

폭압하중을 받는 구조물의 해석기법

Introduction of Structural Analysis Subjected Blast Pressure



손진*

* Software Developer, Ph.D, MSC Software Corporation

1. 서론

최근 전 세계적으로 민간인들 그리고 비군사 구조물에 대한 무차별적인 테러가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 이유로 지금까지는 일반적으로 폭발이나 폭압에 대한 구조물 해석이나 설계가 방공호 등의 군사적인 구조물에 대해서 이루어졌지만 교량, 건물 등의 일반적인 토목 및 건축 구조물에도 이러한 폭압하중에 대한 해석 및 설계의 필요성이 꾸준히 늘어나고 있다. 일반적인 군사 구조물과 달리 대형 교량, 댐, 고층 건물과 같은 중요 토목 및 건축 구조물의 손상 혹은 붕괴는 인명 피해뿐만 아니라 지역 아닌 국가 전체의 경제적 사회적인 재앙을 불러 올 수도 있다.

폭압하중은 지금까지의 구조물에 고려되어진 정적 또는 상대적으로 느린 속도의 동적하중 문제와 달리 극히 짧은 시간에 상대적으로 매우 큰 하중이 상대적으로 좁은 범위에 적용되는 형태로 기존의 해석방법으로는 정확한 거동을 찾기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 재료의 특성 또한 이러한 형태의 하중에 대해서는 앞서 나열한 일반적인 하중하에서 보이는 특성과는 일치하지 않는다. 비록 모든 일반 구조물에 대해 폭압해석 및 설계를 하는 것은 현실적으로 필요하지 않지만 그 지역의 주요 구조물에 대해서는 폭압하중에 관한 구조물의 거동을 정확하게 판단하고 그 거동을 바탕

으로 구조물의 손상과 붕괴를 막기 위한 설계가 필요하다고 하겠다.

본 기사에서는 구조물의 설계에 앞서 폭압하중이 가지는 독특한 특성, 이러한 폭압하중에 대해 필히 고려해야 하는 재료의 특성 및 폭압하중을 받고 있는 구조물의 해석기법에 관하여 소개하였다.

2. 폭압하중의 특성(Characteristics of blast pressure)

핵융합 및 핵폭발을 제외한 일반적인 폭발의 형태는 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫번째 폭발형태로 압축 공기에 의한 폭발(blast of compressed gas)을 들 수 있다. 주유소나 프로판(propane) 가스 폭발이 대표적인 예라고 할 수 있는데 휘발성이 강한 액체나 기체 혼합물에 충격이 가해져서 생기는 폭발이다. 두번째는 저성능 폭약(low explosive) 폭발이다. 소총이나 대포 등에 사용되는 폭발형태로 흑색 화약(black powder) 등의 폭발과정이 상대적으로 느리고 폭압이 낮은 폭발이다. 마지막으로 고성능 폭약(high explosive) 폭발이다. TNT나 C4 등의 형태로 분류되는데, 폭발과정이 매우 빠르고 폭압 또한 높은 폭발이다. 이 기사에서는 세번째 고성능 폭약의 폭압하중에 대해 기술하였다.

Baker¹⁾를 비롯한 많은 학자들이 폭발(detonation)에 대해 급속한 에너지 방출과정(a rapid energy release process) 이라고 정의하고 있다. 폭발 직후 폭발파동(detonation wave)이 발생하고, 이 폭발파동이 공기 혹은 다른 매질로 전파되면서 폭발파동(blast wave)으로 바뀌게 된다. 이 폭발파동은 공기라는 매질에서 그림 1의 점선과 같은 형태를 보이게 된다. 폭발(detonation) 뒤 도착 시간(T_0)이 지난 후 최대 초기 압력(incipient maximum pressure, P_i)에 도달하고 그리고 (+)지속 시간(positive phase, T_1) 동안 기압(P_0)보다 높은 압력을 보이다 (-)지속 시간(negative phase, T_2) 동안 기압보다 낮은 압력을 보이다 원래 기압으로 돌아가게 된다. 이러한 폭발파동에 의한 압력은 구조물과 같이 매질이 차단되는 곳에서 크게 증폭되는데 파동이 전방으로 나아가지 못하지만 후방에서는 앞으로 계속 나아가므로 공기의 밀도와 압력이 증가되기 때문이다. 그림 1의 실선과 같이 형태는 공기 중의 폭발하중과 비슷하지만 최대 반사 압력(reflect maximum pressure, P_r)은 최대 초기 압력보다 크다. 실제 구조물에는 점선의 초기 압력에 의한 하중이 아니라 반사 압력에 의한 하중에 대해서 해석을 수행하여야 한다.

