

축소모형실험 및 PFC2D해석에 따른 발파해체 거동분석

채희문¹⁾, 전석원^{2)*}

A Study of Blasting Demolition by Scaled Model Test and PFC2D Analysis

Hee Moon Chae and Seokwon Jeon

Abstract In this study, scaled model tests were performed on blasting demolition of reinforced concrete structures and the experimental results were analyzed in comparison with the results of numerical analysis. The tests were designed to induce a progressive collapse, and physical properties of the scaled model were determined using scale factors obtained from dimension analysis. The scaled model structure was made of a mixture of plaster, sand and water at the ratio determined to yield the best scaled-down strength. Lead wire was used as a substitute for reinforcing bars. The scaled length was at the ratio of 1/10. Selecting the material and scaled factors was aimed at obtaining appropriately scaled-down strength. PFC2D (Particle Flow Code 2-Dimension) employing DEM (Distinct Element Method) was used for the numerical analysis. Blasting demolition of scaled 3-D plain concrete lahm structure was filmed and compared to results of numerical simulation. Despite the limits of 2-D simulation, the resulting demolition behaviors were similar to each other. Based on the above experimental results in combination with bending test results of RC beam, numerical analysis was carried out to determine the blasting sequence and delay times. Scaled model test of RC structure resulted in remarkably similar collapse with the numerical results up to 900 ms (mili-second).

Keywords Blasting demolition, Scaled model test, Progressive collapse, PFC2D

초 록 본 연구에서는 경제성장기에 고층 구조물 시공에서 널리 사용된 철근콘크리트(RC, Reinforced Concrete) 구조물을 대상으로 발파해체 축소모형실험을 수행하고 전산실험결과와 이를 비교하였다. 발파해체 공법으로는 파괴거동을 비교적 쉽게 확인할 수 있는 점진붕괴공법을 적용하였으며, 축소모형실험은 Hobbs(1969)에 의한 축소율의 개념에 따라 차원해석을 실시하여 축소된 강도특성을 계산하였다. 사용재료로는 석고, 모래, 물의 혼합액을 콘크리트 대용으로 사용하였다. 모래와 석고의 중량 비를 다양하게 변화시키면서 이에 따른 강도의 변화를 측정하고 최적의 강도 값을 갖는 배합 비를 결정하였다. 또한 연성을 가지고 있으며 축소강도로 비교할 때 철근과 유사한 특성을 지니는 팽용 납선을 철근대용 재료로 사용하였다. 수치해석 프로그램으로는 요소의 파괴거동을 육안으로 확인할 수 있는 개별요소법(DEM, Distinct Element Method)에 의해 수행되는 상용코드인 PFC2D(Particle Flow Code 2-Dimension)을 사용하였다. 모형의 제작은 실내에서 미리 양생된 부재들을 현장에서 옮겨 연결부만을 타설하여 일체화 시키는 방법으로 이루어졌다. 먼저 3차원 무근 콘크리트 라멘 구조의 모형을 설계하고 그 축소 모형을 발파해체하여 그 거동을 촬영하였다. 이를 수치적인 해석과 비교하는 과정을 통해 2차원 해석이라는 한계성은 존재하지만 대체로 유사한 형태의 거동을 보임을 알 수 있었다. 사전해석의 경험과 RC 보의 실내 굴곡 실험결과를 근거로 하여 RC 구조모형의 발파해체 사전해석을 실시하였다. 시차는 200 ms로 하여 점진적으로 붕괴되도록 설계하였다. 모형실험과는 달리 2차원 해석이라는 한계에도 불구하고 900 ms 까지 매우 유사한 거동을 보이며 붕괴되었다.

핵심어 발파해체, 축소모형실험, 점진붕괴공법, PFC2D

1. 서 론

발파해체공법은 1940년대 말 미국의 CDI사에 의하

여 개발되어 현재 일반건물, 교량, 타워(굴뚝, 싸일로) 등 다양한 구조물에 대해 적용되고 있다. 그러나 발파해체공법은 경험적 방법에 의존하여, 소수의 전문가들 사이에서만 그 기술이 전수되고 있는 실정이다.

Kurokawa(1993) 등은 6층 철근콘크리트 아파트를 대상으로 시험발파를 통해 기둥과 보 등 구조요소의 장약, 천공방법에 관해 연구했고, Kasai(1993) 등은 같은 구조물에 대해 방호, 사전파쇄작업 등의 폭파해

¹⁾ 대림산업 주식회사

²⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수

*교신저자(Corresponding Author): sjeon@snu.ac.kr

접수일: 2004년 2월 17일

심사 완료일: 2004년 2월 24일

체시공에 관해 연구하고 실제 해체를 실시하였다. 또한, Sawada(1993) 등은 역시 같은 구조물에 대해 발파설계, 소음 진동에 대한 연구를 수행하였다. Isobe(2000) 등은 유한요소법(FEM, Finite Element Method)에 ASI (Adaptively Shifted Integration) 기법을 적용하여 라멘 구조물에 대한 발파해체, 지진피해 등의 동해석을 실시하였다. 한국자원연구소(1993)는 건물의 발파해체를 위한 제어발파기술에 대해 기초연구를 수행하였고, 코오롱건설(주)(1996)는 철골구조물 해체를 위한 성형폭약(shaped charge)을 이용한 강판절단 실험과 붕괴거동 예측을 위한 컴퓨터 모델개발 및 5층 아파트를 폭파해체하여 천공, 방호 등에 관한 연구를 수행하였다. 조근희(1995)는 개별요소법(DEM, Distinct Element Method)을 사용하여 2차원 라멘구조물의 붕괴거동을 해석하였다. 정원준(2002)은 개별요소법을 기반으로 하는 PFC2D(Itasca)를 이용하여 발파해체로 인한 구조물의 붕괴거동을 모사하였다.

실물을 축소한 모형실험은 실제의 구조체를 의형뿐만 아니라 물리적인 특성까지 동일하게 반영시켜야 하므로 이를 위한 준비사항이나 제작비용 및 폭약의 사용에 관한 법적인 절차 등은 그 시도를 어렵게 하는 요인들이다. 따라서 수치적인 모델링을 이용하여 타당성이 있는 전산실험을 수행할 수 있다는 것은 이러한 많은 비용과 제작의 어려움 등을 해소할 수 있는 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 실제 문제에서 접하게 되는 구조물의 주 재료인 철근과 콘크리트의 강도특성을 이용하여 이를 축소하고, 현물과 유사한 3차원 라멘 구조체를 제작하여 축소된 환경에서 이를 발파해체함으로써 수치해석결과와 비교하여 2차원 해석에서의 한계성과 적용성에 대해 고찰하였다. 해석은 3차원의 물리적인 현상을 2차원의 전산기법으로 해석하기 위해 구조체가 2차원 평면상에서 동일한 기폭위치와 기폭순서로 발파가 되도록 설정하였으며, 이에 따라 점진붕괴 공법의 유도를 택하였다.

2. 모형재료의 선정

모형재료의 대상 중 모든 물성이 실제재료와 동일한 비율이 되도록 제작된 시제품을 구한다는 것은 거의 불가능한 사항으로, 본 연구에서는 변형계수 보다는 강도특성을 대표할 수 있는 재료를 선택하였다.

2.1 축소율의 산정

세 가지 기본 차원을 길이[L], 질량[M], 시간[T]이라

할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969). 축소율은 작을수록 현실과 근사하므로 길이에 대한 축소율은 대상체의 높이가 15 m임을 이용하여 작업환경을 고려하여 1/10으로 결정하였다. 다음으로 시간[T]에 대한 축소율을 결정하는데, 여기에는 중력가속도 일정 개념이 사용된다. 즉, 중력가속도[LT⁻²]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식 (1)에 의하여 시간[T]의 축소율은 1/3.16이 된다.

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

한편, 1/10의 길이축소 모형에서는 콘크리트의 강도 또한 크게 감소되므로 시멘트 배합보다는 강도가 작고 국내 모형실험에서 자주 사용되어왔던 모래, 석고, 물 혼합재료를 사용하였다. 콘크리트 모형재료(모래, 석고, 물의 중량비가 110:90:100인 혼합물)의 3일 건조 기준 밀도는 1.72 g/cm³이고 대상인 콘크리트의 밀도는 2.4 g/cm³이므로 밀도[ML⁻³]의 축소율은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{1.72}{2.4} = \frac{1}{1.4} \quad (2)$$

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

$$M = \frac{1}{1.4} \times L^3 = \frac{1}{1.4} \times \left(\frac{1}{10}\right)^3 = \frac{1}{1440} \quad (3)$$

이상과 같이 세 가지 기본 차원인 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 모두 결정되었으므로, 본 실험의 기본적인 차원해석은 완료되었다고 할 수 있다. 예를 들어, 응력, 탄성계수, 강도 등[ML⁻¹T⁻²]의 축소율은 식 (4)와 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{1440}\right)}{\left(\frac{1}{10}\right) \times \left(\frac{1}{3.16}\right)^2} = \frac{1}{14.4} \quad (4)$$

철근의 경우 연성(ductility)을 가지면서 강선에 비해 항복강도가 작은 땀용 납선을 철근의 모형재료로 사용하였다.

