터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 13, No. 2, 2003, pp. 100~107

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 13, No. 2, 2003, pp. 100-107
J. of Korean Society for Rock Mech.

대구지역 셰일의 크리프 특성

김영수[1], 정성관[2], 차주석[3], 방인호[4]

The Creep Behavior of Shale in Daegu Area

Young-Su Kim, Sung-Kwan Jung, Joo-Seok Cha and In-Ho Bang

Abstract. Deformation is found by an external force in the rock which has internal stress. So, deformation is increased in time what is stressed under constant load. Rock materials collapse suddenly in a long period when the creep rate increases slightly. So mechanical deformability of the ground is an essential condition for determination of long term safety in structures. The result of analysis in 40%, 50%, 60%, 70% of constant load in creep test, strain velocity constants α and γ increase with load increasement. Griggs equation is more exact than Li and Xia, Singh equation, and G_2 of a flow constant by Burger's model decreases with stress increasement, but η_1, η_2 and G_1 manifest irregularly in this study.

KeyWords: Deformation, Creep, Constant load, Strain velocity constant, A flow constant

초 록. 본 암석에 외력을 가하면 내부 응력이 발생하고, 이로 인해 변형이 발생하게 된다. 암석재료에서 크리프 변형이 장기간 지속되어 어느 한계에 도달하면 급작스런 파괴로 이어진다. 따라서 구조물의 장기적 안정성 검토시에 지반의 크리프 특성 파악이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 일축압축강도의 40%, 50%, 60%, 70%에 해당하는 하중을 가하여 변형률을 측정하였다. 크리프 특성을 비교·분석한 결과로써 변형률 속도의 경우 하중이 증가함에 따라 변형률 속도 상수 α, γ 도 증가하는 경향이 나타났다. 크리프 곡선에서 Griggs가 제안한 식이 Li와 Xia, Singh식 보다 적합하였으며, Burger's model을 적용하여 구한 상수 G_2는 응력수준의 증가에 따라 감소하며, η_1, η_2, G_1의 경우 불규칙하게 나타났다.

핵심어: 변형, 크리프, 일정하중, 변형률 속도 상수, 유동상수

1. 서 론

대구·경북지역의 지반은 퇴적암이 주종을 이루며, 그 중에서도 이암, 사암, 셰일이 대부분을 차지하고 있다. 특히, 셰일은 층리면의 발달로 이루어진 층상 암반으로서 생성조건, 생성과정에 의해 층리면과 수직인 방향으로 이방성적 특성이 나타내며 이는 등방성 암반과는 다른 특성을 가진다. 암석에 외력을 가하면 변형이 발생하게 되며 시간에 따라 변형량이 증가한다. 이는 발생하는 응력, 온도, 시간, 함수량 등의 변형요소에 따라 다르게 나타나며, 이 변형요소를 연구[1-5]함으로써 암석의 역학적 성질을 규명하고 암석의 역학적 변형 거동을 예측할 수 있다. 암석재료에서 크리프 변형이 장기간 지속되어 어느 한계에 도달하면 급작스런 파괴로 이어진다. 따라서 구조물의 장기적 안정성 검토시에 기초지반의 크리프 특성 파악이 필수적이라고 할 수 있다[6].

본 논문에서는 층리면에 작용하는 하중에 따라 이방성 암석의 거동을 비교하여 변형률과 응력의 관계를 통하여 암석 내부의 파괴 진행과정, 변형률 속도 상수, 크리프 상수 및 유동 상수를 산정하여 암석의 파괴 과정을 예측하였다[7-11].

2. 연구 내용 및 방법

본 논문에서는 이방성 암석시료에 대하여 일축압축강도 실험 및 크리프 실험을 통하여 보통암인 셰일의 층리면에 따른 암석의 크리프 특성을 분석하였다. 시료

[1]정회원, 경북대학교 토목공학과 교수
[2]비회원, 경북대학교 조경학과 교수
[3]비회원, 경북대학교 토목공학과 석사
[4]정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정
접수일: 2002년 12월 20일
심사 완료일: 2003년 3월 5일

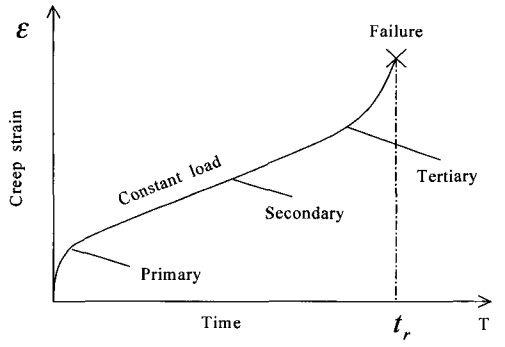


Fig. 1. The character of creep deformation.

