

## 포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동

### Creep behaviour of mudstone in the tertiary Duho Formation at Pohang basin

---

김 광 식 (Kwang-Shik Kim)

(주)한라엔지니어링

김 교 원 (Gyo-Won Kim)\*

경북대학교 지질학과

---

#### 요약 / ABSTRACT

암석의 점탄성적 성질에 기인하는 크리프 특성에 대한 이해는 일정하중 하에서 시간에 대한 변형으로 장기적인 지반거동을 예측할 수 있는 중요한 요소이다. 포항지역에 분포하는 제3기 두호층 이암의 크리프 특성을 파악하기 위하여 암석의 기본적인 물성, 역학적 특성 및 크리프 시험을 실시하였다. 대상 이암은 illite 및 chlorite 등 점토광물을 26% 함유하고 있어 큰 크리프 변형을 보였으며, 평균 일축압축강도는  $462 \text{ kg/cm}^2$  이었는데, 크리프 시험은 일축압축강도의 40-70% 일정 응력수준에서 수행하였다. 시험 결과 얻어진 시간-변형률 곡선으로부터 암석의 크리프 특성을 규정하는 다양한 경험식 및 이론식의 크리프 상수를 도출하였는데, 그 중 Griggs 경험식 및 Burger 모델의 이론식이 이암의 크리프 특성을 가장 잘 반영하는 것으로 평가되었다. 또, 순간탄성변형률은 응력수준에 정비례하여 증가하였으나, 1차 크리프의 변형률 속도는 응력의 크기와 무관하게 시간 경과에 따라 비슷한 양상으로 감소하였다.

**주요어 :** 이암, 순간탄성변형률, 크리프 변형률, 크리프 상수, 크리프 변형률 속도

Understanding of a creep behavior in rocks under a constant load, due to visco-elastic properties of rock, is an essential element to predict a long term ground deformation. In order to clarify the creep characteristics of the mudstone in Duho formation at Pohang basin, deposited during Tertiary, a series of laboratory tests including physical properties, unconfined compressive strength and uniaxial creep tests, was performed. The mudstone showed a higher creep potential due to 26% of clay minerals such as illite and chlorite. The unconfined compressive strength of the rock was  $462 \text{ kg/cm}^2$  in average, and four creep tests were performed under constant stress of 40 to 70 % of the strength. The creep constants in the

---

\* Corresponding author: gyokim@knu.ac.kr

empirical and theoretical equations were deduced from the time-strain curves obtained from the tests. Among the several equations, the empirical equation proposed by Griggs and theoretical equation of Burger's model are appreciated as the best one to express the creep behavior of the mudstone. Instantaneous elastic strain was linearly increased with stress level but strain velocity during the first creep is decreased with a similar pattern by time lapse regardless the stress level.

**Key words** : Mudstone, Instantaneous Elastic Strain, Creep Strain, Creep Constants, Creep Strain Velocity

## 서 론

암석은 외력을 받을 때 순간적인 탄성변형뿐만 아니라 장기적으로 시간 의존적인 변형을 보인다. 시간 의존적 암석의 변형은 암석이 가지는 근본적인 성질 중 하나로서 암석학, 구조지질학적 차원에서 구조운동현상(습곡, 단층)등을 해석하거나 지질공학적인 장기간 안정성에 대하여 분석, 설명하는데 중요한 기초가 된다(Li and Xia, 2000).

암석의 거동 해석 시에 탄소성 모델(elasto-plastic model)이 주로 이용되고 있으나, 이는 짧은 시간 내에서의 거동을 나타내므로 변형 메카니즘과 암석강도 측면에서 시간에 대한 영향을 고려하지 않는다. 대부분의 암석에서 점성에 의한 크리프 변형이 탄소성 변형에 비하여 대단히 적지만, 일부 암석에서는 이를 무시하는 경우 지반 거동에측과 현장에서의 실제거동 간에 상당한 차이를 초래하게 된다. 이러한 현상은 터널이나 지하시설과 같은 심부 암반의 굴착에서 흔히 볼 수 있는데, 대형 구조물의 지보나 암석지주의 변형은 오랜 시간 동안 일정한 하중을 계속적으로 받게 되므로 일정시간이 경과한 후에는 크리프 변형이 주를 이루게 되기도 한다(Maranini and Brignoli, 1999). 주목할 점은 크리프 변형이 장기간 지속되어 어느 한계에 달하면 급작스런 파괴로 이어진다는 것이다. 따라서, 이암과 같이 크리프 변형이 큰 일부 암석에 축조되는 구조물의 장기적 안정성 검토 시에 기초지반의 크리프 특성 파악이 필수적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 포항지역에 분포하는 신생대 제3기의 이암을 대상으로 실내 물성 및 역학시험

과 일축 크리프시험을 수행하여 보통 퇴적암에 비하여 고결도가 낮은 이암의 크리프 거동특성을 규명하였다.

## 지질 개요

본 연구지역은 경북 포항시 용흥동 일대로서 경도 129°20' 45", 위도 36°02' 32"에 해당된다(Fig. 1). 지질학적으로 이 지역에는 육성층인 백악기 퇴적암류를 기반으로 해성층인 신생대 제3기층이 분포하고 있으며(김광호 등, 1993; 이유대, 1988), Tateiwa(1924)는 이 제3기 퇴적층을 연일층이라 명명하고 이를 다시 천북역암과 연일세일층으로 세분하였다. 엄상호 등(1964)은 이 지역의 마이오세 중기 및 후기 지층을 하부로부터 천북역암, 학립층, 홍해층, 이동층, 두호층으로 세분하였고 플라이오세의 여남층이 이들 상부에 분포하는 것으로 보고하였다.

