

폭발하중의 해석에 대한 고찰

Overview of Blast Load Analysis



강 현 구*



정 연 옥**



홍 정 옥***

* 서울대학교 건축학과 교수
 ** KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정
 *** KAIST 건설 및 환경공학과 교수

1. 서 론

최근 중동지역에서 차량 및 자살테러 소식을 쉽게 접할 수 있다. 이제는 테러가 발생했다는 뉴스에 대해서 둔감할 정도이다. 이러한 테러는 사회적으로 많은 파장을 불러왔으며, 여러 나라에서는 테러 위협으로부터 피해를 최소화하기 위한 구조물에 대한 방호설계를 계속 연구 중이다.

방호설계 연구에 앞서, 구조물에 예상 가능한 위협의 종류 혹은 수준을 객관적인 위협평가 과정을 통해 선정하고, 선정된 위협에 의한 하중의 효과와 이것이 구조물에 작용하였을 때 구조물의 거동을 파악하는 것이 필요할 것이다. 하중의 효과와 구조물의 거동을 파악할 때 가장 신뢰성이 있는 방법은 많은 데이터를 축적하고 분석할 수 있는 실험을 반복적으로 수행하여 충분한 정보를 얻는 것이다. 하지만 이러한 방법은 시간과 비용의 측면에서 많은 제약이 따른다. 이에 대한 대안으로 컴퓨터를 활용한 수치해석을 활용하는데, 특히 컴퓨터 성능의 발달로 대용량의 시뮬레이션을 수행할 수 있게 되어, 그 해석범위는 점점 확장되고 있다.

본 기사에서는 과거에 발생한 주요 테러와 폭발하중을 중심으로 한 해석기법에 대해서 살펴본다. 또한 이러한 기

법들의 적절한 적용방법과 효과적인 폭발하중 해석기법에 대한 연구 방향을 제시한다.

2. 테러 위협의 증가 및 방호 연구

2.1 최근 테러 양상

미국에 큰 충격을 가져온 차량폭탄테러의 시작은 1983년 레바논 베이루트 주재 미 대사관 폭파사건이다. 1983년 4월 18일 약 2,000파운드의 폭발물을 적재한 차량이 대사관으로 돌진하여 63명이 사망하였고, 7층짜리 대사관 건물의 일부가 붕괴되었다. 이 사건은 미국 대사관에 대한 테러 중 가장 많은 희생자를 낸 사건이다. 1995년 4월 19일에는 미국 오클라호마 시의 연방정부청사에서 위와 유사한 차량을 이용한 테러로 건물이 붕괴되고, 사망자 168명, 부상자 680명의 인명피해가 있었으며, 반경 16블록에 해당하는 건물의 손상 등으로 직접적 피해 비용만 6.8억 달러로 보고된다(그림 1 참조). 1988년에도 차량을 이용한 케냐와 탄자니아의 주재 미 대사관에 대한 폭탄테러가 발생하는데 223명이 사망하고 4,000여명 이상이 부상을 당한다. 이렇게 차량을 주로 이용한 테러가 진행되던 가운데 전 세계를 경악하게



그림 1 미국 오클라호마 시(市) 연방정부청사 테러 사진

한 테러가 2001년 9월 11일 미국의 중심부 뉴욕에서 발생한 9.11 테러 사건이다. 비행기를 이용한 이 테러는 세계 무역센터 건물을 붕괴시키고 현장에서 3,000여명의 사망자를 발생시켰으며 아프가니스탄 전쟁의 계기가 되었다.

국가정보원 산하 테러정보통합센터(TIIC)의 자료에 따르면 2003년 세계에서 발생한 테러는 744건인데 반해 2005년 1,896건, 2008년 3,215건, 2012년 현재 3,303건으로 밝히고 있으며, 2012년 5월에서 11월 사이 자행된 테러를 살펴보면 총 2,039건 중 1,083건이 폭발물을 무기로 사용하였다. 또한 동기간 테러대상을 살펴보면 총 2,039건 중 997건이 민간인이 사용하는 시설에 집중되어 다중이용시설 등의 폭발물에 대한 방호설계 기준에 대한 사회적 요구가 증가하고 있다.

