

삼차원 입자결합모델을 이용한 구조물 해체발파 모사 연구

신병훈¹⁾, 전석원¹⁾

Simulation of Blasting Demolition Using Three-Dimensional Bonded Particle Model

Byung-Hun Shin and Seok-Won Jeon

Abstract : Reflecting the fact that there are increasing number of old high-story apartment structures in urban area, it is expected that the demand of blasting demolition will increase in the near future. It is of great important to make up for the insufficient empirical knowledge in blasting demolition through priori method such as computer simulation. Computer simulation of the blasting demolition involves complicated process. In the past domestic researches, two-dimensional bonded particle model was used to examine the overall demolition behavior of a five-story simple structure. It was observed that the two-dimensional simulation did not properly simulate the collapsing behavior of a structure mainly due to the reduced degree of freedom. In this study, three-dimensional simulation was tried. It consumed a great amount of calculation time, which limited the extent of the study. A few parameters, such as delay times, amount of charge at each hole, ball properties, were modified in order to check out their effect on the collapsing behavior. The differences were observed as expected but the collapsing behavior did not exactly coincide with the test blasting with a scaled model.

Key words : blasting demolition, bonded particle model, PFC3D, collapsing behavior, scaled model test.

초 록 : 최근 도심지 고층 구조물의 수가 증가하면서 수명이 오래된 구조물에 대한 재건축 수요가 증가하고 있는 실정이다. 기존 구조물을 철거하는 방법에는 기계식 해체 공법과 발파 해체공법이 있으나 10여층 이상의 고층건물일 경우 발파해체공법을 사용하는 것이 경제적으로 유리한 것으로 알려져 있다. 발파해체공법을 사용할 경우, 발파에 앞서 미리 그 붕괴거동을 예측하는 일은 안전한 발파를 위해서 뿐만 아니라 발파해체의 실패를 방지하기 위해서 필수적으로 요구된다. 과거의 연구에서 이차원 입자결합모델을 사용하여 구조물 해체과정을 모사한 사례가 있었지만, 실제 발파붕괴 거동을 적절히 모사하는 데는 많은 제약이 있었다. 본 연구에서는 개별요소법을 기반으로 입자결합모델을 사용한 상용 프로그램인 PFC3D를 사용하여 구조물의 3차원 해체발파를 모사하였다. 삼차원 해석에서는 해석 시간이 오래 걸리는 단점으로 인하여 현실에 가까운 모사를 완성할 수 없었지만 몇 가지 입력변수를 바꾸어가며 그들의 효과를 관찰하였다. 보다 현실에 가까운 결과를 얻기 위해서는 입력변수의 설정과 부재 특성의 모사에 보다 많은 노력이 필요할 것으로 보인다.

핵심어 : 발파해체, 입자결합모델, PFC3D, 붕괴거동, 축소모형실험

1. 서 론

구조물은 일정 시간이 지나게 되면 안정성이 저하하게 되고 그로 인해 보수 혹은 재건축의 필요성이 발생한다. 특히 우리나라에서는 기존 건물의 증개축 및 재건축 붐이 일기 시작한 90년대 이후로 해체 산업은 많은 발전을 거듭하였고, 건설산업의

한분야로서 관심이 증대되고 있다(김효진과 신재완, 1997). 노후된 구조물을 해체하기 위해서는 기계식 해체 공법 혹은 발파 해체 공법을 사용할 수 있다. 경제적인 측면에서 볼 때 저층 구조물에서 보다는 고층 구조물에서 발파 해체 공법이 더 유리한 것으로 알려져 있다. 서울지역의 아파트 층고 (Table 1)를 살펴보면 70년대에 들어서면서부터 11층 이상 아파트의 수가 급격히 증가하여 80년대 이후부터는 대부분을 차지하고 있다. 이에 대응하여 향후 발파 해체의 수요가 증가할 것으로 예상된다.

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부
접수일 : 2005년 3월 24일

발파 해체기술은 대부분 실적을 토대로 한 자료와 경험적 기술이 그 기초를 이루고 있다. 우리나라에서는 수차례의 시공실적이 있으나 아직 기술적 보완이 필요한 실정이다. 따라서, 이를 보완하기 위한 방법으로 사전에 시뮬레이션에 의한 붕괴 거동을 예측하는 것이 바람직할 것이다. 정원준(2003)은 개별요소법을 기반으로 하는 PFC2D (Itasca)를 이용하여 전도, 점진, 내파 붕괴 등의 공법을 수치적으로 모사하였고, 채희문(2004)은 PFC2D를 이용하여 점진붕괴를 모사하고, 이를 축소 모형을 대상으로 실시한 점진붕괴 거동과 비교한 바 있다. 그러나 위 연구들은 2차원 해석으로 부재가 낙하하는 방향이 해석단면으로 구속되어 붕괴거동이나 방향이 현실과 다르게 나타나는 것으로 관찰되었다.

의 차이를 구현할 수 있는지 살펴보았다.

2. PFC3D

PFC3D (Particle Flow Code 3-Dimension)는 개별요소법을 기반으로 하는 입자결합모델로서 벽과 강성체인 구형입자들로 매질이 이루어져 있다고 가정한다. 이 프로그램에서는 연산이 시작되면 입자와 벽 요소의 위치로부터 접촉 여부를 파악한 후 힘과 변위를 계산(force-displacement law)하고, 운동방정식(law of motion)으로부터 각 요소의 속도와 위치를 계산하는 과정을 반복 수행함으로써 각 요소의 위치를 나타낼 수 있도록 한다. 연산과정은 Fig. 1과 같다.

