

# 부재 이력모델을 응용한 연쇄붕괴프로그램 제안 - 선형정적해석

## Development of Progressive Collapse Analysis Program applying hysteresis model - Linear Static Analysis

김진구\*·박새로미\*\*·서영일\*\*\*

Kim, Jinkppi · Park, Saeromi · Seo Youngll

### 요약

본 논문에서는 기존의 선형정적해석 절차를 변형하여 부재의 이력모델 응용을 통해 부재 파괴여부에 따라 힌지처리 및 재해석의 반복과정을 자동으로 수행하는 새로운 연쇄붕괴 프로그램을 제안하였다. 6m 4경간의 철근콘크리트 골조에 철골 가새를 보강 설치한 예제구조물에 대하여 최하층 기둥부재를 제거한 후 기존 해석법과 제안 해석법을 통해 선형정적해석을 수행하였고, 그 결과를 비교 분석하였다. 해석 결과, 두 절차 간 부재단위의 파괴여부 및 구조물 힌지 분포 경향의 동일함을 보여 해석의 신뢰성을 확보하였으며, 기존 해석법에 비해 수행단계의 시간이 매우 짧고 자동 반복해석으로 인한 오류의 가능성도 최소화 할 수 있음을 확인하였다.

**keywords** : 연쇄붕괴, 선형 정적해석, 대체경로법

## 1. 서론

연쇄붕괴란, 예상치 못한 충격하중이나 폭발하중 등 비정상하중에 의해 구조물의 일부 부재가 손상 및 파괴되고, 그로인해 구조물 전체 붕괴로 이어지는 현상을 말한다. 세계의 관심이 집중되었던 2001년 World Trade Center의 비극적 사건은 비행기 충돌 테러로 인한 충격 및 폭발하중에 따른 연쇄붕괴의 대표적인 사례이며, 연쇄붕괴에 대한 심각성을 세계에 다시 한 번 일깨워준 계기가 되었다. WTC 붕괴사건 이후 각국에서는 연쇄붕괴방지를 위한 설계기준 및 해석가이드라인을 엄격히 재정하여 기존 건물 및 신축 건물에 적용할 수 있도록 적극 권고하고 있으며, GSA(General Service Administration), DOD(Department of Defence), Eurocode, NBC(National Building Code of Canada) 가이드라인 등이 이에 해당한다. 본 연구에서는 여러 가이드라인들 중 연쇄붕괴 가능성 해석검토와 이를 반영한 설계법에 주로 적용되는 GSA 가이드라인의 대체하중경로법(Alternative Load Pass Method)에 따른 선형정적해석 절차에 대하여 알아보고, 기존의 선형정적해석 절차를 변형하여 비선형정적해석 수행 시 적용하는 부재 이력모델을 반영한 새로운 선형정적해석 절차에 대하여 제안하고자 한다. 제안하는 절차는 상용화되고 있는 여러 구조해석 프로그램에 적용될 수 있으며, 본 논문에서는 MIDAS GEN 프로그램을 이용하여 예제구조물에 대하여 기존 절차와 제안 절차의 해석 결과 비교 및 분석을 수행하였다.

\* 정회원·교신저자, 성균관대학교 건축공학과 정교수 jkim12@skku.edu

\*\* 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정 dodream05@gmail.com

\*\*\* (주) 마이다스아이티 과장 yiseo@midasit.com

## 2. 연쇄붕괴 해석법 - GSA 가이드라인 선형정적해석

GSA 가이드라인의 대체하중경로법에 의한 선형정적해석에서는, 구조물의 일부 부재 제거 시 그로 인한 충격을 고려하여 정적하중의 2배를 적용하중으로 권고하고 있으며, 부재의 파괴 및 구조물의 손상여부를 판단하기 위한 기준으로 DCR(Demand-Capacity Ratio)을 제시하고 있다. DCR은 부재력을 부재강도로 나눈 값이며, 재료의 종류 및 부재의 폭/두께 비에 따라 허용 DCR(Acceptance Criteria AC)을 제시하고 있다. GSA 가이드라인에서 제시한 선형정적해석 과정을 요약하면 다음과 같다.

