

포항분지 제3기 이암의 크리프 특성

김 광 식 (Kwang-Shik Kim)

경북대학교 지질학과

김 교 원 (Gyo-Won Kim)

경북대학교 지질학과

정 자 혜 (Ja-Hyea Jung)

경북대학교 지질학과

요 약

암석은 외력하에서 탄성 및 점탄성적 변형거동을 보인다. 크리프 특성은 일정하중하에서 시간에 대한 암석의 변형으로 장기적인 지반거동을 예측할 수 있는 중요한 요소이며 암석의 점탄성적 성질을 반영한다. 포항지역에 분포하는 미고결 퇴적암인 이암을 대상으로 암석의 기본적인 물성, 역학적 특성 및 크리프 시험을 실시하였다. 일축압축강도의 40-70% 응력수준에서 순간탄성변형률은 하중의 증가에 대하여 선형적인 관계를 보였으며, 일차 크리프 변형률은 시간경과에 대하여 로그함수로 적절히 설명되었다. 일차 크리프에서 이차 크리프로 진행되는 과정을 살피기 위하여 약 5일 이상의 시간이 필요하였으며 최종 크리프 변형에 의한 파괴시의 변형률은 약 0.01로 밝혀졌다.

서 론

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(Yongsheng and Caichul, 2000).

공학적인 암석의 성질에 대한 분류에서는 탄소성 모델(elasto-plastic model)이 주로 이용되고 있으나, 이는 짧은 시간 내에서 거동되는 특성에 해당되므로 변형 메카니즘과 암의 강도 측면에서 시간에 대한 영향성은 무시되어왔다. 비록 점성의 영향이 실험실에서의 시험에 의해 나타나는 탄소성 거동에 비해 두드러지지는 않지만, 이를 무시하는 경우 예측된 거동과 현장에서 측정된 실제 거동간에 상당한 차이를 초래하게 된다(Maranini and Brignoli, 1999). 이러한 현상은 터널이나 지하시설과 같은 심부 암반의 굴착에서 흔히 볼 수 있다. 대형 구조물의 지보나 암석지주의 변형은 오랜 시간 동안 일정한 하중을 계속적으로 받게 되는데 일정시간이 경과한 후에는 크리프 변형이 주를 이루게 된다. 주목할 점은 크리프 변형이 장기간 지속되어 어느 한계에 달하면 급작스런 파괴로 이어진다는 것이다. 따라서, 구조물의 장기적 안정성 검토시에 기초지반의 크리프 특성 파악이 필수적이라고 할 수 있다.

이처럼 암석의 변형은 탄성거동 뿐만 아니라 점탄성적인 거동을 보이므로 시간에 따른 크리프거동을 설명하기 위하여 많은 연구가 선행되어져 왔는데, 암석의 크리프 특성은 (1) 지수함수 혹은 멱함수를 이용하여 시험 데이터를 적절히 대비, (2) 역학 혹은 수학적 모델, (3) 크리프 거동의 이론 등으로 평가된다(Kaiser and Morgenstern, 1981).

Figure 1은 일축압축하에서의 암석의 크리프 특성을 나타내는 일반적인 그림이며 크리프 시험으로 얻어진 변형률-시간 곡선에 대한 수식은 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + f(t) + Dt \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 순간 변형률, $f(t)$ 는 1차 크리프에 대한 항을 나타내며, Dt 는 2차 크리프에 대한 일차 항을 나타낸다. 변형속도가 서서히 감소되는 1차 크리프에 대하여 여러 형태의 수식이 제안되고 있으나 일반적으로 Griggs(1936)가 제안한 $f(t) = A \log(t)$ 이 사용되나 정(1996)은 $f(t) = A \log(1+t)$ 을 제안하였다. 여기서 A와 D는 응력의 크기에 따른 정수로서 크리프 정수(creep constant)이다. 식(1)의 세 번째 항이 이차 크리프를 설명하는 항목으로써 이러한 이차 크리프의 존재 여부는 지반의 장기적 안정성을 고려한 설계에서 중요하게 인식되고 있다(Chin and Rogers, 1987).