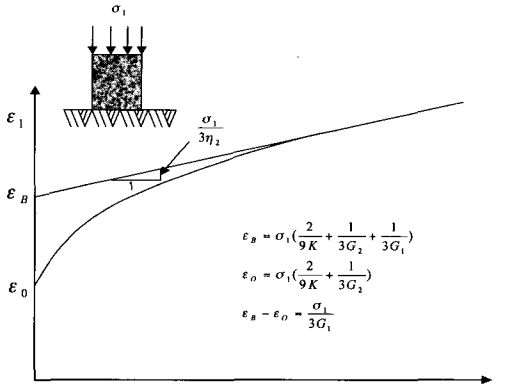


Fig. 2. Burger's material by Hardy's suggestion.

의 균질성을 위하여 동일 암반에서 시료를 채취하여 일축압축강도 실험을 실시하였으며, 0°, 30°, 90°시료에 대해 각각 일축압축강도의 40%, 50%, 60%, 70% 하중을 가하여 변형률을 측정하였다. 그리고, 그 결과로 크리프 특성을 비교·분석하고, 크리프 특성에 적합한 방정식을 이용해서 각 암석의 크리프 거동에 의한 파괴과정을 알며 암석에 따른 변형거동에 적합한 model의 일반식을 적용하여 크리프 유동 상수를 구한다.

2.1 크리프 특성

장시간 일정하게 응력을 가하면 시간이 경과함에 따라 변형률이 증가하는 현상을 크리프라고 한다. 크리프에 의해 발생하는 변형률~시간의 곡선을 크리프 곡선이라 하며, 일반적으로 크리프 곡선은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[12].

2.2 크리프 정수

2.2.1 변형률 속도 상수

Yamaguchi와 Nishimatsu(1967) 등은 log 함수의 시간에 대하여 크리프 변형률은 선형적으로 증가하고 변형률 속도는 감소하는 경향을 밝힌바 있다[12].

크리프 변형률 속도에 대하여 log 스케일을 이용하여 $\ln v_\varepsilon = \alpha \times \ln t + \gamma$로 표현할 수 있으며, 이때의 α, γ는 변형률 속도 상수이다[13].

2.2.2 크리프 상수

일반적인 암석의 크리프 특성식으로는 Griggs(1936)가 적용한 $\varepsilon = a + b \cdot \ln t + c \cdot t$식과 Li와 Xia(1999)가 적용한 $\varepsilon = a + b \cdot \ln t$식 및 Singh(1973)가 적용한 $\varepsilon = a \cdot t^b$식을 이용하여 크리프 상수 a, b, c를 산정하였다[9-11].

2.2.3 크리프 유동상수

암석의 변형거동을 보면 순간적 탄성변형률(ε_0)이 존재하며, ε_0가 시점이 되어 변형률은 시간의 증가에 따라 증가율이 감소되는 현상을 볼 수 있는데, 이로부터 1차 크리프 거동이 확인되며, 기울기가 일정해지는 2차 크리프 곡선의 점근선에서 기울기 $\sigma_1/3\eta_2$이 되는 점성형이 된다. 이는 탄성형과 점성형이 결합되어 점탄성체적 거동을 나타내며 Maxwell형과 Kelvin형의 결합형태가 된다. 즉, 셰일의 변형거동은 Burger's model의 일반식을 적용하여 크리프 유동 상수를 구할 수 있다[3].

Kelvin's model과 Maxwell's model에서 응력이 σ_1으로 일정할 때 변형률(ε_1, ε_2)은 각각 다음 식 (1), (2)와 같이 된다.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{G_1}[1 - \exp(-\frac{G_1}{3\eta_1} t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_1}{G_2} + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t \quad (2)$$

따라서 총 변형률 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{G_2} + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t + \frac{\sigma_1}{G_1}[1 - \exp(-\frac{G_1}{3\eta_1} t)] \quad (3)$$

여기서, 유동 상수 G_1, G_2, η_1, η_2를 구했다.

