

ELS를 이용한 고층 RC 빌딩의 붕괴해석 및 발파해체해석 기법의 국부손상-연쇄붕괴 전이과정 해석에 응용

김현수¹⁾, 박 훈²⁾, 김승곤³⁾, 이연규⁴⁾, 조상호^{5)*}

Collapse Simulations of High-Rise RC Building Using ELS Software and Application of Explosive Demolition Methods to Transition Process Analysis from Local Damage to Progressive Collapse

Hyon-Soo Kim, Hoon Park, Seung-Kon Kim, Yeon-Gyu Lee and Sang-Ho Cho

Abstract Progressive collapse analyses of high-rise buildings subjected to abnormal loading such as fires, impacts, earthquakes, typhoon, bomb blasts etc. are intended. However it is difficult to perform collapse experiments of the real scale building to determine the capacity of the structure under an extreme loading events. In this study, collapse behavior of a 15 story RC structure building loaded by external explosion pressures were simulated using Extreme Loading Structures (ELS) software. The standoff distance between the RC building and explosives of 1500 kg was 1, 2, 5, 10, and 15 meters. The explosive demolition analysis techniques based on removal of partial support structures following blast scenario was adapted to investigate the transition process of progressive collapse-local damage.

Key words External explosion, Progressive collapse, Extreme Loading Structures (ELS), High-rise RC building, Load alternated path

초 록 외부폭발, 화재, 충돌, 지진, 태풍과 같은 비정상 하중에 의한 고층빌딩의 연쇄붕괴(progressive collapse) 해석에 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 그러나 실규모의 고층건물을 대상으로 한 손상 및 붕괴에 실험은 현실상 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 구조물 발파해체분야에서 적용되는 ELS 소프트웨어를 이용하여 외부폭발에 의한 고층 RC 구조물의 국부손상 및 연쇄붕괴시뮬레이션을 수행하였다. 현관으로부터 1m, 2m, 5m, 10m, 15m 이격되어 폭약 1,500kg이 폭발한 것을 가정하여, 이격거리에 따른 국부손상과 이에 따른 연쇄붕괴현상을 파악하였다. 특히 기폭시나리오에 따라 구조물 지지부재의 일부를 제거하여 구조물의 붕괴를 유도하는 발파해체기법을 국부손상-연쇄붕괴 전이과정 연구에 적용하였다.

핵심어 외부폭발, 연쇄붕괴, Extreme Loading Structures (ELS), 고층 RC 빌딩, 하중 대체경로

1. 서 론

연쇄붕괴는 구조부재의 국부적인 파괴로 인하여 주변 부재의 파괴로 이어지고 건물 전체 또는 더 큰 영역의 파괴로 이어지는 붕괴를 의미하며 이는 2차, 3차 피해가 계속해서 발생하게 되어 인명 및 시설물에 큰 손실을 입힌다. 연쇄붕괴의 대표적인 국내 사례는 1995년 삼풍백화점 붕괴사건이고 외국의 경우는 1998

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 대학원생

²⁾ (주)코리아카코 부설연구소 책임연구원

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

⁴⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

⁵⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 부교수

* 교신저자 : chosh@jbn.ac.kr

접수일 : 2011년 12월 13일

심사 완료일 : 2011년 12월 26일

게재 승인일 : 2011년 12월 28일

년 미국 오클라호마 연방정부 건물의 차량 폭탄 테러 및 2001년 미국 세계무역센터(WTC) 건물의 연쇄붕괴를 들 수 있다(Nair, 2003). 이러한 국부손상에 의한 연쇄붕괴의 관련 연구들이 외국에서는 활발히 진행되어 왔지만 국내에는 미흡한 실정이다.

외부폭발에 의한 구조물의 손상에 대한 연구는 Mays & Smith(1995)가 구조물과 폭원까지 이격거리 및 폭약량의 변화에 따른 구조물의 충격손상을 평가하는 폭발압력식을 제안하였으며, Mendis & Ngo (2002)는 전산유체동역학(CFD, computational fluid Dynamic)기법을 이용하여 발파 하중이 구조물에 미치는 영향을 연구하였다. Tagel-Din & Rahman(2006)는 폭탄테러에 의한 미국 오클라호마 Alfred P.Murrah 연방빌딩의 붕괴 및 손상과정을 AEM(Applied Element Method)법으로 모사하였다. 국내에서는 박훈 외(2008)는 ELS소프트웨어를 이용하여 철근콘크리트 모형 구조물의 발파해체실험결과를 모사하여 유효성을 검증하였다.

본 연구에서는 AEM법을 기반으로 한 ELS(Extreme Loading for Structures) 프로그램을 이용하여 외부폭발에 의한 고층 RC 구조물의 국부손상 및 연쇄붕괴 과정을 모사하였다. 폭원과 빌딩의 이격거리에 따른 국부손상과 이에 따른 연쇄붕괴 여부를 파악하였다. 연쇄붕괴가 발생한 경우의 국부파괴된 구조부재(기둥, 슬라브, 벽, 거더)를 조사하여, 발파해체 시나리오의 발파부재로서 적용하여 붕괴모델링을 수행하였다. 하중 대체경로를 부여하기 위하여 국부파괴된 주요 구조부재를 보강한 발파해체해석을 수행하고 축응력 및 모멘트를 분석하여 고층빌딩의 국부손상-연쇄붕괴 전이과정을 분석하고, 국부손상-연쇄붕괴 전

이 방식을 위한 보강법을 제안하였다.

