

미고결 암석의 시간 의존적 변형과 그 의미

장찬동 (충남대학교 지질환경과학과)
Mark Zoback (Stanford University)

1. 서 론

국내 암반공학계에서 암석의 시간 의존적 변형은 주로 화강암이나 고화된 셰일 등의 경암에 초점을 맞추어 왔다(장명환과 양형식, 1998; 김영수 외, 2003; 김광식과 김교원, 2003; Hong and Jeon, 2004). 연약 지반이나 미고결 암반에서 발생하는 변형 작용은 지반 침하 등의 지질공학적 안정성 문제와 관계될 뿐만 아니라, 그 결과로 나타나는 지반의 제 역학적 성질(공극률, 투수율, 고화정도, 변형계수 등)의 변화를 예측 규명하는데 있어서도 중요하다. Soil이나 모래 등의 미고결 물질에서의 압밀작용은 동일한 압력 상태에서 시간에 따라 변형되는 점성의 크립(creep) 효과로 표현된다(Cogan, 1976; Rongzun et al., 1987; Dudley et al., 1994). 이러한 크립 변형을 완전히 기술하기 위해서는 응력-변형 관계 외에도 시간의 factor가 하나 더 추가된다. 기존의 연구 결과에서 이러한 미고결 암석의 시간 의존적 변형은 주로 공극수압의 재배열(Holzer et al., 1973; Jones and Wang, 1981)이나 공극수의 expulsion(Cogan, 1976; Karig, 1993; Hornby, 1998)등의 메커니즘에 주로 초점을 맞추어 설명되었다. 그러나 최근 일련의 실험 연구에서 시간 의존적 변형은 건조상태의 모래에서도 발생함을 보였으며 이러한 건조 상태 미고결 사암에서의 점성 거동은 간입상 점토질 성분이나 운모 성분과 관계있는 것으로 보고된 바 있다(Chang et al., 1997; Hagin and Zoback, 2004).

본 연구에서는 이러한 기존 연구의 연장선에서 점토 함량이 높은 미고결 이암이나 셰일에 대한 시간 의존적 변형에 대해 알아보려 한다. 점토질 미고결 암석은 파쇄대의 충전물이나 단층 점토 등에서 흔히 관찰되므로 그 역학적 성질을 이해하는 것은 암반공학적 측면에서도 중요하고, 또한 층적지나 퇴적분지 등에서 발생하는 압밀작용에 대한 지질학적/지구물리학적 이해에 있어서도 매우 중요하다. 예를 들어 압밀작용에 의해 지반물성이 진화하게 되고 이를 예측하기 위하여 실내실험에서 구해진 압력-물성 간의 상관관계를 이용할 수 있는데, 점성의 암석의 경우 변형속도(strain rate)에 따른 변형을 하기 때문에 실내실험에서 이용된 변형속도(strain rate)와 실제 지반에서 발생하는 변형속도와 의 현저한 차이로 인해 실내실험 자료를 직접 현장에 적용할 수 있는지에 의문이 제기될 수 있다. 본 연구에서는 점토성분을 다량 함유하는 대표적인 미고결 암석인 셰일에 대해서 크립 특성을 실험적으로 규명하며 이를 기술할 수 있는 구성방정식을 유도하고 그 의미를 알아본다.

2. 실험방법

실험에 이용된 미고결 셰일 시료는 미국 Gulf of Mexico에 위치한 Pathfinder 시추공의 심도 2260 m에서 추출된 코어이다. 이 셰일은 점토질 50% 이상, 석영 30%로 구성되어있으며 소량의 장석과 사장석을 포함한다. 셰일은 수년간 상온에서 건조되었으며 실험 전 측정된 초기 공극은 $27\pm 3\%$, 밀도는 $1.86\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ 이다.

원주형 시편(지름 25.4 mm, 길이 38-50 mm)을 이용하여 상온에서 크립 실험을 수행하였다. 시편을 열수축 polyolefin 재킷으로 감싼 후 시편과 같은 지름의 두 core holder 사이에 위치시킨다. Core holder에 장착된 두 LVDT를 이용하여 시편의 축방향 변위를 측정하며 시편의 지름 방향으로 별도로 설치된 LVDT를 이용하여 시편의 지름 방향 변위를 측정한다. 이렇게 조합된 시험장치는 pressure vessel에 넣고 정수압을 매 5 MPa 마다 단계적으로 증가시키며 각 상수 압력 단계에서 최소한 6시간 동안 시간에 따른 시편의 변형을 측정하였다.

