

## 지반침하 거동특성 분석을 위한 암반의 부피팽창률에 관한 연구

이희중<sup>1)</sup>, 정용복<sup>2)</sup>, 최성웅<sup>3)</sup>\*

### An Experimental Study on the Bulking Factor of Rock Mass for Subsidence Behavior Analysis

Hee-Joong Lee, Yong-Bok Jung and Sung O. Choi

**Abstract** The techniques for measuring the bulking factor of rock mass in subsidence area have never been well known all over the world. The volumetric expansion ratios obtained from blasting operation were the only way of acquiring the bulking factor of rock mass. The bulking factor of rock mass obtained from blasting operation, however, has been seldom classified in a certain criterion. Also the bulking factor of rock mass can be very dependent upon rock types. In order to overcome this limitation obtained from these reasons, the authors studied the experimental bulking factor of rock mass according to the stacking shapes as well as the overburden stresses. Gneiss, limestone and shale were chosen for testing specimens, and each bulking factor has been measured with laboratory test of applying a constant load on the fragmented rock specimens.

**Key words** Bulking factor, Subsidence

**초 록** 초록 지반침하 대상지역 암반의 부피팽창률에 대한 측정방법은 국·내외적으로 아직까지 규정된 바는 없으며, 그동안 현장에서 화약발파에 의한 암반의 부피증가율로써 부피팽창률을 적용하여 사용하여 왔다. 하지만 이렇게 제시된 부피팽창률은 일정한 기준으로 분류되지 않았을 뿐만 아니라, 각각에서 제시된 값들은 암종에 따라 부피팽창률 범위 차이가 있기 때문에 지반침하 대상지역에 그대로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 편마암, 석회암 및 셰일을 대상으로 봉락대에 영향을 미칠 수 있는 파쇄암의 적재 형태에 따른 부피팽창률과 응력에 따른 부피팽창률을 산정하기 위해 파쇄암이 적재된 상태에서 일정한 하중을 가하여 실내실험을 실시하였다.

**핵심어** 부피팽창률, 지반침하

## 1. 서 언

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 등에 의한 수치해석을 통하여 지반침하 영향 요소들

을 분석하였으며, 그 동안의 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.

그 동안의 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 발생 이후의 지반 거동 즉, 지반침하의 영향 범위와 침하량 등에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

위에서 언급한 지반침하 거동특성 중에서 침하량에 영향을 미치는 중요한 인자는 암반의 부피팽창률이며, 이는 지표침하량이 채굴고보다 적은 이유를 설명하는

<sup>1)</sup> 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 한국지질지원연구원 지반안전연구부 선임연구원

<sup>3)</sup> 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

\* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr

접수일 : 2007년 12월 4일

심사 완료일 : 2008년 1월 14일

데 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 사료된다.

따라서 본 연구에서는 지반침하 거동특성 분석을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 암종별·입도별 부피팽창률과 일정 응력조건에서의 부피팽창률에 대한 실내 실험방법을 고안하고 실시하였다.

### 2. 연구배경

함몰형 침하의 경우 천정부의 파괴가 일어난 후 붕괴가 점차 상부로 진행되다가 자립이 가능한 지층을 만나거나 파쇄된 암석들의 부피팽창에 의해 중단되기도 하지만, 침하가 점차 상부로 진행된다면 Fig. 1과 같은 형태로 침하가 발생할 것이다. 이러한 침하 과정에서 각 지층의 순차적인 붕괴로 쌓이는 파쇄암들로 인하여 파쇄입자들 사이에 공극이 형성된다. 또한 형성된 공극은 상부에 쌓이는 파쇄암들의 자중에 의한 응력형성으로 미끄러짐 현상과 재파쇄 현상이 발생하여 채워지기도 할 것이다.

만약 파쇄암의 강도가 상부에 형성되는 응력보다 강하다면, 재파쇄와 미끄러짐 현상이 적게 발생할 것이고, 파쇄암 그 자체에 지지력이 형성되어 지표까지 침하가 전이되지 않을 수도 있으며, 설사 지표까지 침하가 전이된다 하더라도 침하 정도가 낮을 것이다. 따라서 파쇄암의 부피팽창률을 산정할 때, 상부 또는 측면에 형성되는 응력을 고려하여야 할 것이다.

암종별로 부피팽창률을 분석한다면, 같은 파쇄입도의 조건으로 쌓이고 같은 응력이 상부에서 형성될 때 그 차이를 확인할 수 있겠지만, 실제로 채굴적 상부 지반

의 붕괴는 불연속면, 채굴적의 심도, 채굴적의 높이와 폭, 지하수 조건 등 여러 가지 요인들로 인해 붕괴 양상이 달라진다. 또한 암반의 파괴 정도가 달라지기 때문에 각각의 요인들을 고려하여 현장 조건에 맞도록 부피팽창률을 분석해야 한다.

