

유한요소법을 이용한 구조물의 발파해체 붕괴거동 및 지반진동 모사에 관한 연구

최주희^{1)*}, 정재웅¹⁾, 전석원¹⁾

Simulation of Blasting Demolition of Reinforced Concrete Structures and Ground Vibration using Finite Element Method

Joohee Choi, Jaewoong Jung and Seokwon Jeon

Abstract With the increasing demand for blasting demolition in urban areas, the simulation of structural collapse prior to the real blasting operation is a key process for ensuring the success and safety of the blasting demolition. The simulation of collapsing behavior of a structure is not only vital for preventing unexpected economic loss and casualties, but also helpful in minimizing public claims by precisely estimating the environmental impact resulting from the operation. This study proposes a new technique for simulation of a blast demolition using FEM based LS-DYNA codes. The technique tries to simplify the complex arrangement of reinforcing bars, and use the actual properties of the concrete and steel reinforcing bars, thereby improving the overall capability of the simulation to match well with the collapsing behavior of real-scale structures.

Key words Blasting demolition, Numerical simulation, Ground vibration, LS-DYNA

초 록 발파해체는 다른 해체방법과는 달리 실패에 따라 발생할 수 있는 인적·물적 자원의 손실이 매우 크기 때문에, 이를 사전에 예측·방지 할 수 있는 수치해석을 이용한 시뮬레이션 개발이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 기둥·보 접합부의 특성구현 및 철근과 콘크리트의 강도 구현 등에 관하여 유한 요소법에 바탕을 둔 상용코드인 LS-DYNA를 이용하여, 실제 발파대상 구조물이 가지고 있는 복잡한 철근 배근을 단순화하여 고려하는 기법을 제안 하였으며, 또한 본 연구에서 제안한 기법을 이용하여 축소모형 실험 및 실제 구조물의 발파해체의 모사를 통해 검증하였다.

핵심어 발파해체, 붕괴거동모사, 지반진동, LS-DYNA

1. 서 론

발파해체는 다른 해체방법과는 달리 실패에 따라 발생할 수 있는 인적·물적 자원의 손실이 매우 크기 때문에, 이를 사전에 예측·방지 할 수 있는 수치해석을 이용한 시뮬레이션 개발이 필수적이라 할 수 있다. 이러한 구조물의 발파해체 거동을 모사하기 위하여 여러 연구가 수행되어 왔다. 그 중 채희문(2004)은 2차원 입자결합모델을 이용한 수치해석을 실시하였으며 결과의 검

증을 위하여 축소모형실험을 실시한 바 있다. 이를 바탕으로 신병훈(2005)은 3차원 입자결합모델을 이용하여 붕괴거동 모사하였으며 전산 해석시간을 단축시키기 위한 clump모델을 적용하였다. 이후 정재웅(2008)은 결합강화계수를 이용한 보·기둥 접합부 특성 구현 및 실제 RC구조물의 붕괴거동을 모사하였으나, 강화계수 및 입력변수의 정성화 작업의 필요성과 입자 개수의 한계로 인한 자세한 붕괴모사 및 진동 예측의 어려움을 지적하고 이러한 어려움을 극복하기 위한 추가 연구를 제안한 바 있다(Lee, H., Jeon, S., 2007, Jung, J., et al., 2008).

본 연구에서는 선행 연구에서 공통적으로 지적되어온 기둥·보 접합부의 특성구현 및 철근과 콘크리트의 강도 구현 등에 관하여 유한 요소법에 바탕을 둔 상용코드인

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부

* 교신저자 : lupin@snu.ac.kr

접수일 : 2009년 5월 8일

심사 완료일 : 2009년 5월 25일

게재 확정일 : 2009년 6월 3일

LS-DYNA를 이용하여, 실제 발파대상 구조물이 가지고 있는 복잡한 철근 배근을 단순화하여 고려하는 기법을 제안하였다.

철근 배근의 단순화 기법을 적용한 해석모델을 이용하여 채희문(2004)이 실시한 축소모형실험 실험 중 무근콘크리트 모델과 철근콘크리트 모델을 해석하고, 축소모형실험 모사를 PFC3D를 이용하여 수행한 논문과 비교·분석하여 본 모델에 대한 타당성을 검증하였다. 또한 군산 화력발전소 및 대전 중앙데파트의 발파해체의 붕괴거동을 모사하여 실제 해체 구조물의 고속카메라 촬영 영상과 비교하였으며, 위 붕괴해석 자료를 이용하여 지반진동을 산출하고 실측자료와 비교·분석하였다. 이를 바탕으로 실제 구조물을 대상으로 한 붕괴형상 및 발파해체로 인한 지반진동에 대한 검증을 실시하였다.

2. 해석 모델링 기법 개발

2.1 해석모델 요소생성

실제 RC 구조물은 수십 개의 단면을 가진 기둥 및 보가 존재하며, 시뮬레이션에서 이를 모두 모사하는 데는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실 구조물에서 가장 많이 사용된 대표단면을 대상으로 구조물을 형상화 하였다. 일반적인 유한 요소법을 이용한 수치해석의 mesh 밀도는 자세한 결과를 원하는 부분의 밀도를 높이나, 범위·변형의 분석이 필요한 경우 응력이 집중하는 부분의 mesh 밀도를 높일 필요는 없는 것으로 알려져 있다

(서영성 외, 2001). 따라서 본 연구에서는 파괴부를 예측할 수 없는 발파해체의 특이성을 감안해 보의 경우 길이 방향에 대해, 기둥의 경우 높이 방향에 대해 mesh를 균등하게 분할하였으며, 보·기둥 접속부의 경우 타 부분에 비해 높은 mesh 밀도를 가지도록 모델링 하였다.

2.2 철근의 형상화 및 단순화

철근콘크리트는 철근과 콘크리트로 결합된 일종의 합성재라고 할 수 있다. 또한 철근의 위치에 따라 인장철근과 압축철근으로 크게 나눌 수 있으며, 철근의 크기 또한 다르게 설계된다. 그러나 선행연구에서는 이러한 합성재의 입력변수를 통합물성으로 대체함으로써 생기는 보·기둥 접합부 문제 및 입력변수의 정성화 작업 등의 필요성을 지적한 바 있다(신병훈, 전석원, 2005). 따라서 앞선 연구의 지적사항을 해석모델 요소생성 단계에서 철근을 형상화함으로써 극복하고자 하였다.

