

## 축소모형실험을 위한 기초 연구

양형식<sup>1)\*</sup>, 하태욱<sup>2)</sup>, 김원범<sup>2)</sup>, 김종관<sup>2)</sup>, 류창하<sup>3)</sup>, 최병희<sup>3)</sup>

### A Basic Study for Scaled Model Test

Hyung-Sik Yang, Tae-Wook Ha, Won-Beom Kim,  
Jong-Gwan Kim, Chang-Ha Ryu and Byung-Hee Choi

**Abstract** : This study was conducted to investigate suitable material properties for scaled model test. Unconfined compressive strength of each material was obtained through former studies. UCS calculated from scale factor and former studies results were compared. Two results had a similar tendency, cement mortar is better than plaster for scaled model test.

**Key words** : scaled model test, scale factor

**초 록** : 본 연구는 축소모형실험을 위한 적절한 재료를 찾기 위해 이루어졌다. 각 재료의 일축압축강도는 이전의 연구를 통해 얻어졌으며, 축소율을 이용하여 계산된 강도와 비교하였다. 두 결과는 유사한 경향을 나타냈으며, 시멘트 모르타르가 석고보다 더 적합한 것으로 나타났다.

**핵심어** : 축소모형실험, 축소율

## 1. 서 론

군집암반에서 정밀제어발파에 의한 손상영역을 평가하기 위해 축소모형실험을 실시하여 파괴유형을 검토하고자 한다. 현지암반의 발파에 의한 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때 현장성을 충분히 재현할 수 있도록 하기 위해서는 현장의 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사용하는 것이 매우 중요하다. 대상지반의 물리적 특성을 충분히 나타낼 수 있는 재료를 찾기 위해서는 동일재료에 대해서 다양한 조건으로 많은 실험과정이 필요하게 된다. 따라서 본 연구

에서는 기존의 연구결과를 토대로 가장 근접한 특성을 도출하고자 한다.

축소모형실험을 위한 모형재료로 시멘트, 석고, 아크릴의 세 가지 재료에 대해서 각각의 재료별 실험목적에 부합하는 재료를 선정하고, 축소율에 따른 재료의 특성이 기존의 연구결과와 부합하는 재료를 찾고자 한다. 이를 위해서 시멘트 5종, 석고 2종에 대해서 물성조사를 하였고, 암반을 해당 재료로 된 축소모형으로 축소했을 경우 강도 등의 특성을 살펴보았다.

## 2. 연구내용

### 2.1 차원해석

세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 할 때 축소율을 산정할 때에는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1966). 특정한 실험목적에 의해 1 : 1 또는 특정한 축소율을 고려하여 상

1) 전남대학교 건설지구환경공학부  
2) 전남대학교 지구시스템공학과  
3) 한국지질자원연구원

\*Corresponding author : hsyang@chonnam.ac.kr

접수일 : 2007년 6월 11일

게재승인일 : 2007년 6월 21일

사법칙을 유도해야 한다. 일반적인 상사법칙은 기본차원을 기준으로 나머지 물리량들을 조합하게 되며, 질량기준의 상사법칙, 시간기준의 상사법칙이 있으며, 물리량을 기준으로 가속도 기준의 상사법칙이 있다.

축소율을 결정하는 Hobbs의 이론은 물체에 작용하는 중력가속도는 언제나 일정하게 작용한다는 가정 하에 중력가속도의 축소율을 1로 하고 시간의 축소율을 산정하였다(정도영 외, 2004). 실제 모델은 45 mm의 천공경을 가지는 터널단면의 최외곽공 부분으로 가정하였다. 천공경(45 mm)을 축소대상으로 하여 축소모형실험에서는 천공경을 9 mm로 선정하였고, 천공경에 대한 축소율은 표 1과 같이 계산된다. 대상암반은 1,000~2,500 kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 가지는 화강암이다. 본 연구에서는 암석의 강도를 1,750 kgf/cm<sup>2</sup>으로 적용하였고, 대상암반의 밀도는 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 시멘트모르타르는 2 g/cm<sup>3</sup>, 석고모르타르는 1.72 g/cm<sup>3</sup>으로 정하였다.

