

# 폭발등 극한하중하의 구조물 거동 해석

## Analysis of Structural Behavior under Blast Extreme Loads



이 경 구\*

\*서울대학교 건축학과 BK 박사 후 연구원

### 1. 서 론

건축구조물의 방폭 관련 연구에 대한 관심은 지난 수십년간 세계적으로 다수의 건물들이 사고나 테러에 의해 폭발 피해를 겪어오면서 점차적으로 증가되어 왔다. 폭발 관련 연구는 국가안보 및 보안과 밀접하게 관련되어, 주로 군 시설물 등에 제한적으로 수행되어 왔다. 그 결과 일반 건물 설계 시 고려되는 지진이나 태풍 등의 자연적 재해에 비해, 충돌, 화재, 폭발 등의 인위적 재해에 대한 대비가 상대적으로 미비한 실정이었다. 하지만, 2001년 9월 11일 미국 뉴욕에서 있었던 세계무역센터에 대한 비행기 테러 사건은 일반 건물 및 고층 건물을 대상으로 하는 연구와 설계기법에 대한 세계적 관심을 촉발시키는 계기가 되었다. 최근 미국에서는 정부 청사 건물의 신축 혹은 보강 시 폭발 재해에 대비하는 설계를 요구하고 있고, 주요 민간 건물에도 권장하는 추세이다.

폭발로 인한 피해는 공중폭발에 의한 구조 부재의 국부적 파괴(직접적 피해)와 구조물의 연쇄적 부분 혹은 전체 붕괴(간접적 피해)로 분류할 수 있다. 공중폭발에 의한 직접적인 효과는 폭발로 인한 공기의 압력증가에 의해 야기되며 외부벽체, 창문, 바닥 시스템, 기둥 그리고 보 등의 국부적인 파괴를 유도할 수 있다. 구조요소의 국부적 손상, 특히 건물의 수직하중을 전달하는 주요 구조부재인 기

둥의 손상은 지지력 감소를 유발하여 근접한 부재에 과도한 하중을 재분배하고 결과적으로 연쇄적인 파괴에 의한 구조물의 전체 붕괴를 초래할 수 있다(그림 1 참조). 피해를 최소화하는 가장 효과적인 방법은 폭발지점과 대상 구조체사이의 이격거리를 충분히 확보하여 폭발에 의한 충격파가 대상물에 전달될 때 구조물에 피해를 발생시키지 않을 정도로 그 크기를 감소시키는 것이라 할 수 있다. 하지만 실제 상황에서는 대지 조건이나 여러 상황 등에 의하여 충분한 폭발 이격거리를 확보할 수 없는 경우가 많기 때문에 다양한 예상 시나리오에 대한 폭발하중 해석평가를 수행할 필요가 있다.

폭발 등의 극한하중하의 구조물 거동을 해석하기 위하여 정적해석방법, 단자유도 동적해석방법, 강체-소성해석방법 등이 일반적으로 사용되어 왔다.<sup>1)</sup> 정적해석방법은 폭발에 의한 동적하중을 등가의 정적하중으로 치환하여 해석을 수행하는 것이고, 단자유도 동적해석방법은 연속체를 단자유도로 치환하여 구조물의 동적특성과 소성거동을 고려할 수 있는 방법이다. 강체-소성해석방법은 탄성영역을 초과하는 구조물의 동적거동을 강체 소성 해석을 통해 예측하는 것이다. 하지만 이러한 방법들은 단순화된 모델을 사용하기 때문에 설계에 적용하기에는 용이하지만 폭발거동을 정확하게 예측하기에는 충분하지 않을 수 있다. 또한, 폭발하중과 각 부재 및 부재 간 반응 메커니즘의