Fig. 1은 군산 화력발전소 및 대전 중앙데파트의 대표 단면을 대상으로 한 기둥과 보의 철근 단순화 과정을 보여준다. 예를 들어 군산 화력발전소의 경우, 기둥은 10개의 D25 철근이 사용되어 A_{st} 는 50.67 cm^2 을 나타내며, 이를 크기가 $36 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$ 인 4개의 정사각형 철근으로 변환하여 요소 생성을 하였다. 그러나 보의 경우는 상부의 압축철근과 하부의 인장철근 등은 구조물에서 서로의 역할이 다르며 철근의 배근 또한 다른 형상을 가지고 있다. 따라서 상·하부 철근으로 나누어 각각의 철근을 개별적으로 모델링 하였다. 상부 압축철근의 경우 4개의 D22 철근이 사용되어 A_{st} 는 15.48 cm^2

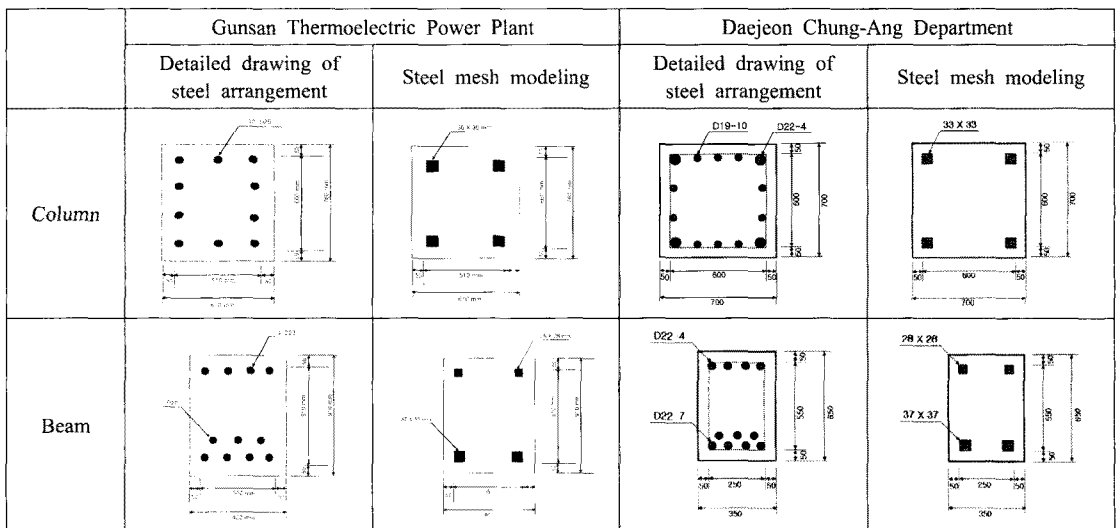


Fig. 1. Simplification of the steel reinforcement arrangement in columns and beams (unit: mm)

를 나타내며 이는 크기가 28 mm × 28 mm인 2개의 정사각형 철근으로 모사되었으며, 하부 인장철근의 경우 7개의 D22철근이 사용되어 A_{st} 는 27.10 cm²를 나타내며 크기가 37 mm × 37 mm인 2개의 정사각형 철근으로 변환하여 해석모델의 요소를 생성하였다.

2.3 철근 단순화에 따른 강성변화

기둥과 보에 배근된 철근의 단순화에 따른 각 부재의 강성변화를 알아보기 위하여 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 해석을 수행하였다. 구조해석 모델은 Fig. 2(a)와 같이 8 m × 8 m 크기의 바닥과 층높이 4 m의 기둥, 길이 8 m 보로 구성된 2층의 가상 RC 구조물로서 층당 Dead load = 360 kgf/m², Live load = 300 kgf/m²의 하중 조건을 가지며, 500 mm × 500 mm의 크기를 가지는 기둥과 400 mm × 600 mm

의 크기를 가지는 보로 구성되어 있다(Fig. 2).

본 구조해석 모델은 Fig. 2와 같이 B1 부재에서 36 tonf·m의 최대 모멘트가 걸리며, G2 부재에서 최대 16 tonf의 전단력이 발생하는 것으로 구조 해석되었다. 이를 바탕으로 기둥에는 8-D22의 철근이 배근되었으며 보에는 상부철근의 경우 2-D25, 하부철근의 경우 4-D25의 철근이 배근되었다.

Fig. 3는 각 부재의 철근량, 강성 등이 본 연구에서 제시하는 방법으로 철근 단순화 과정을 거치면서 각 부재의 철근량 및 강성의 변화량을 알아보기 위한 것이다. 보의 경우 인장철근 즉 하부철근이 배근 단순화 과정을 거치면서 약 5.62%의 변화가 나타났으며 부재의 강성에서는 5.71% 만큼 작아지는 결과를 나타내고 있다. 이는 철근이 단순화 되는 과정에서 철근의 직경이 커짐에 따라 철근의 중심점이 상부로 이동되면서 발생하는 강

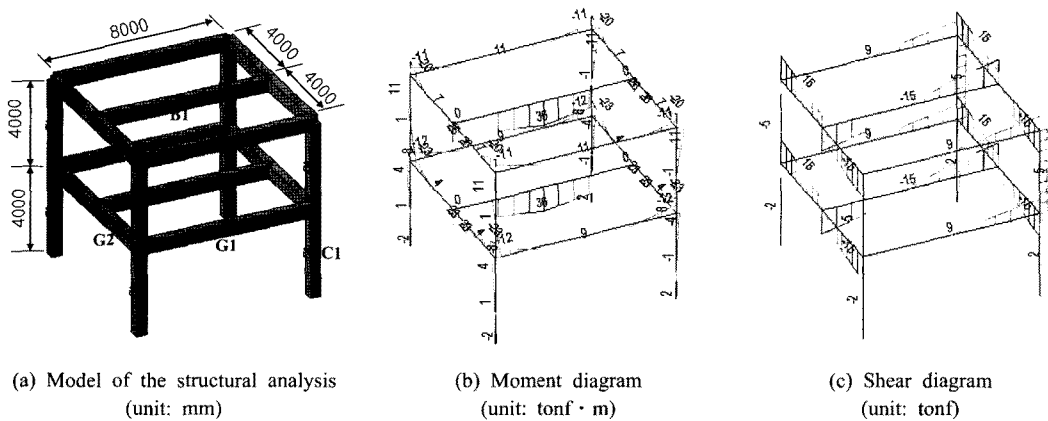


Fig. 2. Diagram of the structural analysis model

	Before simplification	After simplification	Deviation
Column			
Area of steel	8-D22, $A_{st} = 30.97 \text{ cm}^2$	4-D32, $A_{st} = 31.77 \text{ cm}^2$	+2.58 %
Stiffness	$\phi P_n = 27.78$ $\phi M_n = 25.59$	$\phi P_n = 31.37$ $\phi M_n = 28.38$	+12.92 % +10.90 %