## 암석의 시간 의존적 변형특성

암석의 시간에 따른 크리프거동을 설명하기 위하여 많은 연구가 선행되어져 왔는데, 암석의 크리프 특성은 (1) 지수함수 혹은 멱함수를 이용하여 시험 데이터를 적절히 대비하거나, (2) 역학 혹은 수학적 모델, 혹은 (3) 크리프 거동 이론 등으로 평가되고 있다(Kaiser and Morgenstern, 1981).

포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동

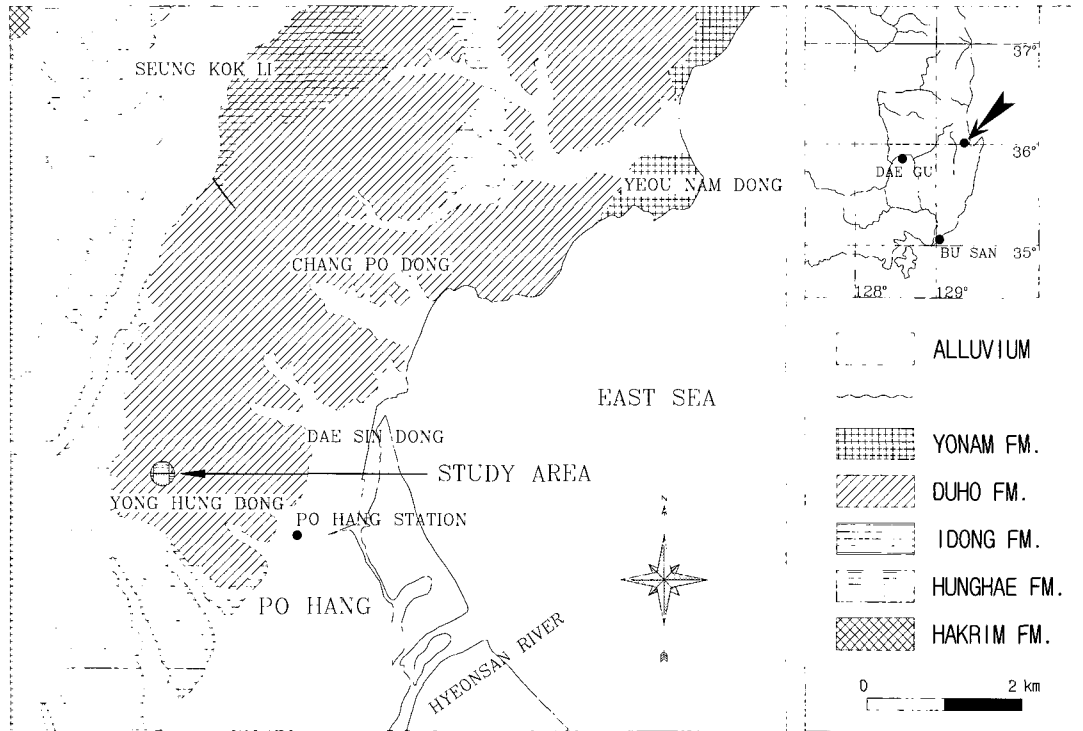


Fig. 1. Geological map of the studied area

일축압축 조건에서의 암석은 일반적으로 Fig. 2와 같은 크리프 특성을 나타내는데, 이 변형률 ( $\epsilon_c$ )-시간 ( $t$ ) 곡선에 기초하여 전체 변형률은 식 (1)로 표시될 수 있다(Jaeger and Cook, 1976).

$$\epsilon = \epsilon_i + \epsilon_1(t) + Vt + \epsilon_3(t) \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_i$ 는 순간탄성변형률,  $\epsilon_1(t)$ 은 1차 크리프 혹은 경과 크리프 변형률,  $Vt$ 는 2차 크리프 변형률 혹은 일정상태 변형률,  $\epsilon_3(t)$ 는 3차 크리프 혹은 가속 크리프 변형률을 표시한다. 암석의 장기적인 변형을 이해하기 위해서는 우선 2차 크리프 변형률을 결정하는  $V$ 의 크기를 알아야 하며 아울러 1차 크리프 양상을 결정하는  $\epsilon_1(t)$ 를 이해해야 한다.

1차 크리프에 대하여 Andrade(1910)은  $\epsilon_1(t) = A \ln t$ , Cottrell(1952)은  $\epsilon_1(t) = A t^n$ 을 제시하였는데, 전자의 경우 시간  $t \rightarrow 0$ 인 경우 해가 없으므로 Lomnitz(1956)는

$$\epsilon_1(t) = A \ln(1 + at)$$

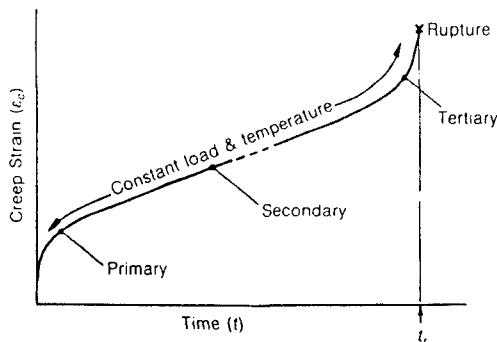


Fig. 2. Typical shape of creep deformation

를 제시하였으며, 이를 Jeffreys(1958)가 수학적 편의성을 위하여 '수정 Lomnitz 식'으로

$$\epsilon_1(t) = A \ln[(1 + at)^\beta - 1]$$

을 제안하였다. 이상의 경험식들에 근거하여 Griggs(1936)는 식(2), Singh(1973)은 식 (3), Li와 Xia(1999)는 식 (4)를 이용하여 암석의 탄성 및 크리프 거동을 해석하였다.

$$\epsilon = a + b \log t + c t \quad (2)$$

$$\epsilon = a t^b \quad (3)$$

$$\epsilon = a + b \log t \quad (4)$$

여기서,  $a$ ,  $b$  및  $c$ 는 크리프상수(creep constant)이다. 또 식 (2)의 일정변형률속도 항인  $c t$ 는 정상(steady state) 변형률을 나타내며, 시간에 비례하여 증가하는 2차 크리프를 설명하는 항목으로써 2차 크리프의 존재 여부는 지반의 장기적 안정성을 고려한 설계부문에서 중요하게 인식되고 있다.

