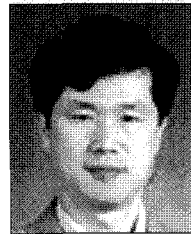
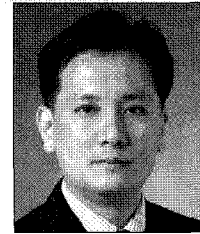


# 고층 건물의 연쇄붕괴 거동평가

## Performance Evaluation of Building Structures Against Progressive Collapse



김진구\*



최현훈\*\*

\* 성균관대학교 건축공학과 부교수  
 \*\* 성균관대학교 건축공학과 연구교수

### 1. 서론

구조물의 붕괴는 인류가 인위적으로 거주할 공간을 만들기 시작하면서 발생하였다고 볼 수 있다. 이러한 구조물의 붕괴는 새로운 구조형식을 시도하거나 시공과정에서 발생하는 부실공사, 지진이나 바람 등과 같은 자연력에 의하여 발생하였다. 기원전 1750년경에 작성된 최초의 성문법인 함무라비 법전 229조에는 다음과 같이 건축물 붕괴시 그 처벌에 대하여 규정하고 있다. "If a builder builds a house for a man and does not make its construction firm and the house collapses and causes the death of the owner of the house-that builder shall be put to death." 이처럼 건물의 붕괴는 오래전부터 사회적으로 중요한 관심사였다. 20세기 중반전까지 건물 붕괴의 주요 원인은 앞서 언급한 것과 같이 시공과정의 부실, 기술력의 부족과 외부에서 작용하는 자연력이었다. 그러나 1968년 영국의 Ronan Point 아파트 내부에서 발생한 가스폭발로 인한 건물의 부분적인 붕괴가 발생한 이후 그림 1과 같이 최근까지 크고 작은 붕괴사고가 발생하였다. 이들 중 1990년대 이후 발생한 건물 붕괴의 주요 원인은 대부분 건물 내외부에서 발생한 폭탄 테러였다. 몇몇 붕괴사고로 인하여 많은 인명피해와 경제적 손실

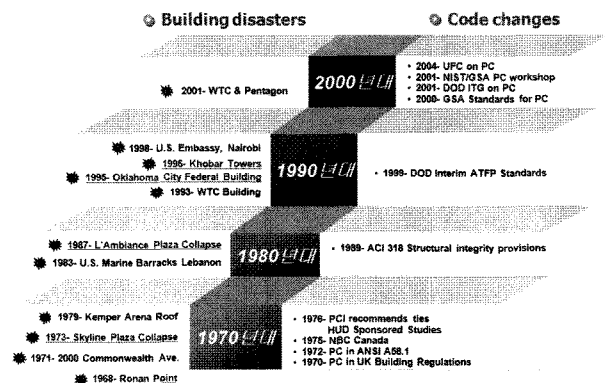


그림 1 건물 붕괴사고와 설계기준 변경 연표

이 발생한 이후 구조물의 붕괴를 방지하거나 그 가능성을 줄이기 위한 내용이 설계기준에 반영되거나 새로운 가이드 라인을 제정하였다.

건물 내외부에서 가스폭발이나 폭탄테러에 의해 발생한 충격파로 인하여 일부 구조부재가 손상되거나 파괴될 경우 파괴되거나 손상된 부재가 부담하던 하중은 인접부재로 전달되게 되고, 그 상부층은 지지부재의 손실로 인하여 큰 변형이 발생한다. 이러한 국부적인 파괴는 구조물 전체의 붕괴로 이어지거나 초기에 손상된 부재 부근이 붕괴되는 현상을 연쇄붕괴(progressive collapse)라고 한다. 2001년 발생

한 세계무역센터의 붕괴 이후 비정상 하중에 의한 구조물의 연쇄붕괴는 초고층 건물이나 주요 건물의 설계과정에서 고려해야 할 중요 사항 중 하나가 되었다.

최근 정형 건물의 구조시스템을 대상으로 연쇄붕괴 저항 성능에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Ellingwood<sup>1)</sup>는 연쇄붕괴 위험을 줄일 수 있는 방법과 각국의 설계기준에서 규정하고 있는 내용을 소개하였다. 구조물의 연쇄붕괴는 붕괴형태에 따라 다음과 같은 5가지의 유형으로 분류할 수 있다<sup>2)</sup>: i) pancake-type, ii) zipper-type, iii) domino-type, iv) section-type, v) instability-type. 이러한 연쇄붕괴 현상에 대한 연구에 함께 모멘트저항골조나 가새골조와 같은 전통적인 구조시스템의 연쇄붕괴 거동에 대한 해석적 연구가 국내외에서 수행되었다<sup>3-8)</sup>.