표 1. 길이의 축소율

실제모델	축소모형	길이의 축소율
45 mm	9 mm	1/5

#### 시멘트

축소모형블록의 길이가 20 cm일 경우 길이[L]의 축소율은 1/10이 된다. 다음으로 시간[T]에 대한 축소율을 결정하는데 중력가속도 일정 개념이 사용된다. 중력가속도[LT<sup>-2</sup>]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식(1)에 의하여 시간[T]의 축소율은 1/3.16이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \quad (1)$$

대상암반과 시멘트 모르타르의 밀도비로부터 밀도[ML<sup>-3</sup>]의 축소율은 식(2)와 같이 계산된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{2}{2.65} = \frac{1}{1.32} \quad (2)$$

길이[L]의 축소율이 1/10이므로, 질량[M]의 축소율은 식(3)과 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{1.32} \times L^3 = \frac{1}{1.32} \times \left(\frac{1}{10}\right)^3 = \frac{1}{1,320} \quad (3)$$

강도[ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]의 축소율은 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 모두 결정되었으므로 식(4)와 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{1,320}\right)}{\left(\frac{1}{10}\right) \times \left(\frac{1}{3.16}\right)^2} = \frac{1}{14.4} \quad (4)$$

이상의 결과를 요약하면 표 2와 같으며 다른 길이의 축소율에 대해서도 같은 방법으로 계산하면 된다.

표 2. 시멘트 모형의 축소율

물성	축소율			
	길이	1/10.0	1/6.67	1/5.00
시간	1/3.16	1/2.58	1/2.24	1/2.00
질량	1/1,320	1/393	1/166	1/84.8
밀도	1/1.32	1/1.32	1/1.32	1/1.32
압축강도	1/13.2	1/8.83	1/6.62	1/5.30
중력가속도	1.00	1.00	1.00	1.00

#### 석고

석고의 경우도 시멘트와 같이 중력가속도의 축소율을 1로 하고 각각의 경우에 대하여 축소율을 산정하였다. 밀도의 차로 인하여 축소율은 표 3과 같이 시멘트의 축소율과는 다르게 산정된다.

표 3. 석고 모형의 축소율

물성	축소율			
	1/10.0	1/6.67	1/5.00	1/4.00
길이	1/10.0	1/6.67	1/5.00	1/4.00
시간	1/3.16	1/2.58	1/2.24	1/2.00
질량	1/1,540	1/456	1/192	1/98.5
밀도	1/1.54	1/1.54	1/1.54	1/1.54
강도	1/15.4	1/10.3	1/7.70	1/6.16
중력가속도	1.00	1.00	1.00	1.00

2.2 모형재료의 특성

본 연구에서는 시멘트, 석고, 아크릴을 축소모형의 재료로 선정하였다. 각각의 재료별 특성을 살펴보면 다음과 같다.

시멘트의 경우는 국내 4개사의 포틀랜드 시멘

트와 1개사의 특수시멘트 총 5종을 선택하였다. 포틀랜드 시멘트의 KS 기준치는 28일 재령강도는 290kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 7일 강도는 200kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 3일 강도는 130kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 되어있다. 시중에 판매되는 시멘트는 기준치를 훨씬 초과하는 것으로 조사되었다. 시멘트 강도와 모르타르의 압축강도와의 관계를 규명하기 위한 연구에서 물/시멘트 배합비에 따라서 압축강도가 22.2MPa에서 33.4MPa까지의 결과를 얻었으며, 시멘트 강도가 증가할수록 모르타르의 압축강도도 증가하는 것으로 나타났다(최세진 외, 2004). 또한 다른 연구에서는 표 4와 같이 물/시멘트의 배합비를 달리 하였으며, 표 5에서 보듯이 탄성계수, 포와송비 등의 물성도 다양한 결과를 보여주었으며 압축강도는 148~911 kgf/cm<sup>2</sup>의 결과를 나타내었다(오선환 외, 2000).

