

단일공 발파 축소모형실험

김종관 (전남대학교 대학원 지구시스템공학과)

양형식 (전남대학교 건설지구환경공학부)

1. 서론

터널 및 지하공간 공사에서 암반굴착을 위한 발파작업은 폭약의 폭발력을 이용한 암반 파쇄 효과의 극대화과 굴착면 주변의 암반손상 및 여굴 최소화라는 조건을 동시에 충족시켜야 한다. 폭약으로부터 발생하는 에너지가 암반으로 전달되는 과정은 암반의 파괴나 손상과 관련하여 매우 중요하면서도 명확히 파악되지 않은 부분이다.

발파는 존재하는 구조를 해체하는 특성이 있으므로 실험의 재현이 대단히 어렵다. 현장에서 발파 실험을 하면 종종 막장을 망치게 되고 이후의 시공에 큰 어려움을 초래하기 때문에 현장 실험 자체가 어렵다. 그러므로 축소모형실험이 대안이 된다.

현지암반의 발파에 의한 변형거동을 연구하기 위해 축소모형실험을 정량적으로 수행하기 위해서는 현장의 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 각 변수별로 축소율을 산정하고 이에 부합하는 재료를 선택하여야 한다. 그동안 축소모형실험에서는 적절한 폭력을 가진 폭원을 구하기가 어려워 뇌관을 주로 사용하였는데, 뇌관만으로 폭원을 삼는 경우 적절한 축소율로 맞추기가 어려워 사실상 정량적인 해석이 어려웠다.

본 연구에서는 뇌관을 이용한 폭원의 단점을 해결하기 위해 도폭선의 길이를 조절하여 폭력을 조절하는 방안을 제시하였으며 간단한 모형의 축소모형실험을 통하여 타당성을 검토하였다. 그리고 산정된 폭발력을 역산하여 원지반의 폭력 및 장약량과 비교하여 보았다.

2. 축소율 산정

발파에 있어서 축소모형을 이용한 연구는 시간적, 공간적인 제약을 최소화시키면서 실제 모형(prototype model)의 역학적 특성에 상사되고 발파 전·후의 상태에 대한 자료를 제시해 왔다. 축소모형은 재료, 형태, 기폭제에 따라 다양한 방법으로 연구되어 왔다.

발파에 사용된 축소모형 재료는 화강암(granite), 사암(sandstone), 대리석(marble), 석고(gypsum), 시멘트모르타르(cement mortar), 콘크리트(concrete), PMMA(polymethyl methacrylate) 등이 있다. 형태에 따라 판형(plate), 블록(block) 등으로 제작되었고, 기폭제로는 폭약, 도폭선, 파쇄제, 뇌관 등이 사용되어 있다. 이들 축소모형은 재료, 형태, 기폭제에 따라 다양한 발파 분야에 적용되었으며 연구되어 왔다(이상은, 1996).

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 축소율

을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969). 특정한 실험목적에 의해 1:1 또는 특정한 축소율을 고려하여 상사법칙을 유도해야 한다. 일반적인 상사법칙은 기본차원을 기준으로 나머지 물리량들을 조합하게 되며, 질량기준의 상사법칙, 시간기준의 상사법칙이 있으며, 물리량을 기준으로 가속도 기준의 상사법칙이 있다(Kumar et al., 1997).

축소율을 결정하는 Hobbs의 이론은 물체에 작용하는 중력가속도는 언제나 일정하게 작용한다는 가정 하에 중력가속도의 축소율을 1로 하고 시간의 축소율을 산정하였다(정도영과 양형식, 2004). 본 연구에서도 같은 방법으로 축소율을 산정하였다.

길이에 대한 축소율은 편의상 1/3로 하였다. 중력가속도 $[LT^{-2}]$ 는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식(1)에 의하여 시간[T]의 축소율을 계산하면 1/1.73이 된다.

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

길이[L]의 축소율이 1/3, 대상암반의 밀도 2.65g/cm³, 시멘트모르타르의 밀도 2g/cm³이므로 암석과 시멘트모르타르의 밀도비는 $\frac{1}{1.32}$ 이므로, 질량[M]의 축소율은 식(2)와 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{1.32} \times L^3 = \frac{1}{1.32} \times \left(\frac{1}{3}\right)^3 = \frac{1}{35.64} \quad (2)$$

강도 $[ML^{-1}T^{-2}]$ 의 축소율은 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 모두 결정되었으므로 식(3)과 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{35.64}\right)}{\left(\frac{1}{3}\right) \times \left(\frac{1}{1.73}\right)^2} = \frac{1}{3.97} \quad (3)$$