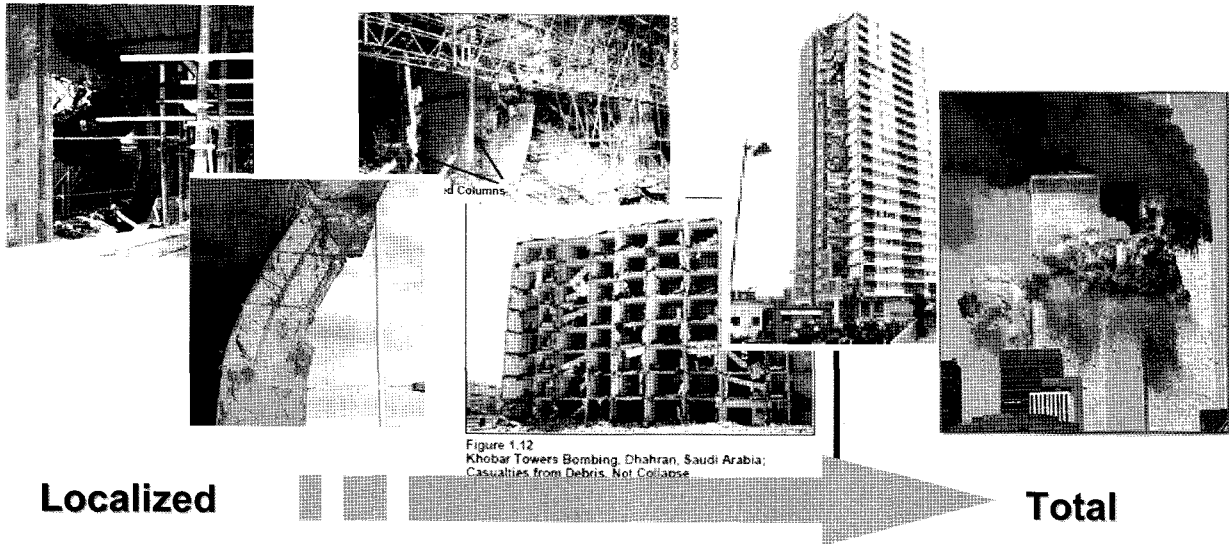


그림 1 폭발 극한하중하의 구조물 피해

복잡성 때문에, 이 분야의 설계기준이나 시방서 개발 시 기존의 실험적 해석뿐만 아니라 전산기술의 발달에 따른 정밀한 수치해석 방법을 포함하는 것을 요구하고 있다.<sup>2)</sup>

최근의 폭발관련 연구에서는 유한요소 해석을 통해 보다 정확한 건물의 거동을 예측하고자 한다. 일반적으로 수치 해석시의 입력 값인 폭발하중 산정을 위해서, 가장 널리 쓰여지는 하중산정 프로그램으로 미공병단에서 개발한 ConWep<sup>3)</sup> 프로그램과 미국 내무부(General Services Administration)의 지원으로 ARA(Applied Research Associates Inc)에서 개발한 AtBlast<sup>4)</sup> 프로그램이 있다. 이들은 실험 자료를 통해 구한 실험적 이론식을 이용하여 폭발 하중의 변수들을 구한다. ConWep 혹은 AtBlast 하중을 이용한 해석법은 전산 시간을 절약하면서 타당한 정확성을 확보할 수 있는 장점이 있지만, 정밀 수치해석 시에 각 지점에서의 압력을 계산하고, 산출된 압력-시간이력 함수를 구조물 각 지점에 부과해야 하는 어려움이 있다. 또한, 구조물의 형상 효과, 다중 폭발과 반사, 다른 구조물에 의한 반사 효과, 구조 재료 변형률 효과 등을 구현하기 어렵다. 반면, 전산유체동력학을 이용한 수치해석법은 앞서 언급한 여러 가지 복잡한 상호작용 효과를 구현할 수 있는 정교한 해석법이라 할 수 있다. 전산유체동력학(computational fluid dynamics, CFD)은 수학적으로 유체흐름(fluid flow)을 모델화하는 과정이다. 유체역학을 이용하여 고압의 폭발가스가 집화되고, 집화된 폭발파가 대기 중으로 전달되어, 파장이 구조물과 상호작용하는 세 단계를 형상화시키는 해석기법이라 할 수 있다. 이는 폭발 등 극한하중하의 구조체 거동 해석에 있어서, 폭발물-공기-구조물의 유한요소 모델을 통해 폭발파장과 구조물간의 상호작용을 이용한 폭발하중 전달 및 구조물의

반응을 일체적으로 해석할 수 있게 한다.

