

다단계 재하시험에 의한 함안층 적색 셰일의 크리프특성

조래훈¹ · 김교원^{2*}

¹(주)삼안 지질부, ²경북대학교 자연과학대학 지질학과

Creep Behaviour of Red Shale in the Haman Formation by Multi Stage Loading Test

Lae-Hun Cho¹ and Gyo-Won Kim^{2*}

¹Geology Department, Saman Corporation

²Department of Geology, Kyungpook National University

본 연구는 대구지역에 분포하는 함안층내 적색 셰일에 대하여 단일단계 크리프 시험과 다단계 크리프 시험을 수행하여 대상 암석의 크리프 특성을 규명한 것이다. 획득된 전체 데이터를 회귀분석하여 Griggs(1936)가 제시한 수식 $\epsilon_s = a + b \log t + ct$ 의 각 크리프 상수값을 도출하였다. 또한 1차, 2차 크리프의 전이시간(T_t)은 $d/dt(b \cdot \log t) = d/dt(ct)$ 되는 시간으로 하였다. 세 번의 다단계 크리프 시험으로 재하하중과 크리프 상수간의 관계식을 도출하였으며, 획득된 크리프 상수값과 시료과괴 시의 최대 변형률에 따라 각 재하하중에서의 시료과괴 예상시간(F_t)을 예상하였다.

주요어 : 크리프, 함안층, 셰일, 다단계재하시험

This study is concerned with creep characteristics of red shale in the Haman Formation by the single stage and multi stage loading tests. Creep constants in the Griggs's experiential equation, $\epsilon_s = a + b \log t + ct$, are determined by regression analysis on the total data obtained. The transition time between the primary and second creep means the time when the differential value of $b \cdot \log t$ is equal to the differential value of $c \cdot t$. The correlation equation between loads ($\sigma_{\%}$) and creep constants is deduced from the three times multi stage loading tests. Also a failure time under each loads is anticipated from creep constants and maximum strain at the failure.

Key words : creep, Haman Formation, shale, multi stage loading test

서 론

암석은 외력 하에서 탄성 및 비탄성 변형거동을 한다. 이 중 암석의 크리프 현상은 항복응력 이하의 일정하중 하에서 시간에 의존하는 비탄성(점소성) 변형 현상을 말하며 이는 장기적인 지반거동을 예측하는 데 중요한 요소이다.

Griggs(1936)가 금속에 대한 크리프 시험에서 나타나는 3단계의 크리프 양상이 암석의 크리프 시험에서도 나타남을 발견한 이후 고전적인 크리프 방정식을 분해하여 각 단계에 맞는 유동학적 모델을 선정하여 각각의 모델 방정식에 필요한 정수값을 결정하는 연구(Boukharov et al, 1995; Weidinger et al, 1997)나 터널, 지하철과 같은

지하공동 구조물의 장기간 안정성을 해석하기 위한 삼축 크리프 시험(Cogan, 1976), 핵폐기물 지하 저장소와 같은 구조물의 열에 대한 장기간 안정성 해석을 위한 고온삼축 크리프 시험(Schatz and Sinha, 1981; 장명환, 1996), 붕암 또는 차응력의 변화에 따른 크리프 특성 연구(Yang et al, 1999), 변형률 속도에 따른 크리프 특성 연구 등을 포함 해서 근래에는 일축, 삼축, 정수압 하에서의 다단계 시험에 의한 크리프 특성 연구(Maranini and Brignoli, 1999; Kaiser and Morgenstern, 1981)등 다양하고 복합적인 방법으로 대상 암석의 크리프 특성을 규명하기 위한 연구가 수행되어져 왔다. 하지만 암석은 불균질, 비등방성이며 그 생성 메카니즘과 광물조성, 입자 크기등에 따라

*Corresponding author: gyokim@knu.ac.kr

역학적 변형성이 다양하고 복잡하기 때문에, 이들의 역학적 거동특성을 일률적으로 정의하기는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 중생대 백악기 하양층군 중 대구지역에 분포하는 함안층 적색세일에 대하여 기본적인 물성 및 외력에 대한 단기간의 역학적 거동특성과 함께 단일단계 재하시험(Single stage loading test)과 다단계 재하시험(Multi stage loading test)을 수행하여 각 하중 단계에서 지속되어야 할 임계시간을 먼저 알아보고, 두가지 방법의 실험에 의한 크리프 상수값의 차이를 비교하였으며, 재하하중과 크리프 상수와의 관계, 크리프 파괴가 발생하지 않는 최대하중(크리프 한계)과 각 하중수준에서의 파괴예상 시간을 알아보고자 하였다.

기본물성 및 시험방법

대상 시료는 대구지역에 분포하는 하양층군 함안층 내 적색 세일이며 그 물성값은 다음과 같다(Table 1).

정태중(1996, a)은 대구지역에 분포하는 백악기 세일에 대한 물성실험에서 공극률은 흑색 세일이 11.5%, 회색 세일이 19.5%로 본 연구에서보다 큰 값을 가진다고 보고하였고, John Cogan(1976)에 의한 연구에서도 세일의 공극율은 11~13%의 값을 가진다고 보고되어 이들과 비교하여 본 실험의 시료는 다소 낮은 공극율을, 그리고 비중과 밀도는 일반적인 세일의 값을 가짐을 알 수 있다. 일축압축시험을 위한 시료는 층리면에 수직인 직경 30 mm의 코어를 채취하여 직경 : 길이 = 1 : 2가 되게 원

Table 1. Physical properties of the sample.

Sample No.	G_s	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	W_a (%)
1	2.707	2.578	0.05	4.762	1.849
2	2.712	2.601	0.043	4.086	1.575
3	2.711	2.592	0.046	4.379	1.687
Average	2.71	2.59	0.046	4.409	1.704

Table 2. Mechanical properties of the red shale by uniaxial compression test.

