

감쇠기가 철골조 건물의 연쇄붕괴 방지에 미치는 효과

Effect of Dampers on Preventing Progressive Collapse in Steel Frames

이 승 준* · 최 현 훈** · 김 진 구*** · 휘 짜안 흠****

Lee, Seungjun · Choi, Hyunhoon · Kim, Jinkoo · Huynh, Chanh Trung

요 약

본 논문에서는 비선형 동적해석법을 이용하여 감쇠기의 적용이 철골조 건물의 연쇄붕괴 방지에 미치는 영향을 평가하였다. 단자유도 구조물에서 감쇠비의 변화에 따라 폭발하중이 구조물의 응답에 미치는 영향을 분석하였고, 15층 3경간 철골조 건물에서는 일정한 감쇠비 하에서 경간을 6m, 9m, 12m로 달리 하면서 감쇠기 설치 효과를 비교하였다. 단자유도 시스템의 경우 감쇠비가 증가 할수록 폭발하중에 의한 진동이 빠르게 감소하고 변위의 감소폭도 커지는 경향을 보였다. 15층 철골조 건물에서도 역시 감쇠기를 설치할 경우 수직 처짐 및 초기 진동을 제어하는 효과가 있었다. 구조물의 경간이 증가하여 수직 변위가 증가 할수록, 감쇠기에 의해 소산된 에너지도 증가하기 때문에 수직 처짐 제어효과가 큰 것으로 나타났다.

keywords : 감쇠기, 철골조, 연쇄붕괴

1. 서 론

연쇄붕괴는 폭발, 화재 등의 비정상 하중에 의하여 발생한 구조부재의 국부적인 손상으로 인하여 구조물 일부 혹은 전체가 연쇄적으로 붕괴를 일으키는 현상을 말한다. 연쇄붕괴 현상은 2001년 World Trade Center의 연쇄붕괴 사고처럼 큰 인명 및 재산 피해를 초래할 수 있다. 현재 대표적인 연쇄붕괴 방지 설계 방법으로 사용되는 대체경로법은 비정상 하중에 의하여 주요 구조부재가 파괴된다고 가정하여 이를 제거한 후에 제거된 부재의 하중을 인접부재로 재분배하여 나머지 구조요소들이 그로 인한 하중을 부담할 수 있는지 확인하는 방법이며, 미국 GSA와 DoD에서는 대체경로법을 사용한 연쇄붕괴 방지에 관한 해석 및 설계지침을 제시하고 있다(General Services Administration, 2003; Department of Defense, 2005).

점성 유체 감쇠기, 점탄성 감쇠기, 소성 감쇠기 등과 같은 수동형 에너지 소산장치는 장치의 설계, 설치 및 교체가 용이하여 신축 건물 뿐 아니라 기존 건물에도 적용이 가능하므로 지진 및 풍하중에 대한 저항능력을 향상시키기 위한 가장 효과적이고 경제적인 방법이라 할 수 있다. 지금까지 감쇠기가 적용된 구조물의 내진 및 내풍 성능에 대한 연구는 활발하게 진행되었지만, 연쇄붕괴 거동에 대한 연구는 아직 수행되지 않았다.

본 연구에서는 폭발 발생 시 감쇠(damping)가 단자유도 구조물의 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 15층 3경간 철골 구조물의 연쇄붕괴 저항성능에 대한 감쇠기의 영향을 경간 길이 별로 비교하였다. 감쇠기와 비정상 하중의 동적 특성을 고려하기 위하여 선형 동적해석과 비선형 동적해석을 수행하였다.

* 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정 smartmaru@skku.edu

** 정희원·삼성물산 기술연구센터 선임연구원 공학박사 hyunhoon.choi@samsung.com

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

**** 학생회원·성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 hctews@yahoo.com

2. 연쇄붕괴 해석 방법

연쇄붕괴 해석은 구조부재가 비정상 하중에 의하여 파괴되는 시나리오를 예상하고, 이러한 부재의 부분적인 손상이 연쇄붕괴로 이어질 지에 대한 평가를 수행하는 방법이 주로 사용되고 있다. 현재 GSA와 DoD 기준에서 제시한 연쇄붕괴의 가능성을 평가하기 위한 대표적인 방법으로는 본 연구에 적용된 정적 해석법과 동적 해석법이 있다. 정적 해석법은 그림 1과 같이 동적 증폭계수 2를 적용한 하중조합을 적용하도록 규정하고 있고, 동적 해석법은 그림 2의 하중조건 하에서 그림 3과 같이 부재력을 가하다가 순간적으로 제거하는 방식으로 기둥이 제거되는 동적효과를 모사하여 수행한다.