3. 실험결과

수행된 모든 실험에서 미고결 셰일은 현저한 양의 크립 변형을 보여주었다. 그림 1은 그 대표적인 결과로서 10MPa부터 30MPa.까지 매 5MPa 씩 압력을 증가시키며 각 단계에서 체적 크립변형율을 시간의 함수로 도시한 결과이다. 그림 1로부터 몇 가지 중요한 결과를 관찰할 수 있다.

- 첫째, 압력이 증가하는 과정에서는 모든 상수 압력 상태에서 현저한 크립 변형이 관찰된다.
- 둘째, 이러한 크립 변형의 양은 압력의 크기에 따라 변화하는 경향이 있다.
- 셋째, 일정한 압력 하에서 압밀이 발생한 후에는 그 이하의 상수 압력에서는 시간에 따른 변형이 발생하지 않는다.

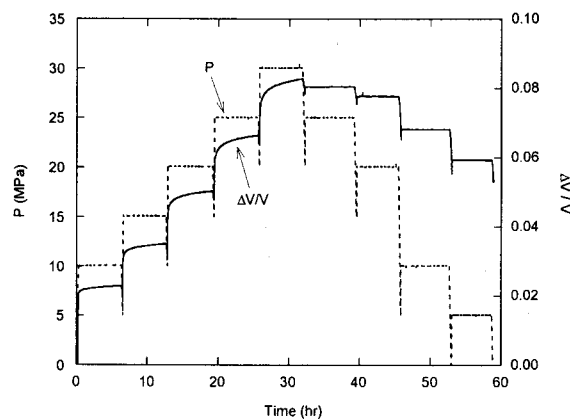


그림 2. A typical loading path used for the hydrostatic pressure experiments.

시간에 따른 크립 변형을 좀 더 세밀히 조사하기 위해 30MPa의 상수 압력 하에서 5일간에 걸쳐 크립 체적변형율을 측정하였다(그림 2). 이 결과는 미고결 점토질 암석의 건조 프레임에서의 크립 변형이 지속적이며 매우 중요한 작용임을 보여준다. 크립 곡선은 급격한 압밀 후 시간에 따라 기울기가 점차 완만해지는 초기 크립 단계(primary creep)와 시간에 따라 거의 연속적으로 지속되는 압밀

단계(steady state creep)로 나뉠 수 있다. 시간 축을 로그 스케일로 변환하면 크립 곡선이 거의 일직선 상에 위치함을 알 수 있으며 이는 크립 곡선이 시간에 대한 로그함수로 표현될 수 있음을 지시한다(그림 2b).