2. 응용 요소법(Applied Element Method, AEM)의 개요

2.1 개요

본 연구에서 적용하는 Extreme Loading Structures (ELS) 소프트웨어는 응용 요소법(Applied Element Method, AEM)을 기반으로 제작되어 주로 극한 하중 조건하에 구조물의 손상정도와 붕괴거동을 예측하는 수치해석 프로그램이다(Tagel-Din & Rahman, 2006). AEM은 구조물을 작은 요소들을 집합체로 모형화하며 이 요소들은 Fig. 1에서와 같이 요소면 주위에 분포되어 있는 접촉점에서 한 개의 수직 스프링과 두 개의 전단 스프링에 의해 연결된 것으로 가정한다. 각 요소는 3차원의 물리적인 좌표와 형상을 가지며 서로 분리되거나 충돌할 수 있다. 3D AEM해석의 경우에는 입방체 요소들로 구조물을 모형화하며 4-6점의 각 추형 또는 각주형 요소들이 사용되기도 한다. 각 요소들은 6개의 자유도를 가지며, 자중은 항상 Z방향으로 적용된다. 해석 종류 별 활동 자유도는 Table 1에 나

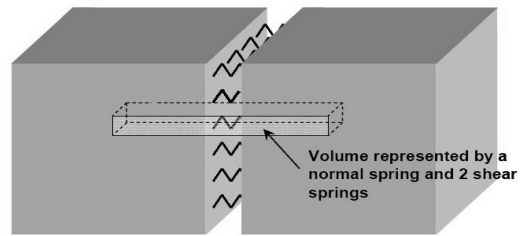
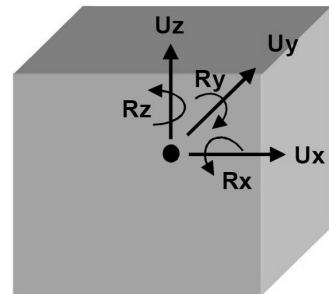


Fig. 1. Element connectivity springs representing volumes.

Table 1. Degree of freedom (DOF) for different types of analysis

Case	Sample	Active DOF
2-D Analysis in X-Z	2-D Multi story frame	U_x, U_z, R_y
Grid in X-Y	Floor, slab or Raft	U_z, R_x, R_y
General 3-D problem	3D multistory structure	$U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$



타낸 바와 같다.

2.2 구성모델 및 파괴 조건

본 연구에서 사용된 ELS 프로그램은 요소와 요소 사이의 면은 스프링을 통하여 연결된다. 연결 스프링은 요소 사이의 응력, 변형률, 연결 상태를 나타낸다. 그리고 요소들의 크기가 변할 때 특정한 변환요소가 필요 없으며 같은 면을 공유하는 요소들은 면의 일부 분만이라도 공유되면 연결 스프링으로 연결이 된다. 요소를 연결하는 스프링은 매트릭스 스프링과 철근 스프링으로 나누며 매트릭스 스프링은 인접한 두 요소의 연결 상태와 주요 구성 재료의 특성을 나타낸다. 예를 들면 콘크리트 구조물일 경우 이 스프링은 콘크리트의 재료를 표현하며 철골 구조물일 경우 철골의 재료 특성을 표현한다. 매트릭스 스프링의 경우 한 개의 수직 스프링과 두 개의 전단 스프링인 3개의 스프링으로 구성되어 있다. 철근 스프링은 철근의 특성, 위치, 크기를 가지며 역시 3개의 스프링으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 ELS에 적용하는 축하중에 의한 콘크리트의 축응력-축변형률 곡선을 보여주고 있다(Okamura and Mackawa 1991). 콘크리트를 구성하는 요소의 초기 영률, 파괴매개변수, 콘크리트의 내부 손상, 압축 소성 변형 등은 축응력-축변형률 곡선을 이용하여 정의된다. 접선계수는 스프링위치에서 변형률을 따라 계산된다. Fig. 3은 Ristic 모델로서 철근에 사용된다(Ristic et al, 1986). 철근의 접선 강성은 철근 스프링, 재하 상태 그리고 Bauschinger 효과를 고려한 철근 스프링 응력-변형률 곡선에 근거하여 계산된다.

3. 해석모델 및 해석조건

폭약 TNT 1,500kg을 적재한 화물차가 Fig. 4와 같이 고층 RC빌딩 건물에 외부폭발사고가 발생하는 것을 가정하였다. 지상 2m 높이에서 구조물과 화물차의 거리 1m, 2m, 5m, 10m, 15m 이격된 거리에서 외부 폭발에 의한 고층 빌딩의 국부손상 및 연쇄붕괴를 모사하였다. 해석시간은 5초로 설정하였으며 외부폭발 하중에 의한 time step은 0.00001초로 설정하였다. 총 모델링 시간은 약 36시간 정도 소요됐다. 폭약량, 거

리, 시간에 따른 폭발압력은 Friedlander방정식(Mays and Smith 1995)를 적용하여 산정하였다.

해석대상 모델은 Fig. 5와 같은 넓이 30.25m, 폭 20.5m, 높이 48m 인 15층 높이의 RC 빌딩이다. (a)는 평면도를 나타내며 (b)는 ELS프로그램으로 생성 시킨 3D 모델이다. 거더의 X방향 길이는 4.75m이고 Y방향 길이는 4.5m이다.

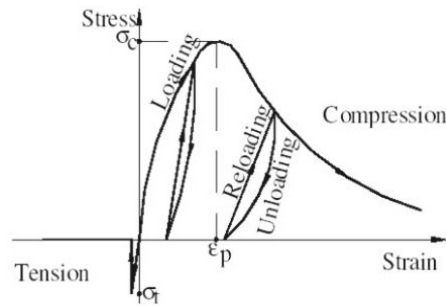


Fig. 2. Stress-strain relation for concrete under axial loading.

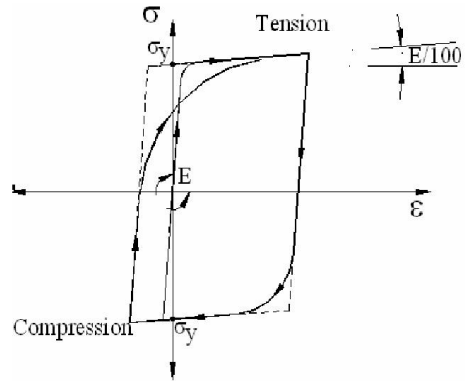


Fig. 3. Stress-strain relation for reinforcement under axial loading.

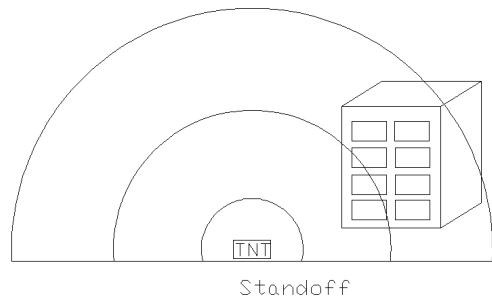


Fig. 4. External explosion environment and RC building structure.