화약의 폭발은 일 또는 에너지 개념으로서 폭발에너지인 폭발열로 결정하였고, 그에 대한 차원은 $[ML^2T^{-2}]$ 이며 축소율은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{M \times L^2}{T^2} = \frac{\left(\frac{1}{35.64}\right) \times \left(\frac{1}{3}\right)^2}{\left(\frac{1}{1.73}\right)^2} = \frac{1}{106.93} \quad (4)$$

3. 축소모형실험

3.1 실험조건

산정된 축소율에 적합한 천공경과 강도를 갖는 축소모형을 제작하였다. 그림 1과 같이 축소모형은 가로, 세로, 높이가 50 cm인 정방형 시멘트 모르타르 블록을 제작하였다. 물, 시멘트, 모래의 배합비를 0.4 : 1 : 1.25로 하여 그림 2의 거푸집을 이용하여 블록의 형태를 만든 뒤에 부직포에 물을 적셔서 블록에 균열이 생기지 않으면서 양생이 잘 되도록 하였다. 실험 이후 파괴의 양상의 비교를 위해 약 2 cm 간격으로 선을 그어 손상영역의 범위를 파악하는데 용이하게 하였다.

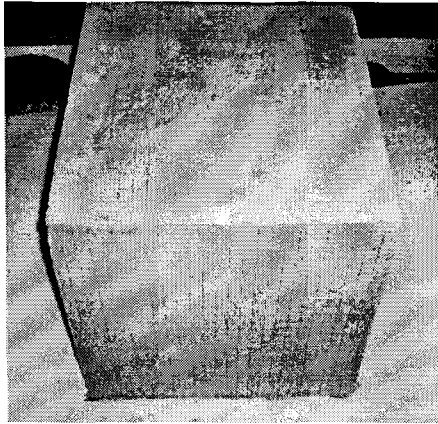


그림 1. 시멘트모르타르 블록

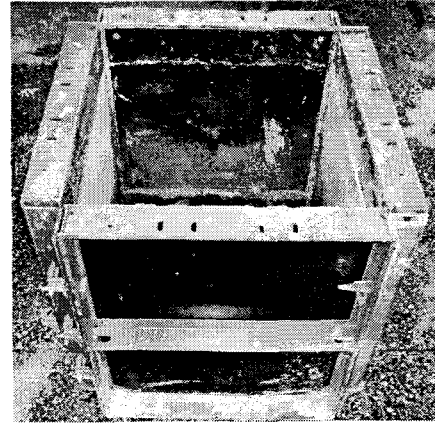


그림 2. 거푸집

실험의 안전을 위하여 직경 5 mm의 철망을 이용하여 그림 3과 같이 2.5×3×2 m 규모의 실험장을 제작하였고, 내부에 5 cm 두께의 스티로폼을 부착하고 바닥부는 모래를 10 cm 정도 쌓아 소음, 진동 및 비산의 위험을 최소화하였다.

실험장 내부에 블록을 위치시킨 후 직경 15 mm의 드릴을 이용하여 천공을 하였다. 실험의 목적인 저항선의 길이에 따른 발파로 인한 응력파의 전파 양상 및 균열 양상의 파악을 위해 그림 4와 같이 단위길이의 2, 3, 4배를 가지는 지점에 천공을 하였다.

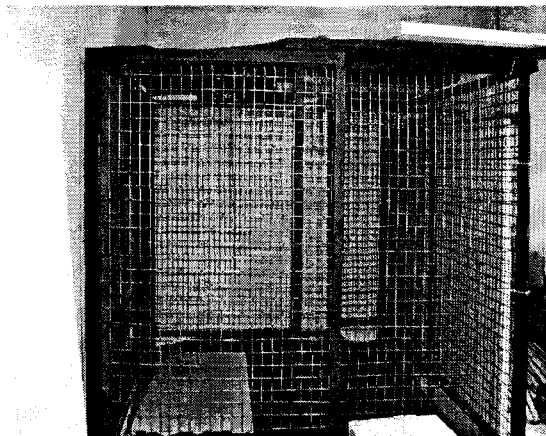


그림 3. 실험장

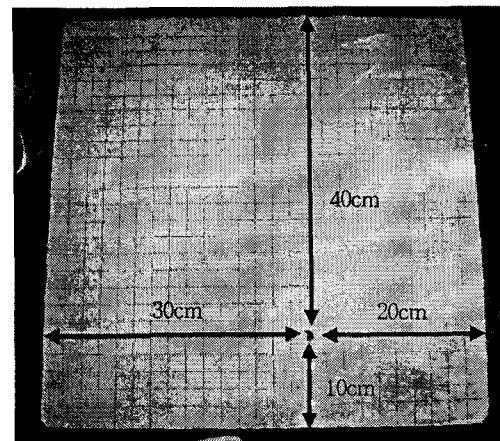


그림 4. 천공모습

본 연구에서는 표 1과 같이 5가지 경우에 대해 축소모형 실험을 실시하였다. 약량의 경우 장약장과 전색장을 더한 길이에 해당하는 약량을 최대로 하고, 장약장의 길이의 약량을 최소로 하여 하나의 값이 아닌 범위값으로 표시하였다.

