

폭원의 축소율 산정과 축소모형 실험에의 적용

정도영,¹⁾ 양형식²⁾

Scale Factor of Explosives and Application on Scaled Model Test of Demolition Blasting

Do-Young Jung and Hyung-Sik Yang

ABSTRACT. In this study, dimension and scale factor of explosives were calculated. Proper dimension and scale factor were considered. Scale factor of 1/256 was obtained when scaled factor of the length was 1/4. This value is similar to the ratio of explosives of model test and demolition structure. It seemed that scale factor of length should be larger than 1/4.

Key words : scaled model test, scale factor, demolition

초 록. 본 연구에서는 발파해체에 대한 축소모형실험의 폭원에 대한 차원과 축소율을 산정하고, 이로부터 축소모형실험의 적정 길이의 축소율을 고찰하였다. 그 결과 길이 축소비를 1/4로 할 때 축원의 축소율은 1/256로 모형실험과 실제 구조물에서 사용한 화약량의 비로 구한 축소율과 유사한 값을 보였다. 길이 축소율은 1/4 이상으로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

핵심어 : 축소모형 실험, 축소율, 발파해체

1. 서 론

최근 경제성장기에 건설된 많은 철근콘크리트 고층구조물들의 수명이 다하면서 발파해체공법을 이용한 고층구조물들의 해체 작업이 이루어지고 있다.

발파해체 공법은 미국 CDI사에 의해서 개발되어 현재 고층건물, 철골구조물 등의 다양한 구조물에 적용되고 있다. 하지만, 이러한 공법은 아직까지도 경험적 방법에 의존하여 시공되고 있고, 그 기술도 소수의 전문가들 사이에서만 전수되고 있는 실정이다.

발파해체 공법은 일반적인 구조물 해체 방법과는 달리 화약을 사용하는 위험부담과 함께 한번의 발파로 목표대상물을 다음 공정이 가능한 상태로 만들어야만 하는 어려움이 존재한다. 때문에, 이러한 위험부담을 줄이기 위한 방법으로 대상 구조물에 대한 발파 해체 공법의 적용 이전에 축소모형실험을 통한 발파해체 거동의 사전 예측과 이에 따른 치밀한 발

파해체 설계가 필요하다.

현재 축소모형실험을 통한 발파해체 거동의 예측 연구가 보고 되어 있는데(김승곤, 2003, 채와 전, 2004) 기존의 연구는 길이의 축소율을 작업 환경에 따라 정한 후 차원해석을 통한 시간, 밀도, 강도, 응력 등의 축소율로 축소모형을 제작하고, 축소모형의 발파 해체 작업을 통해 그 거동을 수치해석을 통해(채와 전, 2004) 분석하고 있다.

그러나, 발파를 일으키는 요인인 폭원에 대한 고려는 되어 있지 않아 이를 정량화하지 못하고 있고, 또한, 축소모형을 제작함에 있어 기본적인 길이의 축소율을 정하는 방법도 작업현장의 상황만을 고려해 경험적인 방법으로 결정되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 여러 변수들의 축소율에 따른 구조물 축소모형의 제작에 있어, 중요하게 고려되어야 한다고 생각되는 화약의 폭원에 대한 차원과 축소율의 적용성에 대해 연구해 보고, 작업환경에 따라 임의로 정해지는 길이에 대한 축소율이 축소모형실험을 통해 적합한 결과를 얻을 수 있는 적용가능 범위가 존재하는지에 대해 화약의 축소율을 통해 유추해 보고자 한다.

1) (주)한화 여수공장

2) 전남대학교 건설지구환경공학부

접수일 : 2004년 12월 14일

2. 축소모형 실험에서의 차원해석

2.1 변수

축소모형 실험을 하기 위해서는 기하학적인 요소는 물론 다른 독립적인 변수에 대한 축소율을 맞추어야 하는데, 차원해석은 이런 변수들에 대한 축소율을 맞추기 위한 중요한 작업이다. 축소모형 실험에서 발파해체로 인한 변형은 통상 다음과 같은 종속변수들에 종속되어 있다고 본다. 구조물의 특징차원(Characteristic dimension)을 h 라고 한다면, 구조물의 높이와 폭은 h 에다 일정한 상수를 곱한 값으로 나타낼 수 있다.

즉, 구조물의 높이는 k_1h , 구조물의 폭은 k_2h 등으로 표시할 수 있다. 이와 같이 하여 구조물 발파해체로 인한 변형에 영향을 미치는 각 변수들을 표시하면 다음과 같다.

