

# 융합연구리뷰

## Convergence Research Review

현실화된 지진, 그 대비를 위한 연구  
지진재해도 평가  
-  
건축물 내진설계



C o n v e r g e n c e   R e s e a r c h   R e v i e w

# Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2017 January vol.3 no.1

- 03 편집자주
- 04 국내 지진 발생 특성과 지진재해도 평가 현황
- 36 9.12 경주지진을 바탕으로 지진에 대한 이해와 내진설계



**발행일** 2017년 01월 02일

**발행인** 하성도

**발행처** 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

**펴낸곳** (주)승일인쇄주식회사 Tel. 070-7416-4124

**디자인** 김진영 이숙현 최보람



## | 더 이상 지진 안전지대가 아닌 대한민국 현실화된 지진, 그 대비를 위한 연구

2016년 9월, 경주에서 한반도 역대 최고 강도인 5.8 규모의 지진이 발생하였다. 뒤이어 500여 차례의 크고 작은 여진이 잇따랐고, 수도권에까지 규모 2.3 지진이 발생하면서 더 이상 우리나라는 지진 안전지대가 아님을 확인하였다. 그간 우리나라는 지진에 대한 경험과 인식이 충분하지 않았으며, 인구 고밀도, 도시화, 난개발, 내진설계 미비 등으로 지진재해에 매우 취약한 상황에 놓여있었다. 그러나 이제는 지난 지진 발생을 경험삼아 그 피해를 최소화하기 위한 노력과 대책 마련이 시급한 때이다.

현재 과학기술로 지진에 대한 단기 예측은 불가능하다. 이에 지진 관련 연구들은 대부분 지진으로 인한 피해를 최소화하기 위한 현실적인 방법을 강구하는데 집중하고 있다. 이번 2017년도 1월 호에서는 지진 발생 규모를 예측하기 위한 지진재해도 평가와 지진방재를 위한 건축물 내진설계 기술에 대해 자세히 살펴보고자 한다. 나아가, 이들 기술을 토대로 지진발생 현황과 과거의 지진발생 이력 등을 감안하여 우리나라의 사회적 상황과 지진환경에 잘 부합하는 대비가 지속적이고 철저하게 이루어지길 기대해 본다.

## | 지진 피해 예측을 위한 지진재해도 평가

지진 피해를 최소화하기 위해서는 보다 신속하고 정확한 지진 발생 예측 기술 및 예보 시스템 구축이 중요하다. 현재로서 지진에 대한 단기 예측이 어렵기 때문에 과거의 지진 기록을 분석하여 앞으로 발생할 지진의 규모를 예측하는 지진재해도 평가 연구가 주목받고 있다. 체계적인 지진재해도 분석은 피해를 예측할 뿐 아니라 원전 설계와 안전성 평가 등에도 반영할 수 있어 그 활용 범위가 넓을 것으로 기대된다.

이에 이번 호의 1부에서는 국내 지진 역사와 우리나라 지진재해도 평가 현황에 대해 살펴보고자 한다. 이를 통해 국내 지진의 특성에 대한 정보를 제공하고 현재 기술에 대한 이해를 토대로 지진대응시스템 구축에 도움이 되길 기대해 본다.

## | 지진방재를 위한 건축물 내진설계

그동안 우리나라는 강진이 자주 발생하지 않는 지진환경으로 지진 재해 및 대비에 대한 중요성이 간과되어 왔다. 그렇게 때문에 건축물의 내진설계 규정도 의무화 기준이 약했거나 미흡했다. 그러나 지진으로 인한 대규모 인명 피해는 대부분 내진설계가 되지 않은 건물 붕괴로 인한 2차 피해가 가장 큰 원인이기 때문에 내진설계 의무화에 대한 필요성이 강조되고 있다. 이에 작년 12월 16일 제 11차 국민안전민관합동회의에서 '지진방재 종합대책'이 확정되면서, 올해 하반기부터 모든 주택과 2층 또는 200m<sup>2</sup> 이상 건물의 내진설계가 의무화 되었다.

이번 호의 2부에서는 작년 경주에서 발생한 지진에 대한 분석과 이해를 바탕으로 지진동을 증폭시키는 지반의 영향과 건축물의 내진설계에 대해 소개하고자 한다. 이를 통해 지진에 대비한 건축설계에 대한 일반인과 연구자들의 이해도를 높이고, 앞으로 내진설계에 대한 전문적인 연구가 더욱 활성화되기를 기대해 본다.

# 01

## — 국내 지진 발생 특성과 지진재해도 평가 현황 —

부경대학교 지구환경과학과  
강태섭 교수 (tskang@pknu.ac.kr)

# 01 서론

우리나라에서 발생하는 다양한 자연재해 가운데, 지진 발생으로 인한 재난은 대비를 위한 우선순위에서 그렇게 높은 자리를 차지하지 못했다. 그만큼 이웃한 일본이나 미국 서부 등과 같이 지진이 빈번하게 발생하고 이로 인한 피해 규모 또한 큰 나라와 지진활동을 비교하기는 어렵다. 그러나 사회적으로나 경제적으로 매우 고도화된 우리나라의 현재 상황에서 다양한 첨단화된 시설들에 대하여는 높은 재해 취약도를 염려하여야 하는 정도의 지진활동을 경험하고 있는 것도 사실이다.

사회의 주요한 기반 시설물 가운데는 지진과 같은 진동 하중에 민감한 종류가 많다. 이러한 시설물에는 원자력발전소 등과 같이 구조물과 세부 설비 등의 설계에서 지진동에 의한 영향으로부터 안전성을 확보해야 하는 목표가 가장 일차적인 경우가 있다. 또한 반도체 공장이나 자동차 공장 등 같이 각종 첨단 자동화 설비 등은 매우 미세한 지진동에도 불량품을 양산할 수 있기 때문에 양질의 상품을 생산하고 판매하여야 하는 경제적인 측면에서 지진에 의한 손실에 대비하여야 한다. 또한 전기나 가스 시설물, 화학 공장 등은 지진으로 인하여 매우 작은 손상을 입더라도, 이것이 커다란 2차적인 피해를 유발할 수 있다(그림 1).



그림 1. 2011년 3월 11일 규모 9.0 동일본 대지진으로 인한 지바현 천연가스 저장 탱크 화재(사진: Reuters)

사실 2011년 규모 9.0의 동일본 대지진 당시 후쿠시마 원자력발전소의 파괴 또한 지진과 지진해일은 직접적인 재난의 원인이 아닌 단순한 촉매제에 불과했던 것을 상기할 필요가 있다. 매우 빠르게 달리는 고속 철도의 경우, 열차가 진행되는 선로에 지진에 의한 순간적인 손상이 있을 때의 상황은 상상조차 허락하기 어려울 정도로 큰 재난을 야기할 수 있다(그림 2).



그림 2. 2004년 10월 23일 규모 6.6 일본 니이가타 지진으로 인한 고속열차 신간선의 탈선  
(<http://web-japan.org/nipponia/nipponia33/en/feature/feature10.html>)

사실 지진으로 인한 재해는 매우 상대적인 특성을 지니고 있다. 즉, 사람이 살지 않는 사막에서 발생한 규모 7.0의 지진보다 도시에서 발생한 규모 2.0의 지진이 훨씬 큰 위협일 수 있기 때문이다. 물론 지진학이라는 학문적인 측면에서 보면 규모 7.0의 사건이 훨씬 더 주목을 받을 수 있다. 하지만 재해의 측면에서는 사막의 지진이 가십거리일 수는 있어도, 아무리 작은 지진이라고 하더라도 도시에서 발생한 지진은 쉽게 지나칠 일이 아니다. 당연히 지진 재해는 과학적인 측면에서 뿐만 아니라, 동시에 우리나라의 영속을 위한 사회적이고 경제적인 측면에서 접근해야 할 문제이기도 하다.

너무나 당연하게도 사람이 사는 모든 곳에서 지진으로 인한 피해가 일어나지 않기를 바란다. 그럼에도 불구하고 지진으로 인한 모든 피해를 막는 것이 가능하지는 않을 것이다. 그렇다면 다양한 대비책을 세워야

할 텐데, 이에 대한 기준이나 목표는 어떻게 세워지는 것일까? 지나친 대비책은 사회적으로 또한 경제적으로 다른 분야에 더욱 유용하게 활용할 수 있는 기회비용을 없앨 수도 있고, 부실한 대책은 아무런 효과가 없거나 때로 무의미한 노력이 될 수도 있다. 가장 적절한 비용을 들여서 가장 효과적인 대비를 할 수 있는 원천은 위해(危害) 상대에 대한 이해이다. 먼저 그 곳에서 지진이 발생하는 환경과 지진 발생 패턴 등과 같은 지역적인 특성에 대한 정보를 정확하게 파악하는 것이 우선이다.

## 02 지진에 대한 이해와 한반도의 지진발생 환경

### 2.1 지진을 일으키는 힘의 원천

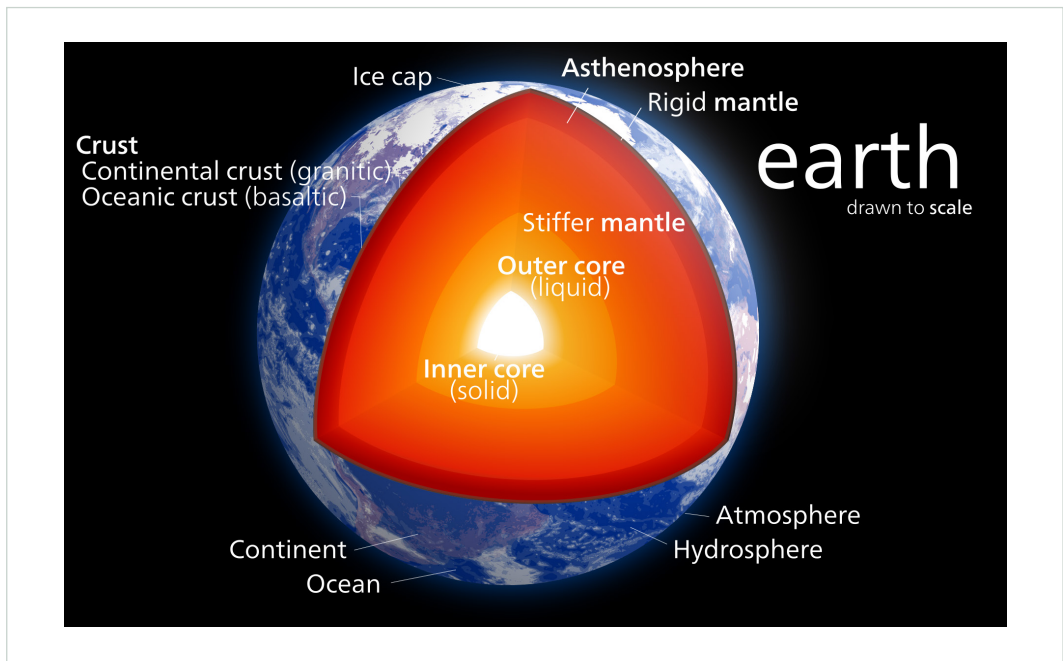


그림 3. 지구의 내부 구조

([https://en.wikipedia.org/wiki/Structure\\_of\\_the\\_Earth#/media/File:Earth\\_poster.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_of_the_Earth#/media/File:Earth_poster.svg))

지구를 구성하고 있는 물질의 물리적, 화학적 성질에 따라 지구 내부를 지표면으로부터 지각(crest), 맨틀(mantle), 외핵(outer core)과 내핵(inner core)으로 크게 구분한다(그림 3). 우리가 살고 있는 지각과 그 아래 맨틀의 최상부 부분을 아울러 암석권이라고 한다. 이 단단한 암석 물질들은 대체로 열전도도가 매우 낮기 때문에, 더 깊은 내부로부터 전달되어 오는 높은 열에너지를 지구 밖으로 제대로 전달하지 못한다. 내부로부터 지구 표면을 향해 열에너지가 발산하는 과정에서 암석권은 지구 표면에서 하나의 덩어리를 유지하지 못하고 여러 개의 조각으로 나뉜 암석권판(또는 단순히 ‘판, plate’)들의 조합을 이룬다(그림 4).



그림 4. 지구 표면을 구성하는 암석판의 분포

([https://en.wikipedia.org/wiki/Indo-Australian\\_Plate#/media/File:Plates\\_tect2\\_bis\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Indo-Australian_Plate#/media/File:Plates_tect2_bis_en.svg))

이들 판은 다시 지구의 육지 대부분을 차지하는 대륙판과 지구 내부로부터 상승하는 물질이 분출하여 새로운 지각을 형성하는 해양판으로 구분한다(그림 5). 해양판은 하부의 맨틀로부터 공급되는 물질이 상승하여 지표면에서 분출하고, 이 물질이 식어가며 형성된 현무암질의 해양지각이 판의 상부를 형성한다. 대륙판은 현무암질 암석에 비하여 상대적으로 가벼운 규산염( $\text{SiO}_2$ ) 광물이 풍부한 화강암질 암석이 지각의 주를



이론다. 따라서 현무암질 암석이 판의 지각을 형성하는 해양판이 화강암질 암석의 지각을 포함하는 대륙판보다 상대적으로 밀도가 더 높다. 이 판들은 내부 열에너지의 발산 작용으로 서로 부딪히고 떨어지거나, 서로 어긋나듯이 빗겨 지나가는 등의 이합집산을 거듭한다. 물론 이런 이합집산을 위한 판의 이동 속도는 1년에 불과 수 mm에서 빨라야 수십 mm 정도에 불과하고, 그 위에 있는 우리가 함께 움직이고 있기 때문에 그 운동을 감지하기는 매우 어렵다. 그러나 오랜 지질시대를 거쳐서 변화하는 지구 표면의 양상으로부터 이러한 판의 이동을 짐작할 수 있다. 또한 서로 다른 판에 위치하는 GPS 안테나를 이용하여 판과 판 사이의 상대적인 이동 속도와 방향을 측정할 수도 있다.

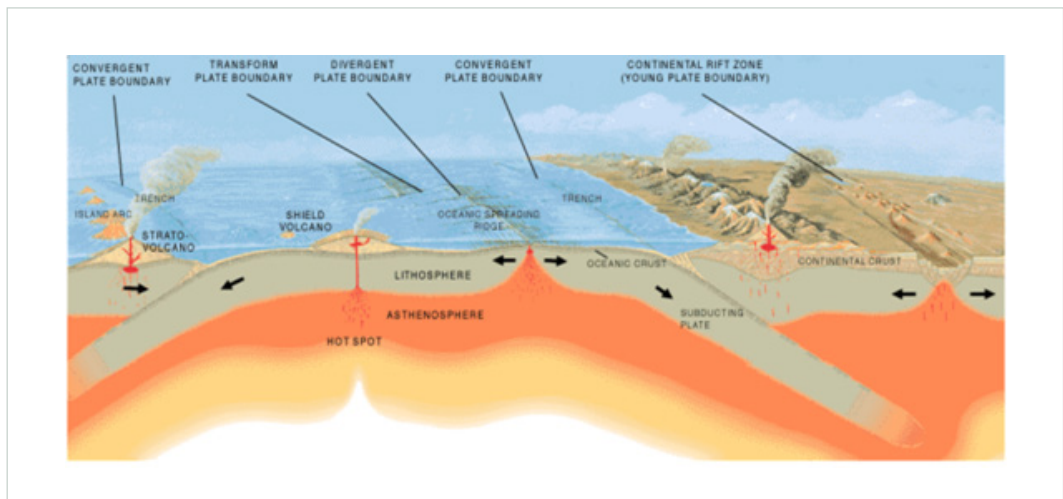


그림 5. 암권판의 경계와 상호작용

([https://simple.wikipedia.org/wiki/Plate\\_tectonics#/media/File:Tectonic\\_plate\\_boundaries.png](https://simple.wikipedia.org/wiki/Plate_tectonics#/media/File:Tectonic_plate_boundaries.png))

판과 판의 상호작용은 거대한 에너지를 발산하며, 그 결과로 지진이나 화산과 같은 순간적인 지질 작용 뿐만 아니라, 히말라야 산맥과 같은 거대한 지형을 만들기 위하여 오랜 기간에 걸친 조산운동<sup>1)</sup>이 일어나기도 한다(그림 6). 이러한 판의 운동으로 일어나는 다양한 결과를 설명하는 체계화된 이론을 판구조론이라고 하며, 오늘날 지구상에서 일어나는 대부분의 지질현상을 설명하는 가장 합리적인 이론으로 받아들여지고 있다.

1) 조산운동 : 지구 표면을 덮은 약 10장의 강한 판이 운동을 하여 다른 판에 부딪치거나 다른 판 밑으로 들어가는 것

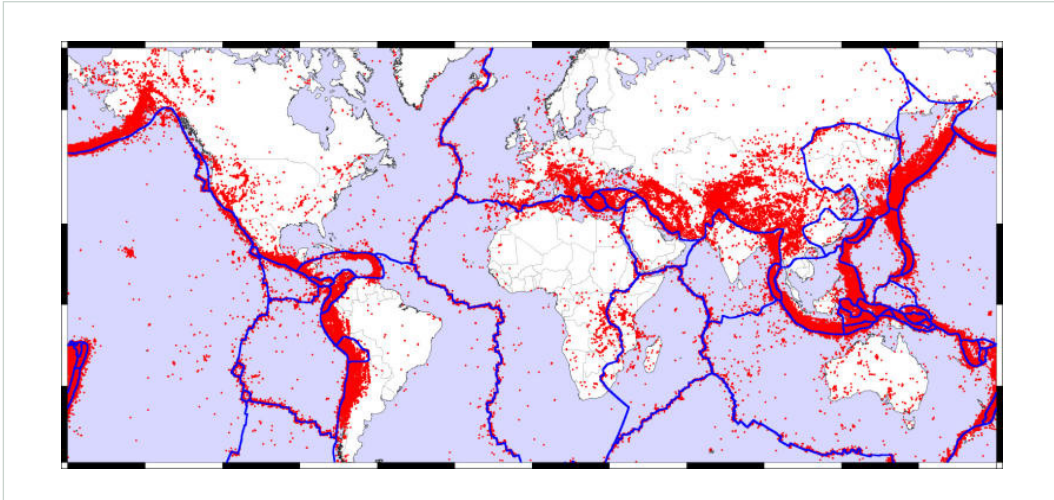


그림 6. 판의 경계와 지진 분포

(<http://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2010/03/plate-tectonics.jpg>)

## 2.2 한반도 주변의 지진발생 환경

한반도를 포함하는 우리나라 주변 지역 역시 활발한 판구조 운동의 영향을 받고 있다. 한반도는 유라시아 판(Eurasian plate) 내부에 위치하고 있으며, 동쪽으로는 태평양판(Pacific plate), 남동쪽에서는 필리핀해 판(Philippine plate), 남서쪽에서는 보다 멀리서 인도판(Indian plate)과 마주하고 있다(그림 7). 이 가운데 유라시아판과 인도판은 대륙지각이 상부를 이루는 대륙판이며, 태평양판과 필리핀해판은 해양지각이 상부를 이루는 해양판이다. 해양판은 대륙판을 만나면 상대적으로 더 높은 밀도를 갖기 때문에 그 아래로 가라앉는데, 이를 섭입작용이라고 한다. 따라서 태평양판과 필리핀해판은 유라시아판을 만나서 맨틀 내부로 가라앉아서 깊이 700km에 이르는 곳까지 섭입대를 이룬다. 한편, 고체 지구를 형성하는 가벼운 부분인 두 대륙판은 해양판과 같이 맨틀 하부로 섭입하기에는 밀도가 낮기 때문에 가라앉지 못한다. 따라서 대륙판인 인도판은 마찬가지로 대륙판인 유라시아판과 만나서 섭입작용 없이 수평적인 충돌을 일으켜서 히말라야 산맥과 같은 거대한 지형을 이룬다.