본 연구에서는 침하 하부지역(채굴적)이 아닌 어느 정도 침하가 진행되었을 때, 즉 파쇄암들이 쌓인 중간 부분에서 상부에 형성되는 응력에 의한 파쇄암 입자들 간의 변위 발생차이에 따른 부피팽창률을 분석하기 위하여 실내실험을 고안하였다.

실험에 사용한 시료는 편마암, 석회암 및 세립이며 파쇄암을 얻기 위하여 이 시료들을 Jaw crusher를 이용하여 파쇄한 후 입도에 따라 쌓는 순서를 하부에서부터 입자가 작은 순서(A set), 입자가 큰 순서(B set), 입자 혼합(C set) 세 가지 방법으로 달리하여 실내 실험을 실시하였다.

### 3. 부피팽창률 이론

Fig. 2는 응력의 영향이 배제된 파쇄암이 쌓이는 형태에 의한 직각기둥형 부피팽창률 모델로서, 채굴고와 붕락고의 관계로부터 이론적으로 간단하게 부피팽창률을 정의할 수 있다.

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

여기서, B는 부피팽창률,  $V_f$ 는 최종붕괴 후 부피,  $V_i$ 는 붕괴 전 부피,  $V_s$ 는 채굴공동의 체적,  $V_v$ 는 붕괴될 상반의 부피이다.

이론적으로 쌓이는 형태에 의해 채굴고와 붕락고의 관계를 통하여 부피팽창률을 설명할 수 있다 하더라도, 지하 심부의 붕락대 형상을 조사하기 어려운 뿐만 아니라 공동 상부 파쇄대 영역에 작용하는 응력, 상부 암층의 종류와 지질구조상의 질리 등의 영향으로 파쇄암의 형태와 입도가 달라지기 때문에 이를 고려하여 현장에 적합한 부피팽창률 산정을 해야 한다.

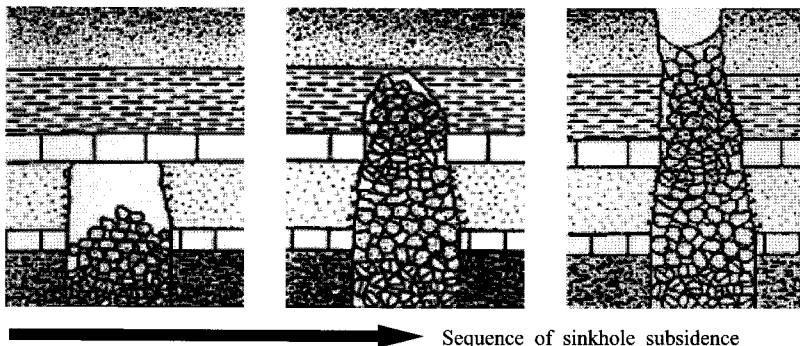


Fig. 1. Schematic diagram of sinkhole subsidence (Karfakis, 1993)

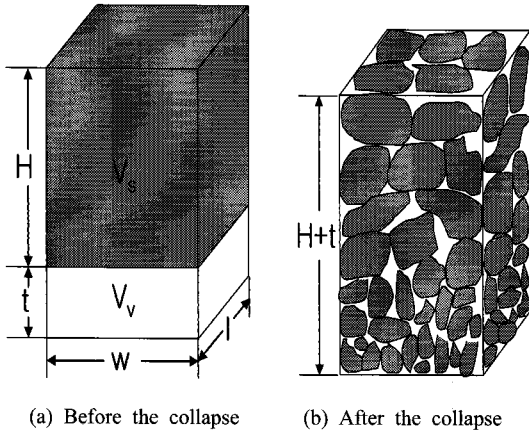


Fig. 2. Schematic diagram of bulking factor model. (H: height of overburden to be collapsed, t: height of an opening, w: width of an opening, l: length of an opening)

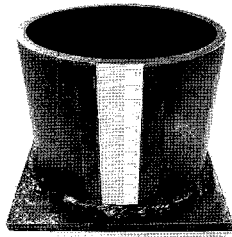
본 연구에서는 응력을 고려한 실내실험을 위해 적재된 파쇄암에 등하중을 가하기 위하여, 원기둥 형태의 실험틀을 제작하였다. 원기둥 형태 또한 직각기둥형 모델과 같이 식 (1)을 적용하여 부피팽창률을 산정할 수 있다.

