

점토함량에 따른 미고결 이암의 시간 의존적 변형 비교

장찬동¹ · 명우호¹ · 이태종^{2*}

¹충남대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Comparison of Time-Dependent Deformation in Unconsolidated Mudstones with Different Clay Content

Chandong Chang¹, Woo-Ho Myoung¹, and Tae Jong Lee^{2*}

¹Department of Geology, Chungnam National University

²Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

점토함량에 따른 미고결 이암의 시간 의존적 변형을 비교하기 위해 축방변형이 구속된 상태에서의 일축압밀시험을 수행하였다. 미고결 이암의 변형은 응력의 증가에 따른 즉각적인 변형과 일정한 응력 하의 크리프 변형으로 구분되었다. 응력 증가분이 동일한 경우에 시간 의존적 변형은 거의 일정한 크기로 발생하였으며 응력 증가분이 증가할수록 크리프 변형의 크기도 증가하여 선형점성변형의 특성을 보였다. 점토함량이 증가함에 따라 시간 의존적 변형은 증가하는 경향을 보여 점토가 이암의 시간 의존적 변형 발생에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다. 크리프 변형은 시간에 따라 지수함수 형태를 보여 크립 모델 중 하나인 power-law 모델로 잘 예측될 수 있었다.

주요어 : 시간 의존적 변형, 크리프, 점토함량, 미고결 이암, power-law 모델

We conducted uniaxial consolidation tests in mudstone samples with different clay content, in order to investigate time-dependent deformation and its characteristics. A significant amount of time-dependent strain was observed at a constant stress level immediately after a jump of stress was applied. For a given mudstone, the amount of time-dependent deformation was nearly proportional to the increment of stress, suggesting a linear viscoelastic rheology. The amount of time-dependent strain increases with clay content, implying that clay plays an important role in creep of the unconsolidated mudstone. A power-law model was suitably applied to our results, suggesting that a short-term prediction of time-dependent deformation of the mudstone is tentatively feasible.

Key words : time-dependent deformation, creep, clay content, unconsolidated mudstone, power-law model

서 론

대부분의 암석은 일정 응력 하에서 시간에 따라 점진적으로 변형하는 크리프(creep) 거동을 보이며 특히 연약 퇴적암의 경우 무시할 수 없는 규모의 시간 의존적 변형을 보인다(정태종, 1996; 김광식과 김교원, 2003; Maranini and Brignoli, 1999; Hagin and Zoback, 2004; Fabre and Pellet, 2006). 시간 의존적 변형을 포함하는 암석의 유변학(rheology)적인 성질은 특히 미고결 암석

의 역학적인 성질에서 중요한 부분을 차지하며 이에 대한 고찰을 통해 이들의 변형성에 대한 보다 완벽한 기술이 가능하다.

미고결 암석의 시간 의존적 변형을 유발시키는 주요 원인으로서는 물의 배수나 공극압의 소산(Murakami, 1979; Yoshimi, 1987; Robinson, 1999)과 암석 매질 자체의 변형특성으로 제시되어왔다(정태종, 1996; 김광식과 김교원, 2003; Maekawa *et al.*, 1991; Maranini and Brignoli, 1999; Azam, 2003; Gasc-Barbier *et al.*,

*Corresponding author: megi@kigam.re.kr

Table 1. Physical properties of Pohang unconsolidated mudstone

Depth (m)	Clay content (%)	Specific gravity	Initial porosity (%)
81	29.6	2.3 ± 0.2	26
104	19.1	2.0 ± 0.4	32
268	39.5	2.1 ± 0.3	33
334	23.5	2.5 ± 0.3	32

2004; Hagin and Zoback, 2004; Onargan *et al.*, 2004; Fabre and Pellet, 2006; Tomanovic, 2006). 특히 일부 연구자들은 시간 의존적 변형의 주된 원인으로 점토나 함유되어 있는 기타 연성광물들의 효과로 제안한 바 있다(김광식과 김교원, 2003; Hagin and Zoback, 2004). 그러나 이를 뒷받침할만한 체계적인 암석역학적 연구는 매우 한정되어 있다. 예를 들어, 김광식과 김교원(2003)은 단일 이암 시편에 대한 일축 크리프 시험을 통해서 시간 의존적 변형에 대한 점토광물의 효과를 추정하였다. Dugan *et al.*(2003)은 점토함량이 다른 시료에 대한 압밀시험을 하였으나 시간 의존적 특성보다는 탄소성 변형에 초점을 맞추어 연구하였다. 다만, Hagin and Zoback(2004)이 미고결 모래에 대한 정수압 압축시험을 통해 점토함량이 많을수록 시간 의존적 변형이 증가됨을 개략적으로 보인 바 있다.

본 연구는 선행 연구의 연장선상에서 미고결 암석의 시간 의존적 변형에 대한 점토함량의 효과를 실험적으로 규명하는데 목적이 있다. 이러한 목적을 위하여 단일 지역에서 얻은 점토함량이 다른 미고결 이암에 대해 압밀시험을 수행하였으며, 실험 결과에 간단한 power-law 모델을 적용하여 미고결 이암의 변형특성을 분석하였다.

암석시편 및 실험방법

실험에 이용된 암석시편은 한국지질자원연구원에서 제공된 포항시 제3기 미고결 퇴적층에서 얻은 시추코어이다. 총 심도 1.1 km의 시추코어 중 상부 359 m 구간은 미고결 이암으로 구성되어 있으며 이 중 점토함량이 다른 네 종류의 시료를 각각 81, 104, 268, 334 m의 심도에서 추출하였다. 모든 시료는 상온 건조 상태로 보관되어왔다. 각각의 시편에 대해 XRD 정량분석을 통한 점토함량 측정이 이루어졌다. 또한 비중(G_s)과 건조 단위중량(γ_{dry}) 등 기본 물성을 측정하였으며 그 결과를 통해 초기 공극률(ϕ)을

$$\phi = 1 - \frac{\gamma_{dry}}{G_s \gamma_w} \quad (1)$$

을 이용하여 산정하였다. 여기서 γ_w 는 물의 단위중량이다. 네 종류의 암석 시편에 대한 물성 값은 Table 1에 보인 바와 같다.

