

지반침하 거동특성 분석을 위한 암반의 부피팽창률에 관한 연구

이희중 (강원대학교 지구·환경공학부 석사과정)
정용복 (한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원)
최성웅 (강원대학교 지구·환경공학부 교수)

1. 서론

1990년 이후 석탄산업합리화 조치에 따라 대다수의 광산이 폐광되었으며, 폐광으로 인해 여러 지역에서 지반침하 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 지금까지의 지반침하에 관한 연구는 지반침하가 발생한 지역이나 민원이 발생한 지역에 대해 사례별 분석을 통하여 수동적으로 이루어 졌지만, 최근 최성웅 외(2005)는 지반침하 메카니즘 분석을 위한 연구를 수행하면서 FLAC, UDEC, PFC 등의 수치해석을 통하여 지반침하 영향 요소들을 분석하고, 그동안의 사례와 퍼지기법을 이용하여 지반침하 예측기법을 개발하고 이를 적용한 바 있다. 지반침하 발생 이후 보강도 시급한 문제지만, 지반침하를 능동적으로 사전에 예측하여 경제적·사회적 손실을 최소화하는 것 또한 중요하다.

그동안의 연구를 통하여 채굴적의 심도, 채굴적의 폭, 채굴적의 높이, 측압계수 등 여러 가지 요인들이 분석되었고, 응력-아치체적팽창이론(Piggott & Eynon, 1997), 한계평형이론(Brady & Brown, 1985), 확률에 의한 침하예측(Karfakis, 1993) 등 지반침하 예측에 대하여 이론적으로 설명된 바 있지만 지반침하 발생이후의 지반 거동 즉, 지반침하의 영향 범위와 침하량 등에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 위의 지반침하 거동특성 중에서 침하량에 영향을 미치는 중요한 인자는 암반의 부피팽창률이며, 이는 지표침하량이 채굴고보다 적은 이유를 설명하는데 근거를 제공한다. 암반의 부피팽창률에 대한 측정법은 국·내외적으로 아직까지 규정된 바 없으며, 그동안 현장에서 측정한 화약발파에 의한 암반의 부피팽창률이 적용되어 왔다. 하지만 각각에서 제시된 값들은 그 분류마다 차이를 보이며, 이것을 그대로 현장에 적용시켜 지반침하를 분석하기에는 다소 무리가 있다고 본다.

따라서 본 연구에서는 지반침하 거동특성 분석을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 일정 응력 하에서 암종별·입도별 부피팽창률에 대한 실내실험을 실시하였다.

2. 연구배경

함몰형 침하는 천정부의 파괴가 일어난 후 붕괴가 점차 상부로 진행되다가 자립이 가능한 지층을 만나 중단될 수도 있고 파쇄된 암석들의 체적팽창에 의해 중단되기도 하지만, 침하가 점차 상부로 진행된다면 그림 1과 같은 형태로 침하가 발생할 것이다. 이러한 침하 과정 중에서 각 지층의 순차적인 붕괴로 인해 쌓이는 파쇄암들로 인해 파쇄입자들 사이에 공

극이 형성된다. 또한 형성된 공극은 상부에 쌓이는 파쇄암들의 자중에 의한 응력으로 인해 sliding 현상과 재파쇄 현상이 발생하여 채워지기도 할 것이다. 만약 파쇄암의 강도가 강하다면, 재파쇄와 sliding 현상이 적게 발생할 것이고, 그 자체 지지력이 생겨 지표까지 침하가 전이되지 않을 수도 있으며, 설사 지표까지 침하가 전이 된다하더라도 침하 정도가 낮을 것이다. 따라서 파쇄암의 부피 팽창률을 산정할 때, 상부 또는 측면에 작용하는 응력을 고려해야 한다.

암종별로 부피 팽창률을 본다면, 같은 파쇄도의 조건으로 쌓이고 같은 응력이 상부에서 존재할 때 그 차이를 볼 수 있겠지만, 실제로 채굴적 상부 지반의 붕괴는 불연속면, 채굴적의 심도, 채굴적의 높이와 폭, 지하수 조건 등 여러 가지 요인들로 인해 발생 양상이 달라진다. 또한 파쇄의 정도도 달라지기 때문에 각각의 요인들에 대하여 현장 조건에 맞도록 분석하여 부피팽창률을 고려해야 할 것이다.

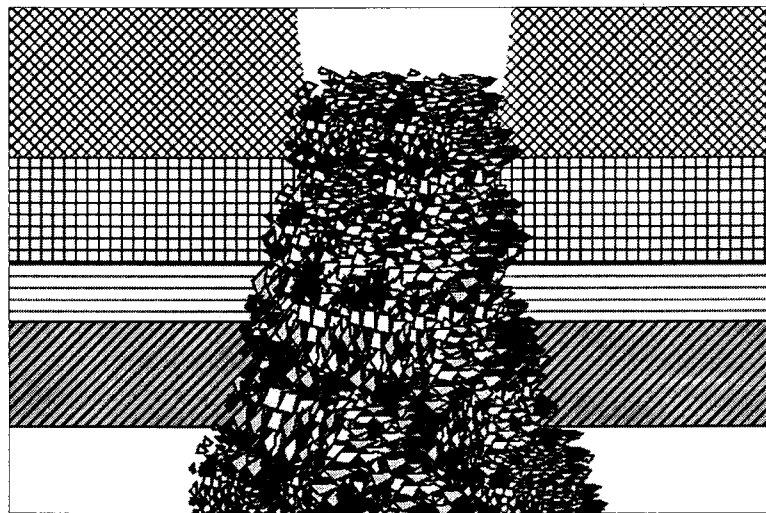
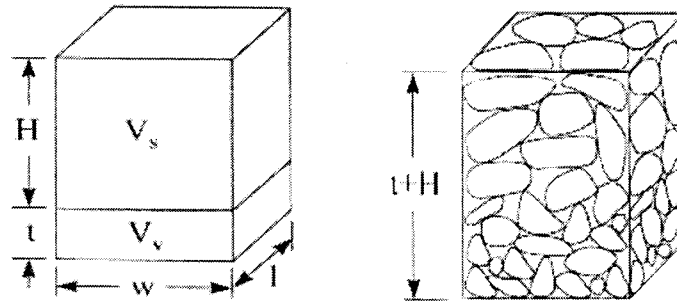