#### 4. 부피팽창률 실내 실험

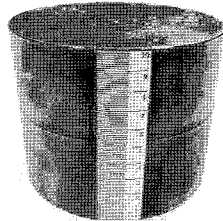
##### 4.1 실험틀 제작

파쇄한 편마암, 석회암 및 세일 시료를 적재하고 등하중을 가하기 위해 Fig. 3과 같이 원통형 하부 실험틀(내경: 11.55 cm, 높이: 12.30 cm)과 원기둥형 상부 실험틀(외경: 11.40 cm, 높이: 10.00 cm)을 제작하였다. 하부 실험틀의 총 부피는 1288.72 cm<sup>3</sup>이고, 높이 눈금 0.1 cm간의 부피차이는 10.48 cm<sup>3</sup>이다(Table 1).

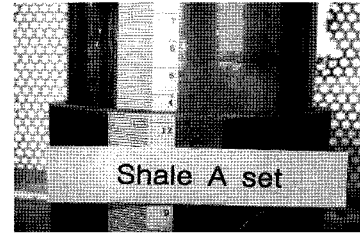
하중을 가하기 전, 각 set별로 실험틀에 적재되었을 때의 초기부피를 측정하기 위해 상부 실험틀과 하부 실험



(a) Lower frame



(b) Upper frame



(c) Combination of upper and lower frames

Fig. 3. Upper and lower experimental frames

Table 1. Volume of frame inside with height of the lower frame

High (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	High (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	High (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )
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

험틀에 눈금을 표기하였다. 초기 부피는 하부 실험틀의 높이와 상부 실험틀이 하부 실험틀에 들어간 높이의 차를 이용하여 측정하였다(Fig. 3. (c)).

하부 실험틀의 직경이 넓어질수록 일정한 하중을 가할 때 파쇄암 입자들이 하중을 받는 면적이 그만큼 넓어지기 때문에 파쇄암 입자들 간에 작용하는 미끄러짐 현상과 재파쇄 현상이 발생 될 수 있는 범위 또한 넓어지게 된다. 따라서 그 만큼 많은 양의 시료가 필요하기 때문에 하중에 의한 파쇄암의 부피변화를 측정하기 위해서는 실험틀의 직경에 따라 시료의 양을 적절히 선택해야 한다.

본 연구의 초기 실험에서 제작된 실험틀 직경과 적재된 시료의 높이를 약 1 : 1.2의 비율로 하여 하중을 가해 보았으나 실험틀 상부에 국부적으로 응력이 집중되어 파쇄암들 간의 미끄러짐 현상과 재파쇄 현상이 상부에 제한적으로만 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 점차적으로 시료의 양을 감소시키며 실험을 한 결과, 제작된 실험틀의 직경과 적재된 시료의 높이가 약 1:0.7~0.9의 비율에서 실험틀 상부의 국부적인 응력 집중 현상이 완화되는 것을 알 수 있었다. 또한 상부 실험틀의 자중에 의한 응력발생 현상도 고려될 수 있었으나, 본 실험에서는 상부 실험틀 자중에 의한 응력집중현상은 공학적인 범위 내에서 충분히 무시될 수 있을 정도로 미약하였기 때문에 이를 염두에 두지 않았다.

본 연구의 실내실험에 사용한 시료의 양은 1:0.7~0.9의 비율에 맞추기 위하여 암종별로 각 set에 NX core 2개(각 set별)로 정하여 실험에 사용하였다.

#### 4.2 암석 물성 시험

실험에 사용된 암석 시료는 편마암(강원도 춘천시 골재 채석장), 석회암(강원도 평창 석회석 광산), 셰일(마산-함안간 복선전철 구간)이며 암종별 부피팽창률 차이를 살펴보기 위해 선택하였다. 위 시료에 대하여 기본 물성시험을 실시하였고, Monte-Carlo 시뮬레이션을 실시하여 통계적으로 대표적인 값을 구하였다(Table 2 및 Fig. 5).

#### 4.3 채 분석 시험

파쇄암을 얻기 위하여 암종별로 NX core 10개를 Jaw Crusher를 이용하여 파쇄한 후 입도분석을 시행하였다. 암종별 각 A, B, C set의 입도를 일정하기 하기 위해 NX core 10개의 평균입도를 구하였으며, Table 3과 같이 NX core 10개의 평균입도에 2배하여 각 set(NX core × 2)의 입도를 일정하게 유지시켰다. Jaw Crusher 파쇄 시 파쇄암의 유실과 입도에 따른 질량을 파쇄 전 암석 부피와 같게 하기 위하여 밀도와 질량의 관계를 이용하였다.