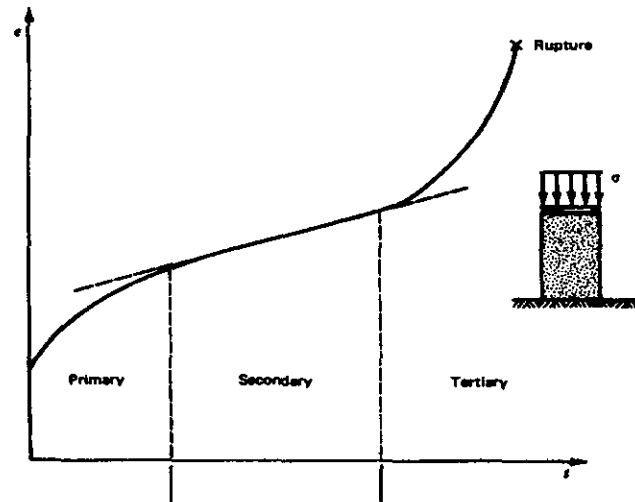


Figure 1. Creep behavior of rocks

암석의 크리프 거동을 예측하기 위한 역학적 모델은 spring, dash pot, slider 및 brittle yield 요소를 이용하여 표현되며, 이암(mudstone)과 같은 연암(weak rock)의 크리프거동에 대한 역학적 모델로는 Maxwell 요소와 Kelvin 요소를 직렬연결한 Burgers 모델이 적합하다(Overt, 1967; Hardy, 1959). 최근 의성소분지의 백악기 사암에 대하여 크리프의 특성을 파악하고 이에 대한 모델로서 Maxwell, Kelvin, Bingham 모델의 조합을 제시한 바 있다(정태종, 1996).

본 연구에 적용된 암석은 제3기에 퇴적된 포항분지의 이암에 해당된다. 이 지역의 제3기 퇴적암은 미고결로 인하여 상대적으로 낮은 암석강도와 큰 변형성을 보인다. 반면 연구지역 일대에는 최근 대단위 고층 건물이 건설되었거나 건설되고 있으나, 건물하중에 따른 장시간 지반의 변형에 대한 고려는 미흡한 실정이다. 그러므로 이번 연구에서는 제3기층의 이암을 대상으로 기본물성, 일축압축시험과 크리프 시험을 통하여 암석의 탄성 및 점성적 거동에 대하여 살펴보고자 한다.

지질 개요

본 연구지역은 경북 포항시 용흥동 일대로서 경도 $129^{\circ}20'45''$, 위도 $36^{\circ}02'32''$ 에 해당된다(Figure 2). 이 지역은 포항분지로 육성층인 백악기 퇴적암류를 기반으로 해성층인 신

생대 제3기층이 분포하고 있으며(김광호 등, 1993; 이유대, 1988), Tateiwa(1924)는 이 제3기 퇴적층을 연일층군이라 하였다. 엄상호 등(1964)의 지질도에 따르면 두호층에 해당된다. 두호층은 담갈색, 담회색, 황백색 이암으로 구성되며 하부는 이동층, 상부는 여남층과 접한다(이동우, 1983).

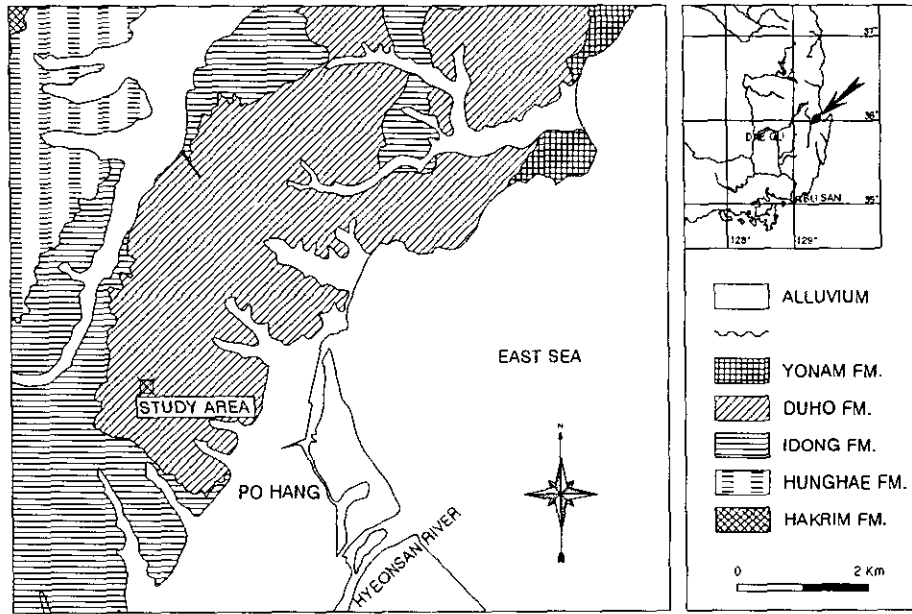


Figure 2. Geological map of the study area showing sampling location

조사 및 시험

암석의 화학적 성분 : 이암의 구성성분을 확인하기 위하여 SIEMENS D5005를 사용하여 XRD(X-Ray Diffraction, X선 회절) 분석을 실시하였으며, 그 결과 이암의 구성물질과 중량 백분율은 Table 1 및 Figure 3과 같다.

