

# 철골조의 연쇄붕괴 민감도 해석

## Sensitivity Analysis of Steel Frames Subjected to Progressive Collapse

박 준 희\*      김 진 구†      이 태 형\*\*  
Park, Jun-Hei      Kim, Jinkoo      Lee, Tae-Hyung  
(논문접수일 : 2008년 5월 6일 ; 심사종료일 : 2008년 6월 18일)

### 요 지

최근 구조물의 국부적인 손상이 전체적인 붕괴로 이어지는 연쇄붕괴 현상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연쇄붕괴에 관한 기존의 연구는 대부분 해석변수의 불확실성을 포함하지 않는 확정론적인 방법이므로, 해석결과에 대한 신뢰도를 알 수 없다. 본 논문에서는 재료의 항복강도, 활하중의 크기, 감쇠비, 탄성계수 등의 설계변수들이 기둥이 제거됨에 따라 발생하는 수직변위에 영향을 미치는 민감도를 분석하였다. 이를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션, 일계이차법, 토네이도 다이어그램의 세가지 해석기법을 적용하였다. 비선형정적 해석결과에 의하면 난수로 설정한 해석변수들 중에서 보의 항복강도가 수직변위의 변동폭이 가장 컸으며, 비선형동적해석의 경우 보의 항복강도와 감쇠비가 서로 유사한 변동폭을 가지는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 민감도 해석, 연쇄붕괴, 몬테카를로시뮬레이션, 토네이도 다이어그램, FOSM

### Abstract

Recently a lot of researches have been conducted on the progressive collapse of structures which is the total collapse of structures initiated by localized damage. Most of the previous studies on the field of progressive collapse have followed deterministic approach without considering uncertainty involved in design variables, which results in unknown reliability of the analysis results. In this study the sensitivity analyses are carried out with design variables such as yield strength, live load, damping ratio, and elastic modulus on the vertical deflection of the joint from which a column is suddenly removed. The Monte Carlo simulation, tornado diagram method, and the first order second moment method(FOSM) are applied for the sensitivity study. According to the nonlinear static analysis results, the vertical deflection is most affected by the variation of yield strength of beams. The nonlinear dynamic analyses show that the behaviour of model structures is highly sensitive to variation of the yield strength of beams and the structural damping ratio.

**Keywords** : sensitivity analysis, progressive collapse, Monte Carlo simulation, tornado diagram, first order second moment method

### 1. 서 론

연쇄붕괴는 폭발하중, 화재, 충격하중 등 현행 설계하중에 포함되지 않는 비정상하중에 의하여 구조물의 주요 하중 전달 요소의 파괴가 구조물 전체에 도미노현상처럼 이어지는 붕괴 현상이다. 1968년 런던에서 발생한 Ronan Point Residential Apartment 가스폭발 사고를 기점으로 2001년 건물전

체가 붕괴된 World Trade Center Tower, 2003년 차량 폭탄 테러에 의해 부분 파괴된 Istanbul HSBC 본사 등 국내 외적으로 비정상하중에 의한 연쇄붕괴 사례가 있으며, 이러한 연쇄붕괴에 대한 위험이 증가하는 추세이다. 이를 반영하여 2003년 미국에서는 General Service Administration (GSA, 2003)와 2005년 Department of Defence(DoD, 2005)에서는 가이드라인을 제시하여 연쇄붕괴에 대한 설계와

† 책임저자, 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 부교수  
Tel: 031-290-7563 ; Fax: 031-290-7570  
E-mail: jkim12@skku.edu

\* 성균관대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 건국대학교 토목공학과 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

해석에 관하여 언급하고 있다.

연쇄붕괴해석을 통하여 얻어진 정보들은 비정상하중에 의한 구조물의 국부적인 손상이 발생한 경우 구조물의 거동을 예측할 수 있으며, 이러한 예측을 통해 다음 단계의 파괴를 방지하여 건물의 거주자 및 인명구조에 대한 안전도를 증가시킬 수 있다(Krauthammer 등, 2002).

