



내부 폭발하중을 받는 철근콘크리트 코어의 연쇄붕괴 해석

김한수 ^{1)*} · 안재균 ¹⁾ · 안효승 ¹⁾

¹⁾ 건국대학교 건축공학과

Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Core Structure Subjected to Internal Blast Loading

Han-Soo Kim,^{1)*} Jae-Gyun Ahn,¹⁾ and Hyo-Seong Ahn¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Konkuk University, Seoul 143-130, Korea

ABSTRACT In this paper, internal blast effect of reinforced concrete core structure were investigated using Ansys Autodyn, which is a specialized hydrocode for the analysis of explosion and impact. It is expected that internal blast case can give additional damage to the structure because it causes rebound of blast loads. Therefore, in this paper, the hazard of internal blast effect is demonstrated using UFC 3-340-02 criteria. In addition, analysis result of Autodyn, experimental result regarding rebound of blast load, and example of UFC 340-02 are compared to verify that Autodyn can analyze internal blast effect properly. Furthermore, progressive collapse mechanism of core structure which is one of the most important parts in high rise buildings is also analyzed using Autodyn. When internal blasts are loaded to core structure, the core structure is mostly damaged on its corner and front part of core wall from explosives. Therefore, if the damaged parts of core wall are demolished, progressive collapse of the core structure can be initiated.

Keywords : internal blast analysis, RC core structure, progressive collapse, autodyn

1. 서 론

최근 테러에 대한 경각심이 높아지면서, 학계에서도 폭발하중이 구조물에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 도심지에서는 이러한 폭발사고로 인해 인명피해뿐 아니라 주요 시설물에도 큰 손상이 가해진다. 폭발하중으로부터 인명 및 시설물을 안전하게 보호하기 위해서는 기본적으로 폭발하중을 받은 구조물의 거동에 대한 이해가 필요하다. 일반적으로, 콘크리트는 다른 재료들에 비해서 상대적으로 높은 폭발저항성을 가진 재료이지만, 특정 부재손실로 인하여 인접부재까지 붕괴되는 연쇄붕괴와 같은 현상을 방지하기 위해서는 재료 외적으로 구조적인 보강이 필요하다. 이러한 보강을 위해서는 폭발하중을 받는 구조물에 대한 해석이 선행 되어야 한다.

국외에서는 폭발하중을 받는 구조물의 연쇄붕괴 가능성을 판단하고 연쇄붕괴를 방지하기 위해서 국가기관 차원에서 가이드라인을 제시하고 있다. GSA¹⁾ (General Service Administration)와 DoD²⁾ (Department of Defense)가 대표적

으로 연쇄붕괴와 관련된 가이드라인을 제시하고 있으며, 그동안 이 기관들에서 연쇄붕괴 해석기술로서 제시하고 있는 ‘기동제거 시나리오’를 이용하여 연구^{3,4,5,6)}를 하는 경우가 대부분이었다. 하지만 ‘기동제거 시나리오’는 폭발물의 크기와 거리를 고려하지 않기 때문에 보수적인 해석결과를 도출하게 된다. 이러한 이유 때문에 최근에는 컴퓨터 기술의 발달을 바탕으로 하여 유체해석과 구조해석이 동시에 가능한 하이드로코드⁷⁾를 이용한 해석 방법이 많이 연구^{8,9,10,11)}되고 있다. 초고층 건물과 같은 규모가 큰 구조물의 경우에는 연쇄붕괴 위험도를 적절하게 평가하기 위해서 구조부재의 손상정도를 파악하고, 폭발 후 부재의 잔류능력까지 고려하여 판단해야 한다. 그렇기 때문에 세밀한 연쇄붕괴 해석에는 하이드로 코드를 이용한 해석이 더 적절하다고 판단되어진다.

하이드로 코드를 이용한 해석에서 중요한 요건 중 하나가 폭발하중의 위치 선정이다. 폭발하중의 위치에 따라 해석의 결과가 좌우될 수 있기 때문에 해석 목적에 따른 적절한 위치선정이 필요하다. 폭발하중은 위치에 따라서 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 구조물의 외부에 위치한 경우와 구조물 내부에서 폭발하중이 일어나는 경우이다. 구조물 외부에서 폭발하중이 작용하는 경우는 많은 연구가 진행되었다. 일단 부재단위의 연구^{12,13)}가 활발

*Corresponding author E-mail : hskim@konkuk.ac.kr

Received April 21, 2014, Revised June 17, 2014,

Accepted October 20, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

히 진행되었기 때문에 구조물의 내부라는 조건을 적용하기가 힘들었던 것이 가장 큰 이유라고 할 수 있다. 건물 단위의 해석 연구도 많은 연구자들에 의해 진행되고 있으나, 최근의 연구 동향을 살펴보면, 폭발하중이 내부에서 작용하는 경우에 대한 연구^{14,15,16,17)}는 미진한 실정이다. 그러나 폭발에 관하여 연구한 여러 문헌^{22,23)}과 DoD에서 제안한 UFC 3-340-02 기준²⁴⁾에서 구조물이 내부 폭발에 대해 저항하기 위해서는 외부 폭발에 저항할 때보다 더 강한 구조시스템이 필요하다고 언급하고 있기 때문에 이에 대한 연구가 깊이 있게 다뤄질 필요가 있다.

