화약·발파, 대한화약발파공학회
제22권 제1호, 2004, pp. 33~43

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 22, No. 1 (2004) pp. 33~43
J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

축소모형실험과 입자결합모델 해석을 통한 철근 콘크리트 구조물의 발파해체 거동에 관한 비교 분석

채희문[1], 전석원[2]

A Study on the Behavior of Blasting Demolition for a Reinforced Concrete Structure Using Scaled Model Test and Particle Flow Analysis

Hee Moon Chae and Seokwon Jeon

ABSTRACT. In this study, a comparison was made between the resulting behaviors of scaled model test and particle flow analysis for blasting demolition of a reinforced concrete structure. For the test and analysis, a progressive failure of a five-story structure was considered. The dimension analysis was carried out to properly scale down the real structure into the laboratory size. The test model was made of the mixture of gypsum, sand and water along with soldering lead to analogy reinforcing steel bars. The ratio of mixing components was chosen to best represent the scaled down strength and deformation modulus. The columns and girders of the structure were precasted in the laboratory and assembled right before the blasting test. The numerical analysis of the blasting demolition was carried out using PFC2D (Particle Flow Analysis 2-Dimension by Itasca). The results of the blasting of concrete lahmen structure showed roughly identical demolition behavior between scaled model test and numerical test. For the blasting of the reinforced concrete structure, the results were more identical and closer to the real demolition behavior, since the demolition behavior was better represented in this case due to the increased tensile strength of the component.

Key words : blasting demolition, scaled model test, progressive failure, numerical analysis

초 록. 본 연구에서는 철근콘크리트(reinforced concrete) 구조물에 대해 발파해체 축소모형실험을 수행하고 이를 전산실험결과와 비교하였다. 적용된 발파해체 공법은 파괴거동을 비교적 쉽게 확인할 수 있는 점진붕괴공법이며, 차원해석(Hobbs(1969))을 실시하여 축소모형실험에 적용될 강도특성을 계산하였다. 이에 따라 석고, 모래, 물의 혼합하여 콘크리트를 대용할 재료로 사용하였으며, 연성을 지니며 축소강도가 철근과 유사한 땜용 납선을 철근 대용 재료로 사용하였다. 이 때 모래와 석고의 중량 비를 다양하게 변화시키면서 이에 따른 강도의 변화를 측정하고 최적의 강도 값을 갖는 배합 비를 결정하여 사용하였다. 모형의 제작은 실내에서 미리 양생된 부재들을 현장으로 옮겨 연결부만을 타설하여 일체화시키는 방법으로 구조물을 축조하였다. 축소모형실험을 전산실험결과와 비교하기 위하여 요소의 파괴거동을 육안으로 확인할 수 있는 개별요소법에 의해 수행되는 상용코드인 PFC2D(Particle Flow Code 2-Dimension)를 사용하여 전산해석을 수행하였다. 먼저 3차원 무근 콘크리트 라멘 구조의 모형을 설계하고 그 축소모형을 발파해체하여 거동을 촬영하였다. 이를 전산실험결과와 비교하여 2차원 해석의 한계는 존재하나 대체로 유사한 형태의 거동을 보임을 알 수 있었다. 그리고, 무근 콘크리트 라멘 구조 해석의 경험과 철근콘크리트 보의 실내 굴곡실험결과를 근거로 하여 철근콘크리트 구조모형의 발파해체 사전해석을 실시하였다. 그 결과, 2차원 해석이라는 한계에도 불구하고 900 ms 까지는 거의 유사한 거동을 보이며 붕괴됨을 확인하였다.

핵심어 : 발파해체, 축소모형실험, 점진붕괴, 전산해석

1. 서 론

발파해체공법은 1940년대 말 미국의 CDI사에 의하여 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 아파트

1) 대림산업주식회사
2) 서울대학교
접수일 : 2004년 2월 25일

를 대상으로 시험발파를 통해 기둥과 보 등 구조요소의 장약, 천공방법에 관해 연구했고, Kasai(1993) 등은 같은 구조물에 대해 방호, 사전파쇄작업 등의 폭파해체시공에 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 라멘구조물에 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 라멘 구조물의 붕괴거동을 해석하였다. 정원준(2002)은 개별요소법을 기반으로 하는 PFC2D(Itasca)를 이용하여 발파해체로 인한 구조물의 붕괴거동을 모사하였다.