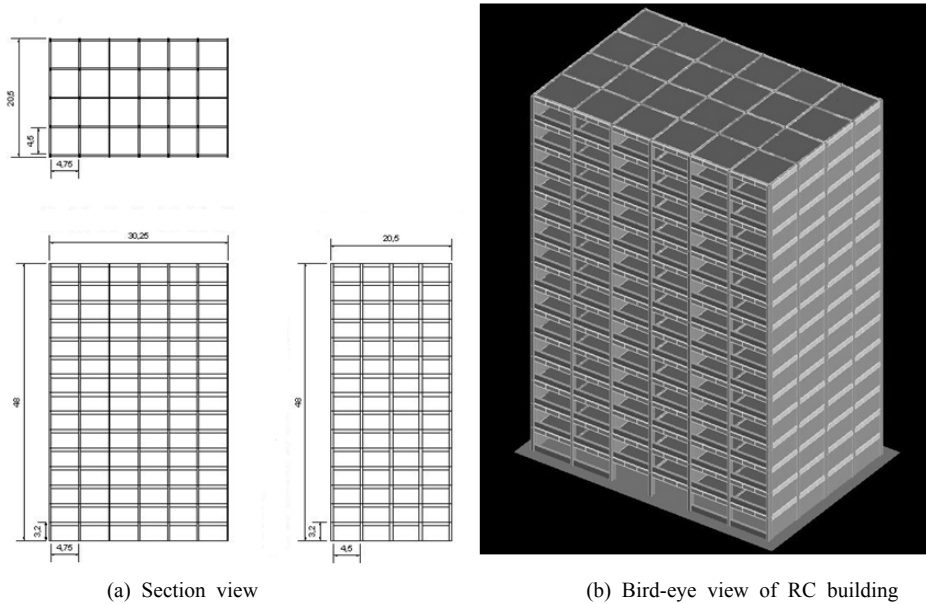


Fig. 5. Plan and 3D model of 15 story RC building(unit: m).

Table 2. Physical properties of the RC building

Property	Concrete	Reinforcement	Brick
Young's modulus ^b (MPa)	2.46×10^4	2.04×10^5	2.0×10^4
Shear modulus (MPa)	9.84×10^3	8.15×10^4	8.0×10^3
Tensile strength (MPa)	3	3.6×10^2	1
Compressive strength (MPa)	40	3.6×10^2	10
Specific Weight (kg/m ³)	2,500	7,840	1,800

Table 3. Rebar properties of analysis models

Bar Number (USA)	Bar Number (KOR)	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Weight per unit (kg/m)
#3	D10	9.5	71	0.56
#4	D13	12.7	129	1.00
#5	D16	15.9	199	1.56

해석에서는 접촉면당 5개의 스프링을 사용하였고 지반은 콘크리트와 동일한 물성을 갖는 것으로 가정하였다. Table 2는 해석에서 사용한 콘크리트, 철근, 벽돌의 물성값을 나타내고 있다.

Fig. 6의 section 1는 거더 중심부의 철근 배열을 보여주고 있다. 즉 거더의 밑 부분에는 #5 철근 4개가 위치하고 중간 양옆에는 #4의 철근 2개가 위치하고

있으며 거더의 윗부분 모서리에 #4 철근 2개가 배열된 구조이다. section 2는 기둥과 거더가 결합되는 부분의 철근 배열을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 6의 col.section은 기둥의 철근 배열을 보여준다. RFT of Slab은 슬라브의 철근배치를 Fig. 6에서 보여준다. m 당 #4의 철근 5개가 배열되어 있음을 보여준다. 여기서 사용된 철근의 규격은 Table 3에 나타난 바와 같다.

5가지 해석조건을 보여주는 Table 4에서 case 1은 이격거리가 1m인 경우로서 폭발압력 도착시간은 0.000091초, 폭발압력 지속시간은 0.002434초이며 폭약량은 1,500kg이고 최대 폭발압력은 6.66×10^{10} MPa이다. case 2는 이격거리가 2m인 경우로서 폭발압력 도착시간은 0.000254초, 폭발압력 지속시간은 0.002434초이며 폭약량은 1,500kg이고 최대 폭발압력은 3.22×10^{10} MPa이다. case 3은 이격거리가 5m인 경우로서

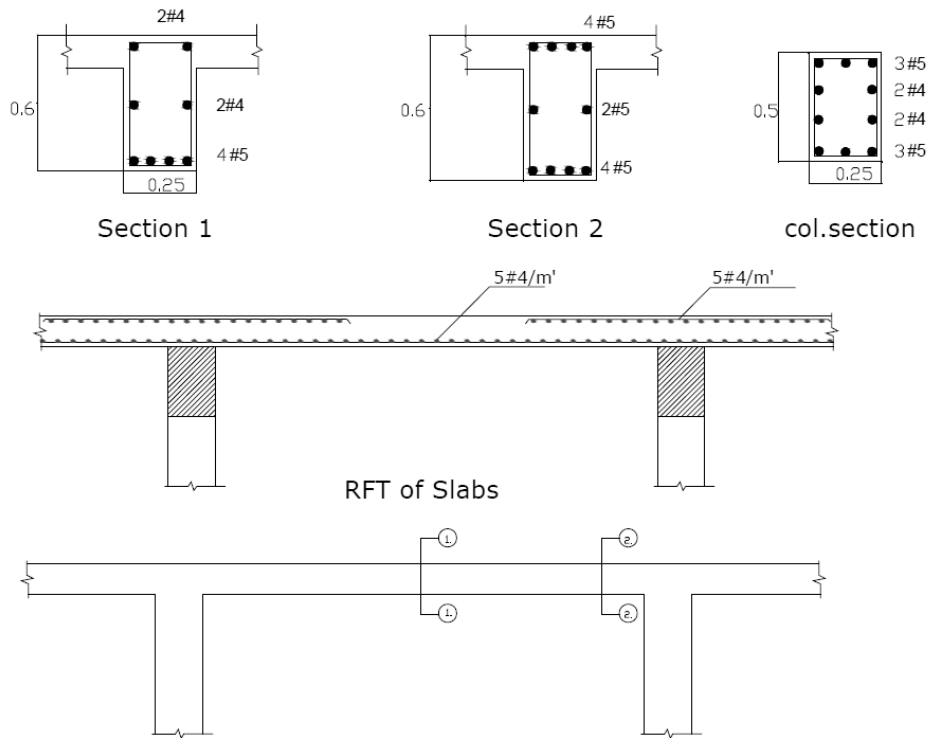
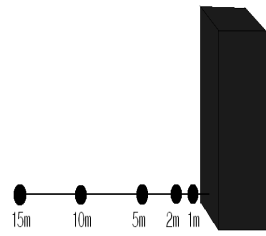


Fig. 6. Design of reinforcement slabs and beams.

