

연쇄붕괴의 동적거동을 고려한 새로운 등가정적해석 기법

New Equivalent Static Analysis Method of Dynamic Behavior during Progressive Collapse

김치경* 이재철*

Kim, Chee-Kyeong Lee, Jae-Cheol

(논문접수일 : 2007년 2월 26일 ; 심사종료일 : 2007년 5월 21일)

요 지

본 논문에서는 한두 부재의 순간적 결손에 따른 동적 거동을 정적해석을 통하여 합리적이고 효율적으로 해석할 수 있는 등가정적 연쇄붕괴 해석기법을 제시한다. 제시된 기법은 부재 결손에 따른 구조물 강성 변화 및 순간적 결손에 따른 동적 거동 확대 효과를 등가의 하중으로 치환한 강성등가하중을 초기 구조물에 적용하여 해석하는 방법으로서 기둥을 하나씩 제거해 가며 반복해석을 수행해야 하는 연쇄붕괴해석 특성에 매우 효율적이면서도 신뢰성이 높은 장점을 갖는다. 제시한 강성등가하중에 의한 해석결과를 시간이력해석결과 및 GSA에 의한 해석결과와 비교한 결과, 휨모멘트, 축력, 및 수직변위 등의 측면에서 GSA에 의한 해석결과에 비해 시간이력해석결과에 상당히 근접하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 강성등가하중에 의한 해석기법이 GSA에 의한 정적해석방법을 대체하는 새로운 정적해석기법으로서 효용성이 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 연쇄붕괴, 동적거동, 등가정적해석, 강성등가하중

Abstract

In this paper a new equivalent static analysis method of dynamic behavior during progressive collapse is presented. The proposed analysis method uses the equivalent nodal load for the element stiffness which represents the dynamic behavior influence caused by the deletion of elements during progressive collapse analysis. The proposed analysis method improves the efficiency of progressive collapse analysis having the iterative characteristic because the inverse of the structural stiffness matrix is reused in the reanalysis. By comparing the results obtained by this analysis method with those of GSA code analysis and time history analysis, it is shown that the results obtained by this analysis method more closely approach to those of time history analysis than by GSA code analysis.

Keywords : progressive collapse, dynamic behavior, equivalent static analysis, equivalent load for stiffness

1. 서 론

1968년 영국 런던의 Ronan Point 아파트 붕괴사건(Griffiths 등, 1968) 이후 건물의 연쇄붕괴(Progressive collapse)는 구조설계의 중요한 고려사항 중 하나로 부각되었다. 연쇄붕괴는 주요 구조부재의 결손이나 구조체의 부분적 피해로 인해 촉발되는 붕괴의 광범위한 전파를 의미하며 이 현상이 특히 주목을 끄는 점은 후속 피해가 원래의 원인

과는 관계없이 증폭된다는 데 있다. Ronan Point 아파트의 경우, 아파트 꼭대기 부근에서 발생한 가스 폭발로 인해 상층부부터 기초까지의 모서리부분 전체 외벽이 연쇄적으로 붕괴되는 결과를 초래하였다.

연쇄붕괴를 고려한 설계방법은 크게 간접설계법과 직접설계법으로 나눌 수 있으며, 직접설계법은 다시 대체하중경로법(Alternate load path method)과 특정부위저항법(Specific local resistance method)으로 구분된다(ASCE

* 책임저자, 정회원 · 선문대학교 건축학부 부교수
Tel: 041-530-2321 ; Fax: 041-541-7426
E-mail: ckkim@sunmoon.ac.kr

* 교신저자, 정회원 · 동명대학교 건축공학과 조교수
Tel: 051-610-8607 ; Fax: 051-610-8840
E-mail: jcleee@tu.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

7-98). 간접설계법은 주요 구조부재의 강도, 연속성, 연성 등의 증가를 통해 전체 구조물의 결합성을 증가시켜 연쇄붕괴를 방지하는 설계법이다(Corley, 2002). 대체하중경로법은 주요 구조부재의 결손이 발생하였을 때 주변 부재를 통한 대체 하중경로를 통해 구조물이 원래상태를 유지할 수 있도록 설계하는 방법이며, 특정부위저항법은 주요 구조부재가 비정상적인 하중을 지탱할 수 있도록 하여 연쇄붕괴를 방지하는 설계법이다(Marjanishvili, 2004).

한편, 미국 GSA(General Services Administration)의 연쇄붕괴 해석 및 설계 지침(GSA, 2003)에서는 연쇄붕괴 해석방법으로 정적 선형-탄성 해석, 동적 선형-탄성 해석, 동적 비선형 해석의 세 가지 방법을 고려하고 있다. 이때 연직 방향 하중 조건을 동적 선형-탄성 해석과 비선형 해석에 대해서는 식 (1)과 같이 사용하도록 하고 있으며, 정적 선형-탄성 해석에 대해서는 감속효과를 고려하기 위해 동적확대계수(Dynamic amplification factor) 2를 적용하여 식 (2)와 같이 사용하도록 규정하고 있다.

$$\text{Load} = \text{DL} + 0.25\text{LL} \quad (1)$$

$$\text{Load} = 2(\text{DL} + 0.25\text{LL}) \quad (2)$$

여기에서, DL = 고정하중; LL = 적재하중

부재의 순간적 결손에 의해 야기되는 동적 거동이 대체하중경로가 부담해야 하는 하중을 배가시키고, 대체하중경로 상의 많은 부재들에서 비선형 거동을 하게 됨을 고려할 때 동적 비선형해석이 연쇄붕괴 해석 시 최선임은 여러 선형 연구들에서 보고된 바 있다(Kaewkulchai 등, 2004; Powell, 2005; Marjanishvili, 2004). 그러나 결손 부재의 위치를 변경해가며 해석을 반복해야 하는 연쇄붕괴 해석의 특성 상 모든 경우에 대하여 동적 비선형해석을 수행함은 계산효율 면에서 부담이 크다는 결점이 있다.