Sample No	Length (mm)	Diameter (mm)	σ (Kgf/cm ²)	$\epsilon(\times 10^6)$		E (10 ⁵ Kgf/cm ²)	ν
				Axial	Lateral		
1	58.3	30.0	1056	2001	163	2.59	0.081
2	62.3	30.0	760	650	68	5.81	0.104
3	59.7	30.0	883	2204	49	1.95	0.022
4	59.8	30.0	892	1640	124	2.68	0.076
5	59.8	30.0	892	2512	738	1.85	0.295
Average			897			2.16	0.131

주형 공시체를 제작하여 105°C로 72시간 이상 완전 건조시킨 후 시험을 실시하였다(Table 2).

탄성계수는 50% 할선탄성계수를 사용하였으며 5개 시료의 실험에 의한 일축압축강도의 평균값은 897 Kgf/cm²으로 정태중(1996, b)에 의한 흑색세일(500~600 Kgf/cm²)과 회색세일 (200~500 Kgf/cm²)의 강도보다 큰 값을 가지는데 이는 물성시험에서 본 연구에 사용된 시료가 상대적으로 낮은 공극율을 가지는 것과 잘 부합하는 결과이다. 포아송비는 0.131로 일반적인 세일의 값을 가진다.

크리프 시험에 사용된 시험기기는 추에 의한 하중의 약 20배 하중이 시료에 가해지도록 제작되었으며(Fig. 1) 지지대가 힌지(hinge)로부터 회전되면서 발생하는 미소한 각에 의한 하중의 불균등 분포 현상을 방지하기 위하여 시료 상부에 구형대(spherical seat)를 설치하였다. 이 구형대는 반구형으로 절삭된 암수가 맞물려 있으며 윤활유로 움직임을 부드럽게 하여 상부가 약간 회전되더라도 하부에 수직으로 재하가 되도록 해 준다. 크리프시험에 사용된 시료 또한 직경 30 mm, 길이 60 mm로 층리면에 수직하게 채취하였으며 변형률은 A/D 변환기를 통하여 약 5초 간격으로 컴퓨터에 기록되도록 하였고 시료의 양측에 두 개의 종방향 변형률을 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

또한 시료의 포화도에 따른 실험값의 오차를 피하기 위하여 105°C에서 48시간 건조시킨 후 시험을 수행하였다(Maranini and Brignoli, 1999).

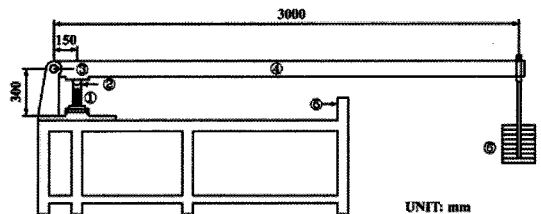


Fig. 1. Schematic diagram of creep test equipment (① Rock sample, ② Spherical seat, ③ Hinge, ④ Beam, ⑤ Protected bar, ⑥ Weight).

시험결과

순간변형률

순간변형률 값의 결정은 크리프 시험 초기의 시간-변형률 그래프에서 탄성적 영역과 비탄성적 영역, 양측의 점근선으로부터 만나는 지점의 변형률을 순간변형률로 정하였으며 재하속도의 차이로 인한 과도한 순간변형률을 제거하고자 비탄성 영역의 진동하는 데이터 중 제일 하한을 기준으로 점근선을 그어 정하였다(Fig. 2). 이후 각

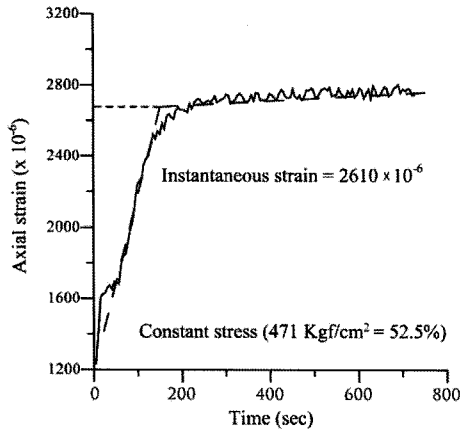


Fig. 2. Determining method of instantaneous strain.

Table 3. Instantaneous strains of each loads.

Sample	Load (%)	a ($\times 10^{-6}$)
A	33.6%	2958
B	42.9%	1860
C	52.5%	2610
D	65.2%	3415
E	77.8%	3220
F	33.6%	2530
	42.9%	3265
	52.5%	4490
G	65.2%	5280
	77.8%	6253
	33.6%	3160
H	42.9%	3985
	52.5%	4845
	65.2%	5750
	77.8%	6985
	33.6%	1940
H	42.9%	2590
	52.5%	3170
	77.8%	5460
	90.4%	6400

시료별 시간-변형률 곡선은 이 순간변형률값(Table 3)이 획득된 시간을 $t=0$ 으로 하여 나타내었다.

시간-변형률 관계

일축압축강도값의 33.6%, 42.9%, 52.5%, 65.2%, 77.8% 수준의 하중 재하로 단일단계 크리프 시험을 수행하여 시간-변형률 그래프를 획득하였다(Fig. 3). 또한 3회에 걸쳐 다단계(33.6%, 42.9%, 52.5%, 65.2%, 77.8% 하중 단계)크리프 시험을 수행하여 시간-변형률 그래프를 획득하였다(Fig. 4).

고찰

해석방법

본 연구의 실험결과는 시간의 경과에 따른 변형률의 증가 혹은 일정값의 유지라는 기존 연구들과 달리 변형률이 증가와 감소를 반복하며 전체적인 상승 곡선을 나타낸다.

이러한 결과는 모든 실험에서 동일하게 관찰되었으며 이는 변형률 속도로서 1, 2차 크리프를 구분하고 각각의 크리프 상수를 구하는 방법을 적용하기 힘들다. 따라서 본 연구에 적용된 해석방법은 Griggs(1936)가 제시한 수식 $\epsilon_t = a + b \log t + ct$ 을 적용하여 크리프 상수를 구하되, 전체 데이터를 회귀분석하여 각 크리프 상수값을 도출, c의 값이 양의 값을 가지는 경우 2차 크리프 거동을 한 것으로 판단하고 c의 값이 음의 값을 가지는 경우에는 순간변형률 및 1차 크리프 거동만을 하는 것으로 해석하였다. 또한 2차 크리프 거동을 하는 경우 1, 2차 크리프의 천이시점은 수식 $\epsilon_t = a + b \log t + ct$ 내의 2항과 3항의 미분값이 같아지는 시간 즉, $d/dt(b \cdot \log t) = d/dt(ct)$ 되는 시간을 구하여 그 시간을 T_t (Transition time)라고 하고, T_t 이전을 1차 크리프 구간, 그 이후를 2차 크리프 구간으로 구분하였다(Fig. 5). 여기에 사용된 데이터 회귀분석 프로그램은 CurveExpert 1.2 이며 이 해석방법에 의해 구하여진 크리프 상수값이 각각의 시간에 대한 실제 데이터 값과의 검증시 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

단일단계 크리프 시험

단일단계 크리프 시험결과를 회귀분석하여 각각의 크리프 상수값을 구하였다(Table 4).