2.3 시료 성형

본 실험에 사용된 셰일은 흑색 셰일로써 시료 채취시 불균질성을 최대한 없애며 단지 이방성 특성을 고려하기 위해서 불연속면이 일정한 간격으로 분포된 암괴형태의 것만을 취하여 구경이 D=4.3cm의 core drill로 Fig. 3과 같이 층리면과 각각 0°, 30°, 90°가 되도록 시료를 제작하였다.

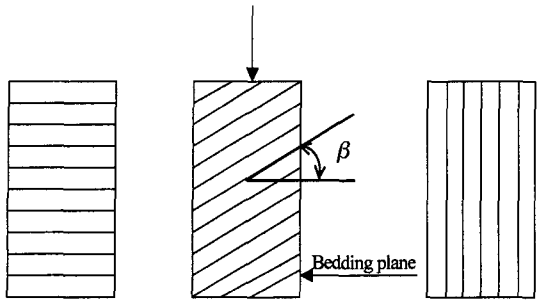


Fig. 3. The sample figure of $\beta°$.

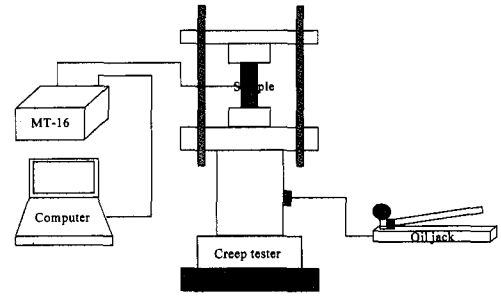


Fig. 4. Systems of experimental test.

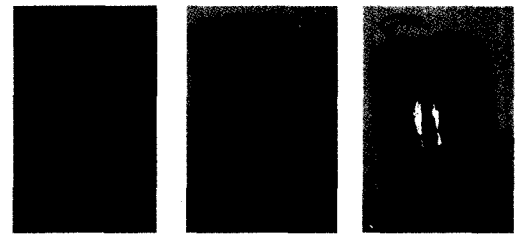


Fig. 5. Failure types.

2.4 실험 기기 및 방법

Fig. 4에서와 같이 oil jack에 의해 일정한 하중을 재하하여 시료에 부착된 변형률 게이지로부터 동적 데이터 변환기(MT-16)를 거쳐 그 자료들을 컴퓨터에 저장하게 된다.

본 논문에서는 일축압축강도의 40%, 50%, 60%, 70%에 해당하는 응력수준으로 실험하였다. 변형률을 측정하는 동안 동일한 조건을 주도록 하여야 하나 현실 여건상의 어려움으로 상온에서 실험을 하였다. 실험이 진행되는 동안 응력수준은 일축압축강도에 대한 재하 하중의 비로 표현되며 크리프 실험기간 동안 일정하게 하중을 유지하는 것이 중요하다.

3. 실험 결과 및 분석

암석에 힘을 가하면 암석 내부에 균형을 이루고 있는 응력 균형이 깨어지고, 다시 이에 맞게 변형을 일으키게 된다. 이 변형은 방향과 크기 및 위치에 따라 다른 값으로 나타난다. 이와 같은 역학적 성질을 알기 위해 일축압축강도, 포아송비, 탄성계수, 변형률, 크리프 정수 등을 구하였다[13]. Table 1은 셰일에 대한 겉보기 비중, 함수비, 포화도, 간극율, 흡수율을 나타내었다.

Table 1. Rock properties.

Apparent specific gravity			w_n	Sr	n_e	ab
G_n	G_d	G_t	(%)	(%)	(%)	(%)
2.73	2.72	2.74	0.42	56.87	2.02	0.74

3.1 일축압축강도 실험

크리프 실험에 사용된 암석의 탄성정수를 구하기 위해 β=0°, 30°, 90°의 시료에 대하여 동일 암반에서 시료를 채취하여 일축압축강도 실험을 실시하였다. $\beta°$에 따른 일축압축강도 실험 결과는 측정된 변형률로부터 구하여진 암석 정수값으로 Table 2와 같다. E는 수직 방향의 탄성계수를 의미하고 할선 탄성계수(E50)을 통해 구하였으며, ν는 수직 방향으로 응력이 작용했을 때의 포와송비이다. 셰일은 90°에서 최고 강도특성을 보였으며, 가장 낮은 강도는 30°에서 나타났다. 이는 $\alpha = 45°$

Table 2. Coefficients of Shale.