본 고에서는 폭발과 압력의 특성의 고찰과 LS-DYNA 명시적(explicit) 유한요소해석 프로그램<sup>5)</sup>을 사용하여 폭발파를 형상화하는 모델링 기법과 폭발 해석을 통한 철골 구조 부재 거동에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 폭발 압력

고압의 폭발이 발생하면 폭발물질은 고온, 고밀도, 고압의 가스로 변환된다. 이러한 폭발은 초기에 아주 빠른 속도로 주변의 대기와 평형상태를 이루기 위해 충격파를 발생하게 된다. 충격파가 확장되면서 압력이 급격하게 감소되는데, 이것은 공기를 가열하면서 에너지를 발산하기 때문이다. 그림 2는 전형적인 개방공간(Free Field)에서의 폭발압력의 시간이력 특성을 보여준다. 개방공간에서의

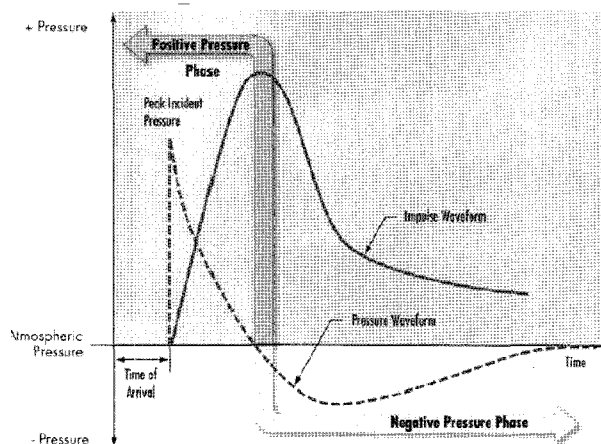


그림 2 폭발 압력의 시간 이력<sup>6)</sup>

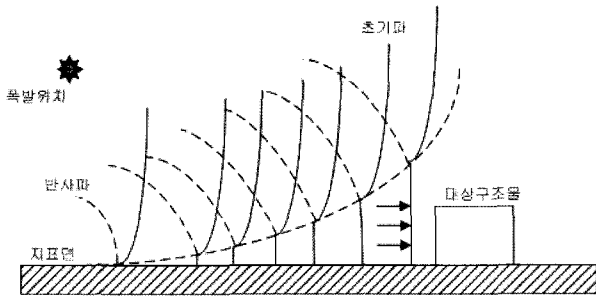


그림 3 초기폭발파와 반사폭발파의 영향<sup>7)</sup>

폭발과장은 초기에 주변의 대기와 평형상태를 이루기 위해 압력을 순간적으로 상승시킨 후, 아주 짧은 시간(수천분의 1초)동안 감쇠되는 충격파형태를 이룬다. 이를 정압상태(positive phase)라 한다. 파의 전면부가 확대되면서 압력은 대기압 이하가 되는 부압 상태(negative phase)로 형성되는데, 이는 충격파 형태의 정압 상태에 비해 영향이 크지 않다.<sup>6)</sup>

공기를 통해 전달된 폭발파의 입사압력(incident pressure)은 파의 전파방향과 평행하지 않은 구조물 등과 충돌하여 반사되면서 증폭된다. 이를 반사압력(reflected pressure)이라 하고, 이 반사압력이 해석시 고려되는 구조물에 직접적으로 작용하는 폭발하중이다. 폭발파 입사압력의 크기는 폭발물질의 종류 및 크기와 폭발물질과 구조물과의 이격거리에 의해 결정된다. 한편, 반사압력의 크기는 입사압력 크기 외에 충격파의 입사각에 따라서도 영향을 받는다. 충격파가 그 전달방향과 직각인 구조체의 표면에 충돌하는 경우에는 그 크기가 최대가 되고, 충격파의 전달방향과 평행인 경우에는 입사압력과 동일할 것이다. 가령, 630kg ANFO 폭발물에 의해 형성된 폭발파를 4m의 이격거리에서의 최대 입사압력은 약 6.9MPa인 반면, 폭발파의 방향과 직각으로 면한 강 기둥 면에서의 최대 반사압력은 55.2MPa로 입사압력의 8배에 이른다. 또한, 그림 3에서와 같이 폭발 하중은 폭발 후 공기를 통해 대상구조물에 직접 전달되는 초기폭발파(incipient blast wave)와 다른 구조물, 예를 들어 지면에 반사되어 전달되는 반사폭발파(reflected blast wave)로 형성될 수 있다. 대상구조물 전면에 가해지는 폭발하중 해석 시 이 두가지 폭발파의 상호작용도 고려하여야 한다.<sup>7)</sup>

