100	4.99E-07	4.20E-03	1.48
				200	5.80E-07	5.10E-03	3.41
140	3.44E-07	0.37	406	25	5.05E-07	3.29E-03	1.93
				100	8.17E-07	4.42E-03	1.73
				200	8.84E-07	5.27E-03	2.77

하중 σ (MPa) 및 절대온도 T(K)이다. 표에서 e_0 는 초기 탄성변형률로서 동일한 응력을 적용할 때 온도의 증가와 함께 대체적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 이유는 온도의 증가와 함께 암석의 강성이 저하되기 때문이라고 본다. 결과적으로 이러한 성질로부터 탄성변형이 일정할 때 응력의 완화현상을 예상할 수 있다.

또, ϵ''_{ss} 는 2차 크립 변형률속도를 나타내는 것으로, 온도가 증가할수록 변형률속도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 실험결과로부터 황등화강암은 압력 및 온도의 증가와 함께 2차 크립변형률속도에 대한 온도의존성이 명확하게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2는 유변학적 모델로서 일반화된 Kelvin 모델의 역학적 상수를 나타낸 것이다. 표에서 E_k 는 초기 탄성계수를 나타내고, E_m 은 1차 크립에 대한 탄성계수의 크기를 나타낸 것이다. 표에서 초기탄성계수는 응력 및 온도의 증가에 대한 뚜렷한 경향을 보여주고 있지 못하고 있다. 이는 역학적 모델식이 암석의 탄성, 점성, 소성 등의 성질을 분해하여 역학적인 성질을 나타낼 수 있으나, 온도라는 인자 때문에 이들의 계수가 분산하고 있기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3~Fig. 5는 Table 1, Table 2에서 구해진 지수-시간식과 일반화된 Kelvin 모델 이론으로 계산된 예측치와 실험에 의한 계측치에 대하여 대표적인 그래프를 나타낸 것이다. 그 결과 두 모델은 계측결과를 잘 묘사해 주고 있음을 볼 수 있다. 즉 황등화강암의 경우 열크립은 두 이론 모델로서 잘 표현될 수 있다는 것을 의미한다.

이상의 결과에서 일반화된 Kelvin의 유변학적 모델 식은 대체로 실험값과 잘 일치하고 있으나 그 계수들

Table 2. Parameters of normalized Kelvin's model

σ (MPa)	Temp. (°C)	E_k	E_m	η_k
90	25	3.66E+04	2.03E+05	2.56E+07
	100	2.87E+04	2.91E+05	6.20E+08
	200	2.85E+04	1.06E+05	9.93E+06
120	25	2.66E+04	2.65E+04	2.22E+08
	100	3.28E+04	1.42E+05	1.29E+07
	200	2.36E+04	5.48E+04	1.60E+08
140	25	4.57E+04	3.20E+04	2.28E+08
	100	3.81E+04	1.30E+05	6.32E+06
	200	2.69E+04	1.53E+05	8.85E+07

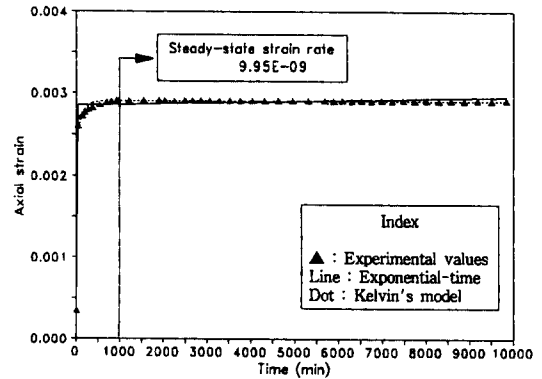


Fig. 3. Measured and predicted axial creep strain (90 MPa, 25°C).

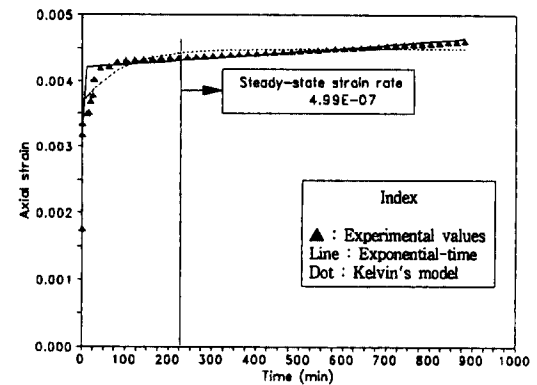


Fig. 4. Measured and predicted axial creep strain (120 MPa, 100°C).