Table 1. Increasing number of stories of apartment (건설교통부, 1999)

Category	Newly built apartment units				Stories of apartment (Seoul, %)					Total
	Nationwide		Seoul		Under 5 stories	6~10 stories	11~15 stories	16~20 stories	Over 21 stories	
	No. of unit	%	No. of unit	%						
Before 1970	33,406	0.7	22,366	2.8	57.5	35.3	2.1	3.0	2.1	100
1971~1980	350,784	7.7	162,221	20.0	53.5	8.4	37.9	0.2	0.0	100
1981~1990	1,162,914	25.6	285,664	35.2	21.6	4.9	69.5	3.3	0.7	100
After 1991	2,996,137	66.0	340,447	42.0	2.3	3.4	63.4	19.5	11.4	100
Total	4,543,241	100	810,728	100	20.6	5.5	60.0	9.1	4.8	100

본 연구에서는, 실제 발파 해체 과정을 보다 효과적으로 모사하기 위하여 3차원 해석 프로그램인 PFC3D를 사용하여 거동을 예측하였다. 먼저, 3차원 입자결합 모델을 이용하여 부재를 구성하고 부재의 특성을 이해한 후 부재의 강도특성을 구현할 수 있는 물성값을 결정하였다. 축소 모형에 대하여 붕괴 거동을 모사하고 축소모형실험 결과와 비교하였다. 축소모형은 무근 콘크리트와 철근 콘크리트를 모사할 수 있도록 제작하여 이에 대한 거동

3. 물성값의 결정

PFC에서는 모든 매질이 구형 입자로 이루어졌다고 가정하고 매질의 강도특성을 만족하는 입력 변수를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 실제적으로 배열된 입자의 특성을 이용하여 전체 매질의 강도특성을 동시에 만족시키는 것은 현실적으로 매우 어렵다 (Potyondy & Cundall, 2004). 본 연구에서는 구조물에서 보와 기둥 부재에 대하여 각

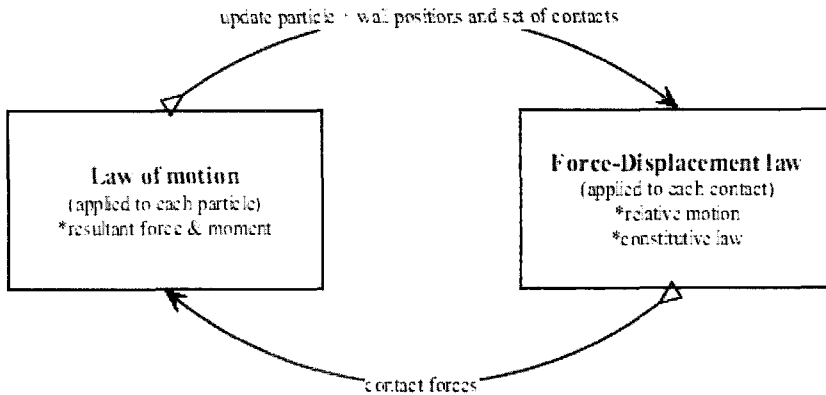


Fig. 1. Calculation cycle in PFC3D(after Itasca Consulting Group, Inc., 2003).

각 일축압축강도 특성과 굴곡강도 특성을 만족하는 물성을 찾는다.

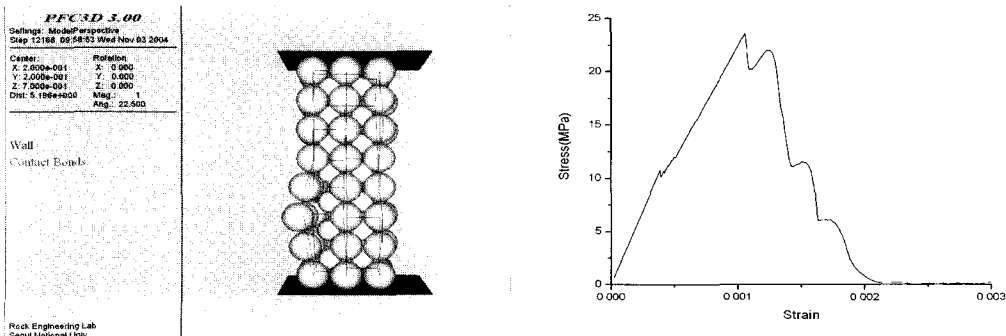
3.1 기둥 부재에 대한 일축압축강도 실험

수치해석 상의 일축압축 실험은 상하가압판을 만들고 KS F 2405에서 제시하는 범위 내의 하중속도(6±4 kgf/sec)로 재하하였다. 구형 입자의 배열은 구조물을 모델링 할 때의 배열과 같게 하기 위하여 큰 입자를 3열로 배치하고 그 공극을 작은 입자로 채우는 배열을 사용하였다. Fig. 2 (a)는 모델의 일축압축실험의 과정을 수치해석으로 모사하였을 때의 파괴과정을 나타내며 (b)는 수치해석 결과로 얻어진 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다.

그 결과 일축압축강도는 236 kg/cm²이었고, 탄성계수는 $E_c = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났으며, 파괴거동도 실제와 유사한 것으로 나타났다.

3.2 보 부재에 대한 굴곡 실험

실제 구조물을 모사할 때와 같은 배열로 입자를 배열하여 보를 구성하고 이에 대해 굴곡시험을 모사하여 강도특성을 나타낼 수 있도록 하였다. 굴곡 시험 과정은 Fig. 3 (a)에 나타나 있으며 그 결과는 (b)에 나타내고 있다. 그 결과 굴곡강도는 105 kg/cm²로 나타났다.



(a) Deformation in uniaxial compression test

(b) Stress-strain relationship

Fig. 2. Process and result of uniaxial compression test in PFC3D model.

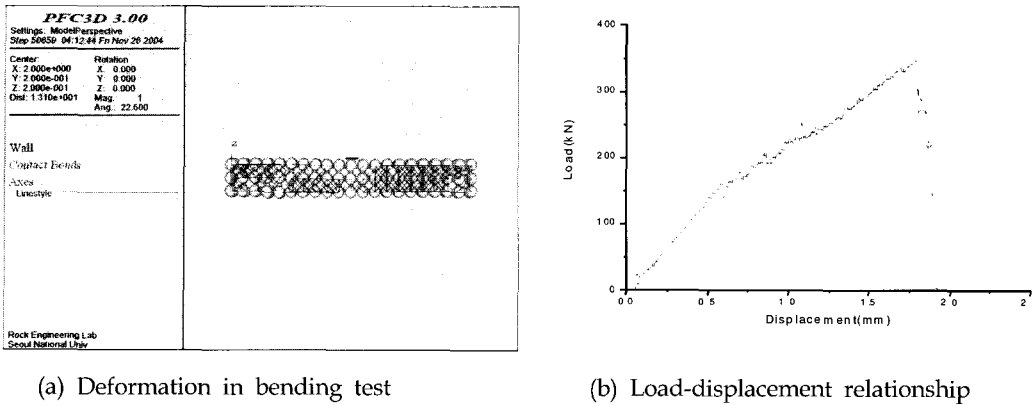


Fig. 3. Process and result of bending test in PFC3D model.

