

주파수 높은 지진파가 낮은 건물도 파괴

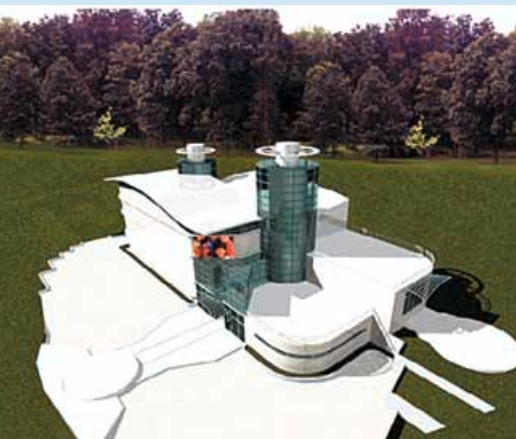
05

글_ 김태진 성균관대학교 건축공학과 교수 taejin@skku.edu

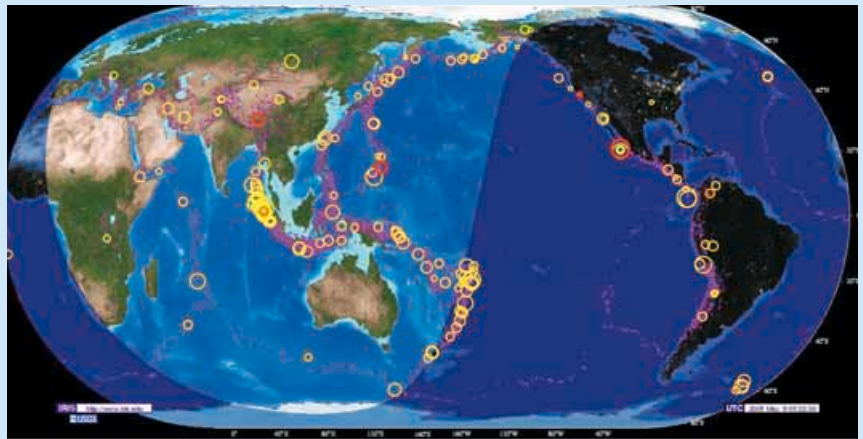
2004년 12월 인도네시아 수마트라 서측해안에서 발생한 지진으로 서남아시아를 강타한 지진해일과 2005년초 한반도 전역에서 감지된 일본 규슈 해역의 강진을 경험하면서 그 동안 지진 안전지대로 인식되어왔던 한반도에서의 지진피해에 대한 우려가 증가하고 있다.

1988년 건축물의 지진피해를 최소화하기 위해 내진설계기준이 제정되었지만 6층 이상의 건물만을 대상으로 하고 있어 실제 지진이 발발하였을 때 주거용 건물과 같은 저층 건물에서 대규모 피해가 예상된다. 내진설계기준 제정 당시 적용 대상 건물의 층수를 6층 이상으로 제한하였던 것은 내진설계라는 신기술을 도입하더라도 무리 없이 받아 들여질 수 있는 규모의 건물에 우선적으로 적용하기 위한 것이었지 저층 건물이 지진에

화재, 지진, 붕괴사고 등 각종 재난사고를 체험할 수 있는 국내 최초의 '시민안전체험관' 가상 조감도



가상 조감도



<그림 1> 2005년 5월 9일 현재 세계 지진발생 현황(출처: <http://www.iris.edu/seismon>)



〈그림 2〉 중고층 건물의 피해 - 1985년 멕시코지진 (출처: <http://nisee.berkeley.edu/>)



〈그림 3〉 은행건물의 연쇄붕괴 - 1995년 일본 고베지진(출처: <http://nisee.berkeley.edu/>)



〈그림 4〉 주거건물의 붕괴 - 1999년 터키 이즈미티지진(출처: <http://nisee.berkeley.edu/>)

안전하기 때문인 것은 아니었다.

지진규모 따라 건물 피해 양상 달라

〈그림 1〉은 2005년 5월초 현재 지구상에서 발생한 지진의 분포와 그 규모를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 지진은 주로 지진대라고 불리는 지역에서 집중적으로 발생하고 있고 그 빈도도 높다. 통계에 의하면 대재난을 야기할 수 있는 규모 8 이상의 초강진은 연평균 1회, 건물에 치명적인 손상을 줄 수 있는 규모 7이상의 강진은 연평균 18회 발생하고 있다. 또한 규모 2~3의 약진은 매일 1천 회씩 발생한다. 이렇듯 지구적인 관점에서 보면 지진은 어쩌다 일어나는 것이 아닌 일상적인 자연현상이라고 볼 수 있다.