기존의 연쇄붕괴해석에서 일반적으로 사용되는 방법은 확정론적 방법(deterministic approach)이다(Kaewkulchai 등, 2003). 하나의 고정된 값만을 대표값으로 사용하는 기존의 확정론적 방법은 변수의 불확실성을 고려하지 못하기 때문에 해석결과의 신뢰도를 알 수 없다. 반면에 확률이론에 근거한 민감도 해석은 위에서 언급한 불확실성을 정량적으로 취급하여 확률변수의 변화에 따라 응답의 변화를 추정하는 민감도(sensitivity)정보를 파악할 수 있다. 민감도 해석은 지진해석시 변수들의 민감도를 분석하기 위하여 사용되어 왔지만, 연쇄붕괴해석에 적용된 사례는 없다. 연쇄붕괴는 건물이 일정한 안전율을 가지고 있더라도 부재의 재료, 작용하는 하중의 통계적인 특성에 따라 달라지기 때문에 설계변수들이 연쇄붕괴에 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 해석이 필요하다. 본 연구는 비선형정적해석과 비선형동적해석을 수행하여 제거된 기둥에서 수직변위를 산정한다. 각각의 입력 변수에 의하여 발생한 수직변위의 변동폭을 조사함으로써 연쇄붕괴에 민감한 변수들을 찾았다.

## 2. 예제모델 및 해석방법

### 2.1 예제모델의 설계

예제 모델은 그림 1과 같이 3층 3경간 철골모멘트저항골조로써 건축구조설계기준 2005을 적용하여 부재를 설계하였다(대한건축학회, 2005). 설계하중은 고정하중  $5\text{kN/m}^2$ , 활하중  $2.5\text{kN/m}^2$ 이며, 부재는 내부기둥은  $\text{H}300 \times 300 \times 10 \times 16$ , 외부기둥은  $\text{H}250 \times 250 \times 14 \times 14$ , 보는  $\text{H}300 \times 120 \times 8 \times 13$ 로 설계하였다. 해석시 재료의 항복강도가 기둥은  $\text{SM}490$  ( $32.4\text{kN/cm}^2$ ), 보는  $\text{SS}400$  ( $23.5\text{kN/cm}^2$ )인 강종을 사용하였다. 기둥과 보의 접합부는 패널존의 강성을 고려하여 모델링하였다(Krawinkler 등, 2000). 해석모델은 그림 1에서 평면의 점선으로 표기된 외부골조만을 분리하여 비선형해석프로그램인 Opensees(Mazzoni, 2005)를 사용하여 해석하였다. 해석시 기둥과 보는 Nonlinear beam column요소를 사용하고, 모든 요소의 적분점은 5개로 하였다. 재료의 이력모델은 그림 2와 같이 이선형모델인 Steel01을 사용하였으며, 항복후 강성비는 2%로 가정하였다. 보의 대변형에 의하여 발생할 수

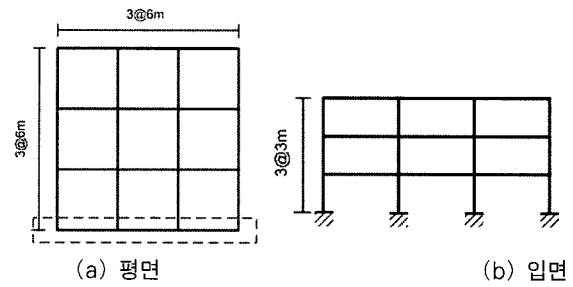


그림 1 해석모델

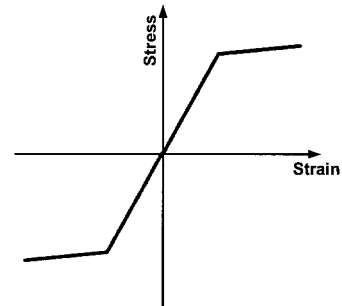


그림 2 Steel01의 이력모델 (Mazzoni, 2005)