본 논문에서는 한두 부재의 순간적 결손에 따른 동적 거동을 정적해석을 통하여 합리적이고 효율적으로 해석할 수 있는 등가정적 연쇄붕괴 해석기법을 제시한다.

제시된 기법은 부재 결손에 따른 구조물 강성 변화 및 순간적 결손에 따른 동적 거동 확대 효과를 등가의 하중으로 치환한 강성등가하중을 초기 구조물에 적용하여 재해석함으로써 부재 결손 후 거동을 해석한다. 본 기법의 장점을 요약하면 다음과 같다.

1) 제시된 기법은 단 한번의 강성행렬 구성 및 역행렬 산정만으로 부재의 위치를 변경해 가며 반복되는 재해석을 수행한다. 구조해석 시 강성행렬 구성과 역행렬 산정에 가장 많은 계산 비용이 소요되므로 제시된 기법은 연쇄붕괴 해석

시 계산량 면에서 매우 효율적이다.

2) 제시된 기법은 등가정적하중에 의한 정적해석을 통하여 부재의 순간적 결손에 따른 동적 해석에 근접한 해석 결과를 도출한다. 전술한 GSA 설계지침에서는 정적해석 시 동적확대계수 2를 모든 고정하중에 일률적으로 적용하였으며, 이는 구조물 전반에서 과도하게 거동이 확대 평가되는 결과를 낳는다. 반면 제시된 기법은 결손되는 부재력에 동적확대계수를 적용함으로써 구조물 전반의 동적 거동을 보다 합리적으로 반영한다.

3) 제시된 등가정적해석기법에 의한 해석 결과는 변위 및 응력 관점에서 동적 거동의 상한치에 해당된다. 이는 구조설계 활용 측면에서 볼 때 보수성을 유지할 수 있다는 면에서 제시된 기법의 활용성을 높여준다.

본 논문은 선형-탄성 등가정적해석 범위 안에서 기술한다. 그러나 본 논문에서 기술한 부재 결손 및 동적 거동 확대 효과를 등가의 하중으로 치환하는 개념을 비선형해석에 확대 적용하여 부재의 비선형거동을 등가의 하중으로 치환하면, 비선형 동적해석 효과를 목표로 한 효율적인 등가정적 비선형해석도 가능할 것으로 기대된다.

다음 각 장에서는 기존 연쇄붕괴 해석 기법을 고찰, 분석하고, 부재 결손을 등가의 하중으로 표현한 강성등가하중의 개념과 산정 기법에 대하여 기술하며, 강성등가하중에 동적확대계수를 적용하는 방안을 제시한다. 마지막으로 15층 예제골조를 대상으로 동적 해석을 실시하여 이를 기준으로 삼고, GSA 설계지침에 의한 해석과 제시된 등가정적해석기법에 의한 해석 결과를 비교함으로써 본 기법의 효율성을 검증한다.

2. 연쇄붕괴 시 동적거동 고찰

Smilowitz는 구조물의 동적거동을 나타내는데 주로 사용

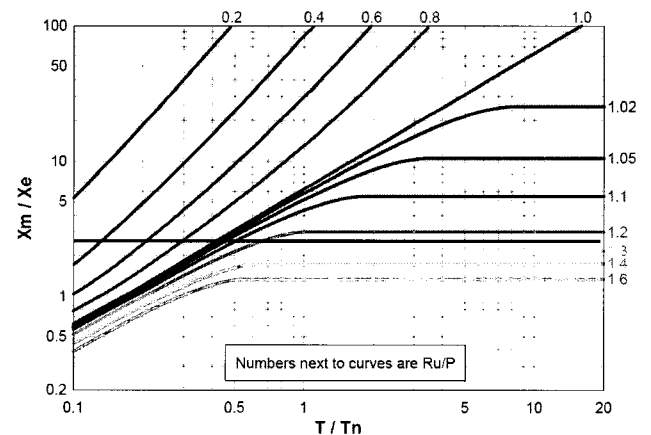


그림 1 사각형 하중을 받는 탄-소성 1-DOF 시스템의 동적확대계수(Smilowitz)