FEMA 426<sup>6)</sup>, FEMA 427<sup>8)</sup>에 의하면 지진, 바람, 홍수 등 다른 재해에 비해 폭발은 다음과 같은 점에서 차별성을 갖는다:

- 폭발에 의한 압력은 발생원으로부터 거리에 따라 급격하게 감소한다. 폭발이 발생한 곳에 면하여 있는 건물의 전면부는 반대편에 비해 심각할 정도로 큰 손상을 받을 수 있다. 따라서 직접 공기-폭발은 보다 많은 국부적 손상을 발생시킬 수 있다. 한편, 건물 전체에

대한 안전을 고려해야 하는 다른 재해에 비해, 폭발이 발생한 곳에 면하여 있는 건물의 이격거리 확보나 건물 전면의 국부적 손상에 대한 대비를 통해 건물 전체의 안전 확보가 가능하다.

- 폭발하중과 구조물의 질량과 관계는 다른 재해하중과의 관계와 다르다. 초단위의 지진이나 돌풍의 경우, 구조물의 질량은 공조현상에 의해 구조물에 악영향을 미칠 수 있다. 그러나 폭발하중의 지속시간은 수천분의 1초 정도로 매우 짧아서, 구조물의 질량이 반응하게 될 때는 이미 하중이 소멸하여 구조물의 질량은 구조물을 안정시키는 역할을 할 수 있다.
- 대상 건축물에 작용하는 압력의 크기는 다른 재해에 의한 것보다 훨씬 클 수 있다. 정적하중이나 지진하중과는 달리, 폭발은 구조물의 일부 영역에만 손상을 발생시킨다. 하지만, 폭발이 일반적으로 제한적인 구조 손상을 일으킨다고 해도 다수 건물의 거주자를 위험에 빠트릴 수 있는 파편을 광범위하게 분산시킬 수 있다. 또한, 폭발하중은 매우 짧은 지속시간을 갖게 되므로 지진과 같은 다른 재해에서는 일반적으로 무시되는 구조물의 고차모드에 의한 피해를 발생시킬 수도 있다.

### 3. 전산유체동역학 유한요소 해석 모델

이 단원에서는 TNT 점화 후 대기중으로 전달된 폭발 압력하의 강재기둥의 거동 해석<sup>9)</sup> 예를 통해 설명하겠다. 본 해석에서는 정육면체의 TNT, 기둥, 그리고 이를 둘러

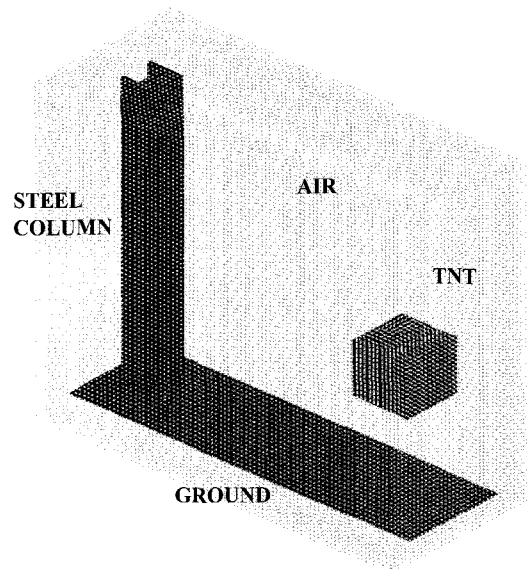


그림 4 유한요소해석 모델 구성

싼 공기 매체를 모델링 하였다(그림 4 참조). 해석 모델에는 비선형 유한요소로서 8절점 육면체 솔리드 블록 요소가 사용되었다. LS-DYNA 프로그램을 이용한 폭파해석에서는 구조체인 기둥은 Lagrangian식을, 폭발 물질과 폭발파의 전달 매체인 공기는 Arbitrary-Lagrangian-Eulerian(ALE)식을 이용한다. ALE식은 Lagrangian단계와 Eulerian단계를 걸쳐, 폭발 압력 전달을 위한 유체 해석 시 요소의 커다란 변형에 의한 해석 값들의 왜곡을 방지한다.