유라시아판과 인도판의 충돌로 인하여 큰 응력(stress)이 유라시아판 내부에 전달되며, 이로 인하여 우리나라 하부를 이루는 암석에도 변형률(strain)이 축적된다(그림 8). 인도판의 수평적인 충돌로 인하여 전달되는 응력은 섭입하는 태평양판과 필리핀해판에 의한 것보다 훨씬 큰 것으로 알려져 있으며(Tapponier et

al, 1982; Jolivet et al, 1990), 이는 암석 내부에 가해지는 보이지 않는 힘이 작용한 결과로 지표면에 드러난 지형의 변화로부터도 쉽게 짐작할 수 있다.

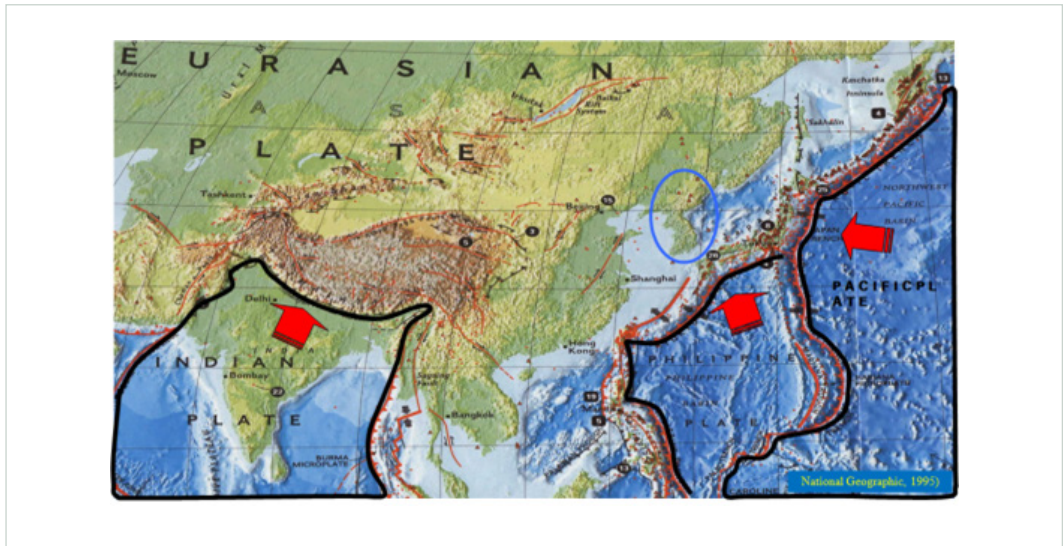


그림 7. 동아시아 지역에 작용하는 판의 상대운동

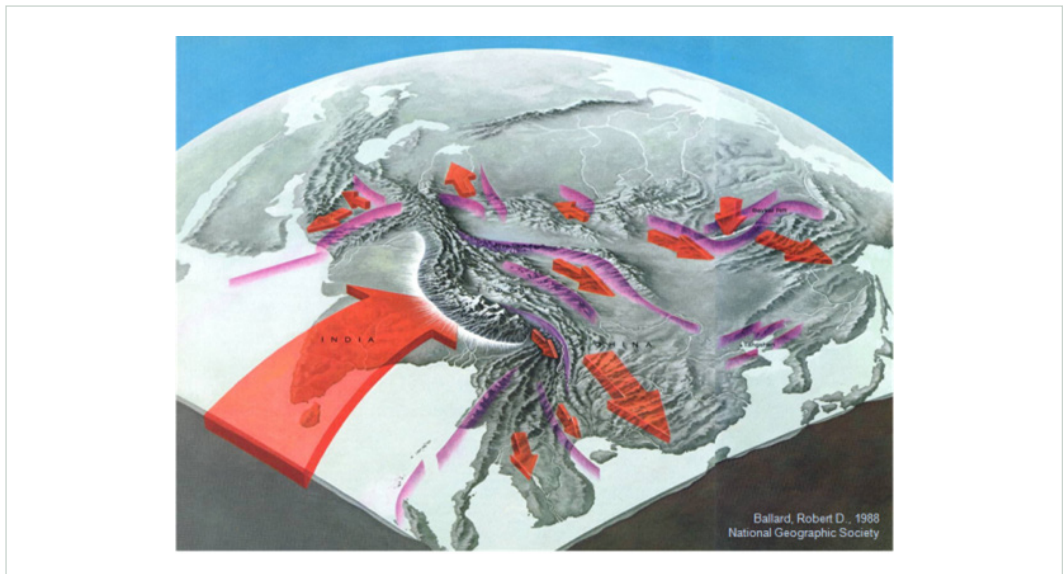


그림 8. 인도판과 유라시아판의 충돌로 인한 응력의 전달

암석에 작용하는 응력의 방향은 지하 시추공을 이용한 측정이나 지진이 발생하였을 때 지진계를 이용하여 기록할 수 있는 지진파형을 분석함으로써 단층운동의 방향과 함께 압축과 인장이 작용하는 방향을 통해서도 파악할 수 있다(그림 9). 우리나라를 포함하는 한반도 주변에 광역적으로 작용하는 최대주응력은 대체로 동-서 방향이다.

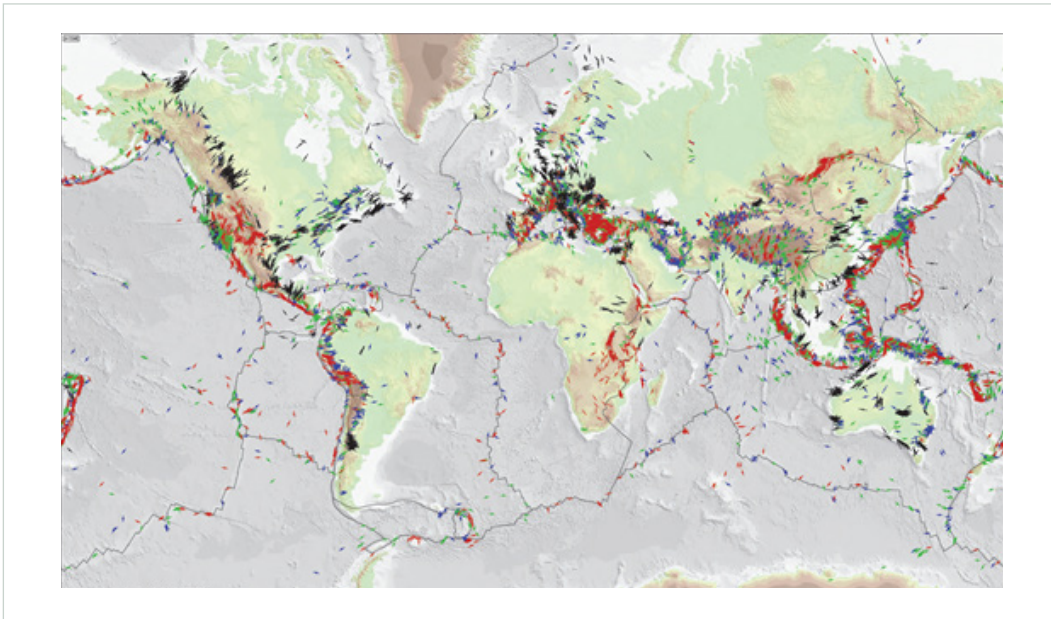


그림 9. 세계 응력장 분포 지도(Heidbach et al. 2009)

한반도 주변에서 유라시아판과 마주하는 세 가지 판들이 이루는 경계를 따라서 많은 지진 활동이 이루어진다(그림 10). 이러한 판과 판의 경계에서 발생하는 지진을 일컬어 ‘판 경계부 지진(interplate earthquakes)’이라고 한다. 판 경계부 지진은 깊이 70km 이내의 천발지진을 비롯하여, 섭입대에서는 맨틀이 차지하고 있는 깊이 700km에 이르기까지 해양판이 섭입하여 심발지진이 발생한다. 판 경계부 지진은 지구상에서 발생하는 지진의 95% 이상을 차지하며, 이들을 판구조론으로 잘 설명할 수 있다.

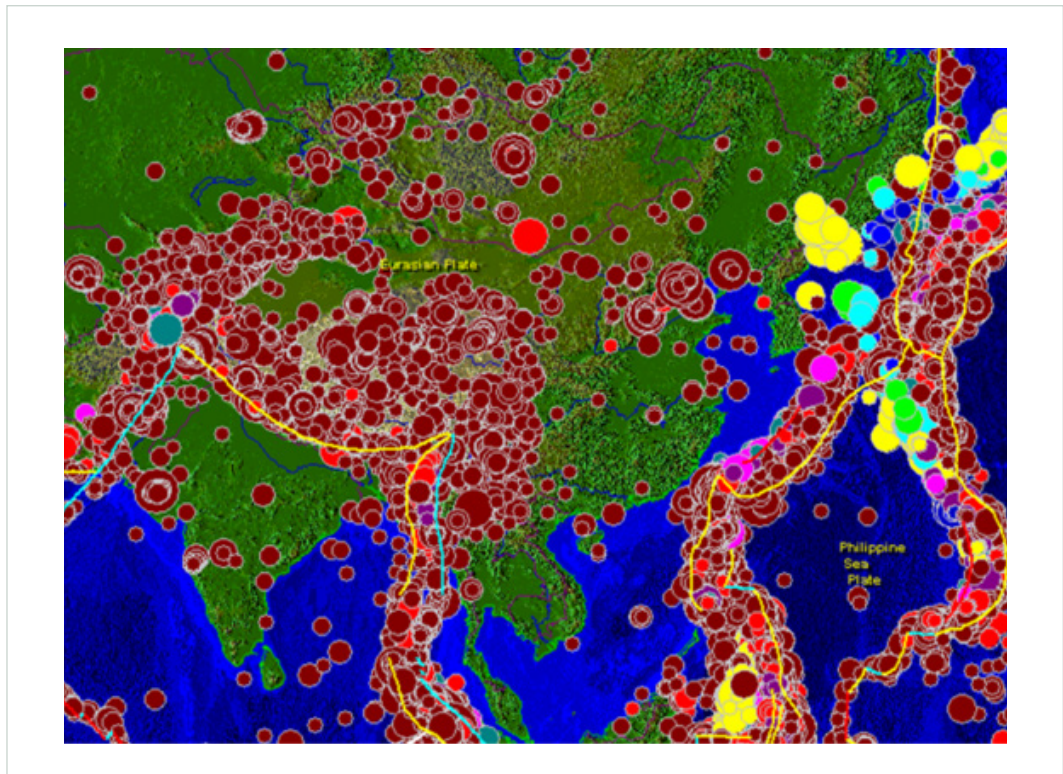


그림 10. 아시아 지역의 지진 분포

한편, 지구상에서 나머지 5% 이하의 지진활동은 판 경계부 지진과 달리 판구조론으로 잘 설명하기 어려운 판의 내부에서 발생하며, 이들을 ‘판 내부 지진(intraplate earthquakes)’이라고 부른다. 판 내부 지진의 특징은 판 경계부 지진과 달리 지진활동의 발생 빈도가 낮고 재발 주기가 길다는 것이 가장 큰 특징이다. 또한 판 경계부 지진이 활발한 지질 작용으로 지진과 단층의 연관성이 비교적 뚜렷하게 드러나는 반면에, 판 내부 지진의 경우에는 넓은 지역에 걸쳐 대체로 산포하는 특징을 보여서 단층과 같은 특정한 지질구조와의 연관성을 파악하기가 매우 어렵다.

한반도는 유라시아판의 주변부에 위치하지만, 판의 경계에서 적어도 수 백km 이상 떨어져 있고 판 경계에서 발생하는 활발한 지질작용과는 거리가 멀다(그림 11). 따라서 한반도를 판 내부 지진 환경으로 분류하며, 실제 지진 발생 형태 역시 판 내부 지진의 주요 특징과 잘 부합한다.

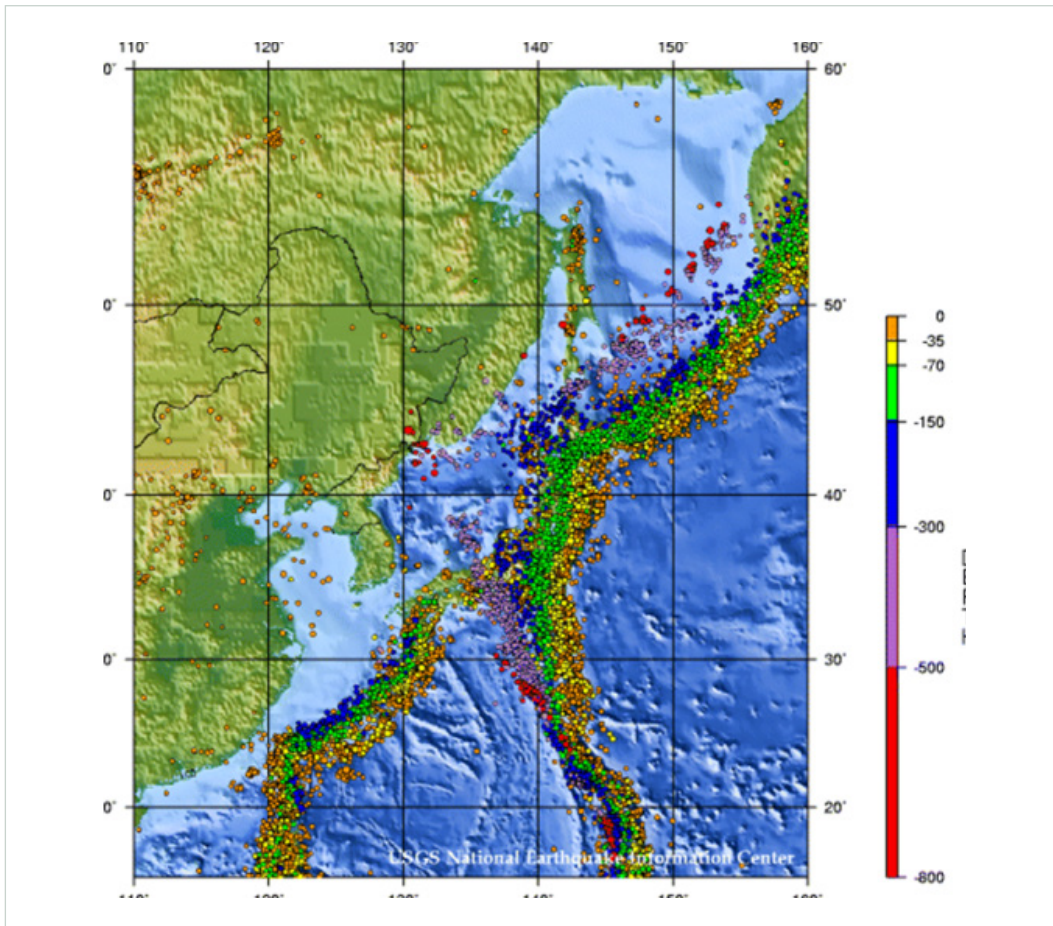


그림 11. 한반도 주변 지역 지진 분포

## 03 한반도 지진 역사

한반도에서 발생한 지진에 관한 기록은 지진계를 이용한 지진관측 시점에 따라 역사지진과 계기지진으로 구분할 수 있다(그림 12). 우리나라에서는 1905년에 인천측후소에 지진계를 최초로 설치한 시점을 기준으로 그 전을 역사지진, 이후를 계기지진 시기라고 한다.

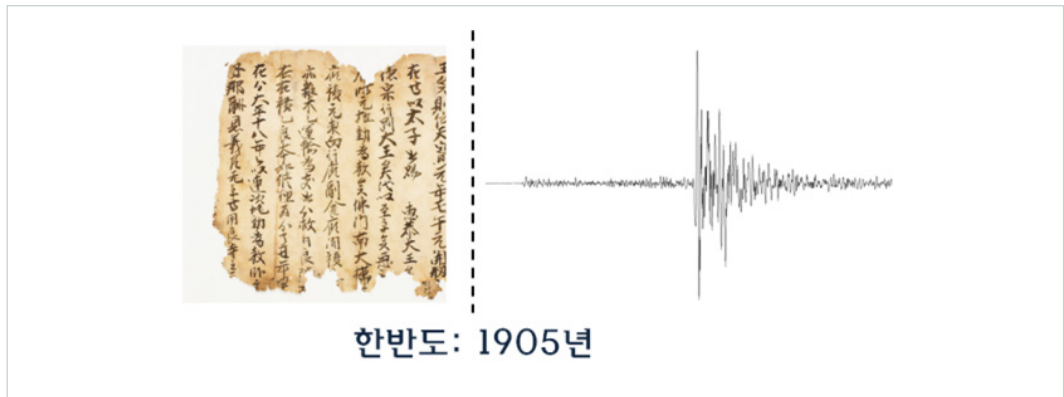


그림 12. 역사지진과 계기지진의 구분

### 3.1 역사지진

## 첫 지진 기록

三國史記 卷第十三  
高句麗本紀 第一  
琉璃王二十一年  
秋八月地震

삼국사기  
고구려본기  
유리왕 21년  
(서기 2년 8월.음)

가을 8월에 지진이 일어난다.

그림 13. 한반도 역사지진 최초 기록

역사지진은 지진계를 이용한 지진 관측이 이루어지기 이전에 발생한 지진으로 역사 문헌을 통해서 확인이 가능하다. 우리나라 역사를 기록하고 있는 문헌으로 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등과 같이 2천년이 넘는 기간에 걸친 사료들을 확인할 수 있다(강태섭, 2016).

우리나라에서 지진에 대한 최초의 기록은 삼국사기에서 찾아볼 수 있다(그림 13). 서기 2년인 고구려 유리왕 21년에 “秋八月地震: 가을 8월에 지진이 일어나다”라는 기사가 있다. 유리왕은 고구려를 세운 동명성왕의 아들이며 2대 왕이다. 당시 고구려의 수도는 오늘날의 중국 요녕성에 있는 졸본성이며, 서기 3년 국내성으로 수도를 옮기기 전까지 40년간 도읍을 유지하였다. 당시 나라의 대부분의 상황에 대한 기술은 수도 중심으로 이루어졌을 가능성이 높다. 따라서 당시 지진에 대한 기록은 정확히 한반도에서 발생한 지진으로 보기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 이 지진이 특별하게 언급된 것은 대단히 심각한 정도의 지진이 발생하였음을 암시한다.