2.2 테러양상에 따른 방호기준 발전

2차 세계대전 이후 군의 생존성 보장을 위하여 미국에서는 TNT를 기준으로 한 실험적 데이터를 구축하고 그에 따른 방호설계 기준을 마련하기 위하여 많은 연구를 수행하였다. 이러한 과정 중 냉전체제가 지속되면서 국가 대 국가의 전면전 보다는 국지적인 전쟁 양상을 보이면서, 특정 집단의 정치적 목적 등을 달성하기 위한 불특정 다수에 대한 테러공격이 또 하나의 전쟁양상으로 등장하게 된다. 이러한 과정에서 군에 적용하고 있던 방호기준과 이에 대한 연구를 민간으로 적용하기 시작하였다.

방호설계 기준 연구 결과를 바탕으로 미국 연방재난관리청(FEMA)에서는 건축물의 테러위험 관리(FEMA-429, *Terrorism Risk Management in Buildings, Primer for Design*, 2002), 건축물 테러공격 경감 참고 매뉴얼(FEMA-426, *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*, 2003), 국토안보를 위한 건축물 디자인(FEMA- E155, L156, *Building Design for Homeland Security* 2009) 등을 발간하였

고, 미 국방부(US D.O.D)에서는 2002년부터 육, 해, 공군의 방호설계 기준을 통합하여 왔으며(Unified Facilities Criteria, UFC) 또한 지속적인 연구와 실험을 통해 테러 위협에 대한 방호시설의 기준을 제시하고 있다. 최근에 공개된 자료에는 폭발저항을 고려한 창호설계(PDC TR-10-02, *Blast Resistant Design Methodology for Window Systems Designed Statically and Dynamically*, 2012), 건축물의 테러방지 최소 국방부 기준(UFC 4-010-01, *DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings*, 2007) 등이 있다.

3. 전산 프로그램을 활용한 폭발하중 해석

앞에서 살펴본 테러방지를 위한 방호기준에 대한 연구가 지속되면서 폭발하중에 대한 분석이 필요하게 되었는데, 가장 신뢰할 수 있는 방법은 실험을 통한 데이터를 확보하여 각종 건축물에 적용하는 것일 수 있다. 하지만 최근에는 다양한 공법, 건축물의 대형화로 많은 경우에 대한 실험을 하기에는 시간, 비용 및 공간적 측면에서 상당한 제약이 있다. 또한 컴퓨터의 발달로 대용량의 시뮬레이션을 수행할 수 있는 바탕이 마련되면서, 전산 프로그램을 활용한 폭발하중 해석이 경제적이고 합리적인 방법으로 많이 활용되고 있다.

특히 유한요소 해석을 통한 프로그램이 많이 개발되었는데 그중에서 널리 사용되는 것 중 하나가 Livermore Software Technology Corporation(LSTC)에서 개발한 LS-DYNA라는 프로그램이다. 이 프로그램은 자동차, 우주선, 구조물, 국방 및 제조업 등 많은 부분에서 널리 사용되며 비선형, 시간적분에 대한 동적 유한요소 해석으로 많은 분야에 사용되고 있다. 이를 활용한 폭발하중 해석에는 크게 2가지 방법이 있는데 과거 미 국방부에서 개발한 ConWep프로그램을 전신으로 하는 *Load_Blast_Enhanced를 사용하여 폭발물로부터 압력을 받는 대상까지의 거리, TNT를 등가로 하는 폭발물 및 4가지 조건(공중폭발, 지면폭발, 지면반사 폭발, 탄

두모사)으로 입사압력 및 반사압력을 해석할 수 있다. 또 다른 방법은 유체해석 중 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) 기법을 통해서 확인할 수 있으며, 이를 통한 Fluid-Structure Interaction(FSI)으로 구조물의 거동 역시 해석할 수 있다.

3.1. ConWep

ConWep 프로그램은 미국 국방부에서 TNT에 대한 실험적 데이터를 정리하여 다양한 조건을 적용하여 입사압력 및 반사압력을 구할 수 있도록 개발한 프로그램이다. LS-DYNA에서는 ConWep 프로그램의 적용을 *Load_Blast_Enhanced (LBE) 를 통해 일부 구현할 수 있으며, TNT의 질량 및 폭발 중심으로부터 구조물까지의 거리로 환산거리(Scaled

Range)를 계산하여 입사압력 및 반사압력을 계산할 수 있다(그림 2, 3 참조).