Table 1. Mineral constituent

Mineral	Weight(%)	Error
Quartz	62.4%	0.96
Albite(low)	9.5%	0.58
Chlorite	7.6%	0.83
Pyrite	2.0%	0.15
Illite	18.4%	0.90

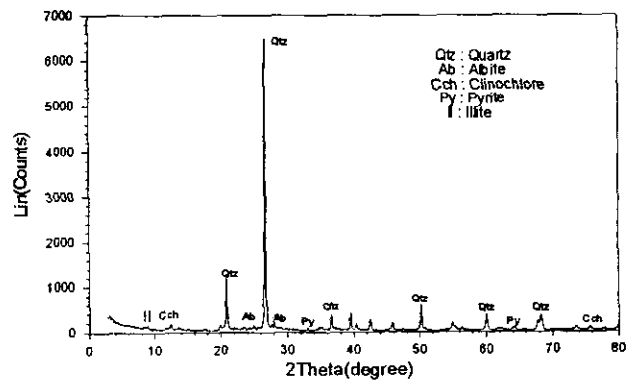


Figure 3. Result of XRD test

암석의 기본물성은 진비중(true specific gravity) 2.45, 단위중량(density) 1.79g/cm^3 , 공극비(void ratio) 0.41, 공극률(porosity) 29.07% 및 흡수율(water sorption) 15.46% 이었다.

암석의 역학적 특성은 외력이 가해질 때의 방향, 크기, 위치에 따라 다르게 나타난다. 이와 같은 역학적 성질을 규명하고 정량적으로 평가하기 위하여 일축압축강도와 이에 따른 변형률을 측정하고 탄성계수와 포와송비를 구하였다. 본 시험에 쓰인 일축압축시험 기기는 ELE compact-1500 압축기, 하중계측기(load cell), A/D변환기(convertor), 및 컴퓨터(computer) 등이다. 변형률 게이지(strain gauge)는 일본 Sokky Kenkyujo 제품으로 PFL-10-1-1L타입을 사용하였다.

일축압축 시험시 재하속도는 현재 ISRM 규정에는 $5\text{-}10\text{kg/cm}^2/\text{sec}$ 로 제안하고 있으나 본 시험에서는 약 $20\text{kg/cm}^2/\text{sec}$ 의 속도로 측정되었다. 시험을 위한 시료는 층리면이 수직이 되도록 채취하였으며 NX 사이즈의 원주형으로 직경:길이=1:2가 되게 성형하였다. 또 실험 중 시료의 온도, 습도의 영향을 줄이기 위해 밀봉한 상태에서 시료를 일정 기간동안 실내에서 보존한 후 시험을 하였다. 준비된 시료는 이암이 흡수율에 따라 강도값에 큰 차이를 가지므로 완전건조 상태에서 시험을 하였으며 변형률 게이지는 시료의 중앙에 중, 횡방향으로 부착하였다. 시험에서는 응력 (σ)과 변형률 (ϵ_x, ϵ_y)을 측정하였으며, 탄성계수(E)와 포와송비(ν)를 산정하였다. 본 연구에서 탄성계수는 접선 탄성계수를 의미한다. 시험결과 평균값으로 일축압축강도 462 kgf/cm^2 , 탄성계수, $E = 2.89 \times 10^4\text{ kgf/cm}^2$, 포와송비, $\nu = 0.30$ 이었다. Figure 4는 응력과 변형률의 관계를 나타내고 있다.

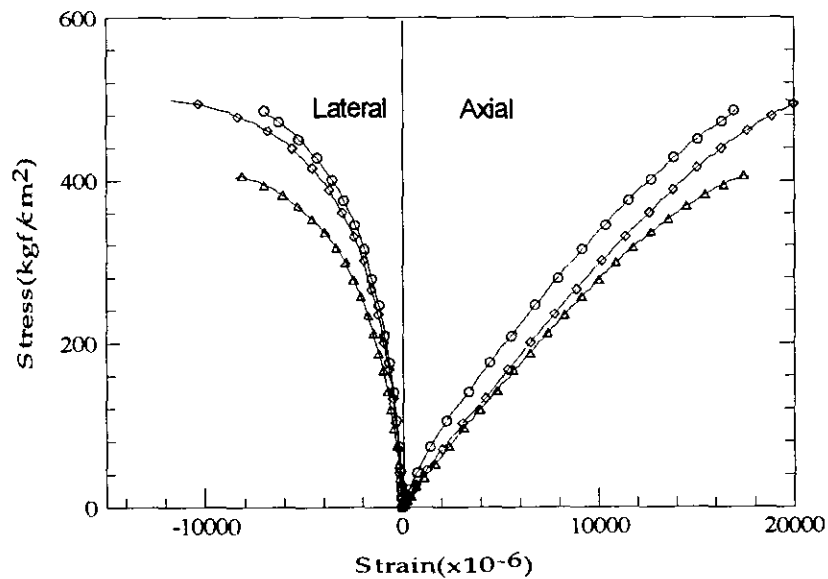


Figure 4. Stress-Strain relation

일축 크리프시험

시험 기기 및 방법 : 크리프 변형에 영향을 주는 중요한 인자로는 응력수준, 온도, 시간을 들 수 있다(Penny and Marriott, 1995). 응력수준은 일축압축강도에 대한 재하 하중의 비