되는 탄-소성 1-DOF 스프링 매스 시스템의 응답 특성을 통해 동적거동 효과를 나타낸 그림 1을 제시하였다. 그림 1에서 수평축(T/T_n)은 하중의 지속시간과 구조물 기본주기의 비로서 연쇄붕괴의 경우 하중의 전이는 순간적으로 일어나고 하중의 지속시간은 길어지기 때문에 큰 값으로 표현된다. 수직축(X_m/X_e)은 비탄성 변형으로 인한 확장변위와 탄성한계 변위의 비로서 연성(ductility)을 나타낸다. 곡선의 옆에 표현된 R_u/P 는 요구하중과 적용하중의 비로서 소성힌지가 발생하기 전 구조 부재의 요구 능력을 나타낸다. 이상으로부터 탄성응답에 해당하는 연성 1.0의 경우 R_u/P 값이 2.0으로서, 이는 탄성구조물의 연쇄붕괴 해석 시 동적거동을 고려하기 위해서는 적용된 하중의 2배에 해당하는 하중을 적용하여야 함을 의미하며 GSA의 동적확대계수는 이 값을 사용하고 있다. 아울러 그림 1에서 진하게 표현된 연성 2.5의 경우는 적절한 비탄성 변형을 고려하였을 때로서, R_u/P 값이 1.2와 1.3 사이에 놓여 있으며, 이것은 비탄성구조물의 연쇄붕괴 해석 시 동적효과를 고려하기 위해서는 적용하중의 1.25배에 해당하는 하중을 적용하여야 함을 의미한다.

그러나 Powell(2005)은 선형정적해석에 의한 연쇄붕괴 해석 시 충격의 효과를 고려하기 위해 일반적으로 사용하는 동적확대계수의 값 2가 강한 지진이 왔을 때 구조물이 탄성 상태를 유지하도록 설계하는 것과 유사한 수준으로서 매우 보수적인 결과를 나타낸다고 주장하였다.

Kaewkulchai 등(2003)은 연쇄붕괴 시 동적하중의 재분배를 고려하는 경우 동적 효과는 프레임의 응답거동에 중대한 영향을 미치며, 기둥의 갑작스런 결손에 따른 해석결과는 변형이 일어난 후의 상태에서 수행하건 변형이 일어나기 전의 상태에서 수행하건 큰 차이가 없음을 보인 바 있다. 또한, 정적해석에 비해 동적해석의 경우 프레임의 수직변위는 2.9~3.7배, 소성 회전은 3.5~12배 증가하는 것으로 분석하였다.

Marjanishvili(2004)는 연쇄붕괴해석에 사용할 수 있는 가장 효과적인 해석방법으로 선형-탄성 정적해석, 선형-탄성 시간이력해석, 비선형 시간이력해석의 세 가지 방법을 분석하였다. 이를 통해 각 해석방법의 절차와 장, 단점을 기술하고 정확한 연쇄붕괴해석을 위해서는 세 가지 방법의 순차적 수행이 필요함을 주장하였다.

이상의 연구에서 지적한 바와 같이 정적 선형-탄성 해석법은 적용이 쉽고 간편한 반면, 지나치게 보수적이지 않으면서도 만족스런 성능을 보장할 수 있는 동적확대계수의 선택이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 쉽고 간편한 정적 선형-탄성 해석법을 연쇄붕괴 해석에 사용하기 위해서는 정적해석과 동적해석의 차이를 최소화하면서 동적 효과를 고려할 수 있도록 정적해석기법을 보완하여야 하며, 본 논문에서는

강성등가하중에 의한 새로운 정적해석기법을 제안하고 효율성을 검증하였다.

3. 강성등가하중에 의한 부재결손 및 동적거동 해석

김치경(2006)은 부분적으로 구조물의 강성이 변할 때 전체 구조물을 재해석하지 않고 강성 변화를 등가의 하중으로 치환하여 초기 구조물에 적용함으로써 재해석하는 기법을 발표한 바 있다. 강성등가하중에 의한 재해석 기법에서는 단 한번의 강성행렬 구성 및 역행렬 계산으로 반복적인 부분 변경에 대한 재해석이 가능하다. 이러한 특성은 위치를 달리하며 한두 부재를 제거한 후 재해석하는 과정을 반복해야하는 연쇄붕괴해석 시 매우 효율적이다.

본 장에서는 부재 결손을 강성등가하중으로 표현하기 위한 방안과 부재에 의한 지지력, 즉 부재력의 순간적 상실에 의한 구조물 거동의 동적 확대 효과를 고려하기 위한 방안을 제시한다.

3.1 개념적 해석 절차

그림 2는 강성등가하중에 의한 부재 결손을 해석하는 개념을 보여준다. A 스프링이 절단된 구조물에서 추가 발생한 변위 2mm는 8N의 힘을 추가 적용함으로써 초기 구조물에서 재현