4. 해체 발파의 모사

4.1 무근 콘크리트 축소모형의 붕괴 거동

채희문(2004)은 무근 콘크리트 축소모형을 제작하여 점진붕괴를 유도하는 실험을 실시하고 실험 결과를 PFC2D 모델링 결과와 비교한 바 있다. 이 경우 부재의 낙하방향이 해석평면 내로 구속되는 2차원의 한계를 극복하지 못하였다. 붕괴된 구조물의 잔재에 의하여 일부의 기둥이 붕괴되지 않는 등 모형실험결과와 부합되지 않는 부분이 발견되었다.

본 연구에서는 같은 구조물을 대상으로 PFC3D를 사용한 수치해석을 수행하여 축소모형실험 결과를 비교하였다. 3차원으로 모델링 한 결과, 2차

원 해석과는 달리 비교적 부재의 움직임이 자유로워 남아있는 기둥 부재가 없이 모든 기둥이 붕괴되는 것을 보여주고 있다. 구조물의 붕괴 거동을 살펴보면, 먼저 발파된 기둥의 열이 무너져 내림으로써 보와 기둥간의 연결부위에서 인장파괴가 발생하여 다음 열의 보가 떨어져 내리는 결과를 보였다. 이후 붕괴가 진행됨에 따라 부재의 움직임이 비교적 자유로워 모든 부재가 붕괴됨을 보여주고 있다. 이는 채희문(2004)의 축소모형 실험 결과와 매우 유사한 거동을 보였으며, 실제 거동을 모사하기 위해서는 2차원 해석에 비해 3차원 해석이 정확함이 관찰되었다. 발파시차는 채희문(2004)의 조건과 동일한 시차(Fig. 4)를 주었으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

