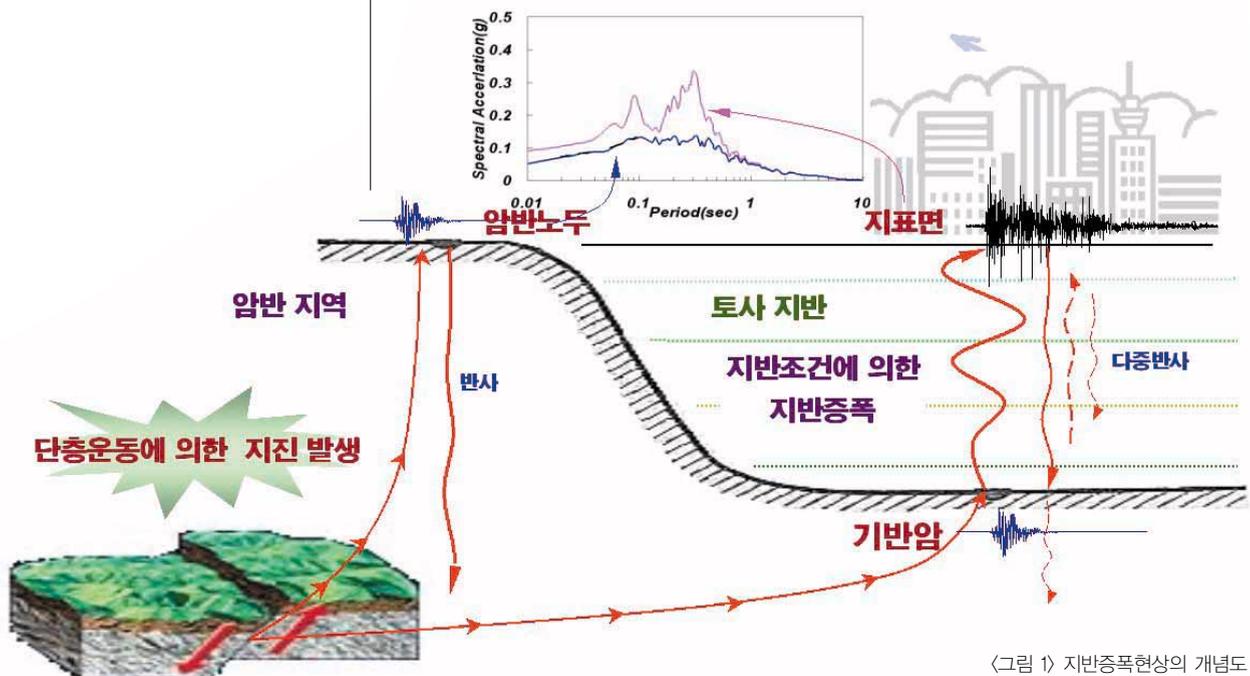


지진의 마술 .. 진동을 키우고 액체처럼 바뀌는 '흙'