$\beta°$	Axial compression strength kg/cm^2	E kg/cm^2	ν	Axial strain ε (10^{-6})
0°	1069	308563	0.16	2866
	1122	305263	0.17	2978
	1037	398558	0.13	2690
Average	1076	337461	0.15	2845
30°	938	160698	0.21	4209
	1008	292710	0.27	4390
	865	212928	0.26	4128
Average	937	221813	0.25	4242
90°	1146	390211	0.21	2580
	1232	412224	0.24	2787
	1018	335848	0.22	2418
Average	1132	379427	0.22	2595

$+\phi/2$에서와 같이 파괴각과 절리면이 일치하는 과정에서 강도가 작아짐을 알 수 있다.

일축압축강도 실험후 각 시료의 파괴각을 통해 이방성 시료의 거동을 살펴보면 Fig. 5와 같고, 0°에서 층리면에 수직으로 작용하는 전단파괴, 30°에서 층리면을 따라 발생하는 전단파괴, 90°에서 층리면에 수평으로 작용하는 인장파괴가 일어남을 알 수 있다. 수직방향의 변형률에 대한 수평방향의 변형률로 나타낸 ν는 0°시료에서 0.15로 가장 작은 값이 나타났다.

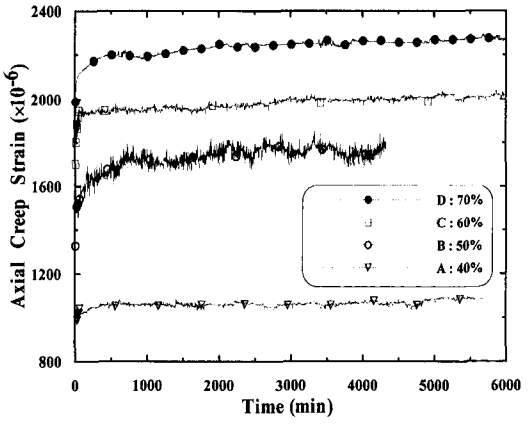
3.2 크리프 실험

암석은 광물입자의 결합체이므로 변형은 연속적이 될 수 없고 단위입자간의 변형을 일으키게 되어 불연속적인 운동이 일어나며, 이 불규칙적인 입자는 하중에 의해 응력균형이 깨어지며 이에 맞게 변형을 일으키는 반복된 거동으로 결국은 파괴에 이르게 한다.

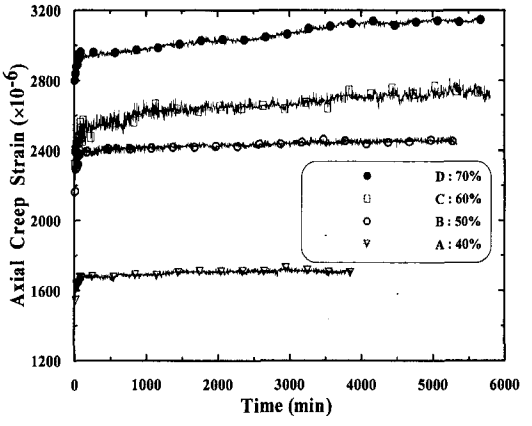
Yamaguchi와 Nishimatsu(1967)에 따르면 일반적으로 암석에서는 파괴가 일어날 때까지 물체가 탄성적인 거동을 하고, 2차 크리프의 지속은 소성적 흐름이 아닌 3차 크리프를 발생하게 하는 취성적 크리프에 의해 결정되며 취성적 크리프는 파괴시의 변형률 5%에서 가속

Table 3. Applied stress.

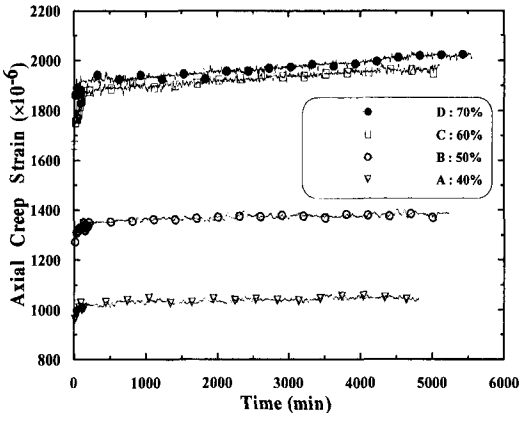
β°	Axial compression strength kg/cm^2	A 40% stress	B 50% stress	C 60% stress	D 70% stress
0°	1076	430	538	646	753
30°	937	375	469	562	656
90°	1132	453	566	679	792