Table 3에서 암종별 각 sieve에 남겨진 평균 중량을 보면 같은 Jaw 간격으로 시료를 파쇄시켰지만, 그 차이가 현저히 다르게 나타난 것을 알 수 있었다. 이러한 원

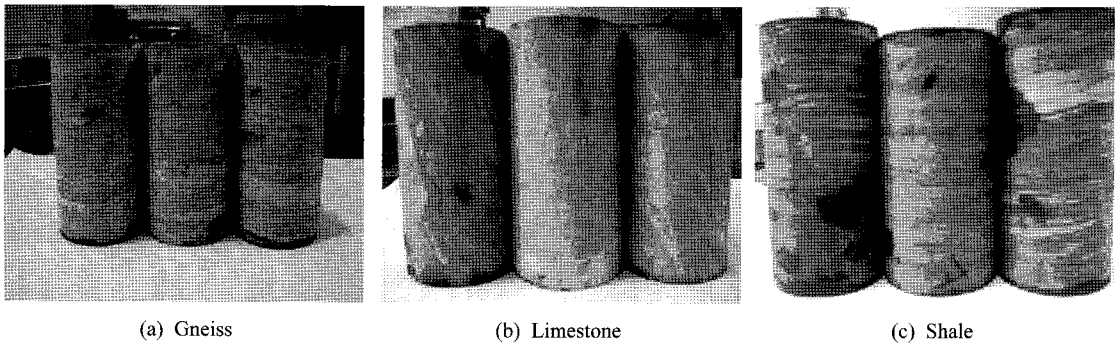


Fig. 4. NX-size rock specimens used in laboratory tests

Table 2. Result of Monte-Carlo simulation on the rock specimens

Property	Density (kN/m <sup>3</sup> )	Absorption (%)	P wave (m/sec)	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Specimen						
Gneiss	25.871	0.153	3,808	151.032	52.426	0.223
Limestone	26.655	0.108	5,428	150.924	56.408	0.216
Shale	26.690	0.046	3,507	188.506	61.141	0.210

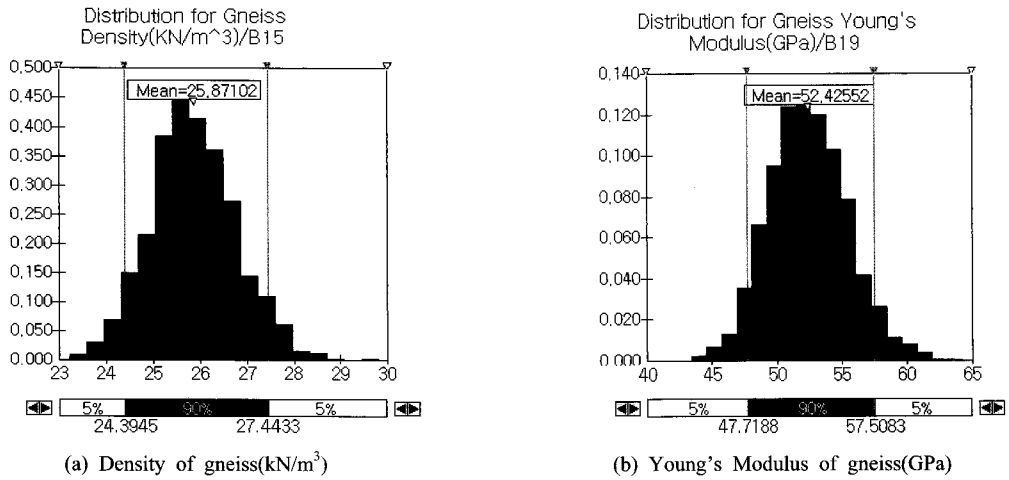


Fig. 5. Examples of Monte-Carlo simulation on rock property tests

Table 3. Average sieve analysis of Gneiss, Limestone and Shale

Sieve (mm)	Gneiss Average (1203.30 g)			Limestone Average (1262.10 g)			Shale Average (1150.61 g)		
	Weight (g)	Remaining rate (%)	Passing rate (%)	Weight (g)	Remaining rate (%)	Passing rate (%)	Weight (g)	Remaining rate (%)	Passing rate (%)
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



Fig. 6. Photograph of sieve 13.20 mm particles of Gneiss, Limestone and Shale

인으로는 암석의 구성 광물 입자와 배열, 성인, 기존 균열 등을 고려할 수 있으며, 세일의 경우 Fig. 6. (c)에서 처럼 엽리 구조에 의한 영향으로 파쇄 시 엽리를 따라 둥근 판상으로 파쇄됨을 알 수 있다.

4.4 적재 시험

파쇄암의 입도에 따라 적재된 차이를 분석하기 위해

서 파쇄암 입자를 실험을 하부에서부터 적재한 순서를 달리하여 암종별로 A set(입자크기 0.60 mm이하부터), B set(입자크기 13.20 mm이상부터), C set(입자 혼합)로 정하였으며(Fig. 7), 암종별 각 set의 초기 부피를 측정한 후 만능재료시험기(UTM 200TON - HD201TC)를 이용하여 20 MPa의 응력까지 가압함으로써, 하중에 따른 부피변화를 측정하였다(Fig. 8).