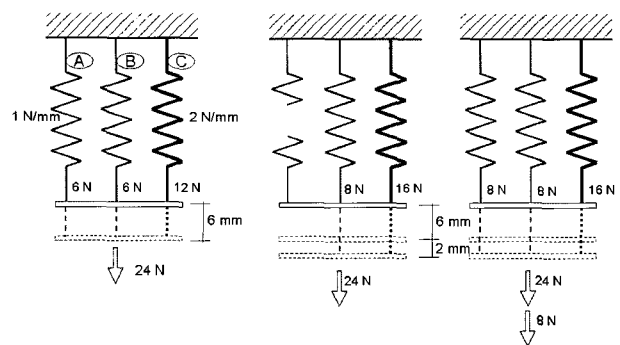


그림 2 강성등가하중에 의한 정적 재해석

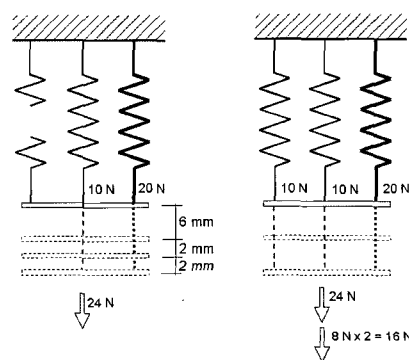


그림 3 동적거동을 고려한 동적확대계수

될 수 있다. 이 때 추가된 8N은 절단된 A 스프링의 강성을 상쇄하기 위하여 필요한 하중으로서 A 스프링 강성에 대한 등가 하중이다. 이와 같이 결손된 부재의 강성에 해당하는 하중을 초기 구조물에 추가 적용하여 해석함으로써 당초 계산된 구조물 강성을 이용하여 결손 후 거동을 재해석할 수 있다.

한편 그림 3의 좌측 그림은 A 스프링이 순간적으로 절단되어 부재력이 상실될 경우 동적 해석 결과를 보여준다. 이 때 동적 확대계수는 2로서 최대 변위가 정적 해석 시 변위의 두 배인 4mm까지 발생된다. 이 상황은 A 스프링에 대한 강성등가하중 8N을 2배하여 추가 적용함으로써 초기 구조물에 대한 정적해석으로 재현할 수 있다.

이 과정에서 주목할 점은 두 가지로서 첫째는 부재 결손을 강성등가하중으로 표현함으로써 초기 구조물을 이용하여 부재 결손 후 거동을 해석할 수 있다는 점이며, 둘째는 강성등가하중에 대한 동적확대계수의 적용은 결손된 부재의 부재력에 동적확대계수를 적용하는 의미로서 부재의 순간적 결손에 의하여 야기되는 동적 거동을 가장 합리적으로 반영한다는 점이다.

다음 절에서는 전술한 과정에서 관건이 되는 강성등가하중 산정 절차에 대하여 기술한다.

3.2 결손 부재에 대한 강성등가하중 산정

김치경(2006)이 발표한 강성등가하중에 의한 재해석 기법에 따라 결손 부재에 대한 강성등가하중을 산정하는 계산 절차를 요약하면 다음과 같다.

1) 초기해석 및 강성행렬 역행렬 산정

정적해석을 위한 평형방정식은 식 (3)으로 주어지며, 이 방정식의 해를 구하는 과정에서 식 (4)에 보는 바와 같이 강성행렬 K 의 역행렬이 계산된다.

$$Ku = r \quad (3)$$

$$u = K^{-1}r \quad (4)$$

여기에서, K : 구조물 강성행렬

u : 변위벡터

r : 하중벡터

2) 단위하중법에 의한 유연도행렬 구성

결손 부재 양단 자유도(이하 '활성자유도'라 칭함)마다 단위하중을 적용하며 활성자유도의 변위를 계산한다. 이를 수식으로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{aa} \\ F_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{aa} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서 아래첨자 a 는 활성자유도를, c 는 소거자유도 즉, 활성자유도를 제외한 구조물 자유도를 의미하고, I_{aa} 는 각 활성자유도에 단위하중을 갖는 벡터들로 구성된 단위행렬이다. 이 과정에서 초기해석에서 계산된 구조물 강성행렬의 역행렬 K^{-1} 를 이용하면 활성자유도에 대한 유연성행렬 F_{aa} 는 역대입만으로 계산할 수 있다.

3) 응축 강성행렬 계산

강성행렬과 유연성행렬은 역행렬관계에 있으므로 활성자유도로 응축된 구조물 강성행렬 \overline{K} 는 활성자유도에 대한 유연성행렬 F_{aa} 의 역행렬로서 구할 수 있다.

$$\overline{K} = (F_{aa})^{-1} \quad (6)$$

4) 결손 부재의 요소강성행렬 제거

식 (6)으로 계산된 \overline{K} 에서 결손부재의 요소강성행렬 K^c 를 차감하면 결손 부재가 제거된 후 활성자유도로 응축된 구조물 강성행렬 \overline{K}^u 를 구할 수 있다.

$$\overline{K}^u = \overline{K} - K^c \quad (7)$$

여기에서,

\overline{K} : 활성자유도로 응축된 구조물 강성행렬

\overline{K}^u : 결손 부재 제거 후 활성자유도로 응축된 강성행렬

K^c : 결손 부재의 요소강성행렬

5) 결손 부재 제거 후 거동 계산

결손 부재 제거 후 활성자유도로 응축된 평형방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\overline{K}^u \tilde{u}_a = \tilde{r}_a \quad (8)$$

여기에서,

\tilde{r}_a : 활성자유도로 응축된 하중벡터

\tilde{u}_a : 결손 부재 제거 후 활성자유도 변위벡터

한편 식 (8) 우변에 사용된 활성자유도로 응축된 하중벡터 \tilde{r}_a 는 다음 식에 의하여 쉽게 계산되는데, 이 때 u_a 는 활성자유도에 대한 초기변위벡터로서 초기해석 시 계산된 초기 변위벡터 u 에서 추출하여 구성된다.