본 연구에서는 UFC 3-340-02 기준에서 제시하는 내용을 통하여 내부 폭발의 위험성을 파악하고, 이러한 내부 폭발의 영향을 하이드로코드 Ansys Autodyn이 적절하게 반영할 수 있는지 검증할 것이다. 그 후 테러에 의해 내부 폭발이 일어날 가능성이 큰 건물의 코어 구조체가 폭발 시 어떠한 거동을 보이는지 Autodyn을 통하여 해석하는 것을 연구의 목표로 하고 있다. 본 논문의 연구결과는 초고층 건물 코어의 구조시스템을 결정할 때 참고사항으로 사용될 수 있으며, 그동안 잘 다뤄지지 않았던 벽체로 이루어진 구조물의 연쇄붕괴 연구에도 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

2. 내부 폭발의 영향

2.1 내부 폭발의 위험성

밀폐된 공간에서 내부 폭발이 일어나게 되면 압력 상승에 의해서 큰 충격 효과가 나타난다. 일반적인 구조물은 내

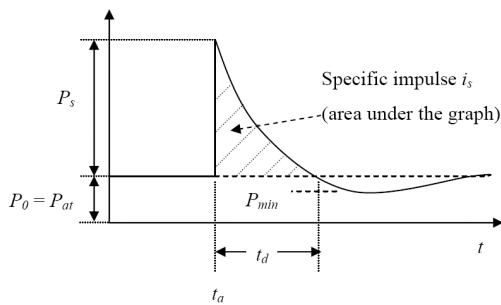


Fig. 1 Typical blast pressure-time graphs²⁵⁾

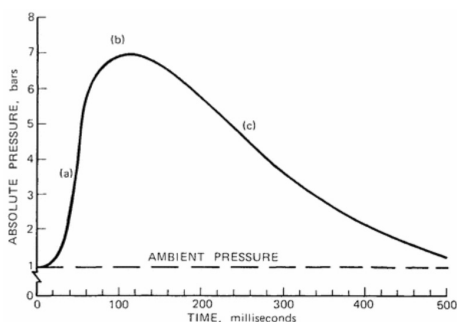


Fig. 2 Typical internal explosion pressure-time graphs²²⁾

부 폭발에 대한 고려를 하지 않고 설계되기 때문에 이로 인하여 상당한 손상을 입을 가능성이 크며, 큰 재난으로 이어질 수도 있다.

Kinney 등²²⁾이 연구한 내용에 따르면 밀폐된 공간에서의 폭발로 인한 압력의 최대 크기는 일반적인 폭발에 비해서 엄청나게 큰 편은 아니다. 하지만 폭발 압력의 지속 시간이 상대적으로 길기 때문에 구조물에 큰 피해를 입히게 되는 것이 내부 폭발의 위험한 점이다.

Fig. 1은 Smith 등²⁵⁾이 제안하는 일반적인 폭발이 일어날 경우의 압력-시간 그래프이고, Fig. 2는 Kinney 등이 제안하는 전형적인 내부 폭발에 의한 압력-시간 그래프이다. 같은 조건에서 만든 그래프가 아니기 때문에 정확한 분석은 힘들지만, 그래프의 형상을 통해서 두 경우의 특징을 비교할 수 있다. 먼저 일반적인 폭발의 경우, 압력이 급격하게 증가했다가 비교적 경사가 큰 기울기를 보이며 압력이 줄어드는 것을 알 수 있다. P_0 는 대기압, P_s 는 최대 압력, P_{min} 은 최소 압력을 나타낸다. 그리고 t_d 는 정압기라 부르며, 정압기 이후 대기압보다 낮은 압력을 갖게 되는 구간을 부압기라고 한다. 일반적인 경우 정압기가 상대적으로 짧게 나타난다. 반면에, 내부 폭발의 경우를 살펴보면 (a) 구간에서 일반적인 폭발에 비해서 완만히 증가했다가 (b) 구간에서 최댓값을 갖고, (c) 구간에서 완만히 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. 내부 폭발의 경우 정압기를 길게 유지하는 특성을 보인다. 이러한 그래프의 차이가 나는 이유는 내부 폭발의 경우가 반사효과에 의해서 압력의 증폭이 생기고, 높은 압력의 지속시간이 일반적인 경우보다 길기 때문이다.

2.2 외부 폭발과 내부 폭발의 영향 비교

UFC 3-340-02 기준²⁴⁾은 폭발물의 영향을 구조물이 효과적으로 저항할 수 있도록 만들기 위해 고려해야 할 사항들을 다루고 있다. 그리고 그 내용 중에 밀폐된 공간에서의 폭발에 대한 내용도 포함하고 있다. 특히, 이 기준의 유용한 점은 Fig. 3과 같이 구조물의 조건과 폭발물의 위치를 지정하면 Fig. 4와 같은 실험에 의해 만들어진 그래프를 통해 평균 최대 압력과 평균 충격량을 개략적으로 구할 수 있게 해놓은 것이다. 이 그래프는 벽체의 개수를