로써 표현을 하며 크리프 시험기간 동안 일정하게 유지가 되어야 한다. 또한 온도에 대한 변화를 최소화하기 위하여 일정한 온도에서 시험을 실시하는 것이 바람직하나 여건상 시험실에서의 상온에서 측정을 하였다. 본 연구 시험을 위하여 Figure 5와 같은 정하중을 장기간 가할 수 있도록 크리프 시험기기를 제작하였다. 이 기기는 추에 의한 하중의 약 20배의 하중이 가해지도록 고안된 것이다. 지지대가 힌지(hinge)로부터 회전되면서 발생하는 미소한 각에 의한 하중의 변화를 방지하기 위하여 시료 상부에 구형대(spherical seat)를 설치하였다. 이 구형대는 원호로 절삭된 암수가 맞물려 있으며 윤활유로 움직임을 부드럽게 하여 상부가 약간 회전되더라도 하부에 수직으로 재하가 되도록 해 준다. 추가로 일정시간 크리프가 진행된 후 시료가 파괴될 때 지지대(beam)가 급작스럽게 낙하하여 발생할 수 있는 기기 변형을 방지하기 위하여 보호대(protected bar)를 설치하였다. 또한 유압잭으로 지지대를 들어 올렸다가 유압을 서서히 낮춤으로써 하중을 서서히 재하되도록 하여 지지대의 낙하에 의한 충격을 완화하였다. 변형은 일축압축시험에서 사용한 것과 동일한 변형률 게이지(strain gauge)를 사용하였으며, A/D 변환기를 통하여 약 2초 간격으로 컴퓨터에 기록되도록 하였다. 크리프시험에 사용된 시료는 NX 크기로 총리면에 수직으로 채취하여 직경:길이의 비가 1:2가 되도록 성형하였다(ASTM D4405, 1989).

연암(weak rock)의 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). 단, 시험도중 공기 중으로부터 흡수되는 수분은 무시하였다. 재하하중에 대한 정확한 값을 구하기 위하여 크리프 시험에 앞서 하중계측기를 이용하여 시료가 받게 될 하중을 먼저 측정을 한 후에 시료를 세팅하여 시험을 실시하였다.

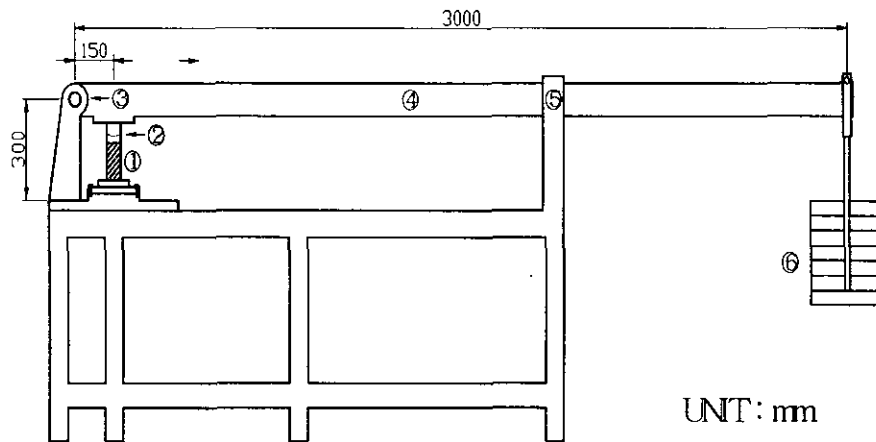


Figure 5. Schematic diagram of creep test equipment ① Rock sample ② Spherical seat ③ Hinge ④ Beam ⑤ Protected bar ⑥ Weight

시험결과 및 고찰 : 본 크리프 시험은 Table 2와 같이 평균 일축압축강도의 40~70%에 해당하는 범위의 일정하중에 대하여 총 4개의 시료를 시험하였다. 비록 같은 지역에서 얻어진 시료이긴 하나 최종적으로 파괴되는 시점은 예상되는 것처럼 일정한 양상을 보이지는 않았다. 따라서 여기서는 파괴에 도달하는 시간이 짧게 측정된 시료와 장시간 측정이 요구되었던 시료에 대한 이해를 돕기 위하여 Figures 6 및 7과 같이 약 300분 정도의 시간에서의 그래프와 400시간에 걸쳐 측정된 데이터를 다루고자 한다.

Table 2. Load applied for each test

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

Figure 6은 일정 하중 재하 후 300분에 걸쳐 기록된 변형률을 도시한 것이며, Figure 7은 400시간까지 기록된 측정치를 나타내고 있다. 장시간에 걸쳐 시험이 진행된 A와 C의 경우는 약 평균 일축압축강도의 약 40%와 60%의 재하 하중에서 측정된 것이다. A시료는 13일간 측정된 것이며 최종 변형률이 7×10^{-3} 에 미치지 못하고 있어서 암석 파괴가 예상되는 변형률 약 10×10^{-3} 에 도달하는데는 보다 더 많은 시간이 소요될 것으로 추정된다. C시료는 평균강도의 약 60%의 재하 하중이 가해졌으며 16일간 측정되었다. 8일 동안 1차 크리프가 진행되면서 서서히 변형률 속도가 감소하고 있으며 최고 11.6×10^{-3} 의 변형률을 보인 후 파괴되었다. 이들 시료는 상당한 시간에 걸쳐 1차 크리프 기간을 거친 후 2차 크리프의 거동이 시작되었으며 제한된 측정시간까지 일정한 구배의 변형률을 나타내고 있다. B시료는 측정시간이 가장 적은 것으로서 타 시료와 비교했을 때 1차 크리프의 진행과정 중 파괴된 것으로 사료된다. D시료는 약 70%에 달하는 하중에서 측정되었으며 본 시험을 준비하는 과정에서의 경험을 비추어 볼 때 충분한 시험시간을 가진 것으로 고려할 수 있다.