그러나, 위 식 (2)와 (4)의 경우 시간  $t=0$ 일 때 해가 없으며, 식 (3)의 경우는 시간  $t=0$ 일 때 전체 변형률이 영이 되어 탄성변형이 없다는 모순이 있다. 따라서, 이러한 모순을 해소하기 위하여 식 (2)와 (4)의  $\log(t)$  항은  $\log(1+t)$ 로 수정하고, 식 (3)은 다음과 같이 수정하여 탄성변형과 1차 및 2차 크리프 변형을 포함하는 시간의존적 암석변형을 해석하는데 적용하는 것이 합리적으로 보인다.

$$\epsilon = a + b t^c \quad (5)$$

이상의 경험식 외에도 1차 크리프 변형률은 유동학적 모델에 근거하여 Kelvin(혹은 Voigt) 모델  $\epsilon_1(t) = A [1 - \exp(-t/t_1)]$ 로 설명할 수 있다. 그러나 Kelvin의 모델은 암석에서 관찰되는 2차 크리프의 특성을 반영할 수 없다. 따라서, Hardy(1966)는 암석의 크리프 거동에 대하여

Fig. 3과 같이 Kelvin 모델과 Maxwell 모델을 직렬 조합한 Burgers모델이 적합함을 밝힌 바 있다. 응력이  $\sigma_1$ 로 일정할 때 Kelvin 모델의 변형률( $\epsilon_1$ )은 식(6)과 같고, Maxwell 모델의 변형률( $\epsilon_2$ )은 식(7)과 같다.

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1} t\right) \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_1}{G_2} + \frac{\sigma_1}{\eta_2} t \quad (7)$$

따라서, 이들을 조합한 Burgers모델의 총 변형률은  $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ 가 되며 다음 식(8)과 같이 표현된다.

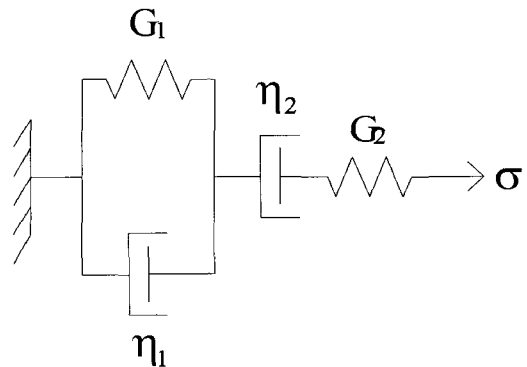


Fig. 3. Burgers Model

$$\epsilon = \frac{\sigma_1}{G_2} + \frac{\sigma_1}{G_1} [1 - e^{-\frac{t}{t_1}}] + \frac{\sigma_1}{\eta_2} t \quad (8)$$

여기서 제1항은 순간탄성변형률, 제2항은 지수함수적으로 변하는 1차 크리프 변형률, 제3항은 영구변형률인 2차 크리프 변형률을 나타내며,  $t_1 = \eta_1/G_1$ 이다. 이 식에서  $t=0$ 일 때 절편은  $\epsilon_0 = \sigma_1/G_2$ 이 되며, 2차 크리프는  $\sigma_1/\eta_2$ 의 기울기를 가진다. 또한, 2차 크리프 곡선에 대한

접근선과 크리프 곡선 사이의 거리를  $q$ 라고 가 정할 때  $\log q$ 는 절편이  $\log(\sigma_1/G_1)$ 이며 기울 기는  $1/t_1$  즉,  $-G_1/\eta_1$ 이다.

Hardy *et al.*(1970)은 Indiana limestone의 크 리프 특성을 연구하면서 Burger 모델을 이용하여 Fig. 4에 근거하여 일정응력( $\sigma_1$ )하에서 시간  $t$  에 대한 축 변형률을 식(9)와 같이 제시하였다.

$$\epsilon(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1}[1 - e^{-(G_1 t/\eta_1)}] + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t \quad (9)$$

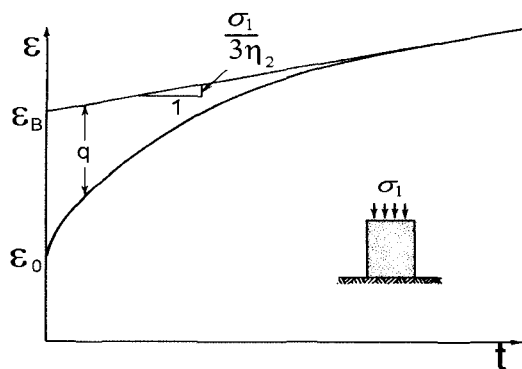


Fig. 4. Creep in uniaxial compression of a rock that behaves as a Burgers body (Hardy et al., 1970).