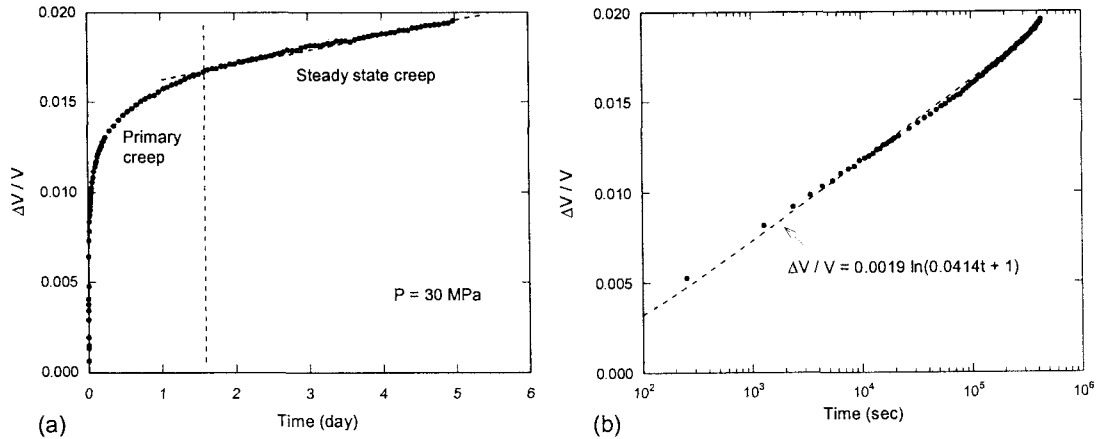


그림 2. Creep strain curve as a function of time

앞에서도 언급했듯이 실험에서 가해진 모든 압력에서 크립이 발생하지만 그 양은 압력에 따라 다르게 발생한다. 각 상수 압력 단계에서 발생한 6시간 동안의 크립의 양을 측정하여 압력의 함수로 도시하였다(그림 3). 10MPa에서 30MPa까지의 구간에서는 매 5MPa 압력이 증가 할수록 직선적으로 증가하며 30MPa 이상에서는 대체로 일정하게 유지되는 경향을 보여준다.

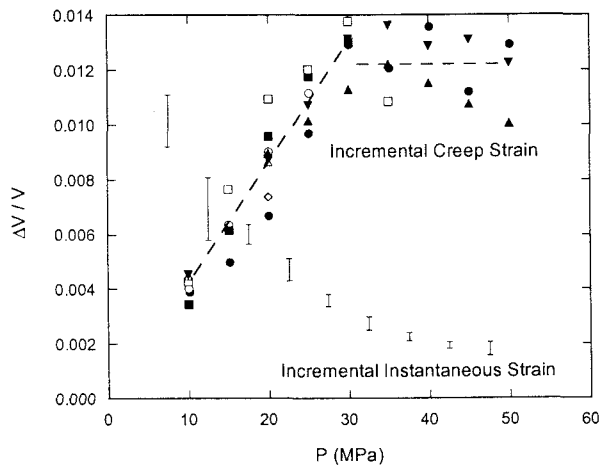


그림 3. Amount of creep strain for 6 hours at each pressure level plotted as a function of pressure

이는 30MPa를 기준으로 그 이상과 이하의 압력에서 발생하는 크립 메커니즘이 다를 수 있음을 암시한다. 비교를 위해 각 단계에서 5MPa 압력 상승에 따른 즉각적인(instantaneous) 체적 변형률 변화량을 그림 3에 도시하였다. 압력 상승에 따른 즉각적인 체적 변형률 변화는 5MPa에서 10MPa로 상승할

때 약 0.01 내외였으며 압력이 높아짐에 따라 점차 감소하여 약 30MPa 이상에서는 0.002 정도로 안정화됨을 볼 수 있다. 압력이 증가함에 따라 변형률의 변화가 작아지는 이유는 점차로 암석이 고화되기 때문이다. 그림에서 보듯이 크립에 의한 압축 변형이 압력 상승에 동반된 즉각적인 변형에 비해 약 15MPa 이상의 조건에서는 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 실험 및 암석 특성상 압력 상승 과정에서 완벽히 시간 의존적 변형이 제거되었다고 볼 수 없고 또한 도시된 크립은 단지 6시간 동안의 자료임을 감안하면 그 차이는 더욱 커지게 된다. 따라서 시간 의존적인 크립 변형이 세일의 압밀작용에서 기여하는 바가 매우 크다고 볼 수 있다.

지금까지의 크립 변형에 대한 관찰을 요약하면 각 상수 압력에서의 시간에 따라 발생하는 현저한 양의 크립 변형은 미고결 세일의 건조 프레임 자체가 상당한 점성을 갖는다는 점을 지시하며 일정 압력에서 압밀 후 감압 상태에서는 어떠한 형태의 시간에 따른 변형이 발생하지 않는다는 사실은 이러한 크립 변형이 비복원 소성작용에 의한 효과라는 점이다. 실제로 압밀되면서 암석의 고화정도(공극률의 감소, 강성의 증가, 등)가 진화하기 때문에 strain-hardening의 현상이 발생하고 이는 소성 이론으로서만 기술이 가능하다. 총체적으로 미고결 세일의 건조 프레임의 변형은 점소성(viscoplasticity)으로 표현될 수 있다.