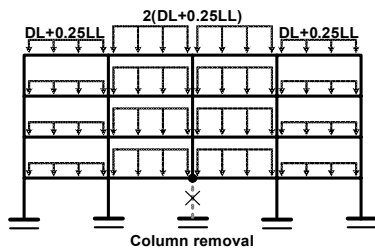


그림 1. 비선형 정적해석의 적용하중

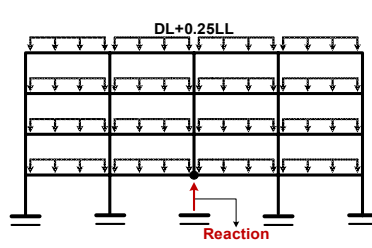


그림 2. 비선형 동적해석의 적용하중

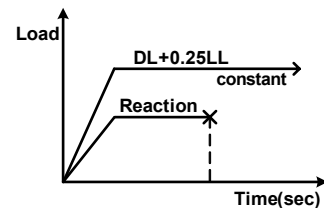


그림 3. 동적하중 가력 방법

3. 구조물의 응답에 대한 감쇠의 영향

본 장에서는 먼저 그림 4와 같은 단자유도 시스템에서 폭발압력이 작용할 때 구조물의 응답에 미치는 감쇠의 영향을 살펴보았다. 폭발압력이 단위면적에 작용한다고 가정하고 구조물에 가력 하였다.

구조물의 주기 변화에 따라 감쇠비가 증가할 때의 탄성 변위응답을 나타낸 그림 5에서 0.5초 주기대역을 제외하고 감쇠비가 증가하면 변위 응답은 크게 줄어들었다. 감쇠비에 따른 변위의 변화를 살펴보기 위하여 나타낸 그림 6에 따르면, 단주기 부분에서 주기가 0.5초까지는 감쇠비를 증가시키면 구조물의 응답이 줄어들었지만, 이후에는 대체적으로 응답의 감소폭이 크게 변하지 않았다. 구조물의 주기가 0.5초이고 감쇠비가 각각 5%와 20%인 경우의 변위와 감쇠력의 변화는 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 감쇠비가 증가하면 충격하중에 의한 진동은 빠르게 감소하고, 변위도 줄어들었다. 그림 8을 보면 초기 충격하중에 의해 감쇠력은 급격하게 증가하지만 이후 점진적으로 줄어드는 거동을 하였다. 이는 그림 4과 같이 하중의 형태가 한쪽방향으로 크기 때문에 감쇠의 효과가 초기 변형에 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

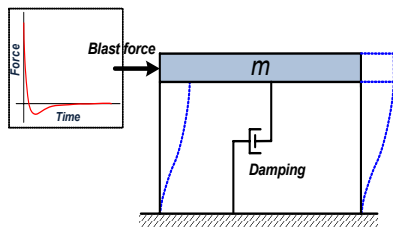


그림 4. 단자유도 시스템

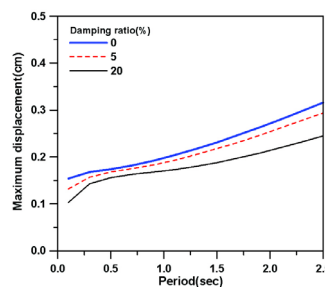


그림 5. 감쇠비에 변화에 따른 탄성시스템의 최대 변위응답

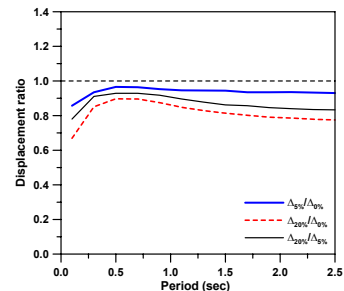


그림 6. 감쇠비에 변화에 따른 탄성 시스템의 변위응답비

비탄성 시스템의 변위 응답을 파악하기 위하여 표현한 그림 9에서 해석결과를 20% 감쇠비를 가진 구조물의 응답을 5% 감쇠비를 가진 구조물의 응답으로 나누어 나타내었다. 비탄성 시스템에서도 감쇠비가 증가할수록 구조물의 응답은 줄어들었다. 특히 변위 연성비가 큰 경우 0.5초 이상에서 응답의 감소효과가 컸다.