표 1. 발파제원

CASE	1	2	3	4	5
도폭선종류	10g/m	10g/m	10g/m	10g/m	10g/m
약량(g)	1.5~1.75	1.55~1.8	1.6~1.85	1.75~2	2~2.5
천공장(cm)	17.5	18	18.5	20	25
공경(mm)	15	15	15	15	15
약경(mm)	5	5	5	5	5
장약장(cm)	15	15.5	16	17.5	20
전색장(cm)	3.5	2.5	2.5	2.5	5
강도(kgf/cm ²)	229	237	267	277	297

3.2 폭원

기존의 축소모형실험 연구에서는 폭력의 최소단위로 뇌관을 주로 사용하였다. 그러나 뇌관의 경우 1개의 위력이 강하고 폭력조절 또한 불가능하다는 고질적인 문제점을 안고 있어 본 연구에서는 모델의 외부에서 뇌관을 발파시켜 그 폭력이 모델에 직접 작용하지 않도록 하였으며 폭력은 모델 내에 장치된 도폭선의 길이에 비례하도록 하였다. 도폭선은 길이 조절을 통해서 폭력의 조절이 용이한 반면에 공의 내부에서 외부까지 연결되어야 하므로 폭약을 이용한 발파와는 차이점이 있다. 뇌관의 폭발력이 모델에 직접 영향을 미치지 않아야 하고, 도폭선의 폭력이 모델에 폭굉압으로 작용하지 않아야 하며, 폭발과정 중에 전색부를 통해서 폭굉압이 모델에 작용하며 먼저 파괴가 되지 않도록 하여야 한다. 이를 위하여 도폭선은 공벽에 닿지 않도록 하여야 한다.

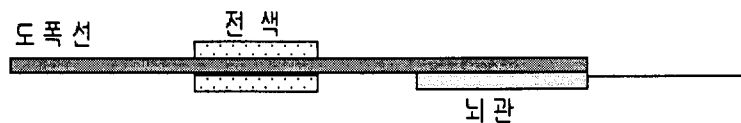


그림 5. 폭원의 개념도

도폭선 자체의 강성은 대단히 떨어지므로 공의 중앙에 위치시키기 위한 도구가 필요하다. 또한 일반적인 모래 전색은 불가능하므로 그림 5에서 보듯이 전색의 역할을 할 수 있는 장치를 마련하고자 하였다. 첫 번째로 실험하고자 하는 폭력을 가지는 만큼의 도폭선을 절단한다. 둘째, 도폭선이 공의 중앙에 위치하도록 일정한 강성을 가질 수 있도록 가는 철사를 이용하여 도폭선을 고정시킨다. 셋째, 도폭선이 공벽과 닿지 않으면서 전색물을 사용할 수 있는 공간을 만들기 위해서 시중에서 흔히 볼 수 있는 OHP 필름을 이용하여 원통의 관을 제작한 후에 철사를 부착한 도폭선을 관의 중앙에 위치시키게 된다. 마지막으로 전색물의 역할을 할 수 있는 재료인 실리콘 수지를 도포하였다. 도폭선을 장악한 후에 그림 6과 같이 공 주위에 실리콘 수지를 도포하였고, 그림 7은 소음 및 비산방지를 위해 방호를 한 모습이다.