현재 FEMA-356 기준<sup>9)</sup>에서는 구조 부재의 이력거동 모델링과 성능수준을 제시하고 있으나 주로 지진해석이나 내진설계를 위하여 적용되고 있다. 연방정부의 재산을 관리하는 미국 GSA(General Services Administration, GSA)과 국방부(Department of Defense, DoD)에서 발간한 연쇄붕괴 설계 가이드라인<sup>10-11)</sup>에서도 각 구조시스템과 구조 부재의 성능한계 상태에 대하여 규정을 하고 있지만, 이에 대한 명확한 이론 및 실험에 의한 결과가 뒷받침하고 있지 않다.

최근 건설되거나 계획되고 있는 초고층 건물은 과거에 건설되었던 사각형 형태에서 벗어나 다양한 형태가 시도되고 있다. 이러한 흐름을 반영하듯 2006년 시카고에서 개최된 세계초고층학회(Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH)에서는 “Thinking Outside The Box: Tapered, Tilted, Twisted Towers” 라는 주제로 비정형 초고층 건물에 대한 다양한 문제에 대하여 논의하였다.

건물의 비정형성이 커질수록 설계과정에서 중력하중 뿐만 아니라 지진이나 풍하중 같은 횡하중에 대하여 세심한 고려 및 검토가 필요하다. 특히 도시의 랜드마크적 역할을

수행하게 되는 비정형 초고층 건물의 경우 1층 부재 뿐만 아니라 상부층의 부재들이 파괴될 경우 연쇄붕괴를 야기할 수 있는 위험 부재로 작용할 수 있으므로, 연쇄붕괴에 대비한 설계가 더욱 필요하다. 그러나 현재 고층 건물 특히 비정형 고층 건물의 연쇄붕괴 해석 및 성능평가에 대한 연구 결과가 미비하고 관련 기준이 정비되어 있지 않다.

본 기사에서는 다이어그리드 구조시스템(diagrid structural system)과 기울어진 건물(tilted building)의 연쇄붕괴 해석 결과를 소개하고자 한다. 소개된 연구결과는 제한된 구조물을 대상으로 하였으며, 형태 또한 정형건물에 가까우므로 초고층 건물의 연쇄붕괴 거동을 나타내는 일반적인 결과라고는 볼 수 없다. 그러나 본 기사에서 소개한 내용이 다양한 형태를 가진 초고층 건물의 연쇄붕괴 거동을 예측할 수 있는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 연쇄붕괴 해석법

비정상 하중에 의한 구조물의 연쇄적인 붕괴해석은 주요 구조부재가 파괴되는 시나리오를 예상하고 이 파괴가 연쇄붕괴로 이어질지에 대한 평가를 수행하는 방법이 주로 사용되고 있다. 현재 사용되고 있는 해석프로그램들을 이용하여 연쇄붕괴 현상을 간접적으로 고려할 수 있는 대표적인 방법은 GSA나 DoD의 가이드라인에서 제안하고 있는 정적해석법과 동적해석법이다. 정적해석법에서는 비정상 하중으로 인하여 임의의 기둥이 파괴되었을 때 해당 골조에 발생하는 순간적인 충격의 영향을 고려하기 위하여, 그림 3과 같이 기둥이 제거된 골조의 중력하중의 크기를 증가시켜 해석하는 방법을 사용하고 있다.

정적해석시 고려하는 고정하중(DL)과 적재하중(LL)의 크기는 GSA에서는  $2(DL+0.25LL)$ 의 하중조합을 적용하여 해석하고, DoD 기준에서는 중력하중 뿐만 아니라 풍하중(W)이 작용하는 상황까지 고려한  $2(1.2DL+0.5LL)+0.2W$ 의 하중조합을 적용하여 해석을 수행하도록 권고하고 있다. 이러한 하중조합에 대하여 전체 시스템의 연쇄붕괴 저항성