그림 1. 함몰형 침하 모식도 (Karfakis, 1993)

본 연구에서는 침하 하부지역(채굴적)이 아닌 어느 정도 침하가 진행되었을 때, 즉 파쇄암들이 쌓인 중간부분에서 상재 하중에 의한 파쇄암 입자들 간의 변위 양상을 분석하기 위한 실험을 하였다. 실험에 사용한 시료는 Gneiss, Limestone, Shale 이며, 이 시료들을 파쇄한 후 입도에 따라 쌓는 순서를 입자가 작은 순서(A set), 입자가 큰 순서(B set), 입자 혼합(C set) 세 가지로 분류하여 실내 실험을 하였다.

3. 부피팽창률 이론

그림 2는 응력 아치 효과를 배제한 부피팽창률 모델로서, 채굴고와 붕락고의 관계로부터 간단하게 부피팽창률을 정의 할 수 있다. 그림 2는 직각기둥 모델이지만, 붕락대의 이상적인 형태에 따라 붕락대의 형상에 따른 채굴고와 붕락고의 관계를 나타낼 수 있다. 하지만 채굴고와 붕락고를 알 수 있다 하더라도, 지하 심부의 붕락대의 형상을 조사하기 어려울 뿐만 아니라 암종별, 파쇄입자의 형상 등의 조건에 따라 달라 질수 있다.



(a) before

(b) after

그림 2. 부피팽창률 모델

(H : 봉락고, t : 채굴고 , w : 채굴적의 폭, l : 채굴적의 길이)

$$B = \frac{V_f - V_i}{V_i} = \frac{(V_s + V_v) - V_s}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

여기서, B 는 부피팽창률, V_f 는 최종붕괴 후 체적, V_i 는 붕괴 전 체적, V_v 는 채굴공동의 체적 V_s 는 붕괴될 상반의 체적이다.

위 모델은 직각기둥이지만 본 연구에서는 등하중을 가하기 위하여, 원기둥 형태의 실험틀을 제작하였다. 원기둥의 형태 또한 직각기둥 형태와 같은 식 1을 적용하여 부피팽창률을 산정할 수 있다.

4. 부피팽창률 실내 실험

4.1 실험틀 제작

파쇄한 Gneiss, Limestone, Shale 시료를 쌓고 일정한 하중을 가하여 실험을 하기 위해 그림 3과 같이 cylinder형 하부 실험틀(내경 ϕ 115.5cm, H 123cm)과 원기둥형 상부 실험틀(ϕ 11.4cm, H 10cm)을 제작하였다. 하부 실험틀의 총 부피는 1288.72 cm^3 이며 높이 눈금 0.1 cm 간의 부피는 10.48 cm^3 이다(표 1).

하중을 가하기 전, 실험틀에 각 set 별로 쌓았을 때의 초기부피를 측정하기 위해 실험틀에 눈금을 표기하였다. 초기부피 측정은 하부 실험틀의 높이와 상부 실험틀이 하부 실험틀에 들어간 높이의 차를 이용하였다(그림 2. (c)).