최근 발생한 지진 피해사례를 살펴보면 건물의 피해양상은 지진에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 〈그림 2〉는 1985년 멕시코 지진에 의한 건물의 붕괴사건이다. 멕시코 지진은 우리 나라의 건축물 내진설계 기준제정의 직접적인 계기가 된 것으로, 지진파가 연약지반인 멕시코시티 지역에서 증폭되면서 6~15층 규모의 중고층 건물에 큰 피해를 냈다. 1995년 일본 고베에서 발생한 지진(그림3 참조)의 경우에는 최신 내진설계기준에 따라 설계된 고층건물의 피해는 상대적으로 적었던 반면 저층건물이나 1~2층의 목조건물에서 큰 피해가 보고되었다. 1999년 터키 이즈미티지에서 발생한 지진으로 피해를 본 건물(그림 4 참조)들은 부실공사가 그 주요인이었다.

농촌인구의 급격한 도시집중으로 건물에 대한 수요가 급증하였고 이에 따라 날림공사가 성행했었는데 바로 이러한 건물들이 큰 피해를 본 것이다. 대만의 경우에는 기존 벽식 아파트의 경제적 효용성을 증대시키기 위해 1층의 벽체를 제거하고 기둥으로 대체하는 주상복합형식의 구조시스템으로 많은 주거건물을 지었는데 이러한 건물들에 큰



〈그림 5〉 주상복합건물의 도괴 - 1999년 대만 치치지진(출처: <http://nisee.berkeley.edu/>)

피해가 발생하였다. 수직적인 강성의 분포가 급격하게 변하는 구조시스템에서는 1층 기둥에 응력이 집중돼 이로 말미암아 기둥이 파괴되면서 〈그림 5〉와 같은 건물의 피해가 발생할 수 있다.

건물에 발생하는 피해 양상은 건물의 높이뿐만 아니라 구조시스템과 시공 정도 및 상재에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 특히 건물의 높이에 따른 피해는 발생하는 지진의 특성과 밀접하게 관계가 있으며, 이러한 경향을 이해하기 위해서는 지반운동에 의한 건물의 동적거동에 대해 먼저 알아야 한다.

지진파 주파수 높낮이가 건물 피해 결정

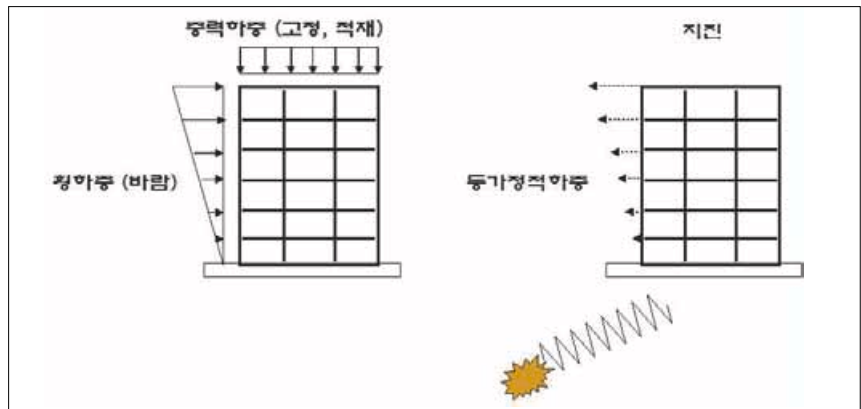
건물의 기본적인 기능은 고정하중이나 적재하중 등의 중력하중과 바람이나 지진과 같은 환경하중으로부터 내부에 거주하고 있는 사람들과 재산을 안전하게 보호하는데 있다.

중력하중이나 풍하중은 압력의 형태로 건물의 구조체에 직접 전달되지만, 지진하중은 건물의 동적거동을 통해 관성력($F = m \times a$)을 발생시켜 구조체에 작용한다(그림 6 참조). 따라서 풍하중은 건물의 높이나 형상에 따라 하중의 크기가 결정되는 반면, 지진하중은 동적거동에 직접적인 영향을 주는 건물의 중량과 구조체의 강성으로 그 크기가 변할 수 있다. 즉, 건물의 높이나 형상이 동일하더라도 건물 내부의 구조시스템이나 층별 중량분포에 따라 작용하중의 크기가 변하게 되는 것이다.

