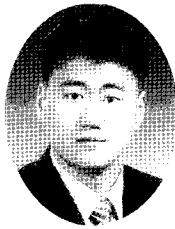


# 초고층 건물의 방폭 및 연쇄붕괴방지설계법의 소개

## Introduction of Blast-and Progressive Collapse-Resistant Design for Highrise Building



김 선 응\*  
Kim, Seon-Woong

### 1. 서론

1968년 영국의 Ronan point 공동주택의 붕괴이후에 방폭 및 연쇄붕괴방지관련연구가 지난 50년간 꾸준히 진행되어왔으며, 2001년 세계문화회관(World Trade Center)의 테러사건을 계기로 구조설계 전문가들에게 방폭 및 연쇄붕괴방지설계가 주요한 연구 주제로 부각되고 있다. 물론, 국내에서도 최근 약 10년간 국책과제로서 꾸준한 연구가 수행되고 있다.

전세계적으로 테러조직에 의한 인적, 물적 피해가 점차 커지고 있으며, 2010년 연평도 포격사건 등 국내의 특수상황에 의한 국지적 사건 뿐만 아니라 대표적인 국제 테러조직인 알카에다에 의해 테러대상국으로 지정되는 등 국내도 더 이상 테러의 안전지대가 아님은 공지의 사실이다. 이러한 테러위협에 대비하여 주요 선진국에서는 국가기관을 중심으로 다양한 건축 계획적, 공학적 대응방안을 제시하고

있으며, 설계지침을 통한 군시설물 및 공공건물을 신축 및 보강하고 있다. 아울러 사회, 경제적으로 상징적인 초고층건물시장이 지속적으로 성장하면서 주요한 민간건물에 대해서도 방폭 및 연쇄붕괴방지설계가 일반화되고 있는 추세이다.

국내도 국가안보기관, 국토해양부, 그리고 지방정부를 중심으로 법제정 및 제도화를 발의하거나 추진 중에 있다. 가령, 2010년 4월부터 국토해양부에서 “건축물 테러예방 설계가이드라인”이 시행되고 있으며, 2030년까지 ‘국민의 삶의 질’ 세계 10위권을 목표로 자연재해, 범죄 등등에 대한 법제화가 추진되고 있다. 이러한 추세에도 불구하고 국내의 방폭 및 연쇄붕괴방지설계관련 엔지니어링 능력 및 연구 인프라수준은 여전히 미약한 수준이나, 최근 국내의 대형 건설사 및 연구기관을 중심으로 방폭 및 연쇄붕괴방지설계관련 기술력 확보에 집중하고 있다. 본 원고에서는 이와 같이 점차 관심이 높아지고 있는 방폭 및 연쇄붕괴방지설계에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

\* (주)대우건설 기술연구원/선임연구원, 공학박사

## 2. 방폭설계법

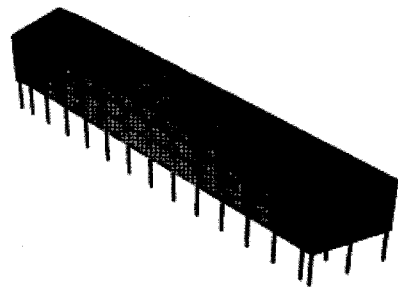
방폭설계(blast-resistant design)와 연쇄붕괴방지설계(progressive collapse-resistant design)를 소개하기에 앞서 두 가지 설계법의 개념을 정의해야 할 것이다. 방폭설계는 구체적인 위협에 의한 폭발하중의 압력을 직접 고려하여 일개의 부재 또는 일군의 시스템에 대한 방폭성능을 평가함으로써 인명 및 재산을 보호하고 구조부재 요소의 파괴를 방지하는 것을 주목적으로 한다. 반면에 연쇄붕괴방지설계는 구체적인 위협을 지정하지 않고, 구조시스템에 적정의 여유도(redundancy)와 연속성(continuity)을 부여하여 국지적으로 시작된 파괴가 전체파괴로 전파되지 않도록 하는데 주안점을 두고 있다.

방폭해석법은 다음과 같이 크게 4가지로 구분할 수 있으며, 장단점은 다음과 같다.