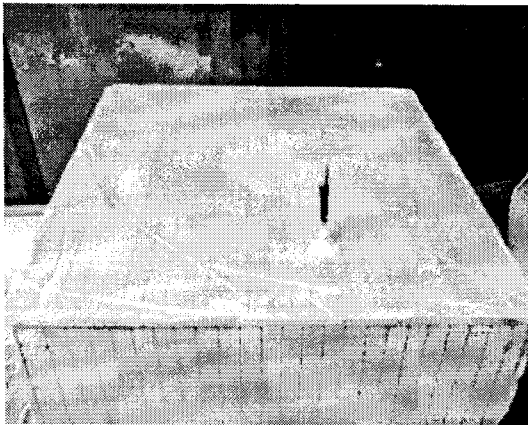


그림 6. 전색 후 모습

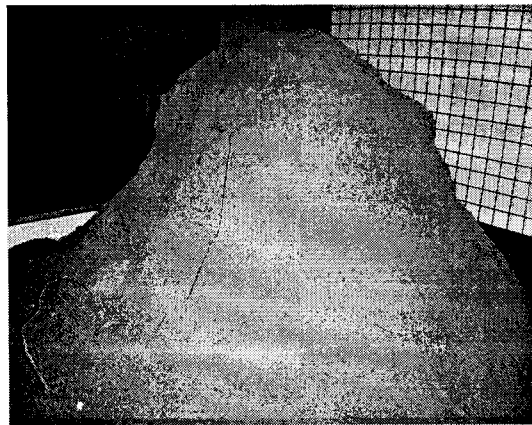


그림 7. 방호 모습

4. 실험결과

그림 8은 시멘트모르타르 블록의 균열 및 파괴양상을 나타낸다. 실험결과 CASE 1의 경우에는 블록이 파괴되지 않았으며, CASE 2의 경우에는 공경으로부터 자유면까지의 최단거리 쪽으로 균열이 발생하였고 CASE 3, 4, 5는 저항선의 비가 1배, 2배, 3배 쪽으로 시멘트 모르타르 블록이 파괴되었으며 장악량이 증가할수록 파괴정도가 크게 나타났다.

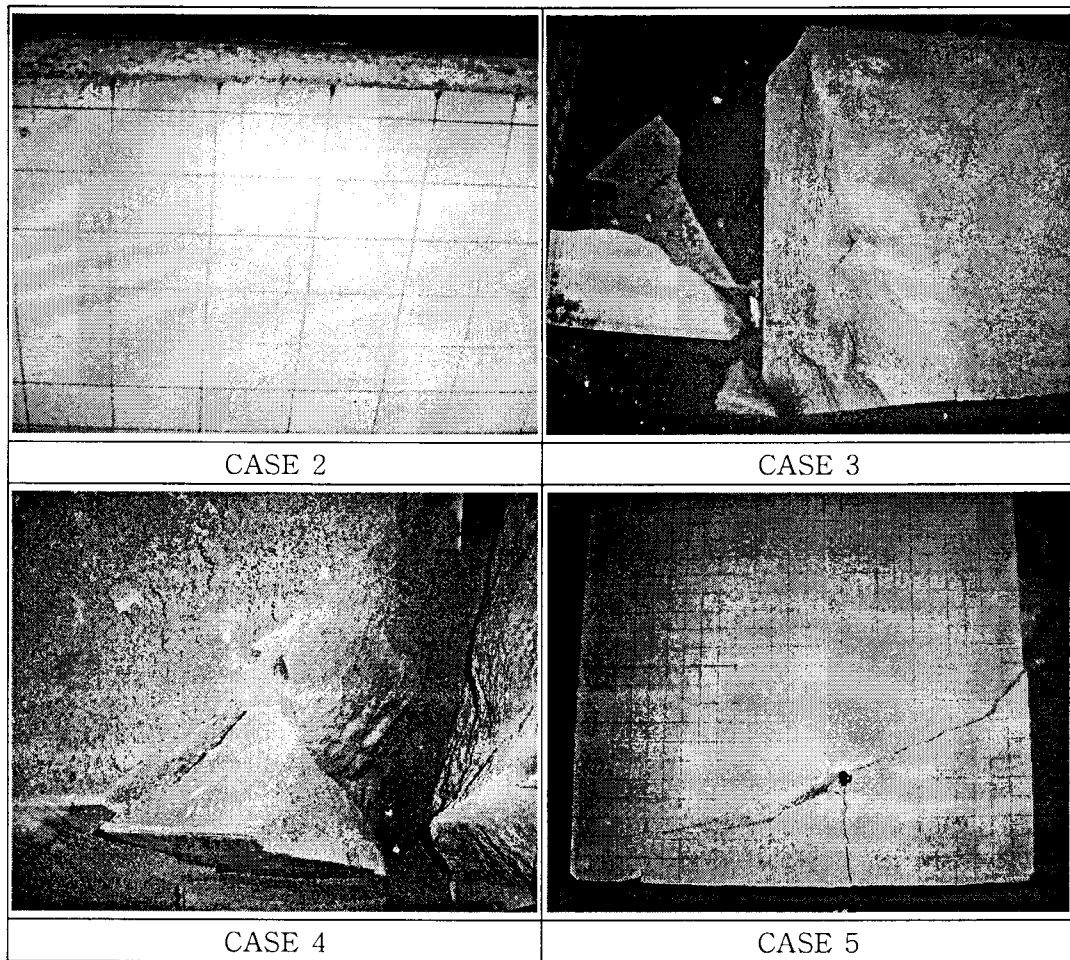


그림 8. 시멘트모르타르 블록의 파괴양상

길이에 대한 축소율을 적용하고 역산하여 모델에서의 폭발열을 계산하였으며, 축소율을 적용하여 실제 발파시의 폭발력 및 장약량을 산정하였다.