Table 4. External explosive location and calculated explosion pressures

	CASE	Distance (m)	Arrival time (s)	Duration (s)	Explosive weight (kg)	Peak pressure (MPa)
	1	1	1	0.000091	0.002434	1500
2	2	2	0.000254	0.002434	1,500	3.22×10^{10}
3	3	5	0.001068	0.003108	1,500	7.00×10^9
4	4	10	0.003574	0.01190	1,500	1.51×10^9
5	5	15	0.007638	0.026479	1,500	5.17×10^8

폭발압력 도착시간은 0.001068초, 폭발압력 지속시간은 0.003108초이며 폭약량이 1,500kg이고 최대 폭발압력은 7.00×10^9 MPa이다. case 4는 이격거리가 10m인 경우로서 폭발압력 도착시간은 0.003574초, 폭발압력 지속시간은 0.0119초이며 폭약량이 1,500kg이고 최대 폭발압력은 1.51×10^9 MPa이다. case 5는 이격거리 15m인 경우로서 폭발압력 도착시간은 0.007638초, 폭발압력 지속시간은 0.026479초이며 외부 폭발한 폭약량 1,500kg이고 최대 폭발압력은 5.17×10^8 MPa이다.

4. 외부폭발하중에 의한 RC구조물의 파괴거동

Fig. 7는 구조물과 폭원과의 이격거리가 1m인 경우 해석결과를 보여주고 있다. 기폭 후 충격파는 0.000091초 후에 구조물의 전면 기둥에 도달하였으며, 약 0.003초 경과 후에 최단거리에 있는 기둥이 파괴되어 건물 안쪽으로 비산되었다. 전면 기둥이 붕괴된 이후 1층의 모든 기둥이 점진적으로 붕괴되었다. 1층의 국부손상정도로써 파괴된 기둥의 수는 9개, 벽체는 6개, 거더는 4개, 슬라브는 4개였다. 1.5초 후에는 2층 바

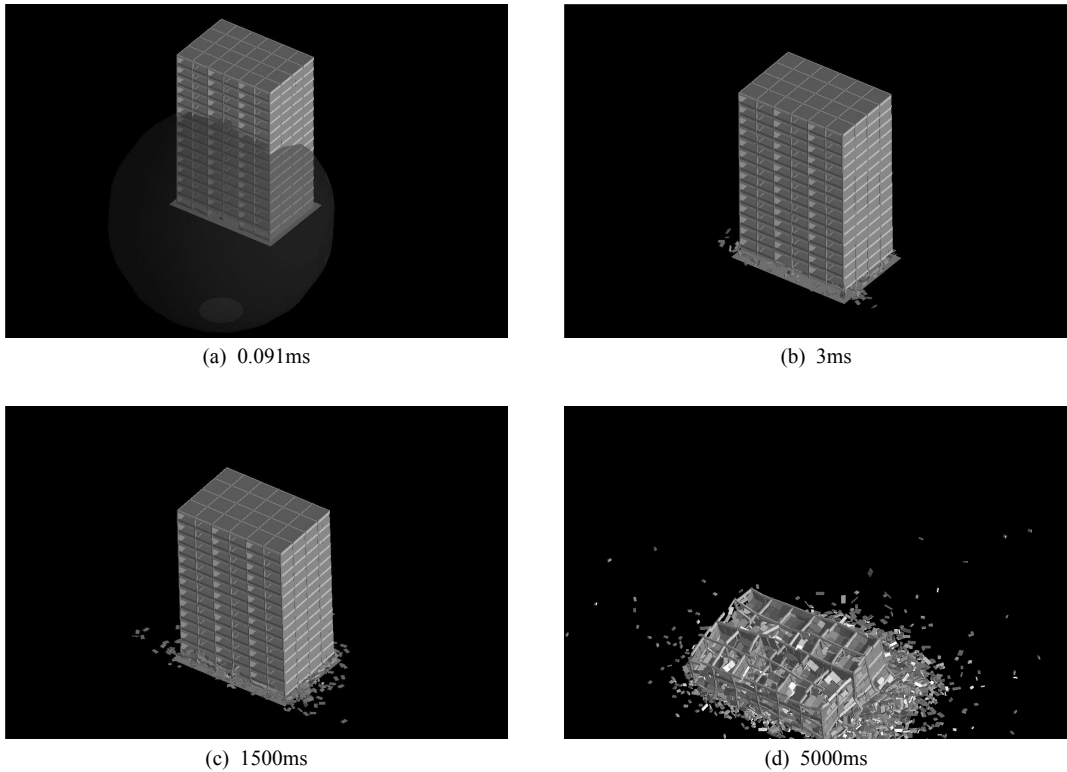


Fig. 7. Collapse behavior of the Case 1 model when standoff distance is 1m.

닥이 붕괴되어 1층 떨어졌다. 그 이후 상부 층이 점진적으로 붕괴되어 최종적으로 전체적 구조물이 붕괴되는 연쇄붕괴거동(progressive collapse behavior)을 보였다. 이격거리 2m인 경우도 이격거리 1m인 경우와 마찬가지로 국부손상에 의한 연쇄붕괴거동이 나타났다.