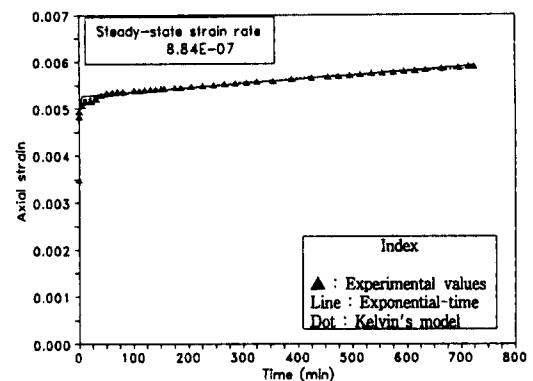


Fig. 5. Measured and predicted axial creep strain (140 MPa, 200°C).

자체는 뚜렷한 온도 의존성은 보여주지 못했다.

지수-시간식은 2차 크립거동에 잘 적합되나, 암석의 1차 크립거동과는 잘 부합되지 않았다. 그러나 이 식은

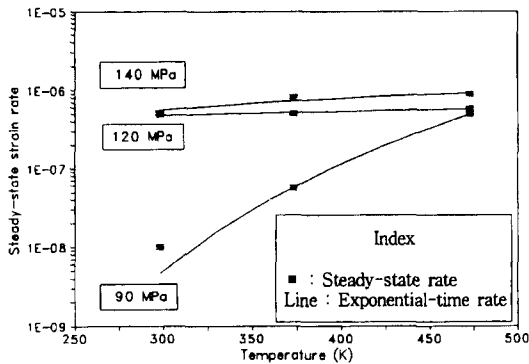


Fig. 6. Stress and temperature dependence of steady-state creep rate.

일반적으로 암반구조물에서 안정성에 대하여 가장 중요한 요소가 2차 크립에서 변형률속도이고, 특히 이 방법은 2차크립 변형률속도가 온도의 함수로 되어 있어 온도변화에 대한 크립거동식으로 적합한 것으로 판단된다. 또 그림들에서 초기 탄성거동과 1차 크립 사이에서는 변형률속도가 약간의 불안정성을 보이고 있는데 이러한 현상은 온도가 증가함에 따라 두드러졌으며, 2차 크립으로의 전이에서는 일정한 변형률속도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 황등화강암의 열크립 실험 결과에 대한 2차 크립 변형률속도를 온도에 대하여 나타낸 것이다. 변형률속도는 이론식과 대체로 잘 부합되고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 적용응력이 클수록 또 온도가 높을수록 2차 크립의 변형률속도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또 그림에서 파괴하중의 45% 수준의 적용응력 90 MPa에서 정속변형률속도의 온도의존성이 컸으나, 적용응력이 파괴하중의 65% 수준인 90 MPa, 75% 수준인 120 MPa 일때는 정속변형률속도가 온도의 증가에도 불구하고 크게 변화하지 않았다. 일반적으로 일정한 외력(응력, 온도)의 증가로 크립속도가 크게 나타나지 않고, 그 이상의 외력에 의하여 크게 나타났을 때의 2차 크립속도를 임계 크립속도로 볼 수 있는데,¹³⁾ 본 연구에서는 2차 크립의 변형률속도가 일정하게 진행되는 시점에서 실험을 끝내고 200°C 이상에 대한 열 크립시 실험을 하지 못해 이에 대한 명확한 판단이 어려웠다. 임계 크립에 대한 명확한 변형거동을 설명하고 이를 설계에 반영하기 위해서는, 200°C 이상의 고온에서 열전도에 안정한 열 크립장비의 개발과 이 분야에 대한 많은 실험연구가 진행될 필요가 있다고 본다.

5. 결 론

암반내 방사성폐기물 처분장같은 특수목적 암반구조물을 시설하기 위해서는 설계기준 및 암반의 열역학적인 거동에 대한 다양한 연구가 필요하다. 본 연구에서 처분장 모암으로서 가장 잠재성이 높은 결정질 암석인 황등화강암을 대상으로 열 크립실험과 열 크립거동에 대한 해석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 황등화강암에 대한 열크립거동을 해석하고자 온도의 함수를 포함하고 있는 지수시간식과 온도의 함수를 포함하지 않는 유변학적 모델식 중 일반화된 Kelvin 모델식을 적용한 바 지수-시간식을 구성하고 있는 역학적 정수인 변형률 속도는 일정하중하 온도상승에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나, 일반화된 Kelvin 모델의 모형정수들은 분산하는 경향을 나타내었다. 따라서 유변학적 모델은 탄성, 점성, 소성 등의 성질을 분해하여 암석의 역학적인 성질을 나타낼 수 있으나, 열역학적인 메카니즘은 설명할 수가 없었다.

2) 지수시간식으로 황등화강암의 2차 크립 변형률속도를 온도에 대하여 나타낸 결과 이론식과 대체로 잘 부합되었으며, 적용응력이 클수록, 온도가 높을수록 2차 크립의 변형률속도가 증가하였다.