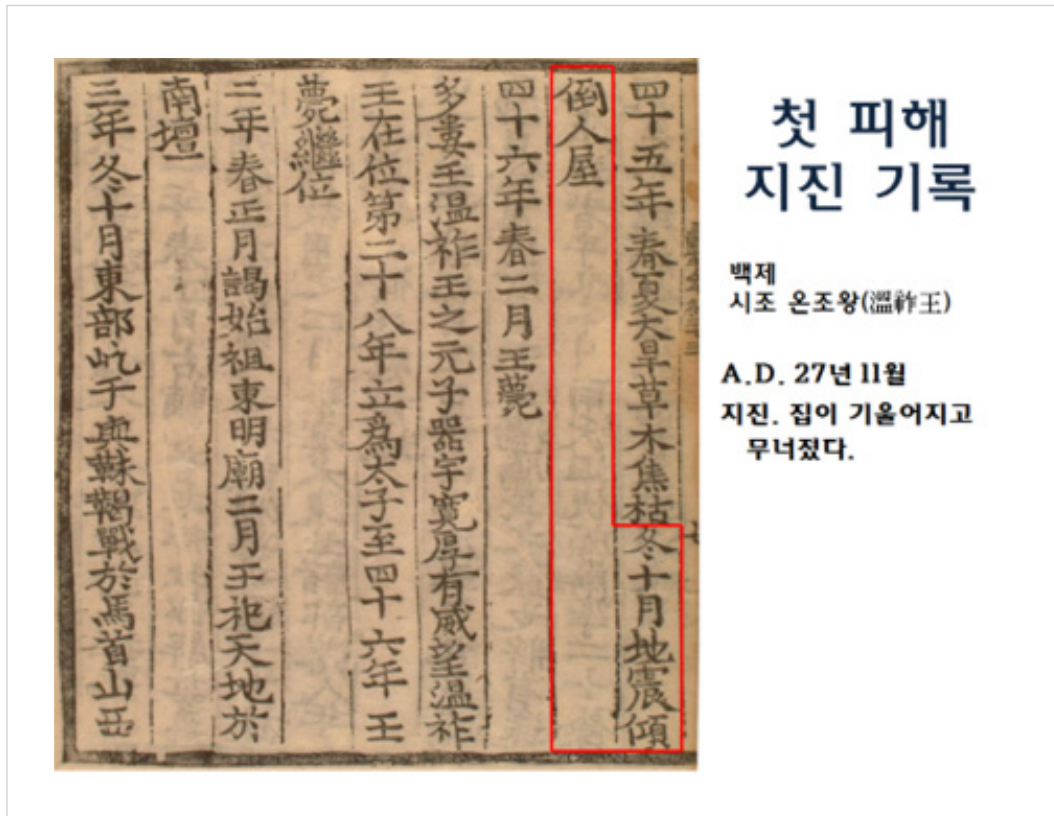


그림 14. 한반도 역사지진 최초 피해 기록



시대를 통틀어서 지진이 나라에 많은 영향을 끼칠 수 있는 사건임은 틀림이 없다. 더군다나 지진으로 인하여 피해가 발생하였다면, 사회의 온전한 유지에 큰 타격을 줄 수도 있다. 이러한 피해를 일으킨 지진에 대한 최초의 언급 역시 삼국사기를 통해서 확인할 수 있다(그림 14). 서기 27년 백제 온조왕 때의 일이다: “...冬十月地震傾倒人屋: 겨울 10월에 지진이 일어나서 집이 기울어지고 무너졌다.” 온조는 비류와 함께 동명성왕의 아들로 알려져 있으며, 고구려의 태자로 이복 형제인 유리가 태자로 책봉되자 남하하여 지금의 수도권 일대에 도읍을 정하여 한성 백제시대를 열었다. 수도 중심의 사건 기술에 대한 특징으로 미루어볼 때, 온조왕 때의 지진은 지금의 수도권 일대에서 발생한 지진이었고 이로 인하여 당시 백제의 수도에서 많은 피해가 있었음을 알 수 있다.

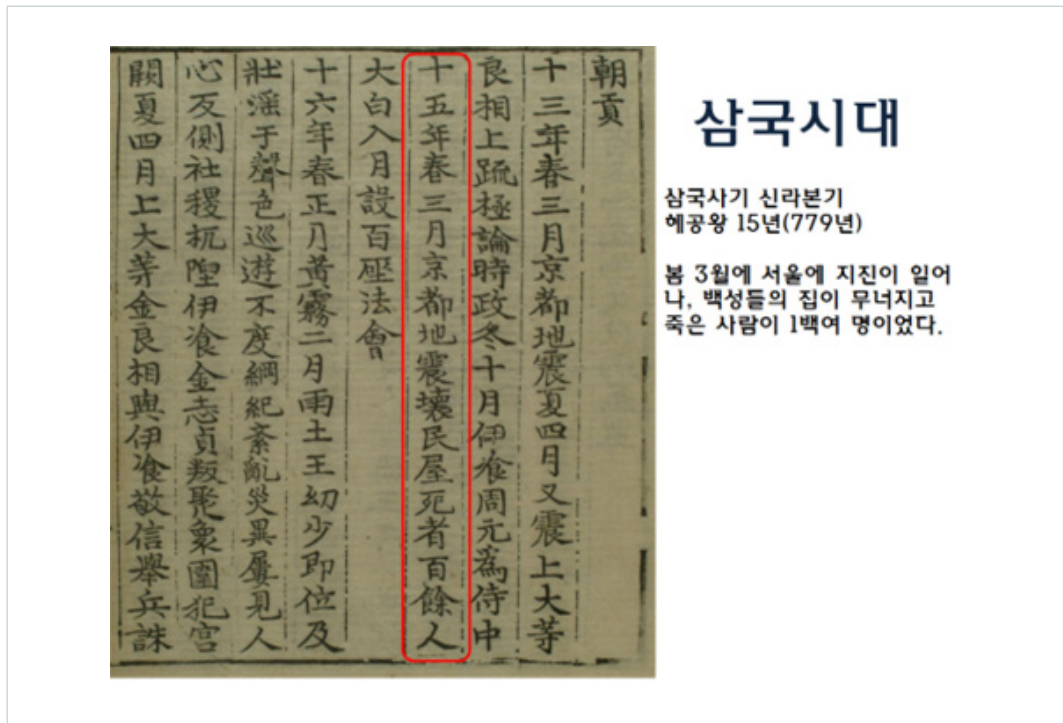


그림 14. 한반도 역사지진 최초 피해 기록

서기 779년 통일신라시대 혜공왕 15년에 당시 수도인 경주에서 발생한 지진으로 백성들의 집이 무너지고 죽은 사람이 백여 명에 이르렀다는 기록(十五年春三月京都地震壞民屋死者百餘人)을 삼국사기에서 확인할 수 있다(그림 15). 이 지진은 삼국시대를 통틀어서 가장 대표적인 지진 피해 사례로 꼽힌다.

고려사는 조선 세종 31년인 서기 1449년에 편찬하기 시작하여 문종 원년인 서기 1451년에 완성된 고려 시대 역사서이다. 고려사에 기록된 경주지역에서 발생한 대표적인 지진으로 현종 4년(서기 1013년)과 정종 2년(서기 1036년)에 발생한 사건을 꼽을 수 있다(그림 16). 서기 1013년 지진에 대하여, 당시 현종은 “짐의 허물과 잘못으로 변이가 잇달았다. 재앙이 수그러들게 하는 방안을 강구하여 아뢰도록 하라”고 말할 정도로, 경주 일대에 막대한 지진 재난이 발생하였음을 암시하는 대목이 있다. 또한 서기 1036년에 발생한 지진으로 당시 고려의 수도인 개성과 이전 신라의 수도인 경주를 포함한 한반도의 넓은 지역에서 진동이 감지되었음을 기록(戊辰京城及東京尙廣二州安邊府等管內州縣地震多毀屋廬東京三日而止)하고 있다. 이 기록은 상대적으로 잘 지어졌을 것으로 추정되는 상류층이 사는 기와집과 그보다 못한 일반 백성들의 집을 가릴 것 없이 많은 피해가 있었음을 언급하고 있다. 특히 경주에서는 3일 동안 지진이 계속되었다는 언급은, 2016년 있었던 9.12 경주지진의 경우와 마찬가지로, 당시에도 사람들에게 위협적으로 느껴질 수 있을 정도의 강한 여진활동이 지속되었음을 지시한다.

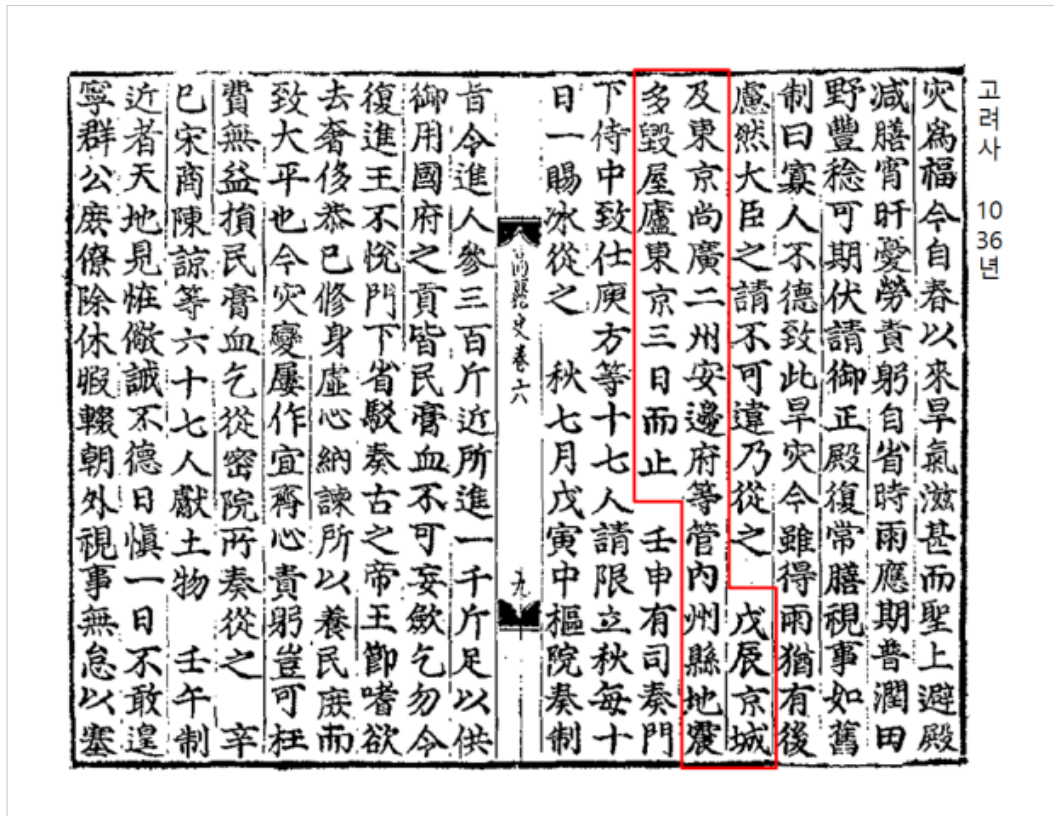


그림 16. 고려사 지진기록 예

1013년과 1036년의 두 차례 지진은 이전부터 고려사에서 확인할 수 있었던 서술과는 완전히 별개로 훨씬 상세한 당시 상황을 짐작하게 할 수 있는 사료가 발견되어 학계를 놀라게 하였다. 2007년 국립중앙박물관은 석가탑에 안치된 유물과 관련한 경과보고를 하였는데, 주된 내용은 1966년 불국사 석가탑의 해체, 수리 과정에서 발견된 ‘묵서지편(墨書紙片)’의 판독에 관한 것이었다(그림 17). 묵서지편은 110여 쪽에 이르고 이를 구성하는 최소 4종의 기록으로 이루어졌다. 이 가운데 1024년 ‘불국사무구정광탑중수기(佛國寺無垢淨光塔重修記)’와 1038년 ‘불국사서석탑중수형지기(佛國寺西石塔重修形止記)’가 이전 두 차례에 걸친 지동(地動, 지진)으로 수리하게 되었다는 석가탑 중수의 전말에 대한 이야기를 담고 있다. 약 1000년 만에 다시 세상에 모습을 드러낸 이 중요한 기록은 과거 경주에서 겪은 지진을 생생하게 재현해내는 계기가 되었다. 고려사에서 확인한 동 시기의 지진 기록과 함께 미루어보면 당시 지진으로 인한 피해가 얼마나 큰 것이었으며, 2016년 경주와 같이 활발한 여진 활동이 과거에도 반복되었음을 짐작하는 것은 그리 어려운 일이 아니다. 사실 1966년 석가탑의 도괴 위험이 처음 알려졌을 때, 불국사 측에서 그 훼손 원인을 지진이라고 알린 것(나중에 실사를 통해 도굴에 의한 훼손임이 확인되었다)은 또 다른 역사의 아이러니이다.



그림 17. 불국사 석가탑 중수기

태조 이성계가 1393년 개국한 이래 1905년까지의 조선시대를 통틀어서 약 1,000회 이상의 지진이 발생하였다. 조선시대에는 그 이전 시기에 비하여 훨씬 더 많은 지진 사료뿐만 아니라, 지진에 대한 서술 자체도 매우 구체적이어서 실제 지진 발생 당시의 상황을 이해하기가 상대적으로 쉬운 경우가 많다. 예를 들어, 승정원일기가 기록하고 있는 서기 1643년 7월 24일과 25일(인조 21년 6월 21일, 22일)의 기록이 그렇다.

“ (黃緝) , “9 (申時) (乾方) 가 , “ (安東) (寧海), (盈德) (金山) , 9 10 (蔚山) , (府) 13 (潮水)가 가 1, 2 가 6 가 1, 2 “ ( ) ”

이와 같이 지진으로 인한 피해 상황과 자연물의 변화 상황을 매우 상세하게 기록하고 있어 오늘날 지진으로 인한 현상과 해당 지진의 크기를 대비함으로써, 당시의 지진이 어느 정도 큰 지진이었는지를 계량화할 수 있다.

한반도에서는 최초 지진에 대한 언급을 확인할 수 있는 서기 2년부터 약 2천년에 이르는 기간 동안, 약 2천여 건의 지진을 확인할 수 있다. 특히 15세기에서 18세기에 이르는 기간 동안, 현저하게 높은 지진활동이 있었다. 이들 역사지진의 시대별 분포를 확인하면, 조선시대에서 그 이전 시기보다 훨씬 많은 수의 지진 사건을 확인할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 지진 발생 자체가 조선시대에 많이 발생했을 수도 있지만, 그 보다는 조선시대에 이르러 더 기록이 상세하고 풍부한 자료가 지금까지 전해질 수 있는 기회가 많았음을 의미하는 것으로 추정할 수 있다. 그 이유는 충분히 큰 규모의 지진으로 실제 피해를 일으킨 지진의 경우, 전체 역사지진 기간 동안 그 횟수가 거의 일정하다는 것으로부터 확인할 수 있다(진도 Modified Mercalli Intensity(MMI) VI ~ VII 이상; 그림 18의 붉은 선). 이러한 피해지진의 횟수는 약 40여 회로, 약 2천년의 기간 동안 평균 약 50년에 1회의 빈도로 피해지진이 발생하였다.

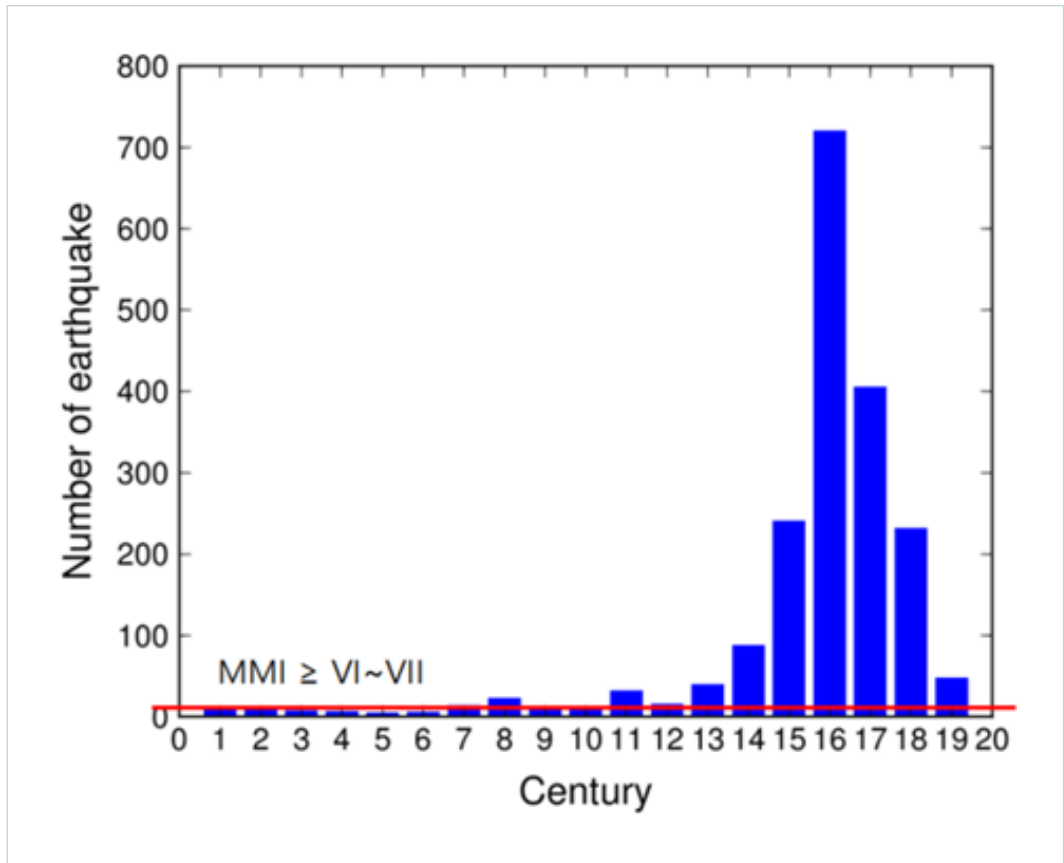


그림 18. 세기별 역사지진 발생 빈도. 붉은 선은 진도(MMI) VI~VII 이상 피해지진 발생 빈도를 가리킴

### 3.2 계기지진

우리나라는 1905년부터 지진계를 이용한 지진관측을 시작하여, 이 시기 이후에 발생한 지진을 계기지진이라고 부른다. 1905년 인천측후소에 기계식 지진계가 처음 설치된 이후, 1945년 광복을 맞이하기 전까지 약 40여 년간 일제 조선총독부 산하 기상측후소에 지진계가 추가로 설치되어 인천, 서울, 평양, 대구, 부산, 추풍령 등의 7개소에서 지진관측을 수행하게 되었다. 해방 이후 한국전쟁을 거치면서 약 20여 년간의 지진관측 공백기를 거쳐서 1963년 세계지진관측망 사업으로 서울에 지진계가 설치되면서 지진관측이 재개되었고, 기상청이 1977년 서울과 광주의 2개소에 지진계를 설치하였다. 그러나 기상청이 본격적인 계기지진 관측을 시작한 것은 1978년 홍성지진이 계기가 되었으며, 이후 꾸준히 지진관측망이 확충되었다. 그 결

과, 기상청은 2016년 8월말까지 총 150개 지진관측소로 구성된 지진관측소를 구축하여 운영하고 있다(그림 19). 한편 한국지질자원연구원은 1980년대 초에 국내 원자력발전소 부지의 지진안전성 평가와 분석을 위하여 자체적인 지진관측을 수행하기 시작하였다. 이후 한국지질자원연구원 자체 운영 또는 지진학을 연구하는 대학과 공동으로 지진연구망을 구축하여 현재 40여 개 지진관측소로 이루어진 지진관측망을 운영하고 있다. 이들 이외에서 한국전력연구원과 한국원자력안전기술원 등이 각 기관의 고유 목적에 따라 지진관측망을 운영하고 있다. 아래 그림19는 기상청이 운영하고 있는 지진관측망 현황을 나타내고 있다.

