

기둥 단면의 형상 변화에 따른 폭발 저항 성능 해석

An Analysis of Blast Resistance Performance According to the Shape of Column Section

박재표* · 김한수**

Park, Jae-Pyo · Kim Han-Soo

요약

본 논문에서는 비선형 동적 해석 프로그램인 AUTODYN을 이용해 기둥의 단면 형상의 변화에 따른 폭발 하중의 영향을 분석하였다. 먼저 폭발하중 산정의 타당성을 확인하기 위해 AUTODYN을 이용한 예제 해석을 수행하였으며, 폭발하중에 의한 영향을 가장 효율적으로 확인할 수 있는 인자인 압력을 비교하였다. 이를 토대로 기둥 형상에 따른 폭발 저항 성능을 평가하기 위해 같은 단면적과 높이를 갖는 정사각형과 원형 기둥을 모델링 한 후 TNT의 양에 따른 폭발전후의 부피를 비교하였다.

해석결과를 비교해보면 정사각형기둥이 원형기둥보다 폭발에 대한 손상정도는 더 크지만 기둥이 절단되지 않도록 하는 저항능력이 더 우수한 것을 확인할 수 있었다. 비록 철근의 영향을 고려하지 않았지만, 이와 같은 결과를 통해 TNT의 양에 따른 기본적인 폭발거동과 대테러 설계를 위한 기둥 단면 선택시 기초적인 자료로 활용가능 할 것으로 사료된다.

keywords : 폭발하중, TNT, ID-wedge, Mohr-Coulomb 모델, 단면형상

1. 서론

테러와 같은 인위적인 폭발에 의한 사고와 그 피해는 갈수록 증가하고 있지만, 과거 폭발에 관한 연구는 국가안보 및 보안상의 이유로 매우 제한적인 환경에서 수행되었다. 하지만 1995년에 차량 공격에 의해 발생한 미국 오클라호마시 Murrah Federal Building의 붕괴를 시발점으로 2001년 9월 11일에 발생한 뉴욕 세계 무역센터의 붕괴는 폭발에 대한 경각심을 고조시키는 계기가 되었다. 폭발이 발생할 경우 구조물이 붕괴되지 않도록 주요 부재가 폭발저항성을 갖도록 설계하거나 주요부재의 손실에 대비한 대체하중경로를 갖도록 설계되어야 한다. 본 논문에서는 비선형 동적 해석프로그램인 AUTODYN을 이용해 폭발이 구조물에 미치는 하중을 산정하고, 예제의 재현을 통해 그 타당성을 입증한 후 같은 단면적과 높이를 갖는 콘크리트 기둥의 단면 형상을 변화시키면서 각각의 폭발 저항 성능을 비교하고자 한다. 단, 이번 논문에서는 철근이 콘크리트에 미치는 영향을 배제하여 순수한 콘크리트만을 고려하였다.

2. 폭발하중의 산정

* 학생회원 · 건국대학교 건축공학과 석사과정 growing1983@naver.com

** 정회원 · 건국대학교 건축공학과 교수 hskim@konkuk.ac.kr

2.1. 폭발하중의 모델링

폭발이 갖는 특성을 정의하고, 올바른 하중을 산정하기 위해 기존에 발표된 논문 중 AUTODYN을 이용한 예제(Fairlie, 1997; Fairlie, 1998)를 재현하였다. 예제는 그림 1과 같은 평면을 가지고 있으며, 해석 시간을 단축시키기 위해 대칭모드를 이용해 사각형으로 표시한 1/4만 모델링하였다. 그림 1에 표시된 콘크리트 블록과 빌딩은 모두 표면에서 폭발파를 완전 반사하는 것으로 가정(Luccioni와 Ambrosini, 2005)하였다. 또한 정확한 폭발파를 계산하기 위해 그림 2와 같은 1D-Wedge를 만들어 미리 압력파를 산정하고, 이를 2D 혹은 3D에 맵핑을 하는 방법(Quan, 2005)을 사용하였다. 1D-Wedge에 사용된 공기의 내부에너지는 206800 kJ/kg로 입력하고, 최대 도달거리는 폭발의 중심으로부터 가장 가까운 건물-처음 반사가 일어나는 지점-까지의 거리인 120mm로 하고, 8g의 TNT에 상응하는 크기를 입력하였다. TNT입력 과정에서 주의해야 할 점은 AUTODYN-2D의 축모드를 이용해 평면상으로 모델링 할 경우에는 구형 폭발(spherical blast)을 모사할 수 없고, 반구형 폭발(hemispherical blast)만 가능하다.