$$\tilde{r}_a = \overline{K}^u u_a \quad (9)$$

6) 결손 부재에 대한 강성등가하중 계산

식 (8)에 의하여 결손 부재 제거 후 활성자유도에 발생하는 추가변위벡터 Δu_a 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta u_a = \tilde{u}_a - u_a \tag{10}$$

구하고자 하는 강성등가하중 Δr_a 는 추가변위 Δu_a 를 초기 구조물에 발생시키는 하중이므로 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\Delta r_a = \overline{K} \Delta u_a \tag{11}$$

결국 식 (11)에 의해 구해지는 Δr_a 는 부재의 결손에 의해 추가 발생하는 구조물의 거동을 초기구조물에 재현하기 위한 하중으로서 초기구조물에서의 결손 부재 제거와 Δr_a 의 추가 재하는 동일한 구조물 거동을 유발하게 된다. 이에 본 연구에서는 Δr_a 를 결손 부재에 대한 강성등가하중으로 정의하였다.

7) 강성등가하중을 이용한 등가정적해석

마지막으로 식 (12)에 보는 바와 같이 강성등가하중을 초기구조물에 추가하여 재해석한다.

$$\tilde{u} = u + \Delta u = K^{-1}(r + 2\Delta r) \tag{12}$$

여기에서,

- \tilde{u} : 부재 제거 후 새로운 변위벡터
- Δu : 부재 제거로 인한 변위벡터 증분
- Δr : 전체 자유도로 확장된 강성등가하중벡터

이 때 식 (4)에서 초기해석 시 계산된 역행렬을 이용함으로써 새로운 강성행렬 구성 및 역행렬 계산 없이 역대입만으로 새로운 변위벡터를 계산할 수 있다. 식 (12)에서 Δr 은 활성자유도 성분만을 갖는 강성등가하중을 전체 자유도로 확장한 벡터로서, 확장된 자유도에 해당하는 요소의 값은 모두 0이다. 한편 강성등가하중을 2배하여 적용한 것을 식 (12)에서 확인할 수 있는데 이는 동적확대계수를 적용한 결과로서 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 기술한다.

3.3 동적확대계수의 적용

하중이 일시에 재하되어 진동하는 경우 최대진폭은 동일한 하중에 대한 정적해석 변위의 2배가 됨은 잘 알려진 사실이

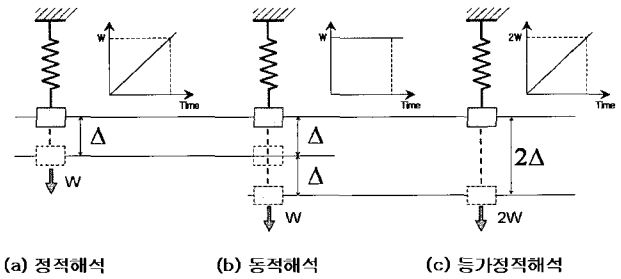


그림 4 동적확대계수를 이용한 등가정적해석

다. 이 때 정적변위에 대한 최대 동적변위의 비율을 동적확대계수라 하며 그림 4에 보는 바와 같이 동적확대계수 2를 하중에 적용하여 정적해석함으로써 동적해석 시 발생하는 최대변위(진폭)를 계산할 수 있다.

어떤 원인에 의하여 특정 부재가 순간적으로 붕괴되면 해당 부재 양단에 작용하던 부재력도 일시에 상실되어 일시 재하와 동일한 동적 거동이 발생된다. 전 절에서 계산된 결손 부재에 대한 강성등가하중은 부재 붕괴 시 상실되는 부재력과 등가의 하중이다. 그러므로 강성등가하중에 동적확대계수 2를 적용하면 부재 붕괴에 의한 동적 거동 효과를 합리적으로 반영할 수 있다.

GSA 설계지침에서 제시하고 있는 식 (2)의 하중조합도 이러한 동적확대계수를 반영하고 있다. 다만 GSA 설계지침의 경우 동적확대계수를 전체 중력하중에 적용함으로써 너무 과도하다는 지적이 있어 왔다. 다시 말해 결손되는 부재에 직접적인 영향을 주지 않는 하중, 즉 동적 거동에 참여하지 않는 하중 성분에도 동적확대계수를 적용함으로써 대체경로 검토 시 부재력이 과도하게 보수적으로 평가되는 단점이 있다. 반면, 동적확대계수를 적용한 강성등가하중은 부재 붕괴 시 부재력 상실 효과만을 2배로 확대함으로써 동적 거동을 정적해석에서 평가할 수 있는 등가정적하중이며, 이론적으로는 오류가 없는 정해이다.

다만, 실제 구조물은 그림 4에서와 같은 단자유도 구조물이 아니고 자유도 수만큼의 모드형상이 함께 진동하는 다자유도 구조물이고, 각 모드의 최대 진폭이 동일 시점에 발생하지 않으므로 실제 동적해석에 의한 최대 진폭은 등가정적해석에 의한 변위보다 작다. 하지만 동적확대계수를 적용한 등가정적해석에 의한 해석 결과는 동적해석에 의한 구조물 거동의 상한치, 즉 최대 변위 및 부재력이라 할 수 있으므로 구조설계를 위한 보수적 해석 결과로서 유용하고 합리적이다.

3.4 고찰

본 강성등가하중을 이용한 연쇄붕괴해석 기법은 기둥을 하나씩 제거해 가며 반복해석을 수행해야 하는 연쇄붕괴해석

특성에 매우 효율적이면서도 신뢰성이 높은 장점을 갖는다.