여기서, 순간탄성변형률  $\epsilon_0$ 는 처음 두 항, 1차 크리프는 세 번째 항이고, 일정한 속도를 가지는 2차 크리프는 마지막 항으로 표시되며, 그 절편 값은  $\epsilon_B = \sigma_1(\frac{2}{9K} + \frac{1}{3G_2} + \frac{1}{3G_1})$ 가 된다. 또, 체적계수  $K = E/(3-2\nu)$ 이고,  $\eta_1$ 은 1차 크 리프에 큰 영향을 미치는 점성률로서 높은 값을 가질수록 2차 크리프로 접어드는 시간이 길어지 는 항이며,  $\eta_2$ 는 2차 크리프의 기울기를 결정하 는 점성률의 특성을 갖는데 Fig. 4의 직선부분의 기울기( $\sigma_1/3\eta_2$ )에서 결정된다. 또,  $G_1$ 은 1차 크 리프 변형률에서 탄성변형률의 양을 조절하는 항 이며,  $G_2$ 는 탄성전단계수인데, 이들 상수는 그래

프로부터 구해지는 암석의 특성이다. 전술한 바와 같이 Fig. 4에서와 같이 2차 크리프 곡선에 대한 접근선과 크리프 곡선 사이의 거리를  $q$ 라고 했을 때, 시간  $t$  에 대한 반대수 plot에서  $\log q$ 는 절 편이  $\sigma_1/3G_1 = \epsilon_B - \epsilon_0$  이므로  $G_1$ 을 구할 수 있고, 그 경사는  $-G_1/2.3\eta_1$ 가 되므로  $\eta_1$ 이 결 정되며,  $G_2$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\sigma_1}{3G_2} = \epsilon_B - \sigma_1(\frac{2}{9K} + \frac{1}{3G_1}) \quad (10)$$

본 연구에서는 두호층 이암의 특성을 설명하기 위하여 일축 크리프 시험을 통하여 얻어진 그래 프로부터 전술한 경험식 (2), (3), 및 (4)의 크리 프 상수를 구하였고, 또 유동학적 모델에 근거한 이론식 (8)과 이를 보완한 Hardy의 경험식 (9)의 제 상수를 결정하였다.

### 암석의 물리적 특성

이암의 구성성분을 확인하기 위하여 SIEMENS D5005를 사용하여 XRD(X-Ray Diffraction) 분석을 실시한 결과, 구성성분은 중 량 백분율로 quartz 62.4%, illite 18.4%, albite 9.5%, chlorite 7.6%, pyrite 2.0%이었다. 점토광 물인 illite와 chlorite의 비율이 26%라는 점이 이 암석의 크리프 변형을 크게 하는 요인일 것으로 판단된다.

물성시험 결과, 진비중 2.45, 단위중량 1.79 t/m<sup>3</sup>, 간극비 0.41, 간극률 29.1% 및 흡수율 15.5%이었다. 일축압축강도는 시료의 함수비에 크게 영향을 받으므로 완전 건조상태에서 강도시 험을 실시하였는데, 평균값으로 일축압축강도  $qu=462\text{kgf/cm}^2$ , 접선탄성계수  $E=2.89 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ , 포아송비  $\nu=0.30$ 이었고, 파괴시의 평균 축변형률 은 약  $18.0 \times 10^{-3}$ 이었다(Fig. 6). 이 암석은 흡수율 과 간극비가 크고, 보통의 다른 이암(예: 중생대 백악기 이암)에 비하여 단위중량과 고결도가 상 대적으로 낮다는 것을 알 수 있었으며 그에 따라 일축압축강도도 낮았다.

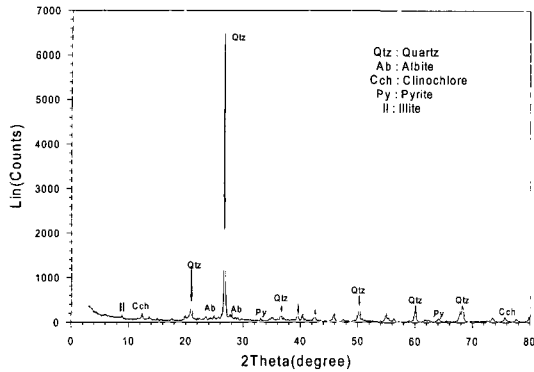


Fig. 5. Result of XRD test

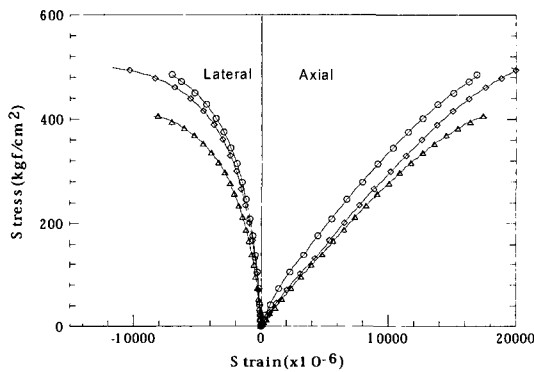


Fig. 6. Stress-Strain relationship

### 일축 크리프시험

시험 기기 및 방법 : 크리프 변형에 영향을 주는 중요한 인자로는 응력수준, 온도, 시간 등을 들 수 있다(Penny and Marriott, 1995). 응력수준은 일축압축강도에 대한 재하하중의 비로 표현하며 크리프 시험기간 동안 일정하게 유지되어야 한다. 또한 온도변화에 대한 영향을 최소화하기 위하여 일정한 온도에서 시험을 실시하는 것이 바람직하나 여건상 실험실에서의 상온에서 시험하였다.

크리프시험에 사용된 시료는 원주형 NX 코아로 층리면 수직으로 제작하여 직경:길이의 비가 1:2가 되도록 성형하여(ASTM D4405, 1989), 시

료 길이가 110mm가 되도록 하였다. 본 연구 시험을 위하여 Fig. 7과 같은 정하중을 장기간 가할 수 있도록 고안된 크리프 시험기기를 제작하였는데 이 기기는 하중 추의 약 20배의 하중이 시료에 가해지도록 켈틸레버 형식을 도입하고 있다. 지지대가 힌지(hinge)로부터 회전되면서 발생하는 미소한 각에 의한 하중의 불균등 분포 현상을 방지하기 위하여 시료 상부에 구형좌대(spherical seat)를 설치하였다. 이 구형좌대는 반구형으로 절삭된 암수가 맞물려 있으며 윤활유로 움직임을 부드럽게 하여 상부가 약간 회전되더라도 시료에 수직하중이 가해지도록 작용한다. 또, 일정시간 크리프가 진행된 후 시료가 파괴될 때 지지대(beam)가 급작스럽게 낙하하여 발생할 수 있는 기기손상을 방지하기 위하여 보호대를 설치하였으며, 유압잭으로 지지대를 들어 올렸다가 유압을 서서히 낮춤으로써 하중이 서서히 가해지도록 하여 지지대의 낙하에 의한 충격을 완화하였다. 변형은 일축압축강도 시험에서 사용한 것과 동일한 변형률 게이지(strain gauge)를 사용하였으며, 측정된 값은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 저장된다.