그림 2 2006년 세계 초고층학회 포스터와 비정형 건물 사례

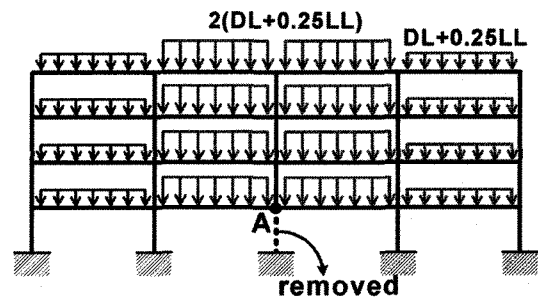


그림 3 비선형 정적해석시 작용하는 하중

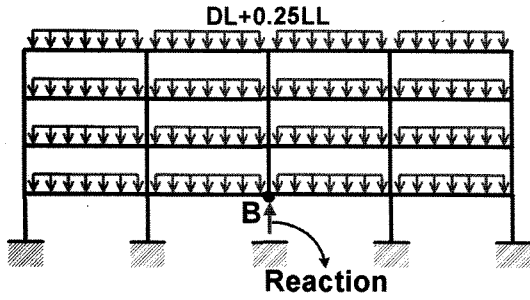


그림 4 비선형 동적해석시 작용하는 하중

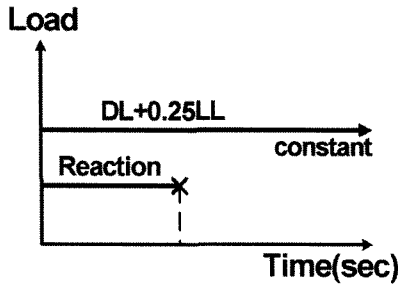


그림 5 연쇄붕괴 해석을 위한 동적하중 가력방법

능은 횡하중에 대한 구조물의 성능을 평가하기 위하여 사용되는 pushover 해석법을 응용한 pushdown 해석을 수행하여 평가할 수 있다. Pushdown 해석은 기둥이 제거된 위치(그림 3의 A점)의 수직변위를 조금씩 증가시키면서 그 때 필요한 하중을 계산하는 방식으로 진행된다. 이 하중은 앞서 언급한 하중조합을 기준으로 모든 위치의 하중을 동일한 비례로 증가시켜 결정한다. 따라서 수직변위가 점차적으로 증가함에 따라 모든 부재에 작용하는 하중도 동일한 비례로 증가한다.

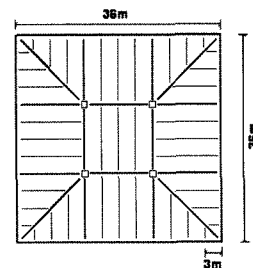
반면 동적해석법은 중력하중의 크기를 증가시키지 않고 그림 4와 같이 모든 경간에 고정하중과 적재하중의 25%를 조합(DL+0.25LL)한 중력하중을 가한다. 부재가 제거되기 전 이 부재에 작용하는 하중을 산정한 다음 그림 4와 같이 제거되기 전 부재에 작용하던 하중을 기둥이 제거된 지점의 보-기둥 접합부(그림 4의 B점)에 반력으로 가해줌으로써 손상되기 전 구조물의 안정화된 상태를 구현할 수 있다. 이 때 고려하는 반력은 축력, 전단력과 모멘트이다. 이 상태에서 부재가 순간적으로 제거되는 현상을 구현하기 위해서 그림 5와 같이 일정 시간이 지난 후 반력을 순간적으로 제거한다.

### 3. 다이어그리드 시스템의 연쇄붕괴 저항성능

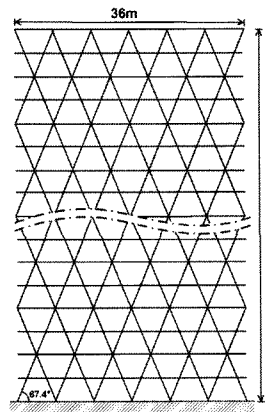
본 기사에서는 36층 다이어그리드 시스템의 연쇄붕괴 저항성능을 비선형 정적해석 및 동적해석을 이용하여 평가하였다.

### 3.1 예제 구조물의 설계

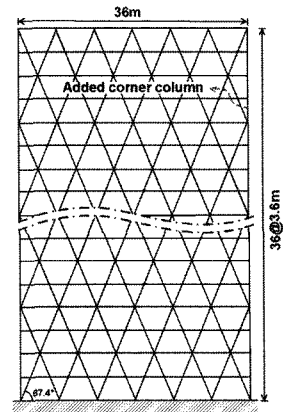
예제 구조물은 그림 6과 같으며 설계는 Midas Genw<sup>12)</sup>을 이용하여 수행하였다. Moon<sup>13)</sup>의 연구 결과에 따르면 다이어그리드 시스템에서 가새를 보와 약 65~75°의 기울기로 설치할 경우 횡하중에 대하여 가장 효과적으로 저항하는 것으로 나타났다. 따라서 가새를 6m 간격으로 배치하고 67°의 기울기로 다이어그리드 시스템을 설계하였다. 설계하중은 건축구조설계기준(KBC-2005)<sup>14)</sup>에 따라 고정하중 4.0kN/m<sup>2</sup>, 적재하중 2.5kN/m<sup>2</sup>을 적용하였고, 풍하중은 노풍도 A, 기본 풍속 30m/sec, 중요도 계수 1.1, 가스트 영향계수는 유연 구조물로 각 구조물에 해당하는 값을 산정하였다. 설계 지진 하중을 산정하기 위하여 지진구역 1, 지반계수 S<sub>B</sub>, 중요도 계수 1.5, 반응수정계수는 기타골조에 해당하는 3을 적용하였다. 예제 구조물의 기둥은 SM490강재를 사용하였고, 가새와 보는 SS400강재를 사용하였다. 각 부재의 설계는 AISC의 하중저항계수설계법<sup>15)</sup>을 적용하였다.