폭압하중의 크기를 비교하는 방법으로 Hopkinson과 Cranz^{2),3)}이 소개한 환산거리(scaled distance)가 많이 사용되는데 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (1)$$

여기서 Z 는 환산거리, R 은 폭발물에서 폭발 측정지점까지의 거리 그리고 W_{TNT} 는 폭발물의 질량을 TNT와 동등하

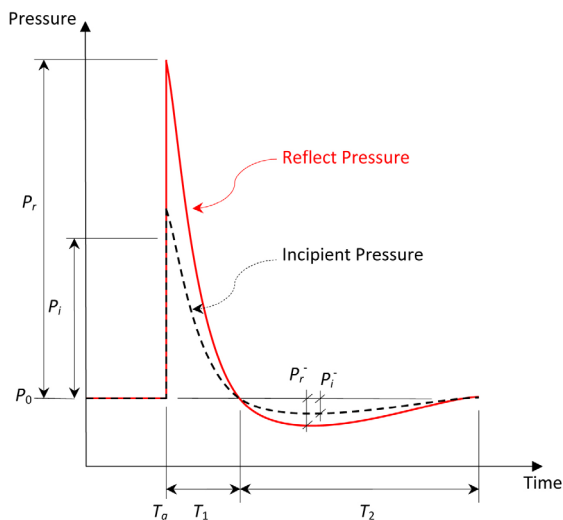


그림 1 Blast profile

게 치환한 TNT 동등 질량이다. 만약 환산 거리가 같다면 폭발의 크기가 같다고 말할 수 있으며, 폭발물의 질량을 1/8만큼 불이는 효과와 폭발물과의 거리를 2배로 늘리는 것은 효과가 같다고 할 수 있다. 여러 나라에서 주요 구조물 주위를 공원화시켜서 대형 차량들의 접근을 막는 것은 이와 같은 효과를 구현하려는 목적도 있다고 할 수 있다.

3. 폭압하중을 받는 재료의 특성

폭압을 받는 구조물에 대해 해석이나 설계 시에 일반 하중 조건 하의 해석과 설계와 달리 재료의 특성 중 한가지 더 고려할 필요가 있다. 재료의 변형속도(strain rate)에 따라 재료의 특성이 달라진다고 알려져 있고, 표 1에서는 하중의 종류와 재료의 변형에 관한 상관관계를 소개하였다. 탄성계수는 재료의 변형 속도에 의해 바뀌지 않으나 항복응력(yield stress)이나 극한 응력(ultimate stress)은 재료의 변형 속도에 따라서 일반적으로 증가되어 진다고 알려져 있다. 대표적인 방법으로 Cowper-Symonds 공식⁴⁾, Johnson-Cook 공식⁵⁾ 등이 있는데, 여기서는 간단하게 일반 구조물에 사용되어지는 철강과 콘크리트에 대해서 어떻게 적용하는지에 대해 소개하겠다.

식 (2)는 일반적으로 Cowper-Symonds 공식이라고 많이 알려져 있는데, f_{yd} 는 빠른 변형속도를 받고 있는 재료의 수정되어 항복 및 극한 응력, 그리고 f_y 는 일반적인 조건의 항복 및 극한 응력이다. 일반적으로 저강도의 철강에 대해서는 C와 q의 값에 대해 각각 40.4와 5가 사용되고⁴⁾, 고강도 철강에 대해서는 각각 3200과 5가 사용된다.⁶⁾

$$\frac{f_{yd}}{f_y} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/q} \quad (2)$$

콘크리트의 경우에는 CEB-FIP⁷⁾에서 소개한 식 (3)이 많이 사용되는데, 여기서 f_{cd} 와 f_c 는 각각 빠른 변형속도를 받고 있는 콘크리트의 압축 강도와 일반 하중조건에서의 압축 강도이다.

$$\begin{aligned} f_{cd} / f_c &= \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1.026\alpha} && \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ sec}^{-1} \\ &= \mu \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1/3} && \text{for } \dot{\epsilon} > 30 \text{ sec}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\log \mu = 6.156 a - 2$$

$$a = 1 / (5 + 9 f_c / f_{co})$$

$$\dot{\epsilon}_s = \text{static strain rate} (= 10^{-3})$$

표 1 Dynamic modes of loading versus the strain rate⁶⁾

Strain rate	$< 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{1.5}$	$10^{1.5} \sim 10^4$	$> 10^4$
Dynamic loading mode	Creep	Static or Quasi-static	Dynamic	Impact	Hyper velocity impact
Examples	Constant loading machine	Dead or live loading	Impulse pressure effects on high-speed craft, wave breaking loads	Explosion, vehicle collision	Bombing

비록 인장강도에 대해서는 다른 공식을 사용하고 위의 식을 여러 실험과 비교하여 수정한 공식들이 있지만 지면 관계상 생략하였다.