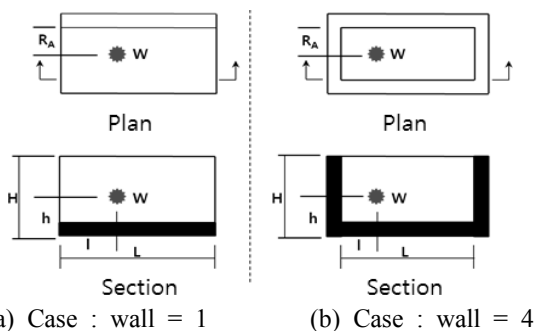


Fig. 3 Condition of structure²⁴⁾

나타내는 N값마다 l/L , h/H , L/H , L/R_A , Z_A 값에 따른 최대압력과 충격량을 나타내는 그래프를 제시하고 있다. 여기서 H 는 벽체의 높이, h 는 폭발물의 높이, L 은 벽체의 폭, l 은 단면상에서 대상 벽체의 끝으로부터 폭발까지의 거리를 나타내며, R_A 는 평면상에서 대상 벽체로부터 폭발까지의 거리, Z_A 는 이격거리 R_A 와 폭발물의 양 W 를 동시에 고려하는 환산거리를 의미한다. 본 논문에서는 이를 이용하여 외부 폭발과 내부 폭발의 영향을 비교하였다. 4면이 둘러싸인 경우를 내부 폭발로 설정하고, 같은 조건에서 벽체가 한 개일 때를 외부 폭발로 가정하여 압력과 그에 따른 충격량을 그래프 보간을 통해 구하였다. $H=16\text{ m}$, $L=10\text{ m}$, 그리고 $L/R_A=2$ 일 때, h/H , l/L , 그리고 $Z_A (=R_A/W^{1/3})$ 값에 따른 압력 값이 Table 1에 정리되어 있으며, 그 때의 충격량이 Table 2에 정리되어 있다.

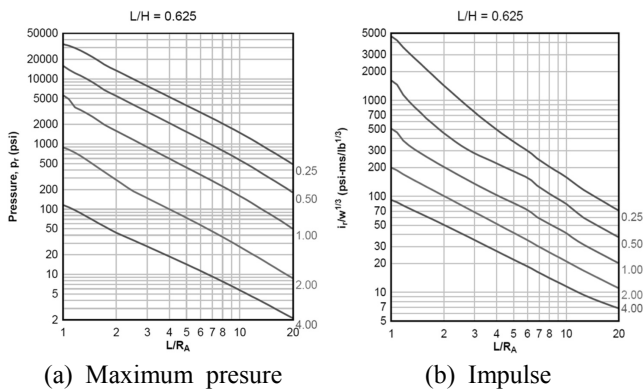


Fig. 4 Example of empirical graph²⁴⁾

Table 1 Comparison of maximum pressure on multiple conditions

h/H	l/L	Z_A (ft/lb ^{1/3})	Wall = 1 (psi)	Wall = 4 (psi)
0.1	0.1	1.6	749	750
		1.13	1595	1597
	0.25	1.6	745	749
		1.13	1792	1798
	0.5	1.6	799	801
		1.13	1903	1906
0.25	0.1	1.6	797	805
		1.13	1897	1897
	0.25	1.6	850	852
		1.13	2003	1910
	0.5	1.6	890	901
		1.13	2098	2099
0.5	0.1	1.6	791	795
		1.13	2000	2000
	0.25	1.6	946	952
		1.13	2190	2203
	0.5	1.6	995	1000
		1.13	2798	2806

결과를 살펴보면, 최대 압력은 두 경우에서 큰 차이가 없지만, 충격량은 대체적으로 2배 정도 차이가 나며, 최대 4.6배까지 차이가 났다. H 값과 L 값을 변경하였을 때도 비슷한 결과를 보였다.

이러한 결과는 내부 폭발이 일어났을 때, 최대 압력은 큰 변화가 없지만 압력의 지속시간이 길어 구조물에 큰 피해를 준다는 Kinney 등의 연구 결과를 뒷받침해주고 있다.

이처럼 내부 폭발은 외부 폭발에 비해서 구조체에 심각한 손상을 입힐 가능성이 크기 때문에 초고층 건물의 코어와 같은 주요 구조물은 내부 폭발의 영향을 고려해야 한다.

3. Autodyn의 검증

3.1 Autodyn을 이용한 UFC 예제 해석

앞에서 살펴본 내부 폭발의 영향을 Autodyn이 해석에 잘 반영할 수 있는지 확인하기 위해서, UFC 3-340-02 기

Table 2 Comparison of impulse on multiple conditions

h/H	l/L	Z_A (ft/lb ^{1/3})	Wall = 1 (psi-ms/lb ^{1/3})	Wall = 4 (psi-ms/lb ^{1/3})
0.1	0.1	1.6	75	140
		1.13	105	461
	0.25	1.6	70	140
		1.13	280	493
	0.5	1.6	85	159
		1.13	130	250
0.25	0.1	1.6	75	150
		1.13	120	220
	0.25	1.6	81	160
		1.13	132	230
	0.5	1.6	95	179
		1.13	150	280
0.5	0.1	1.6	74	150
		1.13	90	190
	0.25	1.6	75	151
		1.13	103	207
	0.5	1.6	86	170
		1.13	110	250

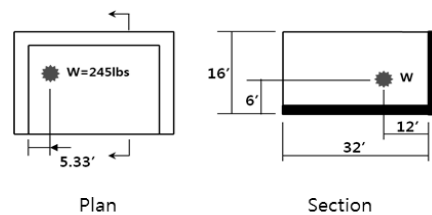


Fig. 5 UFC sample criteria²⁴⁾

준에서 제공하는 예제를 Autodyn에서 해석하고 최대 압력과 충격량을 비교하였다. 예제의 조건은 Fig. 5와 같고 그 조건을 토대로 만든 Autodyn 모델을 만들었다. H=16 ft, L=32 ft, h=6 ft, l=12 ft, 그리고 $R_d=5.33$ ft이다.