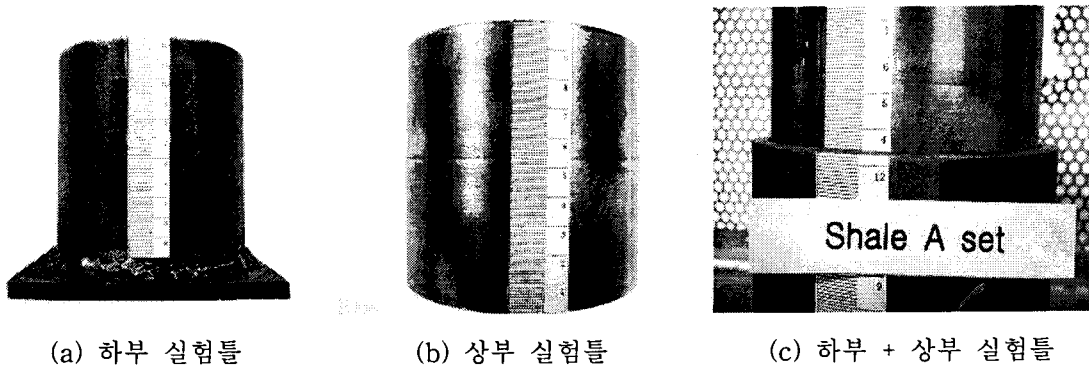


그림 3. 하부 실험틀과 상부 실험틀

표 1. 하부 실험틀 높이에 따른 부피

High(cm)	Volume(cm ³)	High(cm)	Volume(cm ³)	High(cm)	Volume(cm ³)
12.30	1288.721	10.70	1121.083	9.10	953.444
12.20	1278.244	10.60	1110.605	9.00	942.967
12.10	1267.766	10.50	1100.128	8.90	932.489
12.00	1257.289	10.40	1089.650	8.80	922.012
11.90	1246.812	10.30	1079.173	8.70	911.534
11.80	1236.334	10.20	1068.696	8.60	901.057
11.70	1225.857	10.10	1058.218	8.50	890.580
11.60	1215.379	10.00	1047.741	8.40	880.102
11.50	1204.902	9.90	1037.263	8.30	869.625
11.40	1194.424	9.80	1026.786	8.20	859.147
11.30	1183.947	9.70	1016.309	8.10	848.670
11.20	1173.470	9.60	1005.831	8.00	838.193
11.10	1162.992	9.50	995.354	7.90	827.715
11.00	1152.515	9.40	984.876	7.80	817.238
10.90	1142.037	9.30	974.399	7.70	806.760
10.80	1131.560	9.20	963.922	7.60	796.283

일정 응력을 가할 때 하부 실험틀의 직경이 넓어질수록 입자들이 하중을 받는 면적이 넓어짐으로 파쇄 입자의 sliding 과 재파쇄 될 수 있는 범위 또한 넓어진다. 따라서 그 만큼 많은 양의 시료가 필요하기 때문에 실험틀의 직경에 따라 시료의 양을 적절히 선택해야 한다. 본 연구에서는 제작된 실험틀의 직경과 시료 NX core 2개(각 set)를 파쇄하여 실험틀에 처음 쌓았을 때 높이와의 비율을 약 1 : 0.8 로 하여 실험을 하였다.

4.2 Testing device

위에서 언급한 것처럼 각각의 암종에 대하여 A set(입자크기 0.60mm이하부터), B set(입자크기 13.20mm이상부터), C set(입자 혼합)에 따라 파쇄암을 제작된 실험틀에 쌓고, 각 set에서의 초기 부피를 측정 한 후 UTM(Universal Testing Mechine)을 이용하여 200 MPa의 응력까지 가압 하중에 따른 변위를 측정하였다.

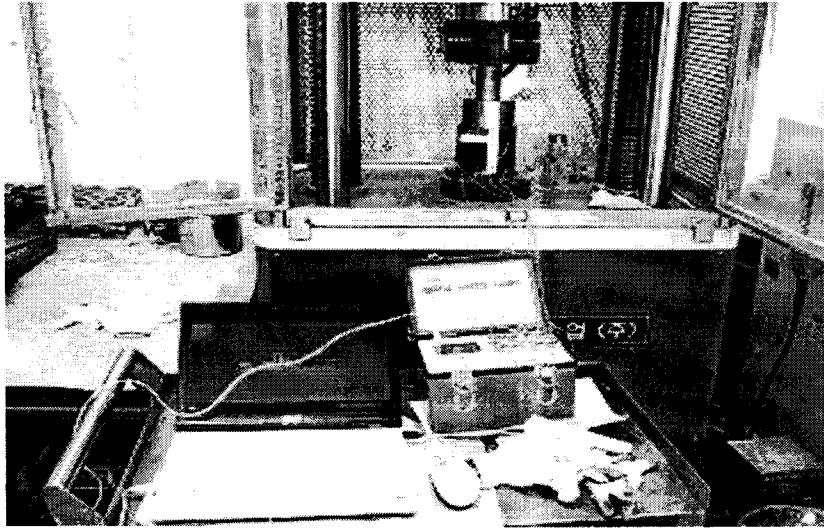
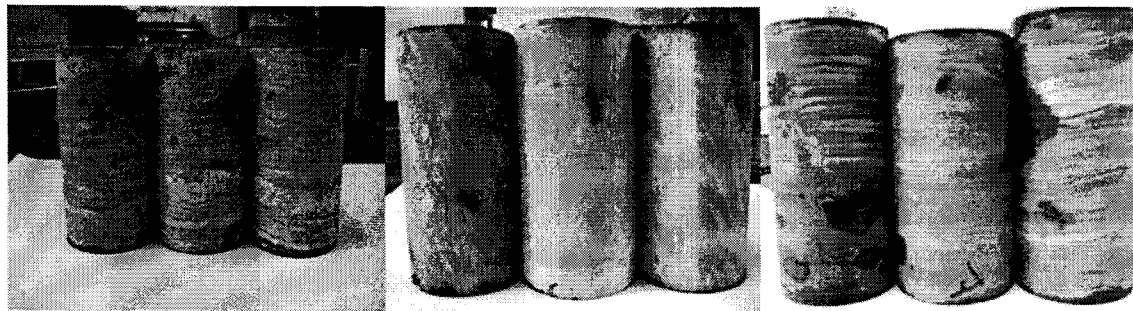


그림 4. Testing devices(UTM)

4.3 Property test

실험에 사용된 Gneiss(강원도 춘천시 골재 채석장), Limestone(강원도 평창 석회석 광산), Shale(마산~함안간 복선전철 구간)은 비록 지반침하지역에서 채취한 시료는 아니지만, 암종별 부피팽창률 차이를 보기 위해 선택하였다. 위의 시료에 대하여 기본 물성실험을 실시하고, Monte-Carlo simulation을 실시하여 대표적인 값을 구하였다(표 2).