D19철근의 밀도는 7.85 g/cm³이고 대상인 땀용 납선의 밀도는 8.4 g/cm³이므로 밀도[ML⁻³]의 축소율은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{8.4}{7.85} = \frac{1}{0.93} \quad (5)$$

한편, 길이[L]의 축소율은 1/10이므로, 질량[M]의 축소율은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{0.93} \times L^3 = \frac{1}{0.93} \times \left(\frac{1}{10}\right)^3 = \frac{1}{930} \quad (6)$$

응력, 탄성계수, 강도[ML⁻¹T⁻²] 등의 축소율은 식 (7)과 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{930}\right)}{\left(\frac{1}{10}\right) \times \left(\frac{1}{3.16}\right)^2} = \frac{1}{9.31} \quad (7)$$

길이와 질량, 시간, 그리고 단위중량은 계산된 축소값과 동일하게 하였고, 강도의 경우 철근과 콘크리트의 이론적 축소율은 1/14.4, 1/9.31으로 축소대상인 구조물의 압축강도, 철근의 항복강도와 함께 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

2.2 콘크리트의 모형재료

모형실험에 필요한 콘크리트의 모형재료는 콘크리트와 같이 취성이 크고 압축력에는 강하지만 인장력에 매우 취약한 재료로 선정되어야 한다. 또한 축소된 모형에서 요구하는 강도 값이 만족되어야 한다.

콘크리트는 물-시멘트 배합 비에 따라 강도가 변화하는 특성을 가지고 있으나 시멘트자체의 강도가 너무 강하여 원하는 축소강도와 근접한 값을 가질 수 있는 조건을 찾아내지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 비교적 구입이 용이하고 국내에서 모형실험에 사용된 바 있는 재료인 모래, 석고, 물의 혼합물을 선택하였는데, 이 재료는 가격이 저렴하고 경화시간이 짧을 뿐만 아니라 콘크리트와 같이 취성을 가지고 있는 재료이다. 또한 모래, 석고, 물의 혼합물에서 모래와 석고의 중량 비를 조절함에 따라 강도특성을 손쉽게 변화시킬 수 있는 재료이기도 하다(김중우, 1988). 석고와 배합되는 모래는 주문된 표준사를 사용하였다. 모형 재료의 강도결정은 다음과 같이 이루어 졌다.

(1) 모래, 석고, 물 배합 비

먼저 원하는 압축강도의 모형을 만들기 위해 모래, 석

Table 1. Scale factor for concrete model

Physical Properties	Dimension	Real model	Scaled model	Scale
Length	[L]	beam length: 4 m	beam length: 0.4 m	1/10
Mass	[M]			1/1440
Time	[T]			1/3.16
Density	[ML ⁻³]	2.4 g/cm ³	1.72 g/cm ³	1/1.4
Young's modulus	[ML ⁻¹ T ⁻²]	25,097 MPa	1,743 MPa	1/14.4
Uniaxial compressive strength	[ML ⁻¹ T ⁻²]	24.3 MPa	1.69 MPa	1/14.4
Acceleration	[LT ⁻²]			1
Poisson's ratio				1

Table 2. Scale factor for reinforcing bar model

Physical Properties	Dimension	Real model	Scaled model	Scale
Length	[L]	diameter: 20 mm	diameter: 2 mm	1/10
Mass	[M]			1/930
Time	[T]			1/3.16
Density	[ML ⁻³]	7.85 g/cm ³	8.4 g/cm ³	1/0.93
Young's modulus	[ML ⁻¹ T ⁻²]	208,163 MPa	22,359 MPa	1/9.31
Yield stress	[ML ⁻¹ T ⁻²]	428 MPa	46 MPa	1/9.31
Acceleration	[LT ⁻²]			1
Poisson's ratio				1

Table 3. Mixing ratio for various modeling samples

Sample number	Proportion by weight Sand:Plaster:Water
1	100 : 100 : 100
2	110 : 90 : 100
3	120 : 80 : 100
4	130 : 70 : 100
5	140 : 60 : 100
6	150 : 50 : 100
7	160 : 40 : 100
8	170 : 30 : 100

고, 물의 중량 비를 100:100:100으로 초기설정하고 Table 3과 같이 물의 중량 비를 고정시키고 모래의 중량을 10% 씩 늘려가며 8개의 배합모델을 가지고 강도를 비교해 보았다. 이는 경화시간에 따른 강도를 찾기 위해서는 시간이 많이 소요되는 단점을 보완하기 위한 것으로 모래의 중량비가 높아지고 석고의 중량비가 낮아짐에 따라 강도가 감소한다는 연구에 근거한 것이다 (김중우, 1988). 원하는 강도의 배합비와 양생시간을 찾아내기 위해 다음과 같은 8개의 배합 비를 선정하여 양생하였다.

(2) 배합 비에 따른 강도실험 결과

배합 비에 따른 압축강도의 변화는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 모래의 중량비가 커짐에 따라 그 값이 감소하며 음지수분포를 나타내는 곡선으로 회귀되었다.

압축강도에 대한 굴곡강도 값은 모래의 중량비가 증가함에 따라 Fig. 1(b)와 같이 대략 그 기울기가 1/5.8인 직선으로 회기 되었다. 우리나라의 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 콘크리트의 압축강도에 대한 굴곡강도의 비가 1/7~1/5 인 것과 비교하였을 때 콘크리트

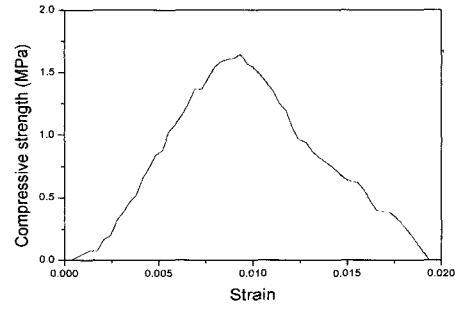


Fig. 2. Stress-strain curve for mixture No. 2

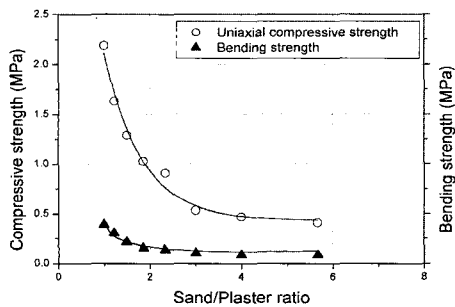
의 휨 인장강도특성 내에 포함되는 값으로 콘크리트와 유사한 성질을 지닌 것으로 고려할 수 있다.

Fig. 2는 실내 물성실험을 통해 얻어진 콘크리트 모형의 응력-변형률 곡선으로 Table 3의 2번 배합비로 3일간 양생을 실시한 모형을 KS규격으로 단축압축실험을 실시하여 나타난 곡선이다.

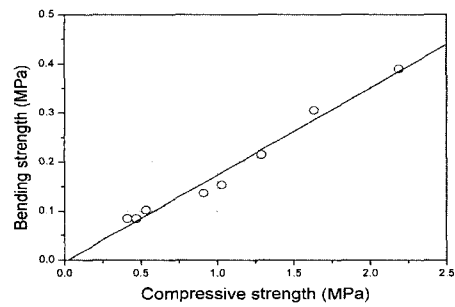
Table 4는 배합 비에 따른 물성실험결과 나타난 물리적인 특성들을 정리한 표로 혼합재료의 배합 비에 따른

Table 4. Physical properties for various mixing ratios

Sample number	Proportion by weight Sand:Plaster:Water	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Density (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



(a) Compressive strength vs. sand/plaster ratio



(b) Bending strength vs. compressive strength

Fig. 1. The change of the compressive strength and bending strength with the values of sand/plaster ratio and the relationship between the compressive strength and the bending strength

단위중량과 단축압축강도 및 굴곡강도 값들을 나타내고 있다. 원하는 모형을 제작하기 위해 축소된 강도로서 가장 유사한 1.64 MPa를 발현하는 2번 배합비로 모든 부재를 3일간 양생하여 제작하였다.