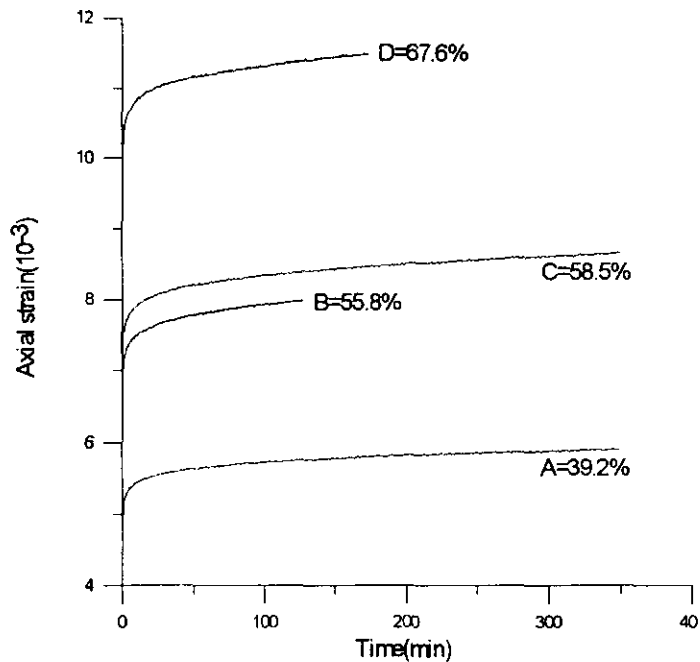


Figure 6. Creep curves under various stress level

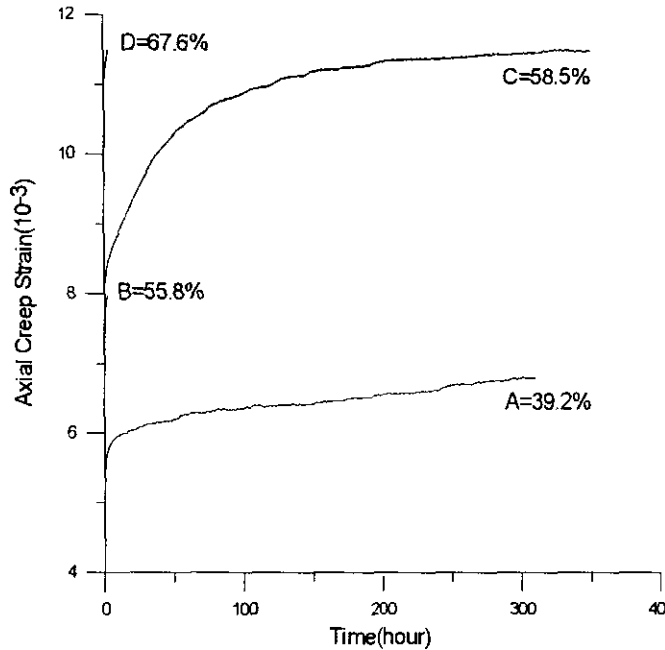


Figure 7. Creep curves under various stress level

시험결과 포항지역의 이암은 측정시간이 5일 이상이 되어야만 보다 정확한 2차 크리프의 양상을 파악할 수 있었다. 만약 이보다 짧은 시간을 고려할 경우, 그래프 상에 나타나는 가식적인 양상으로 인한 오판을 가져 올 수 있을 것으로 생각된다.

다음은 각각의 시료에 대한 시험 결과 값을 변형률의 변화양상으로 구분하여 각 구간별 크리프 변형률 값과 거동의 양상을 살펴본다. 일정하중이 재하되는 순간 시료는 먼저 탄성 거동을 보이며 이후 짧은 시간 내에 점진적으로 변형률 속도가 감소되는 1차 크리프로 진행하게 된다. 이러한 점진적인 양상은 탄성에서 비탄성으로 전이되는 구간으로 생각되며, 양측의 점근선으로 부터 만나는 지점을 순간 변형률로 설정하였다. Figure 8은 시료 E의 크리프 시험 초기의 시간-변형률 그래프로서 이러한 양상을 잘 보여 주고 있으며, 다른 시료에서도 이런 현상이 관찰되었다. 이들을 종합하여 재하하중 백분율(%)과 순간 변형률 사이의 관계를 도식한 결과는 Figure 9와 같이 비례관계를 보이고 있으며 다음 식으로 표현된다.

$$\varepsilon_e = 16.3 \times 10^{-3} (\sigma_{\%}) - 1.97 \times 10^{-3} \quad (2)$$

여기서, ε_e 는 탄성변형이고 $\sigma_{\%}$ 는 평균 강도에 대한 재하하중의 백분율이다. 1차 크리프와 2차 크리프는 변형률 속도가 일정해 지는 구간의 시작점을 기준으로 하여 설정하였으며, 로그 함수와 일차 함수를 이용하여 각각의 크리프 상수를 결정하였다(Table 3). Fig 10은 A 시료의 일차 크리프 구간에 대하여 로그함수를 적용한 것으로 높은 상관계수를 보이고 있다.