UFC 기준에서 구할 수 있는 값은 벽체 전체에 고르게 분배되는 평균 최대 압력과 충격량이다. 유사한 조건에서 평균적인 최대 압력과 충격량을 Autodyn에서 구하기 위해 벽체에 490개의 게이지를 일정한 간격으로 설치하여 게이지 값의 평균을 계산하였다. 예제에서는 폭발하중에 의한 충격이 가해진 총 시간을 0.81 ms로 계산하고 있기 때문에 Autodyn에서도 0.81 ms까지의 압력 그래프를 적분하여 얻은 값을 토대로 충격량을 계산하였다. 예제에서의 압력은 11.8 MPa이었으며, Autodyn을 통해서 구한 압력의 평균은 10.2 MPa이다. 또한 예제에서의 충격량은 111 psi-ms/lb^{1/3}이며, Autodyn에서 압력 그래프를 적분하여 얻은 값을 토대로 계산한 충격량의 평균은 101 psi-ms/lb^{1/3}이다. 압력과 충격량 모두 약간의 차이는 있지만 프로그램 상에서의 게이지 개수 제한으로 인하여 게이지를 조밀하게 분포시키지 못한 점과 UFC 기준의 경우 재료 특성을 고려하지 않는 점 등을 고려하면 수용 가능한 오차로 판단된다.

3.2 Autodyn을 이용한 Channeled Effect 해석

UFC 예제를 통해서 Autodyn이 내부 폭발로 인한 최대 압력과 충격량을 적절하게 반영하고 있음을 알 수 있다. 하지만 UFC 기준에서는 재료적인 측면을 고려하지 않기 때문에 폭발하중의 반사효과를 다른 실험 결과와의 비교를 통하여 Autodyn이 압력의 증가양상을 적절하게 반영할 수 있는지 검증하였다.

초점이 반사효과에 의한 압력 지속시간 증가에 맞춰져 있기 때문에 해석에 사용하는 Autodyn이 폭발하중의 반사효과를 정확히 반영할 수 있는지 확인하는 것이 중요하다. 그래서 Fairlie가 도심지에서의 폭발의 영향을 해석한 논문^{14,15)}을 참고하였다. 이 연구는 도심지를 축소된 모델에 대하여 실제 폭발실험의 결과와 Autodyn 해석결과를 비교한 논문이다. 이 논문의 실험결과와 비교함으로써 반사효과를 반영할 수 있는 해석기법을 얻고자 하였다.

해석모델의 조건은 Fig. 6과 같다. 콘크리트 블록 2개와 빌딩 2개 사이로 8 g의 TNT가 위치해 있다. TNT를 기준으로 하여 빌딩의 정면과 측면에 게이지를 설치하여 폭발에 의한 압력을 측정하였다. 빌딩과 블록이 모두 있을 경우, 빌딩만 존재할 경우, 그리고 모든 구조물이 없는

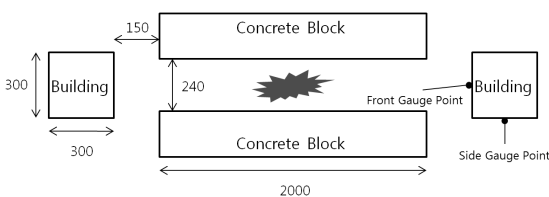


Fig. 6 Analytical model Condition

경우 3가지를 고려하여 반사효과의 영향을 알아보았다.

참고 논문에서는 Autodyn을 이용한 해석결과, 실제 실험결과, 그리고 Autodyn에서 추가적으로 제공하는 Conwep 기능에 의한 해석결과를 비교하여 Autodyn의 정확성을 검증하였다. 여기서 Autodyn을 이용한 해석은 공기와 TNT를 모델링하여 유체동역학적 해석을 하는 것을 의미하고, Conwep의 경우는 공기를 모델링하지 않고 TNT의 영향을 하중으로 치환하여 가하는 방식을 의미한다. 본 연구에서도 Autodyn을 이용하여 같은 조건의 해석을 수행하여 참고 논문의 결과와 같이 비교하였다.

Table 3에 나타나 있는 해석결과 중 빌딩과 블록이 모두 있는 경우를 살펴보면, Autodyn과 실제 실험 결과가 정면과 측면 모두 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 측면에서도 결과가 비슷하다는 것은 폭발하중의 반사효과를 잘 반영하고 있다는 것을 말해준다. Conwep 결과는 다른 결과에 비해 낮은 압력을 나타내고 있는데, 그 이유는 공기를 모델링하지 않고 정해진 부분에 치환된 하중으로 가해지기 때문에 반사효과를 반영하지 못하는 것이다. 참고 문헌의 Autodyn 결과와 본 연구에서 수행한 해석결과에 미세한 차이가 있는 이유는 참고 논문에 재료모델과 요소 개수가 정확히 주어지지 않아 가정한 부분이 있기 때문이다.

빌딩만 있는 경우도 Autodyn과 실험결과는 거의 같은 결과를 나타내고 있으며, Conwep 결과가 약간의 차이를 보이고 있다. 하지만 빌딩과 블록이 모두 있는 경우에 비해서 차이가 대폭 줄어들어 비슷한 압력을 나타내고 있다. 이는 콘크리트 블록이 없어지면서 반사효과의 영향이 거의 없기 때문에 공기를 모델링한 경우와 Conwep의 경우가 거의 같은 조건에서 해석이 이뤄지고 있기 때문이다.

어떠한 구조체도 없는 경우를 살펴보면, 반사효과의 영향이 없기 때문에 다른 두 해석조건에 비해서 낮은 압력을 받고 있음을 알 수 있다. Conwep의 경우 하중을 가할 부분이 없기 때문에 해석이 이뤄지지 않았다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때, Autodyn이 상당히 정확하게 반사효과를 반영하고 있음을 알 수 있으며, 공기와 TNT를 이용하면 내부폭발 해석에 사용할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

Table 3 Peak pressure of analysis model

	with buildings and blocks (kPa)		with buildings only (kPa)	without reflection (kPa)
	Front	Side		
Autodyn-3D	242.90	23.27	71.73	35.17
Experimental results	295.80	24.74	74.72	36.49
Conwep	83.65	-	83.22	-
Analysis in this study	247.60	23.90	74.50	37.20

4. 내부 폭발하중을 받는 구조물의 피해 양상

본 연구의 대상이 되는 구조물은 철근콘크리트 코어이다. 내부에서 폭발하중을 받을 때 코어 구조의 거동을 이해하기 위해 코어 구조체와 비슷한 조건으로 간략하게 모델링한 4면이 둘러싸인 공간에서 내부 폭발을 일으켜 그 파괴 성상을 살펴보았다.