- (1) 의사정적해석법(quasi-static analysis)
- (2) 단자유도해석법(single degree of freedom analysis)
- (3) 매크로해석법(macro level analysis)
- (4) 정밀해석법(micro level analysis)

위의 4가지의 해석법은 의사정적해석법인 정적해석법과 나머지 3가지의 동적해석법으로 또다시 구분할 수 있다. 방폭해석은 아주 짧은 시간의 폭발하중에 대한 응답을 검토하는 것이므로, 실무에서는 동적특성을 반영하지 못하는 정적해석법 보다는 동적해석법을 이용한 방폭설계 및 해석이 수행되고 있다. 동적해석법은 폭발물 주변의 대기환경, 건물배치상황 등을 모두 반영할 수 있는 연계기법(coupled method)을 활용하는 해석법인 정밀해석법과 이를 반영하지 못하는 비연계기법(uncoupled method) 해석법인 단자유도해석법과 매크로해석법으로 대별할 수 있다. 단자유도해석법은 가장 쉽게 사용할 수 있으나, 과설계에 따른 비경제적 설계가 되는 단점이 있다. 매크로해석법은 SAP2000, ETABS 등등의 일반 상용 전산구조 해석프로그램을 사용하여 해석

하는 방법으로 부재의 비선형 특성을 묘사할 수 있으나, 폭발하중의 모사가 어려운 문제점을 갖고 있다. 마지막으로 전산유체역학(computational fluid dynamics)을 활용한 정밀해석법<그림 1 참조>은 부재의 비선형 특성 뿐만 아니라 접합부 상세를 모델링할 수 있고 정확한 성능평가에 의한 가장 최적화된 구조설계를 할 수 있다는 장점에도 불구하고 해석모델링의 어려움과 긴 해석시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다.

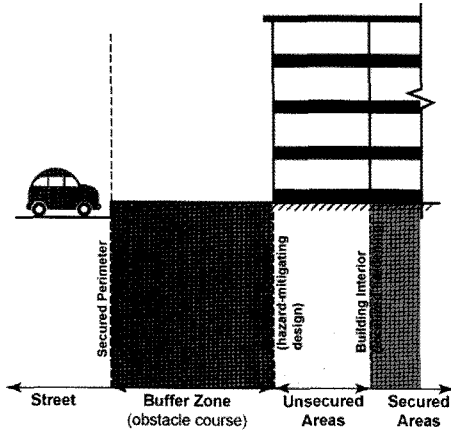


〈그림 1〉 전산유체역학을 활용한 정밀방폭해석의 일례

방폭설계법은 폭발하중에 대해 다음과 같은 세 가지의 건축적 대응전략을 마련하고 있다.

- (1) 위협요소의 축소(reduction of threat risk)
- (2) 각개 부재의 보강(reinforcement of individual elements)
- (3) 대체하중경로의 구축(construction of alternative load path)

우선, 대상건축물에 대한 폭발물 등의 위협적 요소를 사건발생 이전에 차단하기 위해서 도로 장애물(obstacle)를 설치한다든지 폭발이 예상되는 지점을 대상건축물로부터 최대한 이격하는 방안을 건축계획적으로 접근할 수 있다. 그 다음으로는 각개 부재 또는 일군의 부재를 보강하거나 창호 등을 보강하는 방안을 강구할 수 있다. 마지막으로, 구조시스템 측면에서 구조부재의 충분한 여유도 및 연속성을 확보하고 접합부의 연성능력을 향상시킴으로써 일련의 사건에 대응하는 방안이다(〈그림 2〉 참조.)



〈그림 2〉 건물의 방폭설계 전략 개념도(FEMA 427)

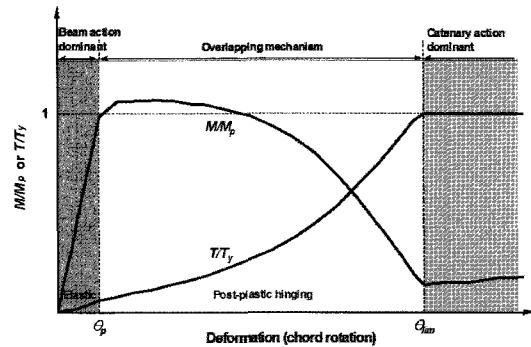
### 3. 연쇄붕괴방지설계법

연쇄붕괴방지설계법은 긴결법(tie method)와 대체경로법(alternative path method)로 대별된다. 긴결법은 유럽을 중심으로 제안된 방안으로서 기둥이 제거된 2경간 보의 수직처짐이 일경간의 10% 발생했을 때 현수작용 발현되는 것으로 가정하고 건물의 수직적, 수평적 연속성을 확보하는 방안으로 역학적 논리에 근거한 것이 아니다. 반면에 대체경로법은 연쇄붕괴방지설계지침서에서 제시한 기둥제거 시나리오(column-missing scenario)에 따라 제거된 기둥이 지지하던 하중을 인접부재로 전달하여 지지할 수 있도록 하는 방안으로서, 최근에 제시된 설계지침서 및 연구주제는 모두 이 방안에 근거하고 있다.