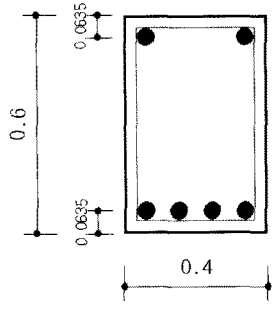
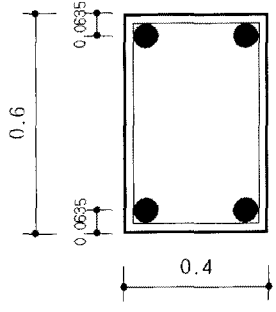
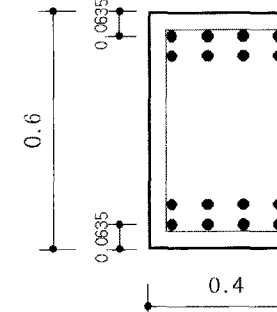
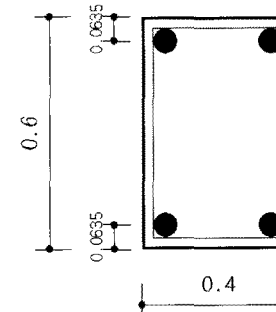
Beam			
Area of steel	Upper 2-D25 $A_{st} = 10.13 \text{ cm}^2$	Upper 2-D25 $A_{st} = 10.13 \text{ cm}^2$	+0 %
	Lower 4-D25 $A_{st} = 20.27 \text{ cm}^2$	Lower 2-D35 $A_{st} = 19.13 \text{ cm}^2$	-5.62 %
Stiffness	$\phi Mn = 34.48$	$\phi Mn = 32.51$	-5.71 %
Girder			
Area of steel	Upper 8-D16 $A_{st} = 15.89 \text{ cm}^2$	Upper 2-D32 $A_{st} = 15.88 \text{ cm}^2$	-0.06 %
	Lower 8-D16 $A_{st} = 15.89 \text{ cm}^2$	Lower 2-D32 $A_{st} = 15.88 \text{ cm}^2$	-0.06 %
Stiffness	$\phi Mn = 26.28$	$\phi Mn = 27.40$	+4.26 %

Fig. 3. Diagram of the structural analysis model

성의 변화로 사료된다. 그에 반해 기둥에서는 2.58%의 철근 량이 많아지면서 10.9%의 강성이 커지는 것으로 해석되었으나 보의 경우 5.62%의 강성이 낮아지는 것으로 볼 때 전체적인 구조물의 강성은 약 10% 내외의 오차를 보일 것으로 판단되며 이는 구조물의 해석에 지대한 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

2.4 보·기둥 연결부 요소생성

실제 철근 콘크리트 구조물에서는 기둥 및 보 등의 주요 부재 연결부에서 철근 이음 및 정착 등의 방법을 통해서 각 주요 부재간의 연결 및 일체화를 하고 있다. 본 연구에 사용된 모델에서는 보의 인장, 압축 철근과

기둥의 주 철근을 Fig. 4와 같이 직접 결합시켜 각 부재의 철근 node를 결합하고 보와 기둥의 부재가 만나는 부분의 절점의 결합을 통해 부재를 일체화시켜 해석모델을 생성하였다.

2.5 물성 결정

RC구조물 내에 사용된 철근의 직접적인 강도 측정 및 노후화에 따른 철근의 강도 추정은 현실상 불가능하다. 본 연구에서는 20~30년 전에 시공된 건축물에서 주로 사용된 철근의 항복강도가 2400 kg/cm^2 인 점을 감안하여(김우 외, 2001) 철근의 강도를 240 MPa로 사용하였다. 탄성계수의 경우 건축 구조설계 기준(KBC

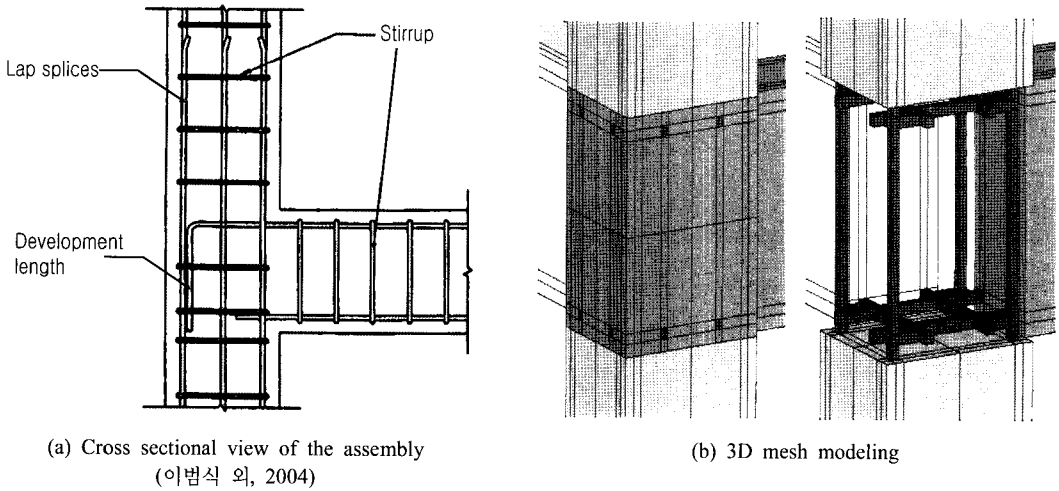


Fig. 4. Assembly of beam and column

Table 1. Input material parameters

		Steel	Concrete
Young's Modulus	GPa	200	23
Density	ton/mm ³	7.85 × 10 ⁻⁹	2.3 × 10 ⁻⁹
Compressive stress	MPa	240	24
Tensile stress			2.4
Yield strain		0.0012	0.002
Poisson's ratio		0.3	0.175
Gravity	mm/sec ²	9.81 × 10 ³	

2008)에서 제시하는 표준값인 200,000 MPa를 적용하였으며, 포아송비는 그에 따른 일반적인 철근의 물성값인 0.3을 사용하였다.

콘크리트의 압축강도는 비파괴 강도시험인 슈미트헤머 시험에 의해 추정된 강도를 압축강도로 사용하였다. 보통의 모래와 보통의 골재를 사용한 경우 콘크리트 단위질량 w_c 는 2.3 ton/m³이며, 이 때 탄성계수는 KBC 2008에서 제안한 아래의 식에 의해 결정된다.

$$E_c = 8500 \sqrt{f_{cu}} \text{ (MPa)} \text{ (} f_{cu} \text{ = 콘크리트 실제 강도) (1)}$$

일반적인 콘크리트의 포아송비는 0.15~0.2의 값을 가지며, 본 연구에서는 중간 값인 0.175를 사용하였으며, 보통 콘크리트는 약 0.002의 변형률에서 극한강도에 도달하므로 항복변형률을 0.002로 설정하였다. 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 1/10~1/12의 값을 나타내며, 이때 인장변형률은 약 0.001 내외의 값을 나타낸다(김우 외, 2001).

콘크리트의 압축강도가 24 MPa 가정 하에 본 연구에

사용된 해석모델의 기본단위인 mm, second, ton, Newton의 단위로 환산한 철근 및 콘크리트의 기본 입력 물성은 Table 1과 같다.