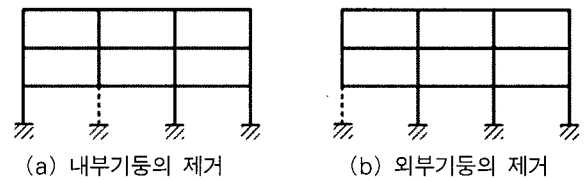
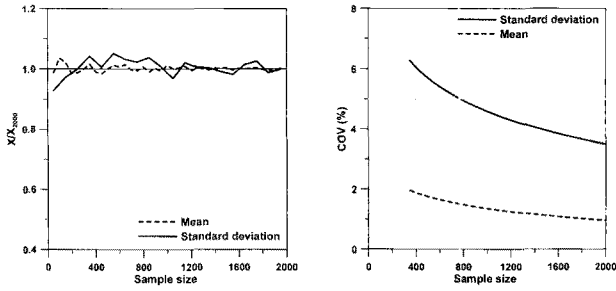


그림 3 제거된 기둥의 위치

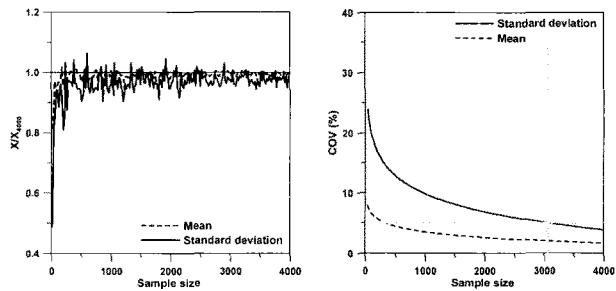
있는 현수 작용을 고려하기 위하여 Corotational 옵션을 적용하였다. 비정상하중에 의하여 초기에 손상을 입은 부재는 그림 3과 같이 1층의 외부기둥일 경우와 내부기둥일 경우로 가정하였다.

### 2.2 변수들의 수렴해석

연쇄붕괴해석과 관련된 변수들을 표 1과 같이 보 및 기둥의 항복강도, 적재하중, 감쇠비, 탄성계수로 구분하고 각각의 평균과 표준편차를 가정하였다(김종락 등, 2000, Lee, 2005, Harris 등, 1981). 난수를 생성하기 위하여 Monte Carlo Simulation(이후 MCS) 방법을 사용하였다. MCS는 생성된 난수의 개수에 따라 오차율이 변하므로 변수들의 최소 표본수에 대한 연구가 선행되어야 한다. 표본수는 변동계수(Coefficient of variance)가 5%일 때를 최소 표본수로 설정하였다. 정적해석인 경우에는 감쇠비를 제외한 변수들 중에서 변동계수가 가장 큰 활하중을 기준으로 하였으며, 동적해석인 경우에는 변동계수가 가장 큰 감쇠비에 대하여 수렴해석을 수행하였다. 그림 4(a)는 적재하중의 표본수에 따른 평균과 표준편차를 최종 표본수로 정규화 시킨 결과이다.



(a) 평균과 표준편차의 정규화 (b) 평균과 표준편차의 변동계수  
그림 4 적재하중의 평균과 표준편차에 대한 수렴해석결과



(a) 평균과 표준편차의 정규화 (b) 평균과 표준편차의 변동계수  
그림 5 감쇠비의 평균과 표준편차에 대한 수렴해석결과

표 1 해석변수들의 통계적 데이터 (Unit: kN, cm)

변수	평균	표준편차	변동계수(%)	분포함수
보의 항복강도	23.5	1.24	5.28	Logn'1
기둥의 항복강도	32.5	3.28	10.10	Logn'1
적재하중	0.000274	0.0000488	17.83	Logn'1
감쇠비	0.05	0.02	40.00	Logn'1
탄성계수	20594.0	679.602	3.30	Normal

표본수가 증가할수록 평균과 표준편차가 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 해당 변수의 평균과 표준편차에 대한 COV를 산정한 결과이다. 그 결과 정적해석에서는 활하중이 765개, 동적해석에서는 감쇠비가 3060개인 경우 COV값이 5%가 되었다. 따라서 정적해석인 경우는 1000개, 동적해석인 경우는 3100개의 표본을 추출하였다.

### 2.3 민감도 해석

본 연구에서는 민감도해석을 수행하기 위하여 세가지 해석 기법을 적용하였다. 첫째 입력값과 결과값 모두 확률적으로 접근한 MCS, 둘째 확률적으로 접근하지 않은 토네이도 다이어그램해석(Tornado diagram analysis, 이후 TDA), 셋째 MCS에 비하여 확률적 접근이 쉬운 First Order Second Moment(FOSM)이론을 적용하였다.

