

동적효과를 고려한 연쇄붕괴해석 프로그램의 개발

Development of Progressive Collapse Analysis Program considering Dynamic Effects

김진구* 박준희** 안다운*** 김현수****
Kim, Jinkoo Park, Jun-Hee An, Da-Woon Kim, Hyun-Su

ABSTRACT

Widespread propagation of failure can be triggered by localized damage to a structure because of fires, impact and explosion etc. In this paper, the progressive collapse analysis program is developed to automatically check the failed members and construct the modified structural model at each step. OpenSees, that is widely used in many research groups, was used for the developed progressive collapse analysis control program. The control program developed in this study automatically computes the damage indices of all the structural members and performs a progressive collapse analysis after the first failed member is selected. Using the developed program, we compared the progressive collapse behaviors of the example structures considering dynamic effects or not, and the difference of progressive collapse mechanism according to the modeling method of the failed members.

Keywords: *progressive collapse, damage index, building structure, nonlinear analysis*

1. 서론

화재나 충격하중, 폭발하중 등과 같이 현행 설계하중에 포함되지 않은 비정상하중에 의해서 발생하는 구조부재의 국부적인 손상은 구조물 전체의 파괴로 이어지는 연쇄붕괴를 유발할 수 있다. 이러한 연쇄붕괴에 대한 관심은 1968년 런던의 Ronan Point 아파트 붕괴이후 1990년 중반까지 연구가 간헐적으로 진행되어왔다. 이후 1995년 Alfred P. Murrah Building과 2001년 World Trade Center 붕괴사고와 함께 구조물의 연쇄붕괴에 대한 관심이 다시 집중되고 있다. 이를 반영하여 미국의 General Service Administration (GSA) 과 Department of Defence (DoD)은 건물에 대한 연쇄붕괴를 방지하기 위한 해석 및 설계법을 제시하고 있다. 특히 DoD에서는 SAP을 사용한 예제구조물의 연쇄붕괴해석과정을 상세히 설명하고 있다. 그러나 현재 실무에서 사용되고 있는 일반적인 범용구조해석프로그램에서는 연쇄붕괴해석을 위한 전용 사용자 인터페이스나 알고리즘을 제공하지 않고 있다. 따라서 실무 엔지니어들이 GSA나 DoD에서 제시한 가이드라인을 따라서 범용구조해석 프로그램을 이용하여 연쇄붕괴해석을 수행하고자 한다면 매우 번거로운 작업을 거쳐야 한다. 따라서 연쇄붕괴해석을 위한 전용 구조해석프로그램의 개발에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 부교수 E-mail: jkim12@skku.edu
** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정 E-mail: panay@dreamwiz.com
*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정 E-mail: dawoony@snaver.com
**** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사후연구원 E-mail: digiarchi@skku.edu

고 있다. 본 연구에서는 반복적인 해석 작업으로 인하여 소요되는 많은 시간과 노력 및 오류의 가능성을 줄이기 위하여 연쇄붕괴해석을 자동화된 하나의 통합시스템에서 이루어질 수 있도록 하는 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 연쇄붕괴해석프로그램의 해석엔진은 OpenSees를 이용함으로써 새롭게 해석엔진을 개발함으로써 필요한 검증절차를 생략할 수 있으므로 개발시간을 단축하고 프로그램의 안정성을 높일 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 개발된 프로그램을 사용하여 국내 기준으로 설계된 예제구조물의 정적 및 동적 비선형 연쇄붕괴해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그리고 구조부재의 단부에서 파괴가 발생했을 때 구조물과 분리하여 모형화한 경우와 그렇지 않은 경우의 연쇄붕괴 메커니즘을 비교 검토하였다. 또한 연쇄붕괴과정을 시각적으로 쉽게 파악할 수 있도록 본 연구에서는 OpenGL 3차원 그래픽 라이브러리를 사용하여 후처리 애니메이션 기능을 개발하였다.