4. 폭발하중을 받는 구조물의 해석기법

폭압하중을 받는 구조물의 해석방법을 일반적으로 Explicit 구조해석 프로그램이 많이 사용되고 있는데, 일반적인 Implicit 구조해석 프로그램과 달리 전 단계의 결과만을 이용해서 다음 단계의 결과를 찾아내는 방법으로 수렴 (convergence)에 대한 검사와 순환 계산(iteration)이 필요없지만 안정성(stability)을 확보를 위해 각 단계의 조건의 변화 (step size)가 매우 적다. 그래서 일반적으로 매우 짧은 시간에 큰 변형이 발생하는 충돌, 폭발 등의 해석을 수행하는데 많이 사용된다.

폭압을 구조물에 적용하는 방법으로는 크게 두가지 방법이 있다. 기존의 여러 실험식을 바탕으로 하여 구조물에 직접 도달하는 폭발의 형태를 구하여 직접 입력하는 방법과

공기와 폭발물을 직접 구현하여 유체와 구조물의 상관관계 (FSI: Fluid structural interaction)를 이용하여 해석하는 방법이 있다.

첫번째 방법에서 폭발의 형태와 크기는 Conwep⁹⁾ (Conventional Weapons Proliferation) 등의 프로그램을 이용해서 쉽게 구할 수 있는데, 이러한 프로그램 등은 일반적으로 특수한 조건하에서 제공받을 수 있다. 비록 직접 이러한 프로그램을 사용하지 못하더라도 기존의 학술지나 학회지를 통해 이미 소개되어진 공식을 사용하여 폭발을 산정하기 때문에 같은 형태의 폭발을 계산하기 쉬운 뿐만 아니라 기존의 많은 Explicit 프로그램에서 특별한 계산과정없이 폭발물의 크기와 위치만을 산정하여 각 구조물의 표면에 하중을 가할 수 있는 방법을 제공하고 있다.^{10,11)} 비록 폭발을 산정하는 방법이 간단하여 계산속도는 빠르지만 폭발을 계산하는 공식이 이상적인 환경에서 산정하였기 때문에 구조물이 매우 넓은 평면형태이며, 구조물의 수직방향이 폭발물의 방향과 일치해야 하고 구조물 주위에 다른 형태의 또다른 구조물이 존재하지 않아서 폭발 파동의 반사에 의