피해 양상을 효과적으로 관찰하기 위해 비교적 많은 양의 TNT를 사용하여 내부폭발에 의한 영향을 관찰하였다. 구조체의 크기는 평면 가로, 세로 각각 11.5 m, 14.0 m, 그리고 층고 4.0 m이다. 콘크리트는 입체요소로 모델링 했으며, 두께 1m의 벽체를 길이 0.5 m의 요소로 거칠게 분할하였다. 철근은 보 요소로 모델링 했으며 모델링에 대한 보다 자세한 사항은 선행 논문²⁰⁾을 참고할 수 있다. 모델의 상부와 하부를 모두 고정시키고, 해석 시간을 고려하여 3층까지 모델링하였다. TNT는 100 kg과 500 kg을 사용하고, 철근비에 따른 파괴성상을 살펴보기 위하여 무근콘크리트 모델과 철근콘크리트 모델을 모델링하였다. 그리고 TNT 양에 따른 각 모델의 파괴상태가 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 파란색으로 나타나는 부분은 탄성 영역에 있는 것을 의미하고, 노란색으로 표시된 부분은 파괴된 영역을 나타낸다.

TNT 100 kg의 경우를 살펴보면, 모서리 부분이 다른 부분보다 먼저 파괴되고 있는 것을 알 수 있다. 무근콘크리트와 철근콘크리트 사이에 큰 차이 없이 피해를 입고 있다. TNT 500 kg을 사용한 경우를 보면, TNT 100 kg을 사용했을 때와 마찬가지로 모서리 부분이 많은 피해를 입고 있다. 그리고 추가적으로 TNT로부터 정면 부위가 많은 피해를 입고 있는 것을 알 수 있다. 무근콘크리트가

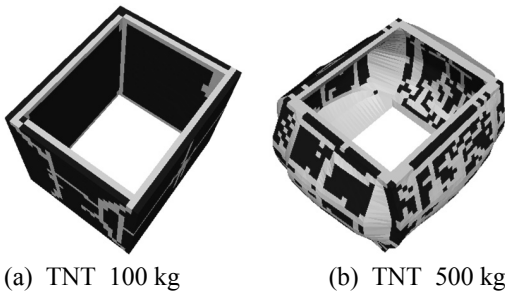


Fig. 7 Destruction shape of plain concrete

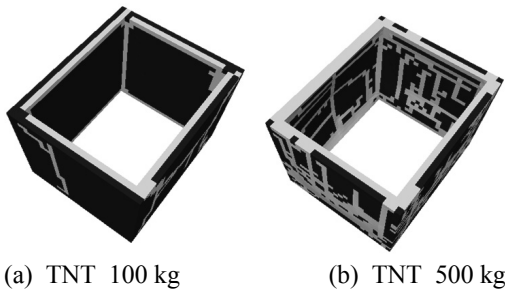


Fig. 8 Destruction shape of reinforced concrete

철근콘크리트에 비해서 많은 변형을 일으키고 있지만 피해를 많이 받는 부위는 TNT 100 kg일 때와 마찬가지로 서로 비슷하게 나타나고 있다. 이러한 양상은 구조물의 크기와 폭발물의 위치와 높이 등을 변경하여도 비슷하게 나타남을 해석을 통해서 확인하였다.

조흥범 등이 수행한 방폭 콘크리트 실험²¹⁾에서도 폭발에 의한 압력전달이 모서리 부분에서 가장 크게 나타난다고 언급하고 있어 본 연구의 해석결과의 신뢰도를 높여주고 있다.

이러한 결과를 구조역학적으로 분석하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)와 같이 코어의 벽체를 보로 간주하여 양단이 고정된 보에 삼각형 분포하중을 적용한 경우로 생각할 수 있다. 이와 같은 경우의 휨모멘트도는 Fig. 9(b)와 같다. 양단의 모멘트가 $-\frac{5}{96}wl^2$ 로 제일 크고, 정 가운데에서의 모멘트가 $\frac{1}{32}wl^2$ 으로 그 다음으로 크게 나타난다. 이러한 역학적인 이유 때문에 내부폭발에 의한 파괴성상은 일정한 패턴을 가지고 있음을 알 수 있다.

이 일정한 패턴을 분석하면 내부 폭발이 일어났을 때 구조물의 피해를 최소화할 수 있도록 설계하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

5. 코어 구조물의 연쇄붕괴 거동

앞에서는 단순하게 모델링한 밀폐된 공간을 통해서 내부에서 폭발하중을 받는 경우, 구조물이 피해를 입는 양상을 해석을 통해 알아보았다. 본 절에서는 정밀하게 모델링한 코어 구조 내부에 폭발하중을 가하여 연쇄붕괴가 어떠한 방식으로 일어나는지를 살펴보았다.