표 4. 물, 시멘트, 모래 배합비(오선환 외, 2000)

물/시멘트비(%)	물		시멘트		모래	
	kg	ratio	kg	ratio	kg	ratio
25	5.23	0.25	20.92	1.0	21.16	1.01
30	5.41	0.3	18.05	1.0	23.01	1.27
35	5.54	0.35	15.83	1.0	24.25	1.54
40	5.94	0.4	14.87	1.0	24.27	1.63
50	5.66	0.5	11.34	1.0	27.91	2.46
60	5.63	0.6	9.36	1.0	29.64	3.17
70	5.99	0.7	8.51	1.0	29.43	3.46

표 5. 물/시멘트 배합비에 따른 물성(오선환 외, 2000)

물/시멘트비(%)	일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수(GPa)	포와송비
25	818~911	19.1~21.5	0.183~0.383
30	726~776	17.1~24.4	0.164~0.338
35	624~693	16.8~22.4	0.181~0.368
40	555~565	15.3~20.8	0.115~0.257
50	353~378	14~18.5	0.178~0.279
60	234~250	8.1~10.7	0.159~0.277
70	148~187	6.5~8.96	0.107~0.252

석고는 가격이 저렴하고 경화시간이 짧을뿐더러 콘크리트와 같이 취성을 가지고 있는 재료이다. 또한 모래, 석고, 물의 혼합물에서 모래와 석고의 배합비 및 건조로 온도에 따라 다양한 강도를 갖는 재료를 구성할 수 있는 장점이 있다. 석고는 크게 두 가지로 분류되는데 황산칼슘 이수염을 고온에서 구워 수분을 제거하여 황산칼슘 반수염의 상태로 만든 것을 말한다. 이때 수분을 제거하는 과정에 따라 두 종류의 석고가 만들어지는데 소석고와 경석고가 생산된다. 경석고 혼합물은 소석고에 비해 축소된 모형의 재료로서 사용하기에는 그 강도가 너무 강하여 소석고를 모형재료로 선택하였다. 기존의 연구결과에서 석고혼합물의 강도 특성은  $3.45 \sim 6.90(\text{kgf/cm}^2)$ 의 결과를 나타내었으며, 다른 연구에서는 표 6과 같이 8단계의 배합비에 따라서  $0.412\text{MPa}$ 에서  $2.19\text{MPa}$ 의 강도값을 나타내었다.

표 6. 배합비에 따른 물성(채희문, 2004)

시료 번호	모래:석고:물의 비율	일축압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	밀도 ( $\text{g/cm}^3$ )
1	100:100:100	2.19	0.390	1.77
2	110:90:100	1.64	0.305	1.72
3	120:80:100	1.29	0.214	1.64
4	130:70:100	1.03	0.153	1.76
5	140:60:100	0.909	0.136	1.82
6	150:50:100	0.534	0.102	1.74
7	160:40:100	0.470	0.0847	1.77
8	170:30:100	0.412	0.0847	1.76

아크릴의 일반적인 강도특성은 인장강도는  $735\text{kgf/cm}^2$ , 휨강도는  $1,120\text{kgf/cm}^2$ , 압축강도는  $1,260\text{kgf/cm}^2$ 로서 차원해석을 통해서 산정된 축소율을 이용하여 실험목적에 부합하는 강도 등의 특

성을 구현하기 어렵기 때문에 임의의 크기의 모형을 제작하였다.

### 3. 축소된 강도 산정

실제모형이 되는 암반의 강도인  $1,750\text{kgf/cm}^2$ 을 표 4와 표 5의 강도의 축소율을 이용하여 산정하였다. 시멘트의 경우 강도의 축소율은 길이의 축소율에 따라서 1/13.2, 1/8.83, 1/6.62, 1/5.30의 값을 가지며, 석고의 경우에는 1/15.4, 1/10.3, 1/7.70, 1/6.16이다. 축소된 압축강도는 표 7과 같다.