실물을 축소한 모형실험은 실제의 구조체를 외형뿐만 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 발파해체함으로서 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

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. 다음의 Table 1과 Table 2는 각각 본 연구에서 사용한 콘크리트 모형과 철근콘크리트 모형의 축소율을 정리한 것이다.

2.2 콘크리트 및 철근의 모형재료

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(김종우, 1988). 석고와 배합되는 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 또한 철근을 대신하여 철근과 물리적 성질이 비슷하고 비교적 쉽게 구할 수 있는 땜용 납선을 사용하였다. Table 3은 축소모형에 사용된 재료의 구성과 물리적 특성을 나타낸 것이다.

Table 1. Scale factor for concrete model.

Physical Property	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.

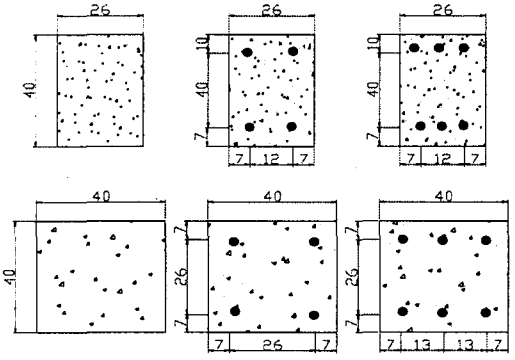
Physical Property	Dimension	Real model	Scaled model	Scale
Length	[L]	diameter: 20 mm	diameter: 2 mm	1/10
Mass	[M]			1/930
Time	[T]			1/3.16
Density	$[ML^{-3}]$	7.85 g/cm^3	8.4 g/cm^3	1/0.93
Young's modulus	$[ML^{-1}T^{-2}]$	208,163 MPa	22,359 MPa	1/9.31
Yield stress	$[ML^{-1}T^{-2}]$	428 MPa	46 MPa	1/9.31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

Table 3. Material properties for the scaled model test.

	Composition (%)	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Density (g/cm3)
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

3. 축소모형구조

축소모형은 해석이 용이하고 비교적 실제에 가까운 형상으로 3차원 라멘구조를 선택하였다. 본 연구에서 수행한 Model 들의 보 및 기둥의 단면은 Fig. 1과 같다.

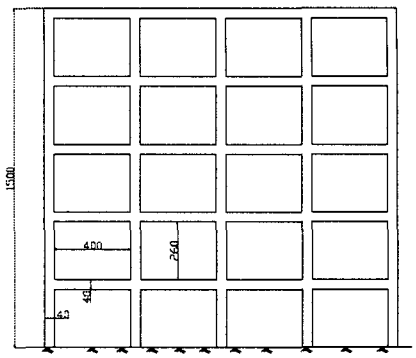


(a) Model #1 (b) Model #2 (c) Model #3

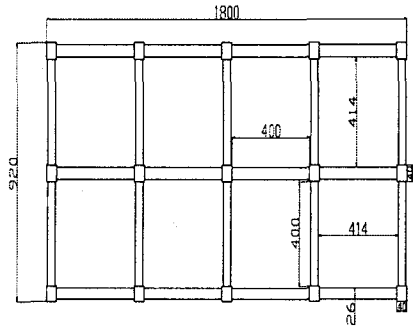
Fig. 1. Sections of beam (40×26) and column (40×40) for 3 types of test models (unit: mm).

Fig. 2는 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. 3 (a)는 Model #1의 보와 기둥이 연결되는 모습을 보여주는 상세 도면이다. Fig. 3 (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.