초고층 건축물의 구조시스템 중 가장 중요한 역할을 하는 부분 중 하나가 코어벽체이기 때문에 코어벽체의 연쇄붕괴 거동을 관찰하여 붕괴에 취약한 부분을 찾는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 10과 같이 인방보(Lintel)를 추가하여 보다 정밀하게 모델링한 모델을 통하여 코어의 연쇄붕괴 해석을 진행하였다. 모델 평면의 가로와 세로길이는 각각 13.5 m와 15.0 m

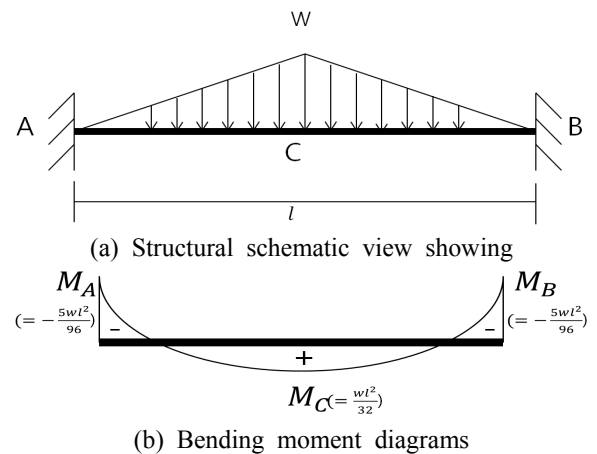


Fig. 9 Structural Analysis about Destruction shape

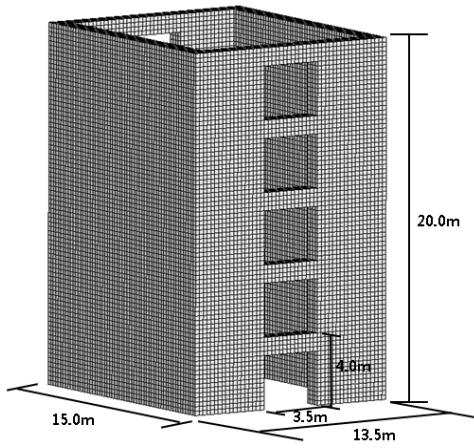


Fig. 10 Analysis model

이며, 개구부의 너비는 3.5 m이고 층고는 4.0 m이다. 벽체 두께는 1.0 m, 인방보의 폭과 깊이도 1.0 m로 모델링되었다. 콘크리트를 입체요소로 모델링하고 철근을 보요소로 모델링한 것은 앞 절과 같고, 인방보 속의 철근도 초고층 건물의 배근도를 참고하여 모델링하였다. 두께 1m의 벽체를 길이 0.25 m의 요소로 비교적 조밀하게 분할하였다. 초고층 건물 코어의 연쇄붕괴를 모사하기 위해서 코어 상단부를 구속하지 않고 수직 하중을 가하였다. 콘크리트 압축강도의 40% 정도인 28 MPa를 가하여 초고층 건물의 사용하중 상태와 비슷한 조건을 만들었다. 물론 내부의 슬래브나 간벽은 생략이 되었지만 이 해석을 통해서 연쇄 붕괴 거동을 파악하면 다른 구성요소가 갖춰진 후의 연

쇄붕괴 거동 또한 충분히 예측할 수 있을 것이란 판단 하에서 해석을 진행하였다.

압축강도가 70 MPa인 콘크리트를 사용하는 초고층 건물의 코어를 가정했기 때문에 확실한 연쇄붕괴를 일으키기 위해 TNT의 양을 크게 설정하였다. TNT 양의 기준은 엘리베이터의 적재하중을 사용하였다. 현재 상용화된 화물 엘리베이터들이 적재하중 4000~6000 kg까지 수송이 가능하므로 TNT의 크기를 4000 kg을 사용하였다. TNT를 엘리베이터가 설치될 위치에서 폭발시키면서 해석을 진행하였다.

Fig. 11은 시간에 따른 코어의 붕괴 양상을 나타낸 것이다. 범례는 파란색으로부터 붉은색으로 변할수록 손상을 많이 받는 것을 나타내고 있다. 해석결과를 살펴보면, 150 ms에서 코어의 하부가 폭발하중에 의해 파괴되고 하부 철근도 항복하여 휘어져 나온 것을 볼 수 있으며 모서리부가 다른 부분에 비해서 많은 손상을 입은 것을 관찰할 수 있다. 모서리부가 벌어지면서 인방보에도 손상이 가해지고 있다. 500 ms에는 모델의 상부에 작용하는 하중 때문에 위쪽도 손상을 많이 받고 있다. 1000 ms에는 하부가 주저앉으면서 하중을 직접받는 벽체와 하중을 직접적으로 받고 있지 않은 인방보의 접합부가 전단력에 의해서 파괴되기 시작한 것을 볼 수 있다. 1500 ms와 2000 ms에는 인방보와 벽체가 거의 완전히 분리 되고 있음을 알 수 있고 계속해서 붕괴가 일어나고 있다. 모델의 최상부에 설치한 게이지에서 측정했을 때, 1500 ms에 2.4 m 주저앉았으며, 2000 ms에는 3.2 m로 내려앉았다. 실제 초고층 건