(a) 평면



(b) 다이어그리드 입면



(c) 다이어그리드 입면 (모서리 기둥 추가)

그림 6 예제 구조물의 평면 및 입면

### 3.2 다이어그리드 시스템의 거동

구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 평가하기 위하여 범용 해석프로그램인 SAP2000<sup>16)</sup>을 이용하여 연쇄붕괴 해석을 수

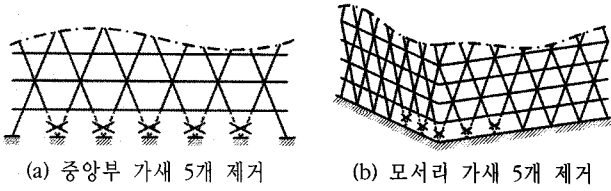


그림 7 다이어그리드 구조물의 가새 제거 위치

행하였다. 주요 구조부재의 제거위치는 그림 7에 나타낸 것과 같이 구조물 측면의 1층 중앙에 위치한 가새를 순차적으로 1개에서 5개까지 제거한 경우와 구조물의 모서리에 설치된 가새를 양 측면으로 1개에서 5개까지 제거하면서 구조물의 붕괴저항성을 평가하였다. 예제 구조물의 3차원 비선형 정적해석 및 동적해석은 GSA 가이드라인에 따라 수행하였다.

비선형 정적해석인 pushdown 해석은 가새 및 기둥이 제거된 위치의 중앙부의 수직방향 변위를 증가시키면서, 각 변위 단계에서 구조물에 재하되는 하중과 가이드라인에 규정된 하중조합(DL+0.25LL)에 대한 비(load factor)를 구하는 일련의 과정이다. 여기서 최대 하중계수(load factor)가 1보다 작으면 구조물이 비선형 정적해석에 규정된 하중에 저항하지 못함을 의미한다.

그림 8은 36층 다이어그리드 구조물의 중앙부 가새를 5개 제거하고 비탄성 정적 및 동적해석을 수행한 결과를 나

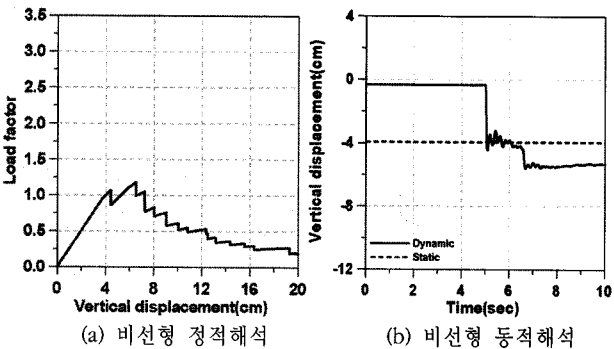


그림 8 다이어그리드 시스템의 중앙부 가새 5개 제거

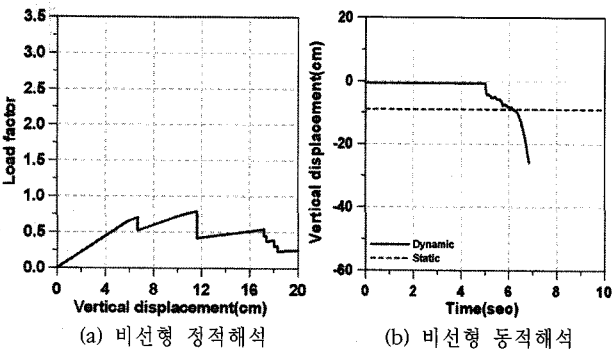


그림 9 다이어그리드 시스템의 모서리 가새 5개 제거

타낸다. 중앙부의 가새를 제거한 경우 비선형 정적해석 결과에 따르면 하중계수가 1.0을 약간 초과하는 것으로 나타났다. 5개의 가새를 동시에 제거하고 비선형 동적해석을 수행한 결과를 보면 소수의 부재만 항복강도에 도달했을 뿐 전체적인 붕괴기구는 형성되지 않았다. 그림 8(b)의 비선형 동적해석 결과에서 점선은 같은 중력하중 조건에서의 정적해석을 통한 수직변위를 나타낸 것으로 동적 처짐량이 정적해석에 의한 처짐보다 크을 알 수 있다.