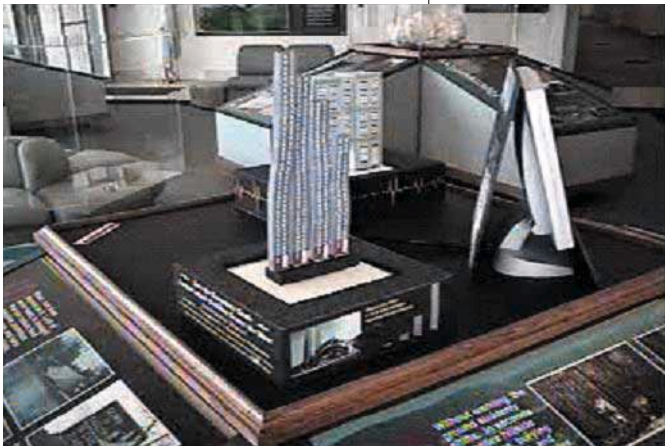
〈그림 7〉은 각기 다른 높이의 건물 모형에 대한 진동대 실험장면이다. 구조시스템이나 각 층별 중량이 동일한 경우 건물이 고층화되면 지진력에 저항하는 건

물의 수평강성은 감소하고 저층건물에서는 수평강성이 상대적으로 커진다. 건물의 주기는 강성의 제곱근에 반비례하므로 건물이 고층화할수록 고유진동주기가 길어지는 반면 저층건물에서는 짧아지는 것이다. 〈그림 8〉은 고유진동주기의 역수인 고유주파수(W_n)에 대하여 가진주파수를 변화시키면서 구조물 응답의 변화를 보여주고 있다. 구조물의 응답은 가진주파수가 구조물의 고유주파수에 근접할수록 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉, 공진현상이 발생하는 것이다. 결론적으로 저층 건물은 높은 주파수 영역(단주기 영역)에서 고층 건물은 낮은 주파수 영역(장주기 영역)의 지진파에 의해 큰 하중을 받는다.

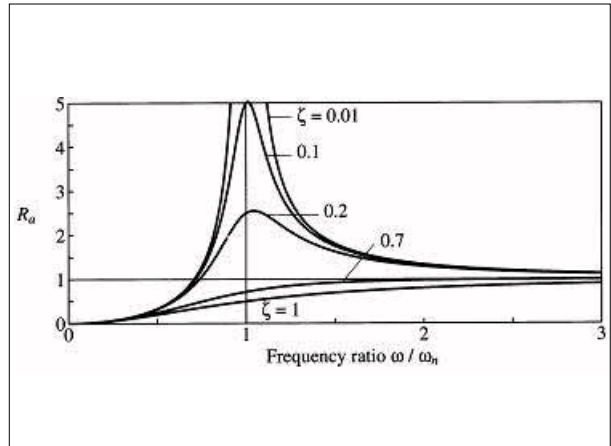
지진파에는 단일한 주파수만이 존재하는 것이 아니라 지진의 발생과 전달 메커니즘을 통해서 다양한 주파수가 혼재되어 있기 때문에 단순한 해석모형에 의해 어느 높이의 건물에 피해가 크게 발생할 것인지를 예측하기는 어렵다. 일반적으로 지진파의 복잡한 주파수 특성을 분리하여 설계에서 고려하기보다는 〈그림 9〉와 같이 여러 주기의 구조물



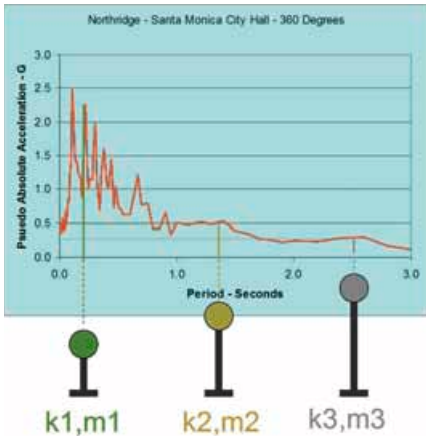
〈그림 6〉 건축물에 작용하는 하중



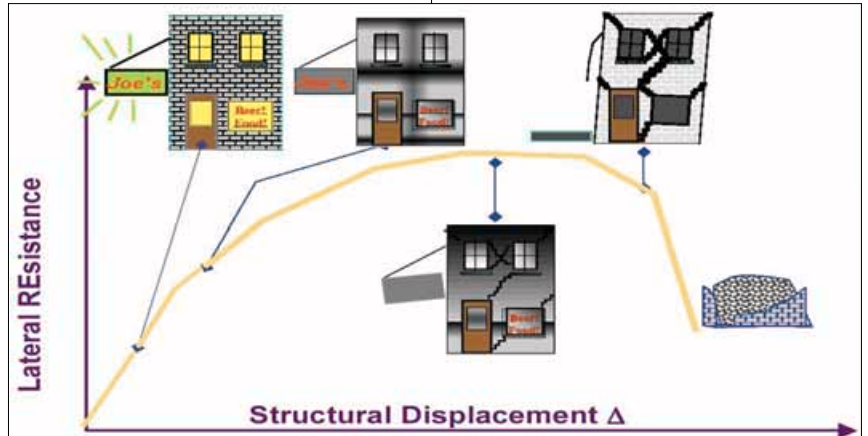
〈그림 7〉 건축물 모형 진동대 실험(http://www.jclahr.com/science/earth_science/esic/)