LBE 명령어를 사용하는 경우에는 대기에서의 폭발효과만 구현가능 하여 공중폭발, 지면폭발, 지면반사를 고려한 공중 폭발 및 탄두(warhead)로 묘사할 수 있으며, 각각의 환산거리는 실험값에 의해 그 범위가 한정되어, 이를 벗어나는 수치의 데이터는 신뢰도가 떨어지게 된다. 또한 실험적 값을 사용하기 때문에 앞으로 소개할 ALE기법에 비해 해석소요가 매우 적어 시간을 단축할 수 있으며, 일반적인 성능의 컴퓨터로도 해석을 쉽게 할 수 있다. 주의할 점은 ConWep의 데이터는 TNT를 기준이므로 다른 폭발물을 적용할 때에는 환산계수를 이용한 TNT 등가량을 확인해야 한다.

3.2 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) 기법

ALE 기법은 라그랑지안 기법과 오일러리안 기법의 단점을 보완하기 위해 각각의 기법들의 장점을 결합하여 개발된 방법이다. 이 방법에서는 메쉬의 계산된 노드가 라그랑지안 기법에서와 같이 연속체를 따라 움직일 수도 있으며, 오일러리안 기법에서처럼 고정되어 있을 수도 있다. 또한 그림에서처럼 재배치 영역 안에서 임의적으로 움직이는 것 또한 가능하다. 이처럼 메쉬의 계산과정을 자유롭게 할 수 있기 때문에 순수한 라그랑지안 기법보다 더 큰 비틀림을 다룰 수 있고, 순수한 오일러리안 접근법보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다(그림 4 참조).

LS-DYNA에서 ALE 기법은 공기 메쉬와 TNT 메쉬를 각각 구성하여 해석을 진행하게 된다. ALE 메쉬인 공기와 TNT 메쉬를 모델링하기 위해서는 일반적인 라그랑지안 모델링과는 달리 LS-DYNA에서 제공하는 상태방정식을 추가적으로 사용하여 모델링할 수 있다. 공기 메쉬의 상태방정식은 아래의 식과 같은 선형 다항식을 이용한다.

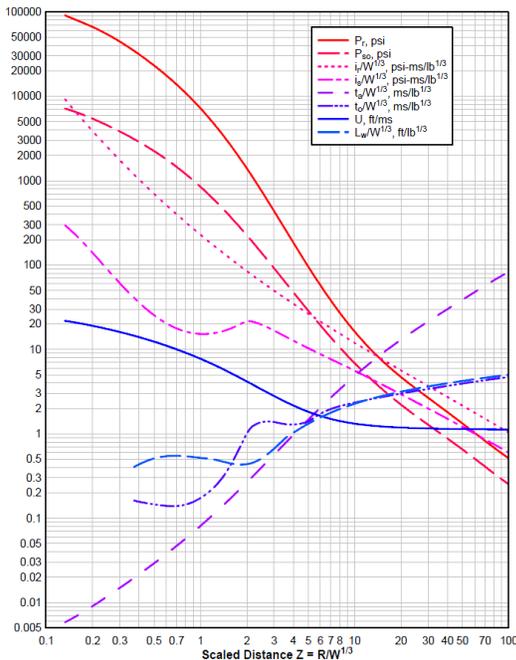


그림 2 Positive Phase Shock Wave Parameters for a Spherical TNT Explosion in Free Air at Sea Level (UFC 3-340-02, Fig 2-7)

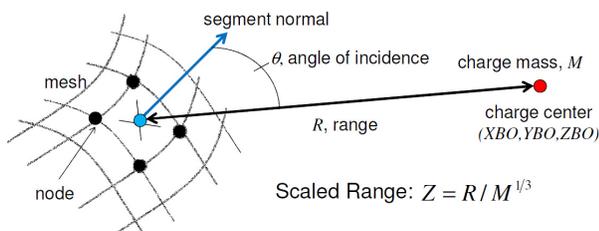


그림 3 Blast Load Model (Blast Loading in LS-DYNA, Todd P. Slavik, LSTC)

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

여기서, E는 내적 에너지를 의미한다. 또한 TNT 메쉬의 경우에는 지수 함수 형태의 Johnson-Wilkinson and Lee 상태방정식(EOS JWL)을 사용한다.

$$p = A\left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (2)$$

재료의 정의는 *Null을 사용하여 공기의 밀도를 정의하며, 폭발물은 *High_explosive_burn로 TNT의 밀도와 초기속도를

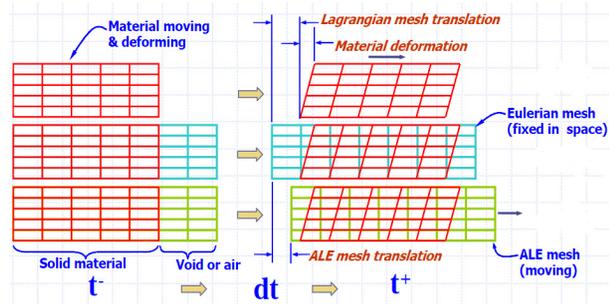


그림 4 라그랑지안, 오일러리안, ALE 메쉬의 비교
(Overview of ALE Method, Ian Do, LSTC)