그림 9는 모서리의 가새를 제거한 해석 결과를 나타내며, 3개의 가새를 제거할 때까지는 별다른 붕괴 위험이 나타나지 않았지만, 5개의 모서리 가새를 제거했을 경우 하중계수가 약 0.7로 현저하게 줄어들었다. 이러한 경향은 그림 9(b)의 비선형 동적해석 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 6(c)와 같이 모서리 4곳에 기둥이 추가된 다이어그리드 시스템의 해석 결과는 그림 10~그림 11과 같다. 전체적으로 모서리 기둥이 없는 다이어그리드 시스템의 결과와 유사한 것으로 나타났으며, 중앙부의 가새가 5개 제거됐을 경우 하중계수가 기둥이 없는 경우보다 약간 증가하고, 동적해석 결과에 따르면 최대 수직변위가 감소하는 것으로 나타났다. 모서리 가새가 5개 제거된 경우에는 정적해석에 의한 하중계수가 1보다 작으며, 동적해석 결과에 따르면

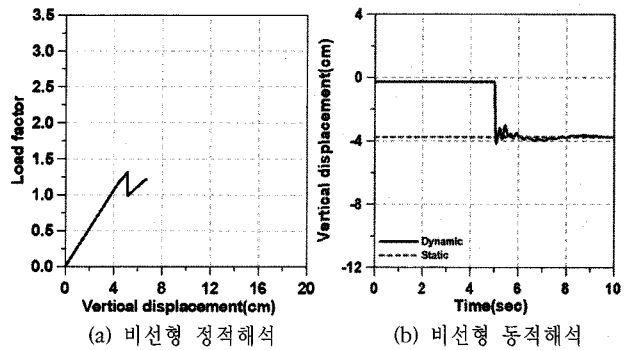


그림 10 모서리에 기둥이 설치된 다이어그리드 시스템의 중앙부 가새 5개 제거

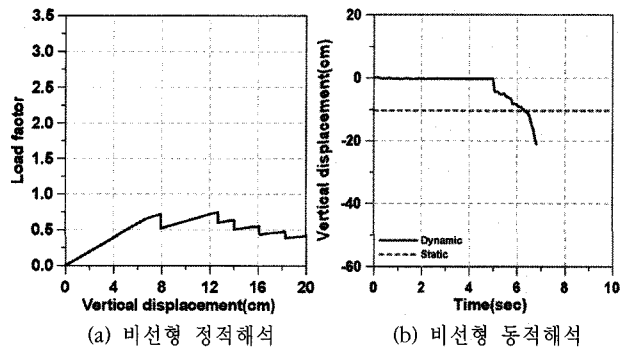
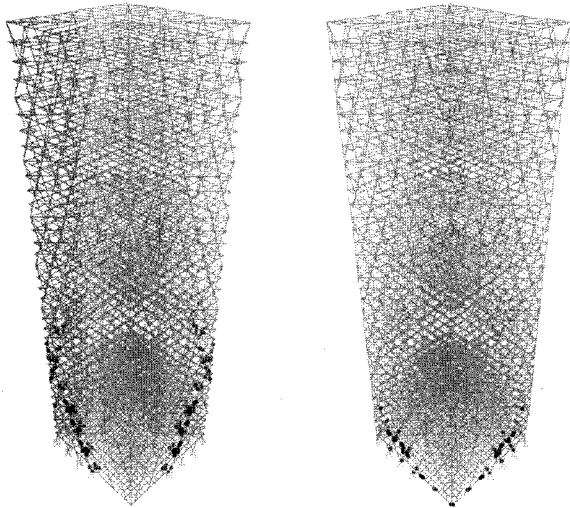


그림 11 모서리에 기둥이 설치된 다이어그리드 시스템의 모서리 가새 5개 제거



(a) 다이어그리드 (b) 다이어그리드(모서리 기둥추가)  
그림 12 모서리 가새 5개 제거시 소성한지 분포

구조물이 붕괴되는 것으로 나타났다(그림 11).

붕괴모드를 나타낸 그림 12에 따르면 가새 부재의 손상은 가새가 제거된 위치에서 시작하여 사선방향으로 진행되어 구조물의 상부층으로 전달되어 구조물이 측면으로 기울면서 붕괴되는 것으로 나타났다. 그러나 모서리에 기둥을 설치한 경우(그림 12(b)) 가새부재의 파괴가 가새가 제거되지 않은 면까지 이어지지 않고 기둥이 있는 모서리에서 멈추었다.

