

미고결 셰일의 크립 특성

장찬동¹⁾, Mark Zoback²⁾

¹⁾충남대학교 지질환경과학과, cchang@cnu.ac.kr

²⁾Department of Geophysics, Stanford University

Creep Characteristics of Unconsolidated Shale

Chandong Chang¹⁾, Mark Zoback²⁾

¹⁾Department of Geology, Chungnam National University

²⁾Department of Geophysics, Stanford University

요약 : 실내실험을 통해 미고결 셰일의 압밀은 시간 의존적 비복원 점성변형임을 보였다. 점소성 이론과 Cam-clay 이론을 접목하여 미고결 셰일의 구성방정식이 동향복/정향복면의 크기에 대한 지수함수의 형태로 주어짐을 보였으며 이를 통해 크립 변형은 시간에 대한 로그함수의 형태로 구해짐을 보였다. 실험자료와 이론을 비교하여 구성방정식의 물질상수를 규명한 결과 셰일의 항복점은 변형속도가 10배 증가함에 따라 약 6%의 증가하는 것으로 나타났으며 이는 실내 변형속도 조건에서 규명한 셰일의 물성(항복점, 공극률)을 실제 현장 변형속도 조건에 적용시에 상당한 오차를 유발할 수 있음을 시사한다.

주요어 : 크립, 미고결 셰일, 점소성, Cam-clay, 항복, 변형속도

Abstract : Laboratory creep experiments show that compaction of unconsolidated shale is an irrecoverable process caused by viscous time-dependent deformation. Using Perzyna's viscoplasticity framework combined with the modified Cam-clay theory, we found the constitutive equation expressed in the form of strain rate as a power law function of the ratio between the sizes of dynamic and static yield surfaces. We derived the volumetric creep strain at a constant hydrostatic pressure level as a logarithmic function of time, which is in good agreement with experimental results. The determined material constants indicate that the yield stress of the shale increases by 6% as strain rate rises by an order of magnitude. This demonstrates that the laboratory-based prediction of yield stress (and porosity) may result in a significant error in estimating the properties in situ.

Keywords : creep, unconsolidated shale, viscoplastic, Cam-clay, yield, strain rate

1. 서론

연약질 지반이나 미고결 암반에서 발생하는 압밀작용은 지반 침하 등의 지질공학적 안정성 문제와 관계될 뿐만 아니라, 그 결과로 나타나는 지반의 물리 역학적 성질(공극률, 투수율, 고화정도, 변형계수 등)의 변화를 예측 규명하는데 있어서도 중요하다. 토양이나 모래 등의 미고결 물질에서의 압밀작용은 동일한 압력 상태에서 시간에 따라 변형되는

크립(creep) 효과를 포함하는 것으로 알려져 있다(예 Cogan, 1976; Rongzun et al., 1987; Dudley et al., 1994; Ostermeier, 1995).

충적지나 퇴적분지 등에서 발생하는 미고결 퇴적물의 압밀작용에 의해 지반물성이 진화하게 되고 이를 예측하기 위하여 실내실험에서 구해진 압력-물성 간의 상관관계를 이용할 수 있다. 그러나 점성의 미고결 물질의 경우에는 실내실험에서 이용된 변형속도와 실제 지반에서 발생하는 변형속도와의 현저한 차이 때문에 실내실험 자료를 직접 현장에 적용할 수 있는지에 많은 의문이 제기된다. 본 연구에서는 세일의 크립 특성을 실험적으로 규명하며 실험 결과를 통하여 세일의 변형속도 의존적인 특성을 기술할 수 있는 모델을 찾고자 한다.

2. 실험 결과

본 연구에서 이용된 세일 시료는 미국 Gulf of Mexico에 위치한 시추공에서 추출된 코어로부터 성형되었다. 미고결 세일은 점토질 50%, 석영 30%로 구성되어있으며 소량의 장석 및 사장석을 포함한다. 세일은 수년간 실내에서 건조되었으며 실험 전 측정된 초기 공극은 27%, 밀도는 1.86 g/cm^3 이다.