우선 구조해석 시 전체 구조물에 대한 강성행렬 구성과 역행렬 계산을 단 한번만 수행하고(식 (4)) 각 해석에서는 역대입에 의한 변위벡터 계산(식 (5), 식 (12))과 부재자유도 수(보요소의 경우 12) 크기의 방정식 계산(식 (6), 식 (8), 식 (9), 식 (11))만 재수행함으로써 반복 해석의 효율을 크게 높일 수 있다. 평형방정식 풀이에 일반적으로 사용되는 가우스소거법 등에서 전체자유도 수를 n , 강성행렬의 반밴드폭(half bandwidth)을 m 이라 할 때, 역행렬 계산에 $0.5nm^2$, 역대입에는 $2nm$ 의 승제연산이 소요된다.

또한 3.3절에서 상술한 바대로 본 기법에서는 부재의 순간 붕괴에 의한 동적 거동을 등가정적해석을 통하여 합리적으로 해석할 수 있다. 많은 기둥을 번갈아 제거해가며 동적 해석을 반복 수행해야 하는 상황을 본 기법을 이용하여 합리적으로 대체할 수 있다.

연쇄붕괴 해석을 위한 궁극적인 해석법은 비선형 동적해석이라 할 때, 본 논문에서 제안된 강성등가하중을 이용한 등가정적해석 기법을 비선형해석에 확대 적용한 비선형 등가정적해석 기법의 개발도 가능할 것으로 기대된다. 현재 본 연구진은 부재의 비선형거동을 강성등가하중으로 표현함으로써 비선형해석을 효율적으로 수행할 수 있는 기법을 연구 중에 있다.

4. 해석 예

4.1 해석방법

연쇄붕괴의 실제거동을 모사하기 위한 가장 합당한 방법은 비선형동적해석 방법으로 알려져 있으나, 비선형동적해석 방법은 해석을 수행하기 어렵고 해석시간이 길 뿐만 아니라 해석결과와 분석도 어려운 단점이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 여러 해석 방법 중 모델링이 간단하고 해석이 빠르며 결과를 쉽게 확인할 수 있는 정적선형해석 방법을 강성등가하중 개념을 적용해 개량한 새로운 해석기법을 제안하였다.

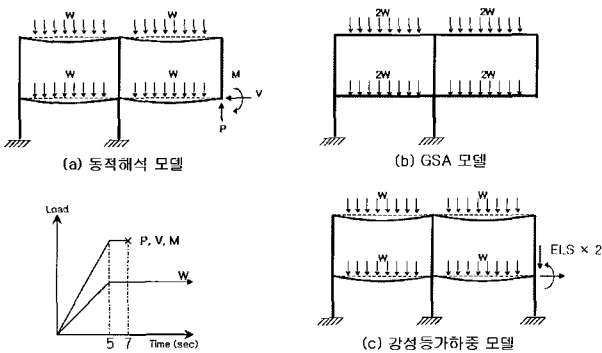


그림 5 제안 기법 검증에 위한 해석 모델

본 절에서는 강성등가하중을 적용한 새로운 해석기법에 의한 결과를 동적해석 방법인 시간이력해석결과와 기존의 정적해석 방법인 GSA 해석결과와 비교함으로써 제안한 해석기법의 타당성을 검증하였다. 해석과 검증은 그림 5에 보는 바와 같이 선형 동적해석, GSA 설계지침에 따른 해석, 그리고 제안된 강성등가하중을 이용한 등가정적해석을 각각 수행하고, 그 결과를 비교하는 방법으로 수행되었다.

그림 5(a)의 시간이력해석을 통한 동적해석에서는 기둥이 순간적으로 제거되는 현상을 모사하기 위해 하중을 시간함수로 표현해 가력하였다. 즉, 제거할 기둥에 가해지는 부재력을 먼저 산정하고 해당 기둥을 제거한 후 계산된 부재력을 제거한 기둥 위치에 반력으로 가한다. 이 반력을 순간적으로 제거하면 기둥을 제거한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 여기서 W 는 자중을 포함한 연직하중이고 P , V , 및 M 은 제거한 기둥의 부재력으로부터 구한 반력이다. 연직하중과 반력을 점차적으로 증가시켜 시간이 5초일 때 동시에 최대값에 도달하도록 한 후, 일정한 값을 유지하다가 반력은 7초에서 제거하고 연직하중은 계속해서 일정한 값을 유지하도록 한다. 이를 통해 중력 또는 바람에 의한 하중은 일정하게 유지하면서 기둥이 순간적으로 제거되는 효과를 얻을 수 있다.

그림 5(b)의 GSA 설계지침에 따른 해석에서는 동적효과를 고려하기 위해 모든 정적하중에 2배를 적용하여 정적해석을 수행하였다.

그림 5(c)의 강성등가하중을 이용한 등가정적해석에서는 동적효과를 고려하기 위해 전체 정적하중의 2배를 적용하는 GSA 해석 방법과 달리, 제거되는 기둥에 대한 강성등가하중만을 2배하여 제거되는 기둥 위치의 절점에 작용시키는 방법을 사용하였다.