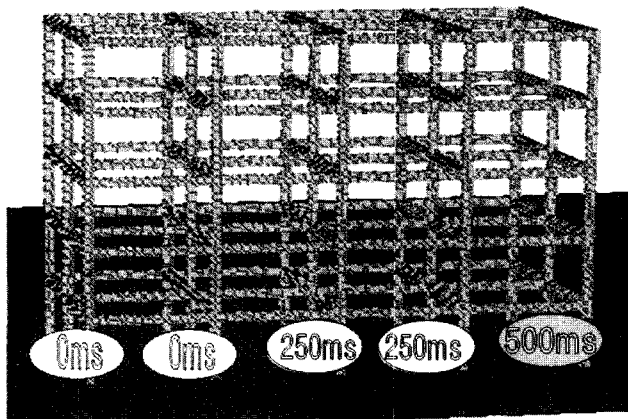
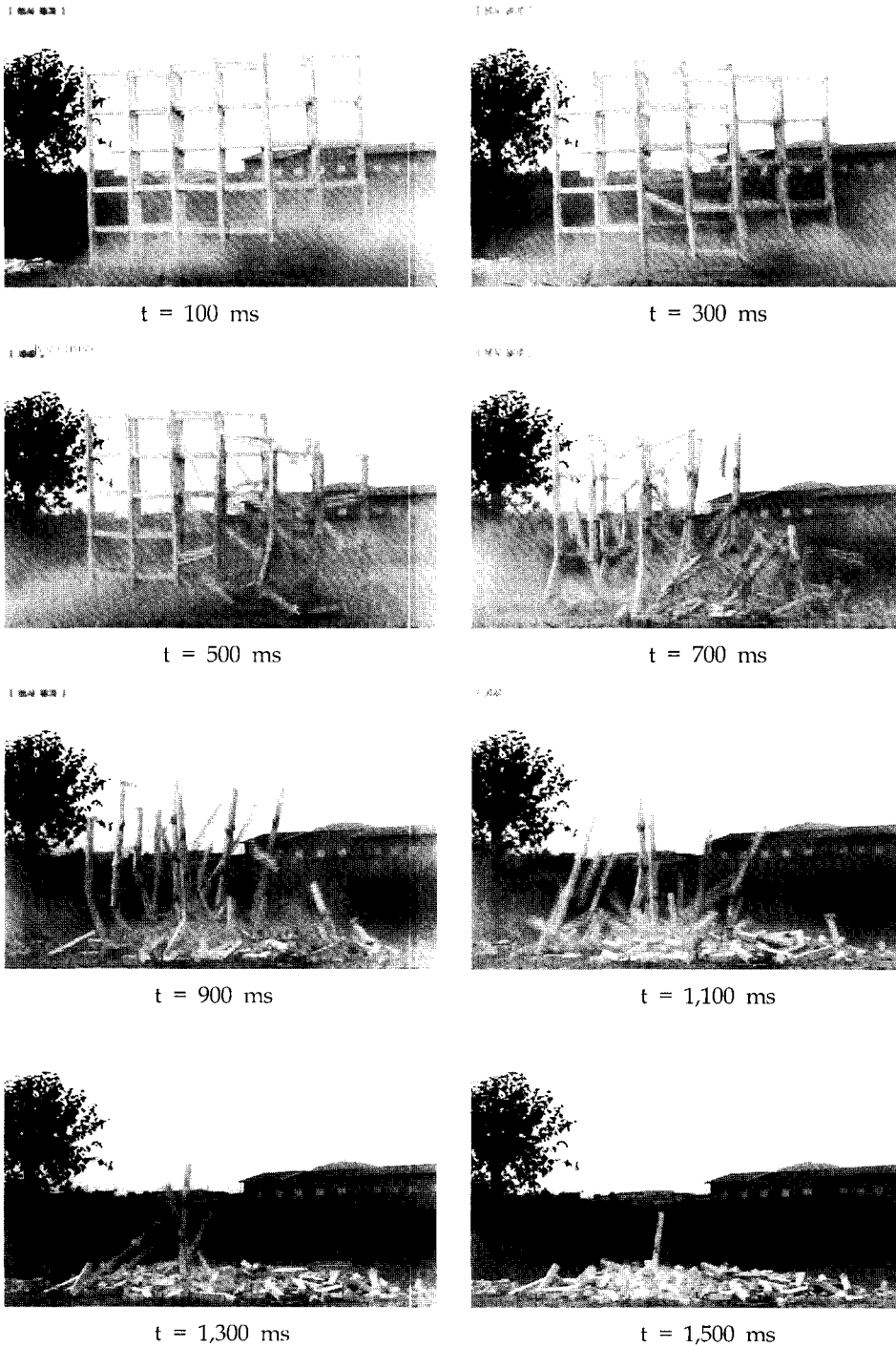
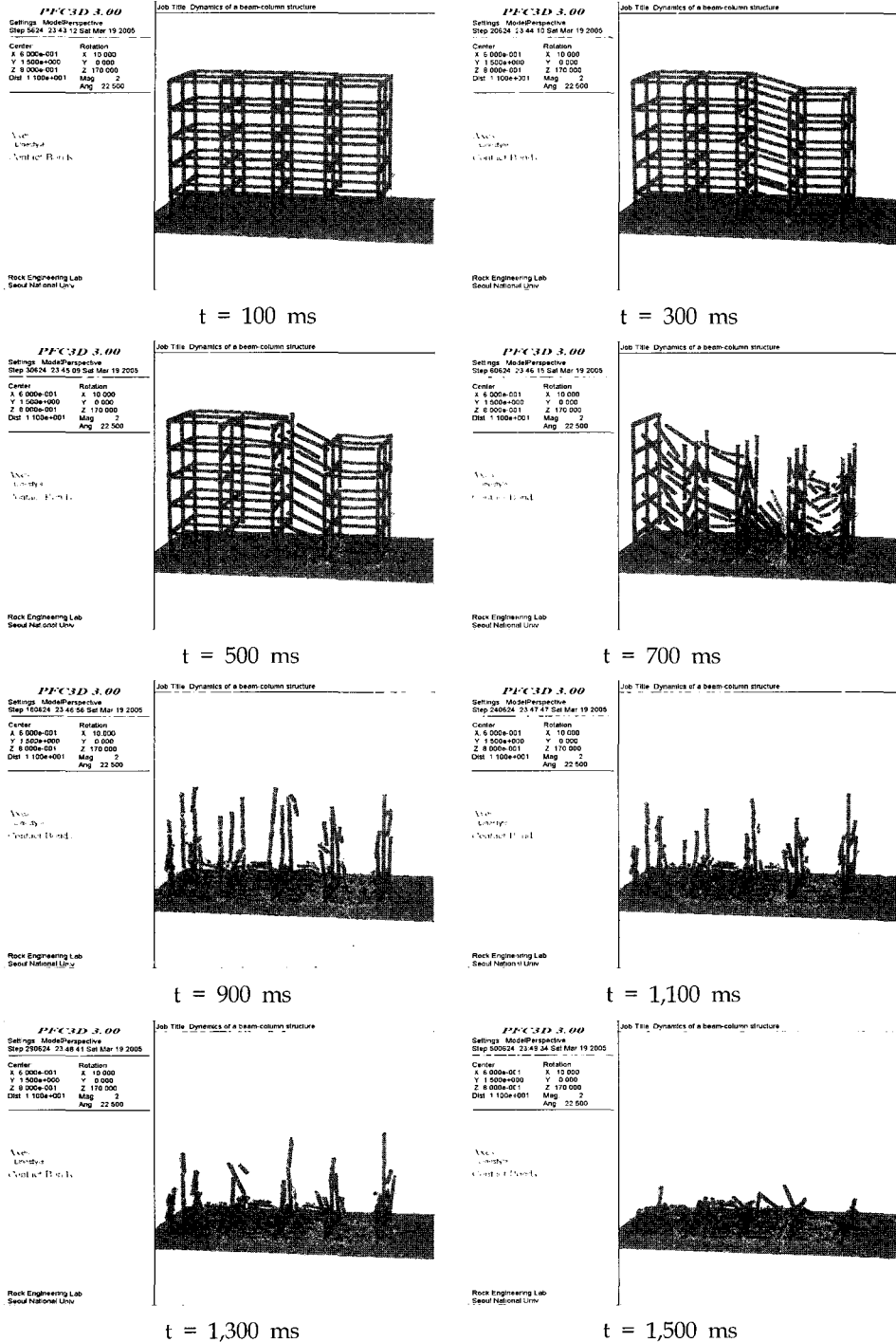


Fig. 4. Blast hole position and blasting sequence in the scaled model test of a concrete structure.