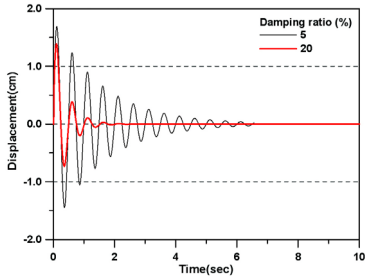


그림 7. 감쇠비에 변화에 따른 탄성 시스템의 변위 시간이력

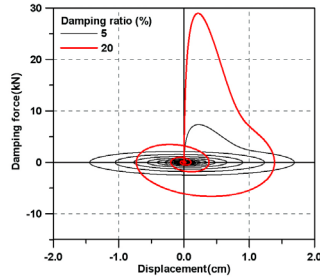


그림 8. 감쇠력의 변화

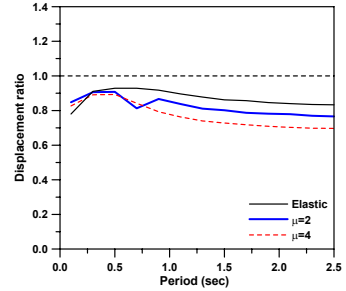


그림 9. 감쇠비에 변화에 따른 비탄성 시스템의 변위응답비

4. 다층 예제 구조물의 설계 및 해석 모델링

예제 구조물은 그림 10~그림 11과 같은 평면과 형상을 가진 15층 3경간 철골조 건물이며, 경간을 6m, 9m, 12m로 각각 달리하여 설계하였다. 내부골조는 외부골조와 힌지접합을 하여 중력하중에만 저항하도록 설계하였으며, 각 층의 층고는 4m로 모두 동일하다. 설계하중은 건축구조설계기준(대한건축학회, 2005)에 따라 5.0kN/m², 적재하중 2.5kN/m²를 적용하였고, 풍하중은 노풍도 A, 기본풍속 30m/sec, 중요도 계수 1.1, 가스트 영향계수는 2.5로 산정하였다. 설계 지진하중은 지진구역 1, 지역계수 0.22, 지반계수 Sc, 중요도 계수 1.2, 반응수정계수는 철골 가새 골조로써 중간 모멘트 골조를 가지는 이중 골조시스템에 해당하는 5를 적용하였다. 예제 구조물의 기둥은 SM490강재를 사용하였고, 가새와 보는 SS400강재를 사용하였다.

비선형 해석을 수행하기 위하여 그림 10에서 점선으로 표시한 영역의 외부 프레임들을 2차원으로 모델링 하였으며, FEMA-356(FEMA, 2000)의 기준에 따라 부재의 힘-변형 관계가 그림 13과 같이 항복 이후 최대 저항력에 도달했다가 저항성능이 감소되는 이력모델을 사용하였다. 그리고 6m, 9m, 12m 경간의 2차원 구조물이 경간별로 횡력에 20%의 일정한 감쇠비를 갖도록 점성 유체 감쇠기를 설계하여 그림 12와 같이 구조물의 전 층에 동일하게 적용하였다(김진구와 최현훈, 2001). 구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 평가하기 위하여 범용해석 프로그램인 SAP2000을 이용하였고, 해석 결과는 제거된 기둥 위치의 반력이 제거한 시점부터 그래프에 표현하였으며 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다.