4.2 해석모델

본 연구에서 제안한 새로운 해석기법의 검증을 위한 해석 모델은 그림 6과 같다. 15층 규모 4베이 프레임에 대상으로 1층 기둥의 결손 상황을 세 가지로 가정하여 강성등가하중을 적용한 새로운 해석기법의 효율성을 검토하였다. 해석모델에 사용한 부재의 종류는 SS400이며 부재 크기는 표 1과 같다.

표 1 해석모델의 부재 크기(mm)

층	부재	기둥	보
13~15		H-248×249×8×13	H-396×199×7×11
10~12		H-298×299×9×14	H-400×200×8×13
7~9		H-344×354×16×16	H-496×199×9×14
4~6		H-350×357×19×19	H-500×200×10×16
1~3		H-400×408×21×21	H-450×200×9×14

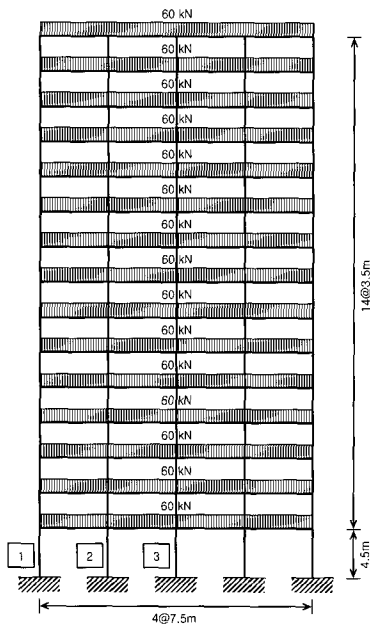


그림 6 해석모델(15층)

4.3 휨모멘트 비교

제거된 기둥에 연결된 보의 각 단에 발생하는 휨모멘트를 시간이력해석, GSA에 의한 해석, 강성등가하중에 의한 해석을 통해 구한 결과는 그림 7과 같다.

강성등가하중에 의한 해석결과 그래프가 시간이력해석결과 그래프와 GSA에 의한 해석결과 그래프 사이에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 강성등가하중에 의한 휨모멘트 해석결과가 기존의 GSA에 의한 정적해석방법에 비해 동적해석결과에 보다 근접한 결과를 보여주고 있음을 의미한다. 연쇄붕괴해석 시 기둥의 결손으로 인한 대체하중이 보를 통해 전달되며 보에 발생하는 소성힌지의 분

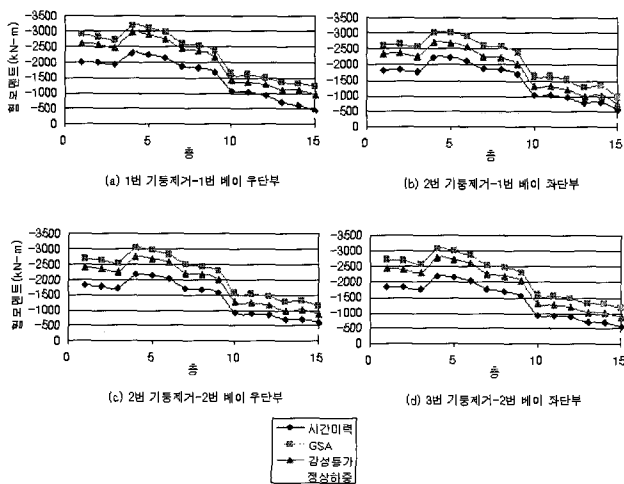


그림 7 제거된 기둥에 연결된 보 양단의 휨모멘트 비교

포를 통해 전체 건물의 붕괴메커니즘을 규명할 수 있으므로 보다 정확한 보 양단 휨모멘트의 계산은 연쇄붕괴해석결과와의 신뢰성 향상에 중요한 의미를 갖는다.

4.4 축력 비교

그림 8은 그림 6의 각 기둥을 제거했을 때 제거된 기둥라인의 좌, 우측 기둥라인에 발생하는 축력을 비교한 것이다. 강성등가하중에 의한 해석결과가 GSA에 의한 해석결과에 비해 시간이력해석결과에 훨씬 근접한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