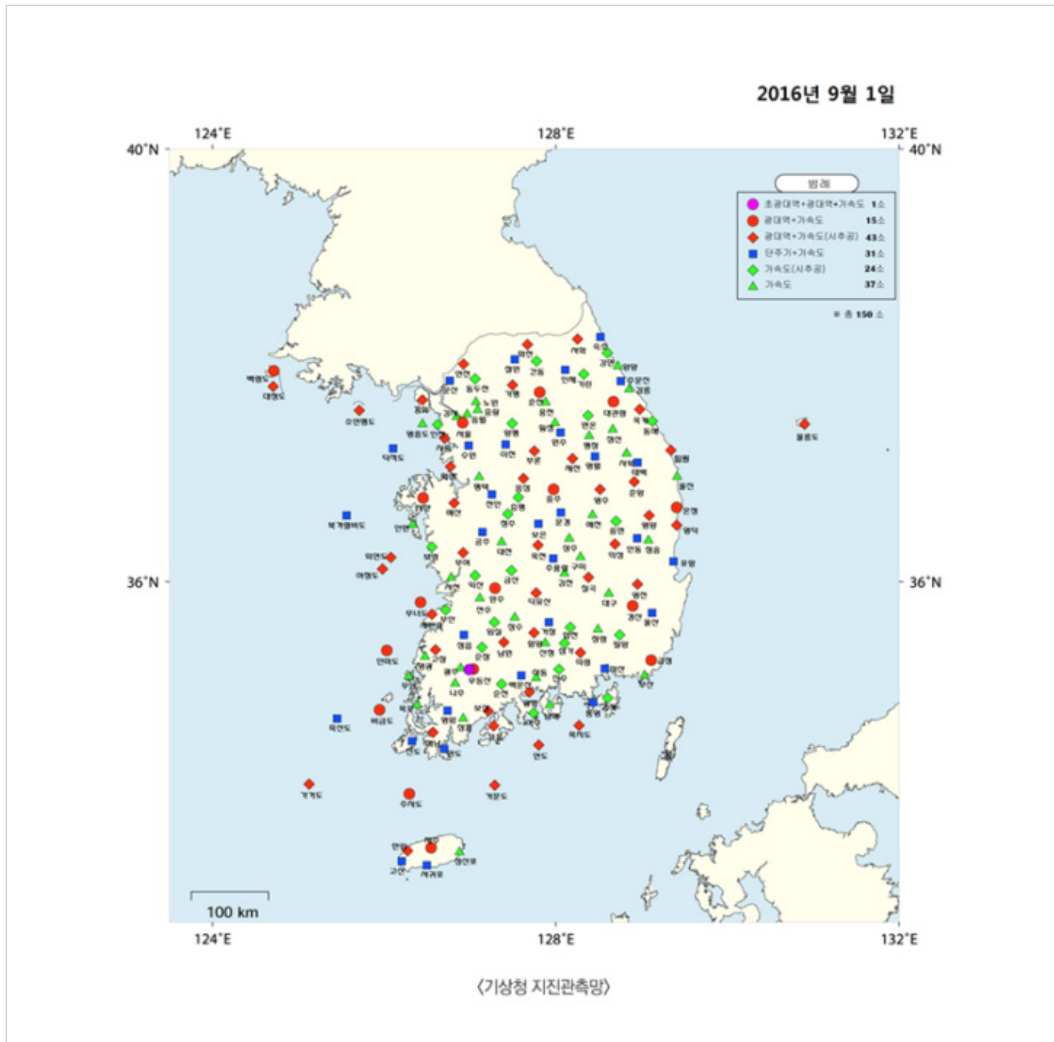


그림 19. 기상청 국가지진관측망 분포(2016년 9월 1일 기준)

계기지진 시기 이후, 1905년부터 1942년까지 38년간 총 533개의 지진이 보고되었으며, 전명순·전정수(2001)은 이 가운데 110개 지진에 대하여 당시 관측기관의 자료를 종합하여 진앙과 규모를 결정하였다. 한편, 2001년부터 매년 한 해 동안 발생한 지진과 관련한 정보를 이듬해에 정기간행물인 ‘지진연보’로 발간하고 있다(기상청, 2016). 이들 연보에 따르면, 국내 지진관측망에 기록된 지진 발생 경향은 1978년부터 한반도에서 본격적인 지진관측망 확충이 이루어지기 시작한 1990년대 중반 이후 증가추세가 지금까지 이어지고 있다(그림 20). 그러나 이러한 경향은 실제 지진발생이 증가하였기 때문에 보이는 것은 아니며, 지진관측망의 확충과 지진관측과 분석 기술의 발달로 인하여 과거에는 관측하지 못하였던 작은 규모의 지진까지 더욱 정밀하게 감지하고 분석할 수 있기 때문으로 풀이된다. 그 이유로는 사람이 직접 감지할 수 있는 정도의 지진이라고 할 수 있는 일정한 규모 이상(보통 규모 3.0 이상; 그림 20 참조)의 지진 발생 경향은 연차별로 지진관측망의 확충과 무관하게 거의 일정한 발생 빈도를 보여주고 있기 때문이다. 기상청은 국내에서 현대적인 디지털 지진관측이 시작한 1999년부터 지금까지 연평균 약 48회의 지진발생을 보고하였으며, 규모 3.0 이상 지진은 연평균 약 10회 정도이다. 이 가운데 주로 내륙에서 발생한 지진의 영향이 우세한 유감지진은 연평균 약 9회 정도 발생하였다.

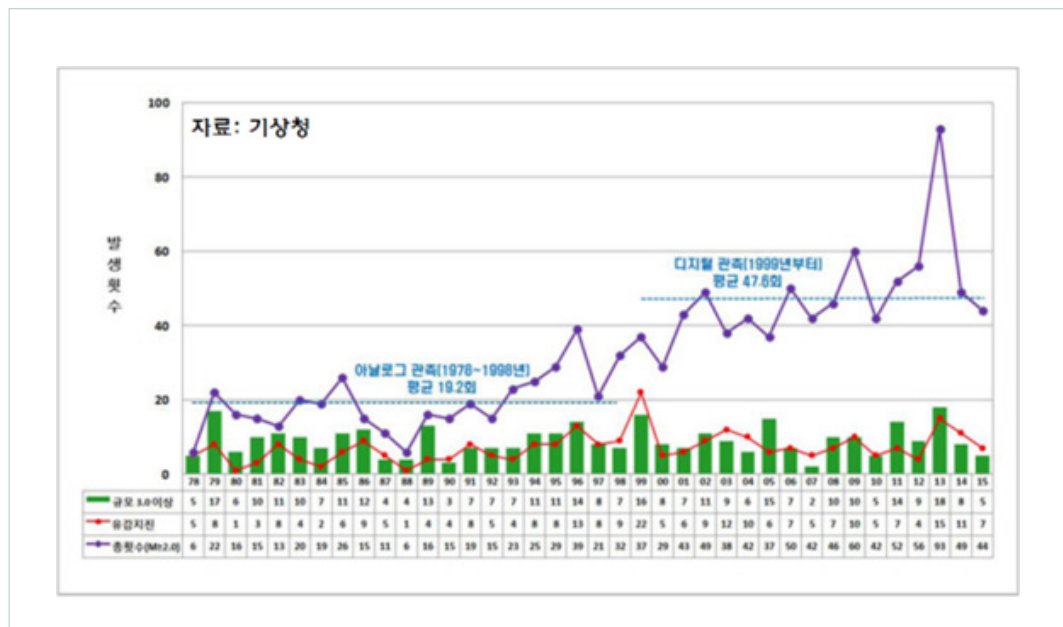


그림 20. 기상청 지진관측 연도별 발생횟수(1978-2015)

역사지진과 계기지진의 진앙 분포를 비교하여 보면, 역사지진에 대하여 추정된 지진의 불확실성과 내륙 지역에 국한된 분포에도 불구하고 계기지진의 분포와 유사함을 확인할 수 있다(그림 21). 이러한 결과는 역사지진 시기와 계기지진 시기를 통틀어서 한반도의 지진 환경은 거의 일정하게 유지되었음을 말해준다. 앞에서 역사지진과 계기지진에 대하여 설명한 바와 같이, 역사지진의 경우에는 피해를 일으킬 수 있을 정도(진도 VI~VII 이상), 계기지진은 사람이 체감할 수 있는 정도(규모 3.0 이상 또는 진도 III 이상)의 지진이 누락 없이 지진기록으로 전해지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

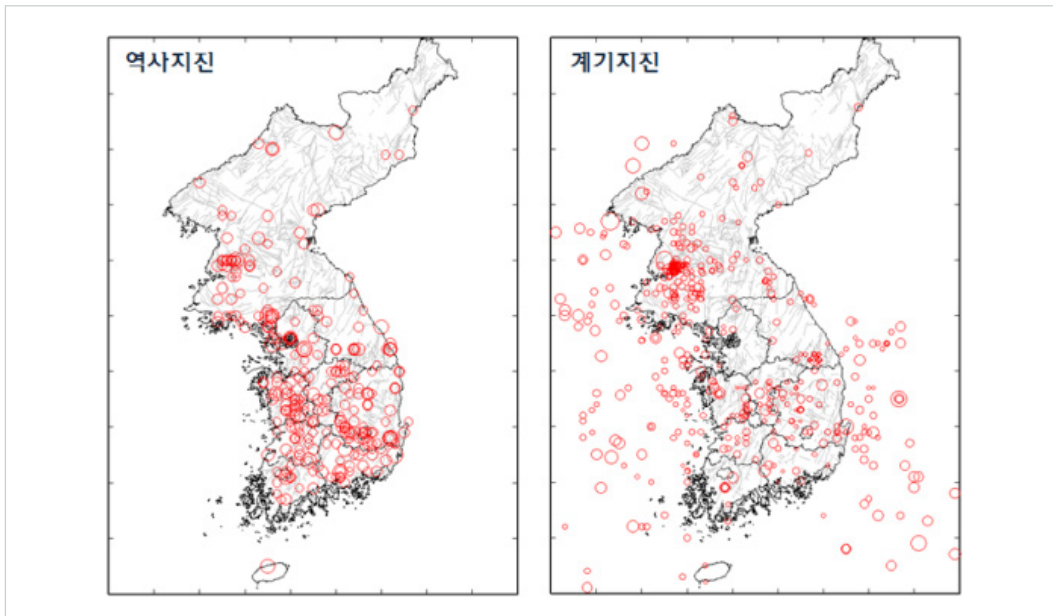


그림 21. 역사지진과 계기지진 진앙 분포

## 04 지진재해도 개념 및 분석방법

지진에 대한 궁극적인 질문은 다음 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 언제 어디서 지진이 발생할까? 둘째, 이 지진이 발생한다면, 얼마나 큰 규모가 예상되며, 각 지역에서 얼마나 큰 지진동을 경험할까?



첫 번째 질문은 지진 예측에 해당하며, 현대 과학기술로는 이러한 예측이 불가능한 것으로 알려져 있다. 아직까지 일관되게 인과관계를 설명할 수 있는 지진의 전조 현상을 발견하지 못하였으며, 일부 지하수위의 변화 등과 같이 지하 암석의 변화에 따른 지진 발생과 지하수 흐름 사이의 인과관계를 고려할 수 있는 경우에도 모든 지진에 대하여 일관된 현상을 보여주지 못하고 있기 때문에, 이들을 지진의 전조로 이해하기에는 여전히 무리가 있다. 따라서 지금으로서는 이 질문에 대한 논의를 진전시키는 것이 크게 의미가 없다.

그렇게 때문에 현대 지진학의 관심은 두 번째 질문에 대한 답을 준비하는데 더 큰 노력을 기울이고 있다. 결국 지진 자체를 피할 수 없거나 지진을 예측하지 못한다면, 부지불식간에 발생하는 지진 자체가 아니라 그로 인한 효과를 예측하고 대비하자는 것이다. 지진은 아무 곳에서나 발생하는 것이 아니고, 암석의 약한 부분, 즉 단층의 움직임이 있는 곳에서 발생한다. 지표면에서 직접 노두<sup>2)</sup>를 조사함으로써 단층의 존재를 파악하고, 시기적으로 비교적 최근에 움직인 흔적을 확인할 수 있다면, 그 단층은 아마도 현재도 활동적일 가능성이 높다. 또한 지표 지질조사로 확인하기 어렵지만, 지하 심부에서 발생하는 작은 미소지진<sup>3)</sup>을 관측함으로써 지표에 드러나지 않은 지하에 숨어있는 지진을 일으킬 수 있는 단층의 존재를 파악할 수도 있다. 이와 같이 지표든 지하든, 가까운 장래에 지진을 일으킬 가능성이 높은 단층을 확인할 수 있다면, 이를 지진원으로 가정하고 지진 발생을 모의할 수 있을 것이다. 그 결과로부터 다양한 지점에서 경험할 수 있는 지진동 수준을 예측할 수 있다. 이러한 지진동 수준은 해당 지역에서 계획하고 있는 구조물을 얼마나 튼튼하게 지어야 다가올 지진에도 견딜 수 있는지에 대한 기준이 된다. 이러한 기준을 마련하고자 하는 노력이 현대 지진학의 주요 목표이며, 이를 지진재해도(seismic hazard) 평가라고 한다.

지진재해도는 위해(危害)를 가져올 수 있는 지진과 연관된 현상이 발생할 확률이나 잠재적인 특성을 평가하는 것이다. 대부분 지진에 의한 지반운동 수준을 의미하지만, 액상화<sup>4)</sup>나 지표에서 노출될 수 있는 단층 파열에 대한 특성을 나타낼 수도 있다. 지진재해도를 평가하기 위하여 사용하는 방법은 매우 다양한 반면, 각각 가지고 있는 장점과 단점이 있으며 적절한 지진재해도 평가 목표에 따라 적용하는 방법은 달라질 수 있다. 다양한 지진재해도 평가 방법에도 불구하고, 주어진 기간 동안 임의의 지진이 발생함으로써 인하여 어떤 지역에서 경험할 수 있는 지진동을 평가한다는 목표는 동일하다. 여기에 수반되는 지진 발생에 대한 기본 가정은 다음과 같다.

2) 노두 : 지하암석이 지표면으로 드러난 것

3) 미소지진 : 매그니튜드 1이상 3미만인 작은 지진으로 미소지진의 관측을 위해서는 고감도 지진계가 필요함

4) 액상화 : 연약한 지하수의 수위가 높은 모래 지반에 지진이 발생하면 지진동에 의해 지반 전체가 액체처럼 되는 현상

### 〈지진발생 기본가정〉

- 어떤 크기의 지진이 어떤 시간에 발생하여, 어떤 지역에 영향을 미친다
- 다양한 규모의 지진을 포함하고, 어떤 지역에서 지진이 더 자주 발생하고, 진앙에 가까울수록 더 큰 진동이 발생한다.
- 동일한 규모의 지진을 가정하면, 더 오랜 기간에 걸쳐 기대할 수 있는 이 지진의 발생 횟수는 그 기간에 비례한다.
- 다양한 규모의 지진을 가정하면, 더 오랜 기간에 걸쳐 기대할 수 있는 지진의 크기는 그 기간에 비례하여 증가한다.

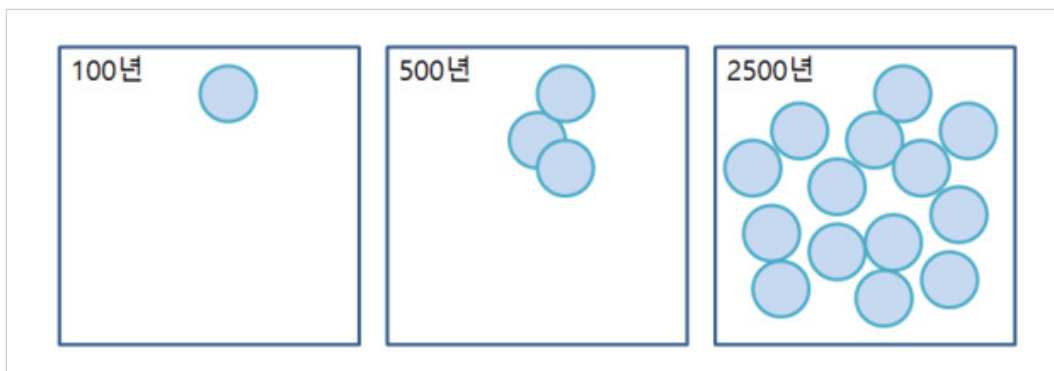


그림 22. 기간과 지진 발생 횟수의 관계

이러한 가정에 따라, 어떤 위치에서의 지진으로 인한 재해도는 어떤 주어진 기간 내에 발생할 지진으로 인한 최대 진동으로 표현된다. 자연에서 발생하는 사건 자체는 임의적이지만, 큰 사건일수록 발생 빈도가 낮고 작은 사건일수록 발생 빈도가 높다. 이를 확률로 표현하였을 때, 큰 사건의 발생 확률은 낮은 반면에, 고려하는 기간이 길수록 기대할 수 있는 최대진동의 크기는 더 커진다. 이를 어떤 지역에서 일정한 규모의 지진이 주어진 기간에 따라 발생하는 횟수로도 설명할 수 있다. 이 지역에서 시간에 따라 지진 발생 환경이 크게 변하지 않는다고 가정하면, 그림 22에서처럼 동일한 규모의 지진은 발생 빈도가 일정하기 때문에 기간이 길수록 더 많은 지진이 발생한다. 다시 이 지역 내의 하나의 지점을 가정하면, 그 지점에서 이 정도 규모의 지진을 경험할 가능성, 즉 확률은 기간이 길수록 더 커진다. 이 지역 내에서 모든 범위의 크고 작은 지진이 발생한다고 가정하면, 고려하는 기간이 길만큼 모든 지진을 경험할 확률도 커진다. 이는 동시에 더 큰 지진을 경험할 확률이 커지고, 따라서 지역 내 어떤 지점에서 경험할 수 있는 최대진동의 크기도 커짐을 의미한다.