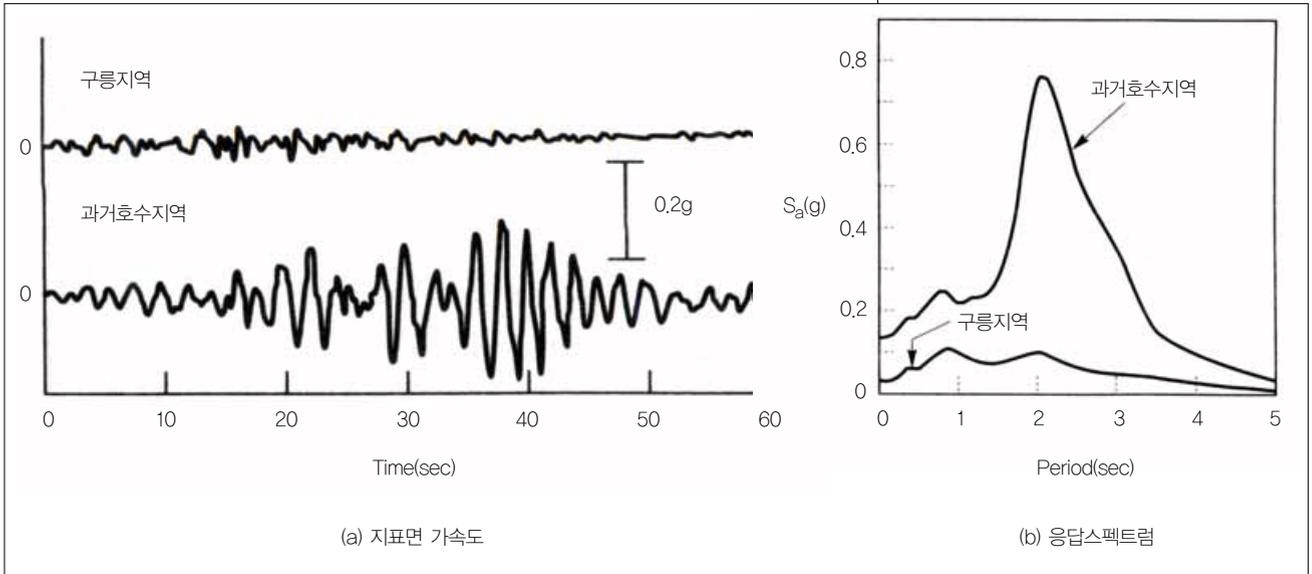
03

글_ 김동수 KAIST 건설·환경공학과 교수 dskim@kaist.ac.kr

지진이 발생하면 동일한 도시 안에서도 어느 지역은 피해가 크고 다른 지역은 상대적으로 피해가 작게 발생하는 현상이 종종 있다. 이러한 현상은 지진에 의해 구조물에 가해지는 하중이 건물의 하부지반조건에 따라 상당히 달라지기 때문이다. 특히 하부지반이 단단한 암반층일 때보다는 연약한 토사지반으로 이루어졌을 경우 진동의 크기가 크게 증폭되는데 이러한 현상을 지반증폭현상이라고 한다. <그림1>은 건물



<그림 1> 지반증폭현상의 개념도



〈그림 2〉 멕시코시티 지진 지진시 지진가속도의 변화(Kramer, 1996)

이 들어선 하부지반에서 증폭현상이 크게 발생하여 상부 구조물에 큰 하중이 가해지는 모습을 나타낸 것이다.

하부지반조건 · 고유주기가 피해 정도 결정

지반증폭현상이 확연히 드러난 대표적인 예는 1985년 9월 19일 발생한 규모 8.1의 미 초아칸 지진(일명 멕시코시티 지진)의 경우다. 실제 단층운동이 일어나 지진이 발생한 태평양 연안(진앙지역)에서는 피해 정도가 미미하였으나, 진앙에서 350km 떨어진 멕시코시티에서는 엄청난 피해가 발생하였다. 이러한 현상의 원인은 멕시코시티 지역의 지반조건 및 그 지역에 위치한 건물의 고유주기와 밀접한 관계가 있었다.

멕시코시티는 지반조건을 토대로 분류해 보면, 단단한 암반으로 이루어진 구릉지대와 화산활동으로 생성된 화산재나 실트 또는 점토 등으로 이루어져 연약층이 깊은 과거 호수지역, 그리고 구릉지대와 과거 호수지역의 경계 지반으로 나뉜다. 지진하중의 크기를 나타내는 척도로 이용되는 지표면 지반가속도의 계측결과를 살펴보면, 구릉지역의 경우 0.03~0.04g이었으며, 과거 호수지역은 구릉지역에 비해 약 5~10배, 경계 지역은 구릉지역보다 약간 크게 계측되었다(그림 2-a 참조). 이는 하부지반조건에 따라 증폭 정도에 현격한 차이가 나타났기 때문이다.

하부지반조건 이외에 지진에 의한 건물의 피해 정도가 결정되는 다른 주요한 원인은 건물의 고유주기이다. 지반증폭 정도가 크게 발생하였던 과거 호수지역의 경우 5층 이하의 건물과 30층 이상의 건물 피해가 경미했던 반면, 5층~20층 사이의 건물들은 큰 피해를 보았다. 건물이 손상을 입는 이유는 건물에 하중이 추가로 가해지기 때문이고, 보통 이러한 하중의 크기 계산은 〈그림 2-b〉와 같은 응답스펙트럼을 이용한다.