Fig. 8은 외부폭발 이후 5.0초에서의 이격거리에 따른 구조물의 최종 손상패턴을 보여주고 있다. 이격거리 1m, 2m의 경우는 앞에서 설명한 바와 같이, 기둥 파괴 후 연쇄붕괴거동으로 인한 전체파괴양상을 보였다. 이격거리가 5m의 경우에는 1층에서 거더 4개, 벽체 6개, 슬라브 4개의 분리파괴가 발생되었으나, 기둥은 2개만 부분적 손상을 입었다. 2층에서는 거더 2개, 벽체 2개, 슬라브 2개가 파손이 되었다. 그러나 연쇄붕괴는 발생하지 않았다. 이격거리 10m인 경우 1층에서는 거더 4개, 벽체 4개, 슬라브 3개가 파괴되었고 2층은 거더 3개, 슬라브 3개가 파괴되었다. 3층은 거더 2개, 슬라브 3개가 파괴되었고 4층은 슬라브 2개가 파괴되는 국부 손상을 보였다. 이격거리 15m인 경

우에는, 1층의 벽체 7개가 파손되었고 2층은 벽체 2개가 파괴되는 국부 손상만 발생되었다. 외부폭발의 경우에는 폭원과 구조물의 이격거리가 구조물의 손상에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 이격거리 1m에서 외부폭발 시 구조물 1층에서의 손상된 구조부재를 나타내고 있다. Fig. 9의 (a)는 1층 기둥의 번호를 나타낸 것이고 (b)는 폭발에 의한 파손된 기둥의 위치를 보여주고 있다. 파손된 기둥 번호는 2-1, 3-1, 3-2, 4-1, 4-2, 4-3, 5-1, 5-2, 6-1이고 총 9개 기둥이 파손됐다. 파괴패턴을 살펴보면, 폭원을 중심으로 대략 10m이내의 기둥들이 손상되었음을 볼 수 있다. 다시 말하면, 1500kg의 외부폭발의 폭력에 의하여 10m이내의 구조가 국부적 손상을 입을 수 있음을 보여주고 있다. 이격거리 1m인 경우 국부손상의해서 연쇄붕괴가 발생하였고 이격거리 5m 이상에서는 국부손상만 발생할 뿐 연쇄붕괴로의 진행은 발생되지 않았다.

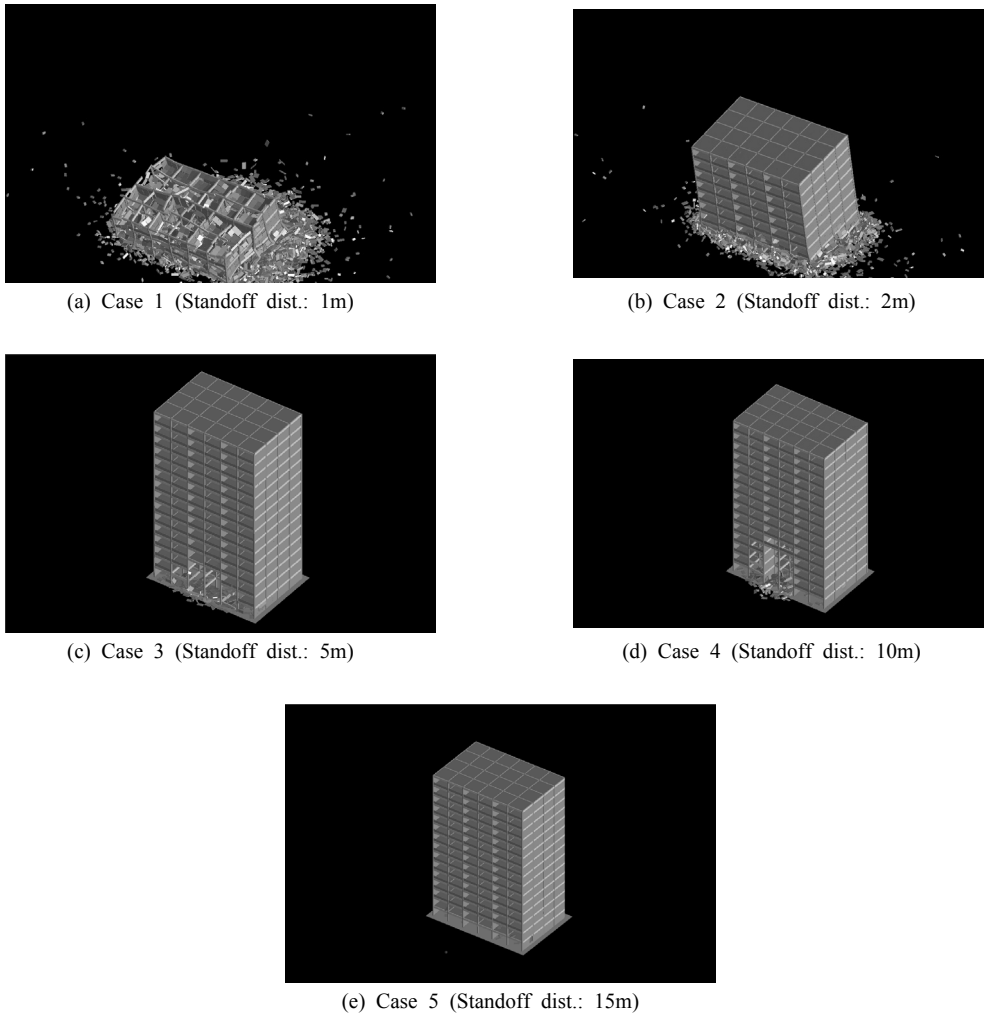


Fig. 8. Resultant fracture pattern of analysis model after 5.0sec of initiation of explosives.