MCS는 가정한 확률분포함수를 이용하여 생성된 난수를 구조해석에 사용한다. 각각의 입력되는 난수에 따라 결과값이 얻어지므로, 생성된 모든 난수에 대하여 많은 양의 해석

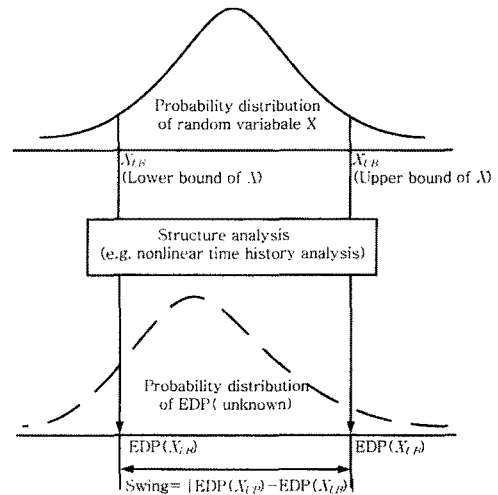


그림 6 토네이도 다이어그램 방법(Lee, 2006)

을 수행해야 한다.

TDA는 최근 민감도해석에서 자주 사용하는 방법이다 (Porter 등, 2002). 그림 6과 같이 입력난수의 하한값과 상한값을 정하고, 이 값들에 대한 구조해석을 수행한 후 결과값을 구하는 방법으로 단순히 결과값의 변동폭에 대한 민감도를 분석하는 방법이다.

평균과 표준편차를 가진 난수 X에 대하여  $Y=g(X)$ 의 함수를 가정하고, 이 함수에서 테일러급수 확장식을 이용하면 식 (1)과 같은 1차 항을 얻을 수 있다. FOSM(First Order Second Moment)은 입력난수들의 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )에 의하여 결과값의 평균과 표준편차를 구하는 방법으로 평균은 식 (2)와 같이 구할 수 있으며, 표준편차는 식 (3)과 같이 구할 수 있다(Lee, 2006).

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \mu_Y &= E[g(X)] \\ &\approx E\left[g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0)\right] \\ &\approx E[g_0] + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 E[(X - x_0)] \\ &\approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (\mu_X - x_0) \end{aligned}$$

$$x_0 = \mu_X \text{라고 하면, } \mu_Y \approx g(\mu_X) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= E[g^2(X)] - \mu_Y^2 \\ &\approx E\left[g_0^2 + \left\{\left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0)\right\}^2 + 2g_0\left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0)\right] - \mu_Y^2 \\ &\approx g_0^2 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0^2 E[(X - x_0)^2] + 2g_0\left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (\mu_X - x_0) - \mu_Y^2 \\ &\approx g_0^2 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0^2 \sigma_X^2 + 2g_0\left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (\mu_X - x_0) - \mu_Y^2 \end{aligned}$$

$$x_0 = \mu_X \text{라고 하면, } \sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx}\right)^2 \sigma_X^2 \quad (3)$$

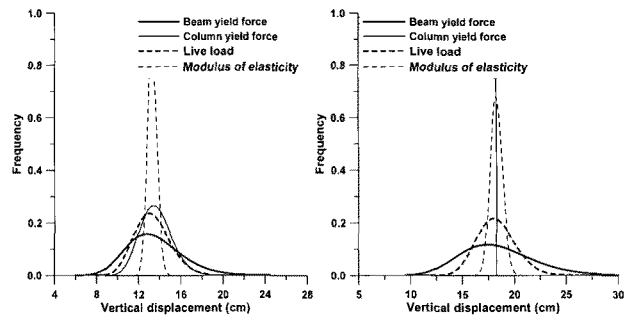
FOSM을 이용한 민감도 해석은 TDA와 유사하다. FOSM에서 구한 수직변위의 평균과 표준편차를 산정하고 수직변위의 변동폭은 결과값의  $\mu \pm 2\sigma$ 에 해당하는 값이다.