4. 크립 모델의 이론적 배경

4.1 항복함수(yield function)

일반적으로 소성의 물질은 특정 응력조건을 기준으로 그 이하의 응력에서는 탄성, 그 이상에서는 소성의 변형을 보이며 그 특정 응력조건을 규정하는 것이 항복함수이다. 미고결 지반이나 토양에서의 압밀작용에 의한 소성변형률이나 공극률 등을 기술하는 항복함수들은 cap형태의 모델들이 주로 사용되어왔다. 대표적인 예로는 modified Cam-clay model로서 응력 공간인 p - q 공간에서 타원형의 형태를 갖는다(Roscoe and Burland, 1968; Desai and Siriwardane, 1984):

$$M^2 p^2 - M^2 p_0 p + q^2 = 0, \quad (1)$$

p 는 평균수직응력, $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$,

q 는 편차응력, $\sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)/2}$,

M 은 p - q 공간에서 임계상태선의 기울기, 그리고 p_0 는 정항복면과 p 축의 교차점으로서 보통 선행압밀압력(preconsolidation pressure)이라 칭한다. 식(1)은 두개의 매개변수 M 과 p_0 만으로 완전히 기술되기 때문에 그 활용이 용이하다. 미고결 물질이 압밀되어 소성변형을 겪을 때 선행압밀압력이 증가하며 이는 항복면의 크기가 증가하는 결과로 나타난다. Cap model은 p - q 공간에서 동일한 체적변형율을 나타내는 자취점이며 미고결 물질의 소성변형은 대부분 공극의 감소에 의해 나타나므로 각각의 선행압밀압력 값은 특정 공극률(ϕ_0)과 일대일 대응시킬 수 있다. 이렇게 항복함수는 미고결 암석이 고화됨에 따라 strain-hardening 효과에 의해 점차 진화한다.

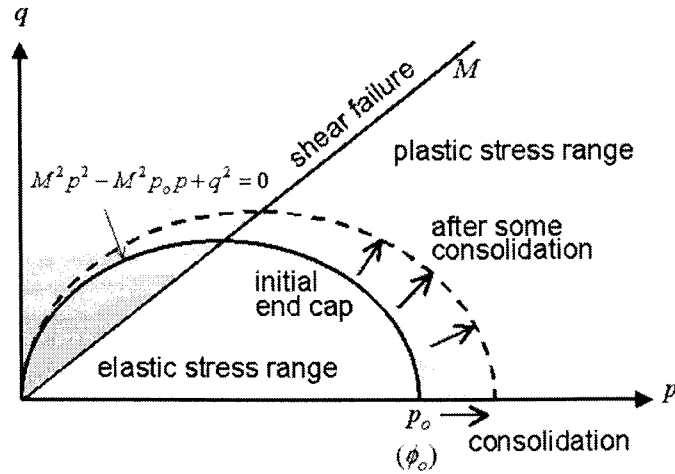


그림 5. Modified Cam-clay model

4.2 점소성 이론

앞에 기술한 Cam-clay model은 소성이론으로서 시간 요소가 배제되어 있는 모델이다. 실험에서 관찰된 세일의 시간에 따른 크립 변형은 공극률 및 항복점에 매우 중요한 영향을 미치며 이러한 효과를 정량적으로 찾기 위하여 크립을 기술할 수 있는 적절한 점소성 모델을 찾아야한다. 점소성 모델은 특히 절리암반의 거동 분석을 위해 국내 암반공학계에서도 빈번히 연구 활용된 바 있다(이연규 외, 1995; 노승환 외, 2004). 예서도 많이 대부분의 점소성 모델은 Perzyna(1963)의 이론에 근거하여 제시되었으며 점소성 변형속도는 다음의 형태로 정의되었다(Kutter and Sathialingam, 1992; Fodil et al., 1997).