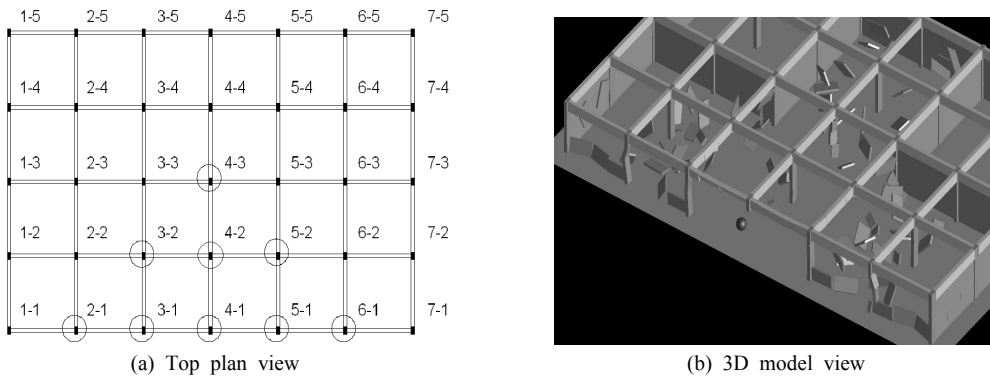


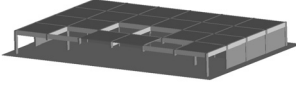
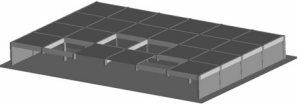
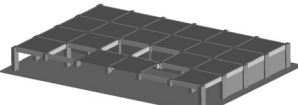
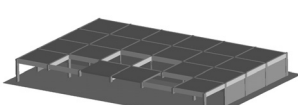
Fig. 9. Failed elements on the 1st floor (Case 1).

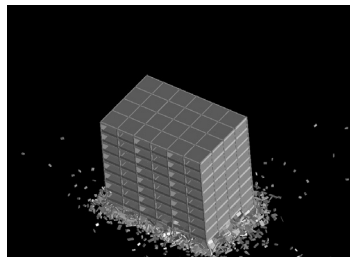
5. 발파해체 시나리오를 적용한 연쇄붕괴-국부손상과정에 관한 고찰

Case 1 해석에서 연쇄붕괴를 야기시킨 국부파괴 부재를 파악하여 발파해체 해석기법에 발파부재로 간주

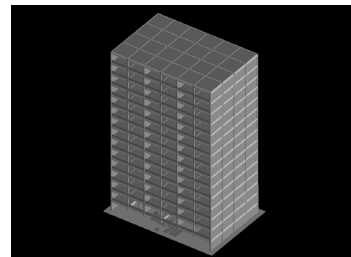
하여 순차적 제거하는 붕괴해석모델을 작성하였으며, 하중 대체경로를 부여하여 연쇄붕괴를 지연시키기 위하여 국부파괴된 주요 구조부재를 보강한 발파해체해석모델을 작성하였다. Table 5는 Case 1 model의 외부폭발에 의하여 직접적으로 국부파괴된 부재를 발파

Table 5. Explosive demolition scenarios for investigating the effect of partial reinforcement of structures on the progressive collapse (9 columns, 4 girders, 6 walls and 4 slabs were removed)

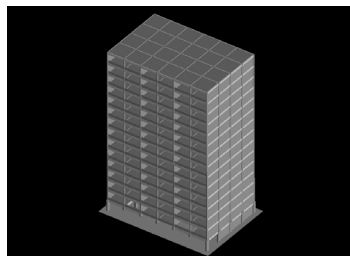
Model No.	Bird-eye view of 1st floor	Partial reinforcement
Case 1 model		None
Model 1		Increasing strength of both side walls
Model 2		Increasing thickness of column as 2 times
Model 3		Increasing slab thickness as 2 times



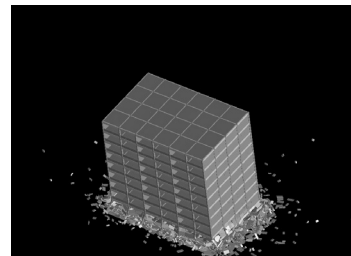
(a) Case 1 model



(b) Model 1



(c) Model 2



(d) Model 3

Fig. 10. Simulated demolition results (snapshots after 3sec calculation).

해체 시나리오에 적용한 모델이며, Model 1은 Case 1 model의 맨 앞 열 좌우측 벽체를 제거하지 않고 해석한 경우이고 Model 2는 Case 1 mode의 1층 기둥의 두께를 2배한 경우이다. Model 3는 Case 1 mode의 천장부분 슬라브의 두께를 2배로 하여 해석한 경우이다. 해석시간은 시간을 단축하기 위하여 3초로 설정하였으며 외부 폭발할 때와 동일하게 time step은 0.00001초로 설정하였다. 총 모델링 시간은 약 24시간 정도 소요됐다. Case 1 model은 외부폭발에 의한 국부손상으로 인한 연쇄붕괴가 발생한 경우로 기준모델로서 국부손상 된 기둥 9개, 거더 4개, 벽체 6개, 슬라브 4개를 제거하여 발파해체 시뮬레이션해석을 수행하였다.

발파해체기법을 이용한 모델들의 붕괴해석결과를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 이격거리 1m에서 외부폭발 시 손상된 1층 구조부재를 적용한 Case 1에서의 해석결과는 연쇄붕괴가 발생하였다. 1층 외벽에 양쪽 벽체 부분을 남긴 Model 1의 해석결과는 연쇄붕괴가 발생하지 않았다. 1층 기둥의 두께를 2배로 한 Model 2 역시 연쇄붕괴가 발생하지 않았고 1층 슬라브 두께를 2배로 한 Model 3는 연쇄붕괴가 나타났다.

국부손상이 연쇄붕괴로 전이되는 메카니즘을 알아보기 위해 구조부재를 보강한 모델들의 기둥의 축력과 거더의 모멘트를 분석하였다. Fig 11은 Model 1, Model 2, Model 3에 대한 축력과 모멘트를 분석하기 위한 1층의 기둥과 거더 내 모니터링 위치를 표시한 것이다.