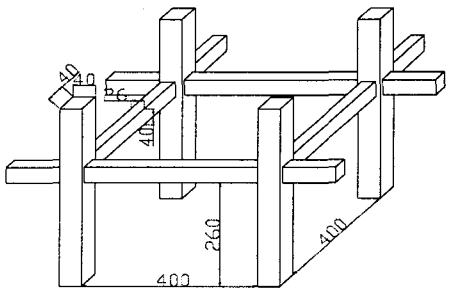


(a) Front view

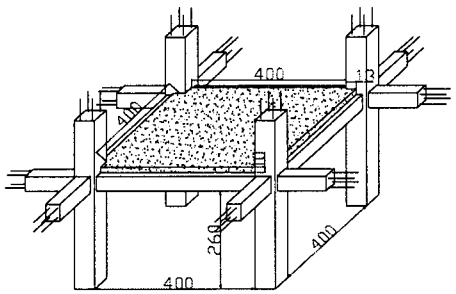


(b) Plane view

Fig. 2. Front and plane view of scaled model structure (unit: mm).



(a) Joint intersections of beams and columns in the model #1



(b) Joint intersections of beams and columns with slab in the model #2

Fig. 3. Detailed drawing of joints for scaled model structure (unit: mm).

4. 모형의 수치해석

보와 기둥의 강도특성을 실내실험을 통해 결정한 후 이를 전산실험에 적용하여 두 결과가 축소물성 치와 동일한 값이 되는지 확인하였다. Table 4는 미리 수행한 Model #1의 수치굴곡실험과 수치단축압축실험을 통해 얻어진 입자결합모델에서의 입력 값들을 타나내고 있다. Table 4에서 (B-A)/A×100(%)항은 축소모형의 실내실험 결과와 입자결합모델로 해석한 결과의 오차정도를 나타내고 있다. 전산실험 결과와 모형실험의 결과가 만족할 만큼 유사성을 보여주었다.

Table 5는 전산 실험 결과 도출된 철근 배근부의 물성으로 철근이 배근된 인장 측 요소들의 수치입력 값을 나타낸다.

Table 4. Material properties used in PFC2D model #1 test.

	Mechanical properties	Scaled modell properties (A)	Input parameters for PFC2D analysis	PFC2D model properties (B)	(B-A/)A×100 (%)
Beam	Compressive strength (MPa)	1.63	N_bond = 66 (N) S_bond = 21.12 (N) Kn = 1.01×107 (N/m) Ks = 0.99×106 (N/m) Friction = 0.5 Density = 1,992 (kg/m³)	1.59	-2.45
	Tensile strength (MPa)	0.31		0.25	-19.4
	Young's modulus (GPa)	0.25		0.24	-4.00
	Density (kg/m³)	1,720		1,720	-
Column	Compressive strength (MPa)	2.51	N_bond = 97 (N) S_bond = 31.04 (N) Kn = 1.72×107 (N/m) Ks = 1.69×106 (N/m) Density = 3,066 (kg/m³) Friction = 0.5	2.38	+1.28
	Tensile strength (MPa)	0.48		0.40	-24.5
	Young's modulus (GPa)	0.39		0.40	+2.56
	Density (kg/m³)	2,724		2,724	-

Table 5. Reinforced concrete properties used in PFC2D model test.

Model	N_bond (N)	S_bond (N)	Kn (N/m)	Ks (N/m)	Friction	Density (kg/m³)
Model #1	66	21.12	1.01×107	0.99×106	0.5	1,992
Model #2	251.3	138.2	0.3×107	0.165×107	0.5	1,992
Model #3	308.5	169.7	0.48×107	0.264×107	0.5	1,992

5. 모형실험과 수치해석실험의 발파해체 거동비교

5.1 Model #1

Model #1의 발파해체는 예비실험으로서 수치적인 모사의 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. 4와 같고 지연시차는 250 ms를 적용하였다.