Model size : h

Horizontal and vertical stress by gravitational forces : P_{gh}, P_{gv}

Horizontal and vertical stress by tectonic forces : P_{th}, P_{tv}

Compressive strength of model : S

Elastic modulus of model : E

Tensile strength of model : T

Poisson's ratio : ν

2.2 축소율

축소모델의 축소율을 결정함에는 먼저 모형 구조물의 길이의 축소율을 임의로 정하여 축소모형의 크기를 실험에 적합한 크기로 맞추어 줄 필요가 있다. 이 길이의 축소율은 가압장치와 설치되는 모델의 크기에 의하여 좌우된다. 축소율이 클수록 모형 구조물 발파해체 조건과의 적합도가 높아져서 실험결과가 정확해지는 반면 비용 및 노력이 증가하게 된다.

축소율을 산정하는 순서는 세 가지 기본 차원을 길이(L), 질량(M), 시간(T)이라 할 때, 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력 등의 축소율을 차례로 산정하게 된

다(Hobbs, 1965).

축소율을 결정하는 Hobbs의 이론은 물체에 작용하는 중력가속도는 언제나 일정하게 작용한다는 가정하에 중력가속도의 축소율을 1로 하고 시간의 축소율을 산정하였다.

그러나, 본 연구에서는 지발 뇌관이 제조될 때 일정한 단차로 생산되기 때문에 축소율의 변화에 따라 다양한 단차를 주기가 쉽지 않고, 또한 파괴되는 순간의 시간은 축소모형이나 실제 구조물 발파에서나 동일하게 작용할 것이라는 가정을 추가하여 축소율을 산정하였다.

차원해석을 통해 축소율을 구하는 방법은 다음과 같다.

길이의 축소율을 1/4로 결정하고, 축소모델과 실제구조물의 밀도가 같다고 가정하면

길이에 대한 축소율(L)은 1/4

시간에 대한 축소율(T)은 중력가속도 일정의 개념 사용할 때는

$$\frac{L}{T^2} = 1, T = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}, \quad (1)$$

시간일정의 개념을 사용할 때는

$$T = 1 \quad (2)$$

밀도에 대한 차원(ML^{-3})은 축소모델과 실제 구조물과의 밀도가 같을 때

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

질량에 대한 축소율(M)은 시간일정일 때

$$M = 1 \times L^3 = \frac{1}{1000} \quad (5)$$

이 된다.

응력, 탄성률, 강도 등의 차원은 ($ML^{-1}T^{-2}$)이고 중력일정일 때 축소율은

$$\frac{M}{L T^2} = \frac{\frac{1}{1000}}{\frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{2}\right)^2} = \frac{1}{62.5} \quad (6)$$

시간일정일 때

$$\frac{M}{L T^2} = \frac{\frac{1}{1000}}{\frac{1}{4} \times 1^2} = \frac{1}{250} \quad (7)$$

의 값을 갖게 된다.

3. 폭원에 대한 축소율

3.1 화약의 폭발열에 대한 차원

화약의 폭원은 일 또는 에너지의 개념으로서 폭발에너지인 폭발열로 결정하였고 그에 대한 차원은 공학단위로 [FL] 그리고 LMT계 절대단위로 [ML²T⁻²]로 정의할 수 있다.

3.2 화약의 폭발열에 대한 축소율의 이론값

위에서 밝혀낸 화약의 폭발열에 대한 차원으로 길이를 변화시키에 따라 나타난 폭발열의 축소율 값을 Table 1에 나타내었다. 길이(L)의 축소율을 1/2에서 1/10까지 변화를 시켜가면서 중력일정의 조건과 시간일정의 조건에서의 축소율을 각각 구하였는데, 길이의 축소율이 작아질수록, 화약의 폭발력에 대한 축소율은 상당히 큰 비율로 줄어드는 것을 볼 수 있다.

그리고, 중력일정의 조건보다는 시간일정의 조건에서 그 축소율이 훨씬 더 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이로부터 시간일정의 조건일 때의 축소율을 실제 구조물발파에 적용하게 되면 화약량이 과다하게 계산된다는 사실을 알 수 있다.

3.3 모형실험과 실제구조물 발파에 사용한 화약량을 이용한 축소율의 산정

모형실험에서는 어떤 화약을 사용하더라도, 기폭

장치인 뇌관의 사용이 불가피하기 때문에 대부분의 모형실험들에서 뇌관을 폭원으로 사용하고 있고, 기존 연구 결과 뇌관의 사용에 따른 발파 효과도 양호한 것으로 밝혀져 있다(김승근, 2003, 채와 전, 2004). 그리고, 실제 구조물 발파해체에 사용되는 화약의 약량은 그 적정기준이 제시되어 있다.