2. 연쇄붕괴해석의 기본 요소

2.1 손상지수

임의의 지지부재가 최초로 파괴된 이후에 연쇄붕괴현상이 발생하게 되면 구조부재들은 다양한 단계의 손상정도를 거쳐서 파괴에 이르게 된다. 따라서 연쇄붕괴해석을 수행하기 위해서는 각 구조부재의 손상된 정도를 표현할 수 있는 손상모델(Damage Model)에 대한 정의가 선행되어야한다. 본 연구에서는 식 (1)에 나타낸 바와 같이 강도저감을 바탕으로 한 일반적인 형태의 손상모델을 사용하여 연쇄붕괴 해석 시 구조물의 손상정도를 표현하였다.

$$D = 1 - \frac{M_{ac}}{M_{y0}} \quad (1)$$

$$M_{ac} = M_{y0} \cdot f(\mu, \int dE) \quad (2)$$

여기서 M_{ac} 는 저하된 항복모멘트, M_{y0} 는 구조부재의 이론상 항복모멘트를 나타낸다. 또한 식 (2)를 통해서 저하된 항복모멘트는 구조부재에서 발생하는 최대변형(μ)과 소성변형에너지($\int dE$)의 함수로 표현되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 연쇄붕괴과정에서의 구조물의 손상도를 표현하는 것을 목적으로 하기 때문에 임의의 구조부재의 국부적인 파괴로 인한 동적충격효과와 그때 발생하는 비정상적인 부재의 변형이 구조부재의 손상정도에 주요한 영향을 미치는 것으로 예상하기 때문에 본 연구에서는 식(3)에 나타낸 연성도 기반함수만을 이용하여 구조부재의 손상도를 표현하였다.

$$f(\beta_1, \mu) = \left(1 - \frac{\mu_{max}}{\mu_u}\right)^{1/\beta_1} \quad (3)$$

여기서 μ_u 는 극한연성도(ultimate ductility), μ_{max} 는 최대연성도(maximum ductility), β_1 은 가속계수(accelerator factor)를 각각 나타낸다. β_1 을 통하여 이력곡선의 경화(hardening)정도를 조절함으로써 다양한 구

조재료의 특성을 표현할 수 있는데 본 연구에서는 '1'의 값을 사용하였다. 식 (1)에 나타낸 D는 손상지수 (Damage Index)로서 0(손상 없음)에서 1(완전 파괴)까지의 값을 가진다.

2.2 비선형 재료모델

연쇄붕괴현상이 발생하게 되면 일반적으로 구조물은 비선형거동을 하게 되므로 선형탄성해석보다는 비선형해석을 수행하는 것이 구조물의 연쇄붕괴저항성능을 검토하고 붕괴 메커니즘을 이해하는데 보다 바람직할 것이다. 따라서 본 연구에서도 비선형 정적 및 동적해석방법을 이용하여 연쇄붕괴해석을 수행한다. 구조물의 비선형 해석에 일반적으로 사용되고 있는 비선형 힌지모델을 그림 1에 나타내었다. 이 비선형 재료모델은 항복모멘트(M_y), 최대모멘트(M_u), 항복곡률(ϕ_y) 및 최대곡률(ϕ_u)로 표현할 수 있다. 본 연구에서 해석엔진으로 사용하는 OpenSees에서는 이러한 손상도를 포함한 이력모델로서 'Hysteretic Material with Damage'등을 제공하여 손상정도에 따른 구조부재 거동의 변화를 표현할 수 있도록 하고 있다.

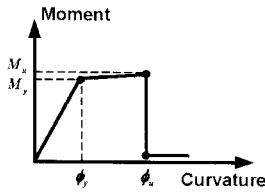
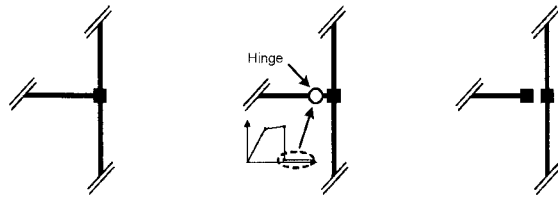