기폭은 Fig. 4에서와 같이 구조물 전체 75개의 기둥 중에 1층 15개의 기둥만을 발파하였고 순발뇌관의 기폭을 시작으로 -x방향으로 250 ms 간격으로 기폭 되었다. Model #1은 무근구조물이기 때문에 Fig. 5 (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 z방향의 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. 모형실험과 동일하게 1층 기둥만을 순차적으로 발파하였다. Fig. 5 (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 붕괴거동을 예측하기 위해서는 3차원 해석이 필수적이라고 판단된다. 축소모형 실험과 수치해석 실험에서의 기폭특성은 Table 6에 정리하였다.

Table 6. Blasting results of scaled model #1.

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

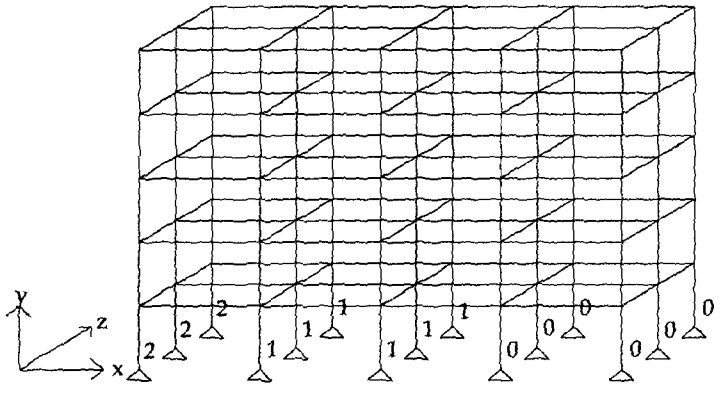
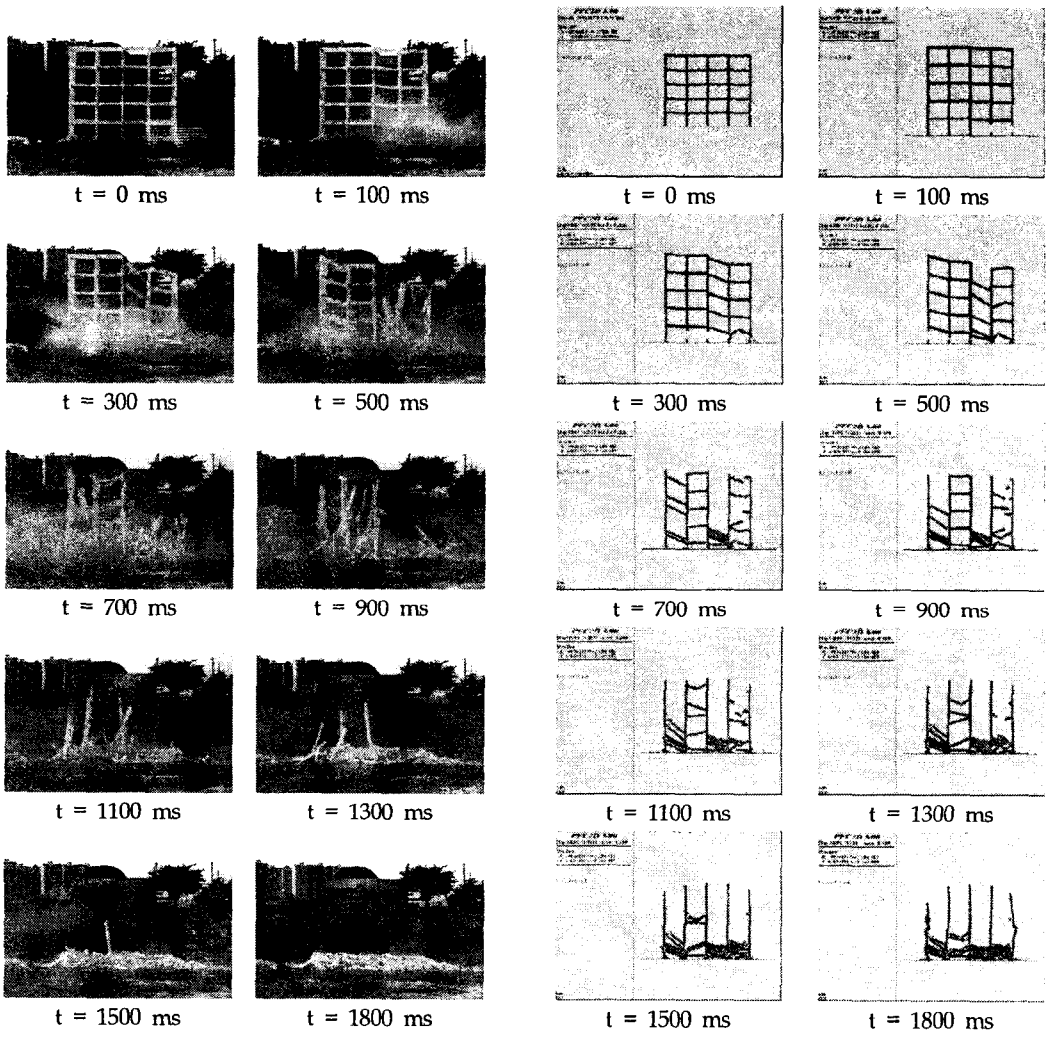