$$\epsilon^{vp} = c_o \left(\frac{f_d}{f_s} \right)^n \frac{\partial f_d}{\partial \sigma} \quad (2)$$

c_o 와 n 은 점소성 물질 상수이다. 식 (2)에서 정항복합수 f_s 와 동항복합수 f_d 는 식 (1)로부터 각각

$$f_s = p_o = p^{(s)} + \frac{(q^{(s)})^2}{M^2 p^{(s)}} \quad (3)$$

$$f_d = p^* = p + \frac{q^2}{M^2 p} \quad (4)$$

의 형태를 가지며 위첨자 (s)는 정항복면 상에서의 응력 상태를 의미하고 p^* 는 동항복면과 p 축이 교차하는 점이다. 앞에서 설명한대로 물질이 비점성일 경우 응력 상태가 식 (3)을 만족하면 미고결 암석은 소성 변형을 시작한다. 이 때 하나의 p_o 값은 하나의 항복합수와 연관되어있다. 그러나 미고결 세일처럼 점성의 성질을 가지면(즉, 시간 또는 변형속도 의존적이면) 선행압밀압력(p_o)이 고정되어있더라도 변형속도에 따라 항복면의 크기(p^*)가 변하게 된다. 따라서 점성 물질인 경우 특정 선행압밀 압력 값 p_o 와 공극률 ϕ_o 는 항복면의 크기를 고유하게 정의할 수 없게 된다. 이 경우 시간 독립적

소성모델인 Cam-clay 모델에 근거하여 추정된 공극률(ϕ^*)은 실제 공극률(ϕ_o)에 비해 과소하게 예측된다는 문제점이 발생한다(그림 5). 미고결 점성 물질에서의 보다 정확한 공극률 예측은 물질의 항복점에 대한 변형속도 효과를 정확하게 아는 것이 필요하다.

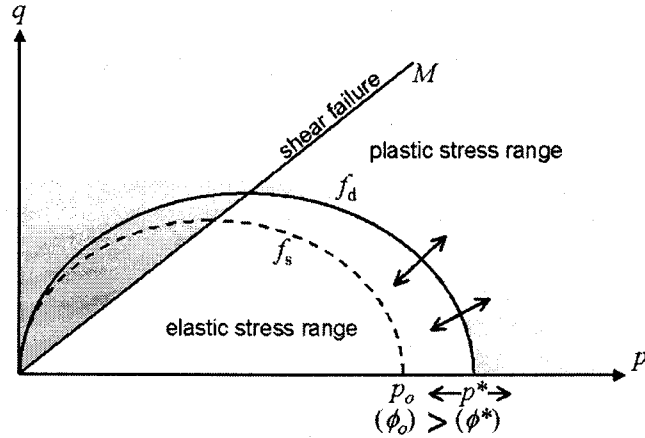


그림 5. Static (f_s) and dynamic (f_d) yield surfaces.

4.3 점소성 모델의 적용

앞에 기술한 점소성 모델을 세일에서의 정수압 크립 실험 결과에 적용하였다. 식 (2)-(4)를 이용하여 정수압 하에서의 점소성 변형속도를 유도하면

$$\epsilon^{vp} = c_o \left(\frac{p^*}{p_o} \right)^n \quad (5)$$

의 형태를 갖는다. 그러나 시편의 선행압밀압력 p_o 나 변형속도에 따라 변화하게 되는 겉보기 선행압밀압력 p^* 에 대한 값을 직접적으로 정확히 측정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 다른 방법을 통해 점소성 물성을 구하고자 한다.

식 (5)에서 선행압밀압력 p_o 는 strain-hardening에 의한 소성변형량에 따라 진화하게 된다(Perzyna, 1963; Bjerrum, 1967). 그림 6은 이 개념을 응력-변형률 공간에 도시한 것이다. 초기 선행압밀압력이 p_{oi} 인 물질이 극히 낮은 속도의 응력 증가를 받으면(즉 정적으로 변형을 하면) 처음에는 기울기 C_c 의 응력-변형률 선을 따라 변형되다가 압력이 선행압밀압력을 초과할 때부터 비점성의 표준 압밀 곡선(기울기 C_c)을 따라 변형하게 된다. 비점성 암석이 소성변형을 겪을 때 선행압밀압력은 바로 이 표준 압밀 곡선을 따라 증가하게 되므로 이 표준 압밀 곡선은 선행압밀압력의 진화상태를 나타내는 자취점으로 볼 수 있다.