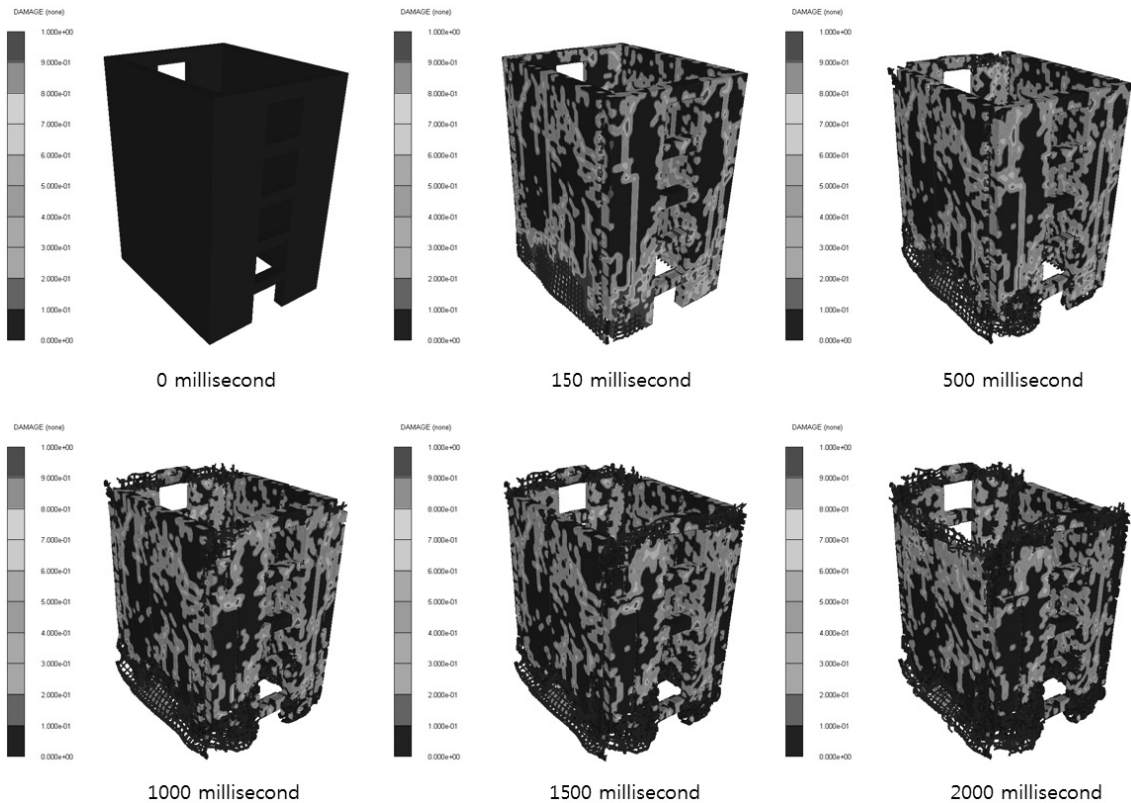


Fig. 11 Time-dependent collapse Patterns

물이라고 생각해봤을 때 이 정도 피해를 입으면 주변부재에 심각한 영향을 미칠 수 있을 것이라 예상된다.

해석결과를 종합해 봤을 때, 단순하게 모델링했을 때와 마찬가지로 모서리에서 가장 먼저 균열이 생기는 것을 알 수 있고, 폭발물의 정면 벽체와 모서리 쪽 측면 벽체에서 큰 피해를 입고 있다. 이 부분들이 파괴되면서 코어가 전체적으로 붕괴 되는 것을 살펴볼 수 있다.

이를 종합해보면, 코어에서 내부폭발이 일어날 때의 취약부위가 모서리와 중앙부임을 파악할 수 있고, 이를 토대로 모든 구성요소가 갖춰진 코어의 거동도 예측할 수 있을 것이며, 연쇄붕괴 방지대책도 수립할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 UFC 기준을 활용하여 구조물 내부에서 폭발이 일어날 경우와 외부에서 일어날 경우의 영향을 비교하였으며, 이 때 발생하는 내부폭발의 영향을 하이드록로이드 프로그램인 Autodyn이 적절하게 반영하여 해석을 수행할 수 있는지를 확인하였다. 그 다음 밀폐된 철근콘크리트 구조물 내에서 폭발이 일어났을 때의 피해양상과 정밀하게 모델링한 코어 구조물의 내부 폭발로 인한 연쇄붕괴 거동이 어떻게 일어나는지를 Autodyn을 통해 해석하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) UFC 기준을 활용하여 내부 폭발이 일어날 때의 최대 압력과 충격량을 외부 폭발의 경우와 비교해보면, 내부 폭발에 의해서 최대 압력은 크게 상승하지는 않지만 높은 압력이 긴 시간 동안 지속되어 구조물에 큰 피해를 주게 된다. 즉, 정압기가 일반적인 폭발의 경우보다 길기 때문에 주요 구조물에서는 내부 폭발의 영향을 고려할 필요성이 있다.
- 2) 밀폐된 공간 내부에서 폭발하중을 가하였을 때, 구조물의 모서리 부분과 중심부에서 큰 피해를 받는 것을 알 수 있다.
- 3) 코어 구조체를 정밀하게 모델링하여 연쇄붕괴 거동을 살펴본 결과, 밀폐된 공간일 때와 마찬가지로 모서리 부분과 폭발물의 정면부에서 많은 피해를 입게 된다. 그리고 특히 폭발물의 정면부에서 많은 파괴가 일어나면서 벽체가 하중지지능력을 상실하여 주저앉는 연쇄붕괴 거동을 살펴볼 수 있다. 이를 통해 벽체 구조물도 보-기둥으로 이루어진 건물과 마찬가지로 구조 부재가 손상을 입었을 때, 대체하중 경로를 만들지 못하면 연쇄붕괴가 일어날 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문의 해석결과를 테러 위험도가 높은 초고층 건물 코어의 폭발저항성능을 높이기 위한 설계에 참고할 수 있을 것이다. 피해를 크게 입을 것으로 예상되는 부분을 보강한다면 예상되는 연쇄붕괴를 최소화할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 첨단도시개발사업 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: 13CHUD-B059231-05-000000.