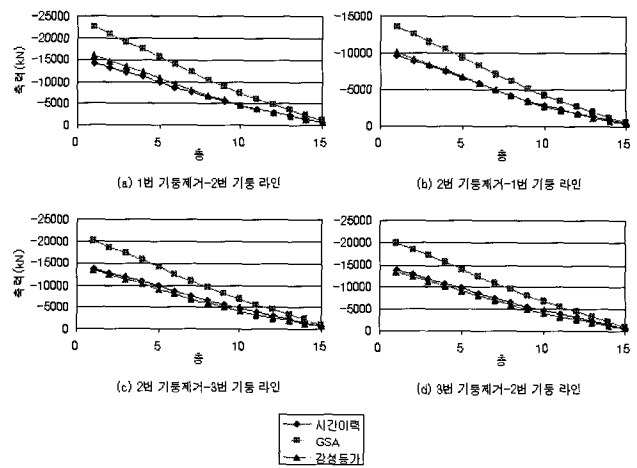


그림 8 제거된 기둥의 이웃 기둥 라인 축력 비교

4.5 수직변위 비교

표 2 해석결과 비교

항목	제거 기둥	위치	시간이력	GSA	강성등가
변위 (m)	1	기둥 제거 절점	-0.328119	-0.476754	-0.473725
			1	1.45	1.44
			-0.279468	-0.328348	-0.322704
	2	기둥 제거 절점	1	1.17	1.15
			-0.285133	-0.336490	-0.330691
			1	1.18	1.16
휨모멘트 (kN-m)	1	1베이 우단부	-2000.44	-2892.67	-2617.52
			1	1.45	1.31
			-1816.34	-2623.74	-2349.32
	2	1베이 좌단부	1	1.44	1.29
			-1808.54	-2673.70	-2393.51
			1	1.48	1.32
3	2베이 좌단부	1	1.47	1.32	
		-1843.8	-2718.28	-2436.05	
		1	1.43	1.32	
축력 (kN)	1	2번 기둥라인 최하층	-14194.76	-22623.93	-16039.64
			1	1.59	1.13
			-9714.52	-13610.32	-10077.02
	2	1번 기둥라인 최하층	1	1.40	1.04
			-13852.88	-20236.00	-13471.16
			1	1.46	0.97
3	2번 기둥라인 최하층	1	1.46	0.97	
		-13819.82	-20040.23	-13455.95	
		1	1.45	0.97	

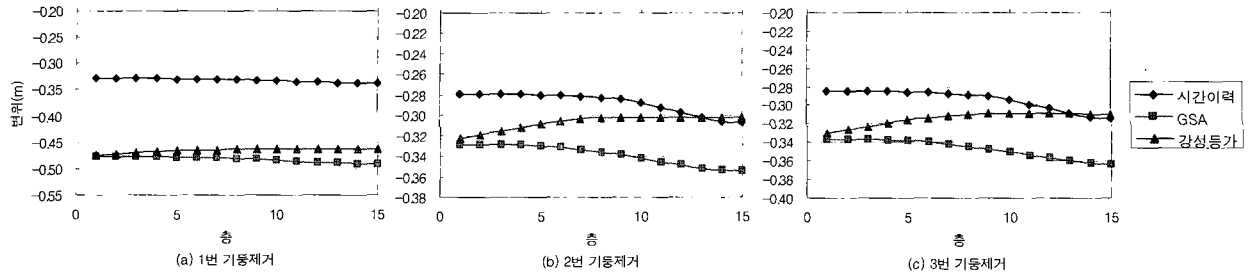


그림 9 제거된 기둥 라인의 수직변위 비교

그림 9는 제거된 기둥 라인의 수직변위를 시간이력해석, GSA에 의한 해석, 강성등가하중에 의한 해석을 통해 구한 결과이다. 강성등가하중에 의한 해석 결과는 시간이력해석과 GSA에 의한 해석 사이에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 연쇄붕괴해석 시 부재의 파괴여부를 판단하는 기준으로 사용되는 회전각은 수직변위와 보 길이의 비로부터 구해지므로 보다 정확한 수직변위의 계산은 연쇄붕괴해석결과의 신뢰성 향상에 중요한 의미를 갖는다.

표 2는 이상의 해석결과를 요약, 비교한 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 GSA에 의한 정적해석방법의 과도한 보수성을 완화하면서 연쇄붕괴 시의 동적 거동 효과를 합리적이고 효율적으로 반영할 수 있는 새로운 등가정적 연쇄붕괴 해석기법으로서 강성등가하중을 적용한 해석방법을 제시하였다.

본 논문에서 제안한 강성등가하중에 의한 해석결과는 GSA에 의한 결과에 비해 계산 효율은 좋으면서도 휨모멘트, 축력, 및 수직변위 등의 측면에서 시간이력해석결과에 훨씬 근접하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 강성등가하중에 의한 해석기법이 GSA에 의한 정적해석방법을 대체하는 새로운 정적해석기법으로서 효용성이 있음을 확인하였다.

향후 본 논문에서 기술한 강성등가하중 개념을 비선형해석에 확대 적용하여 부재의 비선형거동을 등가의 하중으로 치환하면, 비선형 동적해석 효과를 목표로 한 효율적인 등가정적 비선형해석에도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설핵심기술 연구 개발사업(05건설핵심 C03) 및 초고층건축물 건설기술 개발과제(03C04-1)에 의한 연구결과의 일부임

참 고 문 헌

김치경(2006) 강성등가하중의 정의와 응용, 한국전산구조공학 회 논문집, 19(3), pp.303~312.

American Society of Civil Engineers (ASCE) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-89.

Corley, W.G.(2002) Applicability of Seismic Design in Mitigating Progressive Collapse, *National Workshop on Prevention of Progressive Collapse in Rosemont, Ill*, Multihazard Mitigation council of the National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.

Griffiths, J.E. Pugsley, A., Saunders, O.(1968) Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Canning Town, Her Majesty's Stationary Office, London, England.

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.

Kaewkulchai, G., Williamson, E.B.(2003) Dynamic Behavior of Planar Frames during Progressive Collapse, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*.

Kaewkulchai, G., Williamson, E.B.(2004) Beam Element Formulation and Solution Procedure for Dynamic Progressive Collapse Analysis, *Computers and Structures*, 82, pp.639~651.

Marjanishvili, S.M.(2004) Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 18(2), pp.79~85.

Powell, G.(2005) Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis, *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York.