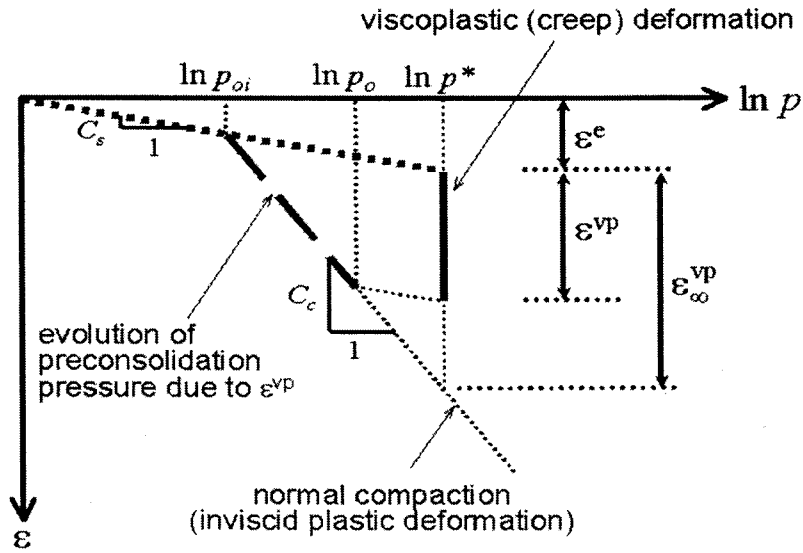


그림 6. Schematic stress-strain curve of viscoplastic material

물질의 변형특성이 점성이면 선행압밀압력은 점소성 변형률에 따라 증가한다. 이 경우 점소성 변형은 시간 의존적이므로 선행압밀압력의 증가 또한 시간 의존적이다. 그림 6에서 동항복점 p^* 에서의 일정시간 동안의 크립 변형률은 p_o 에서 p_o 로의 선행압밀압력의 증가와 일치하게 된다. 같은 개념으로 크립이 계속될 경우 선행압밀압력은 계속 증가하여 궁극적으로 p 값에 도달하게 된다. 점소성 변형률과 선행압밀압력과의 관계는 그림 6에서

$$\epsilon_{\infty}^{vp} - \epsilon^{vp} = (C_o - C_s) \ln \frac{p^*}{p_o} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 ϵ_{∞}^{vp} 는 압력 p^* 에서 압밀의 최후까지 발생할 수 있는 총 점소성 변형이다. 식 (5)와 (6)에서 일련의 압력 항을 제거하면 점소성 변형률에 대한 미분방정식을

$$\dot{\epsilon}^{vp} = c_o \exp(D\epsilon_{\infty}^{vp}) \exp(-D\epsilon^{vp}) \quad \text{where } D = n / (C_c - C_s) \quad (7)$$

의 형태로 얻을 수 있으며 적절한 초기 조건을 통해 쉽게 그 해를 구할 수 있다. 미분방정식의 해는

$$\epsilon^{vp} = \frac{1}{D} [\ln(c_o D \exp(D(\epsilon_{\infty}^{vp} - \epsilon_o^{vp})))t + 1] \quad (8)$$

의 형태로 주어진다. 식(8)은 크립변형이 시간에 대한 로그함수로 주어지는 것을 보이며 이는 흥미롭게도 실험에서 보여진 세일의 크립 곡선과 같은 형태의 함수이다(그림 2).

5. 모델 상수의 규명

등방 하중 하에서의 점소성 모델은 4개의 상수(C_o , C_s , n , c_o)를 포함한다. 이중에 n 값이 변형속도의

암석 물성에 대한 상대적인 효과를 나타내는 가장 중요한 물성이다. 이를 규명하기 위해서는 C_c 와 C_s 값이 부수적으로 규명되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 세 개의 물성 상수 C_c , C_s , n 값만 규명하려 한다. 팽창지수로 불리는 C_s 값은 응력-변형률 곡선의 감압-재가압 곡선에서 비교적 쉽게 구할 수 있으며 평균 0.0074 ± 0.0021 로 나타났다(그림 7). 압축지수인 C_c 값은 점소성 영역의 $\ln p - \epsilon$ 곡선의 전체적인 기울기를 측정함으로써 얻을 수 있으며(Bjerrum, 1967) 평균값은 0.085 ± 0.010 을 구해졌다.