### 3. 해석결과

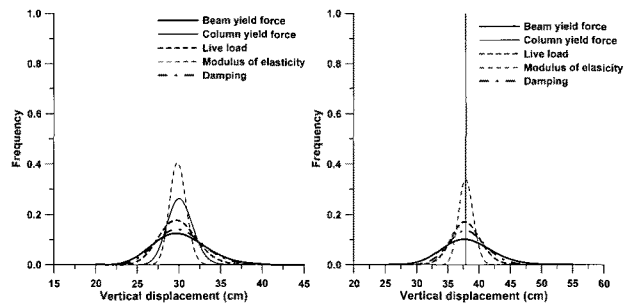
#### 3.1 MCS에 의한 수직변위

본 연구에서 사용한 해석변수는 서로 독립적이기 때문에 개별적인 해석이 가능하다. 따라서 확률분포함수를 가진 하나의 변수를 입력하고 다른 변수들은 평균값을 적용하여 해석하였다. 비선형해석에서 사용한 변수는 표 1에서 나타난 변수중 보의 항복강도, 기둥의 항복강도, 적재하중, 탄성계수이고, 비선형동적해석은 감쇠비를 포함한 5개의 변수를 적용하였다.

MCS에서 사용한 난수의 수는 비선형정적해석의 경우 각 변수들에 대하여 각각 1,000개를 적용하여 총 4,000번의 해석을 수행하고, 비선형동적해석의 경우 각각 3,100개의 난수를 생성하여 총 15,500번의 해석을 수행하였다. 구조해석을 수행한 후 결과값은 히스토그램으로 나타낼 수 있으며, 이 히스토그램을 로그정규분포 함수로 곡선적합(curve fitting)하여 그림 7과 그림 8처럼 나타내었다(MATLAB, 2006). 그림 7과 그림 8에 의하면 비선형정적해석을 수행한 경우 내부기둥이 제거된 모델과 외부기둥이 제거된 모델에서 보의 항복강도에 의한 수직변위의 분산이 가장 큰 것을 알 수 있다. 반면 탄성계수는 입력된 변수의 분산이 작으므로 해석 결과에 큰 영향이 없는 변수인 것을 알 수 있다. 기둥의 항복강도는 내부기둥을 제거할 경우 수직변위의 분산이 적재하중과 비슷하게 나타나지만 외부기둥이 제거된 경우 변수의 영향을 받지 않고 수직변위는 평균값을 나타내었다. 감쇠비를 변수로 포함한 비선형동적해석은 그림 8과 같이 감쇠비에 의한 수직변위의 분산이 보의 항복강도와 비슷한 수준으로 다른 변수들에 비하여 수직변위의 분산이 크게 나타났다.



(a) 내부기둥 제거 (b) 외부기둥 제거  
그림 7 MCS이론을 적용한 수직변위의 분포(비선형정적해석)



(a) 내부기둥 제거 (b) 외부기둥 제거  
그림 8 MCS이론을 적용한 수직변위의 분포(비선형동적해석)

#### 3.2 TDA 에 의한 수직변위

그림 6과 같이 변수들의 평균값, 하한값(-2σ)과 상한값(+2σ)을 이용하여 3번의 구조해석을 수행하고 하한값과 상한값에 대한 수직변위의 변동폭을 산정하면 표 2와 같다. 해석 결과에 의하면 비선형정적해석을 수행한 경우 보의 항복강도의 변동폭이 가장 크고, 비선형동적해석을 수행한 경우 보의 항복강도와 감쇠비의 변동폭이 크게 나타났다. TDA의 해석 결과는 MCS에 의한 해석 변수들의 분산 정도와 비슷한 양상을 나타낸다. TDA에 의한 수직변위를 조사하여 수직변위의 변동폭이 큰 변수 순으로 나열하면 그림 9와 10처럼 나타낼 수 있다.