어떤 지역에 대하여 평가한 지진재해도 결과는 보통 지도를 통하여 표현되는데, 이를 지진재해도 지도라고 한다. 이 지도는 어떤 지역 또는 주변에서 발생한 지진에 의하여 야기될 수 있는 최대 지진 지반운동 가속도의 분포를 나타낸다. 이 지도에는 지진 발생 및 이로 인한 지진에너지의 전파 과정에 대한 정보에 있

어서의 불확실성이 내재하게 된다. 즉, 자연 발생적인 사건의 임의적인 특성에 따른 불확실성과 함께, 측정의 오차 또는 지식의 한계 등으로 인한 불확실성이 혼재된다. 특히 자연의 임의적인 특성은 그 자체로 예측할 수 있는 성질의 범위를 넘어서기 때문에, 이로 인한 불확실성은 제어하기가 어렵다. 반면에 지식의 한계로 인한 불확실성은 과학의 발견과 기술의 발전에 따라서 시간이 지날수록 줄어들 수 있는 여지가 있다. 그러나 이들 두 가지 성질의 불확실성은 서로 혼재되어 있어서, 대개의 경우 쉽게 구분하기가 어렵다. 특히 동일한 현상에 대하여 다양한 해석이 가능하고, 지진자료가 충분하지 않은 지역일수록 해석 방법에 큰 차이가 존재할 수 있다. 따라서 서로 다른 견해를 통합하여 하나의 결과, 즉 다양한 의견이 반영된 지진위험 지도를 도출하는 과정이 필요하다.

지진재해도를 분석하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 결정론적 방법으로 이 방법은 하나의 극한 시나리오를 가정하는 것을 기초로 한다. 즉, 단일한 규모와 거리에서 발생하는 지진의 효과를 가정하여 지진 지반운동을 평가한다. 다른 하나는 확률론적 방법으로 모든 규모와 거리에서 발생하는 다양한 시나리오를 가정함으로써, 이들 모든 시나리오의 효과를 고려하는 지진 지반운동 평가 방법이다.

#### 4.1 결정론적 분석방법

먼저 결정론적 지진재해도 분석 방법에 대하여 자세히 살펴보자. 어떤 부지 주변에 존재하는 다양한 종류(점, 선, 면)의 지진원이 존재하고, 이들 지진원에 극한의 시나리오를 부여함으로써 부지에 미치는 최대 진동을 평가할 수 있다(그림 23).

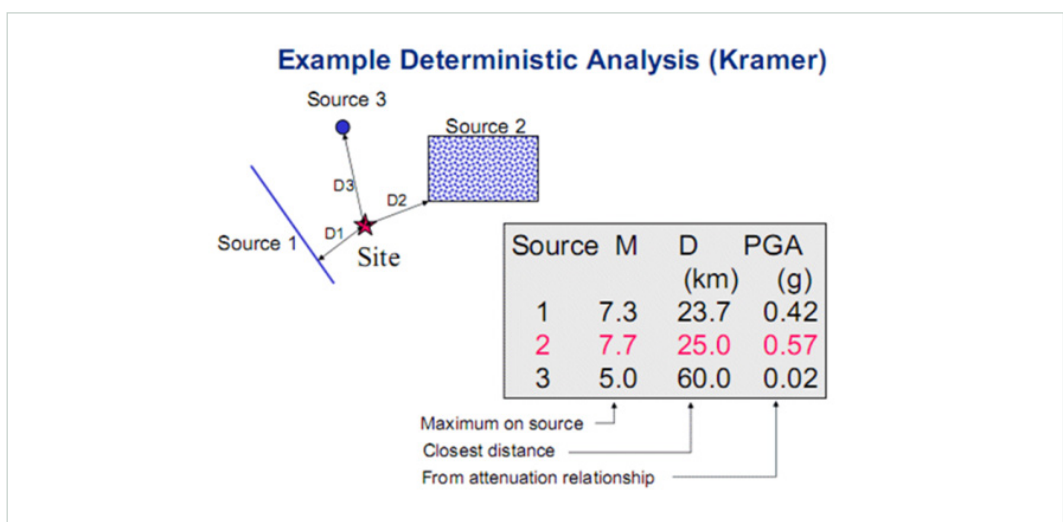


그림 23. 결정론적 지진재해도 분석 방법

결정론적 지진 재해도 평가 방법은 직관적이어서 지진원이 정확하게 정의되면, 이로 인한 부지에서의 지진동은 큰 어려움 없이 평가가 가능하다. 그러나 다양한 지진원이 존재할 경우, 부지에 영향을 미치는 이들 지진원 사이의 경중을 가리는 것은 어렵다(그림 24). 예를 들어서, 어떤 부지에서 10km 떨어진 단층 A에서 규모 6.5의 지진이 발생할 수 있고, 또한 20km 떨어진 단층 B에서는 규모 7.5의 지진이 발생할 수 있다고 가정하자. 이 때, 부지에서 가장 가까운 단층에서 발생할 수 있는 가장 큰 규모의 지진을 설정하려고 하지만, 실제로는 단일한 극한 시나리오를 설정하기가 어렵다(Kramer, 1996).

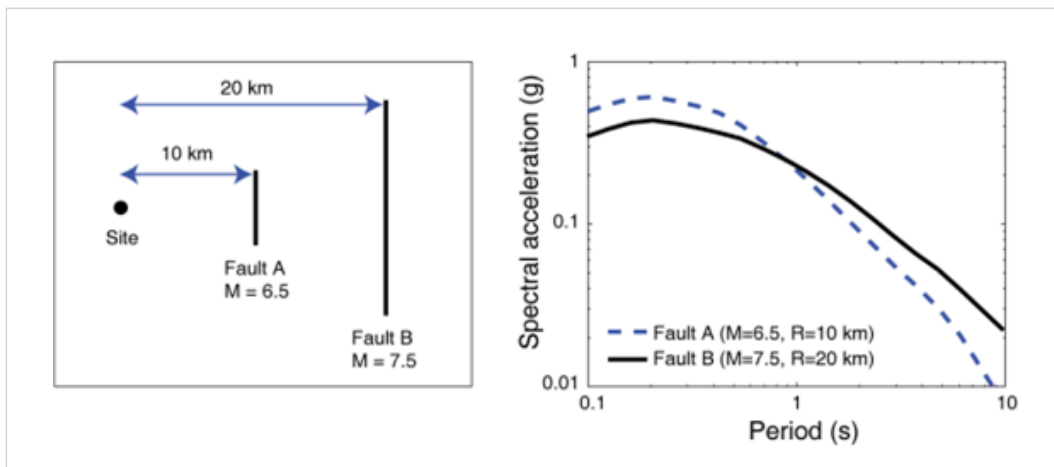


그림 24. 서로 다른 거리와 규모를 갖는 단층으로 인한 부지에서의 진동 주기별 지진 가속도 변화 양상

단층 지진원이 불명확할 경우에는 문제가 더 심각하며, 일정한 구역 내 어디서든 지진이 발생할 수 있는 면적 지진원을 설정할 수 있다. 이 때 부지 하부에서는 지진원에 대한 불확실성 때문에 거의 발생하기 어려울 것 같은 극한 규모의 지진을 가정할 수도 있다. 이러한 지진 발생의 불가능한 정도는 중요하지 않아서, 부지에서 지나치게 높은 지진동을 평가하게 될 수도 있다. 또한 지진 지반운동 세기가 거리에 따라서 감소하는 양상은 자연에서 매우 산포하기 때문에, 단일한 극한 시나리오에 따른 부지에서의 지진동 수준 예측은 매우 어렵고 불확실하다. 그림 25는 1초 주기를 갖는 지진 지반가속도 운동이 거리에 따라서 감소하는 양상을 나타낸 것이다. 주어진 10km의 거리에서 지반가속도는 매우 넓은 범위의 진폭 분포를 나타내고 있다. 이러한 차이는 지진동을 관측하는 지점에 따라서 지반 조건이 다르며, 지구 내부 물질을 통과하는 지진파의 전달 특성 차이, 진원에서 방향에 따라 지진파 에너지가 전달되는 양상이 다르기 때문에 발생한다.

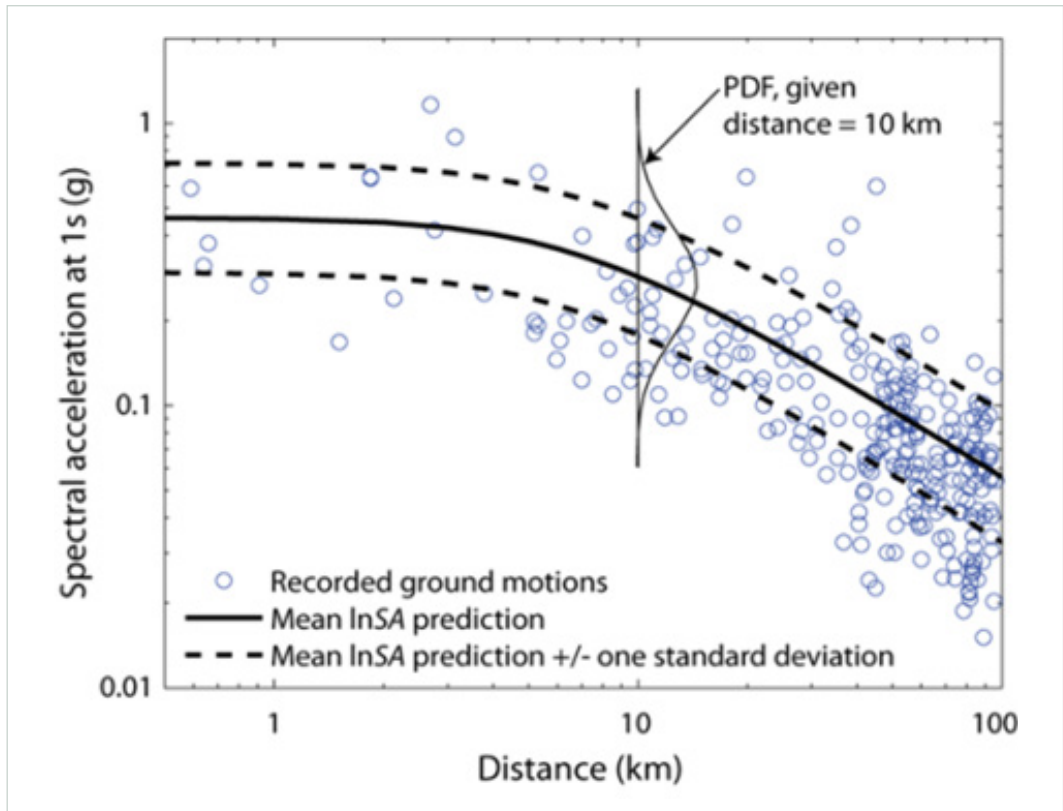


그림 25. 진앙거리에 따른 주기별 지반가속도 감쇄 특성

특히 단단하고 무른 정도와 같이 지반의 물리적 상태에 따라 같은 진원에서 같은 거리에서 관측하여도 지진동의 지반 증폭 등이 발생하면 그 차이는 더욱 커질 수 있다. 그림 26은 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8 경주지진을 국내 지진관측망에서 기록한 최대지반가속도 분포를 나타낸다. 이 분포에서 확인할 수 있는 것처럼, 진원으로부터 거리가 멀어짐에 따라서 대체로 지진 지반운동 수준이 감소하는 경향을 보이지만 지역에 따라 매우 불규칙한 값을 보이고 있다. 지진동 수준을 관측하는 지진관측소의 부지 조건에 따라서 기록하는 진폭 수준이 다르기 때문에 나타나는 양상이다. 따라서 어떤 지역에서 다양한 규모의 지진과 다양한 지진관측 거리에 따른 지진 지반운동 수준은 일정하지 않기 때문에, 많은 지진관측 자료를 통계 분석하여 그 경향을 파악하여야 한다. 이러한 분석 결과를 토대로 지진 지반운동 예측식(감쇄식)을 작성하여, 어떤 구조물의 지진 설계에 사용하거나 지진안전성을 평가하기 위한 지진 지반운동 수준을 예측하는데 사용한다.

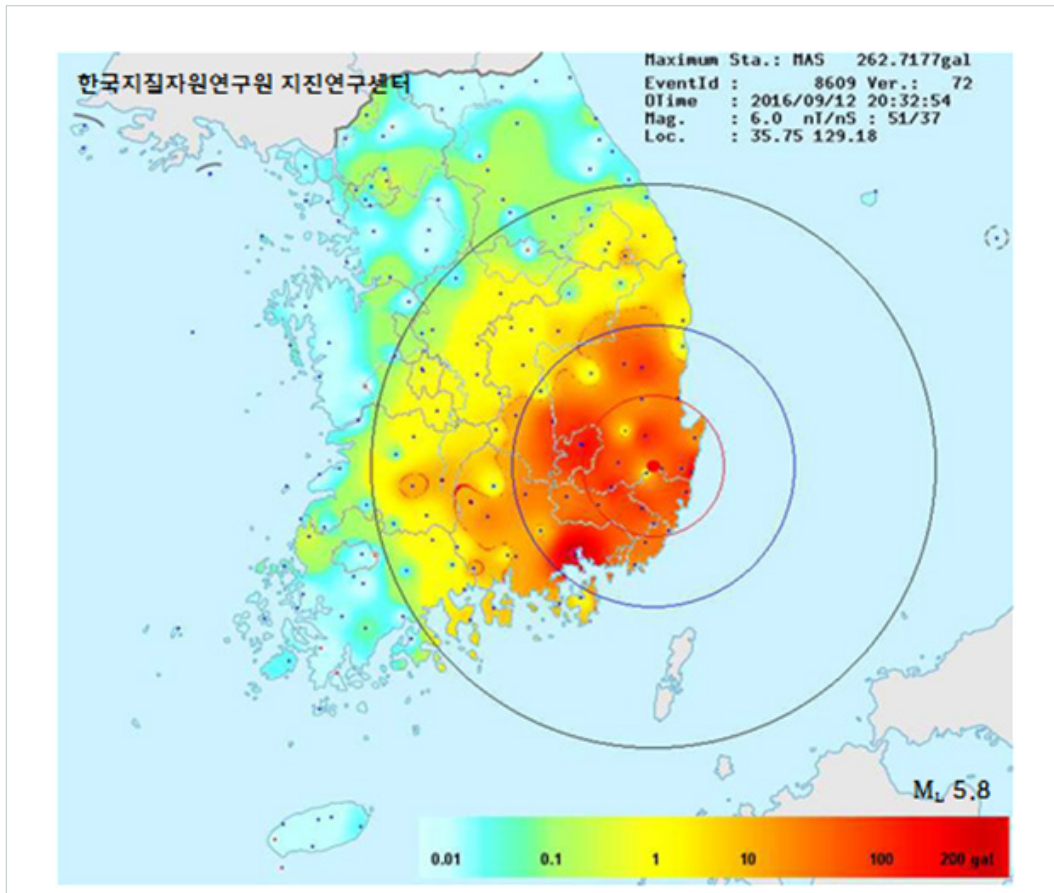


그림 26. 2016년 9월 12일 규모 5.8 경주지진의 최대지반가속도 분포

따라서 결정론적 지진재해도 분석 방법은 지진원에 대한 정의가 확실하고, 지진동 감쇄 특성을 잘 파악하고 있는 지역에서는 적용성이 높다. 반면에 지진원 특성이 잘 알려지지 않은 지역에서는 결정론적 평가 방법 자체가 매우 불확실한 방법이 될 수 있으므로 방법의 선택에 있어서 주의가 필요하다.

#### 4.2 확률론적 분석방법

확률론적 지진재해도 분석 방법은 모든 발생 가능한 지진으로 인하여 특정한 부지에서 다양한 지반운동 수준을 초과할 확률을 정량화한다(그림 27). 이 과정에서 다양한 의견을 종합적으로 평가할 수 있다. 즉, 모든 발생 가능한 사건들을 조합하고 그 확률을 계산하여 통계 처리하고, 각각의 모델과 이에 부여된 가중치

를 조합하여 분석 결과에 대한 불확실성을 추정한다. 또한 민감도 분석을 통하여 각각의 입력자료가 최종 결과인 지진재해도에 미치는 영향을 분석한다. 여기에 사용되는 입력자료는 결정론적 지진재해도 분석 방법에 비하여 훨씬 복잡하며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 지진원 특성 : 지진원(면적, 단층)의 기하학적 형태, 지진원별 지진활동 변수 및 최대규모, 단층길이-규모 관계식 및 표준편차
- 지진과 전달 특성: 지진 지반운동 감쇠 관계식 및 표준편차
- 대안값 및 가중치

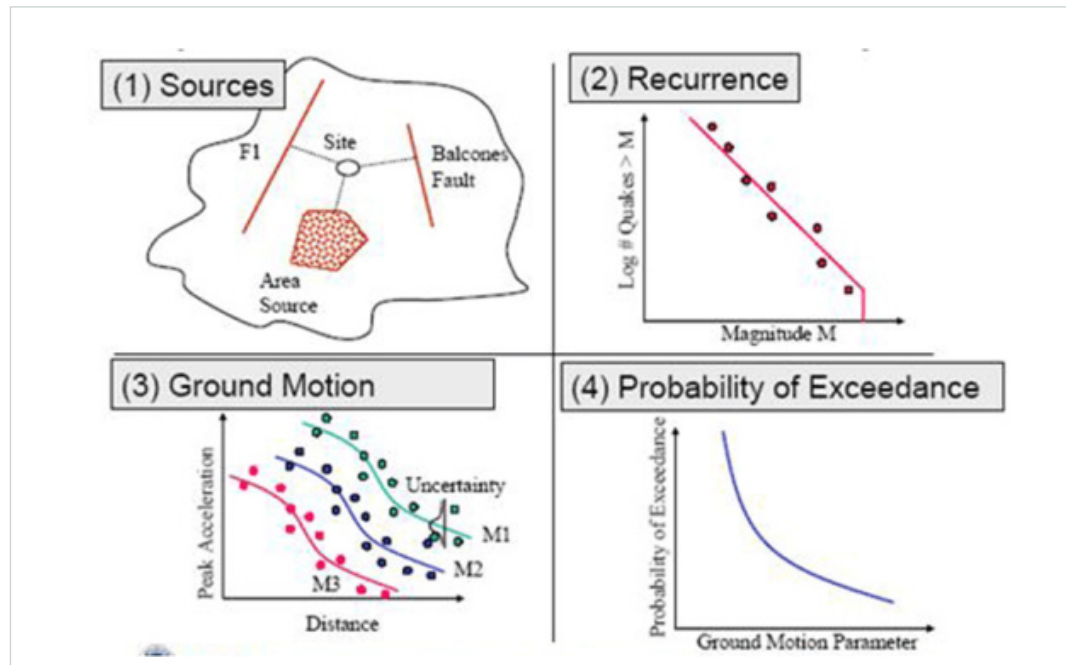


그림 27. 확률론적 지진재해도 분석 방법

확률론적 지진재해도 분석은 지진의 발생 위치, 크기, 발생시각 및 이로 인한 특정 위치에서의 영향에 대한 확률론적 모델을 통합하여, 특정 기간 내에 특정한 크기의 지진동 수준이 부지에서 야기될 확률을 결정할 목적으로 수행된다. 그 결과로 설계 기간 동안 어떤 장소에서 지진 지반운동 수준이 정해진 확률에 의해 초과할 값을 나타내는 확률론적 지진재해도 값을 얻게 된다. 또한 확률론적 지진재해도의 지리적 분포를 지도에 등가속도 곡선으로 나타낸 확률론적 지진재해도 지도를 최종 결과물로 얻을 수 있다. 그림 28은 한반도의 확률론적 지진재해도 평가 결과를 지도로 작성한 예를 나타낸다.