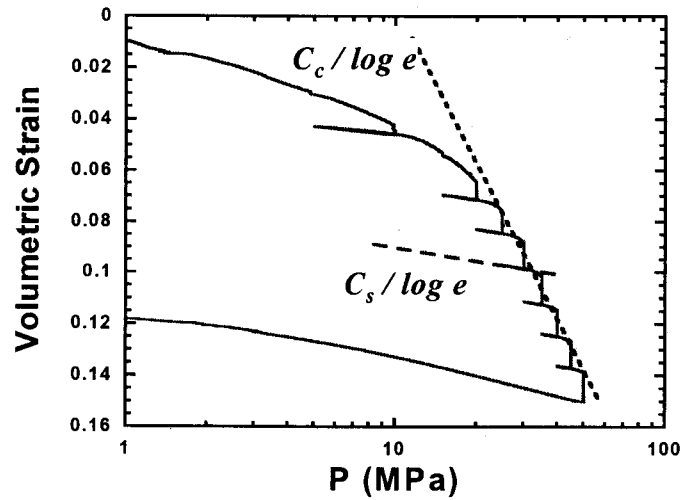


그림 7. 팽창지수 C_s 와 압밀지수 C_c 의 규명

구해진 C_s , C_c 값을 이용하여 식 (8)과 실험 자료를 비교함으로써 n 값을 구할 수 있다. 그림 8은 30MPa 이상에서의 상수 압력 하에서 관찰된 모든 크립 변형률을 로그 시간의 함수로 도시한 결과이다. 모든 결과에서 기울기가 거의 평행하게 나타나고 있으며 이는 기울기를 결정하는 매개변수가 $D=n(C_c-C_s)$ 로서 암석의 물성이기 때문이다. 구해진 C_s , C_c 값을 이용하여 그림 8의 모든 자료와 식(8)을 비교하여 $n = 38$ 임을 얻었다. 따라서 건조 상태의 세일의 점소성 구성방정식은 정수압 하에서

$$\epsilon^{vp} = c_o \left(\frac{p}{p_o} \right)^{38} \quad (9)$$

의 형태로 얻어진다.

식 (9)는 변형속도가 10배 증가함에 따라 항복점이 약 6% ($=1/38 \times 100\%$) 증가함을 나타낸다. 6%의 값 자체는 그리 인상적인 크기는 아니지만 실험실에서 재생시킬 수 있는 변형속도와 실제 지반에서 발생하는 변형속도를 비교할 때 그 차이는 보통 10^3 배 또는 그 이상 차이가 나므로 실제 적용의 경우에는 그 차이가 무시할 수 없음을 의미한다. 결론적으로 실험실에서 예측한 암석의 항복점과 공극률 등은 실제 지반에서의 암석의 물성을 크게 과대평가한다는 점을 의미한다.

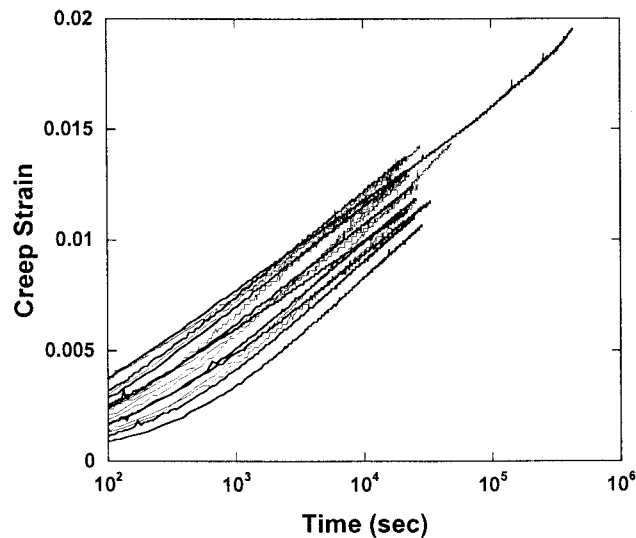


그림 8. 30MPa 압력 이상에서의 모든 크립 변형율 자료를 로그 시간의 함수로 표현한 결과

6. 결 론

Cam-clay소성 모델을 Perzyna의 점소성 이론과 접목하여 건조된 세일에서의 크립을 기술할 수 있는 간단한 모델을 유도하였다. 이 모델은 크립 체적변형률을 시간에 대한 로그 함수로 예측하며 본 연구에서 수행된 실험 결과와 일치하는 결과를 보여주었다. 실험 자료를 분석하고 그 결과를 이론적으로 유도한 식과 비교함으로써 점소성 물성 상수들을 규명하였다. 이 점소성 모델은 건조 상태의 세일은 변형속도가 10배 증가함에 따라 약 6% 증가함을 보여준다. 실내 실험과 실제 지반에서의 변형속도의 차이가 크게 나므로 이 점소성 모델은 크립 변형 시험만을 통해서 좀 더 정확한 항복점과 공극률의 유추에 이용될 수 있다.