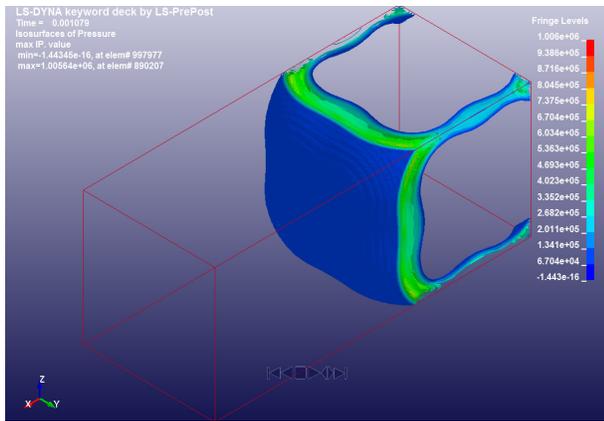


그림 5 ALE기법의 압력전파

정의할 수 있다. 각각 구성된 공기 메쉬와 TNT 메쉬의 상호 작용을 정의하는 과정이 필요한데, TNT 메쉬와 공기 메쉬가 만나는 부분의 노드를 공유시킴으로써 각각의 상호작용을 정의해 줄 수 있으며, *Initial_volume_fraction_geometry 를 적용하여도 TNT 폭발을 묘사할 수 있다.

ConWep, LBE와 비교하여 ALE기법은 공기 중이 아닌 지반이나 수중 등 다른 매질에서의 압력전파를 확인할 수 있다(그림 5 참조). 또한 실험적 데이터가 아닌 수치해석으로 접근하면서 ConWep, 혹은 LBE와 달리 환산거리에 대한 제약이 없다.

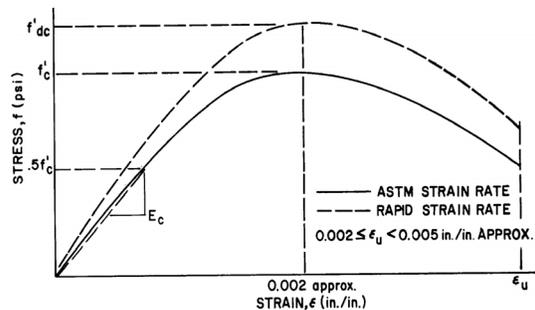


그림 7 Concrete & steel stress-strain relationship depending on strain rate (TM5-1300)

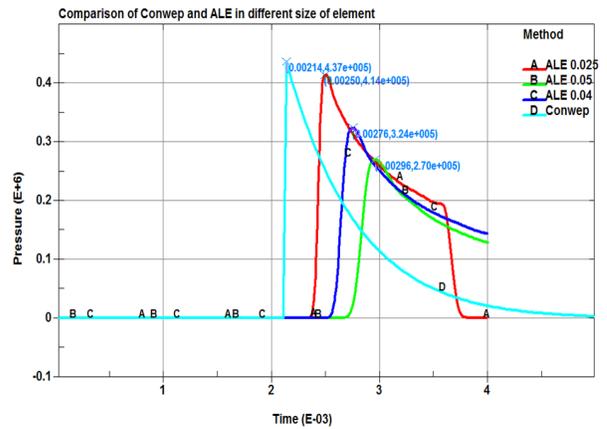


그림 6 ConWep과 메쉬 크기에 따른 ALE기법의 비교

따라서 근접한 거리에서의 폭발하중 계산에 매우 유리하다. ALE 기법 적용 시 고려사항은 정밀한 모델링을 위해서는 도메인의 요소를 되도록 작고 많이 나누어 주면 좋으나, 고성능의 컴퓨터와 많은 시간이 소요된다(그림 6 참조). 또한 폭발물과 폭발 압력 적용 대상 구조물의 거리가 멀어질수록 해석해야 하는 요소가 기하급수적으로 증가하고 따라서 원거리에서의 해석에는 효과적이지 못하다.