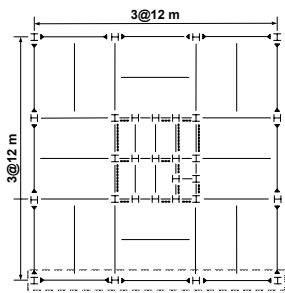


그림 10. 12m 경간 예제구조물 평면

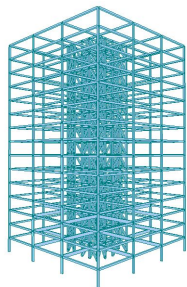


그림 11. 12m 경간 예제구조물 형상

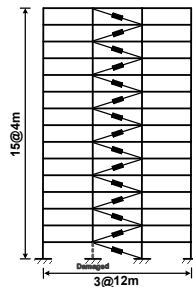


그림 12. 감쇠기가 설치된 구조물의 기둥제거 위치

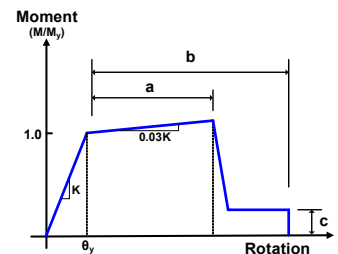


그림 13. 힘 부재의 이력모델

5. 해석 결과

그림 14~그림 16은 철골 구조물과 이에 점탄성 감쇠기를 설치한 구조물의 비선형 동적해석 결과를 경간 별로 나타낸 것으로, 6m 경간에서 -9.1cm에서 -5.8cm로, 9m 경간에서 -14.1cm에서 -8.2cm로, 12m 경간에서 -17cm에서 -36cm로 제어되었으며, 경간이 길어질수록 수직 변위 제어 효과가 커짐을 알 수 있다. 경간의 길이가 6m와 9m인 구조물에서는 점성 유체 감쇠기를 설치한 구조물의 최종 변위가 선형정적해석 결과와 일치하게 됨을 알 수 있다.

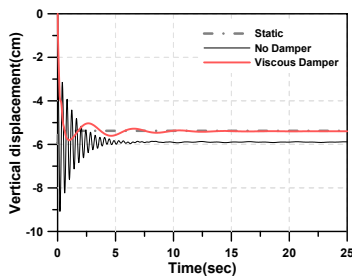


그림 14. 6m 경간 구조물의 비선형 동적해석

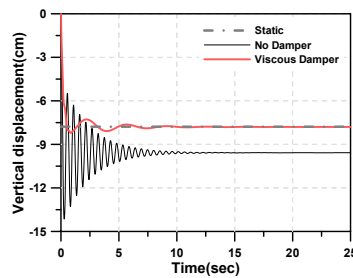


그림 15. 9m 경간 구조물의 비선형 동적해석

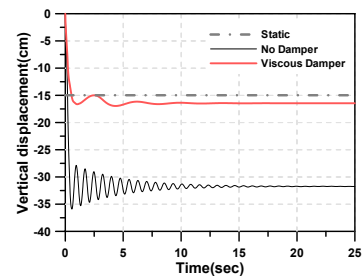


그림 16. 12m 경간 구조물의 비선형 동적해석

6. 결론

본 연구에서는 선형 및 비선형 동적해석 방법을 이용하여 감쇠기가 연쇄붕괴 저항성능에 미치는 영향을 평가하였다. 해석 결과에 따르면, 단자유도 탄성 시스템의 경우 감쇠비가 증가 할수록 폭발하중에 의한 진동이 빠르게 감소하고, 감쇠비의 증가함에 따라 변위의 감소폭도 커지는 경향을 보였다. 15층 철골조 건물에서도 역시 감쇠기를 설치할 경우 수직 처짐 및 초기 진동을 제어하는 효과를 보였고, 12m 경간 구조물에서는 수직변위와 소성현상이 6m, 9m의 경우보다 더욱 효과적으로 제어되었다. 이는 수직 변위가 증가 할수록 점성 감쇠기에 의하여 소산되는 에너지와 감쇠기로 인한 하중의 재분배 효과가 증가하기 때문이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 국가지정연구실사업(R0A-2006-000-10234-0)의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- General Services Administration** (2003) Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, Washington, D.C.
- Department of Defense** (2005) Design of buildings to resist progressive collapse, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03, Washington, D.C.
- 대한건축학회** (2005) 건축구조설계기준.
- FEMA** (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- 김진구, 최현훈, (2001) Evaluation of proper supplemental damping for a multi-story steel frame using capacity spectrum method, **한국지진공학회 논문집**, 18(2), pp.103~111