응답스펙트럼은 건물이 자신의 고유주기에서 지진으로 인해 받는 최대하중을 의미하며, 하중을 가속도로 나타낸 것이다. 보통 건물의 고유주기는 건물의 층수에 0.1을 곱하는 식으로 간략하게 계산할 수 있고, 따라서 20층 건물의 경우 고유주기가 대략 2초 정도가 된다. 〈그림 2-b〉에서 과거 호수지역의 경우 지진에 의해 추가로 받는 하중이 주기 2초 근처에서 약 10배 가까이 커지는 것을 알 수 있으며, 따라서 고유주기가 2초 근처인 5~20층 사이의 건물들이 큰 피해를 보게 된 것이다.

공진현상 · 다중반사로 지반증폭현상 일어나

그러면, 지진시 지반증폭현상은 왜 발생하는 것일까. 지진이 마술이라도 부리는 것일까. 그 대답은 대부분의 자연현상과 마찬가지로 지반증폭현상도 과학적으로 충분히 설명할 수 있다는 것이다.

우리가 잘 알고 있는 자연현상으로 공

진현상이 있다. 모든 사물에는 각각의 고유주파수 또는 고유주기가 존재하는데 지반에도 고유주기가 있다. 지반의 고유주기는 암반층 위에 있는 토사지반의 깊이와 지반의 단단한 정도를 나타내는 전단파의 속도를 이용하여 계산한다. 또한, 지진시 전파되는 지진파는 다양한 주파수(주기의 역수) 성분으로 이루어져 있는데, 지반의 고유주기가 지진파의 특정 주파수 대역과 일치하거나 비슷하게 되면 공진현상이 일어나 지반진동이 크게 증폭된다. 이와 같은 공진현상이 지반증폭현상을 일으키는 주된 요인이다.

또 다른 이유로는 우리가 잘 알고 있는 다른 매질 사이에서 일어나는 파(wave)의 전파 현상에서 찾아 볼 수 있다. 파는 단단한 매질에서 느슨한 매질로 전달이 잘 되지만 느슨한 매질에서 단단한 매질로 전파될 때는 파에너지의 많은 부분이 반사된다. <그림 1>에 나타난 지반증폭현상에 적용하면 단층에서 발생된 후 암반에서 토사지반으로 입사된 지진파는 지표면까지 전파된 후 다시 반사되어 암반층에 도달하게 되는데, 일반적으로 암반층은 토사지반보다 단단하다보니 암반층으로 지진파가 모두 빠져나가지 못하고 대부분 반사된다. 이러한 현상은 지진파가 감쇠현상으로 완전 소멸될 때까지 지속된다. 이를 다중반사라고 하는데, 지진파가 다중반사에 의해 암반층 위의 토사지반에서 갇히게 되는 효과가 나타나 지반의 진동이 지속되고 증폭현상이 더 크게 일어나게 되는 것이다. 따라서 지반증폭현상은 위와 같이 지반의 고유주기와 지반의 단단한 정도, 특히 지반의 전단파속도 등을 평가해 비교적 정확히 예측될 수 있다.



<그림 3> 지반의 액상화로 인한 건물의 피해사례 (1964년 일본 니가타현 지진)

지반증폭현상은 지진에 의해 나타나지만, 지반증폭 정도는 결국 구조물이 건설된 하부지반의 국지적인 특성에 의해 좌우된다. 따라서 우리가 명심해야 할 사실은 지진에 의해 발생하는 피해를 줄이기 위해서는 건물을 짓기 전에 하부지반에 대한 정확한 지반 조사를 통하여 내진설계를 해야 한다는 것이다.

심각한 건물 피해 초래하는 지반 ‘액상화’

지진에 의해 커다란 피해가 발생하게 되는 또 다른 흥미로운 요인으로는 지반이 물같이 변하는 액상화 현상을 들 수 있다. <그림 3>과 <그림 4>는 각각 우리의 삶에서 안식처가 되는 아파트 건물이 전복되고, 댐과 같은 사회간접자본 시설 등 중요한 구조물이 파괴되어 국가 경제에 막대한 영향을 끼치게 된 지진의 피해사례로 모두 액상화 현상에 의해 발생한 것이다.