3) 낮은 적용응력에서 정속변형률속도의 온도의존성은 비교적 컸으나, 적용응력이 클수록 정속변형률속도의 온도의존성은 감소하였다. 이러한 변형률속도가 황등화강암의 임계크립변형률속도인지는 본 연구에서 2차크립의 변형률속도가 일정하게 진행되는 시점에서 실험을 끝내고 200°C 이상에 대한 열 크립시 실험을 하지 못해 이에 대한 명확한 판단이 어려웠다. 따라서 이 분야에 대한 많은 실험연구가 더 진행될 필요가 있다고 본다.

사 사

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구과제 연구비 지원을 받아 이루어진 연구결과와 일부이며 관계기관 협조에 감사드린다(과제번호 : 941-0800-018-2).

참 고 문 헌

1. Kaiser P. K. and Morgenstern N. R., 1981, Time-dependent Deformation of Small Tunnels-I. Experimental Facilities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.

- & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.129-140.
2. Fritz, P., 1982, Numerical solution of rheological problems in rock, In Proc. 2nd Int. Sym-
po. Numerical Methods in Geomechanics, Ed-
monton, Balkema, Rotterdam, pp.793-803.
 3. Kaiser P. K. and Morgenstern N. R., 1981,
Time-Dependent Deformation of Small Tunnels-
II. Typical Test Data, Int. J. Rock Mech. Min.
Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.141-152.
 4. Haupt M., 1991, A Constitutive Law for Rock
Salt Based on Creep and Relaxation Tests,
Rock Mechanics and Rock Engineering 24, pp.
179-206.
 5. 김재동, 이정인, 김재극, 1983, 삼척탄좌 상하반사암
의 Creep 거동에 관한 유변학적 연구, 대한광산학회
지, Vol. 20, pp.153-160.
 6. Leite M. H., Ladanyi B. and Gill D. E., 1993, De-
termination of Creep Parameters of Rock Salt by
Means of an In-Situ Sharp Cone Test, Int. J.
Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30,
pp.219-232.
 7. Aubertin M., Gill D. E. and Ladanyi B., 1991,
An Internal Variable Model for the Creep of
Rocksalt, Rock Mechanics and Rock Engineering
24, pp.81-97.
 8. Pfeifle, T. W., Senseny P. E. and Mellegard K. D.,
1987, Influence of Variables on the Consolidation
and Unconfined Compressive Strength of Crushed
Salt, Report no. BMI/ONWI-627.
 9. Wallner, M., 1986, Stability demonstration concept
and preliminary design calculations for the
Gorleben repository, In Proc. "Waste Manage-
ment", Tucson, AZ Vol. 2, pp.145-151.
 10. Schatz J. F. and Sinha K. P., 1981, Creep de-
formation of oil shale at elevated temperatures,
Proceedings of the International Symposium
on Weak Rock, Tokyo, pp.125-129.
 11. Roland, P., 1993, Mechanisms and Consequences
of Creep in Crystalline Rock, Comprehensive
Rock Engineering, principles, practice & projects,
Vol. 1, pp.227-241.
 12. Mellegard K. D. and Senseny P. E., 1983, Ex-
ponential-Time Creep Law for Avery Island
Salt, Office of Nuclear Waste Isolation Battle
Memorial Institute Columbus, OH 43201, 51p.
 13. Pfeifle T. W., Mellerard K. D. and Senseny P.
E., 1983, Constitutive Properties of Salt from
Four Sites, RE/SPEC Inc., ONWI-314, 93p.
 14. Carnahan, B., Luther H. A. and Wilkes, J. O.,
1987, Applied Numerical Methods, John Wiley
& Sons, Inc., London, 604p.
 15. International Mathematical and Statistical
Libraries(IMSL), 1978, IMSL Library Reference
Manual, 7th edn., IMSL, Houston, TX.
 16. Park D. W. and Jung J. O., 1988, Application
of Holographic Interferometry to the Study of
Time-Dependent Behavior of Rock and Coal,
Rock Mechanics and Rock Engineering 21, pp.
259-270.
 17. ASTM D4341, 1989, Standard Test Method for
Creep of Cylindrical Hard Rock Core Spec-
imens in Uniaxial Compression, pp.696-700.
 18. ASTM D4405, 1989, Standard Test Method for
Creep of Cylindrical Soft Rock Core Specimens
in Uniaxial Compressions, pp.749-753.
 19. Okubo S., Fukui K., and Nishimatsu Y., 1993,
Control Performance of Servo-controlled Test-
ing Machines in Compression and Creep Tests,
Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,
Vol. 30, pp.247-255.
 20. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열파
괴 특성연구, 한국자원공학회지, Vol. 27, pp.31-42.