Fig. 4. Sequence of blasting demolition for scaled model #1.



(a) Blasting process in the scaled model #1 (b) Blasting process in the numerical model #1

Fig. 5. Process of blasting demolition for model #1.

파괴는 발파에 의한 1층 기둥들의 파괴와 발파 후 구조부재들의 뒤틀림 현상으로 인한 기둥과 보의 파괴과정을 거쳐 자유낙하 후 낙하충격으로 인한 파괴까지 이어졌으며, Fig. 6과 같이 구조물의 평면 투영면적보다 넓은 범위로 흩어지는 파괴의 양상을 보였다.

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

Fig. 6. Result of blasting demolition for scaled model #1.

5.2 Model #2

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. 7과 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. 7의 기폭순서를 따라 3층까지 전 기둥을 200 ms의 시차로 발파하였다. 하지만 미리 수행하였던 사전해석 결과와는 조금 다른 양상을 보였다(Fig. 8 (a)). 우선 점진붕괴 후 4, 5층이 건물의 내측으로 모이며 붕괴되는 발파설계대로 붕괴가 유도되어지지는 않았다. 또한 예상 했던 것 보다 발파가 진행되어 짐에 따라 건물의 낙하속도가 조금 빠르게 나타났다. 또한 Fig. 8 (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 ±z 방향 거동을 하였다. 점진붕괴가 진행되며 우측의 기둥들이 좌측으로 기울어지는 모습을 보였으며 발파 후 3,300 ms만에 완전붕괴에 이르렀다. 발파