(a) β=0°



(b) β=30°



(c) β=90°

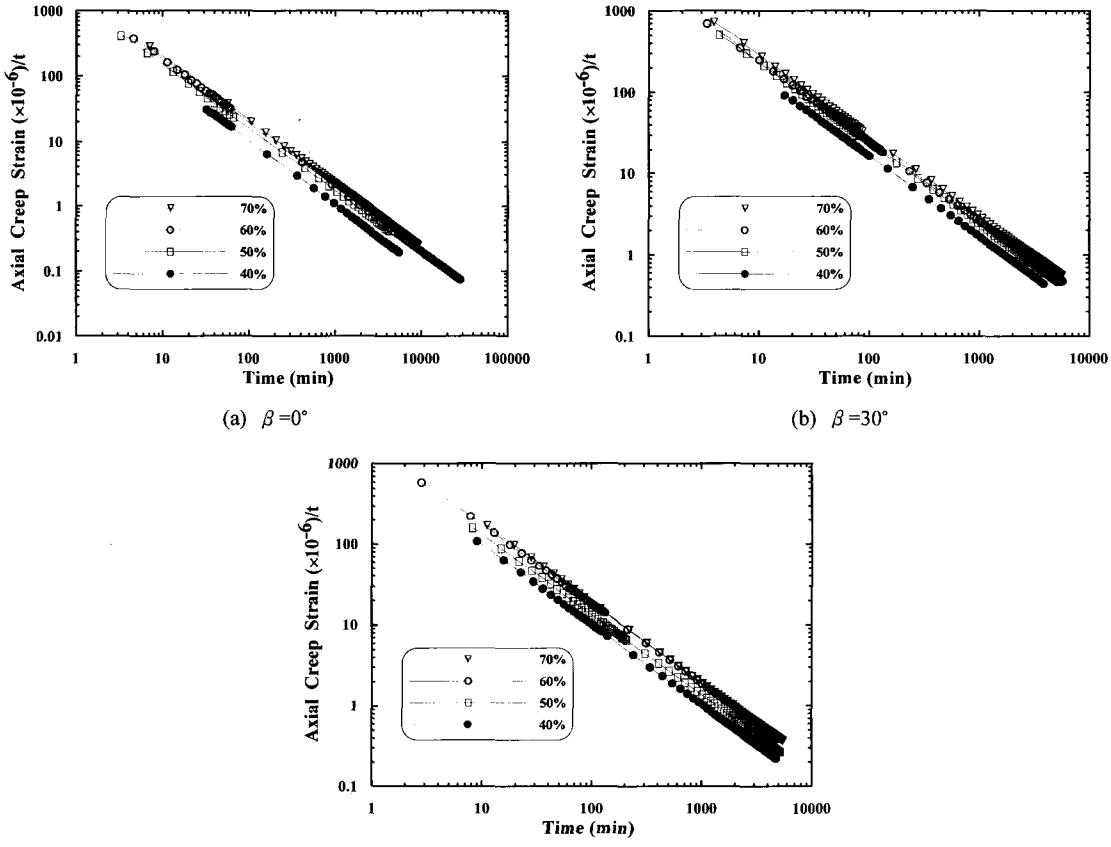
Fig. 6. Creep curves of each stress.

화된다. 즉, 셰일의 크리프 거동은 3차 크리프 전까지인 1차, 2차 크리프의 탄성 및 점성적 거동이 타당하다고 사료된다[12].

Table 3은 일축압축강도에 대한 하중비를 나타냈다. 먼저 0°시료에서 60%의 하중을 재하하여 약 20일에 걸친 장시간의 실험을 실시하여 그 거동 특성을 파악한 후, 3~4일의 짧은 시간으로도 암석의 변형 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단되어 이에 대한 단시간 크리프 실험을 하였다.