2.3 철근의 모형재료

철근은 콘크리트에 비해 뚜렷한 항복점을 가지며 항복 후 변형이 계속해서 증가하다가 파괴되는 연성을 가지고 있다. 땀용 납은 납(Pb)과 주석(Sn)의 합금으로 주석과 납의 비율에 따라 인장강도가 결정된다. 본 연구에서는 시제품으로 Sn 63%의 합금인 땀용 납 선을 사용하였다. 사용된 제품의 특성은 직경이 2 mm로 밀도가 8.4 g/cm³이고 항복강도는 45 MPa, 인장강도는 49 MPa, 탄성계수는 40 GPa이다(우림금속, 2002). Table 2.5는 사용된 철근과 콘크리트의 모형재료인 납 선과 3일간 양생된 석고-물-모래 혼합체의 물리적인 특성들을 표로 정리한 것으로 수치해석에서의 입력자료 선택을

위한 기준으로 사용되었다.

2.4 RC보의 굴곡실험

Table 5의 제원으로 제작된 축소 RC모형으로 보의 굴곡실험을 실시하였다. 실험은 철근의 배근 상태에 따라 3가지 모델에 대하여 실시하였다. Fig. 3에서와 같이 첫 번째 모델(Model #1)은 철근이 배근되지 않은 무근 콘크리트 보이며, 두 번째 모델(Model #2)과 세 번째 모델(Model #3)은 각각 철근이 인장 측에 2개 그리고 3개 배근된 철근콘크리트 보이다. 또한 굴곡시험 시 지간은 12 cm를 적용하였다.

Fig. 5는 실시된 굴곡실험의 하중과 변위 그래프를 나타내고 있다.

3. 축소모형실험의 준비

축소모형은 해석이 용이하고 비교적 실제에 가까운

Table 5. Material properties for the scaled model test

	Composition (%)	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Density (g/cm ³)
Concrete	S(37) P(30) W(33)	1.64	0.31	253	1.72
Steel bar	Pb(37) Sn(63)	-	49	40,000	8.40

(S: sand, P: plaster, W: water, Pb: lead, Sn: tin)

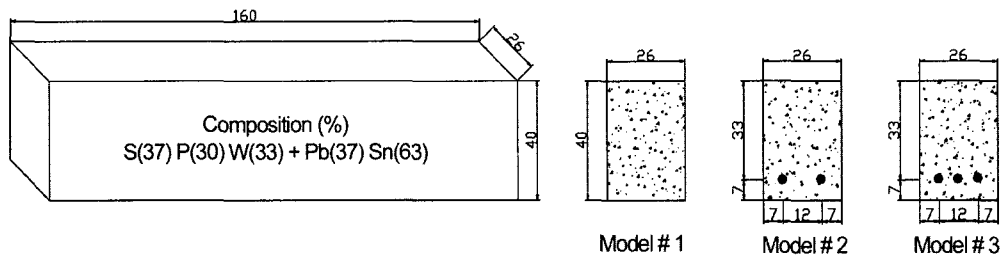


Fig. 3. Section of the beam for 3 types of test models (unit: mm)

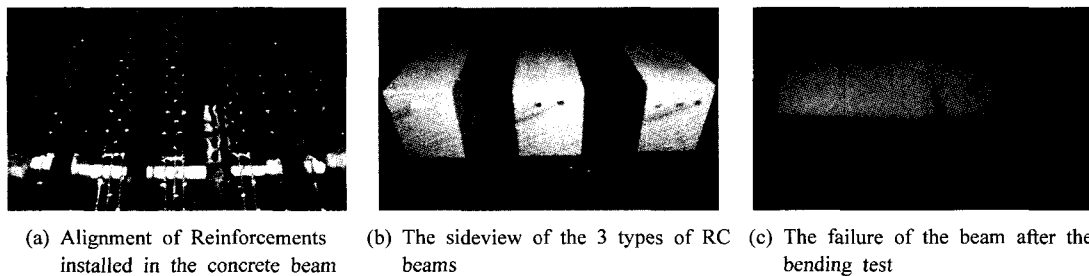


Fig. 4. Process of bending test for concrete model

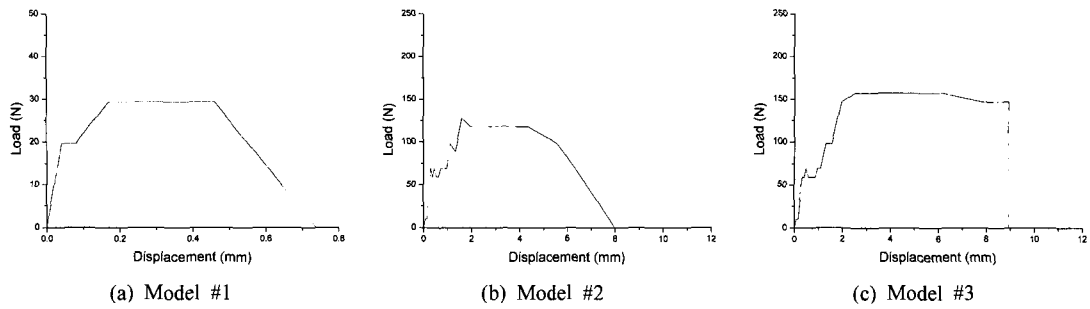


Fig. 5. Result of bending test for 3 types of test models

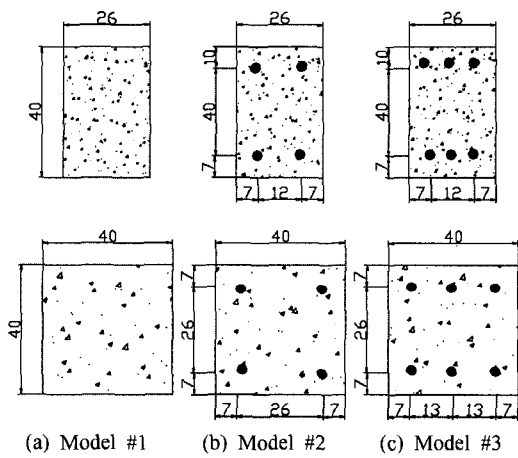


Fig. 6. Sections of beam (40×26) and column (40×40) for 3 types of test models (unit: mm)

형상으로 3차원 라멘구조를 선택하였다. 본 연구에서 수행한 Model #1은 무근 콘크리트 모델로서 기둥과 보만으로 이루어진 구조체이다. 층고는 30 cm이고 지간이 40 cm인 3차원 라멘 구조물로 기둥의 단면은 Fig. 6과 같이 4 cm의 정사각형으로 제작했으며 보의 단면은 4 cm × 2.6 cm의 직사각형으로 철근이 보강되지 않은 상태에서 자중에 견딜 수 있도록 설계하였다.

3.1 구조체의 설계

Fig. 7은 구조체의 평면도와 정면도로서 보 단면의 폭을 기둥보다 작게 하여 연결부 타설시 기둥 안에 완전히 매입되도록 설계하였다. 이는 각 기둥과 보를 미리 실내에서 양생한 후 현장에서 연결부만을 타설하여 구조물을 일체화시켜 축조하기 위한 방법으로 연결부는 동일 재료로 시공하였다. 구조체는 가로 180 cm, 세로 92cm, 높이 150cm가 되도록 매 층 15개의 기둥과 22개의 보를 사용하였다.

Fig. 8 (a)는 Model #1의 보와 기둥이 연결되는 모습을 보여주는 상세 도면이다. Fig. 8 (b)는 Model #2의 보와 기둥을 연결한 후 슬래브가 거치되어 있는 것을 보여주며 약 4.5 kg의 슬래브를 타 부재와 분리하여 조립하였다. 모든 도면의 치수는 mm단위를 사용하였다.