#### 3.3 FOSM 에 의한 수직변위

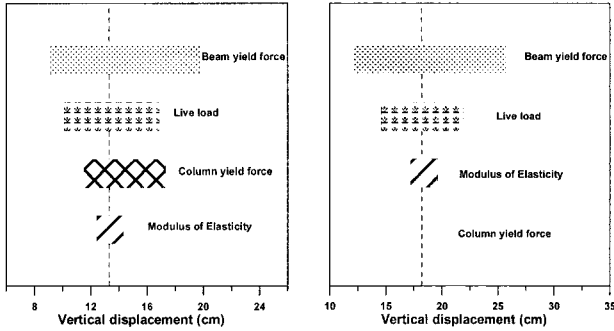
2.3절에서 설명한 FOSM이론을 적용하면 TDA와 같이 3번의 해석만 수행하면 된다. 예제모델의 FOSM이론을 적용

표 2 TDA이론을 적용한 수직변위의 변동폭(내부기둥제거, 비선형정적해석) (unit:kN.cm)

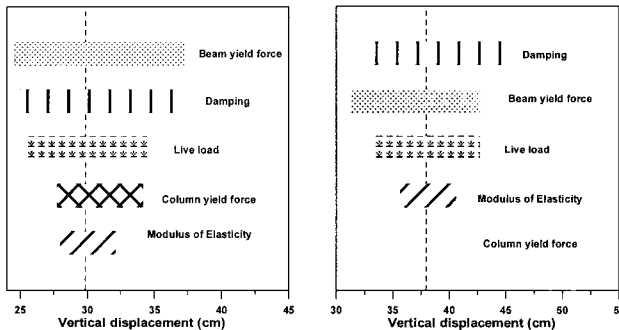
Tornado diagram	입력값( $\mu \pm 2\sigma$ )		결과값		변동폭
	$\mu$	$2\sigma$	$\mu$	$2\sigma$	
보항복강도	25.98	21.02	9.14	19.72	10.58
기둥항복강도	39.07	25.94	17.29	11.52	5.77
적재하중	3.72	1.76	16.85	10.13	6.72
탄성계수	21953.20	19234.80	12.44	14.32	1.88

표 3. FOSM이론을 적용한 수직변위의 평균과 표준편차(내부기둥제거, 비선형정적해석) (unit:kN,cm)

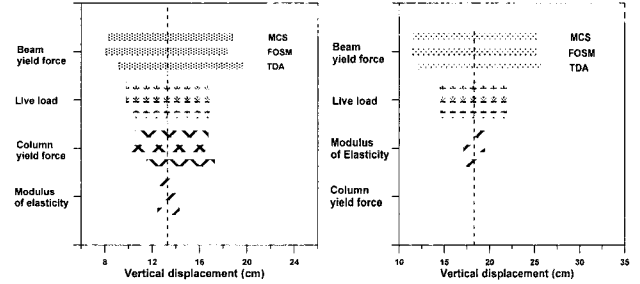
FOSM	입력값		결과값		표준편차	평균
보향복강도	23.48	23.51	13.32	13.27	2.60	13.29
기둥항복강도	32.46	32.53	13.31	13.28	1.58	13.29
적재하중	2.73	2.74	13.28	13.31	1.77	13.29
탄성계수	20587.20	20600.79	13.30	13.29	0.45	13.29



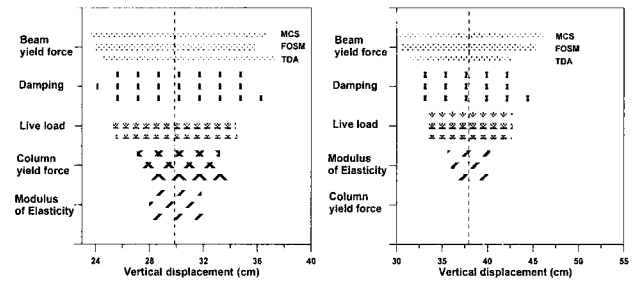
(a) 내부기둥 제거  
그림 9 TDA이론을 적용한 수직변위(비선형정적해석)



(a) 내부기둥 제거  
그림 10 TDA이론을 적용한 수직변위(비선형동적해석)



(a) 내부기둥 제거  
그림 11 FOSM이론을 적용한 수직변위(비선형정적해석)



(a) 내부기둥 제거  
그림 12 FOSM이론을 적용한 수직변위(비선형동적해석)

하여 수직변위의 평균과 표준편차를 구하면 표 3과 같다. FOSM의 경우도 MCS와 TDA처럼 수직변위의  $\mu \pm 2\sigma$  값을 이용하여 변동폭을 산정하였다.