이압과 같은 연압의 경우 물을 흡수함으로써 강도가 급격히 저하하는 현상이나 포화도에 따른 시료의 팽창성이 크므로 이에 대한 오차를 피하기 위하여 건조시료에 대해서만 시험을 수행하였다(Maranini and Brignoli, 1999). 그러나, 시험도중 공기 중으로부터 흡수되는 수분은 무시하였다. 재하하중에 대한 정확한 값을 구하기 위하여 크리프 시험에 앞서 하중계를 이용하여 시험기를 보정한 후에 시험을 실시하였다.

응력수준과 시험기간 : 크리프 시험은 Table 1과 같이 평균 일축압축강도의 40~70%에 해당하는 범위의 일정하중을 가하여 총 4개의 시료에 대하여 수행하였다.

비록 같은 지역에서 얻어진 동일한 암석시료이었지만 최종적으로 파괴되는 시점은 예상과 달리 일정한 양상을 보이지는 않았다. 시료 B와 D는 약 300분 정도의 시간 경과 후 시료가 파괴된 반면 시료 A와 C는 약 350시간 이상까지 크리프 시험이 지속되었다(Fig. 8).

포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동

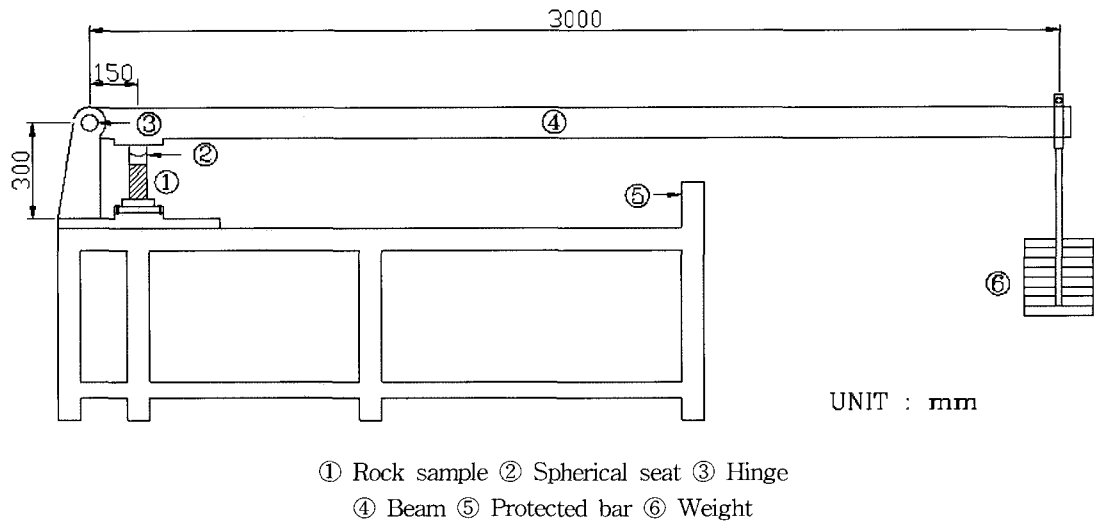


Fig. 7. Schematic view of the creep test equipment employed

Table 1. Load applied for each creep test

Test Number	A	B	C	D
Stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	181.2	257.7	270.3	312.1
% of uniaxial compressive strength	39.2	55.8	58.5	67.6

시료 A는 강도의 39.2%의 하중 하에서 13일간 시험하였으나 최종 변형률이  $6.8 \times 10^{-3}$ (수직변위 7.5 mm) 정도에 지나지 않아서 암석파괴 변형률에 도달하는데는 보다 너무 많은 시간이 소요될 것으로 추정되었으며 또, 재하 후 대략 50시간이 경과한 시점에서 2차 크리프가 시작되어서 350여 시간이 경과한 시점에서 크리프 특성을 충분히 파악할 수 있다고 판단하여 시험을 중단하였다. 시료 B는 강도의 55.8%의 하중 하에서 시험되었는데 변형률  $7.8 \times 10^{-3}$ 에서 파괴되어서 비슷한 응력 수준의 시료 C(58.5%)에 비하여 낮은 변형률에서 파괴된 것으로 볼 때 이는 시료에 원천적으로 내재되었던 손상 등의 영향으로 1차 크리프가 진행하던 중에 파괴된 것으로 추정되었다.

시료 C는 강도의 58.5%의 하중 하에서 16일간 측정되었는데, 처음 8일 동안 1차 크리프가 진행되면서 서서히 변형률 속도가 감소하고 있으며 약 160시간 정도에서 2차 크리프가 시작되어 변형률  $11.6 \times 10^{-3}$ (수직변위 12.76mm)을 보인 후 파괴되었다. Fig. 9의 그래프로 미루어 볼 때 시료 C는 변형속도가 빨라지기 시작하는 3차 크리프가 막 시작하려던 시점에서 파괴된 것으로 추정되지만 이 시험결과로는 정확히 진단하기 어렵다.