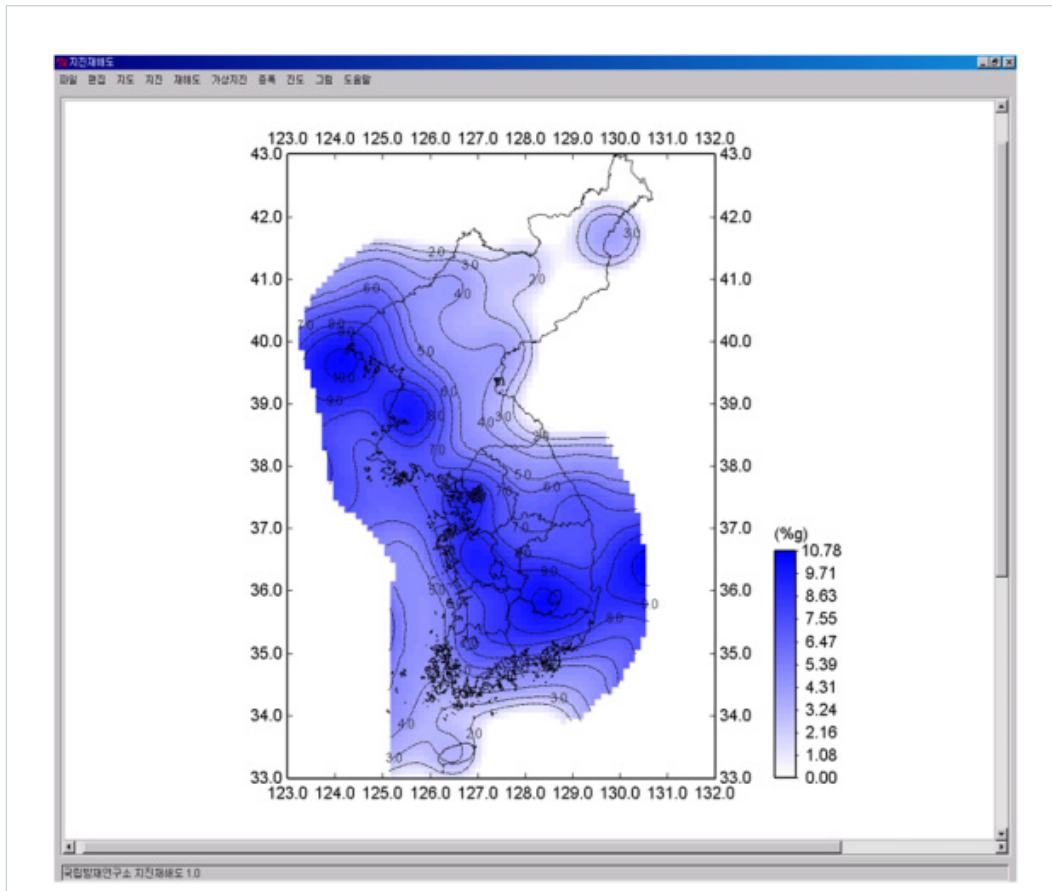


그림 28. 확률론적 지진재해도 분석 결과를 지도로 표현한 예

따라서 우리나라와 같이 지진원과 지진동 감쇄 특성에 대한 불확실성이 높은 지역에서는 단일한 시나리오 설정이 어렵기 때문에 확률론적 방법에 따라서 다양한 가능한 모든 시나리오를 고려하는 것이 합리적인 방법일 수 있다. 즉, 이들 입력자료의 높은 불확실성에도 불구하고, 각각이 최종 지진재해도에 영향을 미치는 불확실성의 범위를 파악할 수 있다는 것은 이후에 무엇을 개선하여야 할 것인지에 대한 명확한 목표가 수립됨과 함께, 최종 지진재해도가 어느 정도까지 신뢰할만한 것인지에 대하여 불확실성 범위를 제시하는 정량적인 답변을 주기 때문이다.



## 05 지진재해도 기술 동향

국내에서 확률론적 지진재해도 분석 방법이 국가지진재해도 평가에 본격적으로 적용된 것은 1997년 당시 건설교통부의 위탁으로 한국지진공학회가 수행한 “내진설계 기준 연구 (II)”에서 부터이다(건설교통부, 1997). 또한 이와 별개로 국내 20여개 원전 관련 시설에 대한 지진안전성 평가를 위하여 확률론적 지진재해도 평가가 이루어졌다. 이 과정에서 노출된 여러 문제점 가운데, 가장 근본이 되는 것은 역시 지진원의 불확실성에 관한 문제였다. 지진재해도 평가에 사용되는 입력자료의 생산 근거를 제공하는 중요 학문 분야인 지질학의 해석적인 성격으로 인하여, 같은 사안에 대하여 다양한 문제 제기와 서로 다른 해석 결과가 제시되는 일이 빈번하다. 이로 인하여 특히 원전 관련 지진재해도 평가에서 부지 선정과 인허가 및 평가 과정에서 부지의 지질학적 조건에 대한 여러 쟁점이 도출되고 이를 해결하는 과정이 진행되었다. 국내 지진재해도 평가에 있어서 또 다른 논점은 과학과 사회 및 정치적 논점을 구별하는 것이 매우 어렵다는데 기인한다. 이러한 다양한 논점이 제기되는 복잡한 배경에도 불구하고, 우리나라에서 확률론적 지진재해도 평가를 수행하는 배경은 우선 이 방법이 불확실성을 다루는 체계적인 방법을 제시한다는 데 있다. 큰 규모의 지진을 많이 경험하지 못한 상황에서도 다양한 지진발생 빈도에 대한 시나리오를 고려할 수 있다는 것은 우리나라와 같은 판 내부 지진 환경에서 특히 유용하다. 또한 다양한 정보와 내포된 불확실성을 고려한 판단들을 융합할 수 있고, 새로운 조사와 분석 등에 의한 결과와 발견 등과 같이 새로운 정보가 등장하였을 경우에도 이들 정보를 기존과 융합하는 것이 용이하다. 또한 확률론적 지진재해도 분석 방법은 발산하는 다양한 견해들을 모두 녹여서 우리 사회가 지향하는 목표에 부합하기 위한 유용한 지진재해도 평가 수행 체계를 제공하였다.

그 결과, 국내에서 그간 20여 년 동안 수행한 지진재해도 평가 경험은 일반구조물의 지진 설계 기준 마련을 위한 국가지진재해도 지도 작성과 원전 시설물의 지진안전성 평가로 대별할 수 있다. 이 둘은 서로 다른 목적에서 수행되었음에도 불구하고, 한반도 지진발생 특성, 지진원 규명, 지진동 전파 특성 규명 등과 같은 관련 연구를 촉발하였다. 또한 전문가 집단의 구성을 통하여 서로 다른 견해를 용인하며 입력자료를 도출하는 과정에 대하여 전문 학계가 공감대를 형성하게 되었다. 전문가들이 최적의 입력자료를 결정하는 과정에서 특정한 과학 주제에 대한 전문가들의 합의가 어려우며 당대에 전문가들이 파악하고 있는 정보의 제한(또는 지식의 한계)로 인해 입력자료에 대한 합의는 거의 불가능하다. 따라서 전문가의 견해 차이를 다루기 위한 방안으로써, 입력자료 주제 자체에 대한 합의를 시도하기 보다는, 견해의 다양성을 어떻게 표현할 것인지에 대한 합의를 시도하는 것이 훨씬 바람직하다.

미국 서부지역이나 일본과 같이, 우리나라에 비하여 지진이 빈발하고 이로 인한 피해가 다른 자연재해에 비하여 큰 비중을 차지하는 지역에서는 지진재해도 평가가 합리적인 내진설계 기준 설정과 지진대응체

계 수립을 위하여 매우 중요하다. 미국에서는 1976년 이후 미국지질조사소(USGS)에서 확률론적 방법에 의한 국가지진재해도지도를 발간하였으며, 약 5년마다 새로운 자료와 방법을 통하여 그 결과를 갱신하고 있다. 또한, 각 주요 대도시 지역에서 독자적으로 지역적인 상세한 조사와 지질구조 및 표토층의 효과를 고려한 지역지진재해도도를 작성하며, 동일한 방법을 사용함으로써 광역 국가지진재해도도를 보완하고 있다. 지역지진재해도도는 확률론적 방법과 지진원을 가정한 결정론적 방법에 의한 지도가 병행하여 제시되고 있다. 가장 최신의 국가지진재해도도는 2014년에 발표되었으며, 2016년에는 미국 중부와 동부지역에 대하여 지하에 인위적인 폐수 주입에 따른 유발지진을 고려한 지진재해도 평가 결과를 갱신하였다(<http://earthquake.usgs.gov/hazards/hazmaps/>).

일본은 1995년 효고현 남부지진 이후, 지진방재대책특별조치법에 따라 설치된 지진조사연구추진본부에서 1999년 ‘지진조사, 관측 및 연구 증진을 위한 기본시책’을 마련하였다. 당면과제의 하나로써 전국을 총괄하는 지진동예측지도 작성을 목표로 약 10년의 장기 계획을 수립 및 시행하였다. 이 과제는 확률론적 방법에 의한 지진재해도도 작성과 특정 단층지진원을 가정한(결정론적) 지진동 예상지도 작성의 두 가지 형태의 연구가 병행 추진되었으며, 2004년 말 국가지진재해도도에 대한 인터넷 서비스를 개시하고 현재까지 지속하고 있다. 현재는 시스템의 보완과 함께 확률론적 방법과 결정론적 방법의 연계 방안 연구가 추진되고 있다. 그 결과로 일본 전역에 분포하는 활성단층에 대하여 가능한 지진 시나리오를 설정하고, 이를 토대로 결정론적 방법으로 지진재해도를 평가함으로써 시나리오 기반 진동 지도를 제공하고 있다(<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)

## 06 지진재해도 분석의 향후 전망

최근 지진관측망의 확충과 통신 기술의 발달로 인하여, 지진 지반운동 자료는 진동이 채 멈추기 전에도 그 일부가 전송되어 지진의 특성이 분석되어질 수 있다. 이러한 발달은 실시간 재해도 평가 분야를 이끌 수 있을 것이다. 실시간 지진재해도 정보에 담긴 개념은 아주 간단하다. 지진 지반운동 정보를 자동으로 처리하여, 긴급 대응 기관과 중요 시설물을 운용하는 관계자에게 신속하게 전달하는 것이다. 예를 들어, 미국 남부 캘리포니아에 운영하는 지진관측망인 TriNet 프로젝트는 지진 발생 이후 몇 분 만에 지반운동의 진도 분포에 대한 정보를 신뢰할 만한 수준으로 제공하는 것이 가능함을 보였다(Wald et al. 1999). 캘리포니아의 다양한 시설들은 이미 상세한 지진대응 계획을 수립하고 있다. 이러한 긴급 대응 계획은 지진 지반운동 분

포도가 제공하는 정보 활용이 핵심이다. 앞으로는 심각한 지진 지반운동이 어느 지점에 도착하기 적어도 수 초 전에 경보를 발령하여, 시설의 자동화된 시스템이 긴급하게 운전을 정지하게 함으로써 큰 피해를 미연에 방지할 수 있다.

기상청에서는 지난 2015년부터 이미 지진원 정보에 대한 지진조기경보시스템을 가동하여, 이번 9.12 경주지진에서 성공적인 결과를 얻기도 하였다. 정보의 생산과 전달 체계의 이원화로 인하여, 지진조기경보시스템에서 생산된 정보가 결과적으로 일반 국민들에게 전달되는 과정에서 다소 미흡한 점이 노출되었으나, 경주지진 이후 정부는 이를 보완하고자 체계를 일원화하여 신속한 지진정보 전달이 이루어질 수 있도록 하였다. 여기에 더하여, 지진 지반운동 예측도를 신속하게 작성하여 지진조기경보시스템의 수준으로 전송함으로써 궁극적인 지진대응시스템 구축에 이를 수 있을 것이다.

## Kang Tae-Seob

저자

강태섭

학력

서울대학교 지구환경과학부 박사  
 서울대학교 지질과학과 석사  
 서울대학교 지질과학과 학사

경력

現) 부경대학교 환경·해양대학 지구환경과학과 부교수  
 前) 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원  
 前) 한국전력기술(주) 토목기술처 책임기술원

## 참고문헌

---

1. 강태섭. 경주에서 발생한 역사지진 이야기. 지진포커스 7, 20-23 (2016).
2. 건설교통부. 내진설계 기준 연구(II). 504 pp. 한국지진공학회 (1997).
3. 기상청. 2015 지진연보. 155 pp. (2016).
4. 전명순, 전정수. 한반도 초기 계기지진 자료 (1905-1942). 자원환경지질 34, 573-581 (2001).
5. Ballard, R. D. Exploring Our Living Planet. 366 pp. National Geographic Society (1988).
6. World Stress Map based on the database release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Commission for the Geological Map of the World, Paris, doi:10.1594/GFZ.WSM.Map2009 (2009).
7. Jolivet, L., Davy, P., Cobbold, P. Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. Tectonics 9, 1409-1419 (1990).
8. Kramer, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. 653 pp. Prentice Hall (1996).
9. Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R., Cobbold, P. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. Geology 10, 611-616 (1982).
10. Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W., Worden, C. B. TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. Earthquake Spectra 15, 537-555 (1999).



# 02

## 9.12 경주지진을 바탕으로 지진에 대한 이해와 내진설계

센구조연구소 김동관 박사 (dkkim@senkuzo.com)

# 01 서론

2016년 9월 12일 경주에서 규모 5.8의 지진이 발생하고, 9월 19일에는 규모 4.5의 여진이 발생하였다. 이후로도 약 400여회의 여진이 발생하였으며, 경주지진으로 인한 피해는 부상자가 23명, 재산상의 피해는 5,120건으로 큰 손실이 발생하였다.

경주지진 시, 경주, 대구지역은 모든 사람들이 진동을 느낄 수 있고 가옥이 심하게 흔들리며 무거운 가구가 움직일 정도의 진도 6이 감지되었으며, 부산, 울산, 창원에는 진도 5가 감지되었다. 이러한 지진의 경험은 더 이상 한국이 지진에 대한 안전지대가 아니며, 언제든지 지진에 의하여 국내에서 인명손실 및 재산피해가 발생할 수 있다는 경각심을 일깨우고 있다.



그림 1.1 경주지진 시, 건물의 손상: (a) 난간의 붕괴; (b) 비구조체의 탈락; (c) 토석담의전도파괴; (d) 기둥의 전단파괴 [1]

이에 따라 한국지진공학회, 한국구조공학단체총연합회, 그리고 유관 정부부처에서는 다양한 학술포럼을 개최하여 경주지진을 분석하고, 후속 대책을 수립하고 있다. 해당 포럼들에서 지진에 대하여 건축물이 안전하게 저항하여 인명을 보호하도록 설계하는 구조설계자, 지진공학자 등은 경주지진이 현재 3층 건물까지만 내진설계 의무화가 되어 있는 국내 내진설계 범위를 확대해야 하는 조기경보임을 알리고 있다.

국내에서는 아직 지진에 대한 일반인의 경험과 인식이 충분하지 않고, 그에 따라 건축물의 내진설계의 중요성이 간과되고 있다. 따라서, 본 원고에서는 지진에 대한 일반인의 이해를 높이고자, 지진에 대한 소개와 이에 따른 국내의 관련기준 그리고 건축물의 내진설계에 대해 설명하고자 한다. 각 장의 내용은 다음과 같다.

2장에서는 경주지진 시 기록된 가속도 자료를 바탕으로 지진에 대한 분석과 그에 따른 내진설계응답 스펙트럼과 국가지진위험지도를 소개한다. 3장에서는 지진 발생시 지진동을 증폭시키는 지반의 영향, 4장에서는 내진설계의 방법에 대해 소개한다. 5장에서는 내진설계와 관련된 향후 연구 전망에 대하여 설명하고자 한다.

## 02 경주지진 및 지진의 이해

### 2.1 지진과 계측

2016년 9월 12일에 발생한 규모 5.8의 경주지진은 1978년 지진계측 이래 최대의 지진이었다. 그 이전에 국내에서는 2007년 1월 20일에 발생한 규모 4.8의 오대산 지진이 내륙에서 발생한 지진으로 지진기록 분석에 유의미한 자료였다. 경주지진은 그림 2.1과 같이 진앙(지진이 발생한 지하 진원에서 연직으로 지표면과 만나는 지점)에서 5.9~22km 떨어진 관측소에서 순간최대가속도(Peak Ground Acceleration)<sup>1)</sup>가 최대 0.404g가 기록되어 진폭이 가장 큰 지진으로 지진공학적으로 매우 중요한 자료가 되고 있다.