3. 축소모형실험의 붕괴거동 모사

채희문(2004), 채희문과 전석원(2004)은 ‘축소모형실험과 PFC2D해석에 따른 발파해체 거동분석’에서 1/10 스케일의 축소모형 실험을 실시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 유한요소법을 바탕으로 하는 LS-DYNA를 이용하여 무근 콘크리트 축소모형(Model #1)과 철근 콘크리트 축소모형(Model #2)에 대해 발파해체 거동모사를 실시하였다. 또한 개별요소법을 바탕으로 하는 PFC 3D를 이용하여 축소모형실험을 모사한 결과(신병훈, 전석원 2005)와 비교하였다.

본 모델은 40 × 40 mm의 기둥과 26 × 40 mm의 보로 구성되어 있으며, 본 축소모델의 층고는 30 cm이고 지간이 40 cm인 축소모형 구조물이다. Model #1의 경우 구조물 내에 철근이 포함되어 있지 않은 석고로만

Table 2. Material properties of the scaled model

	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Density (ton/mm ³)
Concrete	1.64	0.31	253	1.72×10^{-9}
Steel	49		4.0×10^4	8.4×10^{-9}

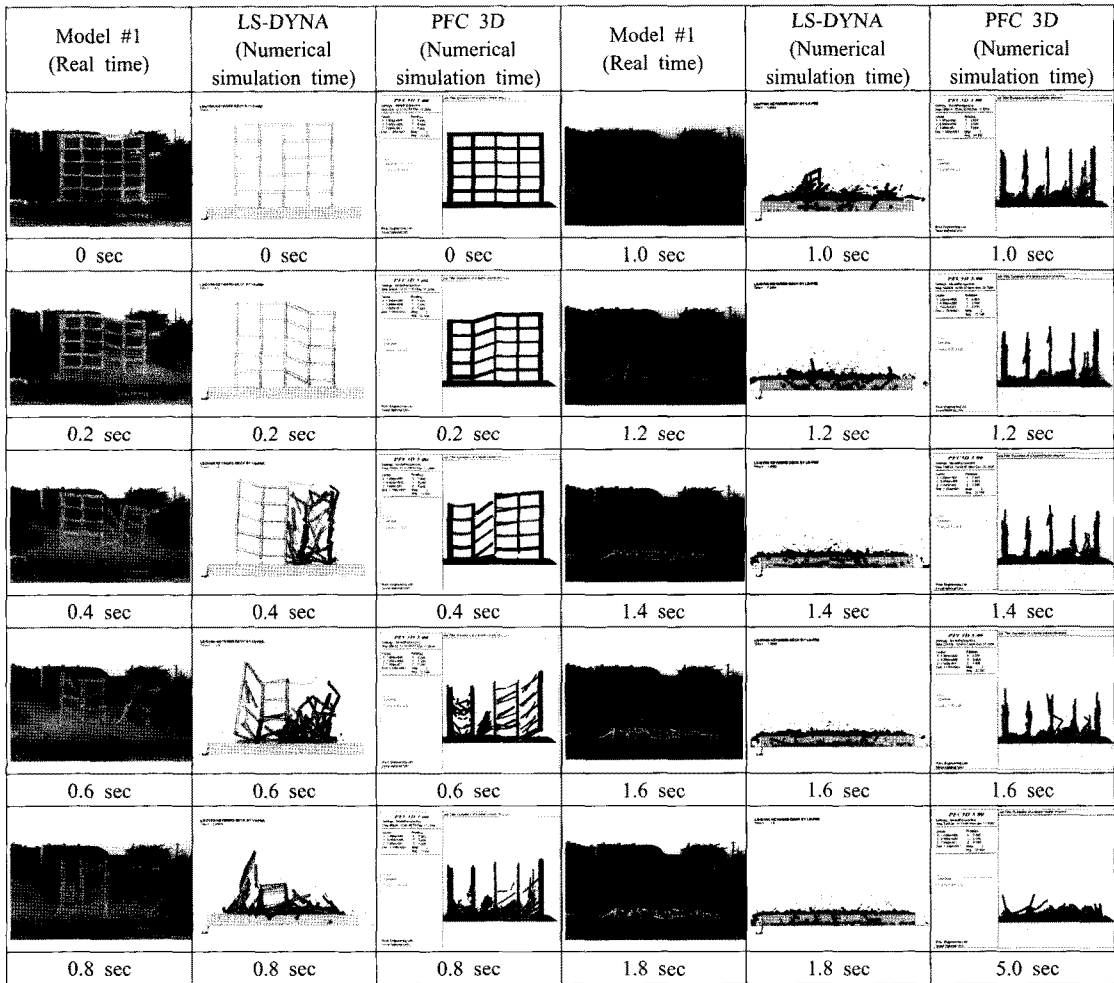


Fig. 5. Simulation of the scaled Model #1

만들어진 무근콘크리트 구조물을 대상으로 만들어진 모델이다. Model #2의 경우 철근콘크리트를 형상화 한 것으로 철근을 대신하여 납 선이 사용되었다. 또한 본 모델에 사용된 물성은 Table 2와 같이 축소모형에 사용된 석고 및 납의 물성을 그대로 사용하였다.

3.1 무근 콘크리트 축소모형 모델의 붕괴거동 모사

선행 연구에서 축소모형 시험을 대상으로 수행하였던 PFC 3D(신병훈, 2005)와 비교하여 볼 때, 0.4초 까지

는 비슷한 양상을 보이나 0.6초 이후 보의 분리 양상은 본 연구에서 수행된 시뮬레이션이 실제 붕괴거동에 더 유사한 결과를 나타냈다. 또한 수치해석 상의 붕괴 완료시간은 실 구조물의 경우 1.8초가 소요되었으며, 선행 연구의 PFC 3D의 경우 5.0초가 걸려 실제 붕괴시간과 큰 차이를 나타내고 있다. 이에 반해 본 연구에서 LS-DYNA를 이용하여 수행한 모델의 경우 1.4초로 실제 거동과 0.4초 차이의 비교적 유사한 값을 나타냈다 (Fig. 5).

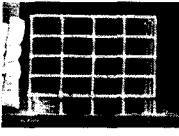

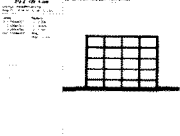
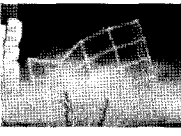

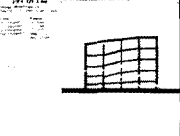
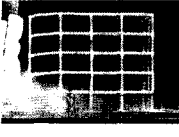

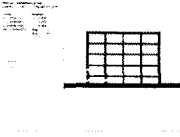
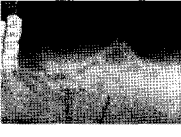

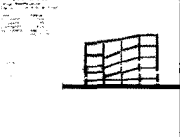



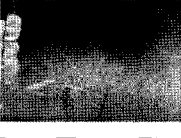

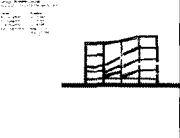
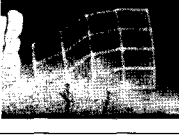
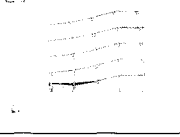
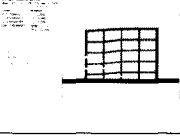
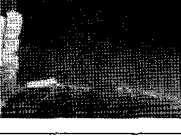