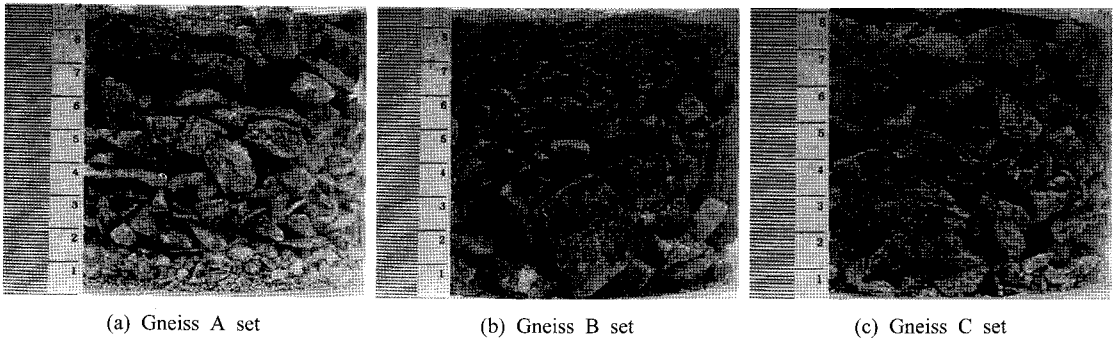


Fig. 7. Different stacking patterns of A, B and C sets

## 5. 실험 결과

### 5.1 초기 부피팽창률(1st bulking factor)

앞에서 정의한 식 (1)로부터 파쇄암을 실험틀에 적재하였을 때의 부피팽창률에 해당하는 초기 부피팽창률(1st bulking factor)을 산정하기 위하여 1st volume(파쇄 전 부피)과 2nd volume(파쇄암을 실험틀에 쌓았을 때 부피)을 편마암, 석회암 및 셰일에 대하여 각 set별로 구하였다. 밀도와 질량관계를 통하여 편마암, 석회암 및 셰일에 대한 각 set의 1st volume을 계산하였고(Table 4), 2nd volume은 하부 실험틀과 상부 실험틀의 눈금으로부터 구하였다(Table 5, Fig. 9).

Table 6에서 확인할 수 있듯이 암종별로 각 set에서 초기 부피팽창률의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 입자의 형상과 입도가 암석의 종류마다 일정한 것이 아니기 때문에 set별로 차이가 나는 것이며, 입자를 쌓는 과정에서 파쇄암 입자들이 상호간의 공극을 채우기 때문에 나타나는 것이다.

set별로 분석해보면 Fig. 7에서와 같이 A set는 입자

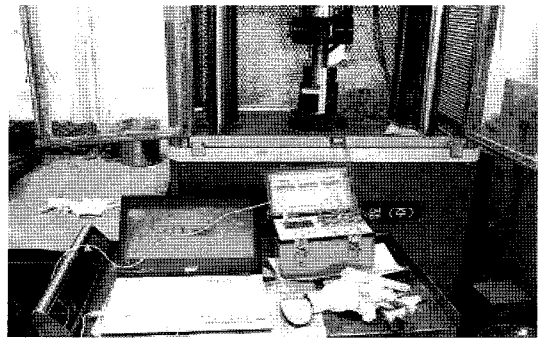


Fig. 8. UTM 200TON - HD201TC

크기 0.60 mm이하 입자가 하부에, 입자크기 13.20 mm 이상 입자가 상부에 쌓였기 때문에 작은 입자들이 큰 입자들에 의해 형성된 공극을 채우는 효과가 거의 없고, B set는 입자크기 13.20 mm이상 입자가 하부에 입자크기 0.60 mm이하 입자가 상부에 쌓였기 때문에 작은 입자들이 공극을 채우는데 기여했다. C set는 큰 입자와 작은 입자들이 혼합되어 큰 입자들 사이의 공극을 작은

Table 4. 1st volume of each set for Gneiss, Limestone and Shale

Set	Gneiss			Limestone			Shale		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Density (gr/cm <sup>3</sup> )	2.638			2.714			2.737		
Weight (g)	1203.5	1203.2	1204.4	1264.0	1262.5	1261.7	1150.5	1150.3	1150.2
1st vol. (cm <sup>3</sup> )	456.22	456.10	456.56	465.73	465.18	464.89	420.35	420.28	420.24

Table 5. 2nd volume of each set for Gneiss, Limestone and 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	3.70	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 <sup>3</sup> )	932.49	901.06	848.67	953.44	932.49	901.06	932.49	880.10	838.19