원주형 시편(지름 25.4 mm, 길이 38-50 mm)을 이용하여 상온에서 크립 실험을 수행하였다. 정수압을 단계적으로 증가시키며 압력과 시간에 따른 시편의 변형을 측정하였다.

건조 상태의 세일은 현저한 양의 크립 변형을 보여준다(Fig. 1). 시간에 따른 크립 체적 변형률은 시간에 대한 로그함수로 나타난다.

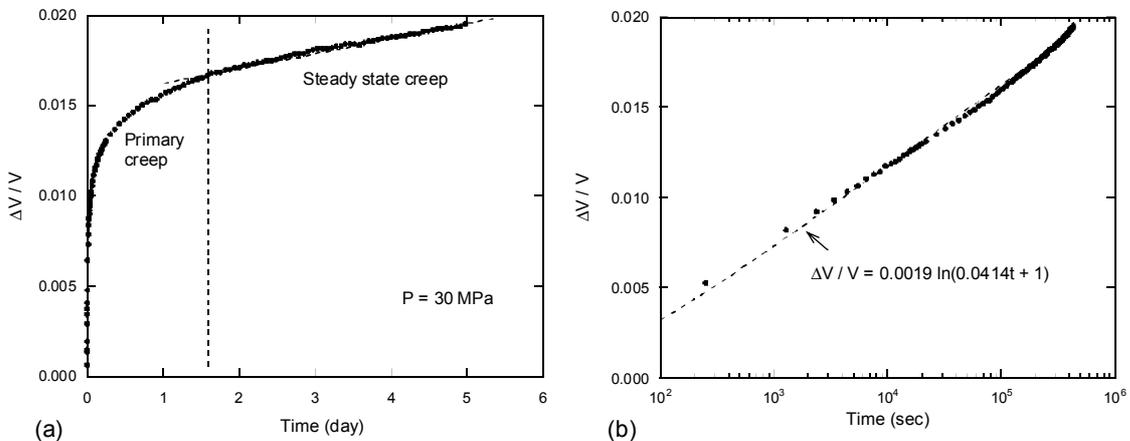


Fig. 1. Creep strain curve as a function of time

실험에서 가해진 모든 압력(10-50 MPa)에서 크립이 발생하였지만 그 양은 압력에 따라 다르게 발생하였다. 6시간 동안의 크립의 양은 10MPa에서 30MPa까지의 구간에서는 매 5MPa 압력이 증가 할수록 대체로 직선적으로 증가하였으며 30MPa 이상에서는 대체로 일정하게 유지되는 경향을 보여주었다(Fig. 2). 이는 30MPa를 기준으로 그 이상과 이하에서 발생하는 크립 메커니즘이 다를 수 있음을 암시한다.

비교를 위해 각 단계에서 5MPa 압력 상승에 따른 즉각적인(instantaneous) 체적 변형률 변화량을 Fig. 2에 도시하였다. 압력 상승에 따른 즉각적인 체적 변형률 변화는 5에서 10MPa로 상승할 때 약 0.01 내외였으며 압력이 높아짐에 따라 점차 감소하여 약

40 MPa 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.

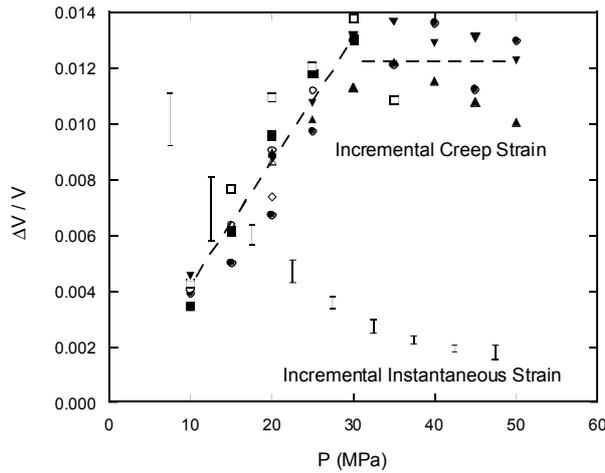


Fig. 2. Creep strain as a function of pressure

4. 크립 모델의 이론적 배경

4.1. 항복함수

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(Roscoe and Burland, 1968; Desai and Siriwardane, 1984).