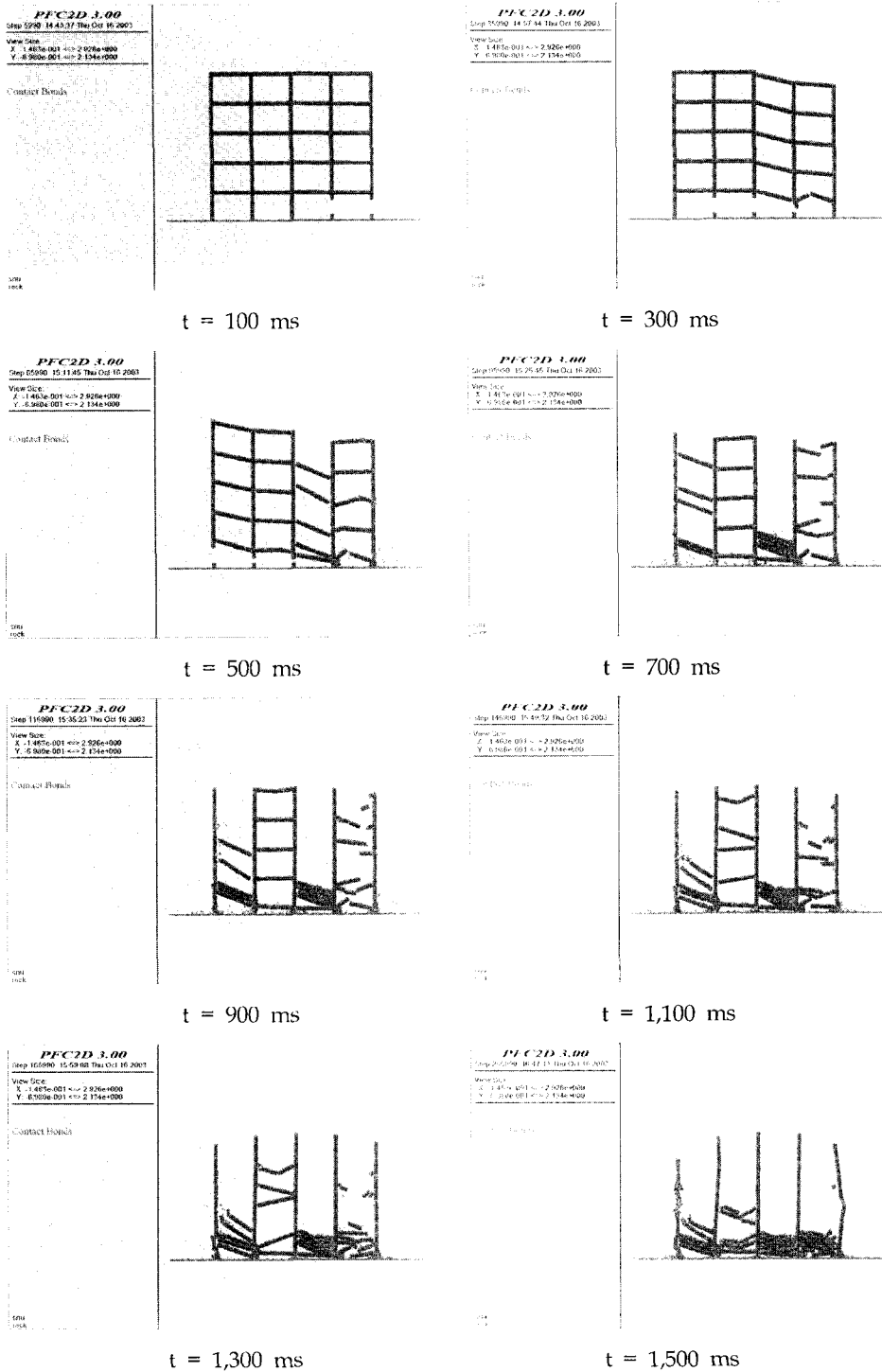
(a) Demolition process in the scaled concrete structure model

Fig. 5. Process of blasting demolition for concrete model.



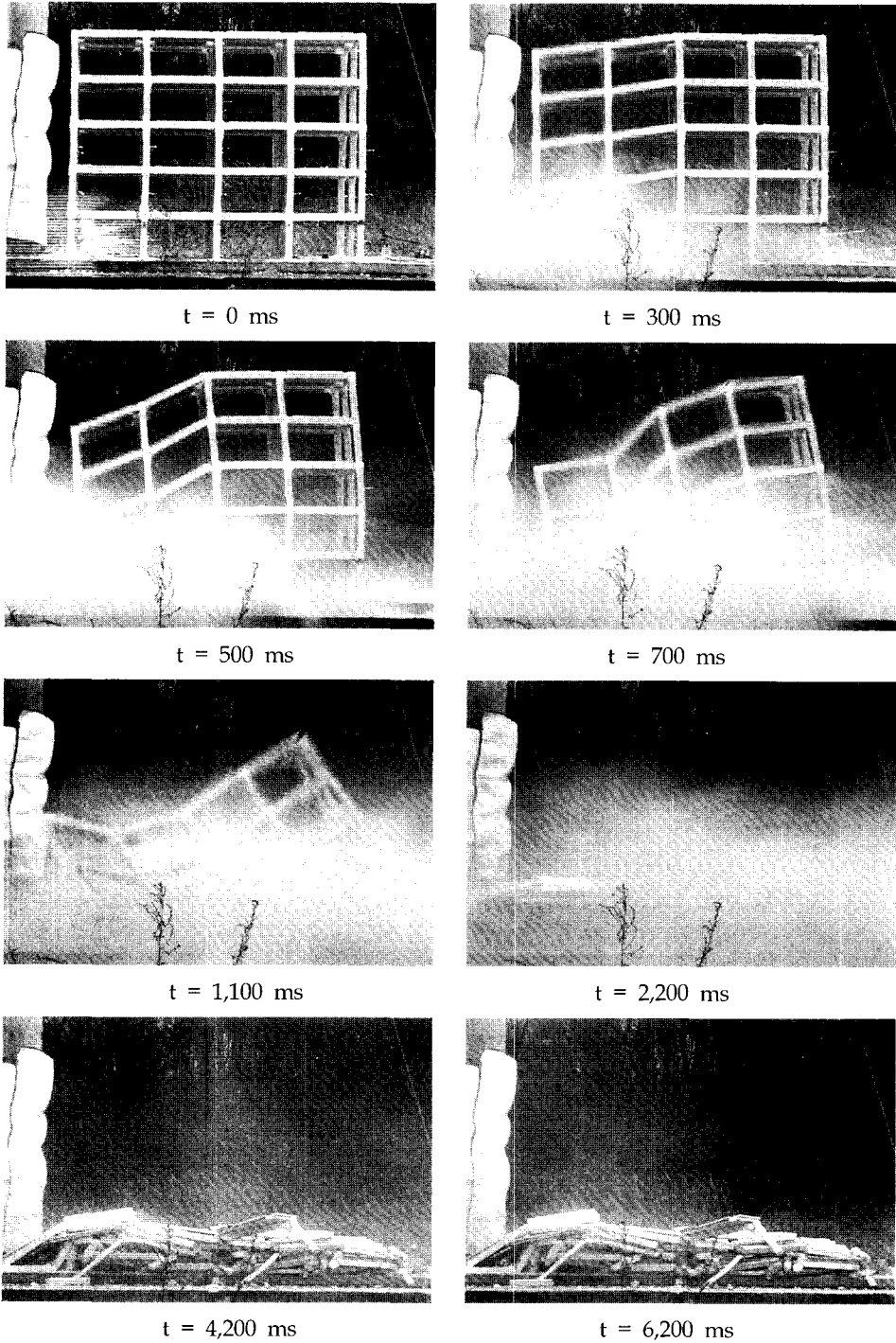
(b) Demolition process in the numerical analysis using PFC3D

Fig. 5. Continued.