3.2 구조부재의 제작

실제의 건축물처럼 현장에서 거푸집을 조립하고 건물을 제작하는 것에는 시간과 비용에 많은 문제가 있어, 모든 부재들을 실내에서 기둥과 보로 분리하여 미리

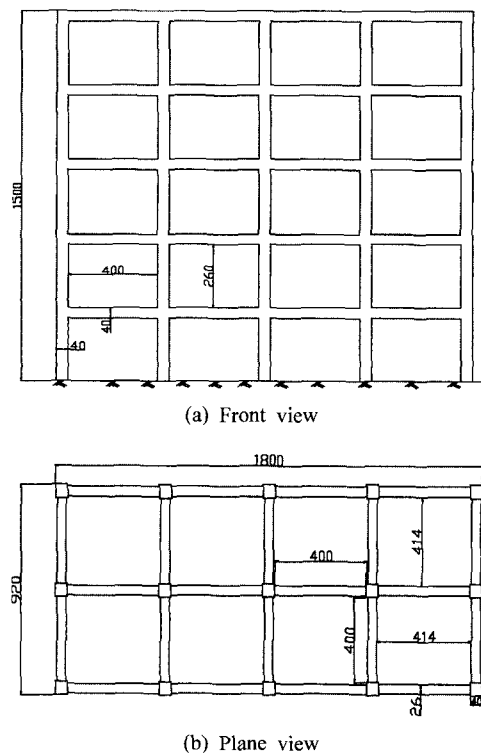


Fig. 7. Front and plane view of scaled model structure (unit: mm)

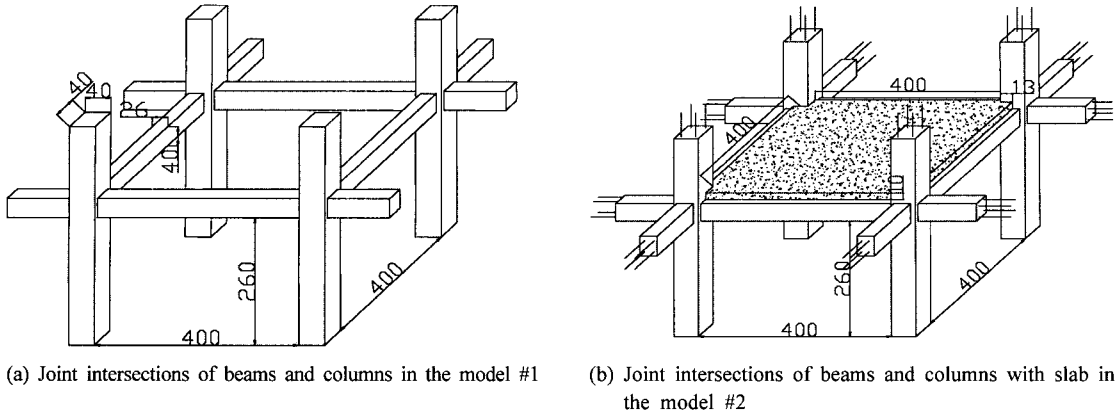


Fig. 8. Detailed drawing of joints for scaled model structure (unit: mm)

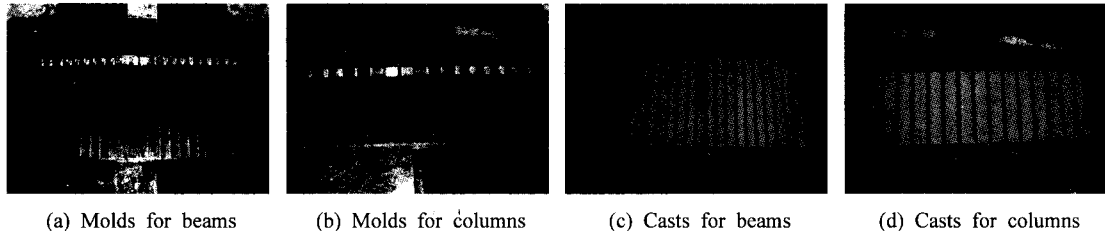


Fig. 9. Production of pre-cast beams and columns

제작 양생하고 현장으로 옮겨 연결부만을 동일한 재료로 타설하여 양생하는 방법을 사용하였다.

Fig. 9의 (a), (b)와 같이 기둥과 보의 형틀을 바닥에 설치하고 모델에 따라 납 선을 삽입한 후 석고, 모래, 물의 중량비가 90:110:100인 혼합액을 타설 하였다. 타설하여 완성된 보와 기둥을 Fig. 9의 (c)와 (d)에 나타내었다.

3.3 시험발파

발파해체 모형실험에 앞서 뇌관을 이용한 기둥발파가

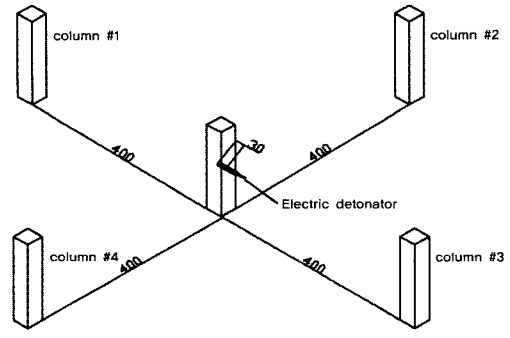


Fig. 10. Location of columns for test blasting (unit: mm)

본 실험을 수행하기에 적당한지 살펴보고 필요한 방호 조치를 실시하기 위하여 Fig. 10과 같이 장전한 기둥을 중앙에 위치시키고 40 cm의 이격거리를 두어 장전한 기둥의 파괴정도와 주변에 미치는 영향에 대하여 관찰 하였다.

실험결과 Fig. 10의 column #1과 column #3처럼 뇌관이 삽입방향에 평행한 축을 따르는 선상에 배치된 기둥들은 발파 시 아무런 영향을 받지 않았다. 하지만 column #2와 column #4는 Fig. 11의 (b)처럼 폭압으로 파괴되며 많은 영향을 받았다. 따라서 기폭과정에서 다른 지연시차를 갖는 부재들의 회로를 끊거나(Cut offs) 파괴시키며 제어발파에 방해를 주는 과발파는 뇌관의 삽입방향을 조절하여 제어가 가능하다는 결론을 얻었다.

3.4 조립 및 양생

미리 제작된 기둥과 보를 현장으로 옮겨 기초콘크리트를 타설 한 후 기둥을 세우고 경화석고를 바닥에 타설하여 하부 기둥과 기초를 완전히 부착시켰다.

Fig. 12의 (a)와 같이 보를 거치시키고 1층 기둥부에 경화석고를 타설 한 다음 Fig. 12의 (b)와 같이 기둥과 보의 교차부에 연결부 형틀을 거치하였다. 연결부 형틀은 외부에서 석고, 모래, 물의 중량비가 90:110:100인

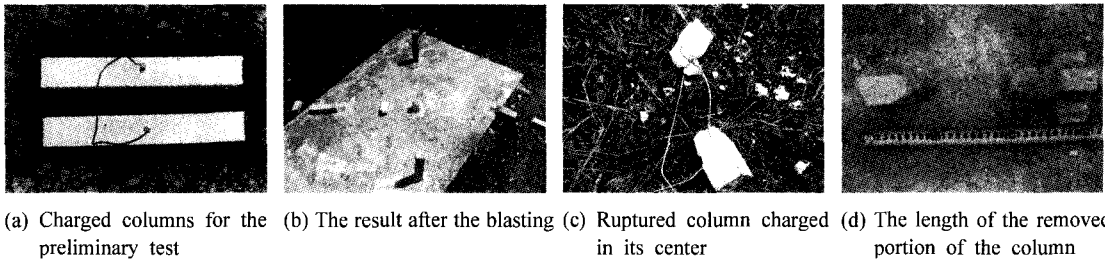


Fig. 11. Measurement of length of failure area and effect area after test blasting

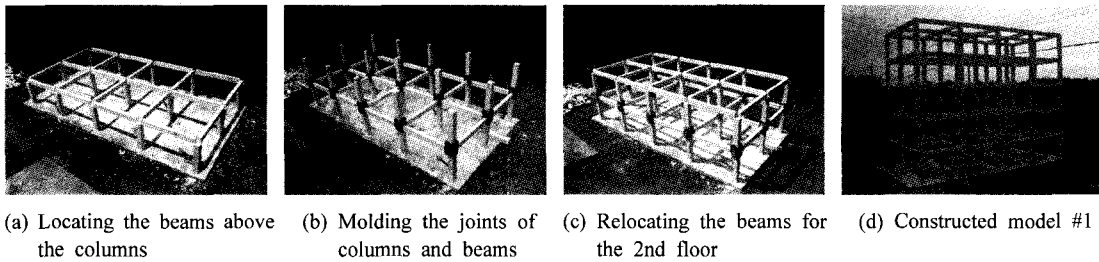


Fig. 12. The process of producing the scaled model #1

혼합액을 주입할 수 있도록 양쪽에 주입구를 설치하였다. 마찬가지로 Fig. 12 (c)와 같이 다시 각 기둥 위에 보를 거치시켜 2층을 만들었다. 이와 같은 방법으로 5층까지 연결부를 타설하여 시공하였고 건물 1층의 제작에는 평균 10시간 정도가 소요되었으며 완성된 모습은 Fig. 12의 (d)와 같다.