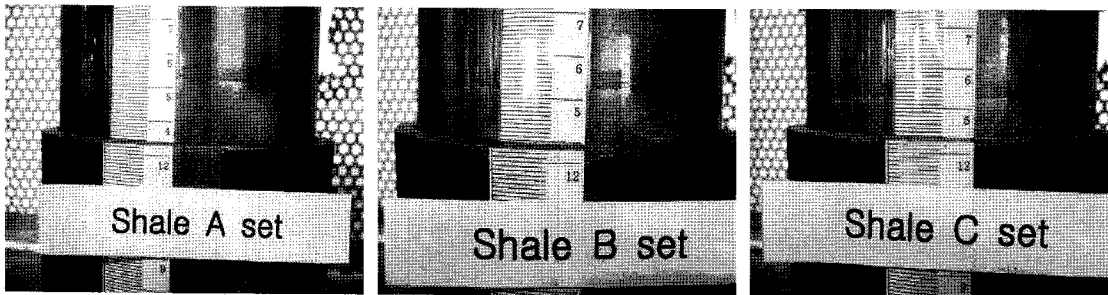


Fig. 9. 2nd volume of each set for Shale

Table 6. 1st bulking factor of each set for Gneiss, Limestone and Shale

Set	Gneiss			Limestone			Shale		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1st vol. (cm <sup>3</sup> )	456.22	456.10	456.56	465.73	465.18	464.89	420.35	420.28	420.24
2nd vol. (cm <sup>3</sup> )	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

Table 7. Bulking factor of rock mass suggested by Strata Control New Journal (Univ. of New South Wales, 1995)

Classification	Bulking factor	Rock type
Highly laminated roof strata	10%~20%	Mudstone
Stronger more massive strata	50% or greater	Sandstone

Table 8. Bulking factor of rock mass suggested by the Korea Coal Corporation (1997)

Rock type	Bulking factor	Average
Sandy shale	50%~100%	70%
Shale	40%~50%	40%
Coal seam	40%~50%	40%

입자들이 B set보다 많이 채웠기 때문에 각 set별로 초기 부피팽창률의 차이가 나타나는 것이다. 하지만 하중을 가하기 전, 편마암, 석회암 및 셰일의 입도를 달리하여 쌓아도, 대상 시료들의 초기 부피팽창률은 85.90~121.80%의 범위인 것을 확인 할 수 있었다.

각 set별로 산정한 초기 부피팽창률 값들은 기존에 제시되었던 화약발파와 현장측정치로 얻은 부피팽창률 값들(Table 7~10)과 비교할 때, 암종별로 일정 범위에 포함시키기는 명확하지 않다. 따라서 응력 조건을 배제한 상태, 즉 파쇄입도에 의한 부피팽창률을 산정할 때 측정된 입도를 함께 제시해야 한다고 사료된다.

Table 9. Bulking factor of rock mass suggested by Korea Construction Standardization (1996)

Classification	Bulking factor	Rock type
Weathered rock	30%	-
Soft rock	40% (50%)	Sandstone
Moderately rock	60%	Limestone
Hard rock	70%	Andesite, Granite
Extremely hard rock	100%	Quartzite

Table 10. Bulking factor of rock mass suggested by Excavation Handbook (Church, 1981)

Rock type	Bulking factor
Hard coal	70%
Conglomerate	33%
Sandstone	61%
Shale	50%
Slate	77%
Clay(moistness)	40%

### 5.2 응력에 따른 편마암, 석회암 및 셰일의 부피팽창률

편마암, 석회암 및 셰일의 각 set를 만능재료시험기로 일정한 하중을 가하여 응력에 따른 부피팽창률 실험을 한 결과 암종별 각 set에서 차이점을 분석할 수 있었다.

응력과 부피팽창률의 관계에 영향을 미치는 것은 초기 부피팽창률에서 분석한 것처럼 쌓는 순서에 의해 형성되는 공극의 부피 차이이다. 큰 입자들에 의해 형성된 공극의 부피는 전체 공극의 부피에서 차지하는 비율이 크기 때문에 미끄러짐 현상과 재파쇄 현상이 일으키는 주된 변위 발생 공간이 된다. 따라서 이러한 공극들이 차지하는 비율이 클수록 부피변화가 크게 발생하게 되며 A, B, C set 중에서 큰 입자들에 의해 형성된 공극의 부피는 A set가 가장 크다. 결론적으로 각 set에 응력을 가하면 A set의 부피변화가 가장 크고, C set의 부피변화가 가장 작게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 10은 편마암의 각 set에서 상부 실험틀의 변위에 따른 응력과 A set의 변화 양상을 나타낸 모식도이다. 파쇄압을 작은 입자부터 쌓았기 때문에 상부 큰 입자에 의한 공극이 많이 형성되었고, 응력이 가해지면서 점차적으로 큰 입자들의 파쇄와 미끄러짐 현상이 복합적으로 발생하여 부피가 감소되었다. 위에서 언급한 것처럼 같은 응력 하에서, 결과적으로 상부 실험틀의 변위가 B set와 C set보다 크게 발생하였기 때문에 부피변화도 그만큼 차이가 나타난 것이다. 마찬가지로 석회암(Fig. 11)과 셰일(Fig. 12)도 각 set별로 편마암처럼 유사한 차이를 보였으며, 압중별 A set의 상부 실험틀의 변위차이는 13.20 mm이상 입자가 50%이상 이었던 셰일이 가장 크게 나타났다.