단, 여기의 상수값 a는 회귀분석 결과 얻어진 곡선에서의 순간변형률로 실제 측정된 순간변형률(Table 3)보다 큰 값을 가진다. 따라서 크리프 상수 b와 c는 회귀분석

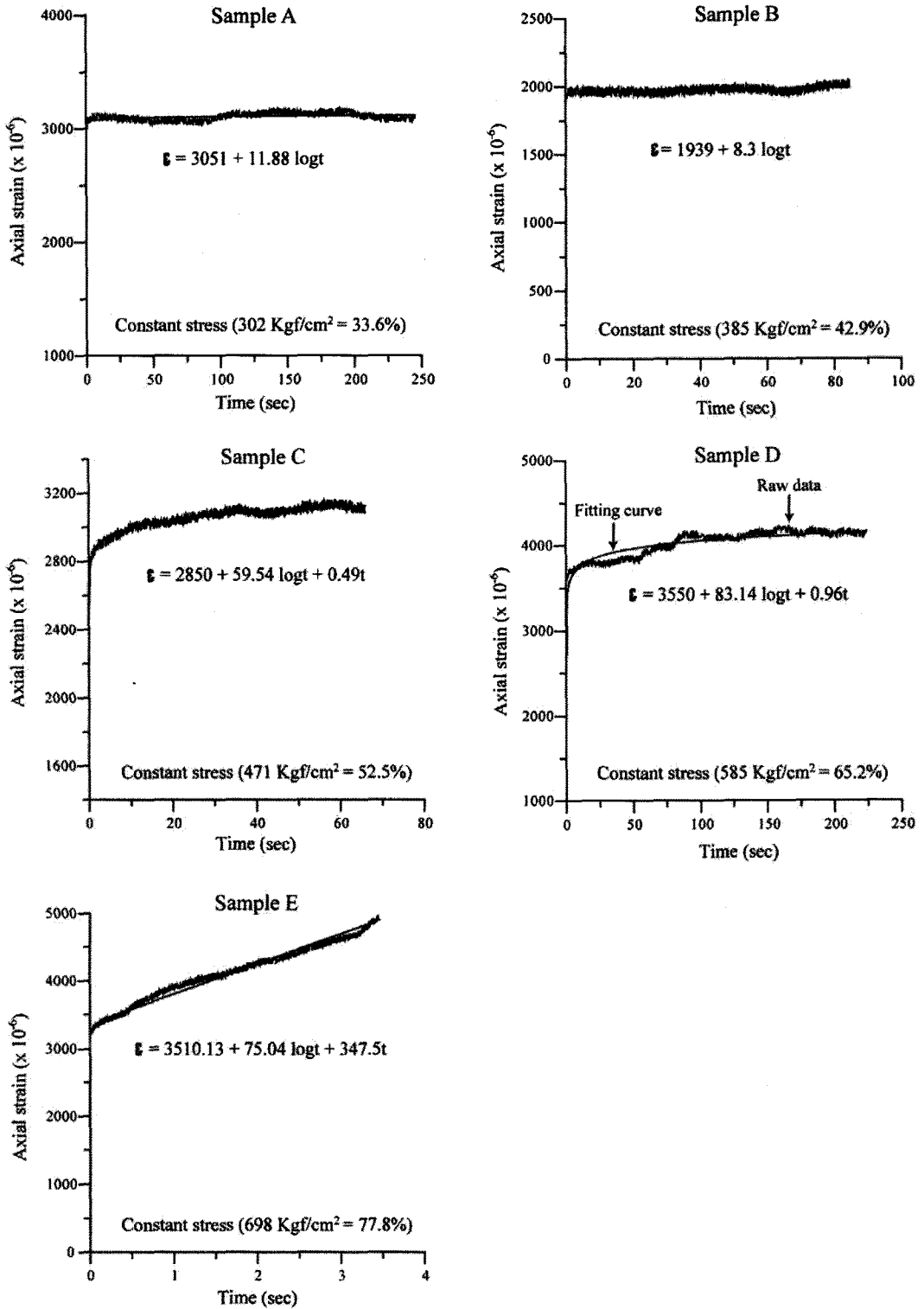


Fig. 3. Strain-time curves of single stage loading test.