경주지진 시 계측된 가속도 기록의 파형은 그림 2.2와 같다. 진앙으로부터 5.9km 떨어진 MKL 관측소에서 계측된 순간최대가속도는 수평방향으로 0.257~0.285g이고, 수직방향으로 0.088g이다. 진앙으로부터

1) 순간최대가속도 : 지반이 흔들리는 정도를 보여주는 지표로 지진파에서 계측된 지진가속도 중에서 가장 최대치를 중력가속도(g)에 대한 지구 중력 1g의 비율로 표시됨(예시: 0.285g는 지구중력의 0.285배)



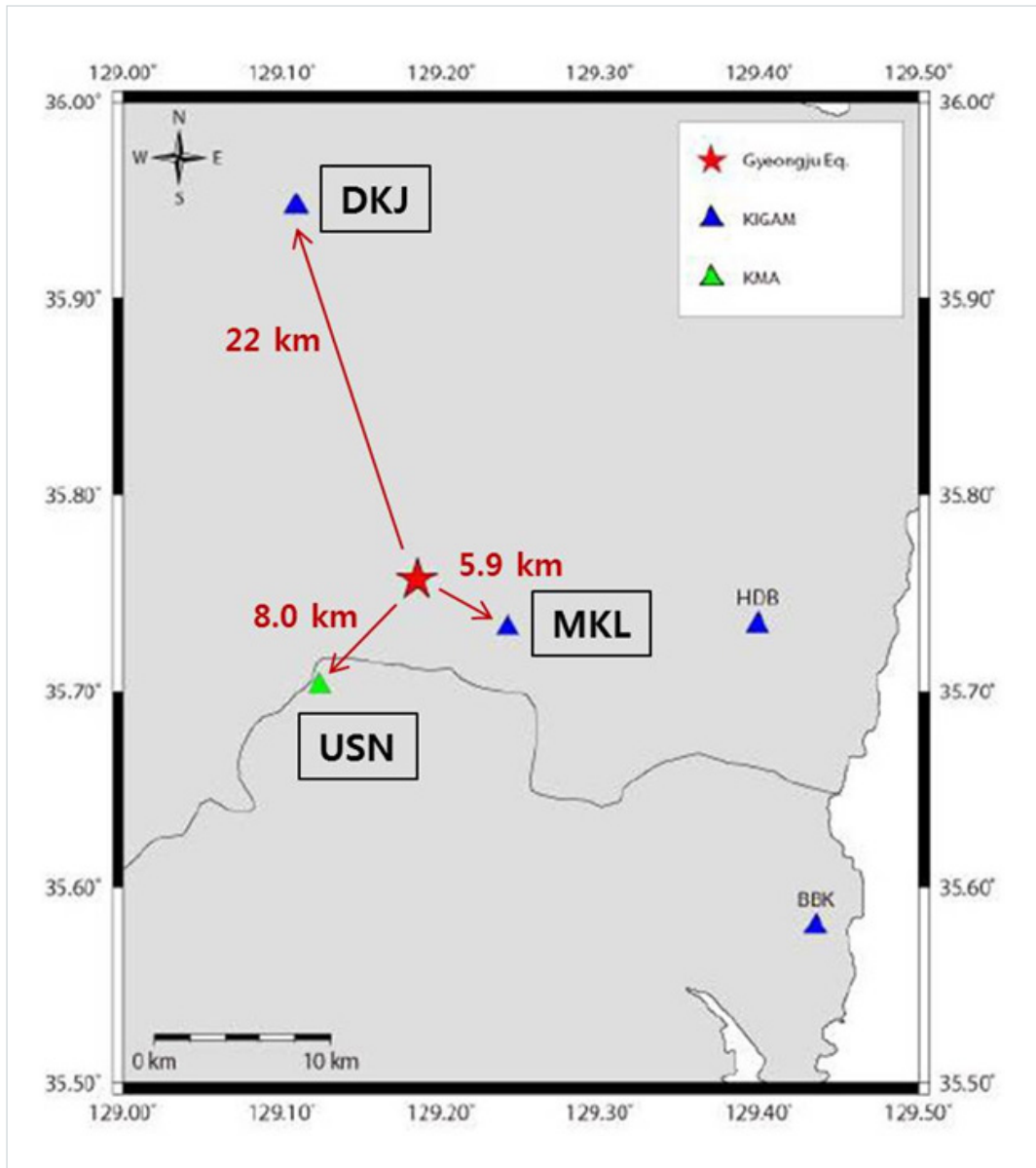


그림 2.1 경주지진의 진앙과 관측소 현황

8.0km 떨어진 USN 관측소에서 측정된 순간최대가속도는 수평방향으로 0.404~0.351g이고, 수직방향으로 0.213g이다. USN 관측소가 MKL 관측소보다 진앙으로부터 먼 거리임에도 불구하고, 측정된 순간최대

가속도는 더 크게 나타났다. MKL 관측소는 단단한 암반 위에 있었고, USN 관측소는 토사지반 위에 있었다. 이는 관측소가 위치한 부지에서 지진동이 증폭되는 지반효과(Seismic Local Site Effect)의 영향으로 USN 관측소 하부의 토사지반에 의해 지진동이 증폭되어 MKL 관측소보다 큰 지진파가 계측된 것이다. 이에 대해서는 3장에서 자세히 논할 예정이다.

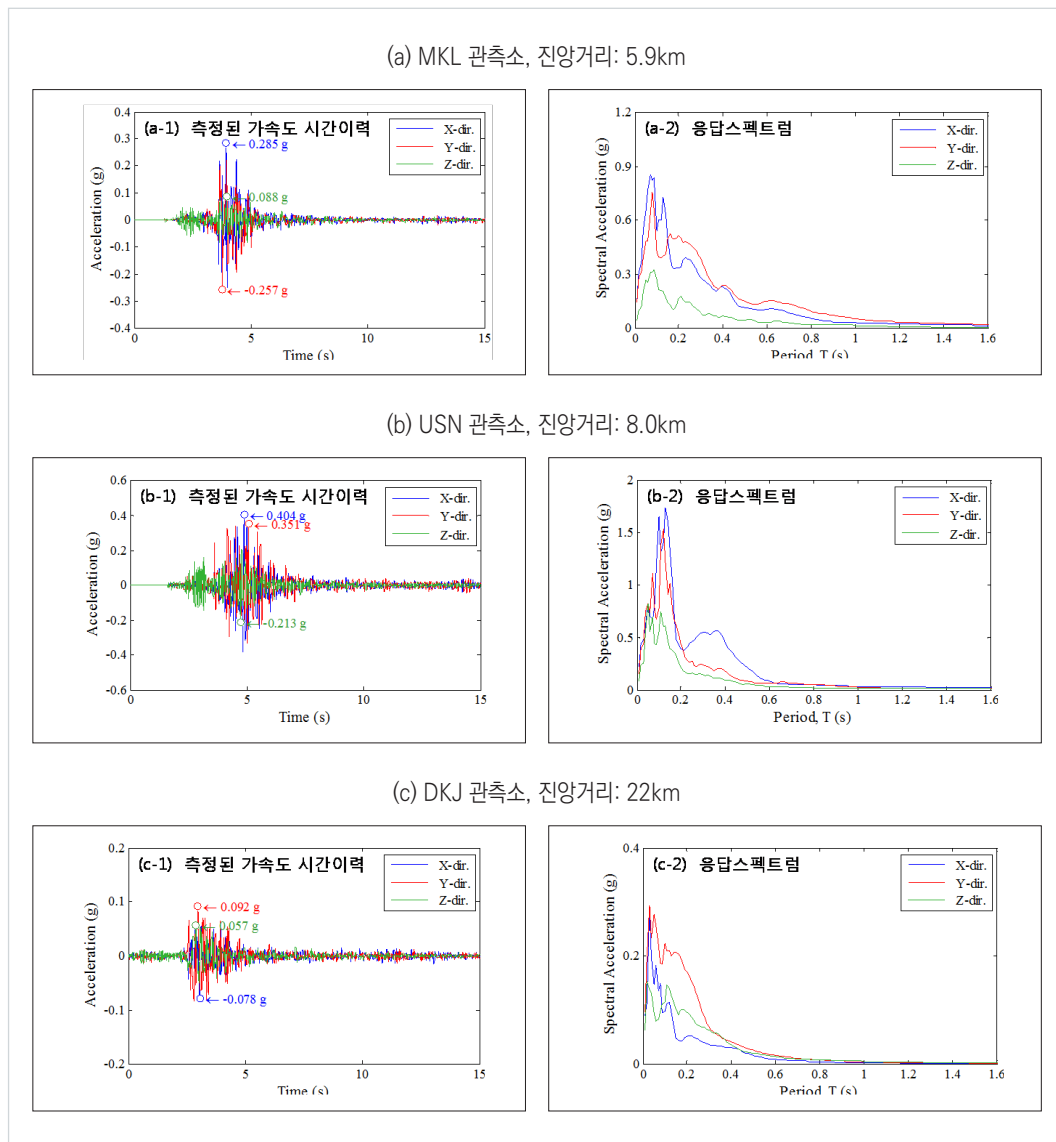


그림 2.2 경주지진 시 측정된 가속도기록과 응답스펙트럼

진양으로부터 22km 떨어진 DKJ 관측소에서 측정된 순간최대가속도는 수평방향으로 0.078~0.092g이고, 수직방향으로 0.057g이다. 지진동은 진원으로부터 멀어짐에 따라 감소되는 특징이 있으며, 암반 위에 놓인 MKL 관측소와 DKJ 관측소에서 측정된 지진기록을 분석하여 국내에서 연구된 지진동의 감쇠식<sup>2)</sup> 들을 평가할 수 있다.

**표 2.1** 경주지진기록의 특성

관측소	진양 거리	지반 조건	순간최대가속도 (PGA)			유효지반가속도 (EPGA)	
			X방향	Y방향	Z방향	단주기	1초 주기
MKL	5.9km	S <sub>B</sub> *	0.285g	0.257g	0.088g	0.157g	0.052g
USN	8.0km	S <sub>C</sub> **	0.404g	0.351g	0.213g	0.286g	0.037g
DKJ	22km	S <sub>B</sub>	0.078g	0.092g	0.057g	0.055g	0.004g

\* S<sub>B</sub> : 건축구조기준 KBC 2016의 지반분류에서 보통암 지반

\*\* S<sub>C</sub> : 건축구조기준 KBC 2016의 지반분류에서 매우 조밀한 토사지반

## 2.2 응답스펙트럼 (Response Spectrum)

그림 2.2와 표 2.1에서 언급된 경주지진의 순간최대가속도는 최대 0.404g까지 측정되었다. 이는 지구 중력의 0.404배로서 매우 큰 힘을 나타낼 수 있지만, 측정된 가속도 기록의 순간최대가속도가 공학적으로 큰 의미를 갖지는 않는다. 하나의 지진파형은 순간최대가속도, 주파수특성, 지속시간 등으로 다양한 관점에서 분석될 수 있다. 이러한 분석방법 중에 내진설계적 관점에서 중요한 것은 지진파의 응답스펙트럼 (Response Spectrum)이다. 응답스펙트럼이란 하나의 지진에 대하여 다양한 주기의 구조물의 응답(거동)을 예측하고, 그 결과를 구조물의 주기 별로 배열한 것이다. 내진설계를 위한 응답스펙트럼으로는 유사가속도 응답스펙트럼(Pseudo-acceleration Response Spectrum)을 사용하며, 도출절차는 다음과 같다.

그림 2.3과 같이 단자유도 구조물(한쪽 방향으로만 움직이는 구조물)을 가정하고, 지진파를 입력하여 구조물의 응답을 예측한다. 이 때, 구조물을 구성하는 요소는 구조물의 질량( $m_s$ )과 강성( $k_s$ )이다. 구조물의 질량은 건물의 무게로부터 환산될 수 있으며, 구조물의 강성은 구조물의 단단한 정도를 의미한다.

2) 지진동 감쇠식 : 지진동이 진원으로부터 전파됨에 따라 감소되는 특성을 지역에 맞게 도출한 식

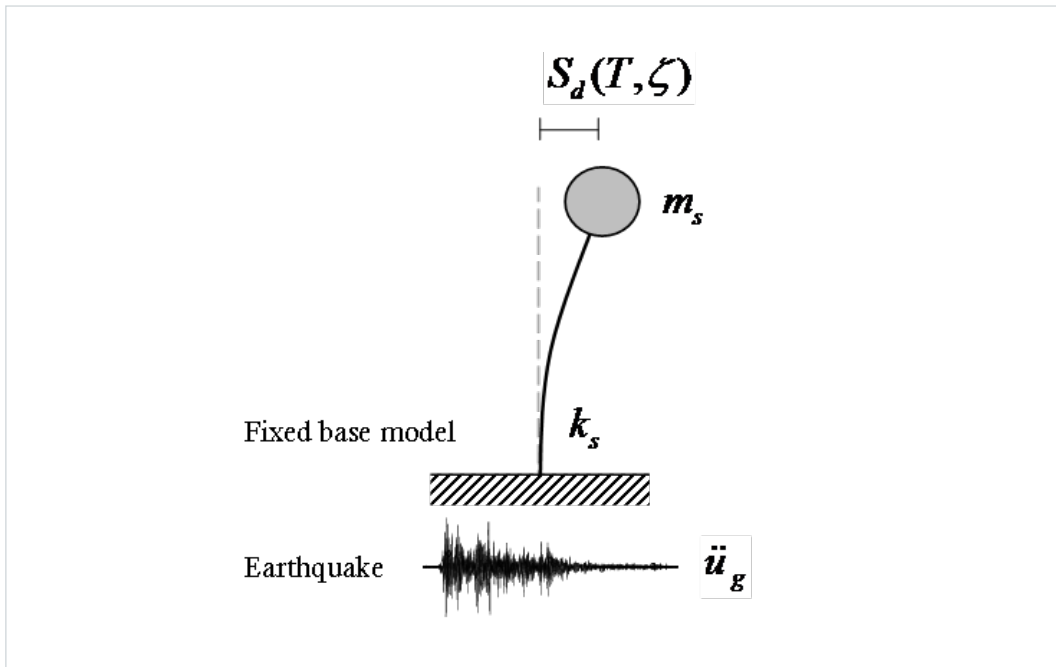


그림 2.3 지진에 대한 단자유도 구조물의 거동해석

질량과 강성의 조합으로 식 (2.1)과 같이 구조물의 진동주기( $T$ )를 구할 수 있으며, 구조물의 진동주기는 구조물이 진폭을 1회 왕복하는데 걸리는 시간이다. 식 (2.1)을 바탕으로 진동주기에 대한 물리적인 의미를 살펴보면, 구조물이 무거워질수록 진동주기가 길어지고, 왕복하는 시간이 길어진다. 반대로 구조물이 강할수록 진동주기가 짧아지고, 왕복하는 시간이 짧아진다. 건축물의 진동주기는 건물의 층수와 관계가 있으며, 층수에 0.1을 곱하면 진동주기를 구하는 약산식이 될 수 있다 [2]. 따라서, 1층 건물은 0.1초 진동주기, 10층 건물은 1초 진동주기, 20층 건물은 약 2초의 진동주기를 갖는다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{k_s}} \quad \text{식 (2.1)}$$

식 (2.2)는 그림 2.3의 단자유도 구조물의 지진응답을 예측하기 위한 운동방정식을 나타낸다. 여기서  $\ddot{u}_s, \dot{u}_s, u_s$ 은 각각 구조물의 가속도, 속도, 변위 응답을 나타낸다.  $\ddot{u}_g$ 는 지반가속도로서 측정된 가속도 기록

을 사용하고, 식 (2.2)의 우항과 같이  $m_s \ddot{u}_g$ 가 관성력으로 구조물의 지진응답을 유발하게 된다.  $c$ 는 구조물의 감쇠계수로서 속도와 유관하여 지진에 저항하는 저항력이다. 감쇠란 공기와의 마찰, 구조물 접합부 내부의 마찰 등으로 진동이 서서히 소멸되는 것을 표현한 값으로 볼 수 있다. 측정된 지진기록의 매 순간마다 식 (2.2)의 운동방정식을 맞추어 구조물의 지진응답을 도출하게 된다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = m_s \ddot{u}_g \tag{2.2}$$

건물을 내진설계하기 위해서는 지진에 의해 해당 건물에 얼마만큼의 수평력( $F$ )이 예상되는지를 정하는 것이 가장 중요하다. 또한 측정된 지진기록을 활용한 지진해석으로부터 해당 건물에 예상되는 수평력( $F$ )을 식 (2.3)과 같이 도출할 수 있다. 식(2.3)에서 수평력은 구조물의 강성과 변위의 곱으로 계산될 수 있으며, 이때 변위로부터 다양한 진동주기( $T$ )와 감쇠비( $\zeta$ )에 대한 spectral displacement<sup>3)</sup> ( $S_d(T, \zeta)$ )를 구할 수 있다. 다만, 일반적으로 구조물의 강성을 정확히 예측하는 것은 어렵고, 구조물의 질량은 무게로부터 환산되기 때문에 정확히 예측하기가 수월하다. 따라서 식 (2.4)와 같이 도출된 수평력을 구조물의 질량으로 나누어 유사가속도 (Pseudo-acceleration,  $S_a(T, \zeta)$ )을 구하여 내진설계에 활용하고 있다.

$$F = k_s u = k_s S_d(T, \zeta) \tag{2.3}$$

$$S_a(T, \zeta) = \frac{k_s u}{m_s} \tag{2.4}$$

그림 2.2에 오른쪽 그림들은 경주지진 시 관측된 가속도기록을 바탕으로 유사가속도 응답스펙트럼을 도출한 것으로 그래프의 X방향은 구조물의 진동주기, Y방향은 유사가속도로 구조물의 질량을 곱하면, 바로 수평력으로 치환될 수 있다. 그림 2.2(b-1)과 같이 USN 관측소에서 측정된 수평방향 가속도 기록의 순간최대가속도는 0.351~0.404g 이지만, 2.2(b-2)의 유사가속도 응답스펙트럼에서는 0.1초 진동주기를 갖는 구조물의 유사가속도가 약 1.7g로서 매우 큰 값을 나타낸다. 이는 경주지진 시 USN 관측소에 1층 건물이 있었다면, 구조물에 건물무게의 1.7배에 달하는 수평력이 유발되었을 것임을 의미한다. 다만, 진동주기 0.6초 이상의 구조물에 대해서는 유사가속도가 매우 작아져서 작은 지진력이 유발된 것으로 분석된다.

3) 스펙트럼 변위 : 지진해석으로부터 계산된 구조물의 주기별 변위

이와 같이 계측된 지진기록으로부터 유사가속도 응답스펙트럼을 도출하여 해당지진을 분석하면, 지진 시 건물의 손상경향과 유사하다. 경주지진 시 피해를 입은 대부분의 건물은 진동주기가 짧은 2층 이하의 저층 건물이었으며, 특히 상부에 기와 등으로 무게가 무거운 한옥 등에 큰 수평력이 유발되어 손상이 발생하였다. 경주지진은 이러한 단주기 구조물에 큰 손상을 유발한 단주기 특성이 큰 지진이었으므로, 진동주기가 긴 10층 이상의 고층건물에서는 피해가 발생하지 않았다.

### 2.3 순간최대가속도(PGA)와 유효지반가속도 (EPGA)

2.2에서 기술한 바와 같이 지진 시 계측된 가속도기록의 순간최대가속도는 공학적으로 큰 의미를 갖지 않고, 구조물의 주기별 수평력을 예측할 수 있는 유사가속도 응답스펙트럼이 중요하다. 또한 지진공학자들이 이 유사가속도 응답스펙트럼으로부터 해당 지진을 나타내는 유효지반가속도(Effective Peak Ground Acceleration, EPGA)를 도출하고 있다. 유효지반가속도란 해당지역에 예상되는 지진의 수준을 나타내는 지표로 2.4절에 소개될 국가지진위험지도와 건축구조기준 2016 (KBC 2016)<sup>4)</sup>에 적용된다.