#### 4. 기울어진 건물의 연쇄붕괴 거동평가

##### 4.1 예제 구조물의 설계

기울어진 건물의 연쇄붕괴 거동을 평가하기 위한 예제 구조물은 먼저 기울지 않은 6층 4경간의 철골조 건물을 설계하고, 부재 크기의 변화없이 수직방향으로부터 0°, 5°, 10°, 15°의 기울기를 가진 건물이다. 설계하중은 건축구조 설계기준(KBC-2005)<sup>14)</sup>에 따라 산정하였고, 고정하중 4.5 kN/m<sup>2</sup>, 적재하중 2.5kN/m<sup>2</sup>을 사용하였고, 지진하중 산정을 위한 설계계수인 지역계수는 0.11, 중요도 계수는 1.2, 반승수정계수는 모멘트저항골조에 해당하는 6을 적용하였다. 지반종류는 단단한 토사지반인 S<sub>D</sub>지반으로 가정하였고, 설계스펙트럼 가속도계수인 S<sub>Ds</sub>와 S<sub>D1</sub>는 각각 0.53과 0.34이다. 풍하중을 위한 설계 변수로는 노풍도 B, 기본풍속 30 m/s, 중요도 계수 1, 가스트 영향계수는 2.2를 적용하였다. 연쇄붕괴 발생시 기울어진 각도의 변화에 따른 구조물 거동을 파악하기 위하여 그림 13과 같은 입면을 가진 구조물을 대상으로 해석을 수행하였다.

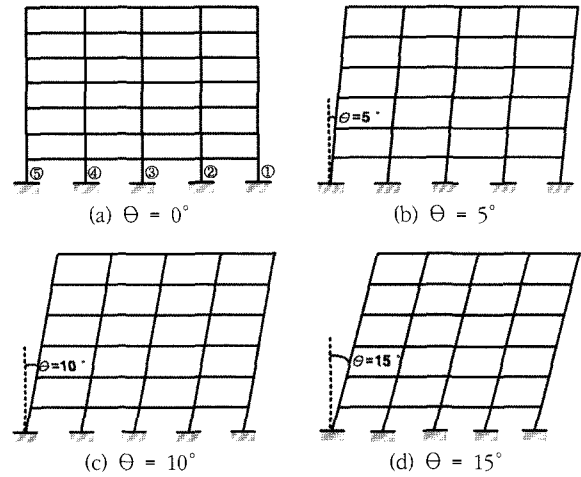
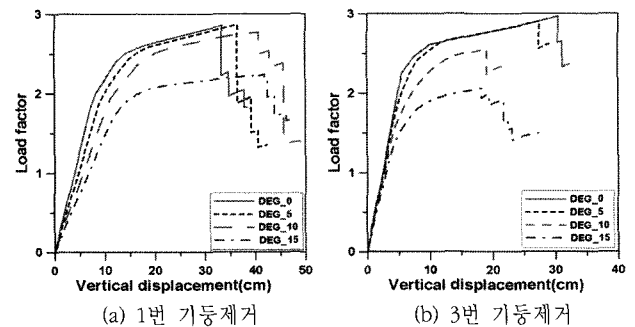


그림 13 예제 구조물의 입면

##### 4.2 연쇄붕괴 해석결과

6층 예제 구조물의 기둥의 제거위치를 그림 13(a)와 같이 다르게 하여 pushdown해석을 수행한 결과는 그림 14와 같다. 예제 구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 살펴보면 하중계수(load factor) 값이 1을 초과하여 연쇄붕괴에 대하여 큰 저항력을 보유하고 있음을 알 수 있다. 이는 해석 모델이 횡하중을 고려하여 설계되었기 때문에 중력하중에 대해서 부재들이 상당한 여유 강도를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그림 14(b)에 나타낸 것과 같이 내부기둥을 제거하였을 때 기울어진 각도가 5°인 경우에는 강성과 항복강도 측면에서 정형 구조물(0°)과 큰 차이가 없지만, 건물의 기울어진 각도가 커질수록 연쇄붕괴 발생시 구조물의 최대강도가 정형 구조물에 비하여 크게 줄어들었다. 외부기둥을 제거한 경우(그림 14(a))도 유사한 거동을 보임을 알 수 있다.

그림 15와 그림 16은 연쇄붕괴 발생 시 각 기둥이 분담하는 중력하중의 분담률을 나타낸 것이다. 기울어지지 않은 정형 구조물의 경우는 중력하중이 기둥의 분담면적에