시료 D는 일축압축강도의 67.6%의 하중 하에서 시험하였는데 1차 크리프가 진행되던 중 변형률이  $11.5 \times 10^{-3}$ (수직변위 12.65mm)에 도달한 후에 파괴되었다. 이로 미루어 볼 때 이 시료 D는 다소 높은 응력 수준(강도의 67.6%) 하에서 조기

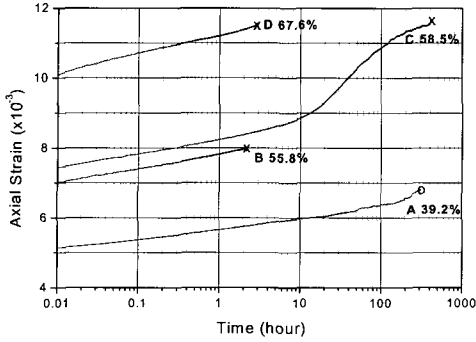


Fig. 8. Creep curves with a time axis in log10 scale (Mark x indicates the failure point.)

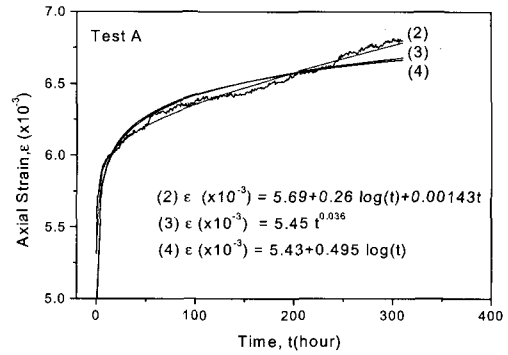


Fig. 10. Determination of creep constants of the empirical equations (2), (3) and (4) by non-linear regression method for Test A

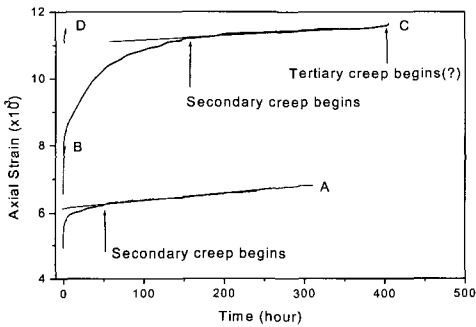


Fig. 9. Creep curves with a time axis in linear scale (The secondary creep behavior is clearly shown only at Tests A and C.)

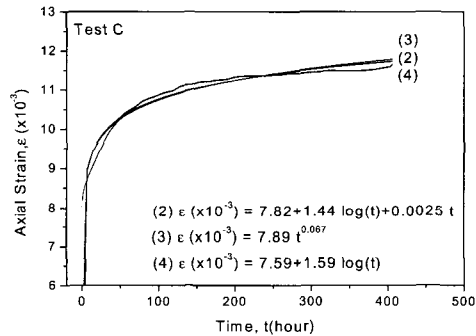


Fig. 11. Determination of creep constants of the empirical equations (2), (3) and (4) by non-linear regression method for Test C

에 이암의 파괴 변형률에 도달되었으며 그로 인하여 시료가 파괴된 것으로 판단된다.

시료 C 및 D의 결과로부터 포항의 제3기 두호층 이암의 일축압축 상태에서의 파괴 크리프 축 변형률은 약 11.5%로 생각되며 이는 Fig. 6의 일축압축강도시험 시의 평균 파괴 축 변형률 18.0%의 약 64%에 해당된다. 또, 두호층 이암은 강도대비 응력수준 58.5%(시료 C)에서 시간이 경과함에 따라 2차 크리프에 도달한 후 파괴에 도달함을 확인할 수 있었으나 39.2%의 응력 수준(시료 A)에서 크리프 파괴에 도달하는지의 여부는 불행하게도 이번 시험에서는 확인할 수 없었다.

크리프 상수 : 크리프 거동특성을 규정하는 식 (2), (3) 및 (4)의 크리프 상수는 Fig. 10 및 11과 같이 비선형 해석을 통하여 결정하였으며 그 결과는 Table 2에 정리하였다.

2차 크리프 곡선이 얻어진 시료 A와 C에 대하여 Burgers model의 일반식 (8)에 대한 곡선 fitting한 결과는 다음 그림과 같으며 여기서 결정된 크리프 상수를 요약하면 Table 3과 같다.

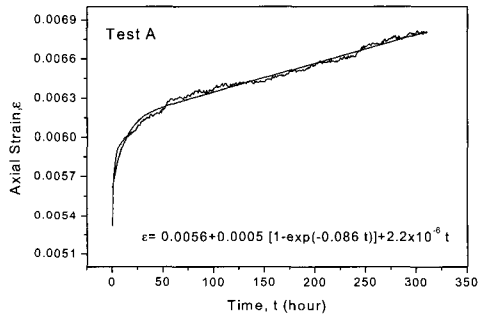
Burgers model에 근거하여 Hardy *et al.*(1970)이 Indiana limestone에 대한 시험결과로부터 얻은 경험식 (9)을 적용하는 경우의 크리프 상수는 Table 4에 정리한 바와 같다. 여기서,



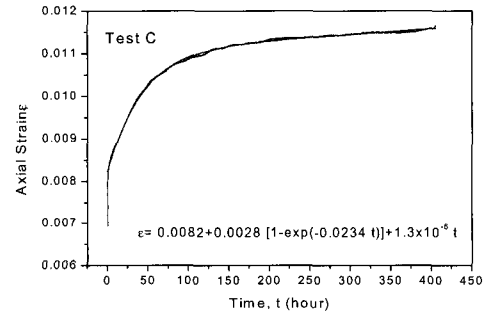
포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동

**Table 2.** Creep constants for Equations (2), (3) and (4)

Test Number	% Stress Level	Griggs (2)			Singh (3)		Li and Xia (4)	
		$a$ ( $\times 10^{-3}$ )	$b$ ( $\times 10^{-3}$ )	$c$ ( $\times 10^{-3}$ )	$a$ ( $\times 10^{-3}$ )	$b$ ( $\times 10^{-3}$ )	$a$ ( $\times 10^{-3}$ )	$b$ ( $\times 10^{-3}$ )
A	39.2	5.69	0.26	0.0014	5.45	0.036	5.43	0.495
B	55.8	7.78	0.43	-	7.83	0.023	7.83	0.382
C	58.5	7.82	1.44	0.0025	7.89	0.067	7.59	1.586
D	67.6	11.21	0.59	-	11.21	0.023	11.21	0.594