(a) Gneiss

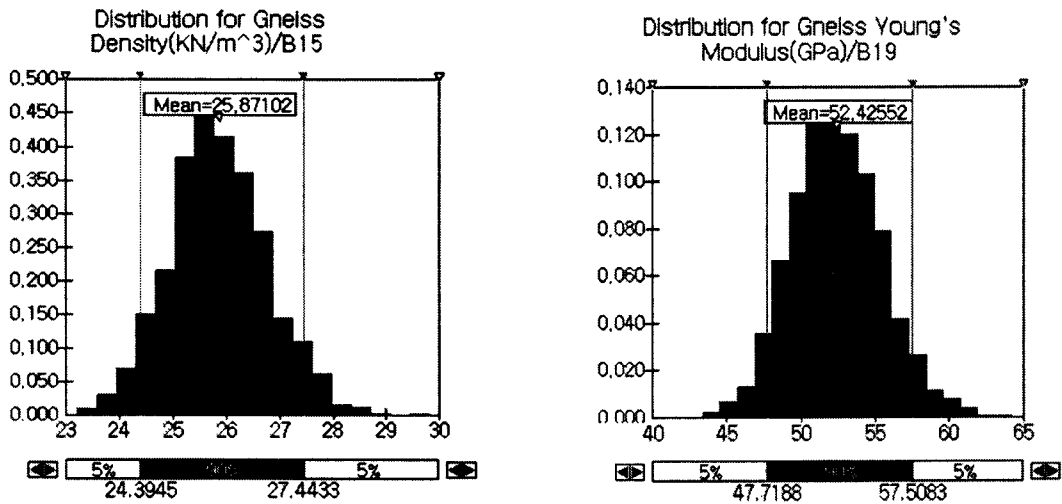
(b) Limestone

(c) Shale

그림 5. NX core of specimen

표 2. Result of Monte-Carlo Simulation

Property	Density (KN/m ³)	Absorption (%)	P wave (m/sec)	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Specimen						
Gneiss	25.871	0.153	3808	151.032	52.425	0.223
Limestone	26.623	0.108	5428	150.924	56.442	0.216
Shale	26.845	0.046	3507	188.506	61.037	0.210



(a) Density of gneiss(KN/m³)

(b) Young's Modulus of gneiss(GPa)

그림 6. Result of Monte-Carlo Simulation

4.4 Sieve Analysis

Gneiss, Limestone, Shale 시료(암종별 NX core × 10)를 Jaw Crusher로 파쇄하고, 입도 분석 하였다. 암종별 각 A, B, C set 의 입도를 일정하기 하기 위해 NX core 10개(암종별)의 평균을 구했으며, 표 3과 같이 NX core 1개의 평균입도에 2배를 하여 각 set(NX core × 2)의 입도를 비슷하게 맞추었다. Jaw Crusher 파쇄 시 파쇄암의 유실과 입도에 따른 질량을 파쇄 전 암석 부피와 같게 하기 위하여 Density와 질량의 관계를 이용하여 초기부피를 일정하게 유지시켰다.

표 3에서 암종별 각 sieve에 남겨진 평균 중량을 보면 같은 Jaw 간격으로 파쇄 시켰지만, 차이가 현저하게 나타난다. 그 차이는 암석의 구성 광물 입자와 배열, 성인, 기존 균열 등으로 인해 다르게 나타나는 것이며, Shale의 경우 그림 8(c) 에서처럼 엽리 구조에 의한 영향으로, 파쇄 시 엽리를 따라 둥근 판상으로 파쇄되었다.

표 3. Average sieve analysis of Gneiss, Limestone, Shale

Sieve (mm)	Gneiss Average (1203.30g)			Limestone Average (1262.10g)			Shale Average (1150.61g)		
	무게 (g)	잔유율 (%)	통과율 (%)	무게 (g)	잔유율 (%)	통과율 (%)	무게 (g)	잔유율 (%)	통과율 (%)
13.20	376.40	31.28	68.72	449.43	35.61	64.39	632.47	54.97	45.03
9.50	324.40	26.96	41.76	267.37	21.18	43.21	208.52	18.12	26.91
4.75	245.83	20.43	21.33	311.60	24.69	18.52	161.32	14.02	12.89
2.36	106.67	8.86	12.47	119.50	9.47	9.05	40.42	3.51	9.38
0.60	82.63	6.87	5.60	79.47	6.30	2.75	78.29	6.80	2.57
fan	67.37	5.60	0.00	34.73	2.75	0.00	29.60	2.57	0.00