Fig. 12는 1층 기둥에 발생된 축력하중 시간이력곡

선을 보여주고 있다. Fig. 12(a)는 Case 1 model의 국부손상영역을 발파해체기법으로 사용한 경우로, Fig. 8(a)와 동일하게 연쇄붕괴가 발생하였다. 이때 기둥의 최대 하중은 약 520,000kgf이었다. Fig. 12(b)는 양쪽 벽체 부분을 남긴 Model 1의 기둥의 최대축력으로 0.6초에 약 470,000kgf이었다. 이 경우 양쪽의 벽체가 기둥의 축력을 대신 받아 연쇄붕괴가 발생하지 않았다. 이는 기둥이 상실되면서 가해지는 축력을 벽체가 대신받는 대체경로법에 의하여 연쇄붕괴로의 전이가 되지 않았기 때문이다. Fig. 12(c)는 1층 기둥의 두께를 2배로 보강한 Model 2의 기둥축력으로 약 700,000 kgf을 보였다. 기둥축력이 700,000kgf이 되어도 기둥이 파괴가 되지 않아 연쇄붕괴가 발생하지 않았다. 이는 구조부재인 기둥의 보강으로 연쇄붕괴로의 전이가 차단되었기 때문이다. Fig. 12(d)는 1층의 슬라브 두께를 2배로 한 Model 3의 기둥축력으로 Case I model과 동일하게 0.4초에서 약 520,000kgf이었고 0.9초에서 축력이 완전히 사라져 기둥의 파괴로 인한 연쇄붕괴가 발생하였다. 이는 구조부재인 슬라브의 두께가 보강이 되어도 구조물을 지탱하는 기둥이 받는 축력을 슬라브가 대체하여 지지할 수 있는 대체경로로서 작용을 할 수 없다는 것을 말해준다.

Fig. 13는 해당 모델들의 거더에 대한 시간-모멘트 곡선을 보여주고 있다. Case 1 model의 거더에서 모멘트를 분석한 결과 기둥의 축력이 상실되는 0.9초에서 모멘트값은 약 12,000kg·m이었다. 0.9초에서 기둥이 파괴 되면서 다시 모멘트가 회복이 되어졌다가 구조물의 연쇄붕괴에 의해 거더가 1.5초 부근에서

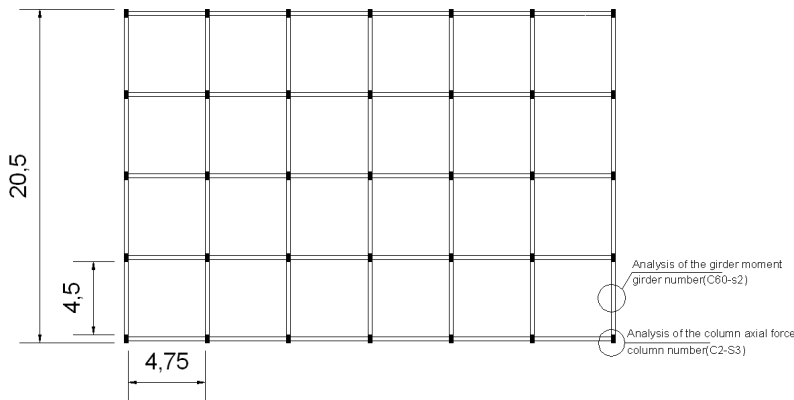


Fig. 11. Monitoring points for axial forces and moments (unit: m).

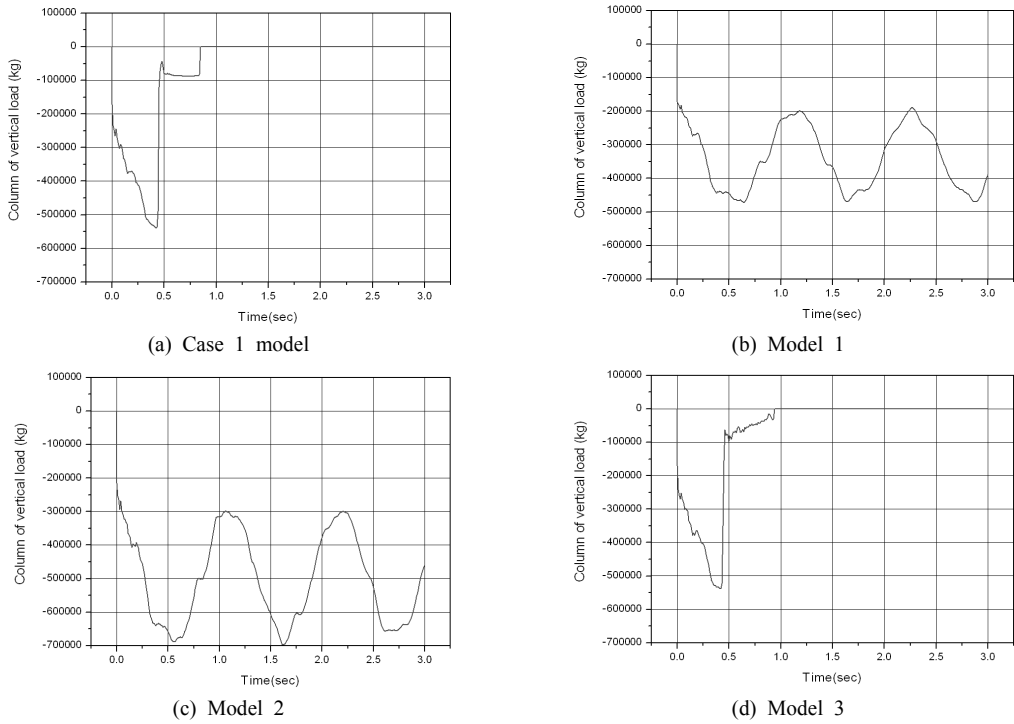


Fig. 12. Axial forec-time histories on the 1st column.