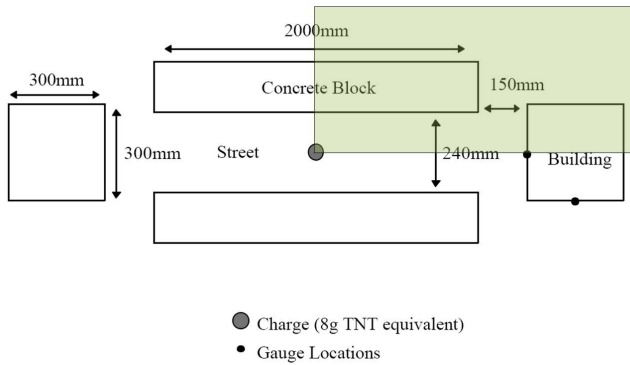


그림 1 폭발 예제에 사용된 평면

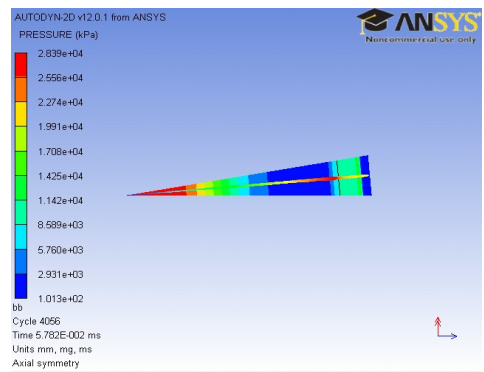


그림 2 1D-Wedge를 이용한 압력파 계산

2.2. 폭발하중에 의한 최대압력 결과 비교

우선 그림 1의 평면을 2D와 3D에 모델링 한 후 1D-Wedge로 미리 계산된 압력파를 각각 맵핑을 한다. 그림 3은 AUTODYN-3D에서 맵핑을 한 후 폭발 시작으로부터 3ms가 경과된 시점을 나타낸 것이다. 압력파의 양상을 측정하는 지점(Gauge Location)을 건물의 정면과 옆면에 설치하였고 이를 그림 1에서 확인할 수 있다.

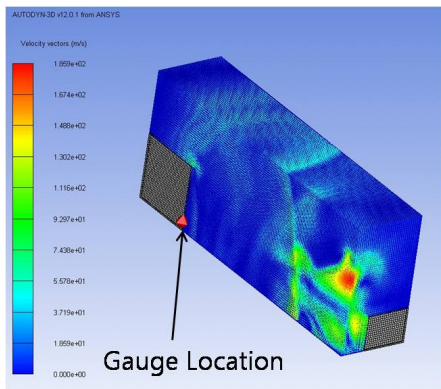


그림 3 AUTODYN-3D 모델링 - Pressure Contour (t = 3ms)

표 1 비교값과 해석값의 최대과다압력 비교

Gauge Location		Front(kPa)	Side(kPa)
Autodyn-2D	비교값	374.9	28.0
	해석값	360.1	27.0
	오차율(%)	3.1	0.7
Autodyn-3D	비교값	242.9	23.3
	해석값	246.2	22.6
	오차율(%)	0.9	0.5

각 지점에서의 과다압력(Overpressure)을 측정된 결과는 표 1에 나타냈으며, 약 0.5 ~ 3.1 %의 오차율을 보이고 있다. 이러한 오차는 요소망의 크기와 1-D Wedge로 압력파를 계산하는 과정에서 발생하고, 이는 CFD 해석에서 충분히 수용할만한 범위내의 오차라고 할 수 있다. 오차율을 구하기 위해서는 전체압력을 사용해야 되므로 과다압력에 대기압 101.3kPa를 더한 값을 사용하여 계산하였다.