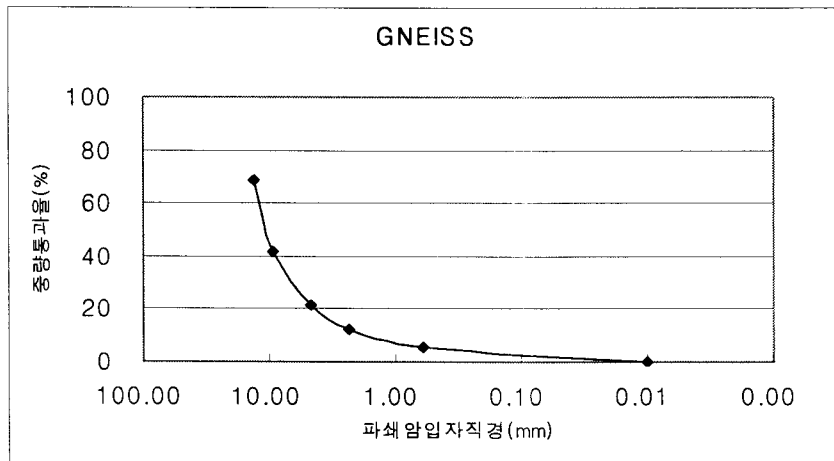


그림 7. Average sieve analysis of Gneiss



(a) Gneiss (b) Limestone (c) Shale

그림 8. Sieve 13.20mm particle of Gneiss, Limestone, Shale

4.5 Test results

4.5.1 1st bulking factor

앞에서 정의한 식(1)로부터 실험틀에 적재 할 당시의 부피팽창률에 해당하는 1st bulking factor를 산정하기 위하여 1st volume(파쇄 전 부피)과 2nd volume(파쇄암을 실험틀에 쌓았을 때 부피)을 Gneiss, Limestone, Shale에 대하여 각 set 별로 구하였다. density와 질량관계를 통하여 Gneiss, Limestone, Shale에 대한 각 set의 1st volume을 구하였고(표 4), 2nd volume은 하부 실험틀과 상부 실험틀의 눈금으로부터 구하였다(표 5).

표 4. 1st volume of each A, B, C set for Gneiss, Limestone, Shale

Set	Gneiss			Limestone			Shale		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Density(gr/cm ³)	2.638			2.714			2.737		
Weight(g)	1203	1203	1204	1264	1262	1261	1150	1150	1150
1st vol. (cm ³)	456.22	456.10	456.56	465.73	465.18	464.89	420.35	420.28	420.24

표 5. 2nd volume of each A, B, C set for Gneiss, Limestone, Shale

Set	Gneiss			Limestone			Shale		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
H (cm)	12.30			12.30			12.30		
h (cm)	3.40	4.10	4.20	3.20	3.40	3.70	3.40	3.90	4.30
H - h (cm)	8.90	8.60	8.10	9.10	8.90	8.60	8.90	8.40	8.00
2nd vol. (cm ³)	932.49	901.06	848.67	953.44	932.49	901.06	932.49	880.10	838.19

표 6. 1st Bulking factor of each A, B, C set for Gneiss, Limestone, Shale

Set	Gneiss			Limestone			Shale		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1st vol. (cm ³)	456.22	456.10	456.56	465.73	465.18	464.89	420.35	420.28	420.24
2nd vol. (cm ³)	932.49	901.06	848.67	953.44	932.49	901.06	932.49	880.10	838.19
Bulking factor	104.44	97.60	85.90	104.70	100.50	93.80	121.80	109.40	99.50

1st volume과 2nd volume으로 암종별 각 set에서의 초기 부피팽창률(1st Bulking factor)을 산정하고, 그 차이를 확인 할 수 있었다(표 6). 이 차이는 입자의 형상과 입도가 암석의 종류마다 일정한 것이 아니기 때문에 set별로 차이가 나는 것이며, 입자를 쌓는 과정에서 파쇄 입자들이 서로 공극을 채우기 때문에 나타나는 것이다. set별로 분석해보면 A set는 입자크기 0.60mm이하 입자가 하부에, 입자크기 13.20mm이상 입자가 상부에 쌓였기 때문에 작은 입자들이 공극을 채우는 효과가 거의 없고, B set는 입자크기 13.20mm이상 입자가 하부에 입자크기 0.60mm이하 입자가 상부에 쌓였기 때문에 작은 입자들이 공극을 채우는데 어느 정도 기여했다. C set는 큰 입자와 작은 입자들이 혼합되어 큰 입자들 사이의 공극을 작은 입자들이 B set보다 많이 채웠기 때문에 각 set별로 1st bulking factor의 차이가 나타나는 것이다. 하지만 하중을 가하기 전, Gneiss, Limestone, Shale의 입도를 달리하여 쌓아도, 암석의 부피팽창률은 85.90% ~ 121.80% 인 것을 확인 할 수 있었다. set별로 산정한 위의 값들은 기존에 제시되었던 화약발파와 현장측정치로 얻은 부피팽창률 값들과 비교할 때, 암종별 일정 범위에 포함시키기에는 어렵다고 본다. 따라서 응력 조건을 배제한 상태에서의 부피팽창률은 측정된 입도를 같이 제시해야 한다고 사료된다.

4.5.2 응력에 따른 Gneiss, Limestone, Shale 의 부피팽창률

Gneiss, Limestone, Shale의 각 set를 UTM으로 일정한 하중을 가하여 응력에 따른 부피팽창률 실험을 한 결과 암종별 각 set에서 차이점을 볼 수 있었다.

응력과 부피팽창률의 관계에 영향을 미치는 것은 1st bulking factor에서 분석한 것처럼 쌓는 순서에 따른 공극의 부피이다. 전체 공극의 부피에서 큰 입자들로 인한 큰 공극의 부피가 차지하는 비율이 크기 때문에 파쇄와 sliding 현상을 일으키는 주된 변위 발생 공간이 된다. 이러한 공극들이 많을수록 부피변화가 많이 발생하게 되는데 A, B, C set 중에서 큰 공극의 부피는 A set가 가장 크다. 따라서 각 set에 응력을 가하면 A set의 부피변화가 크고, C set의 부피변화가 가장 작다.