**Fig. 12.** Determination of Burger's creep constants for Test A



**Fig. 13.** Determination of Burger's creep constants for Test C

**Table 3.** Parameters for the general equation of Burgers model

Test Number	Stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\eta_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> · h)	$\eta_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> · h)	$G_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$G_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
A	181.2	4.062E+6	8.271E+7	348,461.5	32,299.5
C	270.3	4.078E+6	2.073E+8	95,512.4	32,883.2

**Table 4.** Parameters for the Hardy's empirical equation based on Burgers model

Test Number	Stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\eta_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> · h)	$\eta_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> · h)	$G_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$G_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
A	181.2	1.354E+6	2.757E+7	116,153.8	34,593.4
C	270.3	1.359E+6	6.910E+7	31,837.5	27,885.5

두호층 이암의 실내 역학시험으로 구한 탄성계수 ( $=2.89 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ ) 및 포아송 비( $=0.3$ )로부터 체적계수  $K=1.204 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용하였다.

Hardy *et al.*(1970)의 연구결과에 따르면 응력이 증가함에 따라 1차 크리프에서 탄성변형률의 량을 조절하는  $G_1$ 은 감소하며 탄성전단계수  $G_2$ 는 응력에 영향을 받지 않는 것으로 나타났는데, Table 3 및 4에 정리된 본 연구결과와 잘 일치하고 있다. 또, 1차 크리프에서 시간에 영향을 받는  $\eta_1$ 은 응력에 무관하게 거의 일정한 값을 보였으며, 2차 크리프에 영향을 미치는  $\eta_2$ 는 응력 증가에 따라 증가하여서 이 역시 Hardy *et al.*(1970)의 연구결과와 비슷한 경향을 보였다.

순간변형률 : 순간 변형률( $\epsilon_i$ )은 재하하중의 크기와 밀접하게 관계되는데 Table 2의 Griggs 및 Li와 Xia(2000)의 경우를 기준으로 순간변형률( $\epsilon_i$ )과 일축압축강도에 대한 % 응력수준( $\sigma\%$ ) 사이의 관계를 도시한 결과는 Fig. 14에 보인 바와 같이 응력이 증가할수록 변형률 증분이 직선적으로 증가하였으며 다음 관계식으로 표현된다.

$$\epsilon_i (\times 10^{-3}) = 0.15 \sigma\% - 0.18 \quad (11)$$

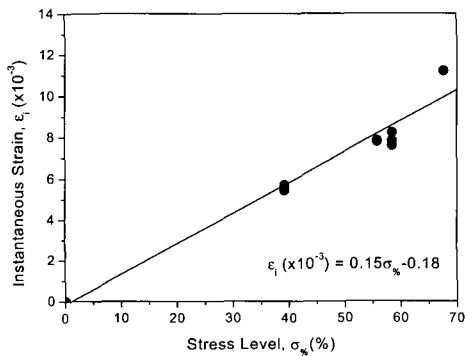


Fig. 14. Instantaneous strain in relation to stress level

변형률 속도 : 변형률 속도는 재하되는 순간 최대 값을 보이거나 시간이 지나면서 급격히 감소하여 속도가 일정하게 되는 2차 크리프의 양상을 보이

게 된다(Okubo, *et al.*, 1991). Fig. 15는 모든 시료의 1차 크리프 변형률 속도를 한 그래프에 나타낸 것으로서, 재하 하중의 크기와 무관하게 경과 시간에 따라서 식 (12)와 같이 변형률 속도가 비슷한 양상으로 감소하고 있음을 보여주고 있다.

$$v_\epsilon = 0.0002 t^{-0.92} \quad (12)$$

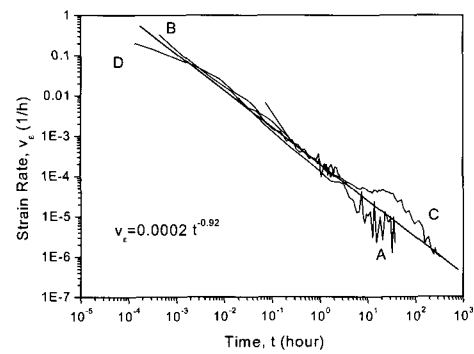


Fig. 15. Change of strain rate with time lapse

## 결론

신생대 마이오세 중기 및 후기에 포항분지에서 퇴적된 연일층군 두호층의 이암은 석화작용(lithification)이 불완전한 암석으로 간극비가 0.41로 크며 illite, chlorite 등의 점토광물을 26% 정도로 함유하고 있어 큰 크리프 변위거동을 보이는 암석이다. 본 연구에서는 포항의 두호층에서 채취한 신선한 이암을 대상으로 물성 및 역학시험과 4회의 일축 크리프시험을 수행하여 이암의 크리프 변위거동 특성을 밝히고자 하였다. 그러나, 4개의 시료 중 2차 크리프까지 장기간 시험이 진행된 것은 두 개의 시료에 불과하여 시험결과에 한계성이 있을 수 있어 추후 동일한 암석을 대상으로 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1) 시험에 사용된 이암은 quartz 62.4%, illite 18.4%, albite 9.5%, chlorite 7.6%, pyrite 2.0% 등의 광물로 구성되어 있으며, 물성시험 결과, 비중 2.45, 단위중량 1.79g/cm<sup>3</sup>, 간극비 0.41, 흡수

을 15.5 %이었고, 일축압축강도는 462kgf/cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.89×10<sup>4</sup>kgf/cm<sup>2</sup>, 포와송비는 0.30이었다.