- Step 1 임의의 기둥 제거 후  $2(DL+0.25LL)$ 의 하중조합을 적용하여 선형 해석을 수행한다.
- Step 2 부재별 DCR 체크. 하중의 전단력(Demand)이 설계전단력(Capacity)을 초과할 경우 그 부재는 파괴된 것으로 간주. 휨에 대한 DCR은 파괴 메커니즘을 고려하여 파괴된 것으로 판단되는 부재는 제거한 후 하중을 재분배한다.
- Step 3 휨에 대하여 부재의 하중상태가 허용 DCR을 초과하면, 그 부재는 보 깊이의 1/2만큼 offset을 적용한 곳에 힌지를 추가. 추가된 힌지에 강도 저감계수와 항복 초과강도 계수 1.1을 적용한 모멘트를 가하여 평형 상태를 만든다.
- Step 4 허용 DCR값을 초과하지 않을 때까지 Step 1~4를 반복하여 재해석. 만약 모멘트의 재분배가 전체 골조에 이루어지거나 허용 붕괴구역 밖에서 기준 DCR를 초과하는 값이 발생하면 구조물은 연쇄붕괴의 가능성이 높음으로 재설계가 필요하다.

## 3. 연쇄붕괴해석 프로그램 절차 제안

구조물의 연쇄붕괴 가능성을 평가하기 위한 해석법으로서 부재 이력모델을 응용한 선형 정적해석법의 새로운 절차를 제안하고자 한다. 본 연구에서는 지진해석분야에서 많이 사용하는 MIDAS GEN 프로그램을 기반으로 절차를 제안하며, 해당 절차는 다음과 같다.

- Step 1 구조물 형태의 모델링, 재료 및 부재 설정, 하중조건, 경계조건 등을 적절히 입력하여 부재설계를 수행, 부재설계가 완료되면 임의의 기둥부재를 제거 후 탄성 해석을 수행한다.
- Step 2 부재의 판-폭 두께비와 하중 형태에 따라 부재의 상태를 규정하는 부재의 이력곡선을 모델링하여 힌지속성을 정의한다. 기존의 부재 힘-변형 관계는 부재가 항복 이후 최대 저항력에 도달했다가 부재가 파괴되어 저항성능이 감소하는 이력모델이나(그림1), 본 연구에서는 부재의 허용 DCR 값( $P_u$ ) 이전까지는 탄성거동을 하고, 허용 DCR 값( $P_u$ )을 초과하면 그 부재는 파괴된 것으로 간주하여 저항성능이 감소되는 이력모델(그림2)을 적용한다. 해당하는 허용 DCR 최대값은 GSA 가이드라인의 규정을 따른다.
- Step 3 Push down 기능을 이용하여 해석을 수행한다. 해석에 앞서 제어조건으로 초기하중조건, 해석수렴조건을 설정한다. 초기하중조건으로 일반 부위에 중력방향 하중조합( $DL+0.25LL$ )을, 부재 제거 영향부위에 대체 경로법에 따라  $2(DL+0.25LL)$ 의 하중조합을 설정하며, 해석수렴 조건으로는 최대 반복해석의 수와 수렴여부를 판단하기 위한 허용오차를 입력한다. 증분해석 방법은 하중제어법을 택하고 부재를 제거한 위치에 가력하중을 설정한 후 Push down 해석을 수행한다.

Step 4 해석결과를 통해 부재의 소성힌지 발생 분포 및 구조물의 연쇄붕괴 가능성을 판단한다. 연쇄 붕괴 가능성이 높은 경우 부재 재설계를 실시하여 연쇄붕괴 방지성능을 확보한다.

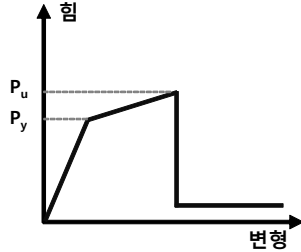


그림1 부재 비선형 이력곡선(기준)

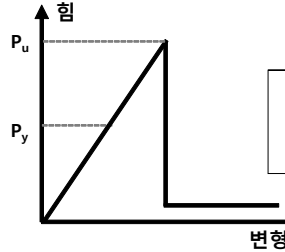


그림2 DCR 값을 이용한 부재 비선형 이력곡선(제안)

#### 4. 예제 구조물의 설계 및 해석

예제 구조물은 가로·세로 6m 4경간으로 이루어진 철근콘크리트 골조 최상층에 Steel 가새를 보강 설치한 형태이며, 층고 3m 12층 규모로 Midas Gen을 이용하여 설계하였다. 콘크리트 240MPa, 철근 SD400, 철골 SS400의 재료를 사용하였고, KBC 2009기준에 따라 설계하였으며 고정하중 및 적재하중으로 각 6kN/m, 3kN/m의 중력방향 바닥하중을 가하였다. 최초 파괴부재는 1층 중앙 내부기둥으로 선정하여 제거하고 GSA 가이드라인에 따라 각 부재에 해당하는 허용 DCR 값을 부재이력모델에 적용하여 힌지속성을 정의하였다. 보 부재는 힘에 대하여, 기둥 부재는 축력과 힘에 대하여 힌지속성을 고려하였으며 RC 부재에는 동일하게 DCR 값 2를 적용하였고, Steel 가새 부재는 축력에 대하여 압축측 좌굴하중에 대한 DCR 값 1과 인장측 DCR 값 2를 적용하여 힌지를 정의하였다. Push down 해석을 위해 기둥 제거 영향부위에는 2배에 해당하는 2(DL+0.25LL)의 하중을 설정하였다. 해당중분스텝은 최대 반복횟수 2~5회로 수렴조건을 설정하였고, 예상붕괴하중은 해석 제어조건에서 입력한 초기하중만을 고려하여 하중 제어법에 따라 Push down 해석을 수행하였다.