심도에 따라 점토함량이 다른 네 종류의 이암에 대해 압밀시험을 수행하였다. 초기 코어 직경은 약 100 mm지만 보관과정에서 축 방향 절반으로 분할되어 한국표준협회(2002)에서 제안하는 압밀시험(KS F 2316)용 원주형 시편의 크기인 직경 60 mm, 높이 20 mm를 만족하는 시편을 제작할 수가 없었다. 시편의 크기는 시험 결과의 표준화를 위해서는 중요하지만 동일한 조건에서 수행된 시험 결과의 상호 비교를 목적으로 했을 때는 큰 무리가 없을 것으로 생각되어 본 연구에서는 직경 25.4 mm, 높이가 15 mm의 원주형 시편을 성형하여 이용하였다. 모든 시편은 축방향이 연직방향과 일치하도록 제작하였다.

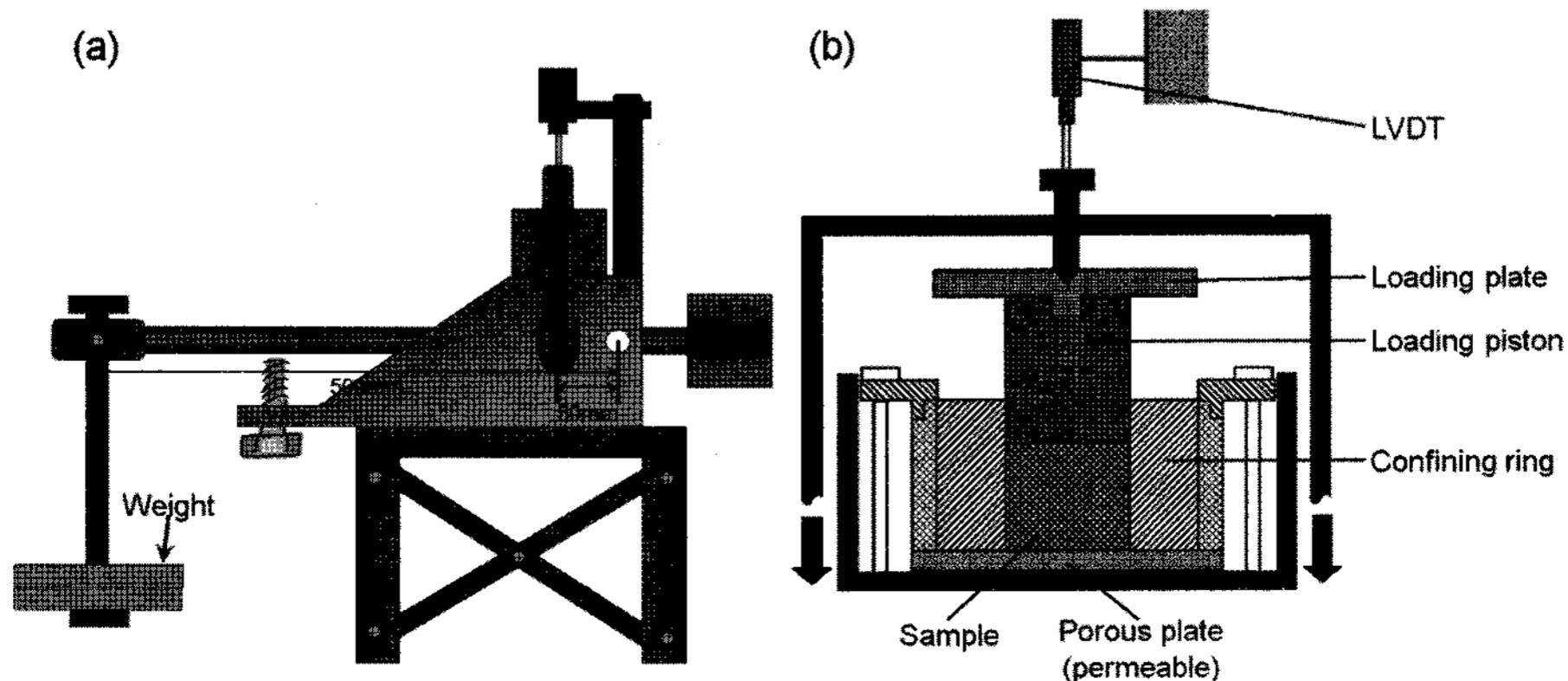


Fig. 1. Schematic of consolidation testing apparatus. (a) full view, (b) a detailed illustration of sample box in the apparatus.

압밀시험을 위해 일정 하중을 장기간 가할 수 있도록 고안된 압밀시험 장비를 이용하였다(Fig. 1). 모든 하중은 추에 의해 즉각적으로 증가 또는 감소하며 추에 의해 발생한 하중은 지렛대 원리에 의해 압밀상자 내의 시편에 전달된다. 압밀시험기의 팔은 힘점과 받침점 사이의 길이가 500 mm, 힘점과 작용점 사이의 길이가 50 mm이기 때문에 추에 의해 발생한 하중은 10배 증폭되어 시편에 전달된다. 성형된 암석시편의 크기에 맞도록 압밀상자에 추가로 24.5 mm 내경의 구속링(confining ring)을 장착하여 그 내부에 암석시편을 넣고 가압피스톤을 통하여 연직방향으로 응력을 가하였다. 측방 변형은 구속링에 의해 제한되므로 변형은 축 방향으로만 발생하고 이 때 발생한 변위는 가압판에 고정된 LVDT를 통해 측정하였다. 구속링 내벽과 가압피스톤에 그리스를 얹게 발라 변형 중 시편과 구속링 사이의 마찰의 효과를 최소화하였다. 모든 시험은 상온 건조 상태의 이암에 대해 수행하였다.

압밀시험은 응력을 여러 단계로 증가시키며 각 단계마다 응력을 일정하게 유지시킨 상태에서 24시간 동안의 크리프 변형 측정 과정으로 이루어졌다. 각 단계마다 응력 증가분은 1.93 MPa이며 총 6회에 걸쳐 응력을 증가시켰다. 또한 한 시험(점토함량 19.1% 이암)에서는 매 단계마다 응력 증가분을 점차 증가시키며 변형 특성을 조사하였다.