(a) 1번 기둥제거 (b) 3번 기둥제거  
그림 14 기둥 제거 위치에 따른 6층 구조물의 pushdown 해석결과

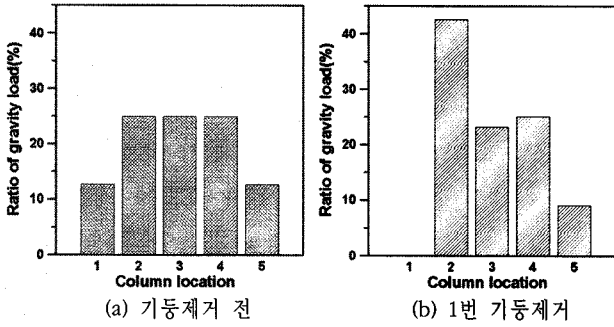


그림 15 정형 구조물에서 기둥의 축력 분담률

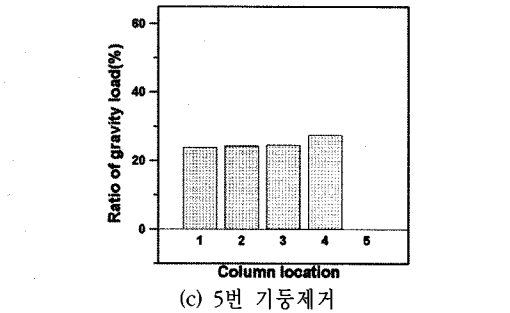
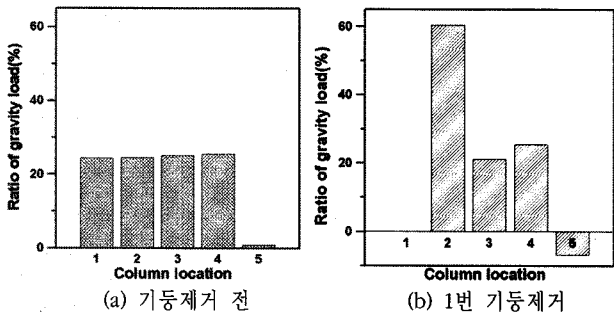


그림 16 15° 기울어진 구조물에서 기둥의 축력 분담률

따라 내부기둥이 외부기둥 보다 두 배의 중력하중을 부담하고 있음을 알 수 있다. 그러나 건물이 기울어질수록 기둥의 하중 부담률이 달라진다. 오른쪽 외부기둥(그림 13(a)의 1번)의 하중부담률을 비교해 보면 정형 구조물(0°)의 경우 약 12%의 하중을 부담하지만, 15° 기울어진 구조물의 기둥이 받는 하중분담률은 약 두 배정도 증가하였다. 반면 15° 기울어진 구조물의 왼쪽 기둥(그림 13(a)의 5번)의 경우 중력하중에 의한 압축력과 p-delta 효과에 의한 전도모멘트에 의하여 발생하는 인장력이 상쇄되어 중력하중 부담률이 약 2%정도로 대폭 감소한다. 정형 건물인 경우 기둥이 제거된 경우 가장 인접한 위치에 있는 기둥의 하중분담률이 크게 증가한다. 그러나 건물이 기울어진 경우에는 5번 기둥이 제거된 후에도 다른 기둥들의 하중 부담률은 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

기둥이 제거됨으로써 발생하는 해석모델의 소성힌지 위치와 휨모멘트 다이어그램은 그림 17~18과 같다. 정형 구

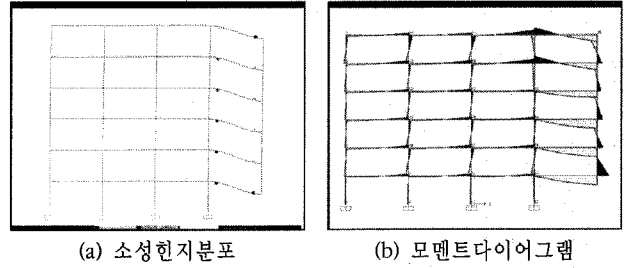


그림 17 정형 구조물의 pushdown 해석결과

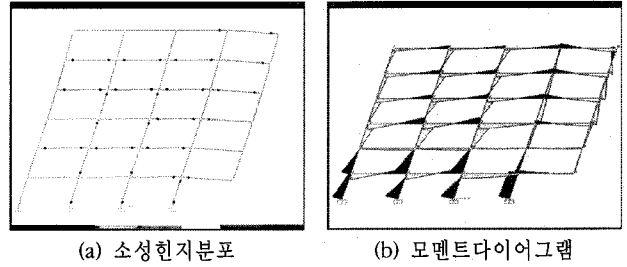


그림 18 15° 기울어진 구조물의 pushdown 해석결과

조물에서 외부기둥이 제거되면 기둥이 제거된 경간의 보들에 큰 모멘트가 발생하여 소성힌지가 형성되었다. 그러나 기울어진 구조물의 경우는 기둥이 제거됨으로써 구조물 전체가 오른쪽으로 기울어지는 현상이 발생하여, 기둥이 제거된 경간 뿐만 아니라 다른 경간에 위치한 보와 기둥의 휨모멘트가 큰 폭으로 증가하고, 구조물 전체에 소성힌지가 발생하는 것을 알 수 있다.

### 5. 맺음말

본 기사에서는 비선형 정적해석 및 동적해석을 통하여 다이어그리드 구조시스템과 기울어진 건물의 연쇄붕괴 저항성능 평가결과를 소개하였다.