두 번째 실험에서 납 선이 배근된 콘크리트 구조체의 축소모형인 Model #2의 경우는 위의 방법과 조금 차이가 있다. 우선 기둥을 기초에 위치시킨 후 보를 기둥위에 설치한 후 보와 기둥간의 납 선을 서로 결속하여 기둥위의 보들이 작업 중에 탈락하지 않도록 하였다. 철근은 기둥철근 4개를 주축으로 하여 Fig. 13의 (a)에서처럼 보와 기둥, 보와 보가 모두 결속되어지도록 연결하였다. 그런 다음 규격화 되어진 슬래브를 Fig. 13의 (b)에서처럼 설치하였다. 다음으로 상부로 올라갈 기둥

을 연결부 형틀을 이용하여 하부의 부재들과 연결시킨 후 앞서 사용된 방법으로 혼합액을 연결부에 타설하여 보와 기둥을 일체화시켰다. Fig. 13의 (c)는 구조물이 시공되며 올라가는 과정을 나타내며, Fig. 13의 (d)는 이와 같은 방법으로 완성시킨 5층 구조물을 나타낸다.

4. 모형의 수치해석

4.1 일축압축실험

수치해석상의 압축실험은 KSF 2405에서 제시한 방법으로 수행되었으며 상하 가압판을 만들고 KSF 2405에서 제시하는 범위 내의 하중속도(0.6 ± 0.4 MPa/sec)로 재하 하였다. Fig. 14의 (a)는 모델의 단축압축실험의 과정에서 입자결합의 파괴과정을 나타내며 (b)는 수치해석 결과로 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다.

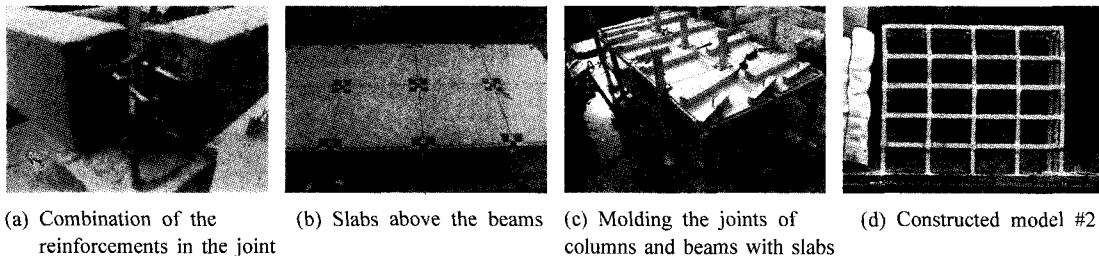


Fig. 13. The process of producing the scaled model #2

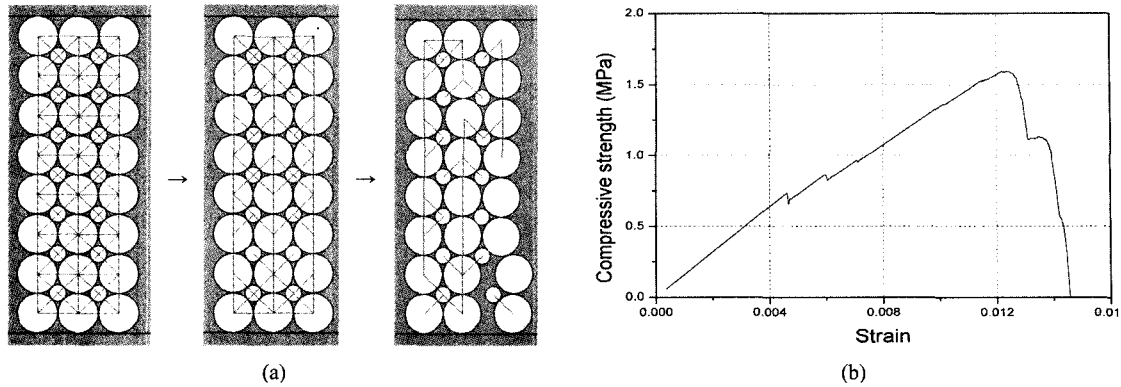


Fig. 14. Process and result of compression test for PFC model

단축압축시험은 반지름 0.00665 m이고 길이 0.026 m인 원기둥을 3열로 배열한 후 그 공극을 주변의 모든 원기둥들과 접하는 작은 원기둥들로 채워 배열하였다. Fig. 14의 (a)에서 보이는 요소들 간에 연결된 선은 이들의 결합을 나타내는 것으로 수직강성(normal stiffness)과 전단강성(shear stiffness) 그리고 수직력(normal force)과 전단력(shear force)이 조합되어 나타난다. 이들의 결합은 뉴턴의 운동방정식을 따르며 힘과 변위로 상호 작용하며 거동하지만 결합이 끊어진 후에는 상호간의 마찰계수에 의한 마찰력이 요소들의 거동을 지배하게 된다.

4.2 굴곡실험

굴곡실험 또한 단축압축실험과 동일하게 볼을 배열하고 그 중앙에 벽요소를 설치하여 벽요소에 일정한 속도의 하향운동을 가하는 방법을 통해 재하하였으며 KS 2408에서 제시한 방법대로 보의 중앙 하단의 응력이 매초 0.06 ± 0.04 MPa 내의 범위에서 발생되도록 재하하였다.

Fig. 15의 (a)는 무근 콘크리트 보의 전산실험 과정과 결과를, (b)는 인장축에 철근이 2개 배근된 Model #2의 전산실험수행 과정과 결과를, (c)는 철근이 3개 배근된 Model #3의 전산실험수행 과정과 결과를 나타내고 있다. 양끝 하단 2개의 볼(ball)요소들이 KS에서 제시하

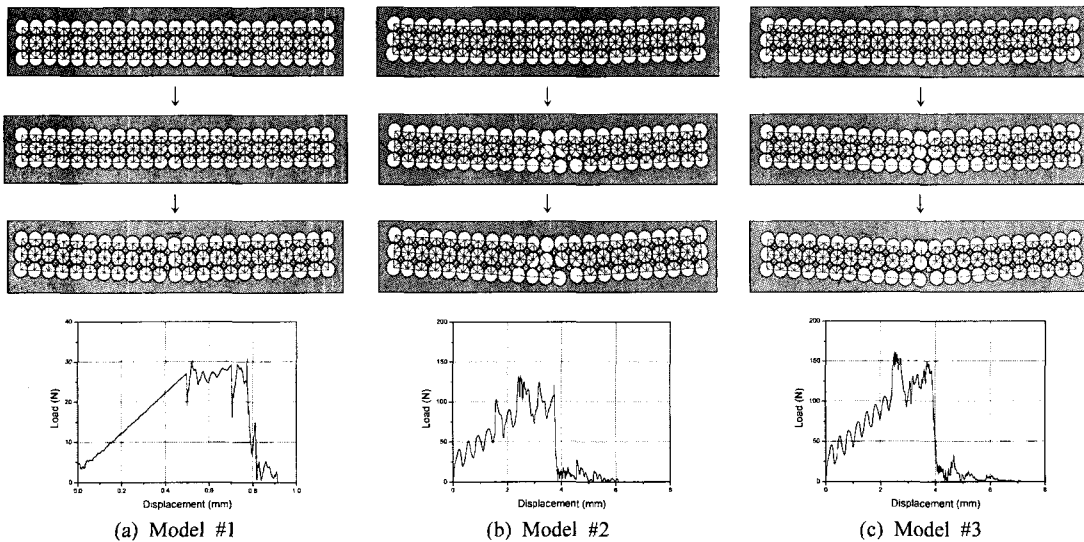


Fig. 15. Process and Result of bending test for different model

Table 6. Comparison between bending test results of PFC model and scaled model

Span 12 cm	Maximum load (N)		Maximum displacement (mm)	
	Scaled model	PFC2D model	Scaled model	PFC2D model
Model #1	29.4	30.2	0.921	0.911
Model #2	135	132	7.69	6.11
Model #3	161	159	8.89	7.17

는 실험방법처럼 이동단으로 작용하게 하기 위해 이들의 수직변위만을 구속하였다. 철근의 반영은 하단 볼 요소들만의 결합력을 높여 철근의 효과를 나타내도록 하였다. 이는 입자결합모델 해석에 있어 인접한 볼 요소간의 결합력에 차이가 발생할 때 작은 값이 사용되는 성질을 이용한 것이다. 이를 바탕으로 이미 수행한 굴곡실험의 하중-변위 그래프와 수치모델 해석에 따른 최대변위와 최대하중 값을 일치시키기 위해 최 하단의 볼 요소들의 결합력을 높여가며 입력 값들을 찾아내었다.

Table 6은 전산실험의 결과로 굴곡 시 발생한 최대하중과 최대변위를 표로 정리한 것이다.