Fig. 6(a) 응력수준 70%인 D의 경우 1차 크리프의 총 변형률량은 A의 경우와 비교해 보면 약 2배 이상의 큰 차이가 나타난다. 이는 낮은 응력에서의 변형 거동은 처음 받은 범위에서 크게 증가하지 않지만, 높은 응력을 받은 경우 암석의 거동은 상대적으로 더 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 1차 크리프의 지속시간은 재하된 하중에 따라 다르고, 2차 크리프는 A의 경우 거의 수평으로 변형률이 일정하게 거동을 하지만, 보다 높은 하중을 받고 있는 B, C, D의 경우 그 기울기가 급한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(b), (c)에서도 (a)의 경우와 유사한 거동이 나타났다. 2차 크리프 거동은 A와 B는 유사하지만, 보다 높은 하중을 받고 있는 C, D의 경우 그 기울기가 급한 것을 볼 수 있다. 1차 크리프의 지속시간의 경우 A에서 C로 가면서 그 시간은 점차 증가되었으며 D에서는 감소하였다. 즉, 60%이하의 응력수준까지는 하중이 재하함에 따라 1차 크리프의 영향을 많이 받는 경향이 있고 70%의 응력수준에서는 1차 크리프의 거동과 함께 2차 크리프 거동에 영향을 받는 것으로 사료된다. β=0°, 90°에서는 그 변형률이 크게 발생하지 않지만, 층리면이 파괴각에 일치하는 β=30°에서는 가장 큰 변형률이 나타나며 더 큰 변형을 보이며 거동을 하고 있다. 즉, 동일 하중이 동일한 암반에 작용하더라도 절리면이나 벽개 등에 대해 서로 다른 방향에서 다른 영향을 끼치는 것을 알 수 있다[14,15]. 이는 구조물의 장기적 안정성 검토



(a) β=0° (b) β=30°

(c) β=90°

Fig. 7. Strain velocity of each stress.

시 기초지반의 하중에 따른 크리프 특성이 다를 것이므로 설계 · 시공시 이방성의 경우 꼭 크리프 특성에 따른 고려를 해야한다[6].

3.3 암석의 크리프 정수 산정

3.3.1 변형률 속도 상수 산정

Fig. 7은 log함수에 대한 변형률 속도를 나타낸 것으로 변형률 속도는 시간의 증가에 따라 감소하며 각각 비슷한 경향이 나타났으며, 본 실험에서는 크리프가 계속하여 발생하고 있는 단계이다.

Table 4와 같이 크리프 변형률 속도에서 변형률 속도 상수 α, γ는 하중의 증가에 따라 비례하여 증가하는 경향이 있다. 즉, 높은 응력수준이 작용함에 따라 보다 이른 시간에 파괴에 이를 것으로 판단된다. 변형률 속도 상수 α의 경우 β=30°에서 가장 크며, β=0°와 β=90°에서 비슷한 값이 나타났다.

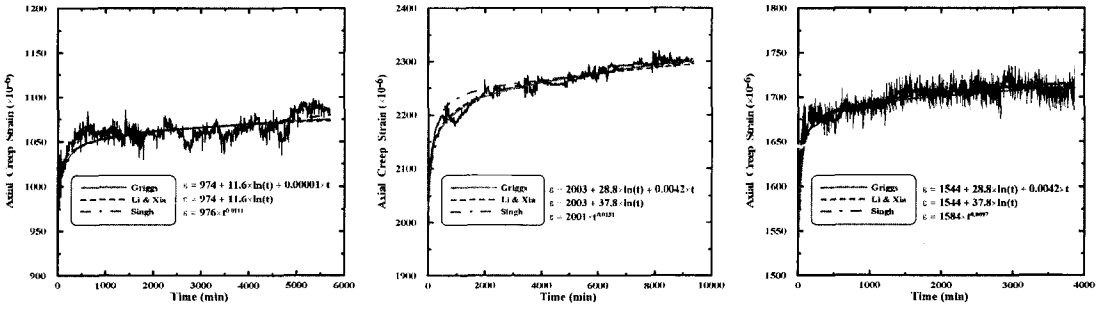
3.3.2 크리프 상수 산정

Griggs가 적용한 식과 Li와 Xia가 적용한 식과 Singh가 적용한 식에 대해 가장 적합한 방정식을 찾는다. 암석의 크리프 곡선을 알게 되면 그에 따른 암석의 대략적인 파괴시간을 예측할 수 있게 된다. Fig. 8에서는 응력수준 40%와 70%에 대해서만 나타내었다.