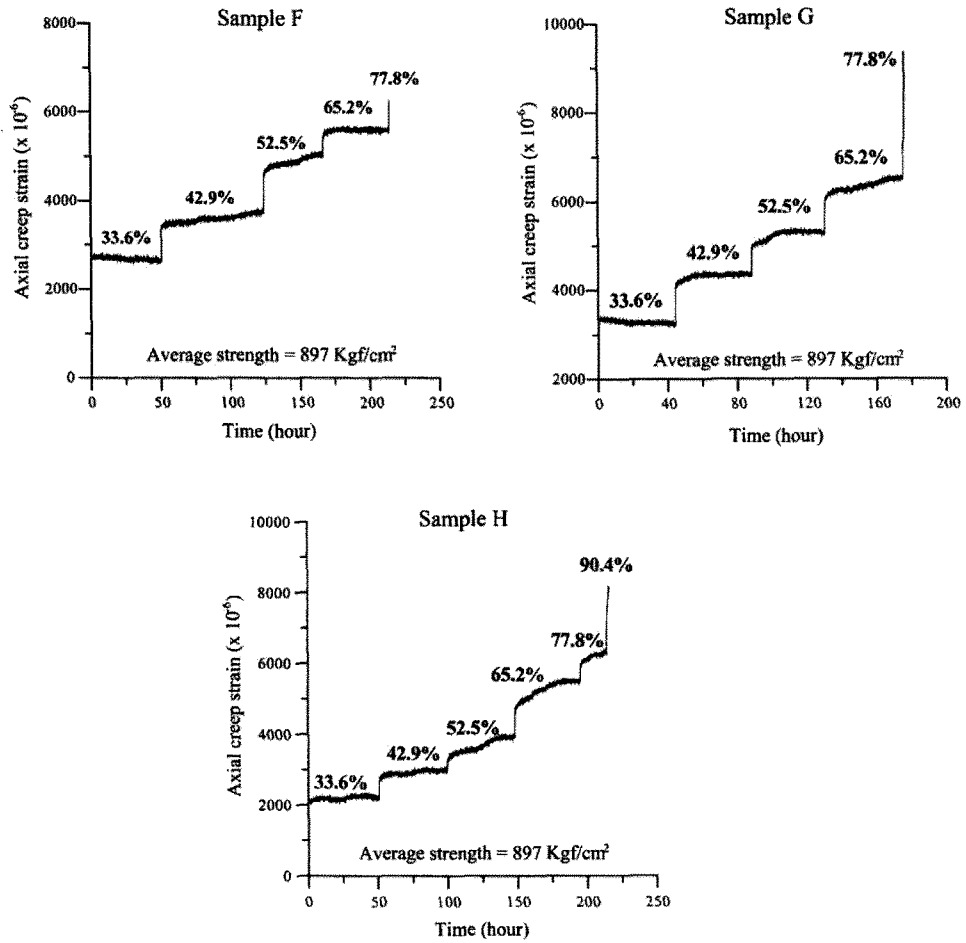


Fig. 4. Strain-time curves of multi stage loading test.

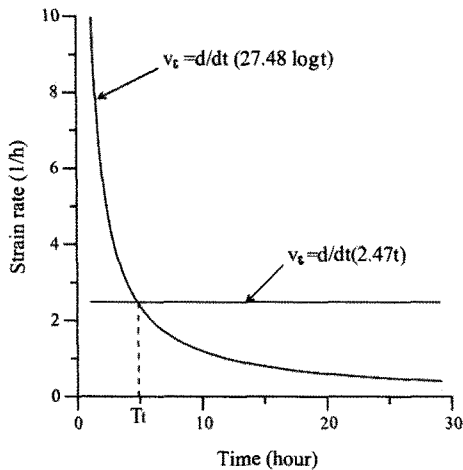


Fig. 5. Determinating method of transition time.

결과 얻어진 값(Table 4)을 사용하고 순간변형률 a 는 실제 측정된 값(Table 3)을 사용하였다.

실험결과 본 시료의 경우 33.6%와 42.9%의 재하하중에서는 순간변형률과 짧은 시간 동안의 1차 크리프를 보인 후 거의 일정한 값을 보이며 2차 크리프로의 전이는 발생하지 않으며, 재하하중 52.5%, 65.2%, 77.8%에서는 순간변형률 및 1, 2차 크리프가 모두 발생한다.

실험결과에서 재하하중과 크리프 상수와의 관계를 보면, 순간변형률 a 와 2차 크리프 상수 c 는 재하하중과의 상관성을 찾기가 힘들다. 1차 크리프 상수 b 와 재하하중은 어느 정도의 상관성을 보이기는 하나, 다른 상수 값들을 볼 때 이 또한 오직 재하하중의 차이에 따른 것이라고 판단하기는 힘들다. 하지만 시료 C, D, E를 통해 알 수 있는 것은 2차 크리프를 발생시키는 하중에서는 최대 2

Table 4. Creep constants by the single stage loading tests.

Sample	Load (%)	a ($\times 10^{-6}$)	b ($\times 10^{-6}$)	c ($\times 10^{-6}$)
A	33.6%	3051	11.88	-
B	42.9%	1939	8.3	-
C	52.5%	2580	59.54	0.49
D	65.2%	3550	83.14	0.96
E	77.8%	3510	75.04	347.5

$\epsilon_t = a + b \log t + ct$ (Griggs, 1936)

일내에 2차 크리프가 발생하며, 2차 크리프가 발생하지 않는 하중에서는(시료 A, B) 최대 12일이 경과하여도 2차 크리프는 발생하지 않는다는 것이다.

다단계 크리프 시험

다단계 크리프 시험은 F, G, H 세 개의 시료에 대해

수행되었으며 F와 G 시료는 총 5단계 하중수준에 대하여, 그리고 H 시료는 총 6단계 하중수준에 대하여 연속적으로 수행되어졌다.

F시료 : 각 단계별 재하하중에 의한 시간-변형률 관계 (Fig. 6)를 보면 재하하중 33.6%와 65.2%에서는 순간변형률 및 1차 크리프 거동을 보이다가 곧 변형률이 감소하는 현상을 보여 변형률 감소가 일어나지 않는 시간까지만 1차 크리프 구간으로 해석하여 1차 크리프 상수를 도출하였다.

반면 재하하중 42.9%와 52.5%에 대한 결과는 일반적인 크리프 곡선을 잘 따르며 Griggs(1936)가 제시한 수식과도 높은 상관관계를 보인다. 재하하중 77.8%에 대한 결과는 순간변형률 값으로의 진행과정에서 파괴되었다.