### 3.1 TNT 폭발물

TNT 폭발물 재료 성질은 표 1과 같다. 이 폭발물의 점화를 시뮬레이션하기 위해 Johnes-Wilkins-Lee(JWL)의 상태식(equation of state)을 이용할 수 있다. JWL상태식은 폭발 점화물의 압력-부피-에너지 거동을 구현하는데 가장 널리 사용되고 있는 실험을 통해 유추된 식이다.<sup>10)</sup> JWL 상태식은 다음과 같이 점화 압력( $p$ )을 정의 한다:

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

식 1에서  $V$ 는 상대적 부피,  $E$ 는 초기 단위부피당 내부 에너지를 나타내며, TNT를 위한 실험적 상수 값들은 표 2와 같이 주어진다.<sup>11)</sup>

표 1 TNT 폭발물 재료값

밀도	1630kg/m <sup>3</sup>
폭발 속도	6930m/s
Chapman-Jouget 압력	21GPa
내부에너지 밀도	7GPa

표 2 TNT를 위한 JWL 상태식 상수 값

$\omega$	0.3
A	371.2GPa
B	3.231GPa
R1	4.15
R2	0.95

### 3.2 공기

공기는 이상 상태로 가정한다. 폭발파의 확장을 단일적 과정으로 가정하여 다음의 상태식으로 전달압력( $p$ )을 나타낸다.<sup>12)</sup>

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (2)$$

식 2에서  $\rho$ 는 밀도,  $E$ 는 초기 단위부피당 내부에너지를 나타내며, 그 밖의 재료값은 표 3과 같다.

표 3 공기 모델 재료값

초기 밀도 $\rho_0$	1.293kg/m <sup>3</sup>
초기 압력	1 Bar
Ratio of specific heats ( $\gamma$ )	1.4

### 3.3 강 기둥

Grade 50 강 기둥의 정적 재료값은 표 4에서와 같다. 그러나 폭발하중은 매우 짧은 시간에 발생하는 충격과와 같은 비정상하중으로서 매우 짧은 시간에 구조물에 적용한다. 그러므로 재료의 비선형 응력-변형도 관계에 높은 변형률 효과와 동적 항복강도를 고려하여야 한다. 또한, TM5-1300<sup>4)</sup>에 따르면 동적 하중하의 강재의 탄성계수는 하중재하속도와 무관하고, 인장강도는 약간 증가하며, 변형률이 증가하더라도 최대인장변형률은 변하지 않거나 약간 감소한다. 이러한 동적특성을 반영하도록 LS-DYNA 프로그램에 인용된 다양한 재료모델을 선택하도록 한다.

표 4 강기둥 재료값

항복강도	345MPa
탄성계수	205×10 <sup>3</sup> MPa
밀도	7830kg/m <sup>3</sup>
poison's ratio	0.3
접선계수	636MPa

### 3.4 유체-구조체 상호작용

점화된 폭발물은 공기-폭발 압력을 생성하고, 그 폭발력은 공기, 즉 ALE 요소를 통해 전달된 후 기둥, 즉 Lagrangian 요소와의 상호작용을 통해 증폭되며, 그 증폭된 반사압력이 기둥에 하중으로 작용한다. 전달된 폭발파와 구조체 상호작용을 표현하기 위해 페널티 커플링(penalty coupling) 알고리즘이 널리 사용된다. 그림 5에서 보듯이, 구조체인 Lagrangian 요소와 유체인 ALE 요소 사이의 커플링 절점과 관통(penetration) 깊이에 상응하는 가상의 저항 스프링 개념을 통해 반사폭발압력이 구조체에 가해진다. 구조체의 질량과 해석 시간간격크기에 따라 가상 스프링의 강성이 결정된다. 상호작용을 통한 폭발하중 산정은 구조물 형상