3. 기둥의 단면 변화를 고려한 예제해석

3.1 해석모델

해석에 사용된 기둥 단면의 형상은 단면적이 같은 정사각형과 원형을 사용하였다. 입력된 정사각형 단면의 크기는 400mm x 400mm이고, 원형단면은 반지름이 228mm이며, 높이는 3000mm로 동일하다. 원형의 단면적이 다소 큰 것은 단면 크기를 결정함과 동시에 요소망의 개수를 결정하는 AUTODYN의 특성을 보정하기 위함이다. 그림 4와 같이 폭발의 중심으로부터 기둥의 중심까지의 거리는 3m이고, 폭발에 의한 압력파를 미리 계산하여 입력하였고 반구형 폭발(Hemispherical blast)을 적용하였다. 기둥의 경계 조건은 하부만 고정지지 되고, 지면에서는 완전 반사가 일어나는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 공기는 오일러-FCT 솔버, 콘크리트는 라그랑지 솔버를 사용하였고 각각 243,000개의 셀과 30,000개의 요소를 사용하였다. 그리고 해석의 효율성을 위해 축대칭 모드를 이용해 1/2만 모델링하였다.

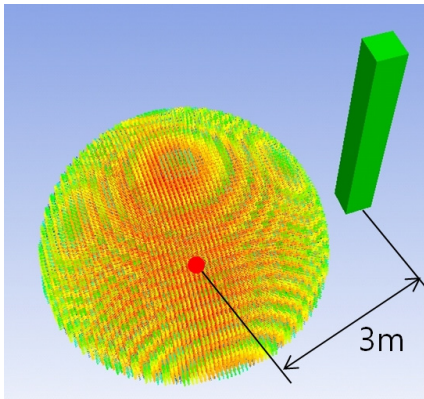


그림 4 기둥의 폭발저항성능해석에 사용된 모델 (정사각형단면)

콘크리트는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고 물성치는 압축시험을 통해 얻어진 수치를 사용하였으며 압축강도는 35MPa이다.(우진호 등, 2009) Mohr-Coulomb 모델은 압력의 증가에 따라 재료의 강성이 커지고 인장과 압축의 항복강도 차이가 큰 재료에 적합하다.

3.2 해석결과

폭발저항성능을 평가하기 위해서 폭발하중의 진행시간에 따라 손상되지 않은 부피를 폭발 전의 전체 부피로 나눈 값을 백분율로 나타낸 부피비(Volume ratio, 이하 부피비)를 비교하였다. 또한 기둥이 축력을 전달할 수 있는 최소한의 능력을 평가하기 위해 요소망의 분리가 일어나는 절단을 평가하였다. 절단의 의미는 임의의 평면에 있는 모든 요소가 파괴되었음을 가리킨다. 그림 5는 TNT양과 단면형상에 따른 기둥의 누적 부피비와 절단되는 시간을 나타낸 그래프이다. 같은 양의 TNT가 폭발했을 경우, 원형 단면이 정사각형 단면보다 부피비의 감소는 적지만 단면의 절단이 더 빠른 시각에 발생했다. TNT 20kg이 폭발했을 경우 절단을 무시한 부피비는 정사각형 기둥과 원형 기둥이 각각 91.7%와 94.3%를 나타냈고, 정사각형 기둥은 절단이 되지 않은데 반해 원형 기둥은 4.42ms가 경과한 시점에 절단이 발생했다. 그리고 TNT 100kg이 폭발했을 경우 정사각형 기둥과 원형 기둥이 각각 68.4%와 83.7%의 부피비 감소를 가져오고, 각각 5.5ms와 2.3ms가 경과했을 때 기둥이 절단되었다. 이를 통해 폭발에 의한 손상은 원형 단면이 정사각형 단면보다 더 적지만, 파괴가 분산되지 않고 한 곳에 집중되었음을 알 수 있다. 그림 6은 TNT 20kg이 폭발할 경우 4.2ms가 경과한 시점에서 정사각형 기둥과 원형 기둥의 손상 정도를 비교한 것이다. 정사각형 기둥이 원형 기둥보다 폭발에 의한 손상이 더 크지만, 손상의 밀집된 정도가 한 곳에 집중되지 않고 산개되어 있음을 확인할 수 있다.