G시료 : 각 단계별 시간-변형률 관계(Fig. 7)는 회귀분석 결과 재하하중 33.6%, 42.9%, 52.5%에서는 2차 크

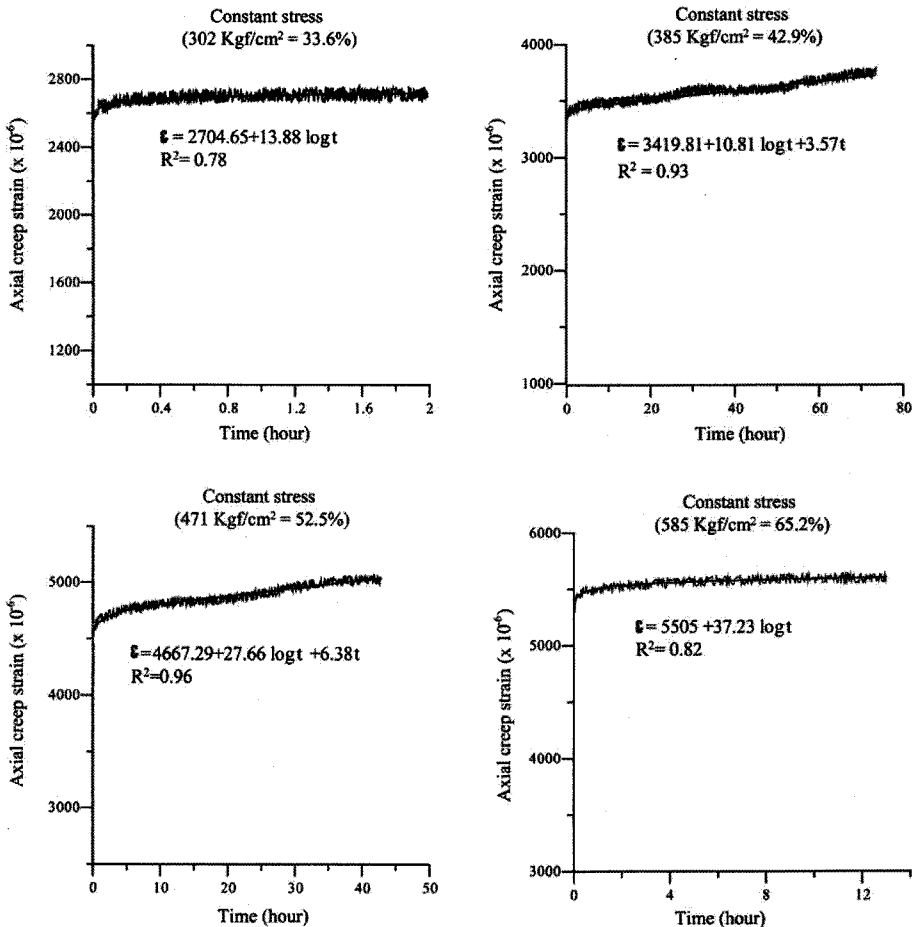


Fig. 6. Strain-time curves under multi stage loading test of sample F.

리프로의 전이가 발생하지 않고 순간변형률 및 1차 크리프만을 보인 후 곧 안정 영역으로 수렴한다. F 시료가 42.9% 재하하중부터 뚜렷한 2차 크리프 거동을 보인것과 달리 G 시료는 65.2% 재하하중부터 2차 크리프 현상이

뚜렷이 나타났으며 재하하중 77.8%에서는 3차 크리프 거동 또한 뚜렷이 관찰되었다.

H시료 : 각 단계별 시간-변형률 관계(Fig. 8)를 보면 재하하중 33.6%부터 2차 크리프가 관측되며 90.4% 재

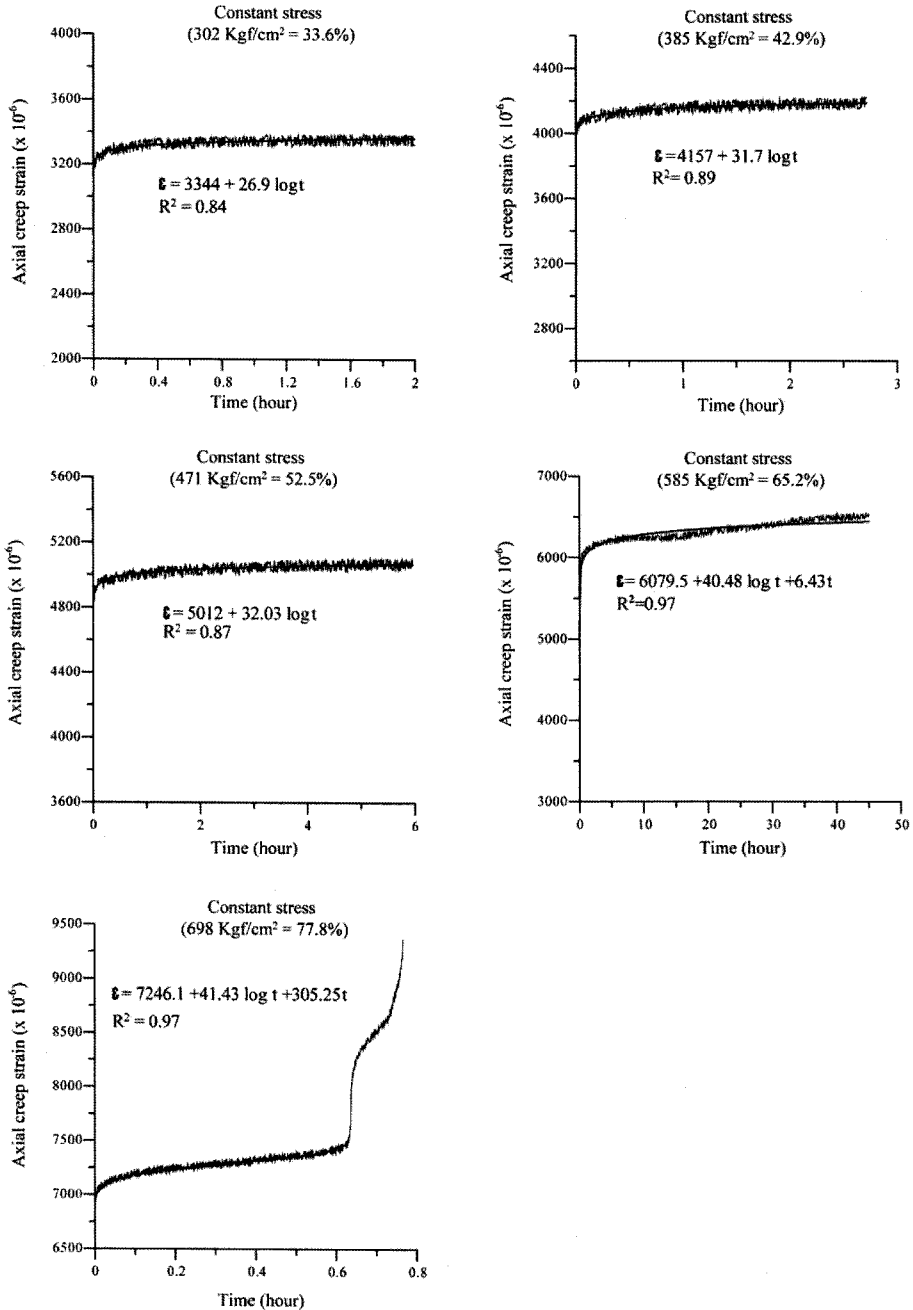


Fig. 7. Strain-time curves under multi stage loading test of sample G.