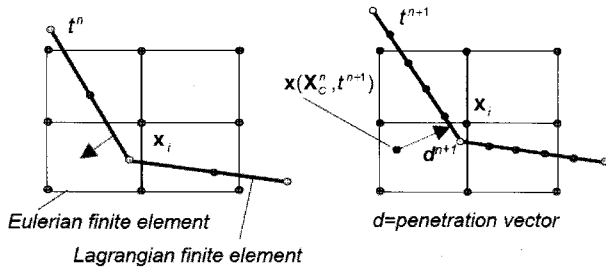


그림 5 페널티(penalty) 커플링 개념<sup>13)</sup>

이 다른 각 부위에 실제 가까운 시간이력 폭발 하중과 변위 관계를 효율적으로 표현할 수 있다.

#### 4. 구조물 거동 및 손상

건물 구조시스템의 반응은 폭약 위치 및 크기 등의 폭발 하중 시나리오뿐만 아니라 외부벽체나 커튼월 등의 비구조 요소에도 큰 영향을 받는다는 사실이 여러 실험을 통해

확인되었다. Crawford<sup>14)</sup>는 실험을 통해 벽체가 없는 기둥 부재에 직접 폭발하중이 가해진 경우와 기둥 외부마감 벽체가 있는 경우의 기둥부재 손상 양상이 다름을 관찰하였다. 그림 6은 폭발파의 전파와 폭발압력을 받은 벽체가 기둥-보 접합부 시스템에 충돌 후 파괴 되는 과정에서, 직접 폭발 충격량이 아닌 벽체에 의한 충격량을 받는 기둥의 거동을 위한 해석 시뮬레이션의 예를 보여준다. 한편, 그림 7은 벽체 없이 큰 폭발파가 직접 기둥 약축 방향에 가해졌을 때, 콘크리트 기초위에서의 기둥 웹 파괴 경우를 보여주는 실험 및 해석 결과이다.<sup>15)</sup> 폭발력이 강한 경우, H-형강의 k-line에서의 국부적 파괴 후 웹 전체가 절단되는 취성파괴의 가능성, 즉 휨 거동이 충분히 진전된 이후에도 박판 요소에 직접 전단의 효과가 야기될 수도 있음을 알 수 있다. 일련의 폭발 관련 실험 및 해석의 의미 중 하나는 폭발로 인해 손상을 입은 일반 중, 고층 건물의 저층 기둥의 중력하중 잔여저항 능력을 가늠하고, 전체 잔여 구

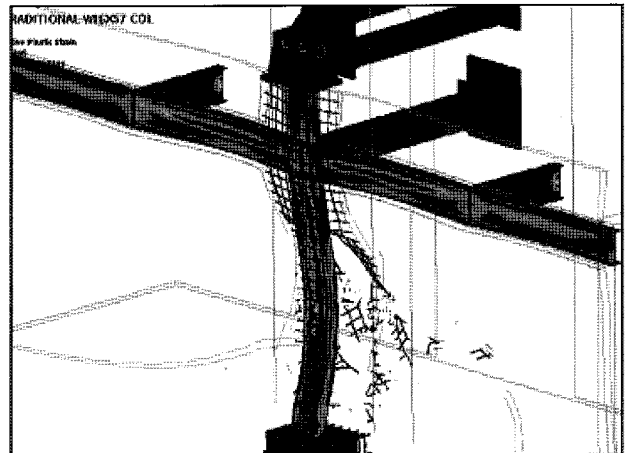
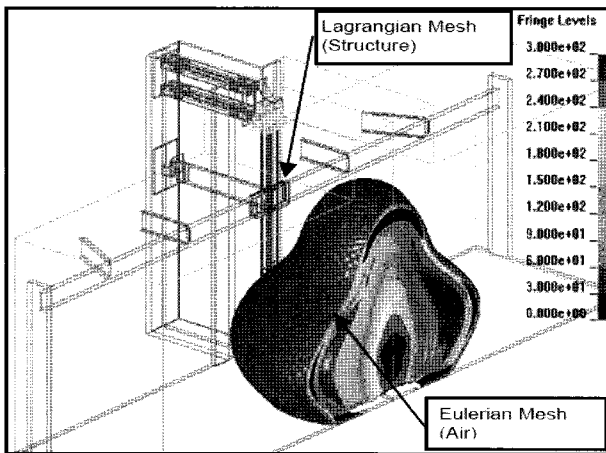