실험결과

점토함량이 다른 네 종류의 이암에 대한 압밀시험 결과를 Fig. 2에 시간에 따른 총 체적변형률의 관계로 도시하였다. 총 6회의 응력 증가 단계 동안 모든 이암에서 상당한 크기의 압밀 변형이 관찰되었다. 압밀 변형은 응력 증가에 따른 즉각적인 변형(instantaneous strain)과 일정한 응력 하에서의 크리프 변형으로 구분되었다. 각 응력 단계마다 매 24시간씩 관찰된 크리프 변형은 초기에 급격한 변형속도(strain rate)를 보이다가 점진적으로 변형속도가 감소하는 경향을 보였다. 점토함량 30% 이하 이암의 경우 시간 의존적 크리프는 24시간 후에 안정화되는 경향이 있지만 점토함량 39.5% 이암의 경우에는 24시간 후에도 지속적으로 발생함을 볼 수 있다. 이는 크리프 변형이 이암의 조직이 갖는 고유한 성질임을 시사한다. Fig. 2에서 보듯이 점토함량이 큰 이암일수록 발생하는 총 압밀변형률이 커짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 부드러운 점토성분이 시간 의존적 변형과 밀

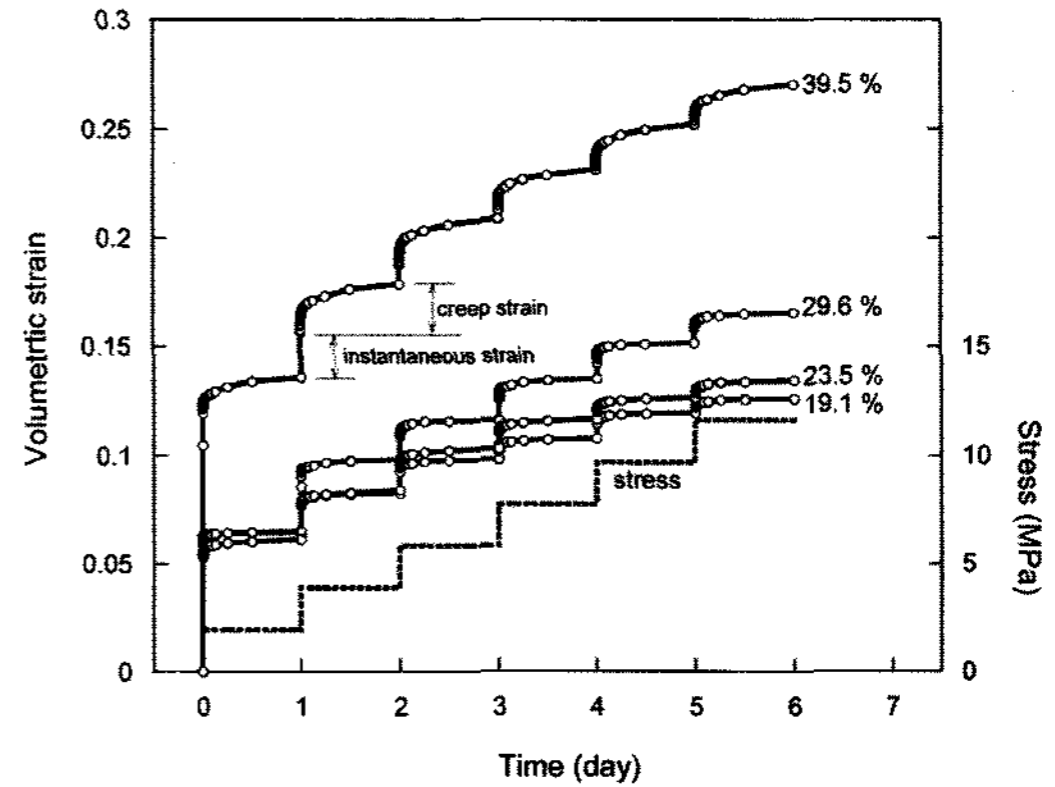


Fig. 2. Volumetric strain versus time curves for different mudstones with different clay content

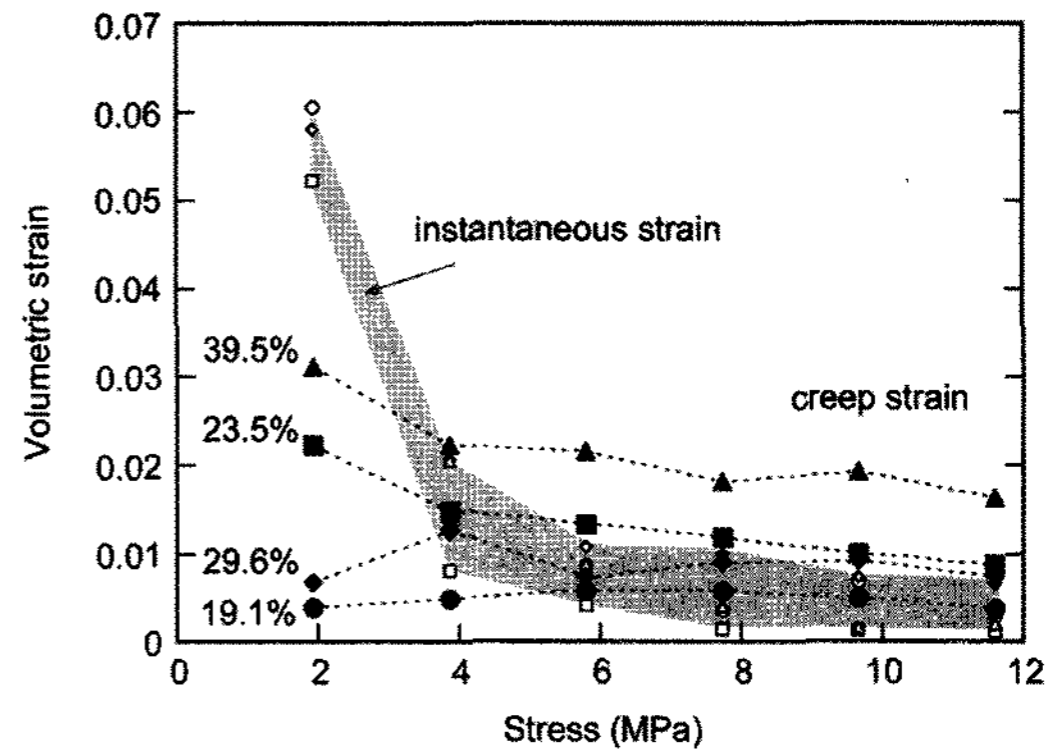


Fig. 3. Amount of creep and instantaneous strain as a function of stress for different clay contents.

접한 관계가 있음을 일차적으로 유추할 수 있다.