다이어그리드 시스템의 해석결과에 따르면 1층에서 부재의 손상이 발생할 경우 손상이 사선방향으로 진행하며 상부층으로 전달되지만, 모서리에 기둥을 추가할 경우 손상이 기둥이 설치된 모서리에서 중단되기 때문에 모서리 기둥이 없는 다이어그리드 시스템보다 좀 더 안전한 파괴모드를 보였다. 또한 비선형 정적해석인 pushdown 해석을 통하여 기울어진 구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 평가한 결과에 따르면 기울기가 커질수록 연쇄붕괴 발생시 강성과 항복강도가 감소하였다. 그리고 기울어진 정도와 기둥의 제거 위치에 따라 기둥의 축력분담률이 달라지기 때문에 중력하중에 대한 부담률이 현저히 큰 기둥에 대해서는 연쇄붕괴를 방지하기 위한 적절한 조치가 필요한 것으로 사료된다. 기울어진 구조물인 경우 중력하중과 함께 편심으로

인한 추가적인 모멘트로 기둥과 보에 모두 큰 모멘트가 발생하고, 기둥이 제거된 공간 뿐만 아니라 더 넓은 범위에 소성현상이 발생하는 것으로 나타났다.

일반적인 건물의 경우 1층에 위치한 기둥이 가장 큰 중력하중을 부담하므로 제거될 경우 가장 큰 피해가 발생하게 된다. 그러나 베이징의 CCTV 사옥과 같이 비정형성이 큰 고층건물의 경우 부재의 손상으로 인한 연쇄붕괴 가능성이 가장 큰 구조요소를 파악하는 것이 쉽지 않다. 이러한 경우 수많은 부재를 하나씩 제거해 가며, 비탄성해석을 수행하고 연쇄붕괴 거동을 파악하는 것은 현실성이 없다. 따라서 비정형 건물의 위험부재들을 손쉽게 찾아내고, 그 부재들에 대한 연쇄붕괴 정밀해석을 수행하는 것이 현실적인 대안이다. 또한 세계무역센터 붕괴사태에서 관찰되었듯이 화재로 인하여 중간층의 보가 파괴되었을 때 연결된 기둥의 좌굴 길이가 증가하여 기둥의 좌굴 파괴가 발생할 수 있으며 상부층 슬래브가 추락하여 하부층에 충격하중으로 작용하는 경우가 발생하는데, 이러한 현상들에 대한 정확한 모델링이 필요하다. 또한 비선형 해석을 수행할 때 구조부재의 한계상태에 대한 규정 등 건물의 연쇄붕괴와 관련하여 해결하여야 할 많은 문제들이 산적하여 있으며, 이에 대한 꾸준한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Ellingwood, B.R., "Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 20, No. 4, pp.315-323, 2006
2. Starossek, U., "Typology of progressive collapse," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 9, pp.2302-2307, 2007
3. Powell, G., "Progressive collapse: Case studies using nonlinear analysis," *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York, 2005
4. Khandelwal, K., and El-Tawil, S., "Progressive collapse of moment resisting steel frame buildings," *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York, 2005
5. Tsai, M.H., and Lin, B.H., "Investigation of progressive collapse resistance and inelastic response for an earthquake-resistant RC building subjected to column failure," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp.3619-3628, 2008
6. 김진구, 박준희, "튜브시스템 건물의 연쇄붕괴 저항성능 평가," *대한건축학회 논문집 구조계*, 23권, 11호, pp.11-18, 2007
7. 김진구, 이영호, 최현훈, "가새골조의 연쇄붕괴 저항성능," *한국전산구조공학회 논문집*, 21권, 5호, pp.429-437, 2008
8. 김진구, 안다운, "현수작용을 고려한 철골모멘트골조의 연쇄붕괴 해석," *대한건축학회 논문집 구조계*, 24권, 1호, pp.55-62, 2008
9. FEMA, *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, Report FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000
10. General Services Administration, *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, Washington, D.C., 2003
11. Department of Defense, *Design of buildings to resist progressive collapse*, Unified Facilities Criteria(UFC) 4-023-03, Washington, D.C., 2005
12. MIDAS IT, "MIDAS/Gen. Integrated Design System for Building and General Structures," Ver.7.4.0., MIDAS Information Technology, Co., Ltd., 2007
13. Moon, K.S., "Diagrid Structural systems for tall buildings, characteristics and methodology for preliminary design," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16, pp.205-230, 2007
14. 대한건축학회, *건축구조설계기준*, 2005
15. AISC, *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2000
16. SAP2000, "Structural Analysis Program," *Computers and Structures*, Berkeley, 2004

[담당 : 김현수, 편집위원]