표 7. 재료별 축소된 압축강도

재료	길이의 축소율	축소율			
		1/10.0	1/6.67	1/5.00	1/4.00
압축강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	시멘트	132	198	264	330
	석고	114	170	227	284

시멘트의 경우 길이의 축소율에 대해 압축강도가  $132 \sim 330(\text{kgf/cm}^2)$ 으로 표 5에서 물/시멘트비를 50%에서 70%의 경우에 유사한 결과를 보여주고 있으며 동일 실험조건일 경우 적은 횟수의 실험으로 원하는 강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 석고의 경우 압축강도는  $114 \sim 284(\text{kgf/cm}^2)$ 로 표 6의 결과와 비교했을 때 최대치인  $2.19\text{MPa}$ 에 비해서도 5배 이상의 큰 수치를 나타내며 이를 통해서 모래/석고 비에서 석고의 비율을 더욱 높일 필요가 있으며 물의 배합비 역시 고려해야 할 것으로 판단된다. 또한 축소모형의 크기도 조정이 되어야 한다. 표 7의 결과와 기존의 연구결과를 토대로 시멘트를 이용한 축소모형이 실험의 목적에 좀 더 부합하는 재료임을 알 수 있다.

### 4. 결론

이론적으로 산정된 축소율을 이용하여 강도의

축소율을 산정하고 기존의 연구결과에서 시멘트와 석고의 압축강도 특성을 파악한 축소율을 이용하여 계산된 압축강도가 기존의 연구결과와 부합되는지를 살펴보았다. 축소모형실험을 위한 모형의 재료로 시멘트, 석고, 아크릴의 특성을 살펴보았으며 이론적인 축소율을 적용하여 계산된 압축강도를 기존의 연구결과와 비교하였다. 동일 실험조건으로 수행한다면 시멘트의 경우 유사한 결과를 얻을 것으로 판단되며 석고의 경우는 배합비, 모형의 길이 등을 조정하여 실험을 수행해야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)'의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 오선환, 김형수, 장보안, 서만철, 2000, 시멘트 모르타르 재료의 동탄성계수와 정탄성 계수 비교 연구, 지구물리, Vol. 3, No. 2, pp. 127-138.
2. 정도영, 양형식, 2004, 폭원의 축소율 산정과 축소모형 실험에의 적용, 화약발파, Vol. 22, No. 4, pp. 1-6.
3. 채희문, 2004, 축소모형실험 및 입자결합모델 해석에 의한 구조물 발파해체 거동모사, 서울대학교 석사학위논문, pp. 7-17.
4. 최세진, 정용, 박창수, 오복진, 여병철, 김무한, 2004, 모르타르의 압축강도에 미치는 시멘트 강도의 영향에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 춘계학술발표회 논문집, Vol. 16, No. 1, pp. 220-223.
5. Hobbs, D.W., 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 237-251.

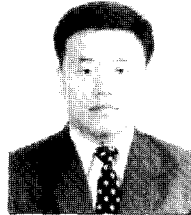


**양형식**

전남대학교 건설지구환경공학부 교수

전화 : 062)530-1724

E-mail : hsyang@jnu.ac.kr



**김종관**

전남대학교 대학원  
지구시스템공학과 석사과정

전화 : 062)530-1720

E-mail : 00kjg@hanmail.net



**하태욱**

전남대학교 대학원  
지구시스템공학과 박사수료

전화 : 062)530-1720

E-mail : htw8646@nate.com



**류창하**

한국지질자원연구원  
지반안전연구부

전화 : 042)868-3236

E-mail : cryu@kigam.re.kr



**김원범**

전남대학교 공과대학 조교

전화 : 062)530-1720

E-mail : hp96042345@nate.com



**최병희**

한국지질자원연구원  
지반안전연구부

전화 : 042)868-3237

E-mail : bhchoi@kigam.re.kr