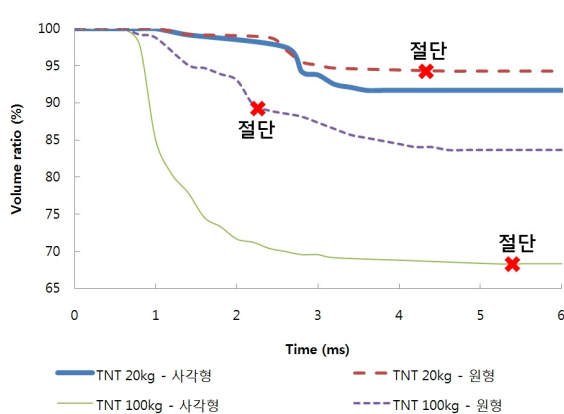


그림 5 TNT양과 단면형상에 따른 부피비 비교

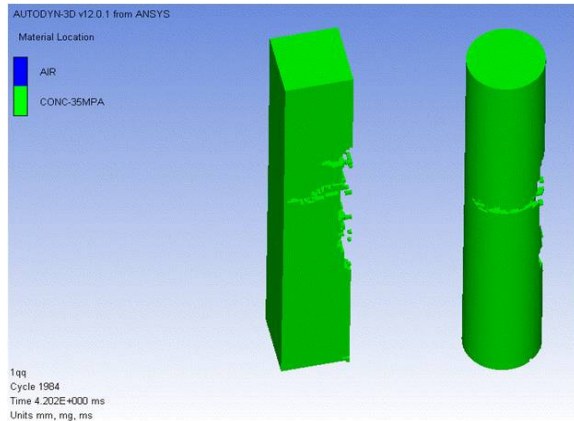


그림 6 t=4.2ms일 때 Fragment plot 비교 (TNT20kg)

4. 결론

기둥의 단면 형상에 따른 폭발의 저항 성능을 평가하기 위해 같은 단면적과 높이를 갖는 정사각형 기둥과 원형 기둥을 비교하였다. 예제에 사용된 두 가지 형상의 기둥은 모두 20kg 정도의 TNT가 3m 거리에서 폭발할 경우 거의 붕괴되는 것으로 나타났다. 정사각형 기둥은 원형 기둥에 비해 폭발에 의해 손상되는 부분이 많았지만 손상이 한 곳에 집중되지 않고 분산된 파괴 양상을 보였다. 그 결과 폭발 경과시간에 따른 부피비의 감소는 정사각형 기둥이 더 컸지만, 단면의 절단은 원형 기둥이 더 빠른 시각에 발생한 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2010년도 첨단도시개발사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 우진호 나원배 김헌태 (2009) 아치형 해저 케이블 보호 구조물의 앵커 충돌 수치 시뮬레이션, **한국해양공학회지**, 제23권 제1호 pp 96-103
- Bibiana Luccioni, Daniel Ambrosini Blast (2005) Blast Load Assessment Using Hydrocodes, *Mecanica Computacional*, Vol.XXIV, pp 329-344
- G E Fairlie (1997) Efficient Analysis of High Explosive Air Blast in Complex Urban Geometries Using the AUTODYN-2D & 3D Hydrocodes, Analytical and Experimental Methods, *15th International Symposium on the Military Applications of Blast and Shock*, Century Dynamics. Inc
- G E Fairlie (1998) The Numerical Simulation of High Explosives using AUTODYN-2D & 3D, *Institute of Explosive Engineers 4th Biannual Symposium*, Century Dynamics. Inc
- Xiangyang Quan (2005) Applications of a Coupled Multi-Solver Approach in Evaluating Damage of Reinforced Concrete Walls From Shock and Impact, *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Century Dynamics. Inc, pp 2537-2547