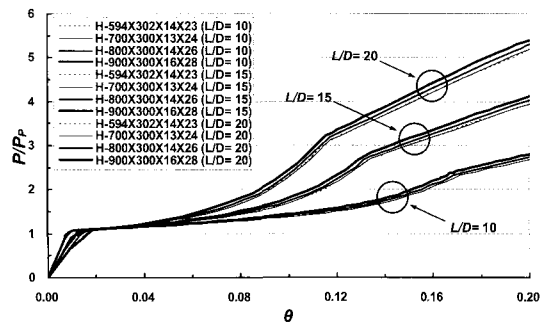
연쇄붕괴방지해석 및 설계법은 기존연구를 통해 다수의 방안들이 소개되고 있으나 본 원고에서는 저자의 최근 연구를 통해 개발된 다음의 세 가지 방안을 소개하고자 한다.

- (1) 에너지균형개념(energy-balanced concept)에 근거한 비선형 정적 근사해석법
- (2) 붕괴스펙트럼을 활용한 비선형 동적 근사해석법
- (3) 병렬소성힌지(parallel moment-axial tension hinge)를 활용한 비선형 동적해석법

우선, 개발된 근사해석법들을 소개하기에 앞서 2경간 보부재의 거동을 살펴보면, 2경간 보는 휨모멘트-축인장력의 상호작용에 의해 연쇄붕괴에 저항하게 된다(〈그림 3〉 참조). 2경간 보의 거동은 세단계, 즉, 보작용단계, 휨모멘트-축인장력 상호작용단계, 그리고 완전인장재 단계로 구분된다. 아울러 2경간 보의 수직내력 대 현회전각의 관계는 〈그림 4〉와 같다.

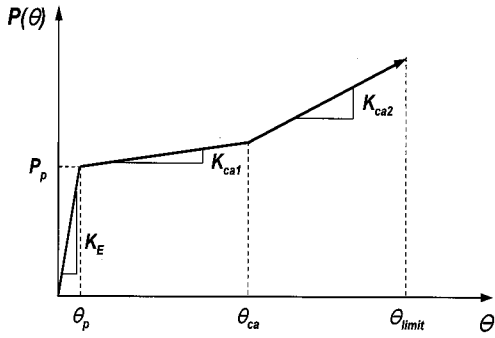


〈그림 3〉 2경간 철골보 부재의 휨모멘트-축인장력 상호작용 관계



〈그림 4〉 2경간 철골보 부재의 수직내력 대 현회전각 관계

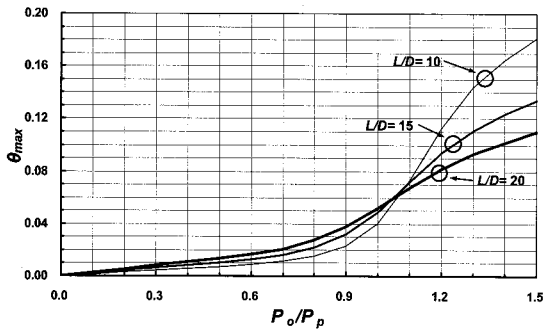
비선형 정적 근사해석법은 에너지균형개념에 기초한 것으로 수직내력 대 현회전각의 관계를 근사모델화(〈그림 5〉 참조)하여 외부가 한 일(external work)과 2경간 보에 의해 내부가 한 일(internal work)이 에너지균형을 이룬다는 개념에 근거하여 2경간 보의 수직처짐을 산정하는 방안이다( (1)식 참조).