크리프 변형에 대한 점토함량의 효과를 좀 더 명확히 알아보기 위해 측정된 변형률을 즉각적인 변형과 24시간 동안의 시간 의존적 변형으로 구분하여 각 크기를 각 응력의 함수로 Fig. 3에 도시하였다. 각 응력 단계에서 발생한 크리프 변형의 크기는 점토함량에 따라 차별적으로 발생하였다. 점토함량 39.5% 이암이 시험된 시편 중 가장 큰 크리프 변형을 보였으며 19.1%의 이암이 가장 낮은 크리프 변형을 보였다. 또한 점토함량 23.5% 이암이 29.6%의 이암에 비해 약간 높은 크리프 변형을 보였으나 그 차이가 응력이 증가함에 따라 매우 미세해 짐을 볼 수 있다.

한 가지 주목할 점은 매 단계마다 1.93 MPa씩 응력이 증가하고 그에 동반되어 24시간 동안 발생한 크리프 변형의 크기가 동일 시편에 대해서는 거의 일정하게 유

지되는 경향을 보인다는 점이다. 이 사실은 일정한 응력 증가분에 대해 일정한 크리프 변형률이 대응된다는 점에서 응력과 크리프 변형률 간의 관계가 선형(linearity) 관계임을 의미한다. 이에 대해서는 추후에 좀 더 논의하기로 하겠다.

한편 응력증가에 따른 즉각적 변형은 점토함량과 특별한 상관관계를 보이지 않는 가운데 초기 하중 시에 매우 높은 값으로 측정되었으며 응력이 증가함에 따라 0.01 이하로 점차로 감소하는 경향을 보였다. 이는 압밀이 진행될수록 공극 닫힘에 따른 시편의 경화현상 때문이다.

점토함량에 따른 크리프 변형률 변화를 좀 더 가시화하면 Fig. 4와 같다. 각 이암에 대해 1.93 MPa의 응력 스텝 직후 24시간동안 발생한 크리프 변형률의 평균치와 표준편차 결과를 보면 점토함량이 증가함에 따라 대체로 크리프 압밀도 증가하는 추세로 나타남을 볼 수 있다. 24시간 동안 발생한 크리프 변형률의 크기는 점토함량 39.5%의 이암이 19.1%의 이암에 비해 약 4배 정도 더 높게 발생하였다. 그러나 그림에서 보듯이 초기 공극률은 한 시편(점토함량 29.6%)을 제외한 나머지 세 시편이 거의 유사함에도 불구하고 크리프 변형에 차이가 나타나므로 단순히 공극 구조의 붕괴에 비례하여 이암의 시간 의존적 변형 크기가 결정되는 것은 아님을 보여준다.

이암의 변형특성을 좀 더 조사하기 위하여 또 다른 압밀시험을 수행하였다. 이 시험 결과는 Fig. 5에 보인 바와 같다. 이 압밀시험에서는 응력 스텝의 증가량을 달리하며 압밀변형을 측정하였다(즉, 0.97, 1.93, 3.8, 7.7 MPa). 또한 응력 경로 중에 몇 차례 감압을 하여 감압상태에서의 변형 양상을 관찰하였다.

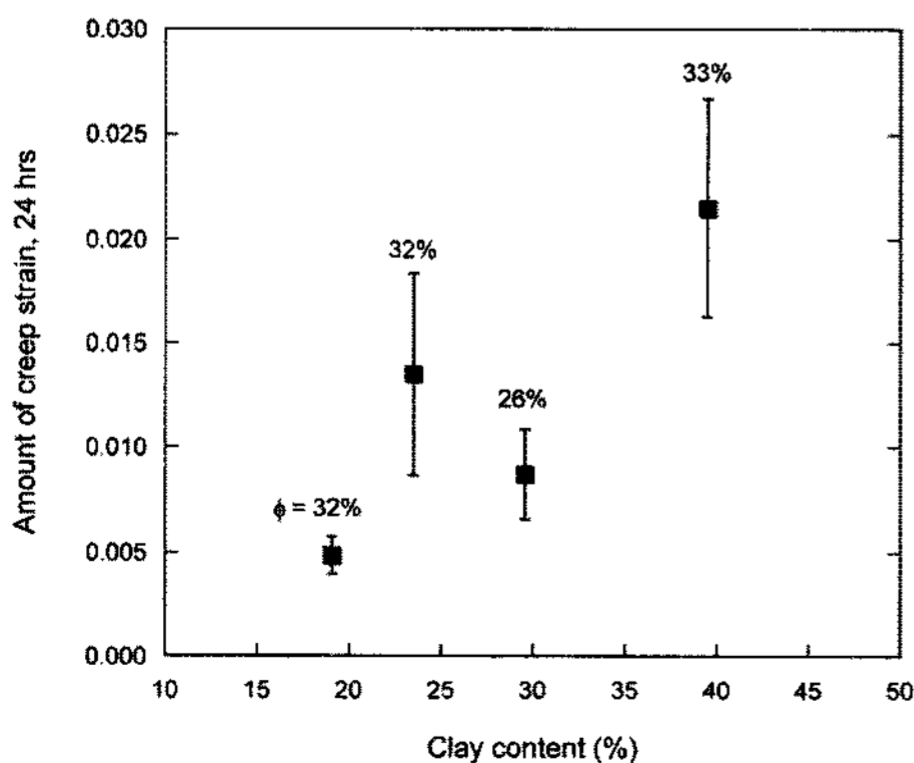


Fig. 4. Average amount of volumetric creep strain after 24 hrs for a 1.93 MPa stress step as a function of clay content. Values marked above data points indicate initial porosity (ϕ).