그림 1. 비선형 힌지모델



(a) 파괴 전 (b) 힌지를 이용한 모형화 (c) 절점분리를 이용한 모형화

그림 2. 구조부재의 파괴상태 모형화

2.3 구조부재의 파괴 모형화

연쇄붕괴해석 과정에서 특정한 구조부재의 손상지수가 '1'이 되면 그 부재는 파괴되었다고 판단한다. 본 연구에서는 구조부재의 파괴에 의한 소성힌지가 부재의 양단에서 발생한다고 가정하고 해석을 수행한다. 연쇄붕괴해석을 위해서 그림 1에 나타낸 비선형 힌지모델을 사용한다면 손상지수가 '1'이 되어 보부재의 단부가 파괴된 후에는 그림 2(b)와 같이 보부재의 단부가 힌지로 표현된다. 이러한 비선형 힌지모델을 이용하여 연쇄붕괴해석을 수행하면 부재에 파괴되면 자동적으로 부재 단부가 힌지로 표현되므로 강성 및 질량행렬을 다시 구성하여 재해석을 수행할 필요가 없어 해석이 매우 간편해진다. 그러나 파괴된 단부를 힌지로 표현하면 모멘트에 대해서는 저항성능이 없지만 축력에 대해서는 아직 저항성능을 발휘하게 되므로 기둥부재의 좌굴현상 등을 제대로 표현하기가 어렵게 될 것이다. 따라서 연쇄붕괴메커니즘을 효과적으로 검토하기 위해서는 구조부재의 단부가 파괴되는 순간 그림 2(a)와 같이 구조부재가 하나의 절점을 공유하다가 그림 2(c)와 같이 새로운 절점을 생성시켜서 구조물을 해석하는 것이 필요하다. 구조부재의 파괴상태를 모형화하는 방법에 따라서 구조물의 응답이 달라질 것으로 판단되므로 본 연구에서는 예제해석을 통하여 그림 2(b)와 2(c)로 모형화하였을 경우의 연쇄붕괴메커니즘에 대해서 비교 검토하여 보았다.

3. 연쇄붕괴해석 제어프로그램의 개발

본 연구에서는 전술한 바와 같이 지진해석분야에서 연구용으로 많이 사용되고 있는 OpenSees를 해석엔진으로 활용하고 그것을 제어할 수 있는 연쇄붕괴해석 제어프로그램을 개발하였다. 이를 이용한 연쇄붕괴해석

은 크게 일반적인 구조물 모형화, 연쇄붕괴해석을 위한 특별한 정보입력, 연쇄붕괴해석 제어프로그램 실행의 3단계에 거치게 된다.

우선 일반적인 상용구조해석 프로그램과 같이 해석대상 구조물의 기하학적 형상 및 하중, 경계조건 등을 모형화 하는 첫 번째 단계를 거친다. 두 번째 단계에서는 일반적인 구조해석에서 필요한 정보 이외에 추가적으로 연쇄붕괴해석과정에서 필요한 최초붕괴부재, 손상지수종류 및 파라미터, 비선형 재료모델, 부재파괴기준 (failure limit criteria) 등을 입력받는다. 이와 같은 연쇄붕괴해석에 필요한 기본 정보를 입력받은 제어프로그램은 각 단계의 OpenSees 입력파일을 자동으로 생성하여 마지막 단계인 연쇄붕괴해석을 시작한다. 해석엔진인 OpenSees를 이용하여 동적 비선형해석을 수행한 후 손상지수가 '1'인 부재가 있는지 확인한다. 만약 하나의 부재라도 손상지수가 '1'인 부재가 있으면 집합부나 부재의 파괴 상태를 고려한 새로운 OpenSees 입력파일을 자동생성한 후 재해석을 수행한다. 이러한 과정을 더 이상 파괴되는 부재가 존재하지 않을 때까지 반복해서 수행한다. 본 연구에서 개발된 연쇄붕괴해석 제어프로그램의 순서도를 그림 3에 나타내었다.