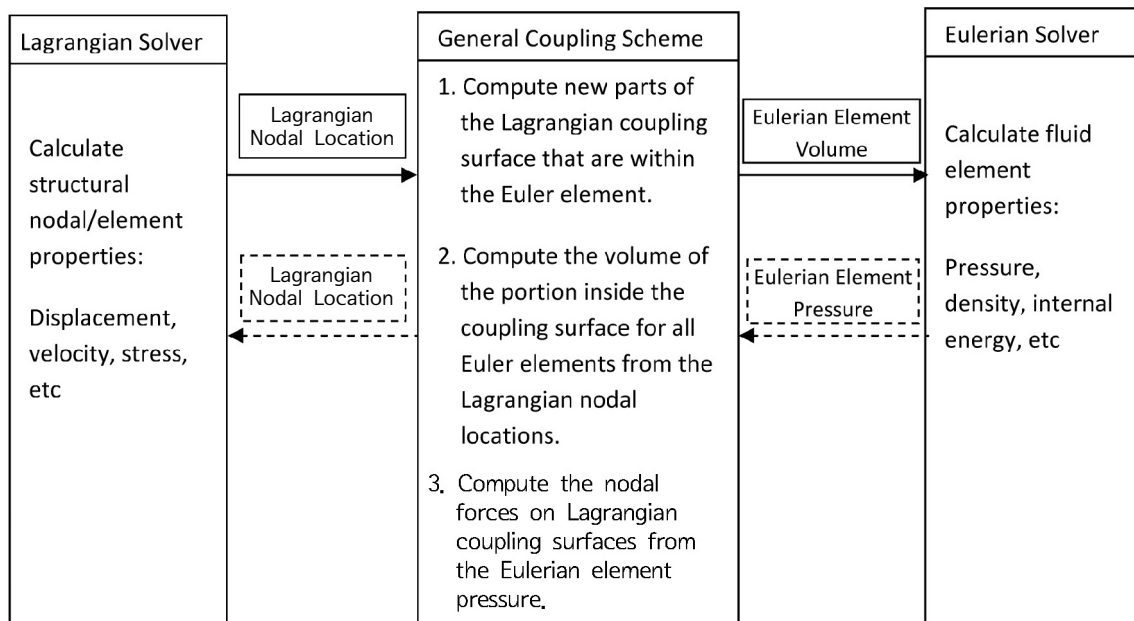


그림 2 General Coupling Scheme¹³⁾

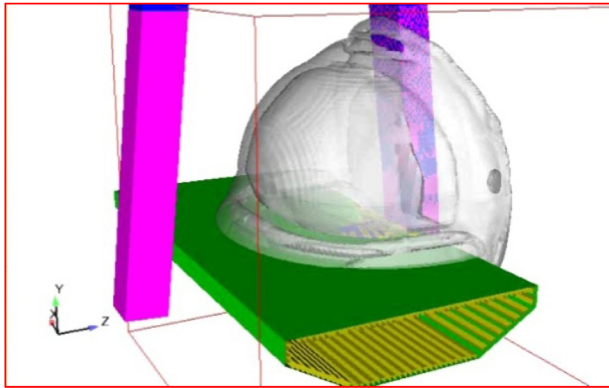


그림 3 Blast wave hits on pylon of cable stayed bridge [14]

한 간섭이 없어야 한다. 뿐만 아니라 매질 자체가 공기에만 적용되기 때문에 수중폭발 등에는 또 다른 접근 방법이 필요하다.¹²⁾ 또한 폭압 공식이 비록 이론적인 바탕으로 만들어 졌지만 많은 실험을 통해서 접근하였으므로 실험결과를 얻을 수 없는 매우 거리가 가까운 폭압에 대해서는 정확성이 떨어진다고 할 수 있다.

두번째 FSI를 이용한 해석방법은 첫번째의 방법에 비해 유체에서 직접 폭압을 계산하기 때문에 시간이 상대적으로 오래 걸리지만 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 폭발물과 공기를 형상화하는 방법으로 세가지 방법, ALE, General Coupling과 Particle method를 들 수 있는데, 지면 관계상 자세한 설명은 생략하겠다.¹³⁾ 그 중 General Coupling의 계산 과정을 간단하게 그림 2에서 설명하였고, 해석결과 중 한 장면을 그림 3에 첨부하였다. 두번째 접근방법은 폭압을 직접 계산하는 과정을 거치기 때문에 첫번째 방법에서의 제약은 없으나 해석시간이 상대적으로 오래걸리고 성능이 뛰어나 컴퓨터를 요구한다.

일반적으로 많은 방폭해석 및 설계에서는 앞에서 설명한 두가지 방법을 병행하여서 구조물의 안정성을 평가하고 있다.


5. 결 론

이상 폭압하중 및 재료의 특성 그리고 폭압하중을 받는 구조물에 대한 해석방법에 대해서 간단하게 기술하였다. 폭압하중은 일반적인 구조물 해석에 사용하는 하중의 형태와 상당히 다른 만큼 일반적인 해석방법, 재료의 특성 등을 고려해야지만 더 정확한 값을 얻을 수 있다고 하겠다.

폭압의 산정이나 구조물의 안정성에 고려해야 하는 폭발물의 크기 산정 등의 많은 문제들이 현재도 계속 연구되고 있으며, 구조물의 해석을 통해서 어떻게 설계할 것인가 등의 접근 방법에 대한 많은 연구자료들이 학회지나 학술지에 개

제되고 있다. 비록 이와 관련한 연구가 계속 진행중이지만 분단국가라는 특수 상황에서 국가의 주요 구조물에 대해서는 폭압하중에 대한 해석과 평가가 분명히 필요하다고 하겠다.

참고문헌

1. Baker, W.E., Explosions in Air, University of Texas Press, 1973
2. Hopkinson B, UK Ordnance Board Minutes 13565, 1915.
3. Cranz C, Lehrbuch der Ballistik, Springer-Verlag, Berlin, 1916.
4. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams, Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
5. Johnson, G.R. and W.H. Cook, A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, 7th International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, April 1983.
6. Paik J.K. and Thayamballi, A.K., Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley&Sons.LTD, 2003
7. 1993 CEB-FIP model code 1990. Comité Euro-international du Béton. Trow-bridge, Wiltshire, UK: Redwood books.
8. Malvar, L. J. and Crawford, J. E. Dynamic increase factors for concrete. Twenty-Eighth DDES Seminar, Orlando, FL, USA 1998
9. U.S. Department of the Army Technical Manual, TM 5-855-1 Fundamentals of Protection Design for Conventional Weapon, Department of the Army, Navy and Air Force, 1986
10. LS-Dyna keyword User's Manual, Livermore Software Technology Cooperation, May 2007
11. MSC Nastran Quick Reference Guide, MSC. Software Corporation, 2012
12. USA+ Keyword User's Manual, Release 6.21, Anteon Cooperation, Mystic CT, November 2003
13. Son, J. and Astaneh-Asl, A. Blast Resistance of Steel Orthotropic Bridge Decks, J. Bridge Eng., 17(4), 589-59, 2012
14. Son, J. and Lee, H.J., Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading, Engineering Structures, 33(4), 1133-1148, 2011 

[담당 : 조정래, 편집위원]