4.3 수치해석에서의 입력 값

보와 기둥의 강도특성을 앞서 실시한 실내실험을 통

해 결정한 후 이를 전산실험에 적용하여 두 결과가 축소 물성 치와 동일한 값이 되는지 확인하였다.

Table 7은 앞서 수행한 Model #1의 수치굴곡실험과 수치단축압축실험을 통해 얻어진 입자결합모델에서의 입력 값들을 나타내고 있다. Table 7에서 (B-A)/A×100(%) 항은 축소모형의 실내실험 결과와 입자결합모델로 해석한 결과의 오차정도를 나타내고 있다. 전산실험 결과와 모형실험의 결과가 만족할 만큼 유사성을 보여주었다.

Table 8은 전산 실험 결과 도출된 철근 배근부의 물성으로 철근이 배근된 인장 축 요소들의 수치입력 값을 나타낸다.

5. 발파해체 거동의 비교

5.1 Model #1의 발파해체 거동

Model #1의 발파해체는 예비실험으로서 수치적인 묘사의 가능성을 확인하기 위한 목적으로 수행되었다. 유한요소법에 의해 수행되는 상용프로그램인 MIDAS를 이용한 검토결과 Model #1의 1층 기둥만을 순차적으로 발파하여도 상부의 보들이 파괴되는 것에는 아무런 지장이 없는 것으로 나타났다. 이를 통해 필요 이상의 기폭 없이 1층의 기둥만을 발파하여 점진붕괴를 유도하였다. 기폭순서는 Fig. 16과 같고 지연시차는 250 ms를 적용하였다.

Table 7. Material properties used in PFC2D model #1 test

	Mechanical properties	Scaled model properties (A)	Input parameters for PFC2D analysis	PFC2D model properties (B)	$\frac{B-A}{A} \times 100$ (%)
Beam	Compressive strength (MPa)	1.63	N_bond = 66 (N) S_bond = 21.12 (N)	1.59	-2.45
	Tensile strength (MPa)	0.31	K _n = 1.01×10 ⁷ (N/m)	0.25	-19.4
	Young's modulus (GPa)	0.25	K _s = 0.99×10 ⁶ (N/m)	0.24	-4.00
	Density (kg/m ³)	1,720	Friction = 0.5 Density = 1,992 (kg/m ³)	1,720	-
Column	Compressive strength (MPa)	2.51	N_bond = 97 (N) S_bond = 31.04 (N)	2.38	+1.28
	Tensile strength (MPa)	0.48	K _n = 1.72×10 ⁷ (N/m)	0.40	-24.5
	Young's modulus (GPa)	0.39	K _s = 1.69×10 ⁶ (N/m)	0.40	+2.56
	Density (kg/m ³)	2,724	Density = 3,066 (kg/m ³) Friction = 0.5	2,724	-

Table 8. Reinforced concrete properties used in PFC2D model tests

Model	N_bond (N)	S_bond (N)	K _n (N/m)	K _s (N/m)	Friction	Density (kg/m ³)
Model #1	66	21.12	1.01×10 ⁷	0.99×10 ⁶	0.5	1,992
Model #2	251.3	138.2	0.3×10 ⁷	0.165×10 ⁷	0.5	1,992
Model #3	308.5	169.7	0.48×10 ⁷	0.264×10 ⁷	0.5	1,992

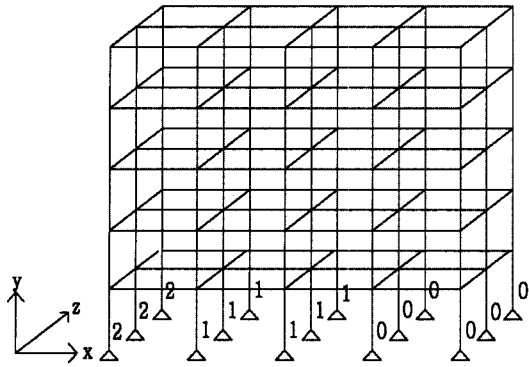


Fig. 16. Sequence of blasting demolition for scaled model #1

기폭은 Fig. 16에서와 같이 구조물 전체 75개의 기동 중에 1층 15개의 기동만을 발파하였고 순발파관의 기폭을 시작으로 -x방향으로 250 ms 간격으로 기폭 되었다. Model #1은 무근구조물이기 때문에 Fig. 17 (a)와 같이 보들이 예상했던 것처럼 기폭이 이루어지자 곧바로 분리되어 자유낙하를 시작하였다. 측면에서 촬영된 영상을 분석한 결과 발파는 x-y평면상에서 2차원으로 진행되었지만 z방향으로 구조부재들이 3차원 거동을 크게 일으켰다. 이는 실험오차로 사료되며, 구조물이 z 방향의 거동을 상호 구속해 줄 수 있고 실제 구조물에도 존재하는 슬래브가 시공되어야 한다는 필요성을 확인하는 계기가 되었다. 수행된 Model #1의 모형실험을 바탕으로 PFC2D를 이용한 수치모사를 수행하였다. 모

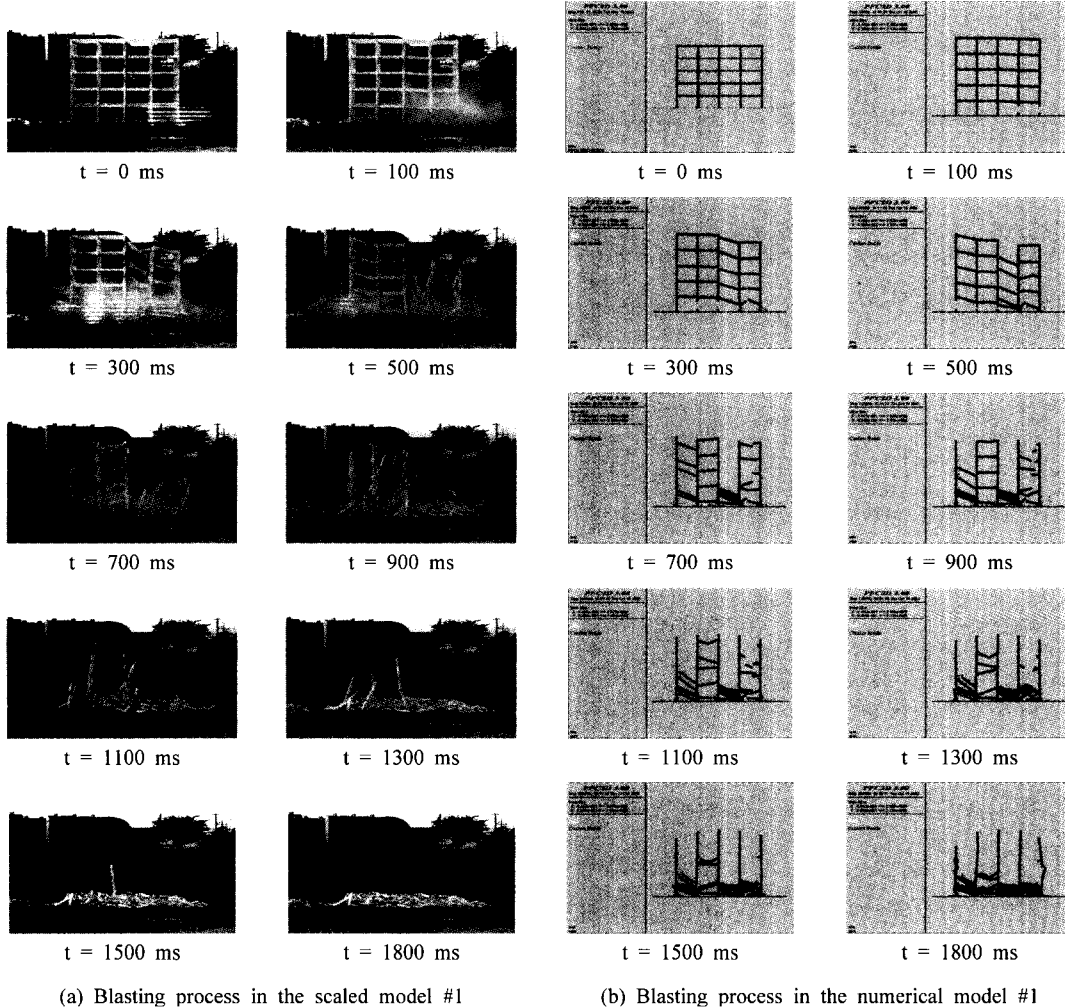


Fig. 17. Process of blasting demolition for model #1

Table 9. Blasting results of scaled model #1

	Scaled model	Numerical model
Interval	250 ms	250 ms
Number of blasted columns	15 / 75	15 / 75
Total number of columns		
Time for complete explosion	500 ms	500 ms
Time for complete collapse of building	1,800 ms	2,480 ms

형실험과 동일하게 1층 기둥만을 순차적으로 발파하였다. Fig. 17 (b)에서 보는 바와 같이 발파해체거동과 어느 정도 유사한 것으로 판단되었다. 단지 기폭이 완료된 후 기둥의 일부가 파괴되지 않고 자립한 점이 축소모형실험과는 다른 점으로 나타났다. 이는 2차원 해석의 한계로 2차원 해석에서는 해석 평면의 전후방으로의 변위가 무시되나 실제 축소모형 실험에서는 기둥부가 후방 쪽으로 많은 변위를 일으키며 붕괴되는 양상을 보인 사실이 이를 뒷받침한다. 따라서 좀 더 상세한 붕괴 거동을 예측하기 위해서는 3차원 해석이 필수적이라고 판단된다. 축소모형 실험과 수치해석 실험에서의 기폭 특성은 Table 9에 정리하였다.