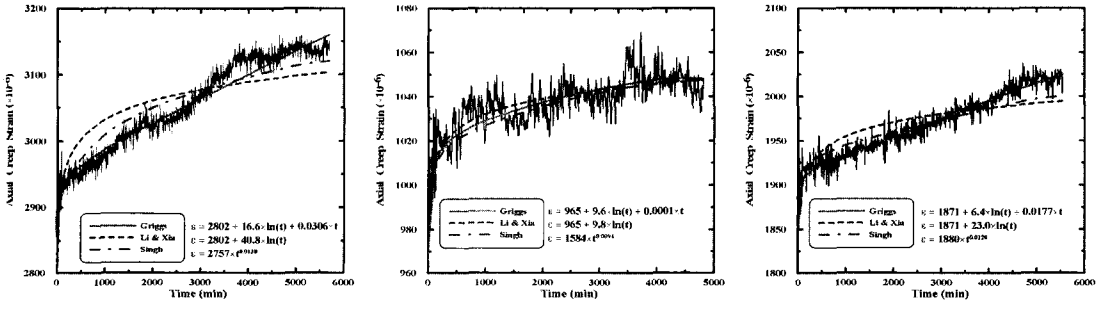
Fig. 8(a), (c), (e)의 낮은 하중에서 크리프 곡선식은 실험과 잘 일치하고 있지만, 응력수준이 증가함에 따라 (b), (d), (f)에서 Li와 Xia, Singh식은 일치하지 않으며, 2차 크리프 거동에 대해 과소하게 평가하는 경향이

Table 4. Strain velocity constant.

β°	Stress (%)	Strain velocity constant	
		α	γ (-)
0°	40	6.88	0.982
	50	7.22	0.981
	60	7.48	0.985
	70	7.58	0.987
30°	40	7.37	0.982
	50	7.71	0.985
	60	7.72	0.985
	70	7.92	0.987
90°	40	6.87	0.983
	50	7.15	0.985
	60	7.42	0.987
	70	7.50	0.988



(a) 40% stress of β=0° (b) 70% stress of β=0° (c) 40% stress of β=30°



(d) 70% stress of β=30° (e) 40% stress of β=90° (f) 0% stress of β=90°

Fig. 8. Creep curve of β°.

Table 5. Creep constant.

β°	Stress (%)	Griggs constant		
		a	b	c
0°	40	974	11.6	0.0001
	50	1350	47.3	0.0007
	60	1785	25.3	0.0013
	70	2003	28.8	0.0042
30°	40	1544	18.7	0.0001
	50	2236	23.6	0.0021
	60	2328	42.1	0.0151
	70	2802	16.6	0.0306
90°	40	965	9.6	0.0001
	50	1270	12.8	0.0005
	60	1666	35.7	0.0022
	70	1871	6.4	0.0177

Table 6. Creep flow constant.

β°	Stress (%)	η_1	η_2	G_1	G_2
		$(Kg/cm^2)\times 10^{-6}$			
0°	40	5.8	20.4	1.81	0.44
	50	1.5	2.2	0.51	0.40
	60	8.6	29.9	1.05	0.38
	70	4.1	5.2	1.18	0.37
30°	40	3.6	7.8	0.75	0.24
	50	1.8	4.6	0.86	0.21
	60	3.7	4.9	0.72	0.24
	70	1.7	9.9	1.46	0.23
90°	40	5.2	12.6	2.43	0.47
	50	3.1	15.7	2.17	0.45
	60	4.3	8.7	1.06	0.41
	70	2.5	4.9	6.28	0.42

있다.

위와 같이 Griggs, Li와 Xia, Singh식을 비교해본 결과 본 실험에서는 Griggs식이 실험 결과와 가장 잘 일치하였으며, 크리프 상수에 대한 값은 Table 5와 같다. 0°와 90°의 경우보다 30°에서 기울기가 급해지며 상당히 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 셰일과 같은 층리가 존재하는 암석에서는 층리가 발달된 방향과 하중이 작용하는 방향의 관계에 따른 그 변형특성이 매우 차이가 난다. 2차 크리프를 나타내는 크리프 상수 c는 하중의 증가와 함께 증가하는 경향이 있다.

3.3.3 유동 상수 산정

셰일의 변형거동은 Burger's model을 적용하여 크리프 유동 상수를 구하였으며, Table 6에 나타내었다. G_2의 경우 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향이 있으며, 이는 Hardy(1970)에 의한 석회암의 경우와 비슷하였다[3]. 그러나, η_1, η_2, G_1의 경우 불규칙하게 나타났다.