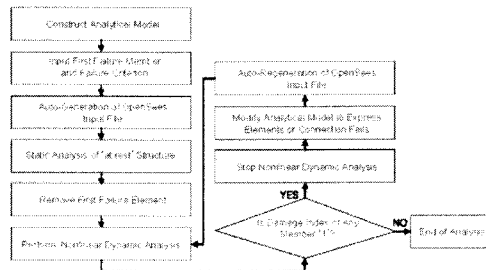


그림 3. 연쇄붕괴해석 순서도

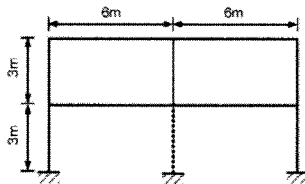


그림 4. 예제구조물

표 1. 예제구조물의 부재단면

2층 구조물	
보	H 250×130×6×10
외각기둥	H 150×150×7×10
내각기둥	H 200×200×8×12

4. 예제해석

본 연구에서 개발한 연쇄붕괴해석 제어프로그램을 사용하여 2층 2경간 예제구조물의 연쇄붕괴해석을 수행하였다. 예제구조물은 현행 국내 설계기준에 따라 설계하였으며, 그림 4에 나타낸 바와 같이 총고 3m, 경간 6m의 2층 철골구조물이다. 기둥과 보는 각각 SM490과 SS400의 재료를 이용하였고 OpenSees의 Nonlinear Beam-Column요소를 사용하여 모형화 하였다. 예제구조물에 사용된 부재의 단면을 표 1에 나타내었다. 예제구조물의 보에 고정하중 및 적재하중으로 0.15kN/cm와 0.075kN/cm의 등분포하중을 각각 가하였다. 동적해석의 시간간격은 0.02로 하였고 각 부재의 질량은 0.0459kN·sec²/cm의 값을 이용하여 계산하였다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 예제구조물은 1층 중앙의 내부기둥을 최초 파괴부재로 선택하였다. 본 예제에서는 소성힌지의 회전값이 0.035를 초과하는 경우에 손상지수를 1로 보아서 부재의 단부가 파괴된 것으로 간주한다. 이

값은 DoD에서 절지형 보단면(Reduced Beam Section)을 사용한 철골부재의 단부에 대하여 파괴 기준으로 제시한 값으로써, FEMA-365에서 제시하고 있는 지진에 의한 붕괴방지수준인 0.02보다 조금 큰 값이다. 구조물의 연쇄붕괴해석에 사용될 수 있는 해석기법 중 비선형 정적 및 동적해석기법을 이용하여 연쇄붕괴 해석을 수행하였고 그 결과를 비교, 분석하였다. 본 연구에서는 표 2에 나타난 바와 같이 연쇄붕괴 해석 시에 일반적으로 사용될 수 있는 3가지 해석모델을 사용하여 연쇄붕괴해석을 수행한 후 그 결과를 비교하였다. 모델 A는 일반적인 비선형정적해석을 수행한 모델로서 수직방향으로 Push-over 해석을 한 모델이다. 이 모델에서는 해석의 편의상 부재 단부의 회전값이 0.035를 넘어서 파괴상태에 이르러도 새로운 절점을 추가하여 파괴부재를 주구조물로부터 분리시키지 않고 현저로시만 모형화한 모델이다. 모델 B는 비선형동적해석을 수행한 모델로서 파괴된 부재의 처리방법은 모델 A와 같다. 모델 C는 비선형동적해석을 수행한 모델로서 부재의 단부가 파괴되면 새로운 절점을 추가하여 구조물을 다시 모형화하고 재해석을 수행하는 모델이다.

표 2. 해석모델

Analytical Model	Material	Analysis	Element Disconnection
Model A	Nonlinear	Static	Do Not Consider
Model B	Nonlinear	Dynamic	Do Not Consider
Model C	Nonlinear	Dynamic	Consider