그러므로 모형실험에서 사용하는 뇌관의 위력과, 실제 구조물 발파에 사용되는 화약의 위력과의 비교를 통해 축소율을 산정할 수 있다.

모형실험에서 사용한 뇌관의 폭발열은 8호 뇌관 하나의 폭발위력이 다이너마이트 0.46g의 위력과 동일하다는 전제(한화, 2002)하에 구한 것과, 뇌관의 침장약으로 들어가는 PETN의 폭발열로써 계산한 두 가지 방법으로 구하였다.

뇌관의 연시약과 기폭약의 위력은 무시할 수 있을 만큼 미미하기 때문에 침장약으로 사용된 PETN의 폭발열로 뇌관의 폭발열을 계산할 수 있다(Fig. 1).

결과값으로, 첫 번째 한화에서 생산되고 있는 메가마이트 I에 대한 폭발열이 1152kcal/kg이고, 뇌관 하나가 다이너마이트 0.46g의 위력과 동일하다면, 축소모델에 사용된 폭발열은 530cal가 된다.

두 번째로, PETN의 폭발열은 1450~1540kcal/kg이고, 8호 뇌관에 들어가는 PETN의 약량이 0.9g이므로, 8호 뇌관하나의 열량은 1305~1386cal가 된다.

Table 4에서 구한 축소율은 PETN의 폭발열을 1450kcal/kg로 가정하여 구하였다.

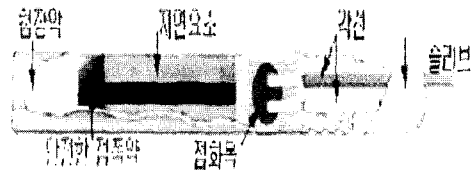


Fig. 1. 전기뇌관의 구조

본 연구에서는 시중에 유통되고 있는 전기뇌관 중 자료를 확보할 수 있었던 (주)한화의 전기뇌관 제원을 이용하였다.

실제 구조물의 발파 해체 작업시 기둥에 대한 천

Table 1. 길이의 축소율에 따른 질량(M), 시간(T), 폭발열의 축소율

L의 축소율	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10
M의 축소율	1/8	1/27	1/64	1/125	1/216	1/343	1/512	1/729	1/1000
T의 축소율	1/1.41	1/1.73	1/2	1/2.24	1/2.45	1/2.65	1/2.83	1/3	1/3.16
폭발열의 축소율 (중력 일정)	1/16	1/81	1/256	1/625	1/1296	1/2401	1/4096	1/6561	1/10000
폭발열의 축소율 (시간 일정)	1/32	1/243	1/1024	1/3125	1/7776	1/16807	1/32768	1/59049	1/100000

Table 2. 건물의 기둥에 대한 천공 및 장약 기준

기둥두께(mm)	천공경(mm)	천공각도(°)	천공장(mm)	천공간격(mm)	장약량(g)	사용폭약
300	30~40	30~40	300	300	40	ST-60 GD기준
400	"	"	400	300	60	"
500	"	"	500	350	60	"
600	"	"	600	350	80	"
700	"	"	700	350	80	"
800	"	"	800	400	125	"
900	"	"	900	400	125	"
1000	"	"	1000	400	170	"

Table 3. 뇌관 1개의 위력이 다이너마이트 0.46g의 위력과 동일하다고 본 경우

실제 모델에서 사용한 화약량(g)	40	60	80	125	170
축소율	1/87	1/130	1/174	1/271	1/370

Table 4. 뇌관의 폭발열을 PETN의 약량으로 계산한 경우

실제 모델에서 사용한 화약량(g)	40	60	80	125	170
축소율(8호뇌관)	1/35	1/53	1/71	1/110	1/150
축소율(6호뇌관)	1/70	1/106	1/142	1/220	1/300

공 및 장약기준은 어느 정도의 적정량이 존재한다 (Table 2). 각 기둥에 대한 천공조건이나 기둥의 두께 등에 의해 어느 정도의 차이가 존재할 뿐, 축소율의 변화처럼 건물의 크기에 따라 엄청난 차이를 보이지는 않는다.

실제 구조물 발파에서 각 기둥에 사용되는 화약의 양은 천공조건에 따라 기둥에 40g에서 170g까지의 약량을 사용하고 있다.