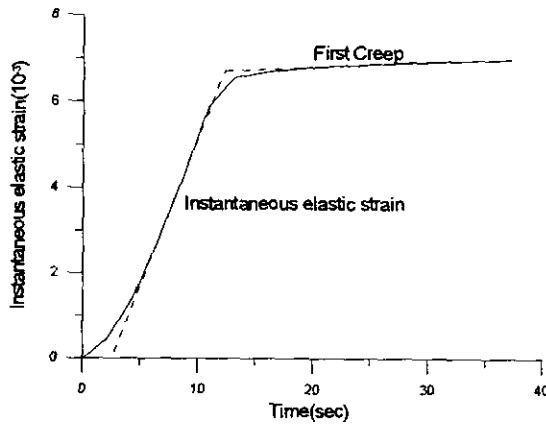


Figure 8. Determination of elastic strain

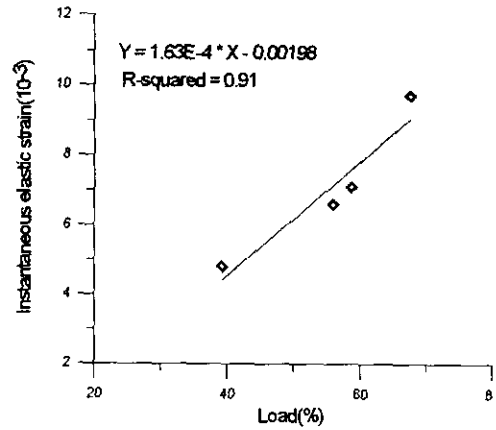


Figure 9. Relationship between percent load and elastic strain

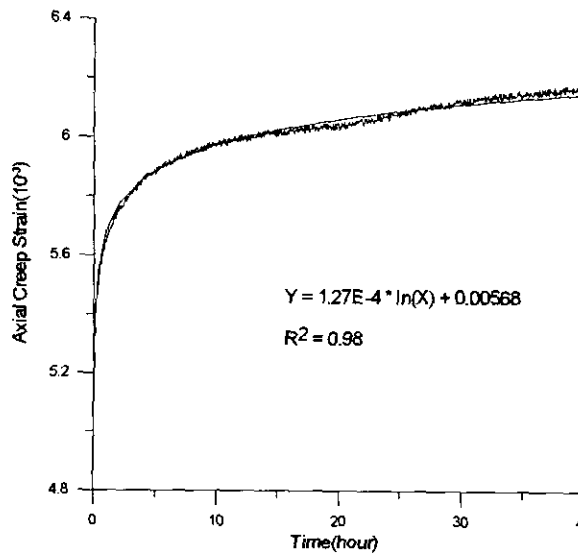


Figure 10. Determination of the first creep constant

변형률 속도는 재하되는 순간 최대값을 보이나 시간이 지나면서 급격히 감소하며 2차 크리프의 양상으로 나타난다(Figure 11). Figure 12는 log-log 스케일을 이용하여 크리프 변형률 속도(creep strain rate, v_ϵ)와 시간(hour, t)에 대하여 나타낸 것인데(Okubo, 1991) 다음의 수식으로 표현할 수 있으며 변형률 속도상수 a, β 를 구할 수 있고, 이로부터 크리프 변형률 속도-시간 곡선이 log-log 함수로 표현하기에 적절하다는 것을 알 수 있다.

$$\ln v_\epsilon = a \ln t + \beta \quad (3)$$

이상에서 구한 상수들에 대한 값들은 다음 Table 3에 정리하였다.