$$M^2 p^2 - M^2 p_0 p + q^2 = 0, \tag{1}$$

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 교차점, 즉 선행 압밀압력이다. 식(1)을 완전히 기술하기 위해서는 두개의 매개변수 M 과 p_0 를 알아야한다. 미고결 물질이 압밀되어 소성변형을 겪을 때 선행압밀압력이 증가하며 이는 항복면의 크기가 증가하는 결과로 나타난다. 미고결 세일의 압밀에 동반되는 소성변형은 대부분 공극의 감소에 의해 나타나므로 각각의 선행압밀압력 값은 특정 공극률과 일대일 대응시킬 수 있다. 항복함수는 미고결 암석이 고화됨에 따라 변형률강화 효과에 의해 점차 진화한다.

4.2. 점소성 이론

실험에서 관찰된 세일의 시간 의존적 크립 변형은 공극률 및 항복점에 매우 중요한 영향을 미치며 이러한 효과를 정량적으로 찾기 위하여 크립을 기술할 수 있는 적절한 모델을 찾아야한다. 대부분의 점소성 모델은 Perzyna(1963)의 이론에 근거하여 제시되며 다음과 같이 규정된다(Kutter and Sathialingam, 1992; Fodil et al., 1997).

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

여기서 c_o 와 n 은 점소성 물질 상수이다. 식 (2)에서 정항복함수 f_s 와 동항복함수 f_d 는 식 (1)로부터 각각

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

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

로 나타낼 수 있으며 여기서 위첨자 (s)는 정항복면 상에서의 응력 상태를 의미하고 p^* 는 동항복면과 p 축이 교차하는 점이다. 응력 상태가 식 (3)을 만족하면 미고결 암석은 소성 변형을 시작한다. 물질이 비점성일 경우 하나의 p_o 값은 하나의 항복함수와 연관되어 있다. 그러나 물질 변형이 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 선행압밀압력 값과 공극률이 항복면의 크기를 고유하게 정의할 수 없게 된다. 이 경우 시간 독립적 소성모델인 Cam-clay모델에 근거한 공극률(ϕ^*)은 실제 공극률(ϕ_o)에 비해 과소하게 예측한다는 문제점이 발생한다(Fig. 3). 미고결 점성 물질에서의 보다 정확한 공극률 예측은 물질의 항복점에 대한 변형속도 효과를 정확하게 아는 것이 필요하다.

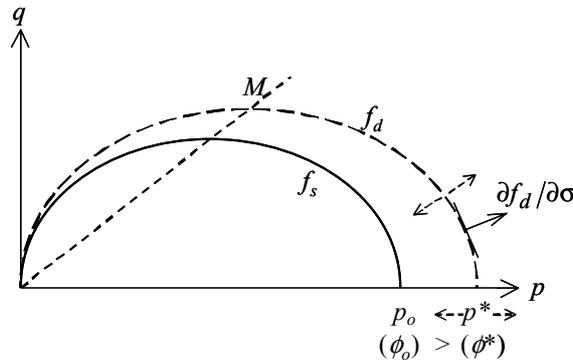


Fig. 3. Static (f_s) and dynamic (f_d) yield surfaces.

4.3. 점소성 모델의 응용

위에 기술한 점소성 모델을 세일에서의 정수압 크립 실험 결과에 적용하였다. 식 (2)–(4)를 이용하여 정수압 하에서의 점소성 변형속도를 구하면

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

의 형태를 갖는다.

식 (5)에서 선행압밀압력 p_o 는 strain-hardening에 의한 소성변형량에 따라 진화하게

된다(Perzyna, 1963; Bjerrum, 1967). Fig. 4는 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_r 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.