4. 결 론

대구 지역의 기반암으로 분포하고 있는 셰일을 채취하여 각종 물리적 특성실험, 역학실험, 그리고, 크리프 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이방성 특성 중 β=90°에서 층리면으로 작용하는 인장파괴로 최고 강도가 나타났고, β=0°에서 층리면에 수직으로 작용하는 전단파괴가 나타났고, β=30°에서 층리면으로 작용하는 전단파괴가 나타났다.
2) 시간과 변형률 속도의 경우 하중이 증가함에 따라 변형률 속도 상수 α, γ는 비례하여 증가하는 경향이 나타났다. 변형률 속도상수 α의 경우 β=30°에서 가장 크게 나타났으며, β=0°와 β=90°에서 각각 비슷한 값이 나타났다.
3) 크리프 곡선에서 Griggs의 식이 Li와 Xia, Singh의 식보다 적합하며, 여기서 순간변형률 a와 2차 크리프 상수 c는 하중에 비례하여 증가하였다.
4) 크리프 거동에 대한 역학적인 모델로 점탄성변형거동을 하는 Burger's model을 적용하여 구한 상수 G_2는 응력수준의 증가에따라 감소하며, η_1, η_2, G_1의 경우 응력수준의 증가에 따라 불규칙하게 나타났다.

참고문헌

1. Chin, H.P. and Rogers, J.D., 1987, Creep parameters of rocks on an engineering scale, Rock Mech. & Rock Eng, 20, 137-146.
2. Desai, C.S. and Varadarajan, A., 1987, A constitutive model for quasi-static behavior of rock salt, J. of Geophy., Res. 92.
3. Hardy, H.R., 1970, Time dependent deformation and failure of geological materials, Proc. 3rd Symp. Rock Mech., Golden, Colo., 135-175.
4. Langer, M., 1984, The rheological behavior of rock salt, 1st International Conference on the Mechanical Behavior of Salt, 201-240.
5. Lecomth, P., 1965, Creep in rock salt, J. Geol., 73.3, 469-484.
6. Boukharov, G.N. and Chanda, M.W., 1994, The three processes of brittle crystalline rock creep, Int. J. Rock

Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 31.4, 325-335.
7. 김광식, 2001, 포항분지 이암의 크리프 특성, 공학석사학위논문, 경북대학교, 32-50.
8. 정태종, 1995, 의성 소분지에 분포하는 하부 경상계층군 사암의 역학적 변형성, 공학박사학위논문, 경북대학교, 17-23.
9. Griggs, D.T., 1936, Deformation of rocks under high confining pressure, J. Geol., 44.5, 541-557.
10. Li, Y. and Xia, C., 1999, Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, 467-475.
11. Singh, M., 1973, Continuum characterization of jointed rock masses. Part I -The constitutive equations, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 10, 311-335.
12. Yamaguchi, U. and Nishimatsu, Y., 1967, 암석역학입문, 구미서관, 서울, 112-125.
13. Okubo, S. and Nishimatsu, Y., 1991, Technical note complete creep curves under uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 28.1, 77-82.
14. Price, N.J., 1964, A study of the time strain behaviour of coal measure rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1.2, 277-303.
15. McLamore, R. and Gray, K.E., 1967, The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks, J. Eng. Ind. 89, 62-76.

김 영 수

1975년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1977년 고려대학교 일반대학원 토목공학과 공학석사
1982년 고려대학교 일반대학원 토목공학과 공학박사
Tel: 053-950-5609
E-mail: kimysu@knu.ac.kr
현재 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

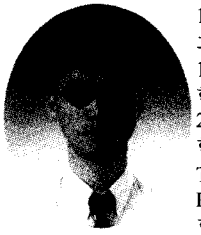
차 주 석

2000년 영남대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2003년 경북대학교 일반대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 053-950-7556
E-mail: jscha2001@hanmail.net
현재 경북대학교 토목공학과 석사

정 성 관

1980년 경북대학교 농과대학 농공학과 농학사
1982년 고려대학교 일반대학원 토목공학과 공학석사
1987년 경북대학교 농과대학 농공학과 농학박사
Tel: 053-950-5783
E-mail: sgjung@knu.ac.kr
현재 경북대학교 농업생명과학대학 조경학과 교수



방 인 호

1995년 경북대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1997년 경북대학교 일반대학원 토목공학과 공학석사
2000년 경북대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정수료
Tel: 053-950-7556
E-mail: bih007@hanmail.net
현재 경북대학교 토목공학과 박사과정