Fig. 14~16과 Table 11은 편마암, 석회암 및 셰일의 각 set에 하중을 가하여 응력의 증가에 따른 부피팽창률을 산정한 결과이다. 압중별로 파쇄암의 적재 순서를 반대로 한 A set와 B set를 비교하였을 때 초기 부피팽창률이 높은 것은 A set이지만, 편마암과 셰일은 약 2 MPa 정도, 석회암은 약 1 MPa 정도에서 B set보다 낮아지며 점차 응력이 가해지면서 일정하게 감소하는 양상을 보이고 있다.

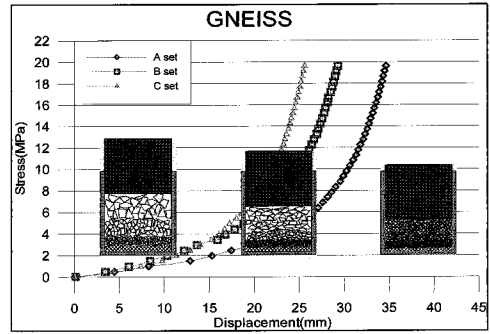


Fig. 10. Relationship between stress and displacement for each set of Gneiss

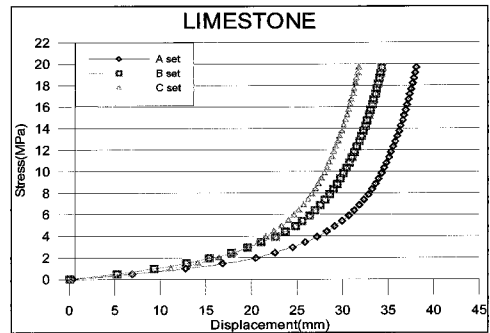


Fig. 11. Relationship between stress and displacement for each set of Limestone

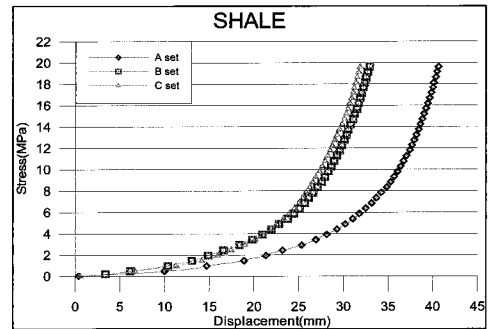
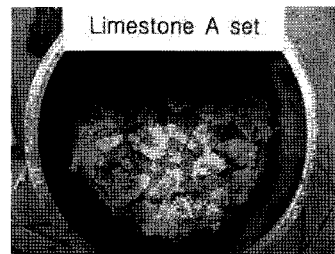


Fig. 12. Relationship between stress and displacement for each set of Shale



(a) before



(b) after

Fig. 13. Photograph of before and after test of A set of Limestone



또한 0 MPa에서 20 MPa까지 암종별 A set를 분석해 본 결과 세일의 부피팽창률의 변화가 가장 크게 나타났다. 이것은 세일의 파쇄암 중에서 전체의 50%이상을 차지하는 13.20 mm이상의 입자들에 의해 형성된 공극의 부피에 의한 것으로 분석되었다.

결과적으로 실험에서 구한 각 암종별 부피팽창률은 응력과 공극의 부피 형성에 관여하는 파쇄암의 입도별 비율, 적재 형태에 따라 파쇄암들 상호간에 공극을 채우는 영향이 큰 것을 분석할 수 있었다.