그림 6 전산유체역학해석에 의한 폭발압력의 전파와 콘크리트 벽체 및 보-기둥 접합부의 거동 예<sup>15)</sup>

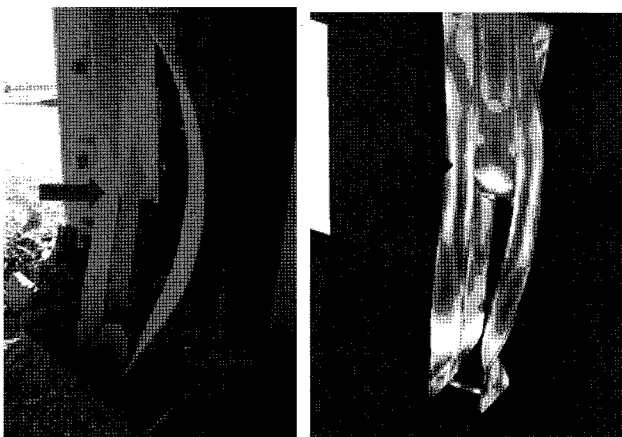


그림 7 폭발압력하의 강 기둥 부재의 손상 실험 및 유한요소해석 결과 비교<sup>15)</sup>

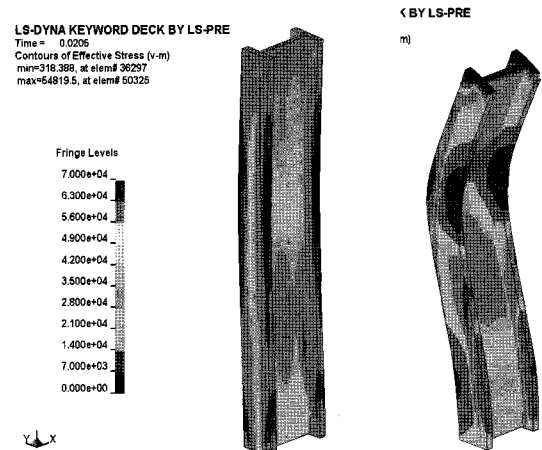


그림 8 중력하중 유무에 따른 강재기둥의 거동

조시스템의 건물붕괴 방지 저항 능력을 평가하는 것이라 할 수 있다. 그림 8은 동일한 폭발하중하의 중력하중 유무에 따른 기둥의 거동의 차이를 비교한 것이다. 이는 다양한 중력하중 시나리오를 통한 기둥의 거동을 해석하여 연속된 구조 시스템 및 기둥의 잔여 저항능력과 상관관계를 고찰할 필요성을 보여준다.

## 5. 결 론

본 고에서는 폭발하중하의 철골구조물을 주 대상으로 살펴보았다. 1994년 미국 노스리지 지진 이후 지진에 대해 신뢰할 수 있는 철골 보-기둥 접합부를 개발하려는 광범위한 연구가 수행되었고, 그 결과 충분한 변형능력을 가진 내진 접합부들이 개발되었다. 그러나 방폭 및 연쇄붕괴 방지를 위해서 기존의 철골구조시스템의 효율성 및 안전성 평가 및 대책은 아직 미비한 실정이다. 따라서 테러 등의 위협을 받는 나라의 정부기관 및 학계, 산업계에서는 폭발에 의한 국부적인 폭파 후 조건 및 연쇄붕괴에 영향을 줄 수 있는 접합부의 필수적인 속성을 대해 인식하기 시작하였고 최근 수년간 방폭 및 연쇄붕괴방지 관련 연구들이 수행되고 있다. 일례로, 미국에서는 기존의 내진접합부의 연쇄방지를 위한 성능을 평가하고 내진 및 연쇄붕괴저항 철골 구조 접합부의 개발 및 전산유체역학을 이용한 폭발해석기법을 창출하는 대규모 연구를 수행하고 있다. 한편, 국내에서도 이철호 등<sup>16)</sup>은 폭발하중에 의한 기둥 손실을 가정한 초고층건물의 연쇄붕괴방지설계와 관련된 연구를 통하여 새로운 개념의 효율적 철골모멘트 골조 연쇄붕괴 해석법을 제안하였다.