Model #2 (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)	PFC 3D (Numerical simulation time)	Model #2 (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)	PFC 3D (Numerical simulation time)
					
0 sec	0 sec	0 sec	0.8 sec	0.8 sec	1.6 sec
					
0.2 sec	0.2 sec	0.4 sec	1.0 sec	1.0 sec	2.0 sec
					
0.4 sec	0.4 sec	0.8 sec	1.2 sec	1.2 sec	2.4 sec
					
0.6 sec	0.6 sec	1.2 sec	1.4 sec	1.4 sec	12.0 sec

Fig. 6. Simulation of the scaled Model #2

3.2 철근 콘크리트 축소모형 모델의 붕괴거동 모사

Fig. 6의 철근 콘크리트 축소모형 모델(Model #2)의 붕괴거동 분석에서 철근을 형상화한 납선의 역할로 인해 보 및 접합부의 강성이 Model #1에 비해 월등히 향상된 붕괴양상을 나타내고 있으나, 선행연구인 PFC 3D의 경우 기둥과 보의 분리 현상이 1.2초 이후 뚜렷이 나타나는 현상을 보여 축소모형 실험과 차이를 드러냈다. 그러나 LS-DYNA를 이용한 본 해석모델에서는 철근 형상화로 인해 Model #2의 붕괴양상과 유사한 기둥·보 접합부 강성을 나타내는 것으로 모사되어 선행연구에 비해 향상된 붕괴거동을 모사한 것으로 판단된다.

기둥과 보의 분리현상이 뚜렷이 나타나는 선행연구(PFC 3D)에 비해 본 연구에서 수행한 모델에서는 Model #2(철근 콘크리트 모델)의 철근의 형상화로 인한 기둥과 보의 결합력 모사 및 발파에 의한 구조물 변형이 다른 부재로 변형을 유도하는 붕괴 모사가 선행연구에 비해 탁월한 것으로 판단된다. 최종 붕괴시간 또한 선행연구(PFC 3D)에서는 1.4초의 실제 붕괴시간

보다 약 8배 이상 큰 12초를 나타냈으나, 본 연구에서 수행한 모델에서는 1.4초의 실제 붕괴시간과 동일한 시간을 나타내는 결과를 도출하였다.

4. 실제 구조물의 발파해체 모사

4.1 군산 화력발전소의 발파해체 모사

실제 구조물인 군산 화력발전소의 붕괴거동을 모사함으로써, 현실의 적용에 대해 검증하고 선행 연구인 PFC 3D의 결과와 비교·검토 하였다. 군산 화력발전소의 경우 총 26가지의 각기 다른 크기를 가지는 기둥 및 보가 존재한다. 본 연구에서는 기둥의 26가지 유형 중 가장 많이 사용된 유형의 대표단면을 기준으로 모델링하였으며, 기둥의 경우 610 mm × 760 mm의 단면, 보의 경우 910 mm × 460 mm의 단면이 사용되었다. 이 대표 단면은 2.2장에서 설명한 바와 같이 크기가 36 mm × 36 mm인 정사각형 4개의 기둥 철근으로, 보의 경우 2개의 28 mm × 28 mm 상부 압축철근과 2개의 37 mm

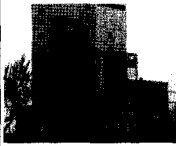
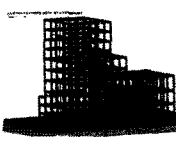
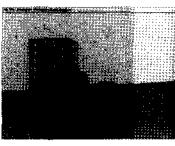


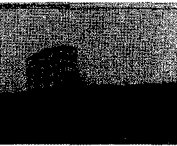
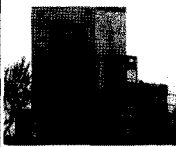
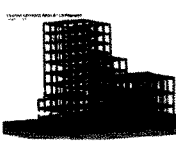
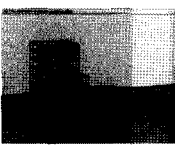




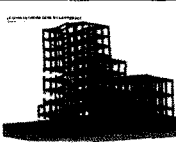


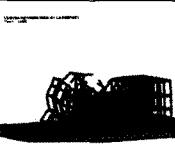
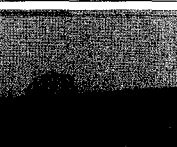

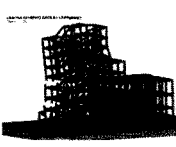
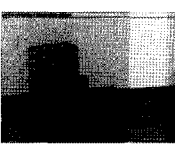
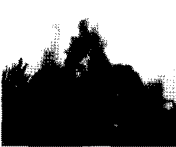
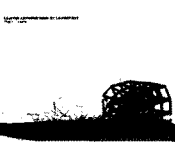
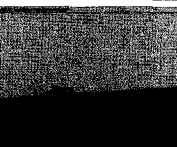
Real structure (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)	PFC 3D (Numerical simulation time)	Real structure (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)	PFC 3D (Numerical simulation time)
					
0 sec	0 sec	0 sec	2.0 sec	2.0 sec	3.5 sec
					
0.5 sec	0.5 sec	0.5 sec	2.5 sec	2.5 sec	4.5 sec
					
1.0 sec	1.0 sec	1.0 sec	3.5 sec	3.5 sec	7.0 sec
					
1.5 sec	1.5 sec	1.5 sec	4.5 sec	4.5 sec	10.0 sec

Fig. 7. Simulation of Gunsan Thermolectric Power Plant

× 37 mm 하부 인장철근으로 단순화하여 모사하였다 (Fig. 1).

군산 화력발전소의 경우, 2007년 해체가 이루어진 구조물로 슈미트해머에 의한 콘크리트의 실제 강도를 측정할 수 없었으므로, 해당 모델의 콘크리트의 압축강도를 24 MPa의 일반적인 콘크리트 강도로 가정하여, Table 1의 콘크리트 물성입력 값들을 사용하여 발파해체를 모사하였다. 군산 화력발전소의 발파해체의 경우 구조물의 앞부분에서부터 뒤쪽으로 점진적 붕괴를 나타내고 있다. 또한 본 구조물의 붕괴 특이사항은 1.0초 이후 자중에 의해 구조물의 앞부분이 뒷부분에 비해 심하게 변형을 일으키면서 먼저 붕괴가 일어나며, 이후 구조물의 뒷부분으로 이어지는 붕괴형상을 보이는 것이다.