2) 4개의 시료에 대하여 일축압축강도의 각각 39.2%(A), 55.8%(B), 58.5%(C) 및 67.6%(D)의 정적 하중을 가하여 크리프 시험을 수행하였는데, 시료 B와 D는 시험개시 300분만인 1차 크리프가 진행되던 중에 시료가 파괴되었고 시료 A 및 C는 350시간 이상 시험이 지속되어 완전한 2차 크리프 곡선을 얻을 수 있었다. 특히 가장 큰 하중 하에서 시험된 시료 D는 시료 C와 비슷한 변형률 11.5%에서 파괴되어서 이암의 파괴변형률에 도달되어 파괴된 것으로 판단되나, 시료 B는 시료 내부에 잠재된 손상으로 인하여 조기에 파괴된 것으로 추정된다.

3) 시험 결과로부터 이암의 크리프 특성을 규정하는 다양한 경험식 및 Burger 모델의 이론식에 포함된 제반 크리프상수를 도출하였다. 그 중 Griggs의 경험식과 Burger 모델의 이론식이 이암의 크리프 특성을 가장 잘 반영하는 것으로 평가되었다. Griggs의 크리프 상수 a, b 및 c는 응력 증가에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 보였지만 이들의 상관성을 결정하기 위하여서는 더 많은 시험이 필요할 것으로 생각된다. Burger 모델에서는 응력이 증가함에 따라 1차 크리프에서 탄성변형률의 양을 조절하는 G<sub>1</sub>은 감소하였고, 탄성전단계수 G<sub>2</sub>는 응력에 무관하였다. 또, 1차 크리프에서 시간에 영향을 받는 η<sub>1</sub>은 응력에 무관하게 거의 일정한 값을 보였으며, 2차 크리프에 영향을 미치는 η<sub>2</sub>는 응력증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.

4) 순간탄성변형률은 응력 증가에 따라서 직선적으로 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 수식  $\epsilon_i(\times 10^{-3}) = 0.15 \sigma\% - 0.18$ 로 표시할 수 있다. 이 수식에 의하면 일축압축강도에 상응하는 100%의 응력이 작용하는 경우 예상되는 순간탄성변형률은 1.48%가 된다. 이는 실제 일축압축강도시험 시의 1.8%에 미치지 못하는데, 두 값의 차이는 일축압축강도시험에 소요된 시간과 관련된 것으로 추정된다.

5) 1차 크리프가 진행되는 동안 변형률 속도는

시간경과에 따라 급격히 감소하여 일정한 속도를 유지하는 2차 크리프에 도달하는데, 응력의 크기에 무관하게 일정 시간 경과후의 변형률 속도는 거의 비슷한 양상으로 수식  $v_e = 0.0002 t^{-0.92}$ 에 따라 감소하였다.

## 사 사

이 논문은 1999년도 두뇌한국21(BK21)사업 핵심분야에 의하여 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김광호, 도성재, 황창수, 임동성, 1993, 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기 해석, 광산지질, 26권, 507-518.
- 엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도 포함도폭 및 설명서, 국립지질조사소
- 이유대, 1988, 한국 포항분지 신 제3기층의 연구, Jour. Geol. Soc. Korea, 24, pp. 16-30.
- Andrade, E.N. DAC., 1910, On the viscous flow in metals and allied phenomena, proc. Roy. Soc., London A84, 1-12
- ASTM D4405, 1989, Standard Test Method for Creep of Cylindrical Soft Rock Core Specimens in Uniaxial Compressions, pp. 749-753.
- Cottrell, A.H., 1952, The time law of creep, J. of Mech. Phys. Solids 1, pp. 53-63.
- Griggs, D.T., 1936, Deformation of rocks under high confining pressure, Jour. Geol., v. 44, 541-577.
- Hardy, H.R., 1966, Inelastic behavior of geologic materials, Canada Dept. Mines Tech. Surveys, Rept. FMP 65, 66.
- Hardy, H.R., Jr., Kim, R.Y., Stefanko, R., and Wang, Y.J., 1970, Creep and micro-seismic activity in geological materials, Proceedings, 11th Symposium

- on Rock Mechanics (AIME), pp. 377-414.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1976, Fundamentals of Rock Mechanics, Ahalsted Press Book, pp. 305-316.
- Jaffreys, H., 1958, A modification of Lomnitz's law of creep in rocks. Geophys. Jour., v. 1, 92-95.
- Kaiser, P.K, Morgenstern, N.R., 1981, Phenomenological model for rock with time-dependent strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 18, 153-165.
- Li, Y. and Xia, C., 2000, Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37, pp. 467-475.
- Lomnitz, C., 1956, Creep Measurement in Igneous Rocks, Jour. Geol., v. 64, 5.
- Maranini, E, Brignoli, M., 1999, Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 36, 127-138.
- Okubo, S., Nishimatsu, Y., Fukui, K., 1991, Technical note complete creep curves under uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 28, 77-82.
- Penny, R.K. and Marriott, D.L., 1995, Design for creep, Chapman & Hall, pp. 426.
- Singh, D.P.A, 1975, A study of creep of rocks, In. J. rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstract, v. 12, 271-276.
- Tateiwa, I., 1924, Geological Atlas of Chosen, No.2, Ennichi kuryuho and Choyo sheets. Geol. Surv. chosen (In Japanese)
- 김광식  
(주)한라엔지니어링  
137-895 서울특별시 서초구 양재동 272-8 (금정빌딩)  
Tel: 02) 579-2560  
E-mail: geoblue@hanmail.net
- 김교원  
경북대학교 지질학과  
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370  
Tel: 053) 950-5357  
E-mail: gyokim@knu.ac.kr

투 고 일 2003년 3월 25일  
심 사 일 2003년 3월 26일  
심사완료일 2003년 5월 6일