모형실험에서 사용한 뇌관 1개의 폭발열과 실제 구조물발파 해체에 사용하는 폭약의 폭발열을 비교함으로써 구한 화약의 축소율은 Table 4와 같다. 뇌관 1개의 위력이 다이너마이트 0.46g의 위력과 동일하다면 Table 3의 결과 값으로 보아, 실제구조물에서 125g의 폭약을 사용할 때에 축소율은 1/271이고, 폭발열의 차원으로 구한 이론값 1/256과는 아주 근접한 값을 보였다. 이는 뇌관을 사용한 축소모형실험에서 양호한 결과를 얻었다면 실제 구조물 발파에서의 공당 장약량은 125g일 때 양호한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 그리고, 그 이외의 약량을 사용하면 과장약 혹은 약장약이 된다는 계산을 얻을 수 있다.

뇌관의 폭발열을 PETN의 약량으로 계산한 Table 4의 결과값으로 볼 때에는 실제구조물에서 사용한 폭발물의 양이 125g일 때에 축소율이 8호 뇌관일 경우는 1/110, 6호 뇌관일 경우는 1/220로서 축소율 이론값 1/256과는 거리가 있었다. 이는 PETN 폭발열을 뇌관의 폭발열과 동일하다고 생각하고 계산했기 때문이며 실제로는 뇌관의 구조상 공극이 존재하고, 관체의 영향이 존재하기 때문에 뇌관의 실제 폭발열 값은 PETN의 폭발열로 계산한 값보다는 더 작게 계산될 것이다.

그러므로, 실제 뇌관의 축소율은 PETN만으로 계산했을 때의 축소율보다는 좀더 이론값에 근사할 것으로 예상된다.

4. 모형실험에서의 적정 축소율 유추

모델실험에서는 폭원으로 최소 기폭장치인 뇌관을 사용하고 있고, 실제 구조물 발파에서 사용하는

폭약량도 그 한계가 있기 때문에, 길이의 축소율에 따라 상당히 작아지는 폭발열에 대한 축소율은 그 적용범위가 한계가 있다. 모형의 길이의 축소율의 비가 1/4보다 더 작아지게 되면 화약 약량의 축소율을 맞춰야 하기 때문에 실제 구조물 발파에 사용되는 화약량이 과장약 계산되거나 축소모델실험에서의 폭원이 뇌관보다 적은 위력의 폭약을 사용해야 한다는 계산이 나온다.

하지만, 실제 축소모형실험에서 사용할 수 있는 최소 기폭장치가 뇌관 일 수밖에 없고, 실제 구조물 발파에서 사용되는 화약도 어느 정도의 적정 약량이 제시되어 있기 때문에 실제 현장에 적용할 수 있는 축소율은 한계가 있고, 그 한계는 위의 연구 결과에 비추어 볼 때 축소율을 1/4이상으로 해야 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결 론

모형실험을 통하여 실제 구조물의 발파해체 거동을 살펴볼 때, 화약의 차원을 화약의 일과 관련이 있는 폭발열의 차원으로써 결정하였다. 연구결과는 다음과 같다.

1) 축소모형실험에서 길이의 축소율이 작아지면, 폭발열의 축소율은 급속도로 줄어드는 것을 볼 수 있고, 중력일정 조건일 때 보다 시간일정 조건일 때에 그 변화 폭은 더 컸다. 이는 실제구조물발파해체에 사용되는 화약의 양이 그 축소율에 따라 과장약으로 계산될 수 있음을 의미한다.

2) 모형실험에서 사용한 뇌관과 실제 구조물발파에 사용한 125g의 장약량을 이용한 축소율의 산정에 있어서, 뇌관의 위력이 다이너마이트 0.46g의 위력과 동일하다면 길이(L)의 축소율이 1/4에서 이론 축소율 1/256과 실제 비교를 통한 축소율이 1/271로써 거의 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 하지만, 뇌관의 위력을 PETN의 폭발열로 계산했을 때는 그 축소율이 1/104(8호 뇌관), 1/208(6호 뇌관)로써 어느 정도 차이를 보였는데, 이는 뇌관의 공극과 관체

에 의한 영향 때문으로 사료된다.

3) 축소모형실험을 할 때 폭원으로 최소 기폭장치인 뇌관을 사용해야 한다는 전제하에서 길이의 축소율은 1/4이상으로 해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김승곤, 2003, 구조물 축소 모형의 발파해체로 인한 지반진동 및 파쇄도에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문.
2. 채희문, 전석원, 2004, 축소모형실험 및 PFC2D해석에 따른 발파해체 거동 분석, 터널과 지하공간 Vol. 14, No. 1, pp. 54-68.
3. 한화, 2002, 저자와의 교신 자료.
4. Hobbs, D. W., 1965, Scaled model study of strata movement around roadways, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 237-251.