정재용(2008)이 기둥·보 연결부에 결합강화계수 등을 이용하여 붕괴거동을 모사한 PFC 3D모델에서는 전체적인 구조물의 강성이 크게 나타나, 구조물의 앞부분이 분리되는 형상 및 점진붕괴 모사에서 오차를 발생하였으며, 7.0초 이후 부분적으로 부재의 낙하속도가 상

이하게 나타나는 현상이 관찰되었다. 그에 반해 본 연구에서 수행한 LS-DYNA를 이용한 붕괴거동 모사에서는 건물의 앞부분 구조물이 먼저 무너져 내리는 형상이 유사하게 모사되었으며, 선행연구에 비해 각 세부시차별 붕괴거동 및 전체적인 붕괴형상이 유사한 것으로 나타났다(Fig. 7). 또한 총 붕괴 시간에서는 선행연구의 경우 10초의 큰 시간오차를 나타내고 있으나, 본 연구 모델에서는 4.5초의 실제붕괴거동과 같은 시간을 나타내고 있는 것 등을 볼 때 실제 구조물의 붕괴거동 모사 측면에서 선행연구에 비해 월등히 향상된 것으로 판단된다.

4.2 대전 중앙데파트 발파해체 모사

해석대상 구조물인 대전 중앙데파트의 대표 단면은 Fig. 1 과 같이 기둥의 경우 700 mm × 700 mm 단면으로 4개의 D22 철근, 10개의 D19 철근이 사용되어 A_{st} 는 15.48 cm²을 나타내며, 이를 크기가 33 mm × 33 mm인 정사각형 철근으로 변환하여 요소 생성을 하였

Table 3. Compressive strength for concrete of Daejeon Chung-Ang Department

Measurement location			Rebound hardness (R)					
Column			51	56	41	54	54	
			41	40	51	45	49	
			43	44	48	50	58	
Compressive strength (MPa)			Year of the construction	Coefficient of age	Compressive strength (MPa)			Compressive strength of Schmidt Hammer (MPa)
JSMS	ITBM	EMPA	(yr)	(n)	JSMS	ITBM	EMPA	
45.95	38.50	51.50	1974	0.63	28.95	24.26	32.45	

- * JSMS: The Society of materials science, Japan
- * ITBM: Institute for the Testing of Building Materials, Tokyo
- * EMPA: Eidgen ssische Materialpr fungs und Forschungsanstalt, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

Table 4. Material properties for ground surface at Daejeon Chung-Ang Department

	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Density (ton/mm ³)
Concrete	28.5	2.85	2.6×10^4	2.3×10^{-9}
Steel	240		2.0×10^5	7.85×10^{-9}

다. 보의 경우 350 mm × 650 mm 단면으로 상부 압축 철근은 4개의 D22 철근이 사용되어 A_{st}는 15.48 cm²를 나타내며 이는 크기가 28 mm × 28 mm인 정사각형 철근으로 모사되었으며, 하부 인장철근의 경우 7개의 D22 철근이 사용되어 A_{st}는 27.10 cm²를 나타내며 크기가 37 mm × 37 mm인 정사각형 철근으로 변환하여 요소 생성을 하였다.

대전 중앙데파트의 콘크리트 강도는 기동을 대상으로 하여 Schmidt hammer에 의한 비파괴 검사법으로 콘크리트의 실제 강도를 측정하였다. Table 3과 같이 일본 재료학회, 동경 재료시험소, 스위스 연방재료시험소 등의 각각의 추정 값의 평균값인 28.5 MPa를 산출하여, 붕괴해석 모델의 입력물성 값으로 선정함으로써 콘크리트 물성 결정에서 보다 현실성 있는 접근이 이루어지도록 하였다. 이를 바탕으로 해석모델의 콘크리트 및 철근의 입력 물성 값은 Table 4와 같다.

군산 화력발전소에 이어 실제 구조물인 대전 중앙데파트의 붕괴거동을 모사하고 고속카메라의 촬영화면과 비교함으로써 현장 적용에 대한 검증은 하고자 하였다. 0.3초가 되면서 구조물 앞부분의 붕괴가 시작되는 현상이 나타나며 0.6초가 되면서 붕괴형상이 확연히 나타나고 있다(Fig. 8). 본 연구에서 수행한 철근의 형상화를 바탕으로 하는 모델에서 또한 같은 시초에 실제 붕괴형상과 같은 현상이 모사되었다. 점차 붕괴가 진행되면서

신축이음(Expansion Joint)이 존재하는 구조물의 중앙부에서 분리되어 붕괴가 일어나는 현상을 나타냈으며 본 해석에서도 신축이음에 의한 붕괴거동 형상이 매우 잘 모사된 것으로 판단된다. 또한 구조물의 중앙으로 전도붕괴가 유도되는 현상이 표현되며, 본 해석에서 수행한 모델에서도 같은 현상이 표현되었다. 이는 철근을 모사함으로써 중전의 발파해체의 모델에서 사용되던 철근의 배근 위치 및 강도에 대한 특성을 표현하고, 철근과 콘크리트의 통합물성 사용을 지양하고 콘크리트의 비파괴 시험을 통한 측정을 통해 해석모델의 입력변수 선정을 보다 철근콘크리트 구조물에서 붕괴거동에서 매우 타당성 있는 결과가 도출된 것으로 사료된다. 이로서 축소모형실험을 뿐만 아니라 실제 구조물에서도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 지반진동 측정 및 비교·분석

지반진동 측정은 군산 화력발전소를 대상으로 실시하였으며, 높이 3 m, 가로 × 세로가 약 105 m × 81 m의 지반을 형상화한 모델을 생성하였으며, 구조물 외각의 22 m 지반 mesh를 조밀하게 구성해 지반진동 측정이 용이하도록 하였다. 또한 지반의 최하부 node를 X, Y 축의 변위 및 변형을 자유롭게 하고 Z축만을 고정함으로써 지반 mesh 경계면에서 발생하는 반사파를 최소화

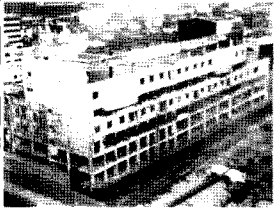
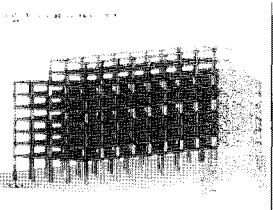
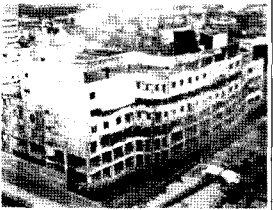
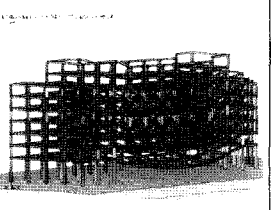
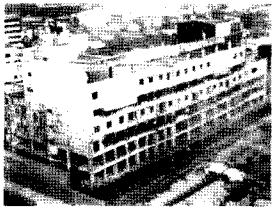
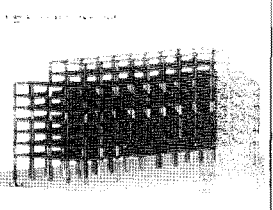
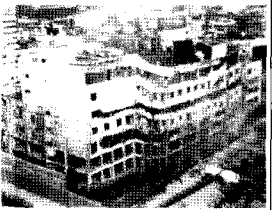
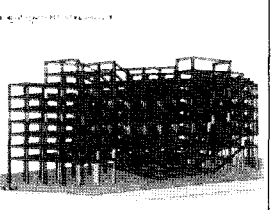
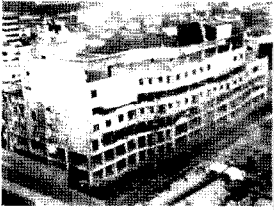
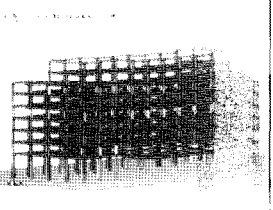
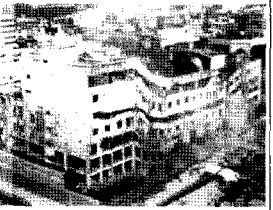
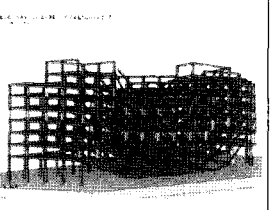
Real Structure (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)	Real Structure (Real time)	LS-DYNA (Numerical simulation time)
			