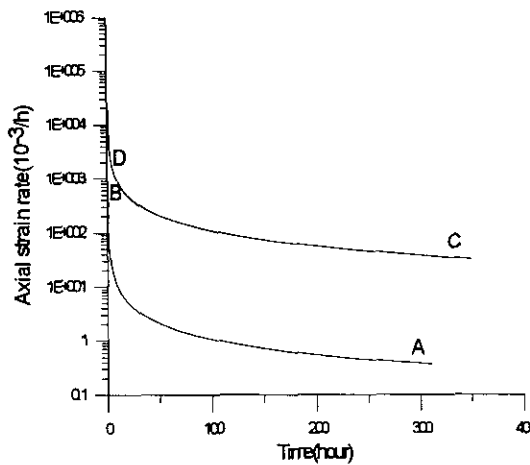


Figure 11. Change of axial strain rate with time

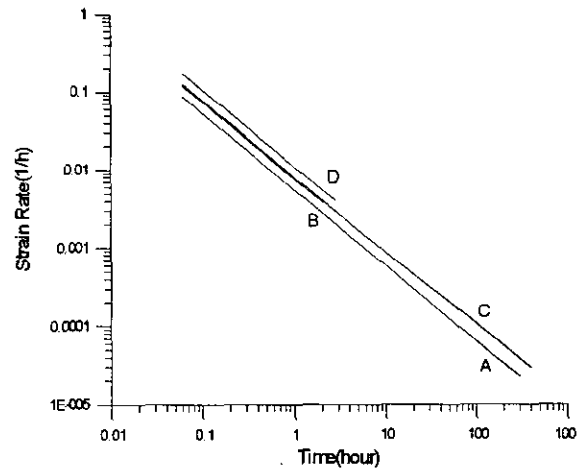


Figure 12. Change of axial strain rate with time

Table 3. Creep constants(A, D) and strain rate constants(α , β)

Sample	Load %	ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)	A ($\times 10^{-6}$)	D ($\times 10^{-6}$)	α	β
A	39.2	4800	127	2.12	-0.966	-5.21
B	55.8	6600	165	.	-0.977	-4.85
C	58.5	7100	665	1.22	-0.936	-4.83
D	67.6	9700	214	.	-0.979	-4.49

Hardy *et al.*(1970)은 Indiana Limestone의 크리프 특성을 연구하면서 Burger 물체의 모델을 이용하였다. Burger 물체 모델로부터 일정한 응력(σ_1) 하에서 소요시간 t 에 대한 축변형(axial strain)은 다음 식으로 계산된다.

$$\epsilon(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} e^{-(G_1 t / \eta_1)} + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t \quad (4)$$

여기서 체적계수(Bulk modulus) K 는 다음과 같다.

$$K = \frac{E}{(3-2\nu)} \quad (5)$$

또한, η_1 은 지연 탄성률(rate of delayed elasticity)을 결정하며, η_2 는 점성률(rate of viscous flow)를 서술한다. 그리고 G_1 은 지연탄성의 양(amount of delayed elasticity)를 조

절하며 G_2 는 탄성전단계수(elastic shear modulus)이다. 이러한 상수는 Figure 13 에서 구해지는 암석의 특성이다.

Figure 14는 ϵ_1 과 t 에 대하여 1차 크리프 곡선과 2차 크리프 곡선에 대한 점근선을 그린 것이며 식 4에 해당된다. $t=0$ 일 때 절편은 $\epsilon_0 = \sigma_1(2/9K + 1/3G_2)$ 이며, t 가 클 때 절편은

$$\epsilon_B = \sigma_1(2/9K + 1/3G_2 + 1/3G_1)$$

으로 벌어지며 $\sigma_1/3\eta_2$ 의 기울기를 가진다. 2차 Creep 곡선에 대한 점근선과 Creep 곡선 사이의 거리를 q 라고 했을 때, 시간 t 에 대한 반대수 plot에서 $\log q$ 는 절편이 $\sigma_1/3G_1$ 이고 경사는 $-G_1/2.3\eta_1$ 이다. K 와 G_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$K = \frac{\sigma_1}{3(\epsilon_1 + 2\epsilon_2)} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_1}{3G_2} = \epsilon_B - \sigma_1 \left(\frac{1}{3G_1} + \frac{2}{9K} \right) \quad (7)$$

본 연구에서는 Hardy *et al.*(1970)가 적용한 식을 도입하여 Burger 물체 모델의 상수 (η_1, η_2, G_1, G_2)를 구하였으며, 다음 Table 4에 정리하였다.

Table 4. The rheological model parameter of the Burger body

Sample	% Loading	η_1 (kgf/cm ² · s)	η_2 (kgf/cm ² · s)	G_1 (kgf/cm ²)	G_2 (kgf/cm ²)
A	39.2	9.64E+04	2.84E+07	45,007	19,309
C	58.5	1.21E+07	1.83E+09	82,438	20,345
D	67.5	2.77E+03	1.09E+09	24,351	19,562

결 론

포항분지의 제3기층은 신생대의 미고결 퇴적암으로 형성되어 있어 단기적인 암석의 역학

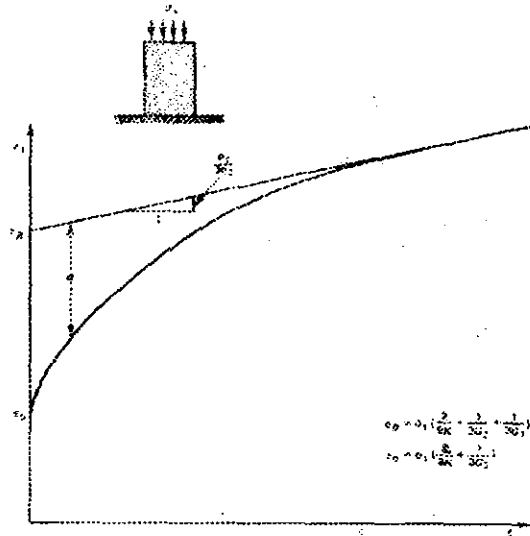


Figure 14. Creep in uniaxial compression of a rock that behaves as a Burgers body (Hardy *et al.*, 1970)

성질보다 장기적인 크리프 현상의 효과가 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 포항의 두호층에서 채취한 신선한 이암을 대상으로 기본 물성, 역학시험을 거쳐 크리프 시험을 수행하고 그 특성을 밝히고자 하였다.