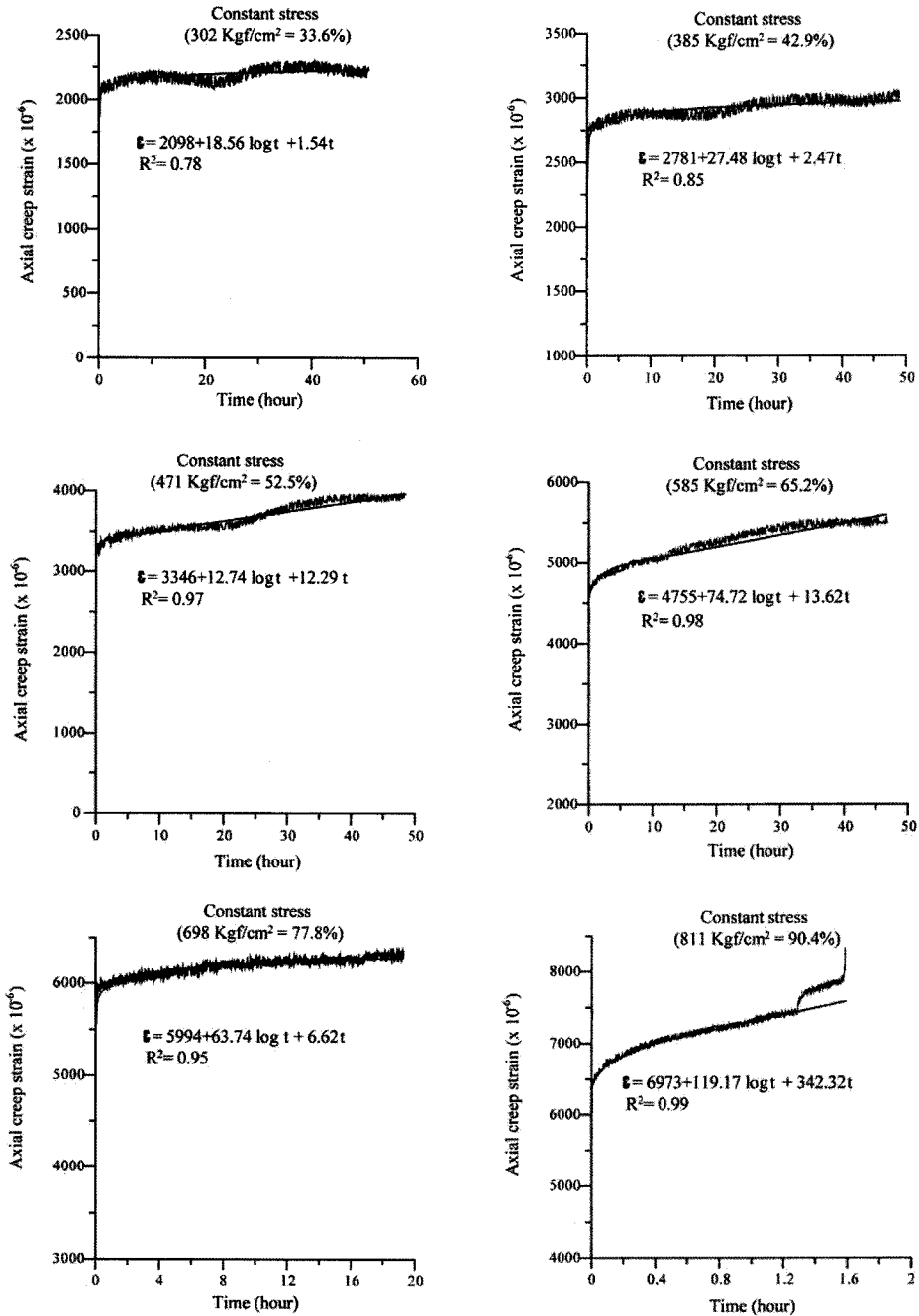


Fig. 8. Strain-time curves under multi stage loading test of sample H.

하하중에서는 뚜렷한 3차 크리프 또한 관찰된다.

획득된 데이터를 회귀분석하여 다단계 시료의 각 단계별 크리프 상수값을 구하였으며(Table 5) 이를 바탕으로 재하하중과 크리프 상수값의 상관성을 알아보았다(Fig. 9).

크리프 상수 a와 하중과의 관계(Fig. 9(A))에서 순간 변형률 a는 t=0 일때의 값(Table 3)을 사용하였으며, 크리프 상수 a는 재하하중에 비례하여 증가하며 그 상관도 또한 높게 나타난다.

Table 5. Creep constants by multi stage loading test.