액상화 현상은 우리의 실생활에서도 쉽게 발견할 수 있는 현상이다. 썰물 때 물이 빠져나간 해변의 백사장에 가만히 서있으면 파도가 칠 때마다 발뒤꿈치 부분이 살짝 꺼지는 것을 경험해본 적이 있을 것이다. 이 경우 우리의 몸무게는 물론 변하지 않고 일정하지만, 파도의 진동에 의해 우리의 몸을 지탱하고 있던 발밑의 모래지반이 물과 같이 변하여 지지력을 상실함으로써 생기는 현상이다. 이와 마찬가지로 지진시 지하수 아래에 위치하여 물에 잠겨있는 모래지반의 경우, 지진의 진동으로 모래지반의 흠이 물처럼 되어 건물을 지탱할 수 있는 지지력을 상실해 상부구조물에 피해를 유발하게 되는 것이



〈그림 4〉 지반의 액상화로 인한 댐의 피해사례(1987년 미국 San Fernando 댐)



〈그림 5〉 지반의 액상화로 인한 지반의 파괴

며, 이러한 현상을 액상화 현상이라고 부른다.

그러면, 지진은 흙을 물로 변신시키는 마술을 부린 것일까. 그러나 이러한 현상도 과학적으로 설명이 가능하다. 여기서 마술을 부리는 것은 물이다. 일반적으로 모래흙의 경우 점토와는 달리 흙 입자들 사이에 점착력이 없어 뭉쳐지지 않는다. 설령 뭉쳐있더라도 가볍게 흔들거나 툇 쳐보면 금세 부서지거나 흩어진다. 이러한 모래 지반이 물에 잠겨 있을 경우, 지진에 의해 흙 입자들 사이에 변형이 발생하여 흙 입자 사이의 공간이 수축되면 흙 입자들 사이에 존재하는 물의 압력인 간극수압이 증가하게 된다. 간극수압이 점차 증가하여 모래지반의 구조를 지탱하고 있던 흙 입자들 사이의 접착력이 줄어들게 되면 지반이 지탱할 수 있는 능력이 줄어들고, 구조물이 침하되거나 심할 경우 구조물이 전복되는 등의 피해가 발생하게 되는 것이다. 또한, 모래흙에서 내부의 간극수압이 증가하여 물이 분수처럼 솟구쳐 오르고 화산분화구 같은 흔적이 남기도 한다(그림 5 참조).

이러한 액상화 현상은 건물을 지을 때 지반의 액상화가 발생할 수 있는 지반을 피하거나, 지반개량을 통하여 미연에 방지할 수 있다. 주요 구조물의 경우 액상화 현상이 발생할 경우 심각한 피해를 유발할 수 있으므로 이를 꼭 검토하여야 한다.

사상누각이라는 말이 있다. 한자 그대로 해석하면 모래 위에 세워진 누각이라는 뜻으로, 기초가 튼튼하지 못하면 곧 무너지고 만다는 것을 일깨워주는 고사성어다. 그 동안 우리나라는 지진에 대한 안전지대로 인식되어 내진설계에 대한 준비가 많이 부족하였

다. 그러나 역사적인 자료를 참고할 때 우리나라에서도 규모가 상당히 큰 지진이 여러 번 있었으며, 지진이 일정한 주기를 가지고 발생하기도 하는 점을 고려할 때, 우리나라에서도 규모가 큰 지진이 발생할 가능성이 적다고 단정할 순 없다. 지진이 100년에 한 번 일어난다고 하여도 그에 대한 적절한 대비를 하지 않았을 경우 사회·경제적으로 막대한 피해를 준다는 점을 생각해 볼 때, 이에 대한 준비를 철저히 해야 할 것이다. 그렇지 않다면 그야말로 사상누각이 되는 셈이다. ㉔



글쓴이는 '2002년 젊은 과학자상'을 수상했으며, 현재 지진공학회 이사를 겸임하고 있다.