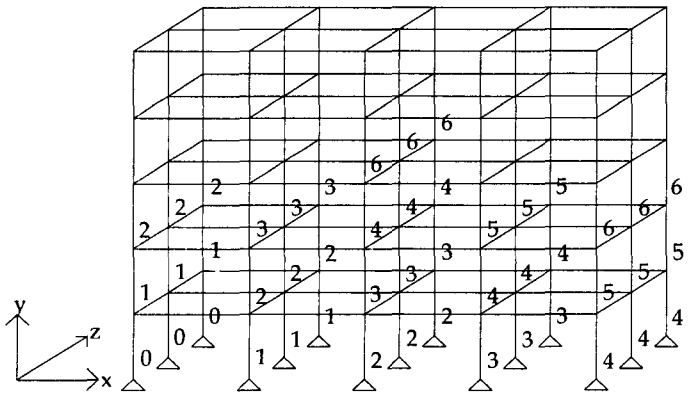


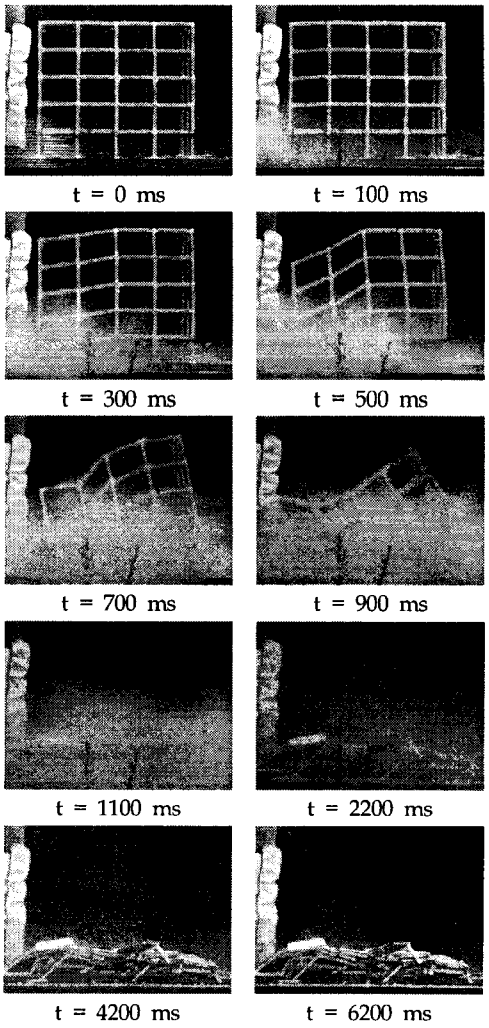
Fig. 7. Sequence of blasting demolition for scaled model #2.

해체 과정은 Fig. 7에 기폭특성은 Table 7에 정리하였다.

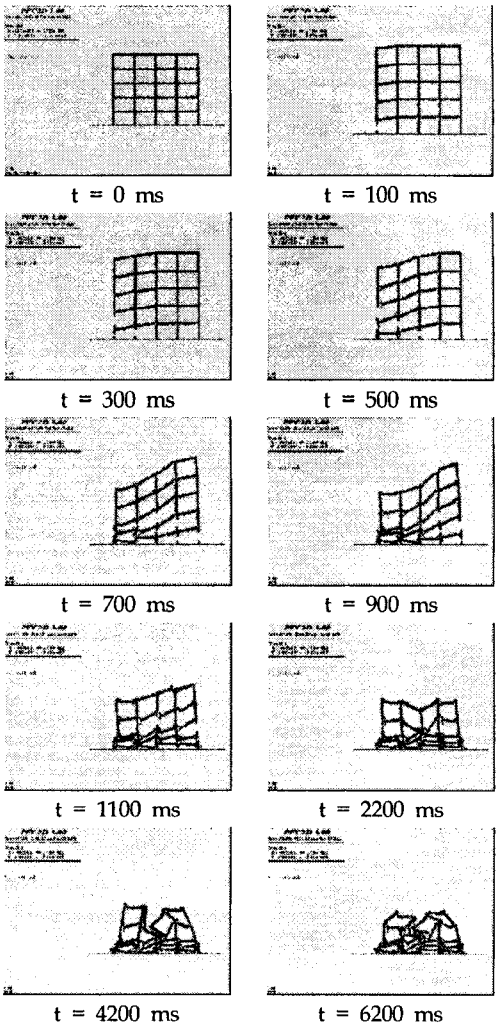
발파해체 결과 붕괴된 5층 구조물의 부재들은 Fig. 9의 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 지상으로부터 약 35 cm의 높이에 걸쳐 순차적으로 쌓여있었다. 이는 10배 확대한 Scale에서의 높이가 3.5 m임을 고려할 때 중장비에 의한 2차 해체작업에 무리가 없을 것으로 사료된다.

Table 7. Blasting results of scaled model #2.

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



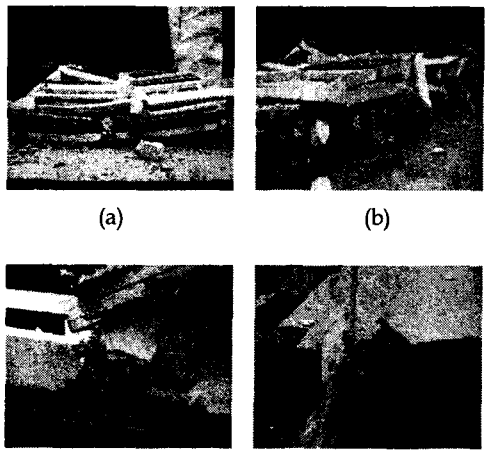
(a) Blasting process in the scaled model #2



(b) Blasting process in the numerical model #2

Fig. 8. Process of blasting demolition for model #2.