5.2 Model #1의 발파해체 결과

파괴는 발파에 의한 1층 기둥들의 파괴와 발파 후 구조부재들의 뒤틀림 현상으로 인한 기둥과 보의 파괴과정을 거쳐 자유낙하 후 낙하충격으로 인한 파괴까지 이어졌으며, Fig. 18과 같이 구조물의 평면 투영면적보다 넓은 범위로 흩어지는 파괴의 양상을 보였다.

발파 후 파괴되어진 부재들이 바닥의 기초콘크리트 경계 밖으로 최대 40 cm 정도까지 흩어진 결과를 보여주었으며 낙하부재가 2차 평면 내에 구속되어 있는 수치해석의 결과와는 다른 모습을 보였다.



Fig. 18. Result of blasting demolition for scaled model #1

5.3 Model #2의 발파해체 거동

Model #2의 발파는 Model #1의 발파해체 거동을 통해 구조물을 현실적으로 재구성하여 실시한 것이다. Model #2에서는 2차원의 수치해석과 비교하기 위해 Model #1과는 달리 3D의 거동을 지향할 수 있는 슬래브를 추가하고 철근으로 보강하였다. Model #2는 보다 현실적인 철근콘크리트 구조물을 통한 모형실험을 실시하기 위해 수행한 것이며 기폭위치와 지연시차를 찾기 위해 PFC2D 사전해석을 실시하였다.

기폭순서는 Fig. 19와 같이 x방향으로 점진적으로 기폭 되도록 유도하였으며, 사용된 발파패턴은 김해국제공항 청사의 발파해체 시공사례를 참고로 하여 수행하였다(이윤재 외, 2003). 시행착오를 통한 입자결합모델의 해석 결과 Model #2의 경우 3층까지 기둥을 완전발파 하지 않는다면 완전붕괴 유도가 어려울 것으로 나타났다.

Model #2의 발파해체는 Fig. 20의 기폭순서를 따라 3층까지 전 기둥을 200 ms의 시차로 발파하였다. 하지만 미리 수행하였던 사전해석 결과와는 조금 다른 양상을 보였다(Fig. 20 (a)). 우선 점진붕괴 후 4, 5층이 건물의 내측으로 모여 붕괴되는 발파설계대로 붕괴가 유도되어지는 않았다. 또한 예상 했던 것 보다 발파가 진행되어 질에 따라 건물의 낙하속도가 조금 빠르게 나타났다. 또한 Fig. 20 (a)와 (b)를 비교하면 붕괴의 양상은 수치적인 사전해석과 대략 900 ms 까지는 유사하였지만 이후로는 많은 차이를 보이는데 이는 앞서 언급했던 바와 같이 구조물이 낙하하여 쌓이는 방식이 2차원과 3차원에서 크게 다르기 때문으로 사료되어진다. 측면에서 촬영된 영상을 분석한 결과 낙하과정에서의 구조물 전체의 ±z방향 거동은 나타나지 않았다. 하지만 2차원 수치해석에서 상부 기둥들이 낙하하며 바닥에 2차원적으로 쌓이는 결과와는 다르게 모형실험에서는 낙하를 완료한 기둥들이 ±z방향 거동을 하였다. 점진붕괴

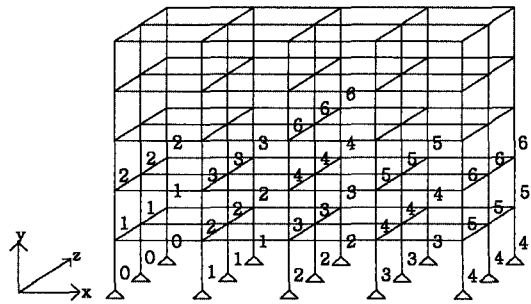


Fig. 19. Sequence of blasting demolition for scaled model #2

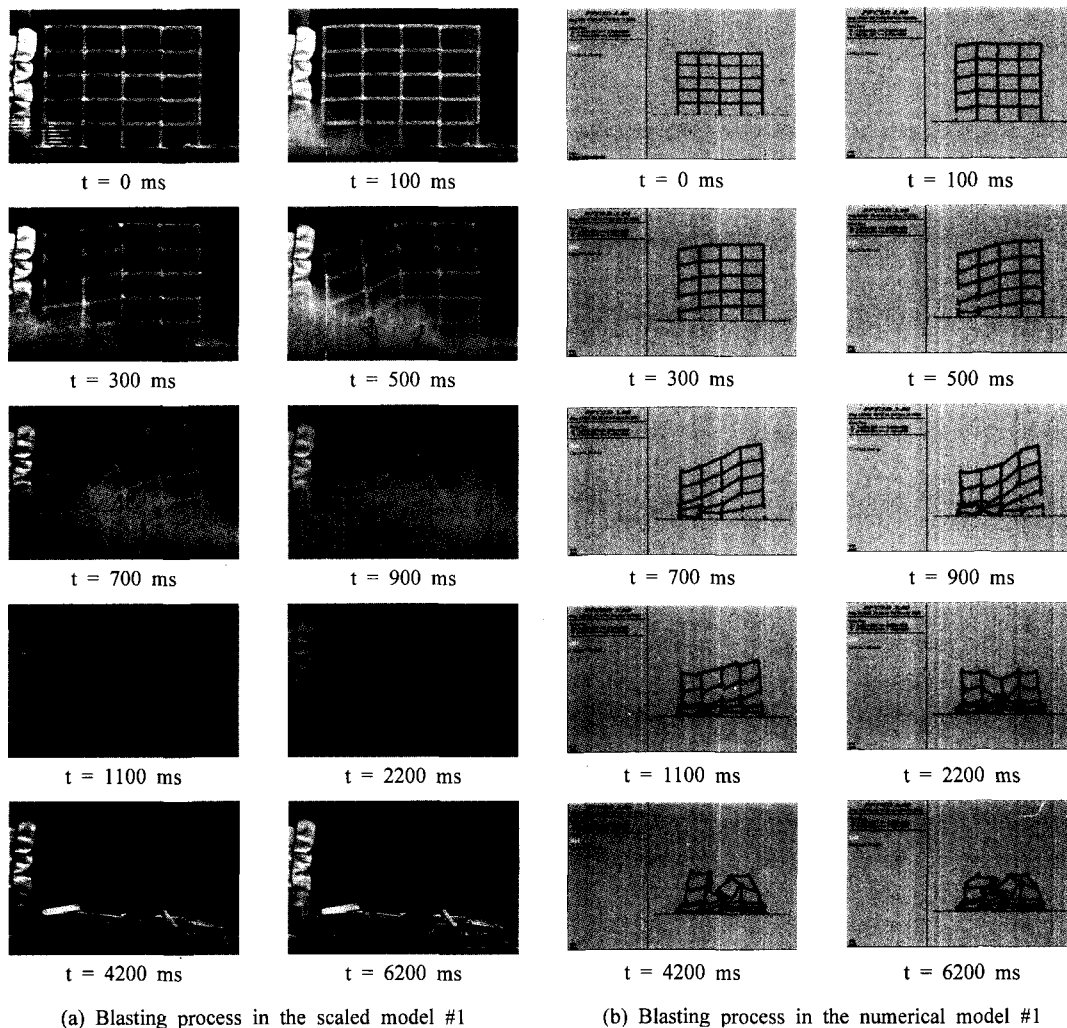


Fig. 20. Process of blasting demolition for model #2

가 진행되며 우측의 기둥들이 좌측으로 기울어지는 모습을 보였으며 발파 후 3,300 ms만에 완전붕괴에 이르렀다. 발파해체 과정은 Fig. 20에 기폭특성은 Table 10에 정리하였다.