시험에 사용된 이암은 석영 62.4%, 일라이트 18.4%, 그 외 몇몇 광물로 구성되어 있으며 물성시험 결과, 진비중 2.45, 단위중량 1.79g/cm³, 공극비 0.41, 공극률 29.07%, 흡수율 15.46 이었다. 역학적 성질을 규명하기 위하여 일축압축시험과 변형률을 측정하여 분석하였다. 일축압축강도는 462kgf/cm², 탄성계수는 2.89×10⁴kgf/cm², 포와송비는 0.30으로 나타났다.

이암에 대한 크리프 시험은 점성적 거동에 대한 해석을 가능하게 하며 시간의존성을 파악하는데 유용한 방법이다. 이를 위하여 별도로 시험기기를 제작하였으며 일축압축강도의 40~70%에 해당하는 재하 하중의 범위에서 총 4번의 시험이 시행되었다. 단 시료는 건조시료를 사용하였다. 탄성거동이 대부분을 차지하는 순간변형률은 하중의 증가에 따라 증가하는 양상을 나타내었으며 재하하중%에 대한 순간 변형률은 직선적으로 증가하였으며, 관계식은 $\epsilon_e = 16.3 \times 10^{-3} (\sigma_e) - 1.97 \times 10^{-3}$ 이었다.

시간에 대한 변형률에서 1차 크리프가 진행되는 구간은 log(t) 함수를 이용하여 적절히 묘사가 되었으며 2차 크리프의 특성을 살펴보았다. 장시간 시험이 진행된 A 및 C 시험 결과 1차 크리프의 변형이 2~5일 동안 지속이 되었으며, 2차 크리프의 구간에서 변형률 속도가 10⁻¹⁰/sec까지 낮아지며 순간적으로 3차 크리프에 도달되며 시료가 파괴되었다. 여기서 1차 크리프에서 2차 크리프의 단계로 진행하기 위해서는 5일 정도의 충분한 시간을 가져야 하며, 이후 파괴에 도달하는 변형률은 약 0.01 정도로 추정된다.

사사

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

참 고 문 헌

김광호, 도성재, 황창수, 임동성, 1993, 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기 해석, Jour. Korean Inst. Mining Geol., 26, pp. 507-518.

엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도 포항도폭 및 설명서, 국립지질조사소

이동우, 1983, 포항분지의 절리계와 고응력장의 해석, 고려대학교 석사학위논문, pp 3-7.

이유대, 1988, 한국 포항분지 신 제3기층의 연구, Jour. Geol. Soc. Korea, 24, pp. 16-30.

정태종, 1996, 의성 소분지에 분포하는 백악기 사암의 크리프 시험, Jour, Korean Earth Science Society, Vol. 17, No. 2, p. 109-118.

ASTM D4405, 1989, Standard Test Method for Creep of Cylindrical Soft Rock Core Specimens in Unidial Compressions, pp. 749-753.

Chin, Han-Ping, J. David Rogers, 1987, Creep parameters of rocks on an engineering scale, Rock Mechanics and Rock Engineering, 20, pp. 137-146.

Griggs, D. T., 1936, Deformation of rocks under high confining pressure, *J. Geol.*, 44, pp. 541-577.

Hardy, H. R., 1959, Time dependent deformation and failure of geological materials, *Proc. 3rd Symp. Rock Mech.*, Golden, Colo., pp. 135-175.

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.

Kaiser P. K, Morgenstern N. R, 1981, Phenomenological model for rock with time-dependent strength, *Int. J. Rock Mech. Mim. Sci.*, 18, pp. 153-165.

Maranini, E, Brignoli, M., 1999, Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization, *Int. J. Rock Mech. Mim. Sci.*, 36, pp. 127-138.

Overt, L., 1967, *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 293-301.

Okubo, S., Nishimatsu, Y., Fukui, K., 1991, Technical note complete creep curves under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Mim. Sci.*, 28, pp. 77-82.

Penny, R. K., Marriott, D. L., 1995, *Design for creep*, Chapman & Hall, 426 .

Tateiwa, I., 1924, *Geological Atlas of Chosen*, No.2, Ennichi kuryuho and Choyo sheets. *Geol. Surv. chosen (In Japanese)*

Yongsheng Li, Caichu Xia. 2000, Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Mim. Sci.*, 37, pp. 467-475.