〈그림 5〉 2경간 철골보 부재의 수직내력 대 현회전각의 근사모델

$$P_u \times \delta_{bal} = \sum_i \int_0^{\delta_{bal}} P_{ui} d\delta \quad (1)$$

붕괴스펙트럼을 활용한 비선형 동적 근사해석법은 비선형 동적 유한요소해석결과를 통해 작성된 새로운 개념의 붕괴스펙트럼(collapse spectrum) (〈그림 6〉 참조)을 활용하여 (2)와 (3)식의 등가의 수직 내력비( $P_o/P_p$ )와 경간길이 대 보춤 비(equivalent span-to-depth ratio,  $L/D$ )만으로 2경간 보의 수직처짐을 산정하는 방안이다.

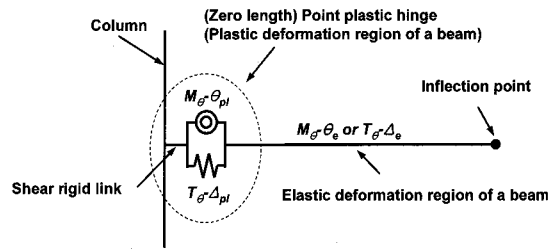


〈그림 6〉 연쇄붕괴방지설계를 위한 붕괴스펙트럼

$$\left(\frac{P_o}{P_p}\right)_{eq} = \frac{\sum_i P_{oi}}{\sum_i P_{pi}} \quad (2)$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{eq} = \frac{\sum_i P_{pi} \left(\frac{L}{D}\right)_i}{\sum_i P_{pi}} \quad (3)$$

마지막으로 상용 전산구조 해석프로그램에 활용할 수 있는 병렬소성힌지(parallel moment-axial tension hinge)를 활용한 비선형 동적해석법은 2경간 보부재의 휨모멘트-축인장력 상호관계를 두 개의 소성힌지로 치환하는 방안으로 그 개념은 〈그림 7〉과 같다. 이 상의 세가지 방안들은 엔지니어들이 쉽고 효율적으로 사용할 수 있는 방안이며, 자세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다.



〈그림 7〉 전산구조해석을 위한 병렬소성힌지모델

#### 4. 결론

본 원고에서는 예기치 않은 폭발물 테러나 가스폭발, 건축구조적 개념을 무시한 리모델링 시공 등으로 발생할 수 있는 일련의 사건들에 대한 방폭 및 연쇄붕괴방지설계의 기본개념 및 설계방법들에 대해서 살펴보았다. 최근이 이러한 사건들이 빈번하게 일어나면서 방폭설계 및 연쇄붕괴방지설계에 대한 일반인들의 인식도 점차 높아지고 있고, 국가기관을 중심으로 법제화도 추진되고 있는 상황이다. 하지만 이에 대한 국내 엔지니어 및 연구기관의 기술적, 전략적 대응능력은 세계 건설시장에서 국내건설사의 기술력의 우수성을 인정받고 있음에도 불구하고 일부 분야를 제외하고는 선진국에 비해 아직 태동단계에 머무르고 있는 것이 국내의 현실이다. 이는 아직 특수분야이며 소수의 공공발주만이 방폭 및 연쇄붕괴방지설계를 요구하는데 따른 건설사와 엔지니어들의 무관심 및 필요성의 부족, 더불어 사회적으로 엔지니어링 기술의 경시풍조가 낡은 복합적인 결과물이라 여겨진다. 이에, 각 기관과 전문가 등은 조속히

방폭 및 연쇄붕괴방지설계에 대한 기술력 확보를 통해 선진외국사에 미래시장을 선점당하거나 기술적 종속이 되는 일이 없도록 하여야 할 것이다.

**- 참고문헌 -**

- Cormie, D. Mays, G., and Smith, P., Blast effects on buildings, 2nd ed., thomas telford, 2009.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, FEMA427, FEMA, Washington, D.C., 2003.
- Lee, C.-H., Kim, S., Han, K.-H., and Lee, K., "Simplified Nonlinear Progressive Collapse Analysis of Welded Steel Moment Frames," Journal of Constructional Steel Research, Vol.65, No.5, pp.1130-1137, 2009.
- Lee, C.-H., Kim, S., and Lee, K., "Parallel Axial-Flexural Hinge Model for Nonlinear Dynamic Progressive Collapse Analysis of Welded Steel Moment Frames," Vol.136, No.2, pp.165-173, 2010.
- Starossek, U., Progressive collapse of structures, thomas telford, 2009.