Table 10. Blasting results of scaled model #2

	Scaled model	Numerical model
Interval	200 ms	200 ms
Number of blasted columns	48 / 75	48 / 75
Total number of columns		
Time for complete explosion	1,200 ms	1,200 ms
Time for complete collapse of building	3,300 ms	6,200 ms

5.4 Model #2의 발파해체 결과

발파해체 결과 붕괴된 5층 구조물의 부재들은 Fig. 21의 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 지상으로부터 약 35 cm의 높이에 걸쳐 순차적으로 쌓여있었다. 이는 10배 확대한 Scale에서의 높이가 3.5 m임을 고려할 때 중장비에 의한 2차 해체작업에 무리가 없을 것으로 사료된다. 또한 Fig. 21의 (c)와 (d)같이 보와 기둥이 매입된 연결부의 파괴되어진 모습은 실제의 발파해체 시공사례와 비교할 때 상당부분 유사하다고 판단되어진다.

6. 결론

본 연구에서는 3차원 라멘 구조물을 1/10으로 축소하

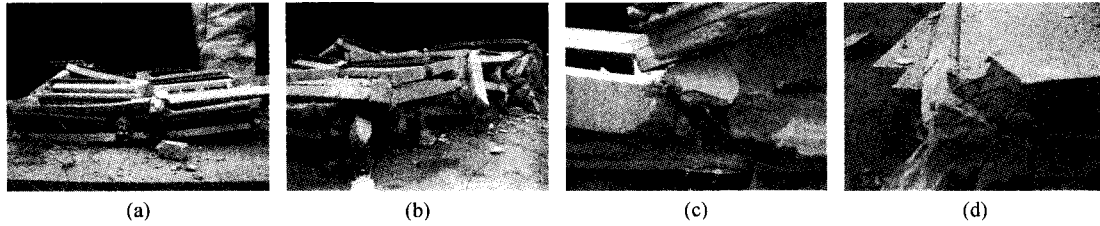


Fig. 21. Result of blasting demolition for scaled model #2

여 이에 따라 축소율을 산정하고 이에 부합하는 강도특성을 지닌 재료를 사용하여 축소모형실험을 실시하였다. 문헌으로부터 철근과 콘크리트의 물리적인 특성과 시험방법을 참고하고 축소된 물리적인 특성에 부합하는 재료를 선정하여 모형실험을 실시하고 수치적인 해석을 통해 이를 비교 분석하였다. 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 차원해석에 의해 산정된 축소율에 따라 여러 가지 대상재료들의 물성실험을 통해 축소율 1/10에서 콘크리트 및 철근과 유사한 강도특성을 갖는 재료를 선별하였다. 이는 발파해체 거동이 변형계수보다는 강도의 특성에 더욱 큰 영향을 받는다는 사실에 근거하여 강도를 우선하여 선정한 것이다. 콘크리트의 모사재료인 석고-물-모래 혼합체는 차원해석에 의한 압축강도와 굴곡강도가 실제의 콘크리트의 강도특성과 거의 일치하는 재료로서 강도 값을 대표하기 위하여 성공적으로 사용될 수는 있지만, 축소율을 적용한 탄성계수는 실제의 콘크리트와 큰 차이를 보인다. 그러나 철근의 모형재료로 사용된 땀용 납선은 그 탄성계수가 콘크리트의 모형재료보다 실제의 경우와 유사하여 변형특성까지 고려해 볼 만한 모형재료라 사료된다.
- 2) 시험발파를 통하여 뇌관의 삽입방향에 따른 영향을 살펴보았다. 시험발파 결과 뇌관의 삽입 방향에 평행한 축을 따르는 선상에 배치된 기둥들은 발파에 의한 아무런 영향을 받지 않았다. 뇌관에 의한 기둥의 파괴정도는 발파공 상하부 약 5 cm로 기둥 전체 길이 26 cm중 약 10 cm이상의 길이가 파괴되었다. 철근이 배근된 기둥과 무근기둥의 파괴범위는 거의 일치했다. 하지만 철근이 배근된 기둥의 경우는 발파 후 철근이 절단되지 아니하고 남아있는 모습을 보였다. 실제의 발파해체 시 철근의 사전 절단이 없을 경우 발파 후 철근이 남게 되는 시공사례와 비교해 볼 때 사용된 전기뇌관은 1/10 Scale에서 적절히 사용된 폭약의 모형재료라 판단된다.

- 3) 무근콘크리트 구조물의 발파영상을 통해 수치해석을 실시하고 이를 토대로 RC구조물의 발파설계를 수행하였다. 전체적인 거동이 유사함에 따라 결과는 비교적 만족스럽다고 사료되며, RC구조물의 발파에서 부재가 낙하한 평면 범위가 기초경계로부터 최대 15 cm인 것을 고려할 때 효과적으로 제어된 발파였다고 사료된다.
- 4) Model #2의 모형실험과 수치해석 결과를 비교 분석하였다. 초기의 거동은 모형실험에서의 거동과 수치해석에서의 거동이 서로 매우 유사하였다. 특히 400 ms에 1층에서 발파되고 구조물에 매달려 있던 좌측의 기둥들이 바닥에 충돌하게 되는 모습까지 일치하였다. 900 ms까지의 초기 거동은 서로 많은 유사성을 보였으나 그 이후는 많이 다른 모습을 보였다. 이는 앞서 언급한 낙하부재들이 평면상에 쌓이는 방식에는 차이가 있기 때문으로 사료되며 3차원 해석의 중요성을 다시 한번 생각해 보게 한다.
- 5) 모형실험에 있어 강도특성 뿐만 아닌 변형계수까지 일치시킬 수 있는 재료의 선정이 이루어진다면 보다 신뢰할 수 있는 모형실험이 될 것으로 판단된다.

또한 모형실험 시 제작시간에 많은 제약을 받지 않기 위해서는 시간에 따라 물리적인 특성의 변화가 적은 재료의 선택이 중요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1996, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발.
2. 김종우, 1988, 층상압반내 경도의 변형거동에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 3-11.
3. 류창하, 1999, 발파연구를 위한 수치해석적 기법과 컴퓨터 모델링, 발파기술 세미나 논문집, 한국암반공학회, 1-20.
4. 서영갑, 안주옥, 1993, 철근 콘크리트공학, 구미서관, 12-20.
5. 손무열, 김광태, 이윤재, 1996, 1996 한화 발파해체 시공사례, 제 1회 한화기술 심포지움, 415-434.
6. 우동균, 신현목, 문재길, 1998, 철근 콘크리트, 동명사, 1-63.

7. 이윤재, 송영석, 정민수, 권오성, 강대우, 2003, 김해국제공항 구 국제선 청사 발파해체 시공사례, 화약·발파, 37-48.
8. 정원준, 2002, PFC2D를 이용한 구조물의 발파해체 거동모사, 서울대학교 공학석사학위 논문.
9. 조근희, 1995, 개별요소법에 의한 2차원 뼈대구조물의 붕괴해석, 서울대학교 공학석사학위 논문.
10. 조효남, 심종성, 1991, 철근 콘크리트 구조설계, 구미서관, 1-54.
11. 한국자원연구소, 1993, 제어발파에 의한 구조물 해체기술 개발연구(1), 과학기술처.
12. Gere, J., S., Timoshenko, 1991, Mechanics of Materials, I.T.P., 220-266.
13. Hobbs, D., 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results; Int. J. Rock Mech Min. Sci. 3, 101-127
14. <http://www.standard.go.kr>(기술표준원).
15. <http://www.wlmetal.co.kr>(우림금속).
16. Kasai, Y., T., Saito, Y., Seki, K., Tomita, J., Ishibashi, 1993, Blasting demolition of six-story reinforced concrete apartment building (Part 2: Demolition plan, pre-work measures, collapse conditions), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, 159-169.
17. Kurokawa, K., T., Yoshida, T., Saito, M., Yamamoto, S., Nakamura, 1993, Blasting demolition of six-story reinforced concrete apartment building (Part I: Experimental blasting of reinforced concrete components), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, 147-158.
18. Persson, P., R., Holmberg, J., Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, 90-115.
19. Sawada, I., U., Yamaguchi, N., Kobayashi, M., Nakajiku, H., Shibata, T., Shindo, 1993, Blasting demolition of six-story reinforced concrete apartment building (Part 3: Blast design, noise and vibration), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, 171-181.

채 희 문



2001년 건국대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시
스템공학부 공학석사

Tel: 02-2011-8421
E-mail: hmchae@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 기술연구소 토목설계
지원팀

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학
공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
교수