또한 제안된 해석 절차와의 비교를 위하여 기존의 선형정적해석법 절차를 통해 동일 구조물에 연쇄붕괴 해석을 수행하였다. 각 부재별 DCR을 검토하여 파괴된 부재는 단부에 힌지를 추가하고 하중을 재분배 하였다. 부재가 평형상태를 이룰 때까지 선형해석과 DCR 검토, 힌지 추가 및 하중 재분배 과정을 반복적으로 수행하였다.

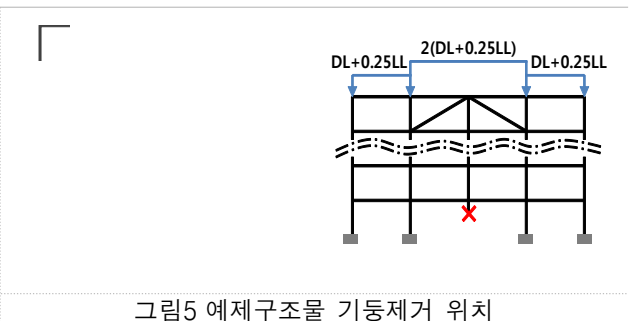
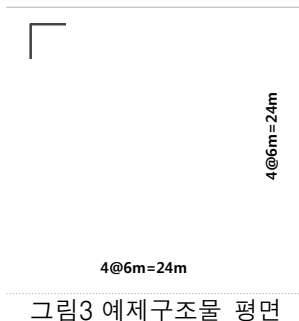


그림3 예제구조물 평면

그림4 예제구조물 입면

그림5 예제구조물 기둥제거 위치

## 5. 해석 결과

해석은 3D로 수행하였고, 해석의 결과는 부재 파괴여부를 한눈에 알아보기 위하여 그림 3의 평면에 점선으로 표시된 부분을 나타내었다. 제안된 절차에 따른 해석 결과, 제거된 기둥 상부 7개 층의 보 단부에서 해당 DCR 값을 초과하여 파괴된 것으로 나타났으며, 파괴된 부재를 소성한지로 표현하여 그림 4에 나타내었다. 또한 기존의 선형정적해석 절차에 따라 수행한 결과, 각 스텝에서 DCR 값을 초과하여 파괴부재로 판단되는 부재에 힌지 처리와 재해석 수행을 반복하였고, 총 4번째 해석 이후 부재 평형상태에 도달하였으며 선형정적해석 최종 결과는 그림 4에 나타난 제안 절차에 따른 해석 결과와 동일하게 하부 7개 층 보 단부에서 파괴가 발생한 것을 확인하였다.

F	F	F	F	F
그림6 제안해석 결과	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
그림7 기존 선형 정적해석 결과				

## 6. 결론

본 연구에서는 구조물의 연쇄붕괴 가능성을 평가하기 위한 해석방법으로 부재의 이력모델을 응용한 선형정적해석수행 절차를 새롭게 제안하였고, 국내기준에 따라 설계한 예제 구조물을 통해 제안절차를 수행하고 기존의 선형정적해석절차와의 결과를 비교해보았다. 예제구조물을 통한 선형정적해석결과 GSA 가이드라인의 절차와 본 연구에서 제안하는 절차는 구조물의 손상정도와 부재의 파괴여부에서 동일한 결과를 보였으며, 기둥 제거 이후의 부재력 또한 매우 유사한 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안한 선형정적해석의 새로운 절차는 한 번의 해석만으로 기존 선형정적해석 수행절차와 동일한 결과를 가져올 뿐 아니라 기존 절차의 반복해석에 따른 시간과 노력, 발생할 수 있는 오류를 감소시킴으로써 연쇄붕괴해석의 신뢰도를 높이고 해석을 간편화 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업 연구비지원(과제번호#09 첨단도시A01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- GSA (2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, The U.S. General Services Administration  
 KBC (2009) 건축구조설계기준, 대한건축학회