(c) Demolition process in the numerical analysis using PFC2D

Fig. 5. Continued.



(a) Demolition process in the scaled RC structure

Fig. 7. Process of blasting demolition for scaled RC structure.

Fig. 5(a)에서는 무근 콘크리트 축소모형 구조물의 해체 거동을 시간에 따라 나타낸 것이다. (b)에서는 PFC3D로 그 거동을 예측한 것이며, (c)는 PFC2D로 그 거동을 예측한 것이다. 실제 거동을 살펴보면 부재가 낙하하면서 구조물의 평면 투영면적보다 넓은 범위로 흩어지는 양상을 보였다. 그러나 2차원 해석에서는 낙하하는 부재가 수직방향으로만 한정되어 있어 낙하부재는 순서대로 쌓이게 되며 그로 인해 기둥의 전도가 쉽게 일어나지 않는 등 실제와 다른 양상을 보였다. 이는 2차원 해석의 한계로 보인다. 그러나 3차원 해석에서는 부재가 낙하하면서 측면으로 흩어지는 파괴 양상을 보임으로써 실제와 유사한 거동을 나타내었다. 따라서 구조물의 해체 발파 붕괴 거동을 모사하기 위해서는 2차원 해석보다는 3차원 해석이 유용한 것으로 판단된다.

4.2 철근 콘크리트 축소모형의 붕괴 거동

앞서 실시한 무근 콘크리트 축소모형의 실험과는 달리 철근 콘크리트 구조물의 붕괴 거동을 살펴보는 것이 중요한 의미를 가질 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 철근 콘크리트의 강도특성을 구현하기 위하여 건물의 부재 중 철근으로 배열된 열의 강도를 크게 증가시켜 철근의 효과를 나타내

고자 하였다. 또한 철근이 배열된 부근의 콘크리트에서도 철근과의 부착력으로 인해 철근의 물성을 나타내므로 강도와 더불어 마찰계수를 증가시킴으로써 전체적인 강도의 증가를 유도하였다. 철근 콘크리트 축소모형의 발파 시차는 실제 발파에서의 시차(이윤재 외, 2003)를 고려하여 채희문(2004)의 실험에서 사용된 시차를 사용하였으며 (Fig. 6), 그 결과는 Fig. 7과 같다.

철근열의 강도를 증가시켰기 때문에 전체적으로 부재들이 무근 콘크리트에 비해 파괴가 덜 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 철근의 밀도가 크고 기둥과 보의 연결부위의 강도가 제대로 구현되지 못하여 기둥과 보의 결합이 쉽게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 실제 철근 콘크리트 구조물의 경우 점진 붕괴가 일어남에 따라, 보와 기둥의 연결부위에서 파괴가 쉽게 일어나지 않고, 전체적으로 하중을 전달시켜 붕괴를 유도하는 양상을 보인다(채희문, 2004; 한동훈 외, 2003; UNAPIX, 1999). 따라서 수치해석으로 철근콘크리트 구조물의 실제적인 붕괴 거동을 나타내고자 하기 위해서는 보와 기둥의 연결부의 강도특성 등 연결부위에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