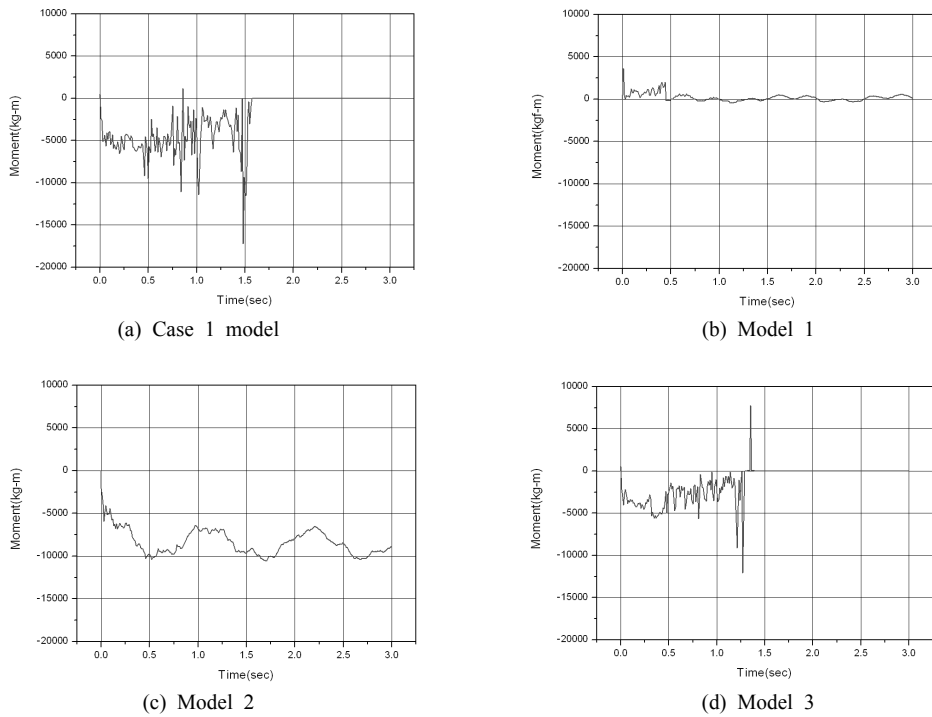


Fig. 13. Moment-time histories on the 1st girders.

완전히 파괴가 됐다. 이때의 모멘트 값은 약 $18,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 이었다. 이 점으로 미루어보아 대상구조물 거더의 최대허용모멘트 값은 약 $18,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 임을 알 수 있었다. 양쪽 벽체를 남긴 Model 1의 최대모멘트 값은 0.02초 부근에서 약 $3,700\text{kg}\cdot\text{m}$ 이었다. 이는 남긴 벽체가 거더의 모멘트를 대신 전달 받을 수 있는 대체경로로 작용하여 거더의 모멘트 값을 낮추는데 영향을 미쳤다는 것을 말해준다. 기둥의 두께를 2배로 한 Model 2의 모멘트는 0.5초에서 약 $10,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 이었다. Case I model의 모멘트-시간 그래프와 비교해보면 0.5초, 1.6초, 2.6초에 축력이 많이 작용을 하는데 모멘트 그래프에서도 같은 시간대에 모멘트값이 큰 것을 알 수가 있다. 이는 축력이 하중을 많이 받으면 받을수록 모멘트값도 커진다는 의미한다. 따라서 구조부재인 기둥의 보강이 거더로 전달되는 모멘트를 낮추는 대체경로의 역할을 하였다는 것을 알 수 있었다. 슬라브의 두께를 2배로 한 Model 3의 거더에서 시간-모멘트 그래프 범위는 $0\text{kg}\cdot\text{m}\sim 12,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 이고 Case I model에서의 모멘트 값의 범위는 $0\text{kg}\cdot\text{m}\sim 18,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 이다. 모멘트 값이 약 $6,000\text{kg}\cdot\text{m}$ 정도 차이가 발생하였다. 이는 거더에 전달되는 모멘트를 구조부재 보강을 한 슬라브가 대신 받아 모멘트의 증가를 억제하였기 때문으로 추측된다. 슬라브 역시 약간의 거더 대체경로로 작용했다는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

외부폭발에 의한 고층 RC 빌딩의 붕괴거동을 해석하기 위하여 1,500kg 폭약이 RC 빌딩으로 1m, 2m, 5m, 10m, 15m 이격된 거리에서 폭발하는 것을 가정하였다. 해석모델의 경우 이격거리 1~2m 사이에서 국부손상에 의한 연쇄붕괴가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 기폭시나리오에 따라 구조물 지지부재의 일부를 제거하여 구조물의 붕괴를 유도하는 발파해체기법을 국부손상-연쇄붕괴 전이과정 연구에 적용하였

다. 연쇄붕괴가 발생한 모델을 대상으로 국부손상부재를 파악하여, 발파해체 해석기법을 적용하여 국부손상-연쇄붕괴 전이를 방지하기 위한 보강법을 연구하였다. 결과적으로 구조물의 수직하중을 직접 받는 벽체 및 기둥의 보강이 효과적인 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2009년 군산대학교 해양개발연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한 해석결과의 분석에 많은 조언을 주신 삼성기술연구소의 최현훈박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Okamura H. and Maekawa K.: Nonlinear analysis constitutive models of reinforced concrete, Gihodo Co. Ltd., Tokyo, 1991.
- Ristic, D., Yamada, Y., and Iemura, H. 1986, "stress-strain based modeling of hysteretic structures under earthquake induced bending and varying axial loads", Research report No. 86-ST-01, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Nair, R.S., 2003, Progressive Collapse Basics, Proc. AISC-SIDNY Symp. on Resisting Blast and Progressive collapse, AISC, New York.
- Mays, G.C., and P.D. Smith, 1995, Blast Effects on Buildings, Thomas Telford Publications, Thomas Telford Services Ltd, Heron Quay, London, UK.
- Mendis, P.A., and T. Ngo, 2002, Assessment of tall buildings under blast loading and aircraft impact, Toward a better built Environment, Innovation Association of Bridge and Structural Engineering, Australia, pp. 375-376.
- Tagel-Din, H. and N. A. Rahman, 2006, Simulation of the Alfred P. Murrah Federal Building Collapse due to Blast Loads, Architectural Engineering National Conference, Omaha, Nebraska, pp. 1-15
- 박 훈, 석철기, 김승곤, 2008, AEM을 이용한 철근콘크리트 모형 구조물의 붕괴 모델링, 터널과 지하공간, Vol. 19, No. 1 pp. 43-51.

**김 현 수**

현재 전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

Tel: 063)270-4636

E-mail: khs1221@paran.com

**박 훈**

(주)코리아카코 책임연구원
전북대학교 자원·에너지공학과
겸임교수

Tel: 02)270-4636

E-mail: hujin@jbnu.ac.kr

**이 연 규**

현재 군산대학교 해양건설공학과
교수

Tel : 063)469-1864

E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr

**김 승 곤**

현재 전북대학교 자원·에너지공학과
교수

Tel: 063)270-2364

E-mail: skkim@jbnu.ac.kr

**조 상 호**

현재 전북대학교 자원·에너지공학과
부교수

Tel: 063)270-4636

E-mail: chosh@jbnu.ac.kr