그림 9는 Gneiss의 각 set에서 변위에 따른 응력과 A set의 변위 양상을 나타낸 모식도

이다. 파쇄암을 작은 입자부터 쌓았기 때문에 상부 큰 입자에 의해 공극이 많이 형성되었고, 응력이 가해지면서 큰 입자들의 파쇄와 sliding 현상이 복합적으로 발생하여 부피가 감소하였다. 위에서 언급한 것처럼 같은 응력 하에서, 결과적으로 B set와 C set보다 변위가 많이 발생했기 때문에 부피변화도 그만큼 차이가 나타난 것이다. 마찬가지로 Limestone과 Shale도 각 set별로 Gneiss처럼 유사한 차이를 보였으며, 암종별 A set의 변위차이는 입자크기 13.20mm 이상 입자가 50% 이상 이었던 Shale이 가장 크게 나타났다.

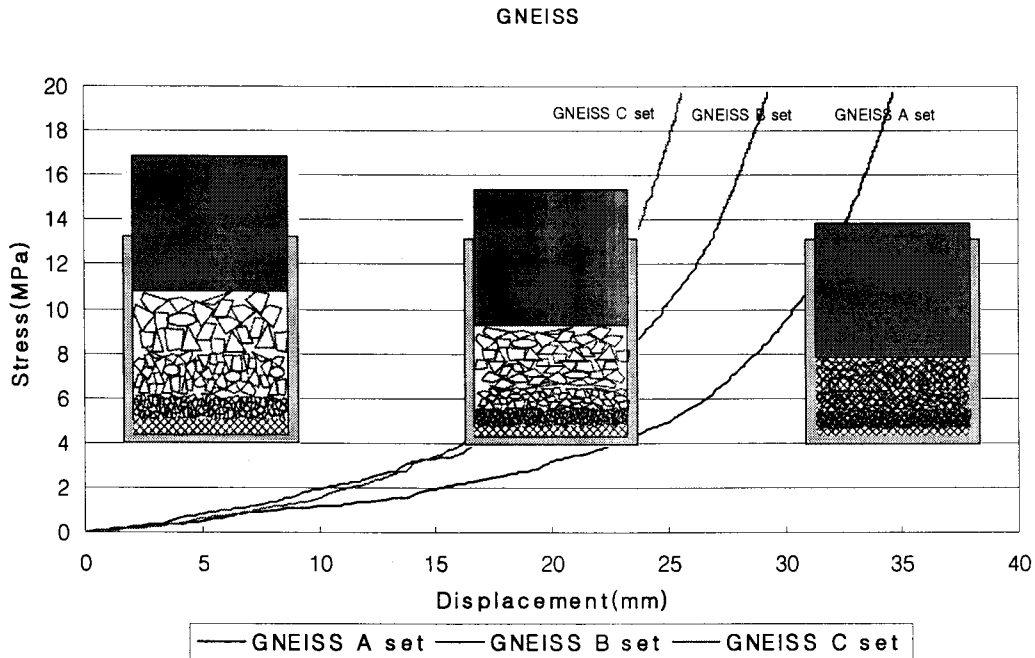
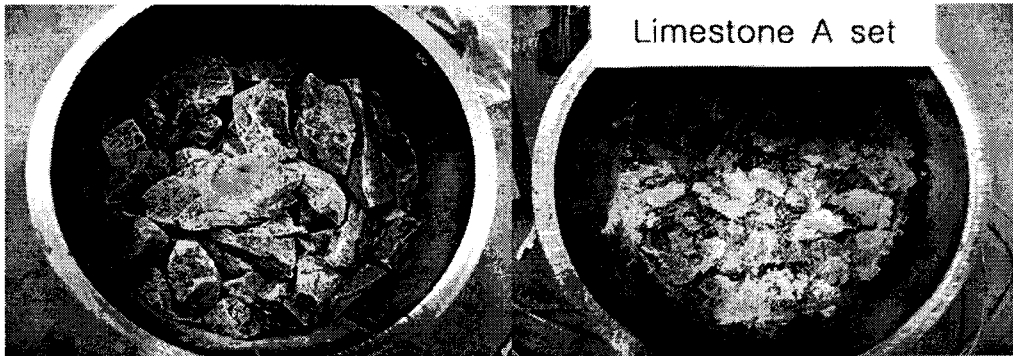


그림 9. Relationship between Stress and displacement for each set of Gneiss

그림 11 ~ 13과 표 7은 Gneiss, Limestone, Shale의 각 set에 하중을 가하여 응력의 증가에 따른 부피팽창률을 산정한 결과이다. 파쇄암의 쌓는 순서를 반대로 한 A set와 B set를 비교하면, 1st bulking factor가 높은 것은 A set이지만, 응력이 가해지면서 점차적으로 낮아지는 양상을 보이고 있다. 이것은 입도의 쌓는 순서에 대한 영향으로써, 상부에 큰 입자가 존재하는 A set의 부피 변화가 큰 것을 알 수 있다.