■ 참고문헌 ■

- 김광식, 김교원, 2003, 포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동, 지질공학, 13, 227-238.
- 김영수, 정성관, 차주석, 방인호, 2003, 대구지역 세일의 크리프 특성, 터널과 지하공간, 13, 100-107.
- 노승환, 이정인, 이연규, 2004, 연속체 절리와 록볼트 요소를 고려한 암반의 점소성 거동에 관한 수치해석, 터널과 지하공간, 14, 215-228.
- 이연규, 이정인, 조태진, 1995, 굴착과정에서 록볼트로 보강된 절리암반의 점소성 거동 분석, 터널과 지하공간, 5, 123-133.
- 장명환, 양형식, 1998, 화강암의 열 크립 거동에 관한 연구, 8, 1-7.
- Bjerrum, L., 1967, Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings: Geotechnique, 17, 81-118.
- Chang, C., Moos, D. and Zoback, M.D., 1997, Anelasticity and dispersion in dry unconsolidated sands: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34, Paper No. 48.

- Cogan, J., 1976, Triaxial creep tests of Ophongia limestone and Ophire shale, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 13, 1–10.
- Desai, C.S. and Siriwardane, H.J., 1984, *Constitutive Laws for Engineering Materials, with Emphasis on Geologic Materials*: Prentice–Hall.
- Dudley, J.W., Myers, M.T., Shew, R.D., and Arasteh, M.M., 1994, Measuring compaction and compressibilities in unconsolidated reservoir materials via time–scaling creep, Eurock '94; SPE/ISRM international conference, Delft, Netherlands, 45–54.
- Fodil, A., Aloulou, W. and Hicher, P.Y., 1997, Viscoplastic behaviour of soft clay: *Geotechnique*, 47, 581–591.
- Hagin, P.N. and Zoback, M.D., 2004a, Viscous deformation of unconsolidated sands; Part 1, Time–dependent deformation, frequency dispersion, and attenuation: *Geophysics*, 69, 731–741.
- Holzer, T.L., Heg, K. and Arulanandan, K., 1973, Excess pore pressure during undrained clay creep: *Can. Geotech. J.*, 10, 12–24.
- Hong, J.–S. and Jeon, S., 2004, Characteristics of creep deformation behavior of granite under uniaxial compression, *Tunnel and Underground Space*, 14, 69–77.
- Hornby, B.E., 1998, Experimental laboratory determination of the dynamic elastic properties of wet, drained shales: *J. Geophys. Res.*, 103, 29,945–29,964.
- Jones, L.E.A. and Wang, H.F., 1981, Ultrasonic velocities in Cretaceous shales from the Williston basin: *Geophysics*, 46, 288–297.
- Karig, D.E., 1993, Uniaxial reconsolidation tests on porous sediments: mudstones from site 897, in R. B. Whitmarsh, D. S. Sawyer, A. Klaus and D. G. Masson, eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*: 149, 363–373.
- Kutter, B.L. and Sathialingam, N., 1992, Elastic–viscoplastic modelling of the rate–dependent behaviour of clays: *Geotechnique*, 42, 427–441.
- Perzyna, P., 1963, The constitutive equations for rate sensitive plastic materials: *Quarterly Applied Mathematics*, 20, 321–332.
- Rongzun, H., Zuhui, Z., and Jingen, D., 1987, The creep characteristics of shale formation and the analysis of its loading on the oil well casing, *Proc. Congress Int. Soc. Rock Mech.*, 137–139.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B., 1968, On the generalized stress–strain behaviour of wet clay, in J. Heyman and F. P. Leckie, eds., *Engineering Plasticity*: 535–609.