References

1. GSA, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization, U.S General Services Administration, 2003.
2. DoD, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC 4-023-03), U.S Department of Defense, 2010.
3. Iribarren, S., Berke, P., Boulillard, Ph., and Massart, J., "Investigation of the Influence of Design and Material Parameters in the Progressive Collapse Analysis of RC Structures", *Engineering Structures*, Vol. 33, 2011, pp. 2805-2820.
4. Kim, J. An D., "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 18, 2009, pp. 455-465.
5. Mohamed, A., "Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 31, 2009, pp. 749-757.
6. Tsai, H. and Lin, H., "Dynamic Amplification Factor for Progressive Collapse Resistance Analysis of an RC Building", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 18, 2009, pp. 539-557.
7. Zukas, A., Introduction to Hydrocodes, Elsevier, UK, 2004, pp. 313.
8. Jayasooriya, R., Thambiratnam, P., Perera, J., and Kosse, V., "Blast and Residual Capacity Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 33, 2011, pp. 3483-3495.
9. Kelliher, D. and Sutton-Swaby, K., "Stochastic Representation of Blast Load Damage in a Reinforced Concrete Buildings", *Structural Safety*, Vol. 34, 2012, pp. 407-417.
10. Luccioni, M., Ambrosini, D., and Danesi, F., "Analysis of Building Collapse under Blast Loads", *Engineering Structures*, Vol. 26, 2004, pp. 63-71.
11. Shi, Y., Li, X., and Hao, H., "A New Method for Progressive Collapse Analysis of RC Frame under Blast Loading", *Engineering Structures*, Vol. 32, 2010, pp. 1691-1703.
12. Kim, H. S. and Park, J. P., "An Evaluation of Blast Resistance Performance of RC Columns According to the Shape of Cross Section", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 387-394.
13. Kim, H. S. and Lee, J. Y., "An Evaluation of Blast Resistance Performance of RC Columns by Using P-M Interaction Diagram", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 10, 2011, pp. 47-54.
14. Fairlie, G., "Efficient Analysis of High Explosive Air Blast

- in Complex Urban Geometries Using the AUTODYN-2D & 3D Hydrocodes”, Analytical and Experimental Methods, Proceedings of the 15th Int. Symposium on the Military aspects of Blast and Shock, Banff, Canada, 1997.
15. Fairlie, G., “The Numerical Simulation of High Explosives using AUTODYN-2D & 3D, Proceedings of the Explo ‘98”, Institute of Explosive Engineers 4th Biannual Symposium, 1998.
 16. Zhao, F., Chen, Y., Wang, Y., and Lu, J., “Damage Mechanism and Response of Reinforced Concrete Containment Structure under Internal Blast Loading”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 61, 2012, pp. 12-20.
 17. Deng, G., “Research on Internal explosive Loadings and Blast Resistant Characteristics of Discrete Multi-layered Explosion Containment Vessels”, *Journal of Pressure Equipment and Systems*, Vol. 6, 2008, pp. 217-224.
 18. Clutter, K., Mathis, T., and Stahl, W., “Modeling Environmental Effects in the Simulation of Explosion Events”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, 2007, pp. 973-989.
 19. Zheng, Y., Deng, G., Chen, Y., Sun, G., Hu, Y., Zhao, L., and Li, Q., “Experimental Investigation of Discrete Multilayered Vessels under Internal Explosion”, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 42, 2006, pp. 617-622.
 20. Kim, H. S., Ahn, H. S., and Ahn, J. G., “Erosion Criteria for the Blast Analysis of Reinforcement Concrete Members”, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 30, No. 3, 2014, pp. 21-28.
 21. Cho, H. B., Kim, J. J., Lee, J. H., Shin, J. K., Jeong, Y., and Kim, G. Y., “Evaluation on the Blast-Resistant Performance of Fiber Reinforced Concrete Box Structures by Contact Explosion and Pressure”, *Journal of 2013 Spring Conference of Korea Concrete Institute*, 2013, pp. 369-370.
 22. Kinney, G. and Graham, K., *Explosive Shocks in Air*, U.S, 1985, pp. 137.
 23. Mays, G. and Smith, P., *Blast Effect on Buildings*, UK, 1995, pp. 40.
 24. DoD, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02)*, U.S Department of Defense, 2008.
 25. Smith, P.D., Hetherington J G, *Blast and ballistic loading of structure*, Laxton's, Great Britain, 1994, pp. 336.

요 약 본 논문에서는 철근콘크리트 코어 구조물의 내부폭발 효과를 폭발이나 충격해석에 특화되어 있는 하이드로코드인 Ansys Autodyn을 이용하여 조사하였다. 내부폭발의 경우 폭발하중의 반사효과로 인해 더욱 큰 파괴를 일으킬 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 UFC 3-340-02 를 사용하여 내부 폭발현상을 입증하였다. 추가적으로 Autodyn을 사용한 해석에 관하여 UFC에서 예제로 제시하는 폭발하중의 반사에 관한 실험 결과를 비교하여 Autodyn이 내부폭발 효과를 해석하는데 적합함을 증명하였다. 나아가, 초고충빌딩에서 가장 중요한 부분 중의 하나의 코어 구조의 붕괴메커니즘을 Autodyn을 사용하여 해석하였다. 내부폭발이 코어에 충격을 가할 때, 코어는 모서리와 폭발 정면 부분이 대부분 피해를 입었다. 그러므로, 코어 벽체가 피해를 입게 된다면 코어 구조물의 연쇄붕괴가 발생할 수 있다.

핵심용어 : 내부 폭발 해석, 철근콘크리트 코어 구조, 연쇄붕괴, 오토딘