결과적으로 실험에서 구한 각 암종별 부피팽창률은 대상 암종별 강도와 공극의 부피 형성에 관여하는 개별적 입자 크기의 비율과 쌓는 순서에 따른 공극의 부피에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다.

암종별 부피팽창률의 차이와 범위를 갖기 위해서는 보다 많은 실험을 통하여 통계적인 산출 과정을 거쳐야 한다. 또한 지반침하 지역을 대상으로 암반의 부피팽창률을 산정한다면, 현장에 작용하는 응력의 측정과 파쇄 입도에 영향을 주는 암반의 종류와 특성을 고려한 실내실험을 해야 할 것으로 사료된다.



(a) before (b) after
 그림 10. Before and after test of Limestone A set

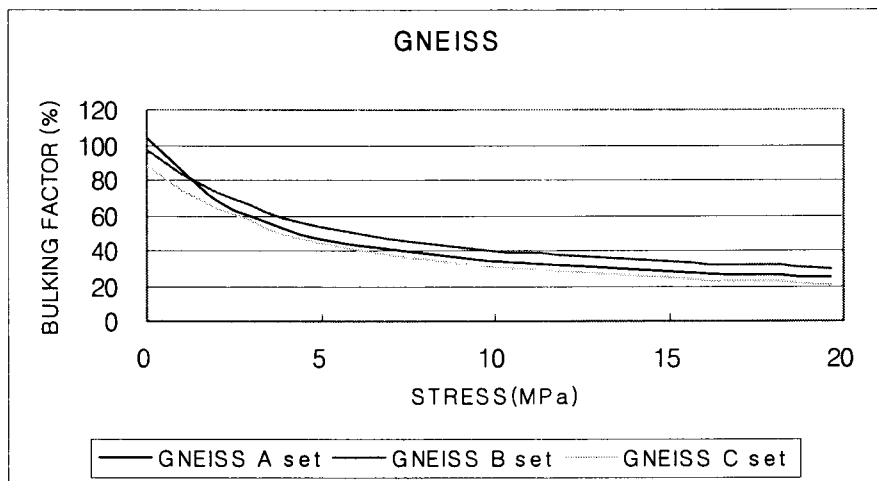


그림 11. Relationship between bulking factor and stress for Gneiss

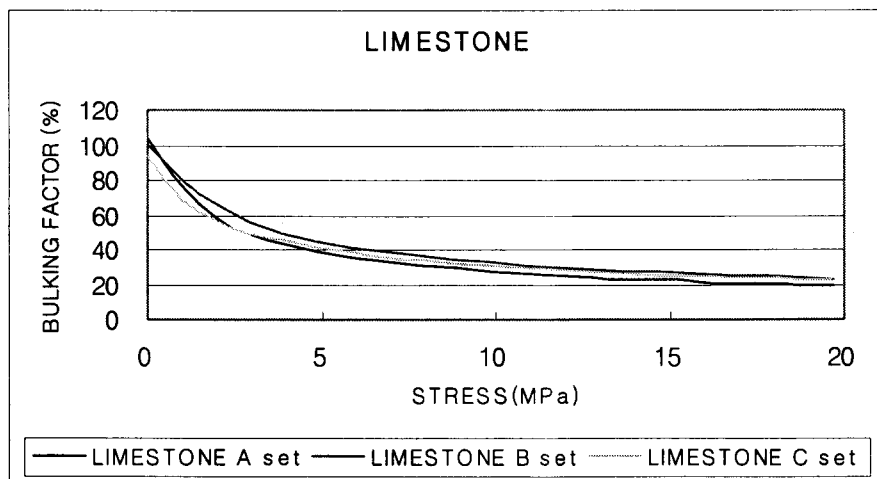


그림 12. Relationship between bulking factor and stress for Limestone

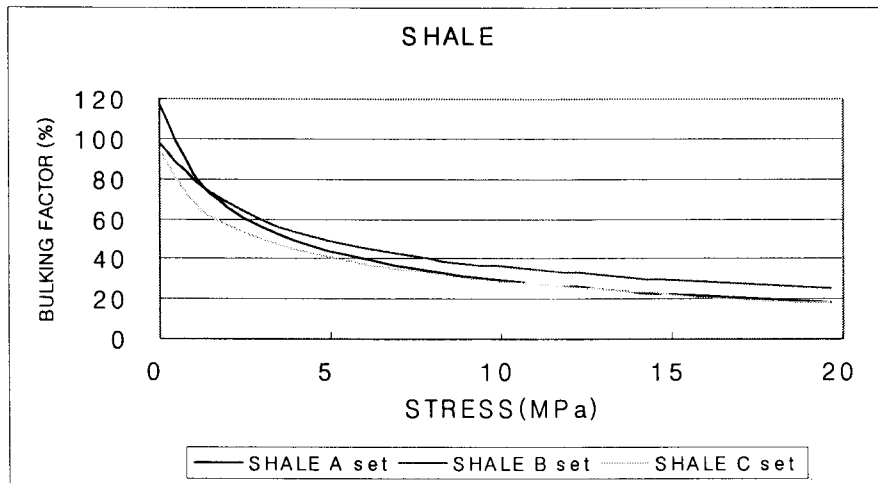


그림 13. Relationship between bulking factor and stress for Shale

표 7. Bulking factor according to stress for Gneiss, Limestone, Shale

Stress(MPa)	Gneiss(%)			Limestone(%)			Shale(%)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.00	104.44	97.60	85.90	104.70	100.50	93.80	121.80	109.40	99.50
0.03	104.10	97.01	85.83	103.90	100.10	93.50	117.30	97.70	94.90
0.98	85.20	83.43	74.25	76.10	79.60	68.80	82.20	79.30	68.60
1.96	69.10	73.70	64.52	58.70	66.00	57.00	65.90	68.50	57.00
2.95	59.20	66.13	56.95	49.60	56.50	49.70	56.10	60.00	49.50
3.94	52.40	58.78	49.60	43.70	49.60	45.30	49.20	53.80	44.40
4.91	47.10	54.15	44.97	39.30	44.60	41.40	44.20	49.40	40.80
5.89	43.40	49.88	40.70	35.80	41.10	38.30	40.30	45.50	37.40
6.87	40.80	47.22	38.04	33.20	38.50	36.00	36.90	42.90	34.80
7.85	38.60	44.56	35.38	31.00	36.20	33.90	34.30	40.50	32.90
8.84	36.40	42.54	33.36	29.20	34.30	32.30	31.70	38.10	31.00
9.85	34.70	40.56	31.39	27.70	32.80	30.80	29.80	36.40	29.20
10.79	33.10	39.19	30.01	26.50	31.30	29.60	28.10	34.90	27.70
11.79	31.80	37.35	28.17	25.40	30.10	28.50	26.50	33.40	26.30
12.76	30.50	36.20	27.03	24.30	28.90	27.50	25.20	32.00	25.00
13.76	29.50	35.06	25.88	23.30	27.90	26.50	24.00	30.90	23.70
14.72	28.60	34.09	24.92	22.40	26.90	25.60	23.00	29.80	22.40
15.73	27.70	33.22	24.04	21.70	26.10	24.80	22.00	28.70	21.30