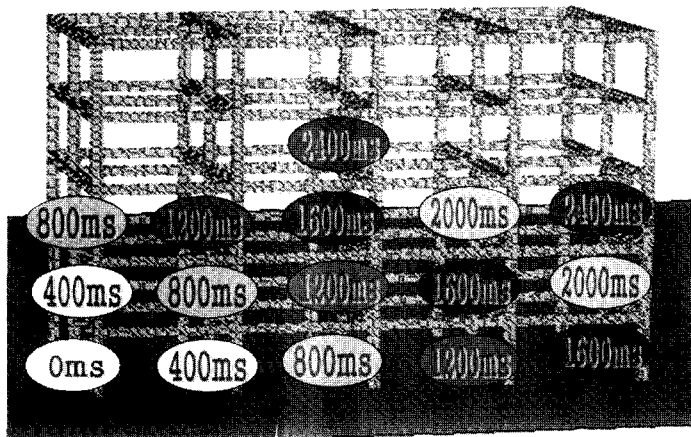
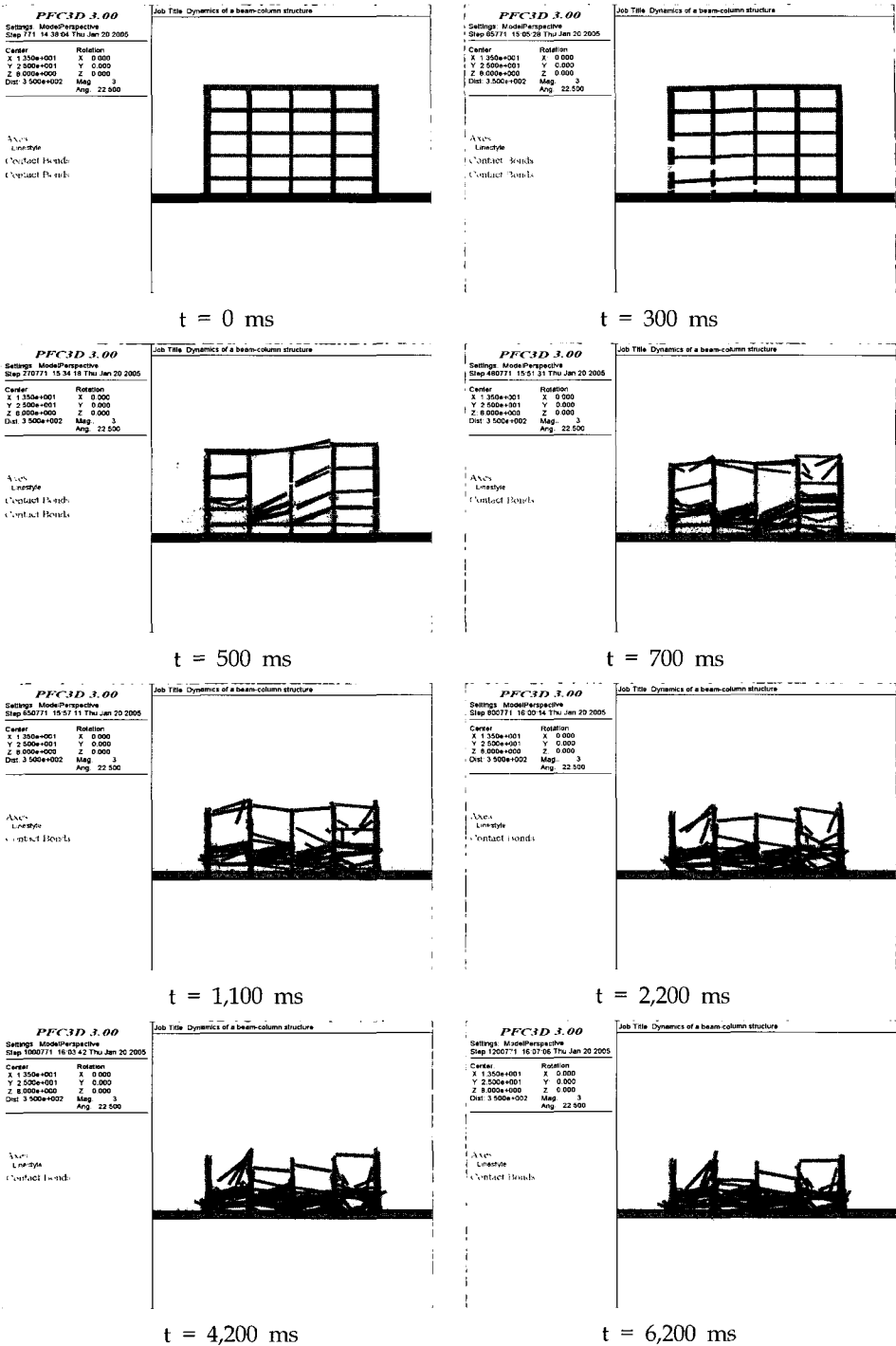
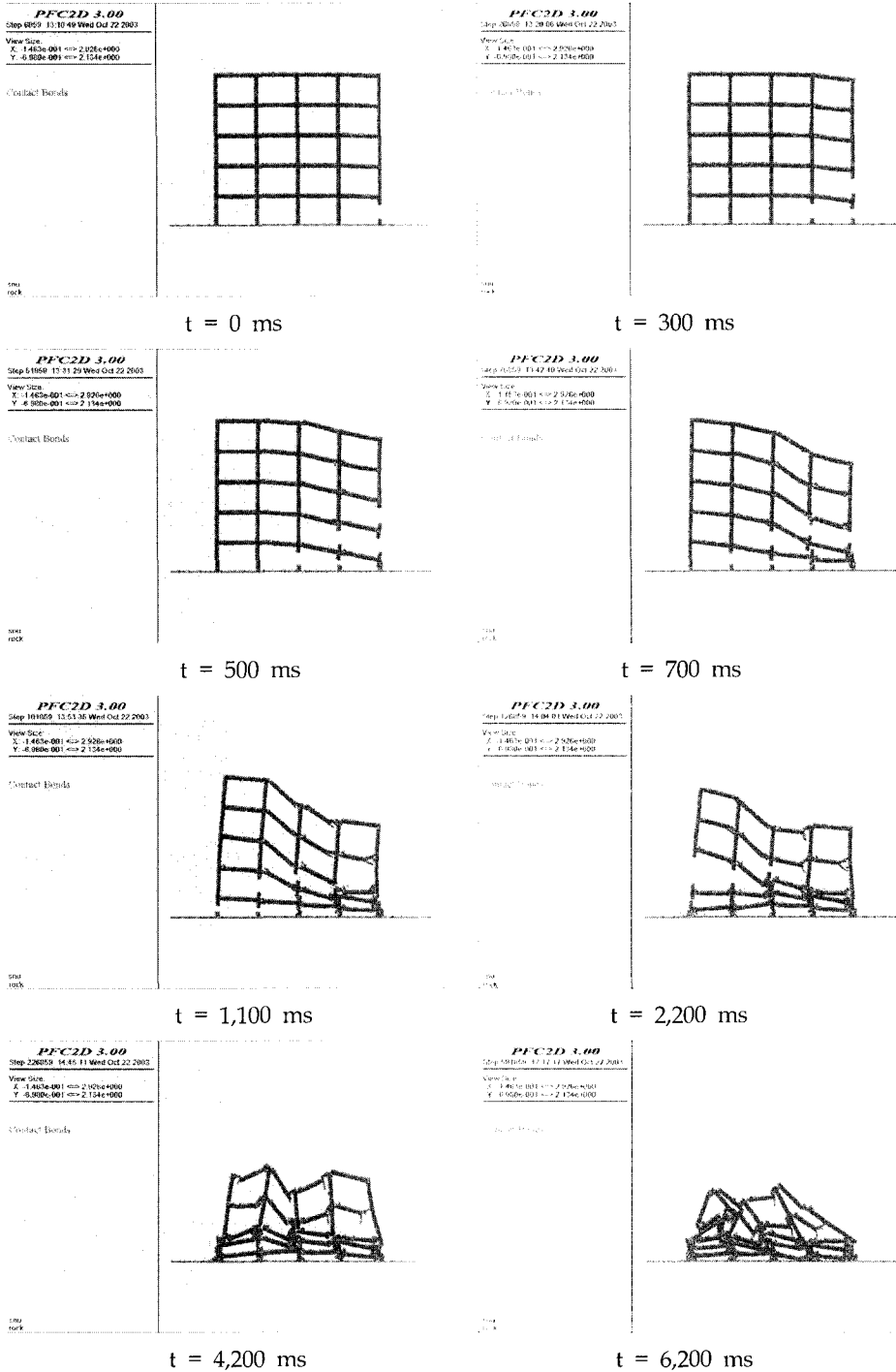


Fig. 6. Blast hole position and blasting sequence in scaled model test of an RC structure.