Sample	Load (%)	a ($\times 10^{-6}$)	b ($\times 10^{-6}$)	c ($\times 10^{-6}$)
F	33.6	2705	13.88	-
	42.9	3420	10.81	3.57
	52.5	4667	27.66	6.38
	65.2	5505	37.23	-
	77.8	6253	-	-
G	33.6	3344	26.9	-
	42.9	4157	31.7	-
	52.5	5012	32.03	-
	65.2	6079	40.48	6.43
	77.8	7246	41.43	305.23
H	33.6	2098	18.56	1.54
	42.9	2781	27.48	2.47
	52.5	3346	12.74	12.29
	65.2	4755	74.72	13.62
	77.8	5994	63.74	6.62
	90.4	6973	119.17	342.32

$$\epsilon_t = a + b \log t + c t \text{ (Griggs, 1936)}$$

다단계샘플 F

$$: a(\times 10^{-6}) = 84.89\sigma_{\%} - 254.3 \quad (R^2 = 0.99)$$

다단계샘플 G

$$: a(\times 10^{-6}) = 84.49\sigma_{\%} + 343.1 \quad (R^2 = 0.99)$$

다단계샘플 H

$$: a(\times 10^{-6}) = 80.53\sigma_{\%} - 854.1 \quad (R^2 = 0.96)$$

크리프 상수 b와 하중과의 관계(Fig. 9(B))를 바탕으로 도출된 상관식은 다음과 같으며 크리프 상수 b는 재하 하중에 비례하여 증가하며 그 상관도 또한 높게 나타난다.

다단계샘플 F

$$: b(\times 10^{-6}) = 0.84\sigma_{\%} - 18.39 \quad (R^2 = 0.85)$$

다단계샘플 G

$$: b(\times 10^{-6}) = 0.34\sigma_{\%} + 15.92 \quad (R^2 = 0.93)$$

다단계샘플 H

$$: b(\times 10^{-6}) = 1.71\sigma_{\%} - 50.49 \quad (R^2 = 0.81)$$

크리프 상수 c와 하중과의 관계는 모든 단계에서 2차 크리프가 관찰된 H시료에 대해서만 고려하였으며 시료가

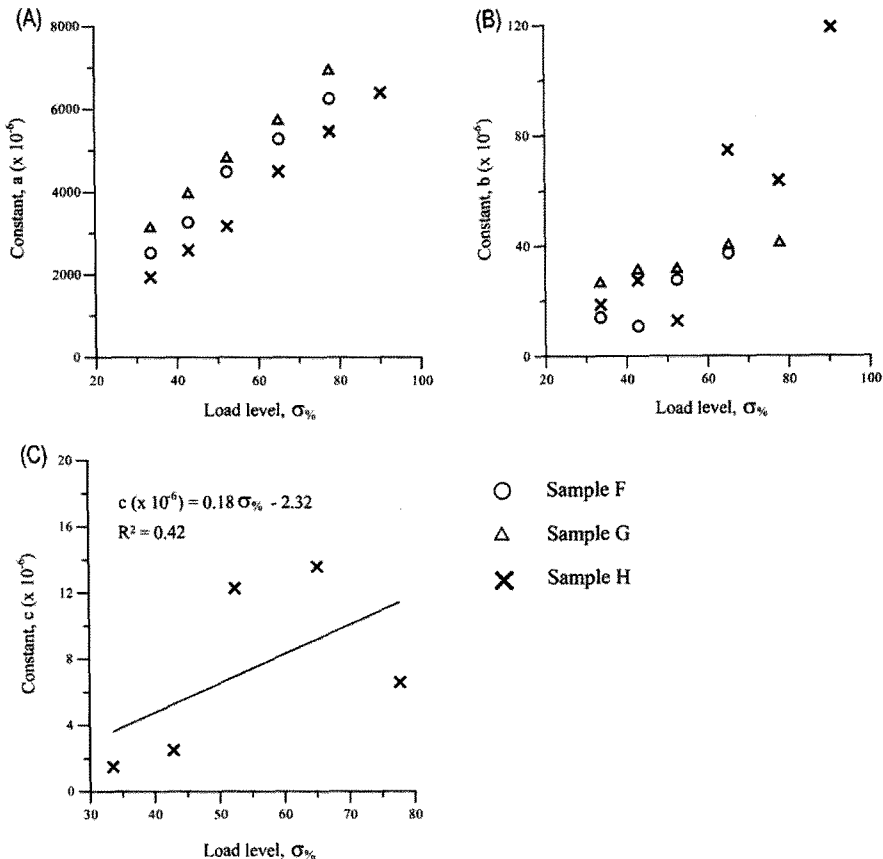


Fig. 9. Relationship between loads and (A) creep constant a, (B) creep constant b and (C) creep constant c.

파괴된 마지막 단계에서는 3×10^{-4} 이상의 매우 높은 값을 가져 다른 단계에서의 값과 매우 큰 차이가 있기 때문에 마지막 단계의 2차 상수값은 제외하고 상관식을 구하였다(Fig. 9(C)).

다단계샘플 H

$$: c(\times 10^{-6}) = 0.18\sigma_{\%} - 2.32 \quad (R^2 = 0.42)$$

1, 2차 크리프 전이

해석방법에 있어서 본 연구에서는 전체 데이터를 회귀분석하여 $\epsilon_t = a + b \log t + ct$ 식의 각 상수를 구한 다음 1차항과 2차항의 미분값이 같아지는 시간 즉, $d/dt(b \log t) = d/dt(ct)$ 되는 시간(Tt : Transition time)을 구하여 Tt 이전을 1차 크리프 구간, 그 이후를 2차 크리프 구간으로 구분하였다(Fig. 5). 이러한 방법으로 각 시료별 재하하중에 따른 1차와 2차 크리프의 전이시간을 구하였다(Table 6).

파괴 예상 시간

본 연구에서는 하나의 시료에 대해 각기 다른 하중수준에 대하여 다단계 크리프 실험을 실시하여, 각 시료의 마지막 단계에서 시료가 파괴될 때의 최대변형률과 회귀분석에 의해 얻어진 크리프 상수값을 가지고 각 하중 단계가 지속될 경우 시료의 파괴 예상시간(Ft : Failure time)을 구하였다(Table 7).

다단계 시료 중 전 하중 단계에 걸쳐 2차 크리프가 발생한 H시료의 경우 재하하중과 파괴예상시간(Ft)과의 관계(Fig. 10)는 지수함수로써 표현될 수 있으며 그 상관식은 아래와 같다.

$$Ft = 157112e^{-0.1025\sigma_{\%}} \quad (R^2 = 0.81)$$

Table 6. Transition time between primary creep and secondary creep.