그림 11과 12는 3가지 해석기법에 대한 변수들의 변동폭을 비교한 것으로 그래프에서 세로점선은 평균값을 나타낸다. 세가지 해석기법을 이용한 결과를 비교하면 변수별로 비슷한 변동폭을 나타내었다. TDA는 결과에서 확률적 이론을 포함하고 있지 않기 때문에 FOSM과 MCS의 결과와 약간의 차이가 있으나, FOSM과 MCS의 결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 비선형정적해석 결과에 의하면 보의 항복강도의 변화에 따른 수직변위의 변동폭이 가장 크고, 비선형동적해석에 의하면 보의 항복강도와 감쇠비를 변수로 한 경우 유사한 변동폭을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 보의 항복강도, 기둥의 항복강도, 적재하

중·탄성계수·감쇠비 등의 설계변수에 대한 민감도 해석을 통하여 기둥의 제거에 의한 수직변위의 변동폭을 조사하였다. 입력변수의 변동계수와 민감도해석에 의한 수직변위의 변동폭은 서로 관계가 없었다. 이러한 결과는 초기 기둥이 제거되면 중력하중을 1차적으로 보의 휨에 의하여 저항하기 때문이다. 그 결과 보의 항복강도가 변동계수는 작지만 연쇄 붕괴에 가장 민감하게 반응하였다. 반면, 수직변위에 대한 탄성계수와 기둥의 항복강도는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 감쇠비는 동적 변위응답과 밀접한 관계가 있기 때문에, 동적해석 결과 얻어진 수직변위에 대한 민감도는 보의 항복강도와 유사하게 큰 결과를 나타내었다. 본 연구에서 분석된 설계변수에 따른 수직변위의 민감도는 추후 구조물의 연쇄붕괴와 관련한 신뢰성 해석에 중요한 자료가 될 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. ROA-2006-000-10234-0).

참 고 문 헌

- 김종락, 김성배, 박양희, 정웅기 (2000) 용접구조용 압연강재 SM490의 제성질에 관한 통계적 연구, 대한건축학회 논문집, 16(11).
- 김종락, 김성배, 박양희, 정웅기 (2000) 일반구조용 압연강재 SS400의 제성질에 관한 통계적 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 20(1).
- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준.
- Ang, A.H-S., Tang, W-H., (1975) Probability concepts in engineering planning and design, *John Wiley & Sons*, pp199~201.
- GSA, (2003) Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, The U.S. General Services Administration. Washington D.C.
- Harris, M.E., Corotis, R.B., Bova, C.J. (1981) Area-dependent processes for structural live loads, *Journal of Structural Division, ASCE*, 107(ST5).
- Kaewkulchai G., Williamson E. B. (2003) Dynamic Behavior of Planar Frames during Progressive Collapse, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference.
- Krauthammer, T., Hall, R.L., Woodson, S.C., Baylot, J.T., Hayes, J.R., Sohn, Y. (2002) Development of progressive collapse analysis procedure and condition assessment for structures, The Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences, Report on the July 2002 National Workshop and Recommendations for Future Effort.
- Krawinkler, H., Gupta, A., Medina, R., Uco, N. (2000) Loading Histories for Seismic Performance Testing of SMRF Components and Assemblies, SAC/BD-00/10.
- Lee, T.H., Mosalam, K.M. (2006) Probabilistic seismic evaluation of reinforced concrete structural components and systems, PEER Technical Report 2006/04, University of California, Berkeley, CA, USA.
- MATLAB Version 7.3 (2006) The Mathwork, Inc., Natick, MA.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Fenves, G. (2005) OpenSees Command Language Manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
- Porter, K.A., Beck, J.L., Shaikhutdinov, R.V. (2002) Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables. *Earthquake Spectra*, 18(4), pp.719~743.
- Unified Facilities Criteria (UFC)-DoD (2005) Design of buildings to resist progressive collapse, department of defense.