0 sec	0 sec	0.9 sec	0.9 sec
			
0.3 sec	0.3 sec	1.2 sec	1.2 sec
			
0.6 sec	0.6 sec	1.5 sec	1.5 sec

Fig. 8. Simulation of Daejeon Chung-Ang department

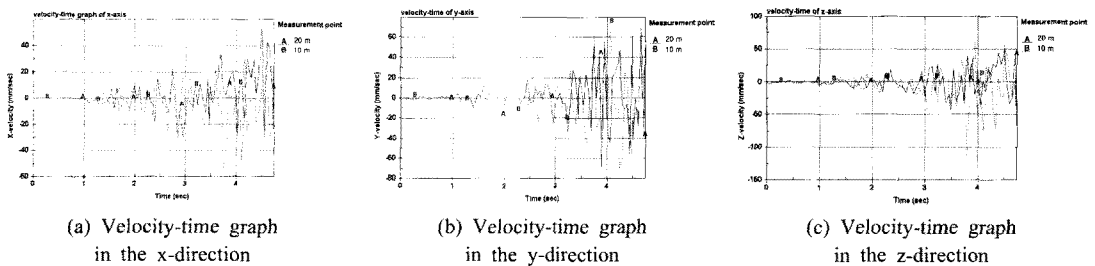


Fig. 9. Particle velocity-time history at measurement point

하도록 하였다.

지반 물성은 측정지역 및 지반 깊이에 따라 상당한 차이를 나타내며, 이를 대표할 수 있는 물성의 선정은 한계가 있다. 구조물 해체시 발생하는 지반진동은 해체 낙하물이 지표면과 충돌하면서 나타나게 되므로, 지표면을 구성하고 있는 콘크리트의 물성을 사용하여 해석을 진행하였다.

본 연구에서 수행한 진동해석은 각 측정 지점에서의 X, Y, Z성분의 시간-속도 그래프로 도시된다. 예를 들

어 10, 20 m의 측정지점에서 X, Y, Z축에 대한 시간-속도 그래프는 Fig. 9와 같이 표현되며, X, Y, Z축의 값들의 벡터 합의 최댓값으로 지반진동이 계산된다. LS-DYNA 해석에 의해 산출된 지반진동의 값들은 Table 7과 같다. 해석을 통해 구해진 진동 값들을 거둬제공함수로 회귀하여 군산화력발전소의 실제 측정자료(Table 5)와 정재용(2008)이 PFC 3D를 이용하여 산출한 값(Table 6)과 비교하였다.

Fig. 10에서 군산 화력발전소의 실제 지반진동 계측

Table 5. Result of ground vibration at Gunsan Thermoelectric Power Plant

Distance (m)	69	107.5	162.5	184	254	256
V (cm/s)	0.668	0.436	0.371	0.217	0.344	0.224

Table 6. Result of ground vibration in numerical simulation by PFC 3D

Distance (m)	6	7	8	9	10
V (cm/s)	12.10	4.72	3.44	2.99	2.37

Table 7. Result of ground vibration in numerical simulation by LS-DYNA

Distance (m)	4	6	8	10	12
V (cm/s)	9.34	6.41	4.58	5.99	5.37
Distance (m)	14	16	18	20	-
V (cm/s)	4.30	5.37	4.86	4.52	-

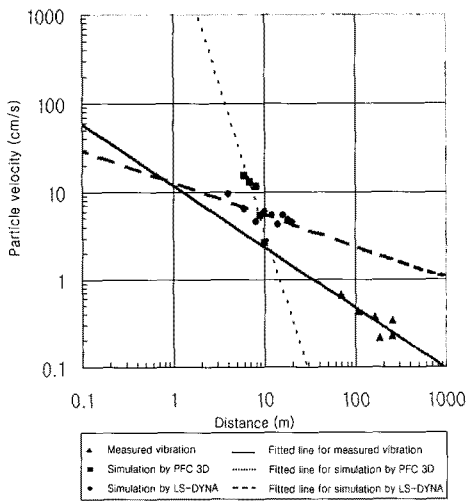


Fig. 10. Particle velocity at different distances (Gunsan Thermoelectric Power Plant)

자료의 회귀선에 비해 본 연구에서 LS-DYNA를 이용하여 모사된 지반진동의 회귀된 선은 1 m를 기점으로 측정 거리가 멀어질수록 큰 값을 나타내며 진동전파거리의 증가에 따른 지반진동 감소가 실측 자료에 비해 느린 것으로 해석되었다. 이는 해석모델 생성시 전체 지반의 크기가 작으며 mesh 경계부에서 오는 반사파의 영향으로 보인다. 그러나 PFC 3D를 이용하여 산출한 자료에 비해 실측자료에 상당히 근접했음을 알 수 있다.

실제 측정 자료와 수치해석에 의한 자료의 편차가 일반적인 구조물의 진동 허용기준치인 1 cm/s 이상의 차이를 나타내고 있으며 이 수치를 실제 발파해체 현장에 적용하기는 한계가 있다. 실제 발파해체의 진동측정에서는 콘크리트 및 아스팔트 등의 표피를 덮고 있는 층

과 지반 층의 복합적 거동에 의해 발생하며, 향후 발파 대상 지반의 특성에 맞는 탄성계수, 포아송비 등의 입력물성 선정 및 해석모델의 지반 크기를 100 m 이상의 실측자료와 유사한 크기로 확장을 통해 보다 타당성 있는 지반진동 예측이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 선행 연구에서 공통적으로 지적되어온 기동·보 접합부의 특성구현 및 철근 및 콘크리트의 강도 구현 등에 대하여 유한 요소법에 바탕을 둔 상용코드인 LS-DYNA를 이용하여, 철근 모사 및 콘크리트와 철근의 고유 물성을 사용하여 보다 타당성 있는 발파해체 붕괴거동 모사에 중점을 두고자 하였다. 철근 단순화 및 고유물성을 바탕으로 채희문(2004)이 실시한 축소모형실험 실험 중 무근콘크리트 모델과 철근콘크리트 모델을 해석하고, 축소모형실험을 PFC 3D를 이용하여 수행한 선행 논문과 비교·분석하여 타당성을 제시하였다. 또한 실제 발파해체 구조물인 군산 화력발전소 및 대전 중앙데파트의 붕괴거동을 모사함으로써 실 스케일에 대한 검증은 실시하였다.