4. 폭발하중을 받는 구조재료의 모델링

폭발하중이 발생할 때 매우 빠른 속도의 하중에 의하여 구조재료는 100~10,000/s에 해당하는 매우 높은 변형률 속도(strain rate)를 가지게 되는데, 이러한 영향을 구조재료의 응력-변형률 곡선에 반영하여야 한다. 즉, 콘크리트와 강재 모두 폭발하중이 발생할 때 더 강한 강도를 가진다(그림 7 참조). 이렇게 증가한 강도를 동적 응력(dynamic stress)이라고 부르고, 통상적으로 동적 응력(dynamic stress)과 정적 응력(static stress)의 비율, 즉 동적 증가 계수(dynamic increase factor: DIF)를 적용하여 묘사할 수 있다. LS-dyna에서 사용 가능한 정밀한 콘크리트 모델로는 MAT_72, MAT_159 등,

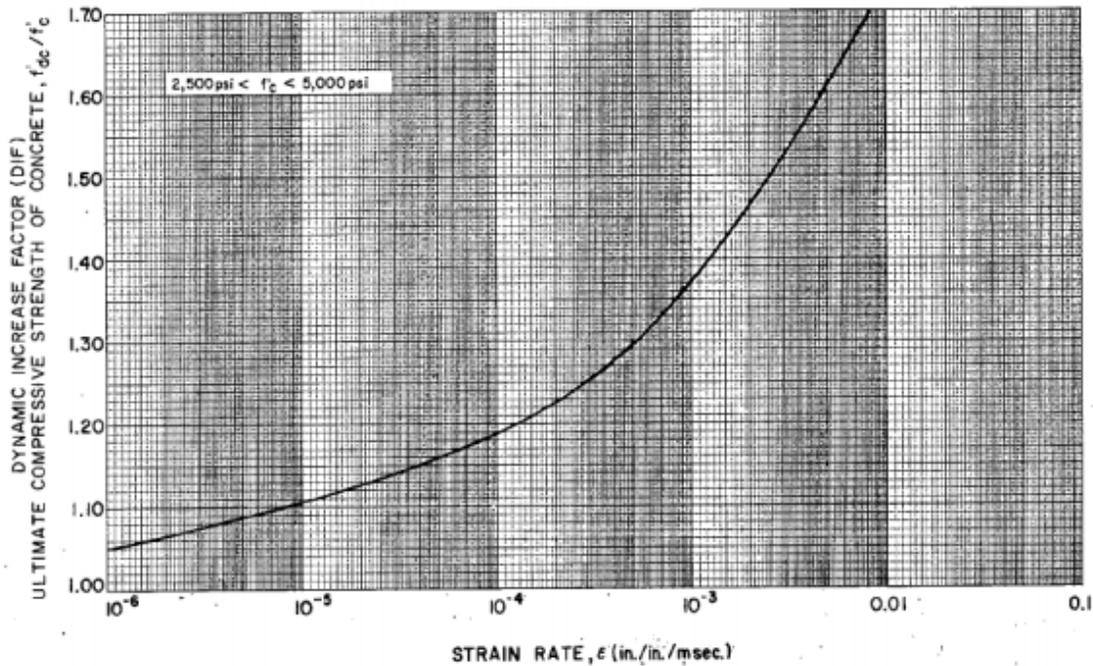


그림 8 DIF design curve for concrete compressive strength (plotted using TM5-1300 data)

표 1 Typical DIF design values used for analysis of reinforced concrete elements

Type of Stress	Far Design Range		Close-in Design Range			
	Reinforcing		Reinforcing		Concrete	
	Bars	Concrete	Bars	Concrete	Concrete	Concrete
	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f'_{dc}/f'_c	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f'_{dc}/f'_c
Bending	1.17	1.05	1.19	1.23	1.05	1.25
Diagonal						
Tension	1.00	N A	1.00	1.10	1.00	1.00
Direct Shear	1.10	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10
Bond	1.17	1.05	1.00	1.23	1.05	1.00
Compression	1.10	N A	1.12	1.13	N A	1.16

여러 가지가 있으며, 일반적인 개념은 TM5-1300에 설명되어져 있다. 그림 8에서 콘크리트에 대한 DIF 설계곡선을 나타내었는데, strain rate가 증가할수록 DIF는 증가함을 알 수 있다. 이 설계곡선은 strain rate이 10×10^{-3} in./in./msec일 때의 측정데이터를 기반으로 TM5-1300에서 유도하였다. 설계곡선은 안전성을 고려하여 보수적인 예측치를 가지게 된다. 또한, DIF 설계 값은 표 1에와 같이 보통 설계목적에 따라 원거리에서의 설계 범위(far design range)와 근접한 거리에서의 설계 범위(close-in design range)로 구분하여 제시한다. 근접한 거리일 때 증가하는 폭발하중과 그에 따른 strain rate의 증가를 반영하기 위해서인데, 폭발하중이 근접