(b) Blasting process of scaled RC structure in numerical analysis using PFC3D

Fig. 7. Continued.



(c) Blasting process of scaled RC structure in numerical analysis using PFC2D

Fig. 7. Continued.

Fig. 7 (a)에서는 축소모형 철근 콘크리트 구조물의 붕괴양상을 나타낸 것이고, (b)에서는 이를 PFC3D를 사용하여 모델링 한 것이며, (c)는 PFC2D로서 모델링 한 결과이다. 붕괴 후 낙하부재의 상황을 살펴보면 실제 실험 결과에서는 완전 붕괴가 일어나 모든 부재가 전도되는 양상을 보였으나 2차원 해석에서는 일부 부재가 붕괴되지 않고 모양을 유지하고 있는 등 사실과 다른 붕괴 거동을 나타내었다. 반면 3차원 해석에서는 모든 부재의 붕괴가 일어나 실제 실험과 비슷한 양상을 보였다. 3차원 해석에서는 철근의 강도특성을 제대로 반영할 수 있었으나, 보와 기둥의 연결부위에 대한 강도특성이 제대로 구현되지 못하여 일부에서 인장 파괴가 먼저 발생하여 보 부재가 먼저 낙하하는 등 실제와 다소 다른 거동을 나타내었다. 보와 기둥의 연결부위에 대한 강도특성을 제대로 반영할 수 있는 방안이 마련된다면 PFC3D가 PFC2D보다 더 좋은 결과를 가져올 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조물의 발파해체 과정을 모사하기 위하여 개별요소법을 기반으로 하는 입자결합모델을 사용하였다. 상용 프로그램인 PFC3D를 사용하여 구형 입자들로 기둥과 보를 구성하였고, 강도특성을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 각각 일축압축시험과 굴곡시험을 모사하여 적절한 물성을 결정하였다. 이를 바탕으로 5층 축소모형 구조물의 붕괴거동을 모사하였고, 이를 실제 실험 결과와 비교하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석에 있어서 필요한 물성은 실제 부재의 강도특성을 만족시킬 만한 수준의 값을 사용하여 성공적으로 결정할 수 있었다. 본 연구에서는 일축압축강도와 휨인장강도를 만족시킬 때의 물성을 사용하였다.
- (2) 무근 콘크리트 구조물에 대하여 수치해석을 실시하고 이를 발파 영상 및 PFC2D의 결과와 비교하였다. PFC2D와의 비교를 통해 거동을 살펴본 결과 2차원 해석에서는 부재의 거동이 구

속되어 있어 기둥이 전도되지 않고 남아 있는 등 실제 거동과 다른 결과를 보였으나, 3차원 해석에서는 비교적 부재의 거동이 자유로워 실제의 거동과 같이 모든 기둥이 전도되는 양상을 보였다. 따라서 실제의 붕괴 거동을 모사하고자 할 경우 3차원 해석에 의한 수치해석이 2차원 해석보다 유용할 것으로 판단된다.

- (3) 입자결합모델을 이용하여 철근열의 강도를 증가시키는 방법으로 철근콘크리트의 강도특성을 구현하고 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동을 나타내고자 하였다. 그 결과 붕괴 후 부재가 적재되는 상태를 살펴보면 2차원 해석에서는 구조물의 붕괴는 일어나지만 일부 부재가 전도되지 않는 결과를 보여 구조물이 완전히 붕괴되지 않는 등 현실과 다른 양상을 보였다. 그러나 3차원 해석에서는 부재가 낙하하여 점차적으로 부재가 적재되는 등 보다 현실적인 거동을 나타내었다. 그러나 붕괴거동을 살펴보면 기둥과 보의 연결부위에서 먼저 인장파괴가 일어나 부재가 낙하하는 등 실제와 다른 붕괴거동을 나타내었다. 따라서 보와 기둥의 연결부위에서 철근의 파괴 특성과 강도특성 설정에 보완이 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1999, "1999년도 아파트 주거환경 통계" 보고서.
2. 김효진, 신재완, 1997, "발파해체 공법의 설계 및 시공기술 개발" 보고서, 대한주택공사.
3. 이윤재, 송영석, 정민수, 권오성, 강대우, 2003, 김해국제공항 구 국제선 청사 발파해체 시공사례, 대한화약발파공학회지, Vol. 21, No. 3, pp. 37-48.
4. 정원준, 2003, PFC2D를 이용한 구조물의 발파해체 거동 모사, 서울대학교 공학석사학위 논문.
5. 채희문, 2004, 축소모형실험 및 입자결합모델 해석에 의한 구조물 발파해체 거동모사, 서울대학교 공학석사학위 논문.
6. 한동훈, 안명석, 공병승, 이윤재, 류창하, 2003, 구조물 발파해체 공법 시공사례 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 21, No. 3, pp. 49-60.

7. Itasca Consulting Group Inc., 2003, PFC3D User's Manual.
8. Potyondy, D. O. and P. A. Cundall, 2004, A bonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1329-1364.
9. UNAPIX, 1999, What a blast - Architecture in motion, Video Tape, 42 minutes.



신 병 훈

2003년 전북대학교 자원공학과 공학사
2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사
E-mail: shinbbang@rockeng.snu.ac.kr



전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991년 미국 캘리포니아 주립대학 공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수