이는 10배 확대한 Scale에서의 높이가 3.5 m임을 고려할 때 중장비에 의한 2차 해체작업에 무리가 없을 것으로 사료된다. 또한 Fig. 9의 (c)와 (d) 같이 보와 기둥이 매입된 연결부의 파괴되어진 모습은 실제의 발파해체 시공사례와 비교할 때 상당부분 유사하다고 판단되어진다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 9. Result of blasting demolition for scaled model #2.

6. 결 론

본 연구에서는 3차원 라멘 구조물을 1/10으로 축소하여 이에 따라 축소율을 산정하고 이에 부합하는 강도특성을 지닌 재료를 사용하여 축소모형 실험을 실시하였다. 문헌으로부터 철근과 콘크리트의 물리적인 특성과 시험방법을 참고하고 축소된 물리적인 특성에 부합하는 재료를 선정하여 모형실험을 실시하고 수치적인 해석을 통해 이를 비교분석하였다. 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 차원해석에 의해 산정된 축소율에 따라 여러가지 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 땜용 납선은 그 탄성계수가 콘크리트의 모형재료보다 실제의 경우와 유사하여 변형특성까지 고려해 볼 만한 모형재료라 사료된다.

(2) 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.

(3) 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.

(4) 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.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1996, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발.
2. 김종우, 1988, 층상암반내 갱도의 변형거동에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 3-11.
3. 류창하, 1999, 발파연구를 위한 수치해석적 기법과 컴퓨터 모델링, 발파기술 세미나 논문집, 한국암반공학회, pp.1-20.
4. 서영갑, 안주옥, 1993, 철근 콘크리트공학, 구미서관, pp.12-20.
5. 손무열, 김광태, 이윤재, 1996, 1996 한화 발파해체 시공사례, 제 1회 한화기술 심포지움, pp.415-434.
6. 우동균, 신현묵, 문재길, 1998, 철근 콘크리트, 동명사, pp.1-63.
7. 이윤재, 송영석, 정민수, 권오성, 강대우, 2003, 김해국제공항 구 국제선 청사 발파해체 시공사례, 화약 · 발파, pp.37-48
8. 정원준, 2002, PFC2D를 이용한 구조물의 발파해체 거동 모사, 서울대학교 공학석사학위 논문.
9. 조근희, 1995, 개별요소법에 의한 2차원 뼈대구조물의 붕괴해석, 서울대학교 공학석사학위 논문.
10. 조효남, 심종성, 1991, 철근 콘크리트 구조설계, 구미서관, pp.1-54.
11. 한국자원연구소, 1993, 제어발파에 의한 구조물 해체기술 개발연구(I), 과학기술처.
12. Gere, J., Timoshenko, S., 1991, Mechanics of Materials, I.T.P, pp.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, pp.101-127
14. http://www.standard.go.kr
15. http://www.wlmetal.co.kr
16. Kasai, Y., Saito, T., Seki, Y., Tomita, K., Ishibashi, J., 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, pp.159-169.
17. Kurokawa, K., Yoshida, T., Saito, T., Yamamoto, M., Nakamura, S., 1993, Blasting demolition of six-story reinforced concrete apartment building (Part 1: Experimental blasting of reinforced concrete components), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, pp.147-158.
18. Persson, P., Holmberg, R., Lee, J., 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, pp.90-115.
19. Sawada, I., Yamaguchi, U., Kobayashi, N., Nakajiku, M., Shibata, H., Shindo, T., 1993, Blasting demolition of six-story reinforced concrete apartment building (Part 3: Blast degign, noise and vibration), Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, pp.171-181.