응력의 즉각적인 증가에 동반되어 나타나는 즉각적인 변형(탄성변형으로 간주)이 매 응력 스텝과 함께 발생함을 볼 수 있으며 그 직후 24시간 동안의 크리프 변형이 관찰된다. 총 변형률 곡선에서 즉각적인 탄성변형을 뺀 시간 의존적 크리프 변형 곡선을 Fig. 5에 같이 도시하였다. 결과에서 보듯이 응력 증가 스텝의 크기가 커질수록 그 직후 발생하는 크리프 변형의 양도 증가하는 경향을 볼 수 있다. 시험 도중 감압을 하면 감압에 따른 즉각적인 변형률 저하가 발생하는데 이 때 발생한 시간 의존적 변형이 거의 무시될 만큼 작은 크기라는 점에서 탄성회복(elastic recovery)이라 볼 수 있다. 감압 직후에는 시간에 따른 변형이 거의 발생하지 않았다. 또한 부분적 재가압을 하더라도 시간 의존적 변형은 발생하지 않았다(Fig. 5의 nc 부분 참조). 일단 감압을 하면 응력

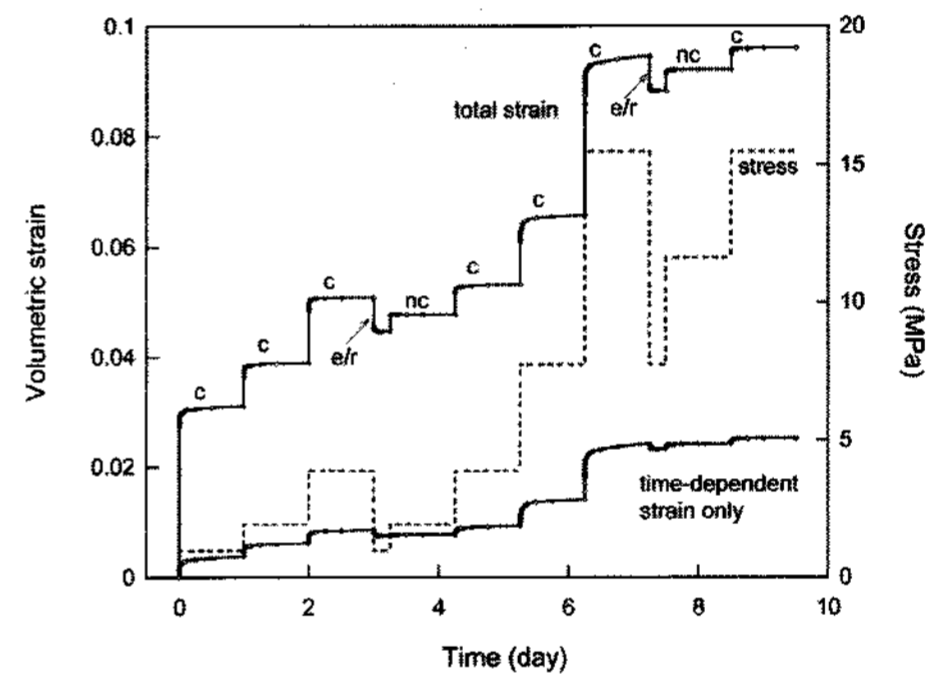


Fig. 5. Compaction strain as a function of time for a sample with clay content of 19.1%. In this test, loading was conducted at an increasing stress step. Intermittently, stress was lowered to investigate deformation at unloaded conditions. Total strain means instantaneous strain plus time-dependent strain. Letters 'c', 'nc', and 'e/r' indicate creep, no creep, and elastic recovery, respectively.

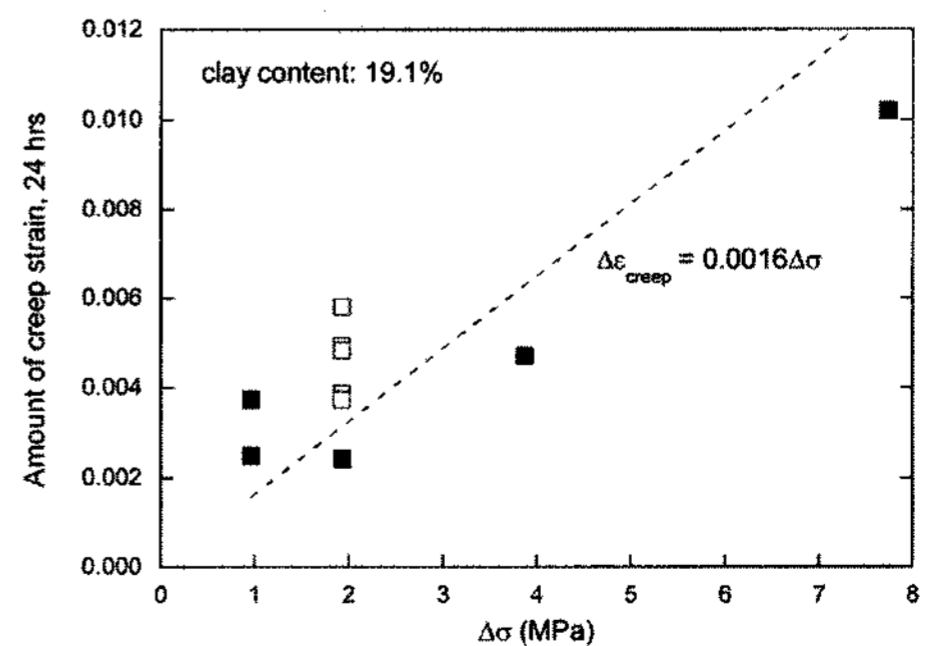


Fig. 6. Amount of creep strain after 24 hrs for different stress steps. The closed symbols are data obtained from Fig. 5, and the open symbols are those obtained from tests in 19.1% clay content shown in Fig. 3.

을 이전에 가했던 최고 응력(선행압밀응력, preconsolidation stress)까지 올려야 비로소 크리프 변형이 다시 시작되었다. 이러한 일련의 결과는 이암에서의 크리프 변형이 비복원, 비가역적인 변형임을 지시한다.

응력 대 크리프 변형의 선형 관계를 재확인하기 위하여 Fig. 5의 자료와 Fig. 3의 19.1% 점토함량의 이암 자료를 크리프 변형률 대비 응력증가량의 함수로 Fig. 6에 도시하였다. 응력 증가 직후 24시간동안 발생한 시간 의존적 변형은 응력 증가분이 증가함에 따라 대체로 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 이는 본 연구에서 관찰한 크리프 변형이 점토가 갖는 점성 변형에 기인할 가능성이 크다는 점에서 이암의 선형점성변형(linear viscous deformation) 특성을 지시한다.