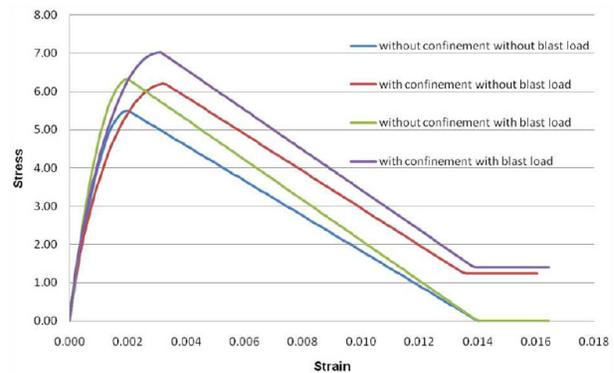


그림 9. 폭발하중에 따른 unconfined and confined concrete의 응력-변형률 곡선의 차이(단위: 1 ksi = 6.9 MPa)

한 거리에서 발생할 때의 dynamic stress가 부재로부터 원거리에서 폭발이 발생했을 때의 그것보다 큰 것을 알 수 있다.

그림 7에서는 폭발하중을 받는 일반 콘크리트에서의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 이를 구속을 받는 콘크리트(confined concrete) 모델을 사용하여 철근콘크리트 교량의 기둥에 적용할 수 있을 것이다. 이때 사용된 교각은 미국 여러 주의 교통국(Department of Transportation, DOT)과 미국 설계사무소의 의견 청취를 통하여 필자가 선정하였다. Saatcioglu와 Razvi(1992) 모델을 적용하여 구한 confined concrete의 응력-변형률 곡선이 그림 9에 나타나 있는데, 폭발하중을 받을 때와 그렇지 않을 때의 강도, 강성 그리고 최대값 이후의 강도 저감비율에서 차이가 나는 것을 알 수

있다. 이러한 폭발하중을 받는 일반 콘크리트와 철근콘크리트의 응력-변형률 곡선을 구조물의 폭발하중 해석에 반영할 필요가 있고, 강재 역시 마찬가지이다.

V. 결론

폭발하중은 매우 짧은 시간에 나타나는 현상이다. 이에 실험적 데이터의 축적은 정확한 폭발하중의 예측과 그에 따른 구조물의 거동확인을 가능하게 한다. 하지만 앞에서 언급하였듯이 시간, 비용 및 장소 등의 한계로 직접적인 실험이 제한되는 상황에서 컴퓨터를 활용한 폭발하중 해석은 매우 효과적인 방법이다. 널리 사용되는 LS-DYNA라는 상용프로그램을 활용한 폭발하중 해석기법에는 ConWep과 ALE기법이 있으며, 이러한 방법을 결합하여 사용하는 Coupling 기법도 가능하다. 또한 폭발하중을 받는 구조재료의 모델링에 있어 일반하중과는 다른 매우 빠른 변형률 속도에 의한 동적응력 및 응력-변형률 관계를 구조물 해석에 적용해야 할 것이다.

미국에서는 9.11테러 이후에 각 군에서 가지고 있는 방호설계기준을 통합하고 지속적으로 방호설계기준을 발전시키고 있다. 우리나라 또한 이러한 테러의 위협에 안전하

다고 생각할 수 없다. 이러한 사회적 요구에 의한 방호설계 기준을 제시하고 적용하기 위해서 전산 프로그램을 활용한 폭발하중 수치 해석이 병행되어야 하며, 실험결과를 바탕으로 수치해석 결과를 보완을 한다면 객관적인 기법으로 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

References

1. PDC TR-10-02, "Blast Resistant Design Methodology for Window Systems Designed Statically and Dynamically, U.S. Army Corps of Engineers, 2012.
2. TM5-1300, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," Department of the Army, Navy and Air Force, U.S. 1990.
3. Sattcioglu, M. amd Razvi, S., "Strength and Ductility of Confined Concrete," ASCE Journal of Structural Engineering, V. 118, No. 6, 1992.
4. LS-Dyna 971 manual, Vol. 1, LSTC, 2006. 

[담당 : 강현구·홍정욱 편집위원]