16.67	26.80	32.49	23.31	21.00	25.40	24.20	20.90	27.70	20.50
17.70	26.00	31.52	22.35	20.40	24.60	23.50	20.10	26.90	19.70
18.64	25.30	30.79	21.61	19.70	23.90	22.90	19.30	26.00	18.80
19.63	24.70	30.10	20.92	19.10	23.30	22.30	18.60	25.20	18.10
19.63 - 0	79.70	67.50	64.98	85.60	77.20	71.50	103.20	84.20	81.40

5. 결론

본 연구에서는 지반침하 거동특성 분석을 위해 암반의 부피팽창률에 대한 실내실험을 계

확하고 실시하였다. 실내실험은 지반침하 시 파쇄암들의 전체적인 거동 중에서 파쇄암들이 쌓인 중간부분에 대한 실험으로서, 일정 응력 하에서 Gneiss, Limestone, Shale의 파쇄암들에 대한 부피팽창률에 대하여 분석하였다.

1st bulking factor를 통해 입자가 쌓이는 형태(A, B, C set)에 따른 부피팽창률을 비교 분석하였고, 그 차이에 따른 Gneiss, Limestone, Shale의 1st bulking factor는 85.90% ~ 121.80% 범위를 갖는다. 이러한 결과는 기존에 제시되었던 부피팽창률과는 상이한 결과라고 할 수 있다. 파쇄입자들의 입도와 형상이 다르기 때문에 단순히 파쇄 입자들이 쌓이는 형태로만 부피팽창률을 산정하는 것은 무리가 있다. 본 연구에서 실험한 시료 중 Shale는 파쇄암의 입자크기 13.20mm이상 입자가 50% 이상을 차지하였으며, 입도 순서를 달리하여 쌓아도 다른 암석들에 비해 1st bulking factor가 높게 분석되었다. 따라서 쌓는 형태에 따라 부피팽창률을 분석할 때, 기존 부피팽창률에 제시되지 않았던 파쇄암의 입도와 그 입도들이 암석 전체에 차지하는 비율을 고려해야 한다.

일정응력 하에서의 부피팽창률은 이런 입도차이에 의한 영향도 있지만, 표 7에서 분석된 결과와 같이 파쇄암에 일정 응력 이상이 작용하면, 어느 정도 공극을 유지한 상태로 부피가 변화 한다. 따라서 위의 두가지 요소와 응력과의 관계를 통하여 부피팽창률을 산정해야 한다고 사료된다.

1st bulking factor를 지반침하지역에 적용하는 것보다 현장에 작용하는 응력을 측정하고 암반의 종류와 특성이 분석된다면, 본 연구에서 실험한 data들을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 분석된 응력에 따른 부피팽창률 결과 값들은 더 많은 실내실험과 분석을 통하여 통계적으로 암종별 부피팽창률을 산정 할 수 있도록 보완되어야 할 것이다. 또한 더욱 정확한 부피팽창률 산정을 위해, 본 연구에서 배제되었던 안식각과 파쇄암들의 전체적인 부피팽창률을 고려 할 수 있도록 실험 방법이 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 최성웅, 전양수, 박의섭, 정용복, 천대성, 2005, 지반침하메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제15권 제3호, 195-212
2. Piggot, R. T. & Eynon, P.(1997), "Ground Movements Arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings". In Large Ground Movements & Structures, Pentech, 749-780
3. Brady, B.H.G and Brown, E.T., 1985, Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen & Unwin., 527p
4. Karfkis, M. G., 1993, Comprehensive Rock Engineering, Vol, 5-I, Pergamon, 451-476