크리프 모델에 대한 고찰

보다 장기적인 크리프 변형 예측을 위해 시간에 대한 함수로서의 크리프 변형률 모델들이 제시되어왔다. 선행 모델들은 발생한 총 변형률(ϵ)을 응력변화에 따른 즉각적인 변형 성분(ϵ_0)과 시간의 함수로서의 변형 성분($\epsilon(t)$)으로 분해하여

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon(t) \quad (2)$$

의 형태를 주로 이용하였다. 특히 많은 선행 연구에서 시간에 따른 변형을 지수함수(power-law function)의 형태로 기술하여 왔다(김광식과 김교원, 2003; Dudley *et al.*, 1994; Jaurez-Badillo, 1985; Hagin and Zoback, 2004; Hyde and Brown, 1976; Singh, 1975; Singh and Mitchell, 1968). 즉,

$$\epsilon(t) = \epsilon_1 \cdot t^d \quad (3)$$

여기서 ϵ_1 은 최초 단위시간($t=1$) 동안의 시간 의존적 변형률이며 d 는 크리프 지수(creep exponent)이다. 선행 연구에서 power-law 모델은 시간 함수로서 크리프 변형의 현상학적인 기술을 하는데 상당히 효율적으로 이용되어 왔다. 본 연구에서는 기존의 power-law 모델을 우리의 실험 자료에 적용하여 모델 인자가 갖는 의미와 크리프의 성격에 대해 이해하고자 한다.

먼저 점토함량이 다른 네 이암의 24시간 크리프 자료를 Fig. 7a와 같이 시간의 함수로 도시하였다. 그림에서 보이는 각 자료들은 총 6회에 걸쳐 실시된 $\Delta\sigma = 1.93$ MPa 직후 측정된 크리프 자료들의 평균값이다. 변형률과 시간 공히 log scale로 도시된 공간에서 크리프 변형률은 대체로 선형성을 보이므로 시간에 대한 지수 함수로 잘 표현됨을 알 수 있다. 이 공간에서 직선의 기울기는 크리프 지수 d 이며 변형률 축의 절편은 ϵ_1 에 해당된다. 점토함량 23.5%의 이암 자료를 제외한 나머지 세 이암의 지수함수는 d 가 0.13-0.15로 상당히 비슷한 기울기를 갖는다. 반면에 점토함량이 증가할수록 값이 증가함을 보였다. 점토함량 23.5%의 이암의 기울기가 다른 암석의 경우에 비해 크게 다른 이유는 확실치 않지만 t 가 약 1시간 이후의 자료는 다른 경우와 비슷한 기울기를 보인다.

Fig. 7b는 점토함량 19.1%의 이암에 대해 응력 스텝($\Delta\sigma$)의 크기가 다른 경우의 자료를 도시한 것이다. 즉, 네 조의 자료는 응력을 각각 0.97, 1.93, 3.8, 7.7 MPa 증가시킨 직후부터 24시간동안의 크리프 변형 자료이다. 이들 자료 역시 log scale의 변형률-시간 공간에서 선형

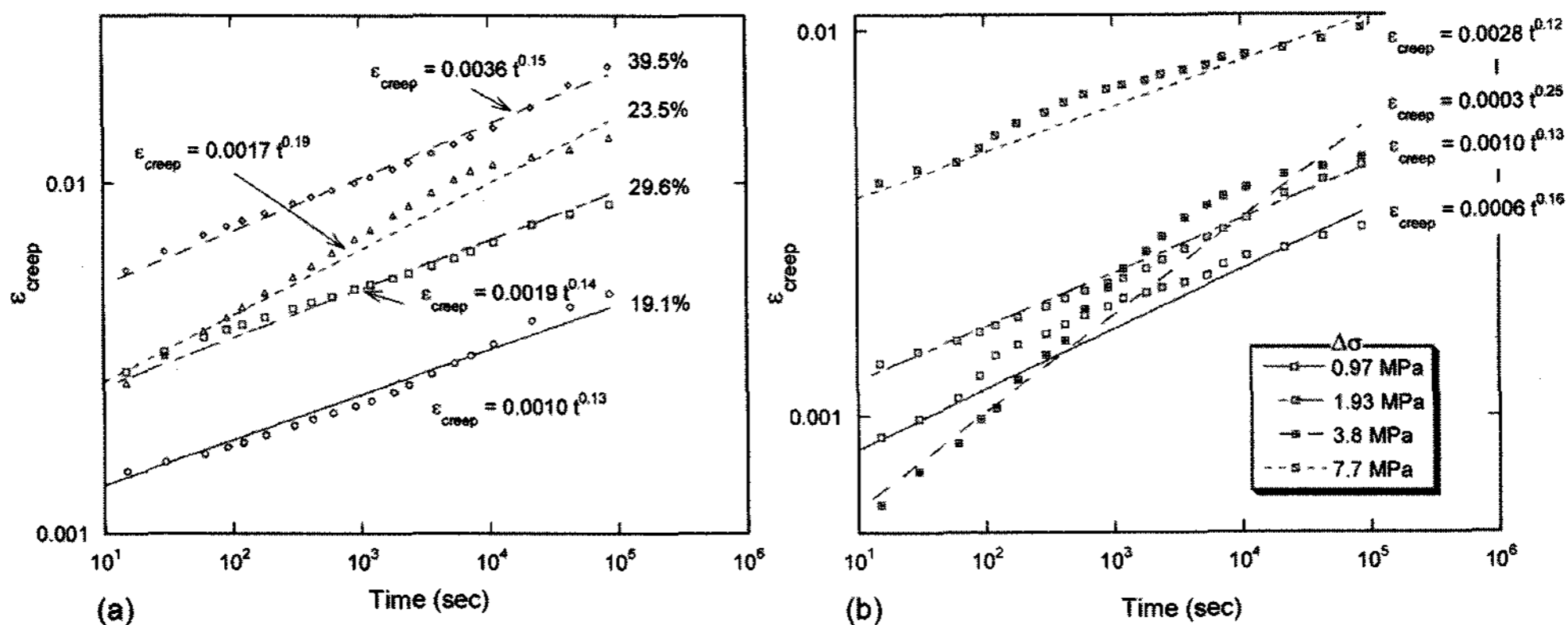


Fig. 7. Creep strain data fitted using power-law function as a function of time. (a) creep strain for different clay content, and (b) creep strain for different stress steps.

으로 나타나 지수함수로 대체로 잘 표현됨을 알 수 있다. 이 결과에서는 $\Delta\sigma=3.8\text{MPa}$ 직후의 자료를 제외하면 다른 세 곡선이 유사한 값(0.12-0.16)을 보인다. 이 경우 역시 발생한 크리프 변형률의 차이는 현저히 다른 ϵ_1 값의 차이로 표현되었다.