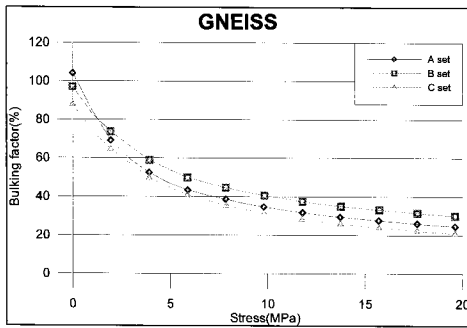


Fig. 14. Relationship between bulking factor and stress for Gneiss

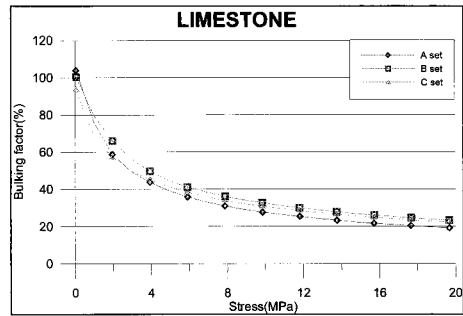


Fig. 15. Relationship between bulking factor and stress for Limestone

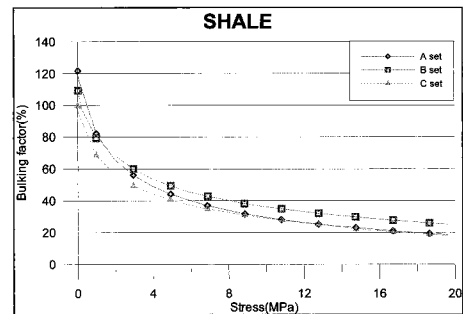


Fig. 16. Relationship between bulking factor and stress for Shale

Table 11. Bulking factors according to stress for Gneiss, Limestone and 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
Difference between max. (=19.63) and min. (=0.00) stresses	79.70	67.50	64.98	85.60	77.20	71.50	103.20	84.20	81.40

## 6. 결론

본 연구에서는 지반침하 거동특성 분석을 위해 암반의 부피팽창률에 대한 실내실험을 계획하고 실시하였다. 실내실험은 지반침하 발생시 파쇄암들의 전체적인 거동 중에서 파쇄암들이 쌓인 중간부분에 대한 실험으로서, 일정 응력 하에서 편마암, 석회암 및 세일의 파쇄암들에 대한 부피팽창률에 대하여 분석하였다.

초기 부피팽창률을 통하여 입자가 쌓이는 형태(A, B, C set)에 따른 부피팽창률을 비교 분석 하였고, 그 차이에 따른 편마암, 석회암 및 세일의 초기 부피팽창률은 85.90%~121.80%의 범위를 나타냈다. 이러한 결과는 기존에 제시되었던 부피팽창률과는 상이한 결과라고 할 수 있으며, 파쇄입자들의 입도와 형상이 다르기 때문에 단순히 파쇄 입자들이 쌓이는 형태로만 부피팽창률을 산정하는 것은 무리가 있다고 사료된다. 따라서 쌓이는 형태에 의해 부피팽창률을 분석한다면, 파쇄암의 입도와 각각의 입도가 암석 전체에 차지하는 비율을 함께 고려해야 할 것이다. 이는 결국 암석 전체에 대한 파쇄암의 크기 효과(scale effect)와도 직결되는 문제로서, 본 연구에서는 실내시험이 갖는 유한성을 고려하여 시험편의 크기효과에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 못하였다. 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 보완되어야 할 것으로 사료된다.

또한 일정 응력 하에서의 부피팽창률은 이런 입도 차이에 의한 영향도 있지만, 본 연구에서 분석된 결과와 같이 파쇄암에 일정 응력 이상이 작용하면, 파쇄암의 입자들 상호간에 재파쇄 현상과 미끄러짐 현상으로 공극이 채워지면서 부피 변화가 감소하게 되고 점차적으로 무결암에 가까운 거동을 보이게 된다. 따라서 위의 두 가지 요소와 응력과의 관계를 통하여 부피팽창률을 산정해야 할 것으로 판단된다.

초기 부피팽창률을 지반침하지역에 적용하는 것보다 본 연구의 실내실험으로 접근한 방법처럼 현장에 작용하는 응력을 고려하고, 지질구조상의 암반 종류와 특성이 분석된다면 보다 정확한 부피팽창률 산정을 기대할 수 있을 것이다.

본 연구에서 분석된 응력에 따른 부피팽창률 결과값들은 더 많은 실내실험과 분석을 통하여 통계적으로 암종별 부피팽창률을 산정할 수 있도록 보완되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지질재해 피해평가기술 및 대응기술 실용화 사업’ 과제의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. 최성용, 전양수, 박의섭, 정용복, 천대성, 2005, 지반침하 메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제15권 제3호, pp. 195-212.
2. Piggot, R. T. & Eynon, P., 1997, Ground Movements Arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings, Large Ground Movements & Structures, Pentech., pp. 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, pp. 451-476
5. University of New South Wales, 1995, Strata Controls for Coal Mine Design, No. 7, 5p.
6. 석탄산업합리화사업단, 1997, 폐광지역 지반침하 메커니즘 및 침하방지공법에 관한 연구, 기술총서, No.6, 292p.
7. 건설표준품셈, 1996, pp. 98-99.
8. Church, 1981, Excavation Handbook, McGraw Hill Book co.



**이 희 중**

2007년 강원대학교 지구시스템공학과 공  
학사  
Tel: 033-256-6256  
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 지구시스템공학과 석사  
과정



**정 용 복**

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학박사  
Tel: 042-868-3097  
E-mail: ybjung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원



**최 성 응**

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사  
Tel: 033-250-6253  
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과  
교수