CASE 2에 대하여 길이 축소율을 적용할 경우 실제 암반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 54 cm, 장약장 46.5 cm, 전색장 7.5 cm로 간주할 수 있으며, 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 165.7-192.5 g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450kcal/kg일 경우 폭발열은 240.3~279.1kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지140.3~179.1kcal의 FINEX 2.2~2.8개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540kcal/kg일 경우 폭발열은 255.2~296.4kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지155.2~196.4kcal의 FINEX 2.4~3개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 3의 경우에는 실제 지반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 55.5 cm, 장약장 48 cm, 전색장 7.5 cm에 해당하며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 171.1~197.8g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450kcal/kg일 경우 폭발열은 248.0~286.8kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러

스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 148.0~186.8kcal의 FINEX 2.3~2.9개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540kcal/kg일 경우 폭발열은 263.4~304.6kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 163.4~204.6kcal의 FINEX 2.6~3.2개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 4의 경우에는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 60 cm, 장약장 52.5 cm, 전색장 7.5 cm이며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 187.1~213.8g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450kcal/kg일 경우 폭발열은 271.3~310.1kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 171.3~210.1kcal의 FINEX 2.7~3.3개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540kcal/kg일 경우 폭발열은 288.1~329.3kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 188.1~229.3kcal의 FINEX 2.9~3.6개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 5의 경우도 실제 지반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 75 cm, 장약장 60 cm, 전색장 15 cm이며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 213.8~267.3g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450kcal/kg일 경우 폭발열은 310.1~387.6kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 210.1~287.6kcal의 FINEX 3.3~4.5개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540kcal/kg일 경우 폭발열은 329.3~411.6kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100kcal로서 나머지 229.3~311.6kcal의 FINEX 3.6~4.9개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

이상의 검증실험에서 폭원을 조절함에 따라서 블록의 파괴 양상이 달라졌고, 약량이 증가하는데 따라 파괴의 정도가 커지는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 뇌관 한 개로 블록이 폭발되는 것에 비하여 도폭선의 길이를 조절하여 블록의 파괴 정도를 조절할 수 있었다. 또 축소율로 역산한 폭약량은 실제 발파의 경우와 크게 다르지 않았으며 폭발열을 이용하여 산정한 폭원 축소율은 상당한 근거가 있는 것으로 생각된다.

앞으로 좀 더 정교한 계측이 이루어진다면 폭발 에너지에 따른 파괴의 전개나 손상의 정도를 정량적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도폭선의 길이 변화를 이용하여 폭원조절이 가능한 축소모형실험을 제안하였으며 시멘트모르타르 블록의 발파에 적용하여 타당성을 검토하였다.

폭원 조절에 따라서 블록의 파괴양상이 비례하여 파괴 또는 손상되었으며 뇌관 한 개로 발파하는 것보다 더 정교한 축소모형실험 발파가 이루어져 제안된 방법은 폭원 조절이 가능하고 또 축소모형실험 방법으로서 타당한 것으로 판단된다.

폭발열을 이용하여 이론적으로 산정한 축소율을 적용하여 정량적으로 산정한 폭약의 량

은 대략 실제 발파에서 적용하는 범위에 해당하여 폭발열을 이용하여 산정한 폭원 축소율은 상당한 근거가 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)'의 일환으로 수행되었습니다. 관계자에게 감사를 드리며 실험에 도움을 주신 대한석탄공사 화순광업소 안철수 과장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 양형식, 하태욱, 김원범, 김종관, 류창하, 최병희, 2007, 축소모형실험을 위한 기초 연구, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 25, No.1, pp. 79-84.
2. 이상은, 1996, 화강암의 역학적 이방성 및 균열제어 발파에 관한 연구, 전북대학교 박사학위 논문.
3. 정도영, 양형식, 2004, 폭원의 축소율 산정과 축소모형 실험에의 적용, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 22, No. 4, pp. 1-6.
4. Hobbs, D.W., 1969, 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.
5. Kumar, S., Y. Itoh, K. Saizuka and T. Usami, 1997, Pseudodynamic testing of scaled models, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 4, pp. 524-526.