〈그림 8〉 조화하중에 의한 구조물의 가속도 응답(출처: Dynamics of Structures by A. K. Chopra)



<그림 9> 구조물의 주기에 따른 반응 스펙트럼(출처: CE227 lecture note by R. O. Hamburger)



<그림 10> 내진설계의 기본 개념(출처: CE227 lecture note by S. A. Mahin)

에 대해 특정 지진파를 적용하여 해석을 하고, 그 최대 응답값을 도시한 반응 스펙트럼이 건물의 내진설계에서 널리 사용되고 있다. <그림 9>에 사용된 지진파의 경우에는 고유진동주기가 0.2초인 저층건물에 작용하는 지진하중이 가장 크고 진동주기가 길어질수록 작아지는 것을 알 수 있다.

어느 정도 피해 감안해 건물 내진설계

지진에 의한 건물의 피해 정도는 내진설계여부에 달려있다. 일반적으로 내진설계가 되어 있지 않더라도 건물은 중력하중과 풍하중에 저항할 수 있도록 설계되기 때문에 어느 정도는 지진에 견딜 수 있는 내력을 보유하고 있다고 할 수 있다. 건물이 고층화할수록 풍하중의 영향이 커져 설계지진하중 이상을 견딜 수 있게 설계될 수 있지만, 저층 건물은 풍하중의 영향이 작기 때문에 단주기의 지진하중에 작용하는 경우에는 부재에 발생하는 응력이나 변형이 설계 당시 고려했던 것 이상을 초과하게 되므로 피해가 발생할 가능성이 더 높다. 하지만 풍하중에 의한 설계는 구조물의 소성 메커니즘을 고려하고 있지 않기 때문에 설계지진하중 이상의 지진이 일어나면 고층건물에서도 피해가 발생하게 된다.

건물이 위치한 지역에서 발발 가능한 최대 지진에 대해 아무런 피해가 건물에 발생하지 않도록 설계하는 것은 경제적인 관점에서 효율적이지 못하다. 왜냐 하면 건물의 수명은 일반적으로 50~100년 정도인데 반하여 최대 지진이 발발할 수 있는 주기는 500년 이상이기 때문이다. 특히 우리나라와 같이 강진이 발생할 확률이 적은 지역에서는 건물의 수명 동안 지진을 전혀 겪지 않을 수도 있는 것이다. 따라서 내진설계는 설계하중에 대해 어떠한 피해도 허용하지 않는 일반적인 구조설계와는 달리 지진하중의 크기에 따라 어느 정도의 피해를 허용하는 기본 철학에 근거를 두고 수행되고 있다(그림10 참조).

첫째, 자주 일어날 수 있는 작은 지진에 대해서는 아무런 피해가 없도록 하고, 둘째,

건물의 수명 동안 한두 번 발생할 수 있는 중간 정도 규모의 지진에 대해서는 마감재 균열 등 비구조 요소에 대한 파손은 허용하지만 구조체의 피해는 발생하지 않도록 하며, 셋째, 건물의 수명 동안 일어날 가능성이 희박한 큰 지진에 대해서는 구조체의 피해를 허용하지만 건물이 붕괴되는 것은 방지하도록 한다는 것이 그 기본 철학이다.

지진은 구조체의 강성과 직접적으로 연관되기 때문에 바람의 경우와는 달리 건물의 높이보다는 내진설계여부와 내진상세 및 시공의 적절성에 따라 그 피해의 정도가 결정된다. 건물이 고층화할수록 각 층에 작용하는 하중은 작아지지만 내진상세나 시공정도에 따라 취약부가 존재할 가능성이 높아진다. 따라서 지진피해를 최소화하기 위해서는 각 구조시스템별, 층수별 건물의 동적특성을 파악하여 각 경우에 대해 적절한 내진대책을 수립하는 것이 중요하다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 건축학과 졸업 후 동 대학원에서 석사학위를, 미국 UC 버클리대학에서 박사학위를 받았다.