이러한 일련의 연구는 폭발하중에 의한 주요 구조요소의 거동, 폭발이후 중력하중을 지지하는 기둥, 보, 접합부 요소들의 잔여 능력, 폭발이후 전체 또는 국부적인 구조 시스템의 연속성, 연성도와 강성 등을 예측할 수 있는 신뢰성 있는 방법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 최종적으로 폭발 등의 극한하중에 의한 주요 건물의 치명적인 파괴 방지를 위해서 보다 신뢰성 있고 실무적으로 적용될 수 있는 방폭설계지침을 개발하는 것이라 할 수 있다. 이를 위하여 미국 등에서는 다양한 구조 시스템을 위한 일련의 폭발 실험대 실험과 정밀한 수치해석이 병행되어 이루어지고 있다. 정밀수치해석은 다양한 하중(폭발하중 및 중력하중) 시나리오와 부재, 시스템간의 복잡한 상호작용의 정확하고 합리적인 분석 및 예측을 가능하게 한다고 할 수 있다. 또한, 전산유체동력학을 이용한 정밀 수치해석은 방폭

및 연쇄붕괴방지를 위한 일체적이며 통합적 연구에 매우 유용할 것이다. 우리나라에서도 건축 구조물의 방폭 및 연쇄붕괴관련 설계기준 및 지침서 개발 시에 실험과 정밀 수치해석의 병행이 필요할 것이며, 구조물의 거동을 면밀히 분석하고 검토를 위해서는 보다 정확하고 정교한 수치해석 기술이 선결조건임을 간과해서는 안 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Kang, K.W. and Liew, J.Y.R., "Blast Response of Steel-Concrete Composite Structures," International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Lisbon, Portugal, 2006
2. AISC. Facts for Steel Buildings-Blast and Progressive Collapse, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, Inc., 2004.
3. TM5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. U.S. Department of the Army Technical Manual, Washington DC, 1990
4. TM 5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Joint Departments of the Army, Air Force and Navy, Washington, DC. 1990
5. LS-DYNA, LS-DYNA Keyword User's Manual, version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2005
6. FEMA, Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, FEMA Report No. 426, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2003
7. Nair, R.S., "Progressive Collapse Basic," Proceedings of AISC-SIDNY Symposium on Resisting Blast and Progressive Collapse, AISC, New York, 2003
8. FEMA, Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, FEMA Report No. 427, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2003
9. 이경구, 김대진, 김은석, 김진구, 폭발하중에 의한 강제 기둥의 거동, 대한건축학회논문집, 구조계, 제23권, 제 7호, pp 37-44, 2007
10. Lee, E., Finger, M., & Collins, W., JWL Equation of State Coefficients for High Explosives, UCID-16189, Lawrence Livermore National Laboratory,

Livermore, CA, 1973

11. Dobratz, B.M. and Crawford, P.C., LLNL Handbook of Explosives, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-529978-21, 1985.
12. LS-DYNA, LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 1998.
13. Haufe, A. and Franz, U., "On The Simulation Of Out-Of-Position Load Cases With The ALE-Method," 7th international symposium and exhibition on sophisticated safety systems, Karlsruhe, Germany, 2004.
14. Crawford, J., Houghton, D., Dunn, B., & Karns, J., Design Studies Related to the Vulnerability of Office Buildings to Progressive Collapse due to Terrorist Attack, Research Report TR-01-10.1, Kraagozian & Case Structural Engineers, Glendale, California, 2001.
15. Karns, J.E., Houghton, D.L., Hall, B.E., Kim, J. and Lee, K., Blast Testing of Steel Frame Assemblies to Assess the Implications of Connection Behavior on Progressive Collapse, Proceedings of The 2006 Structural Congress, ASCE/SEI, St. Louis, MO, May 18-20, 2006.
16. Lee, C.H., Kim, S.W., and Lee, K., Moment-Axial Tension Interaction of Double-Span Beams I Column-Removed Steel Moment Frames, the PROTECT2007 Workshop, Whistler, Canada, Aug 19-21, 2007. 