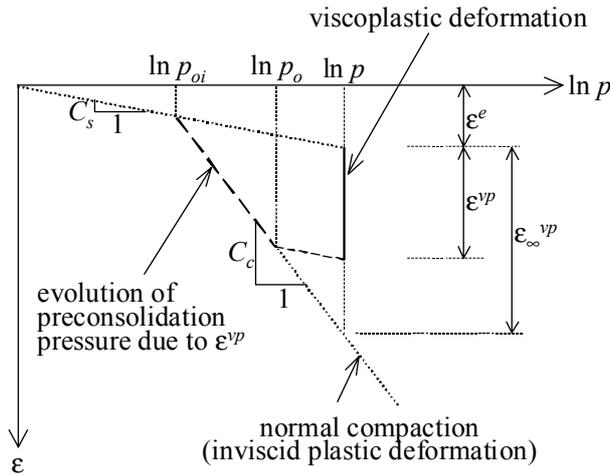


Fig. 4. Schematic stress-strain curve of viscoplastic material

물질의 변형특성이 점성이면 선행압밀압력은 점소성 변형률에 따라 증가한다. 이 경우 점소성 변형은 시간 의존적이므로 선행압밀압력의 증가 또한 시간 의존적이다. Fig. 4에서 동향복점 p 에서의 일정시간 동안의 크립 변형률은 p_{oi} 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 Fig.4에서

$$\epsilon_{\infty}^{vp} - \epsilon^{vp} = (C_c - C_r) \ln \frac{p}{p_o} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 ϵ_{∞}^{vp} 는 압력 p 에서 압밀의 최후까지 발생할 수 있는 총 점소성 변형이다. 시간 의존적 선행압밀압력의 증가에 동반되는 점소성 변형은 식 (5)와 (6)에 의해 얻어지는 미분방정식으로 표현될 수 있으며 이 미분방정식의 해는

$$\epsilon^e = \frac{1}{D} [\ln (c_o D \exp (D(\epsilon_{\infty}^{vp} - \epsilon_o^{vp}))t + 1)], \quad (7)$$

$D = n / C_c C_r$ 이다.

5. 모델 상수의 규명

등방 하중 하에서의 점소성 모델은 4개의 상수(C_c , C_r , n , c_o)를 포함한다. C_r 값은 응력-변형률 곡선의 감압-재가압 곡선에서 평균 0.0074로 나타났다. C_c 값은 점소성 영역의 $\ln p - \epsilon$ 곡선의 전체적인 기울기를 측정함으로써 얻을 수 있으며(Bjerrum, 1967) 평균값은 0.085이다. 식 (7)와 실험 자료와의 회기분석을 이용하여 $n = 38$ 임을 얻었다. 따라서 건조 상태의 세일의 점소성 구성방정식은 정수압 하에서

$$\dot{\epsilon}^{vp} = c_o \left(\frac{p}{p_o} \right)^{38} \quad (8)$$

의 형태로 얻어진다. 식 (8)은 변형속도가 10배 증가함에 따라 동항복점이 약 6% 증가함을 나타낸다. 실험실에서의 변형속도와 실제 지반에서의 변형속도를 비교할 때(보통 10^3 배의 차이) 그 차이가 무시할 수 없음을 의미하며 실험실에서 예측한 암석의 항복점과 공극률 등은 실제 지반에서의 암석의 물성을 크게 과대평가한다는 점을 의미한다.

6. 결론

Cam-clay소성 모델을 Perzyna의 점소성 이론과 접목하여 건조된 셰일에서의 크립을 기술할 수 있는 간단한 모델을 찾았다. 이 모델은 크립 체적변형률이 시간에 대한 로그함수로 예측하며 실내 실험 결과와 잘 부합하는 결과를 보여준다. 실험 자료를 분석하고 그 결과를 이론적으로 유도한 식과 비교함으로써 점소성 물성 상수들을 찾았다. 이 점소성 모델은 건조 상태의 셰일은 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

- Bjerrum, L., 1967, Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings: *Geotechnique*, **17**, 81–118.
- Cogan, J., 1976, Triaxial creep tests of Ophongong 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.
- Kutter, B.L. and Sathialingam, N., 1992, Elastic-viscoplastic modelling of the rate-dependent behaviour of clays: *Geotechnique*, **42**, 427–441.
- Ostermeier, R.M., 1995, Deepwater Gulf of Mexico turbidites; compaction effects on porosity and permeability, *SPE Formation Evaluation*, **10**, 79–85.
- 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.