실험을 통해 관찰한 점토함량 차이와 즉각적인 응력 증가량 변화에 따른 크리프 변형률의 차이는 지수함수로 잘 표현될 수 있으며 두 경우 대체로 power-law의 d 보다는 ϵ_1 에 의해 그 차이가 기술되는 것으로 나타났다. 변형률-시간 곡선에서 d 와 ϵ_1 공히 크리프 곡선의 전체적인 형태를 정의하지만 주로 d 는 전반적인 곡선의 기울기(또는 증가분)에 의해 그 값이 달라지는 반면에 ϵ_1 은 초기 크리프 변형률에 의해 그 값이 크게 달라진다. 본 연구에서 보인 24시간 동안의 비교적 짧은 크리프 시험 결과는 점토함량 차이나 응력변화에 동반된 크리프 변형의 차이가 주로 크리프 과정의 초기 단계에서 발생했음을 지시한다.

토 의

본 실험 연구의 결과들은 미고결 이암에서의 크리프 변형이 암석 조직 자체가 갖는 고유한 성질임을 보여주었다. 점토함량이 증가함에 따라 크리프 변형의 크기도 증가하는 경향으로 보아 크리프 변형을 유발하는 유력한 원인은 점토의 점성 효과일 것으로 생각된다.

미고결 암석의 크리프 변형에 대한 지식은 본 이암이 채취된 시추 현장에서 여러 측면으로 활용될 수 있는데 이에 대해 간략히 활용 가능성을 검토해 보면 다음과 같다. 포항 지열 시추공에서의 지속적인 양수는 필수적이며 양수량에 따라 지하수위 저감이나 상승이 동반될 수 있다. 지하수위의 저하는 지하수압의 감소를 유발하며 이는 곧 지반의 유효응력(effective stress, 총응력 - 지하수압)의 상승을 의미한다. 이 경우 지반은 유효응력 증가에 의한 즉각적인 변형과 함께 시간 의존적 점성 변형이 동시에 발생하여 단순히 탄성적 응력-변형률 분

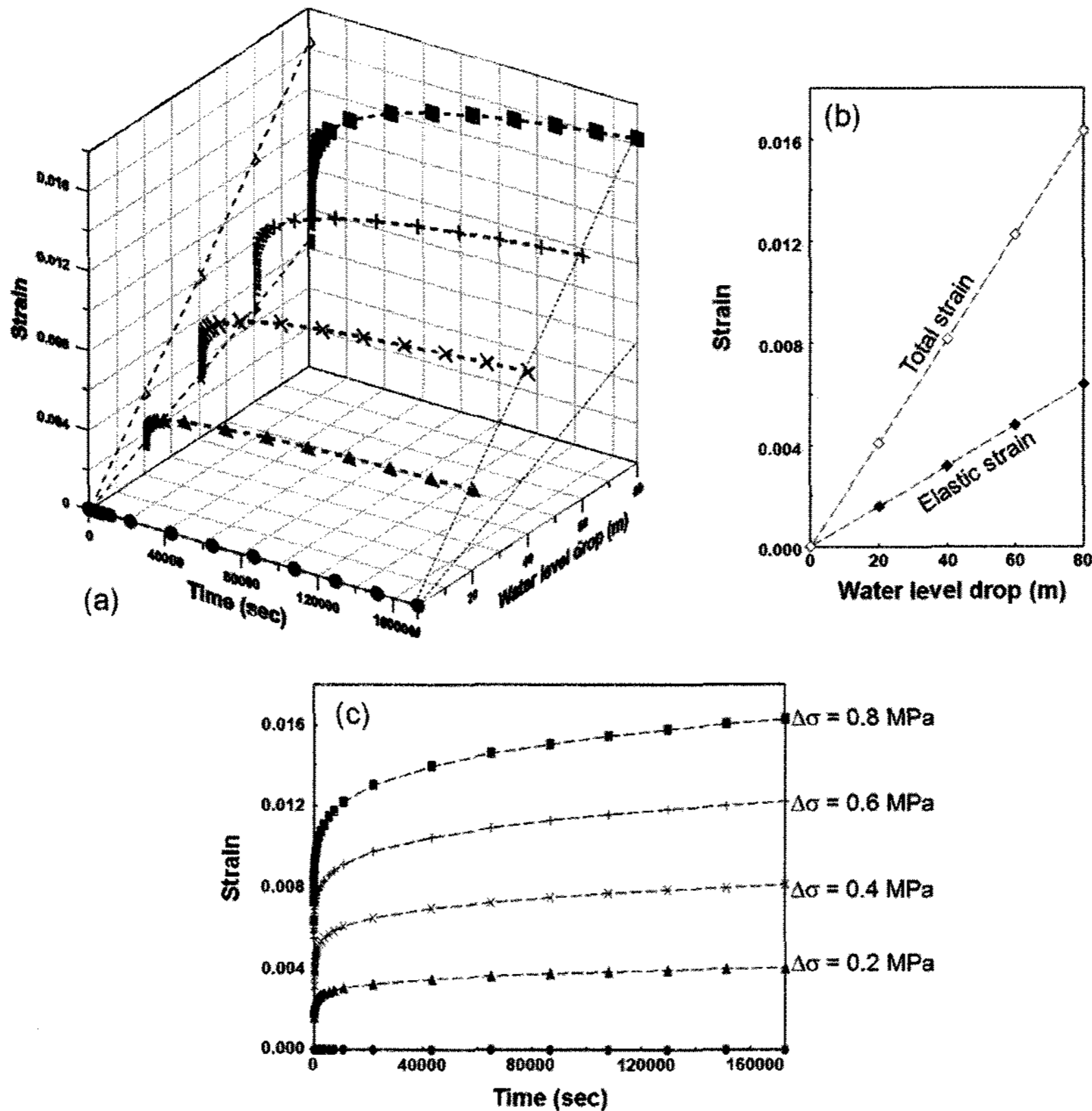


Fig. 8. A simplistic evaluation of the magnitudes of deformation in 40%-clay mudstone depending on water level drops. Total estimated strain after 48 hrs in (b) is the sum of elastic strain and viscous creep strain. Water level drop corresponds to a rise of effective stress ($\Delta\sigma$) in (c).

석에 의한 결과보다 훨씬 더 큰 규모의 변형이 발생하게 된다.