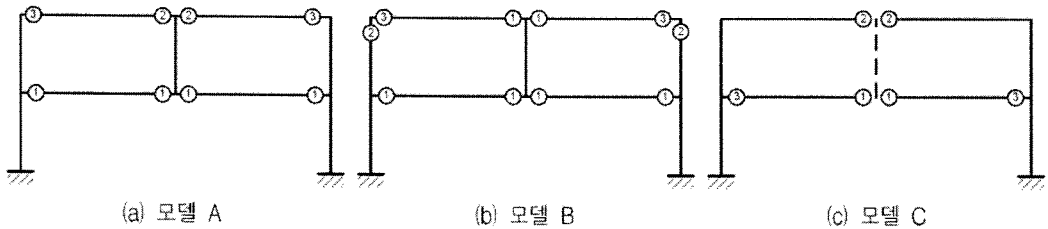


그림 5. 해석모델의 연쇄붕괴해석결과

앞에서 설명한 3가지 해석모델을 사용하여 연쇄붕괴해석을 수행한 후 부재가 파괴되는 순서를 그림 5에 나타내었다. 정적비선형해석을 수행한 모델 A의 경우에는 계기된 기둥과 연결된 상부의 보 양단에서 먼저 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 구조물의 손상은 제거된 기둥의 상부에 존재하는 기둥과 연결된 보의 단부파괴로 이어지며 최종적으로 모든 보의 단부에서 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다. 모델 A에서는 기둥의 파괴가 발생하지 않는다. 모델 B의 경우에는 비선형동적해석을 수행한 경우로서 첫 번째 단계에서 1층 보의 양단부 및 2층 보의 중앙단부에서 파괴가 먼저 발생하고 다음 단계에서 2층 기둥의 상단부에서 파괴가 발생한다. 최종적으로 2층 보부재의 나머지 단부에서 파괴가 발생한다. 모델 A에서는 발생하지 않았던 기둥의 파괴가 모델 B에서 발생하므로 이것은 동적충격효과에 의하여 구조물에 더 큰 응답을 유발하기 때문인 것으로 판단된다. 모델 C의 경우는 그림 5(c)에 나타난 바와 같이 제거된 기둥과 연결된 보부재의 단부에서 최초로 파괴가 일어난다. 그 이후 파괴된 보 단부는 주구조물과 분리되며 이 단계에서는 2층 보의 중앙단부에서 파괴가 발생한다. 다음 단계에서 2층 내부 기둥은 모든 보부재와 분리되므로 해석모델에서 제거한 후 연쇄붕괴해석을 수행한다. 마지막 단계에서는 1층의 외부기둥이 파괴되면서 해석이 종료된다. 이와 같이 연쇄붕괴해석을 수행할 때 어떤 해석방법과 모형화기법을 사용하느냐에 따라서 구조물의 붕괴메커니즘이 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 연쇄붕괴 메커니즘을 파악하고 이에 대한 저항성능을 증가시킨

구조물을 설계하기 위해서는 부재의 파괴시의 동적 충격효과 및 구조물의 기하학적 형태의 변화를 모두 고려할 수 있는 해석기법을 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 골조구조물의 효율적인 연쇄붕괴해석을 위한 연쇄붕괴해석 제어프로그램을 개발하고, 국내 기준에 따라 설계된 철골 건물의 정적, 동적 비탄성 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 프로그램의 안정성 및 개발의 효율성을 높이기 위하여 구조해석 연구분야에 널리 이용되고 있는 OpenSees를 개발된 프로그램의 해석엔진으로 이용하고 입력데이터의 자동생성 및 해석결과 의 관리기능을 추가하였다. 최초파괴부재가 파괴된 이후, 다른 구조 부재에서 극한의 변형이 발생하여 파괴에 도달하였을 때 새로운 절점을 추가하여 강성 및 질량행렬을 재구성한 후 재해석을 수행하거나, 또는 해석의 편의를 위하여 부재의 파괴된 단부를 주 구조물과 분리하지 않고 현지상태로 해석을 수행할 수 있는데, 이러한 파괴된 부재의 모형화 방법에 따라서 구조물의 연쇄붕괴메커니즘이 다르게 나타났다. 따라서 다소 번거롭더라도 구조물의 실제거동을 정확하게 표현할 수 있는 방법으로 모형화 하는 것이 필요하다. 대상 구조물의 연쇄붕괴가능성을 검토하고 연쇄붕괴가 발생하지 않는 구조물을 설계하기 위해서는 여러 번의 반복적인 해석이 필요한데 본 연구에서 개발된 연쇄붕괴해석 제어프로그램을 이용하면 이를 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대되고 수작업 시 발생할 수 있는 오류를 감소시킴으로써 해석의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 추후에는 여러 연구자들에 의하여 발표된 보다 다양한 손상모델 및 손상지수 계산방법 등을 프로그램에 추가하여 해석의 신뢰성 및 프로그램의 활용성을 높이는 작업을 하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업(M10600000234-06J0000-23410)지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준, 대한건축학회
- Colombo, A. and Negro, P. (2005), A Damage Index of Generalized Applicability, *Engineering Structures*, 27, pp.1164-1174.
- FEMA, (2000) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C..
- Kaewkulchai G. and Williamson E. B. (2004), Beam Element Formulation and Solution Procedure for Dynamic Progressive Collapse Analysis, *Computers and Structures*, 82, pp.639-651.
- The U.S. General Services Administration(GSA) (2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, *GSA*.
- Unified Facilities Criteria (UFC) DoD (2005) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, (UFC4-023-03), *Department of Defense*.