- 1) 실제 발파해체 대상 구조물의 기동과 보에 배근된 철근의 두께와 개수를 바탕으로 필요철근량(Ast)을 역으로 산출하여, 4개의 정사각형 모양의 철근으로 단순화시켜 모델링하는 기법을 제안하였다. 또한 철근을 형상화함으로써 철근콘크리트의 통합물성을 사용하지 않고, 철근과 콘크리트 각각의 고유물성을 이용하는 방법을 제시하여 본 연구에 적용하였다.
- 2) 채희문(2004)이 실시한 축소모형실험 중 무근콘크리트 모델(Model #1)과 철근콘크리트 모델(Model

#2)에 대하여 붕괴거동 모사를 수행하였으며, 실제 거동 및 PFC 3D를 이용하여 수행한 선행연구와 비교·검토 하였다. 무근콘크리트 모델의 경우 석고의 약한 인장력에 의해 기동 보 접합부 부분이 쉽게 파괴되는 형상의 모사가 뚜렷이 나타났으며, 선행 연구인 PFC 3D와 본 연구의 해석모델 또한 전체적인 붕괴양상이 유사하였으나, 보의 인장파괴 모사 및 세부 시차별 붕괴형상 그리고 전체 붕괴시간 모사 측면에서는 본 연구모델이 선행연구 모델에 비해 타당한 결과를 나타냈다.

- 3) 축소모형실험의 철근콘크리트 모델(Model #2)의 붕괴거동 모사에서는 무근콘크리트 모델(Model #1)에 철근을 형상화하는 납선을 모사하여 실제 거동과 비교함으로써 철근콘크리트 해석모델의 타당성을 검증하고 선행논문인 PFC 3D와 비교·검토 하였다. 선행논문에서 수행한 PFC 3D의 수행결과에서는 Model #2에서 찾아볼 수 없었던 보의 인장 파괴 및 접합부 파괴 형상 등의 문제점들이 나타났다. 그러나 본 연구모델에서는 Model #2의 납선의 형상화로 인해 실제 구조물과 접합부 및 부재의 강성이 유사한 붕괴 거동을 모사할 수 있었다.
- 4) 실제 구조물인 군산 화력발전소 및 대전 중앙데파트의 붕괴거동을 모사함으로써, 발파해체 현장 적용에 대해 검증하고 선행 연구인 PFC 3D의 결과와 비교·검토 하였다. 전체적인 붕괴거동 및 세부시차별 붕괴거동 모사는 실제 거동과 유사하나, 구조물의 앞부분이 분리되어 붕괴되는 형상의 모사는 미약한 것으로 판단되었다. 이는 실제 발파해체 공사 수행에 있어서 시행되는 기동 및 보 등의 사전 취약화 및 해석모델에 비내력벽의 미적용 등이 수치해석 모델에 반영되지 못하여 발생된 것으로 사료된다.
- 5) 선행연구인 PFC 3D를 이용한 연구에 비해 본 연구에서 수행한 해석모델의 경우 입력물성의 산정, 각 세부시차별 붕괴거동 모사, 총 붕괴시간 및 기동·보 접합부 강성 표현 등에서 보다 타당한 결과를 도출하였으나, 철근을 형상화하면서 늘어난 3배 이상의 요소개수로 인해 해석시간이 약 2배 이상 늘어났으며, 발파해체시 발생할 수 있는 비산 등의 모사에서 취약한 측면을 드러내고 있다. 따라서 해석시간 감소를 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 6) 군산 화력발전소의 붕괴거동을 바탕으로 발파해체시 발생하는 지반진동에 대해 측정하고 실측 자료와 PFC 3D를 이용한 자료와 비교·검토를 통해 실제구

조물로의 적용 가능성을 검증하였다. 본 연구에서 붕괴거동 모사를 통해 산출한 자료는 선행연구의 자료에 비해 실측자료에 좀 더 유사한 회귀선을 나타냈다. 그러나 실측값과 회귀선의 편차가 1 cm/sec 이상의 차이를 나타내는 것으로 해석되었다. 이는 지반의 특성을 수치해석상에서 정확히 모델링하는데 어려움이 있음을 보여주고 있으며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호: 06건설핵심B04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김우, 김진근, 오병환, 정란, 최완철, 2001, 콘크리트 구조 설계, 사이텍미디어, pp. 32-236.
2. 이범식, 손창학, 박성식, 2004, 콘크리트 설계기준 통합에 따른 철근배근 실무 지침, 대한주택공사 부설 주택도시연구원 보고서, pp. 193-207.
3. 서영성, 박문식, 이재영, M. J. Fagan, 2001, CBT로 배우는 유한요소해석, 문우당, pp. 6-11.
4. 신병훈, 2005, 3차원 입자결합모델을 이용한 건물해체발파 모사를 위한 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
5. 신병훈, 전석원, 2005, 3차원 입자결합모델을 이용한 구조물 해체발파 모사 연구, 대한화약발파공학회, 제23권 제1호, pp. 65-57.
6. 정재용, 2008, 입자결합모델을 이용한 RC 라멘 구조물의 발파해체 붕괴거동 모사에 관한 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
7. 채희문, 2004, 축소모형실험 및 입자결합모델 해석에 의한 구조물 발파해체 거동모사, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
8. 채희문, 전석원, 2004, 축소모형실험과 PFC2D해석에 따른 발파해체 거동분석, 터널과 지하공간, 제14권 제2호, pp. 54-68.
9. 대한건축학회, 2008, 건축 구조설계 기준(KBC, 2008).
10. Lee, H., Jeon, S., 2007, Simulation of the collapse of a reinforced concrete structure by blasting demolition, Proceedings of the 2nd International Conference on Explosives and Blasting, pp. 83-86.
11. Jung, J., Lee, H., Jeon, S., 2008, Simulation of blasting demolition of RC structure using bonded particle model, JSRM2008 & 29th West Japan Symposium on Rock Engineering, CD-ROM.
12. Livermore Software Technology Corp., 2007, LS-DYNA Keyword User's Manual.

최 주 희

2006년 단국대학교 건축대학 건축공학과
공학사
2009년 서울대학교 대학원 에너지시스템
공학부 공학석사

Tel: 02-880-8713
E-mail: lupin@snu.ac.kr



정 재 응

2006년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2008년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부 공학석사

Tel: 02-880-7230
E-mail: panda77@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 박사과정



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 공과대학 에너지시스템공
학부 부교수