예를 들어 Fig. 8은 점토함량이 40%인 이암 구간에서의 지하수압 강하(또는 수위강하)에 동반되어 발생할 수 있는 총 변형을 유추한 예이다. 48 시간 동안의 크리프 변형을 고려해 보면 탄성에 근거하여 분석한 변형량과 비슷한 규모의 크리프 변형이 발생하여 총 변형은 탄성변형의 두 배 이상으로 산정되었다. 이 분석은 양수에 의한 유효응력의 증가에 따른 즉각적 변형과 시간에 따른 점성적 크리프 변형을 독립적으로 계산한 비교적 단순한 결과이지만 미고결 암석에서의 시간에 따른 변형이 간과하기에는 상당한 규모로 발생함을 보여준다.

시추공 주변 암석의 과도한 변형은 공내 케이싱의 손상 등의 결과를 초래할 수 있으므로 적절한 양의 양수량을 유지해야 할 필요가 있다(예, peng *et al.*, 2007). 실제 포항 시추공에서의 양수량과 수위강하 간의 관계는 상당히 선형적으로 비례함이 보고되어 있다(송윤호 외, 2005). 또한 양수에 따른 미고결 지반의 압밀은 이 지역의 지반 침하량 산정에 있어서도 중요하게 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

결 론

본 연구에서는 점토함량에 따른 미고결 이암의 시간 의존적 변형성을 비교하기 위해 같은 지역에서 추출한 점토함량이 다른 네 종류의 미고결 이암 시편에 대한 압밀시험을 통해서 시간 의존적 변형을 측정하였다. 또한 시간 의존적 변형 모델의 하나인 power-law 모델을 적용하여 그 특성을 알아보았다.

모든 가압 단계에서는 응력 증가 직후에 시간에 따른 크리프 변형이 현저하게 발생함을 관찰하였으며 감압이나 부분적 재가압 시에는 시간 의존적 변형이 거의 발생하지 않아 발생한 크리프 변형은 비가역적 점소성 변형임을 보였다. 발생한 크리프 변형의 크기는 점토함량에 비례하는 경향을 보여 점토의 점성 성분이 미고결 이암의 크리프에 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 또한 응력 증가분이 일정하면 그에 동반되어 발생하는 크리프의 규모도 거의 일정하며 응력증가분이 커지면 크리프 변형의 크기도 커져 응력증가분과 크리프 변형 사이에 선형관계가 있음을 알 수 있었다. 즉, 미고결 이암의 변형특성은 선형 점소성 변형임을 지시한다.

관찰한 크리프 변형은 시간에 따라 지수함수적으로 증가하여 power-law 모델로 잘 기술할 수 있었으며, 특

히 power-law 모델의 계수 ϵ_1 가 발생 크리프의 규모를 정의하는 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “지열수 자원 실용화 기술 개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 유익한 지적과 제안을 해주신 익명의 심사자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김광식, 김교원, 2003, 포항분지 제3기 두호층 이암의 크리프 거동, 지질공학, 13, 227-238.
- 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성곤, 박인화, 이태종, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 기원서, 현혜자, 오재호, 이윤수, 박찬, 정용복, 김통권, 이진수, 고동찬, 안은영, 윤욱, 2005, 심부 지열에너지 개발 사업, 과학기술부, 147p.
- 정태종, 1996, 의성 소분지에 분포하는 백악기 사암의 크리프 시험, 대한지구과학회지, 17, 109-118.
- 한국표준협회, 2002, 흙의 압밀 시험 방법(KS F 2316), 한국표준협회, 14p.
- Azam, S., 2003, Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia, Canadian Geotechnical Journal: Revue canadienne de gotechnique, 40, 964-975.
- 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, in Rock Mechanics in Petroleum Engineering, 45-54.
- Dugan, B., Flemings, P.B., Olgaard, D.L., and Gooch M.J., 2003, Consolidation, effective stress, and fluid pressure of sediments from ODP Site 1073, US mid-Atlantic continental slope, Earth and Planetary Science Letters, 215, 13-26.
- Fabre, G. and Pellet, F., 2006, Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 43, 950-960.
- Gasc-Barbier, M., Chanchole, S., and Brest, P., 2004, Creep behaviour of Bure clayey rock, Applied Clay Science, 26, 449-458.
- Hagin, P.N. and Zoback, M.D., 2004, Viscous deformation of unconsolidated sands-Part 1: Time-dependent deformation, frequency dispersion, and attenuation, Geophysics, 69, 731-741.
- Hyde, A.F.L. and Brown, S.F., 1976, The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading, Gotechnique, 26, 173-184.
- Jaurez-Badillo, E., 1985, General time volume change equation for soils, Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 519-530.
- Maekawa, H., Miyakita, K., and Sekiguchi, H., 1991,

- Elasto-viscoplastic consolidation of a diatomaceous mudstone, *Soil and Foundations*, 31, 93-107.
- Maranini, E. and Brignoli, M., 1999, Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 36, 127-138.
- Murakami, Y., 1979, Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clays of some age, *Soils and Foundations*, 19, 17-29.
- Onargan, T., Koca, M. Y., Kucuk, K., Deliormanli, A., and Saydam, S., 2004, Impact of the mechanical characteristics of weak rocks and trona ore beds on the main drift deformation at Beypazari mine, Turkey, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 41, 641-654.
- Peng, S., Fu, J., and Zhang, J., 2007, Borehole casing failure analysis in unconsolidated formations: A case study, *J. Petrol. Sci. Eng.*, 59, 226-238.
- Robinson, R.G., 1999, Consolidation analysis with pore water pressure measurements, *Gotechnique*, 49, 127-132.
- Singh, A. and Mitchell, J.K., 1968, General stress-strain-time function for soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 95, 21-46.
- Singh, D.P., 1975, A study of creep of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 12, 271-276.
- Tomanovic, Z., 2006, Rheological model of soft rock creep based on the tests on marl, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 10, 135-154.
- Yoshimi, Y., 1987, Pore pressure dissipation ratio for a nonlinear consolidation problem, *Soils and Foundations*, 27, 88-90.

장찬동

충남대학교 지질환경과학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-6430
Fax: 042-823-5636
E-mail: cchang@cnu.ac.kr

명우호

(주)휴스콘건설
150-708 서울시 영등포구 여의도동 25-3 동화빌딩
15층
Tel: 02-780-4071
Fax: 02-780-4076
E-mail: sunclipse@huscon.com

이태종

한국지질자원연구원 지하수지열연구부
305-350 대전시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3051
Fax: 042-868-3414
E-mail: megi@kigam.re.kr