Sample	Load (%)	a ($\times 10^{-6}$)	b ($\times 10^{-6}$)	Tt (h)
F	42.9	10.81	3.57	1.32
	52.5	27.66	6.38	1.89
G	65.2	40.48	6.43	2.74
	77.8	41.43	305.23	0.06
	33.6	18.56	1.54	5.24
H	42.9	27.48	2.47	4.84
	52.5	12.74	12.29	0.45
	65.2	74.72	13.62	2.39
	77.8	63.74	6.62	4.19
	90.4	119.17	342.32	0.15

$$Tt : d/dt(b \log t) = d/dt(ct)$$

Table 7. Failure time under each loads of multi stage loading test.

Sample	Max.ε ($\times 10^{-6}$)	Load (%)	a ($\times 10^{-6}$)	b ($\times 10^{-6}$)	c ($\times 10^{-6}$)	Ft (h)
F	6,253	42.9	3420	10.81	3.57	784.9
		52.5	4667	27.66	6.38	238.3
G	9,366	65.2	6079	40.48	6.43	494.3
		77.8	7246	41.43	305.23	6.9
		33.6	2098	18.56	1.54	4001.4
H	8,327	42.9	2781	27.48	2.47	2208.2
		52.5	3346	12.74	12.29	402.6
		65.2	4755	74.72	13.62	249.1
		77.8	5994	63.74	6.62	328.2
		90.4	6973	119.17	342.32	3.8

$$\epsilon_t = a + b \log t + ct$$

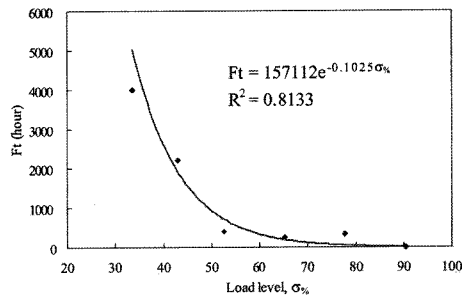


Fig. 10. Relationship between percent load and failure time of sample H.

결 론

대구 지역 세일에 대하여 단기 및 장기간의 하중에 따른 변형거동을 알아보기 위하여 단일단계와 다단계 크리프 시험을 수행하였으며, 이를 바탕으로 본 시료에 적합한 크리프 상수를 도출하고자 하였다.

1. 시험에 사용된 세일은 비중 2.71, 건조단위중량 2.59 g/cm³, 공극비 0.046, 공극률 4.41%, 흡수율 1.7의 기본 물성값과 일축압축강도 897 Kg/cm², 탄성계수 2.16 $\times 10^5$ kgf/cm², 포아송비 0.131의 역학적 특성을 가진다.

2. 다단계 크리프 시험결과 크리프 상수 a와 b는 하중의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며 2차 크리프 상수 c는 2차 크리프가 발생하는 재하 하중에서 더욱 세분화된 다단계 시험을 해야 정확한 재하하중과의 상관식을 도출할 수 있다.

3. 시험결과와 해석시에는 회귀분석결과 얻어진 $\epsilon_t = a + b \log t + ct$ 식에서 1차 크리프항과 2차 크리프항의

미분값이 같아지는 시간 즉, $d/dt(b \cdot \log t) = d/dt(c \cdot t)$ 되는 시간을 전이시간(T_t : Transition time)이라 하고 이 시간을 기준으로 T_t 이전 구간을 1차 크리프 구간, T_t 이후를 2차 크리프 구간으로 구분할 수 있다.

4. 다단계 크리프 시험에 의해 구하여진 크리프 상수와 시료파괴시의 최대변형률을 이용하여 각 단계의 시료파괴 예상시간(F_t)을 결정할 수 있다. 또한 재하하중과 파괴 예상시간(F_t)과의 관계는 지수함수로 표현 가능하며 그 식은 아래와 같다.

$$F_t = 157112e^{-0.1025\sigma_{\max}} (R^2 = 0.81)$$

5. 세 개의 시료에 대한 다단계 크리프 시험 결과 크리프 한계는 시료마다 다소 차이가 있었으며 이는 동일한 블록내에서 채취된 시료라 할지라도 그 역학적 변형성이 다를 수 있음을 단적으로 보여준다. 하지만 다단계 크리프 시험은 재하하중과 크리프 상수와의 관계, 시료 파괴 예상시간 등의 자료를 획득할 수 있는 유용한 실험방법으로 판단된다.

참고문헌

- 장명환, 1996, 화강암의 열역학적 거동에 대한 실험 및 수치해석적 연구, 전남대학교 자원공학과 박사학위논문.
- 정태중, 1996a, 대구 지역에 분포하는 백악기 셰일의 역학적 특성, 한국지구과학회지, 17(6), 489-496.
- 정태중, 1996b, 백악기 사암과 셰일에 대한 포아송비의 변화, 지질공학회지, 6(2), 103-110.
- Chunhe Yang, J. J. K. Daemen, and J.-H. Yin, 1999, Experimental investigation of creep behavior of salt rock, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci* Vol 36, 233-242.
- E. Maranini and M. Brignoli, 1999, Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.* 36, 127-138.
- G. N. Boukharov, M. W. Chanda, and N. G. Boukharov, 1995, The three processes of brittle crystalline rock creep, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol 32. No 4, 325-335.
- Griggs, D. T., 1936, Deformation of rocks under high confining pressure, *J. Geol.*, 44, 541-577.
- John cogan, 1976, Triaxial creep tests of ophongong limestone and ophir shale, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol. 13, 1-10.
- John F. Schatz, Krishna P. Sinha, 1981, Creep deformation of oil shale at elevated temperatures, *Proceedings of the Int. Symposium on Weak Rock.* Tokyo, 125-129.
- P. Weidinger, A. Hampel, W. Blum, and U. Hunsche, 1997, Creep behaviour of natural rock salt and its description with the composite model, *Materials Science and Engineering A234-236*, 646-648.

2009년 4월 2일 원고접수, 2009년 6월 15일 게재승인

조래훈

(주)삼안 지질부

427-707 경기도 과천시 별양동 1-20

Tel: 031-440-8256

Fax: 031-440-8261

E-mail: rhcho@samaneng.com

김교원

경북대학교 지질학과

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5357

Fax: 053-950-5362

E-mail: gyokim@knu.ac.kr