경주지진의 유사가속도 응답스펙트럼으로부터 유효지반가속도를 계산하여 비교한 결과는 표 2.1과 같다. 유효지반가속도는 주기가 0.1~0.5초 사이의 유사가속도 응답스펙트럼을 평균하여 2.5로 나눈 '단주기 유효지반가속도'가 있고, 1초 주기(약 0.8~1.2초 사이)의 유사가속도 응답스펙트럼을 분수함수로 fitting 하여 계산한 '1초 주기 유효지반가속도'가 있다. 경주지진의 단주기 유효지반가속도는 0.055~0.157g이고, 1초 주기 유효지반가속도는 0.004~0.052g로서 단주기 성분이 더 큰 지진임을 확인할 수 있었다.

### 2.4 내진설계응답스펙트럼과 국가지진위험지도

2.2절에서 기술한 응답스펙트럼과 2.3절에서 기술한 유효지반가속도는 내진설계를 위한 설계응답스펙트럼<sup>5)</sup>으로 건축구조기준 2016 (KBC2016)에 명시되어 있다. 또한 유효지반가속도는 2013년에 소방방재청에서 발간된 국가지진위험지도로 정의되어 있다 [3]. 국가지진위험지도는 지진의 재현주기(재현주기 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년 및 4800년)별로 우리나라 국토에 예상되는 유효지반가속도

4) 건축구조기준2016(KBC2016): '건축물이 안전한 구조를 갖기 위한 최소기준'(국토교통부령, 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 제3조제1항)

5) 설계응답스펙트럼: 지진이 발생하여 구조물에 예상되는 수평력에 대하여 건물을 내진설계하기 위하여 해당지역과 지반조건에 맞게 예상되는 가속도 수준

를 %단위로 나타내고 있다. 그림 2.4는 2400년에 한번 발생할 것으로 예상되는 지진의 수준을 유효지반가속도로 나타내고 있으며, 이는 건축구조기준 KBC 2016에서 최대예상지진의 유효지반가속도( $S$ )로 표현된다. 그림 2.4에서 17%는 해당지역에서 2400년에 한번 발생할 것으로 예상되는 지진의 유효지반가속도가 0.17g 임을 의미한다.

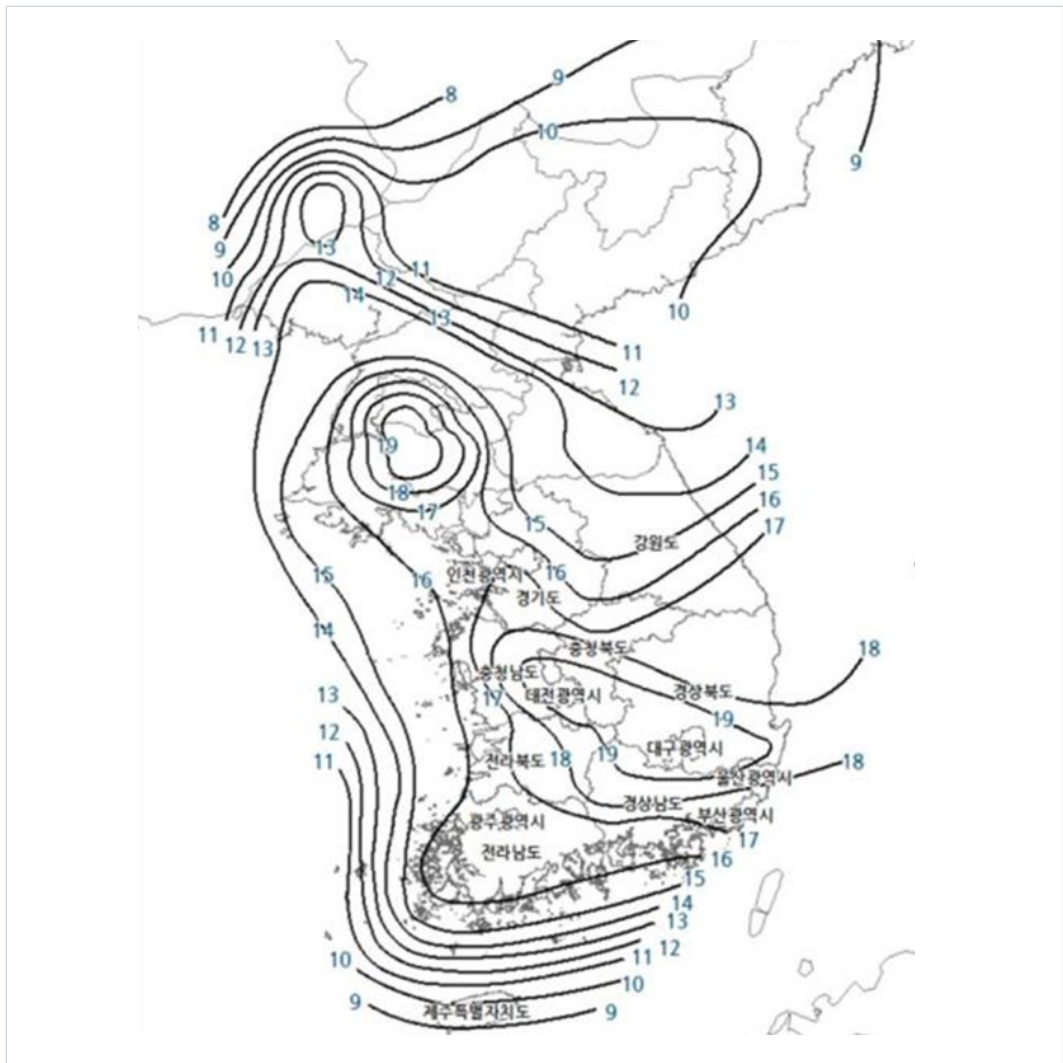


그림 2.4 국가지진위험지도 (소방방재청, 2013) - 재현주기 2400년 [3]

그림 2.5(a)는 KBC 2016의 설계응답스펙트럼을 나타낸다. 식(2.1)과 같이 정해진 구조물의 주기는 설계응답스펙트럼의 X축이 되며, 이에 대응하는 설계응답스펙트럼의 Y축이 설계가속도가 된다. 설계응답스펙트럼은 단주기 스펙트럼가속도 ( $S_{DS}$ )와 1초 주기 스펙트럼가속도 ( $S_{D1}$ )으로 이루어져 있으며, 이는 식(2.5)와 식(2.6)과 같이 구할 수 있다. 식(2.5)와 식(2.6)에서  $S$ 는 2400년에 한번 발생할 것으로 예상되는 지진의 유효지반가속도이고, 현재 건축구조기준에서는  $S$ 의 2/3 수준으로 지진 시 예상되는 수평력(=지진하중<sup>6)</sup>)을 정하고 있다.  $F_a$ 와  $F_v$ 는 단주기 및 1초 주기 지반증폭계수<sup>7)</sup>로서 3장 지반운동의 영향에서 그 의미를 설명할 예정이다.

$$S_{DS} = S \times \frac{2}{3} \times 2.5 \times F_a \tag{식(2.5)}$$

$$S_{D1} = S \times \frac{2}{3} \times F_v \tag{식(2.6)}$$

그림 2.5(b)는 서울지역에서  $S_B$  암반조건에 대한 설계응답스펙트럼을 나타낸다. 암반조건이기 때문에 식(2.5)와 식(2.6)에서  $F_a$ 와  $F_v$ 는 각각 1.0과 1.0이다. 0.08~0.4초까지의 단주기 구간에 대해서는 0.293g로 일정하며, 그 이상의 주기에 대해서는 1초 주기에서 0.117g가 되는 분수함수로 감소된다.

전술한 바와 같이 설계응답스펙트럼은 구조물의 주기에 따라 예상되는 수평력(=지진하중)을 구하기 위하여 유사가속도로 표현된 것으로 해당 가속도에 구조물의 질량을 곱하여 지진하중을 구하여 내진설계를 수행하게 된다.

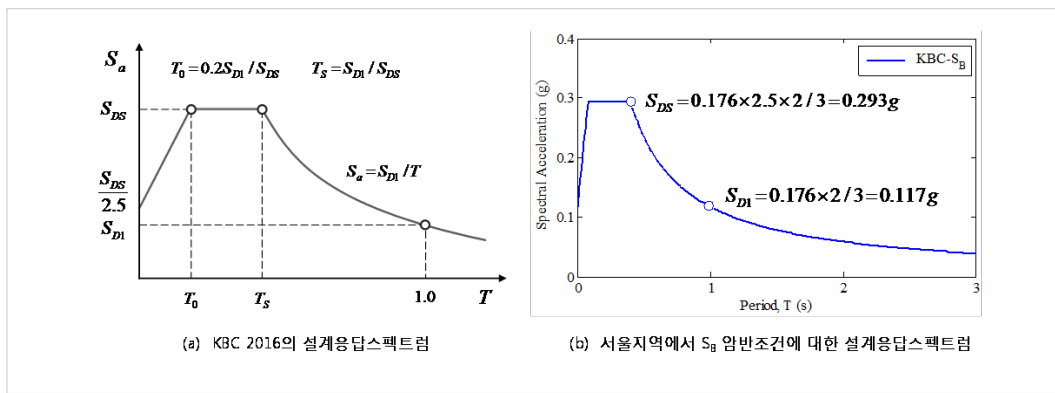


그림 2.5 KBC 2016의 설계응답스펙트럼 [2]과 서울지역의 예

6) 지진하중 : 지진 발생시 관성력에 의해 건물을 미는 힘  
 7) 지반증폭계수: 지반의 특성(단단하거나, 연약함)에 따른 지진의 증폭효과를 나타내는 값



## 03 지반운동의 영향

2장에서 기술한 바와 같이 지진은 순간최대가속도, 주파수특성, 지속시간 등 다양한 지표가 있으며, 내진설계를 위해서는 응답스펙트럼과 유효지반가속도가 필요함을 언급하였다. 또한, 경주지진 시 진앙으로부터 거리가 8km인 USN 관측소에서 계측된 가속도 기록이 진앙으로부터 거리가 5.9km로 USN 관측소보다 짧은 MKL 관측소에서 계측된 가속도 기록보다 큰 현상이 나타났으며, 이는 그림 3.1과 같이 지진 시 지반에 의한 지진동이 증폭된 것으로 KBC 2016에서도  $F_a$ 와  $F_v$  계수를 도입하여 이러한 효과를 내진설계에 반영하고 있다. 3장에서는 이러한 지반운동의 영향이 내진설계에 어떻게 적용되는지 기술하고자 한다.

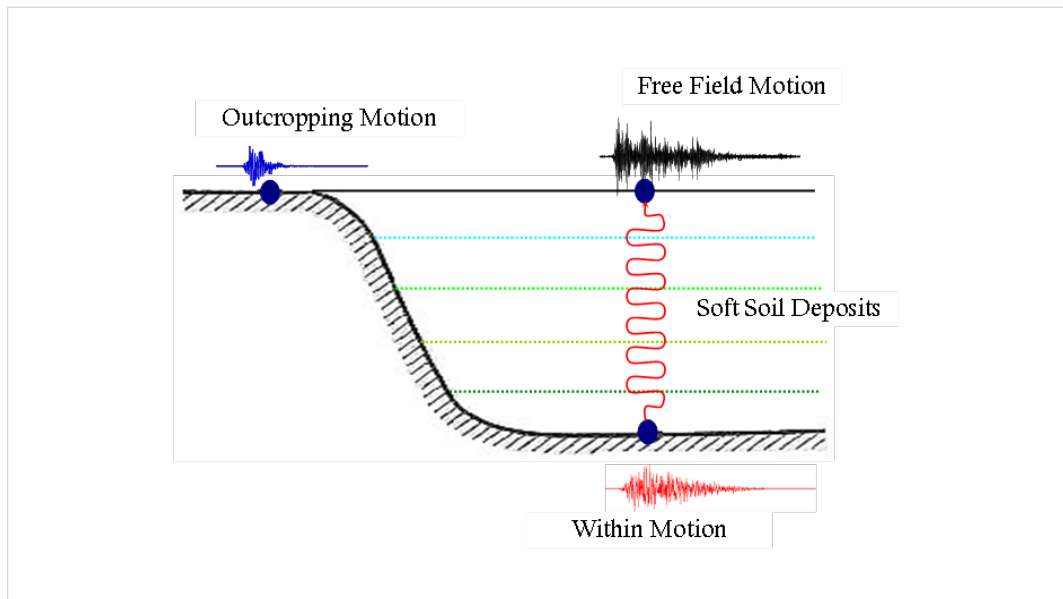


그림 3.1 지진 시 지반에 의한 지진동의 증폭

그림 3.1에서 Outcropping Motion은 지표면에 노출된 암반에서 측정되는 가속도 기록이고, Within Motion은 암반과 토층 사이의 가속도이다. Within Motion이 토사지반(Soft Soil Deposits)에 의해 증폭된 지표면 가속도를 Free Field Motion 이라고 한다.

### 3.1 멕시코시티 지진과 내진설계의 변화

1985년 9월 19일에 멕시코 해안 근처에서 규모 8.0의 지진이 발생하였다. 진앙과 가까운 Campos 관측소에서 측정된 지진의 최대순간가속도는  $150\text{cm/s}^2 (=0.153g)$  정도였다. 하지만, 진앙으로부터 약 400km 떨어진 멕시코시티에서는 그림 3.2와 같이 412동의 건물이 완전히 붕괴되고, 3,124동이 심각한 손상을 받음에 따라 최소 5000명이 사망하였다.

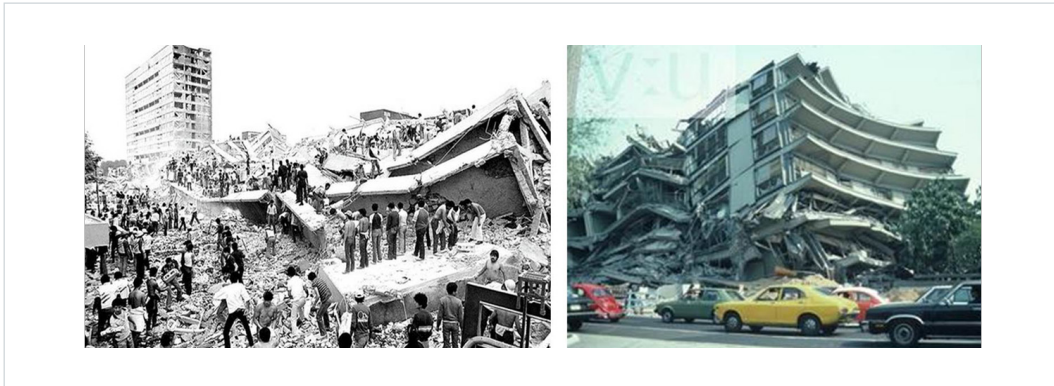


그림 3.2 1985년 멕시코시티 지진에 의한 건물의 붕괴 [4], [5]

경주지진의 MKL 관측소의 지진기록과 DKJ 관측소의 지진기록과 같이 진앙으로부터 거리가 멀어지면 지진동이 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 1985년 멕시코시티 지진도 그림 3.3과 같이 진앙(epicenter)으로부터 거리가 멀어짐에 따라 Teacalco, UNAM 관측소에서 측정된 지진기록은 진앙과 가까운 Campos 관측소에서 측정된 지진기록의 12~23% 정도로 지진동이 감소되었다.

하지만, 멕시코시티는 호수를 매립하여 만든 도시여서 매립된 토사지반에 의하여 지진동이 증폭되었다. 증폭된 지진동은 원지진이 단층에서 발생될 때 형성되는 주파수 성분에 매립된 토사지반의 동적 특성이 부가되어 장주기 성분이 강한 지진이 되었고, 순간최대가속도는  $170\text{cm/s}^2 (=0.173g)$ 에 도달하였다. 장주기 성분이 강한 0.173g의 지진은 멕시코의 수도인 멕시코시티의 고층건물들을 붕괴시키고, 많은 인명피해를 유발하였다.

1985년 멕시코시티 지진 이전까지는 지반에 의한 지진동의 증폭효과가 내진설계에서 간과되어왔다. 하지만, 그 이후 세계 각국에서는 이를 고려한 내진설계의 중요성을 인식하여 2.4절 설계응답스펙트럼에서 전술한  $F_d$ 와  $F_v$  등의 지반계수를 도입하여 지진하중을 증가시키고 있다.

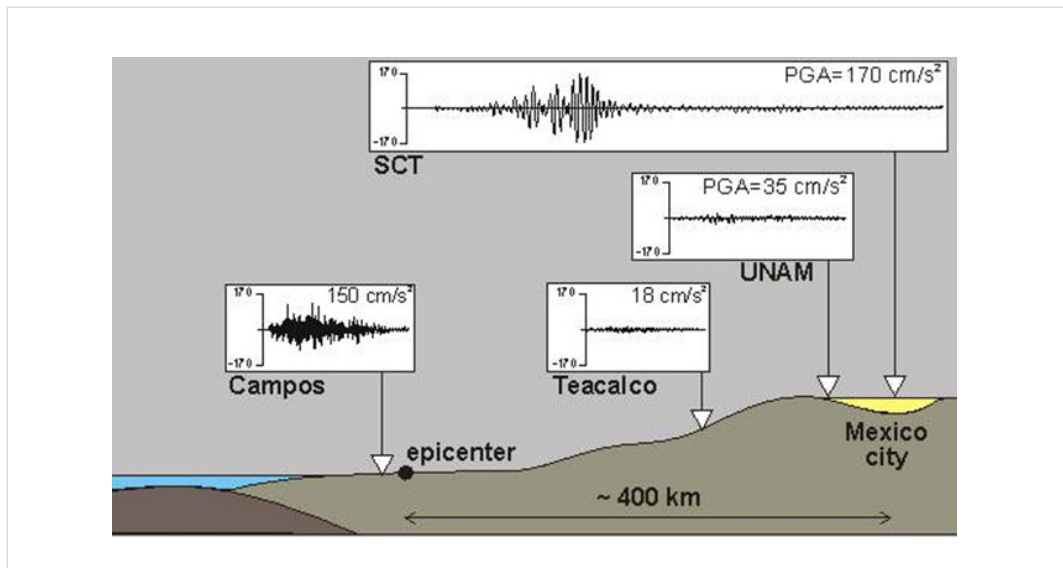


그림 3.3 1985년 멕시코시티 지형특성에 의한 지진동의 변화 [6]

그림 3.4은 지반효과를 고려한 세계각국의 설계응답스펙트럼을 나타내고 있다. (a) 미국, (b) 유럽, (c) 캐나다, (d) 일본, (e) 중국, (f) 멕시코 등의 설계응답스펙트럼을 나타내고 있으며, 각 기준은 지표면으로부터 상부 30m의 평균전단파속도 혹은 지반의 진동주기에 따라 지반을 분류하고, 지반계수를 도입하고 있다. 지반의 전단파속도는 파동이 전달되는 속도를 의미하며, 이는 지반의 단단함과 유사한 의미로 전단파속도가 클수록 단단한 지반을 의미한다. 따라서, 각국의 기준은 그림 3.3과 같이 지반이 연약하거나 암반까지의 심도가 깊은 경우에 지진하중을 점차 키우는 경향을 보인다.

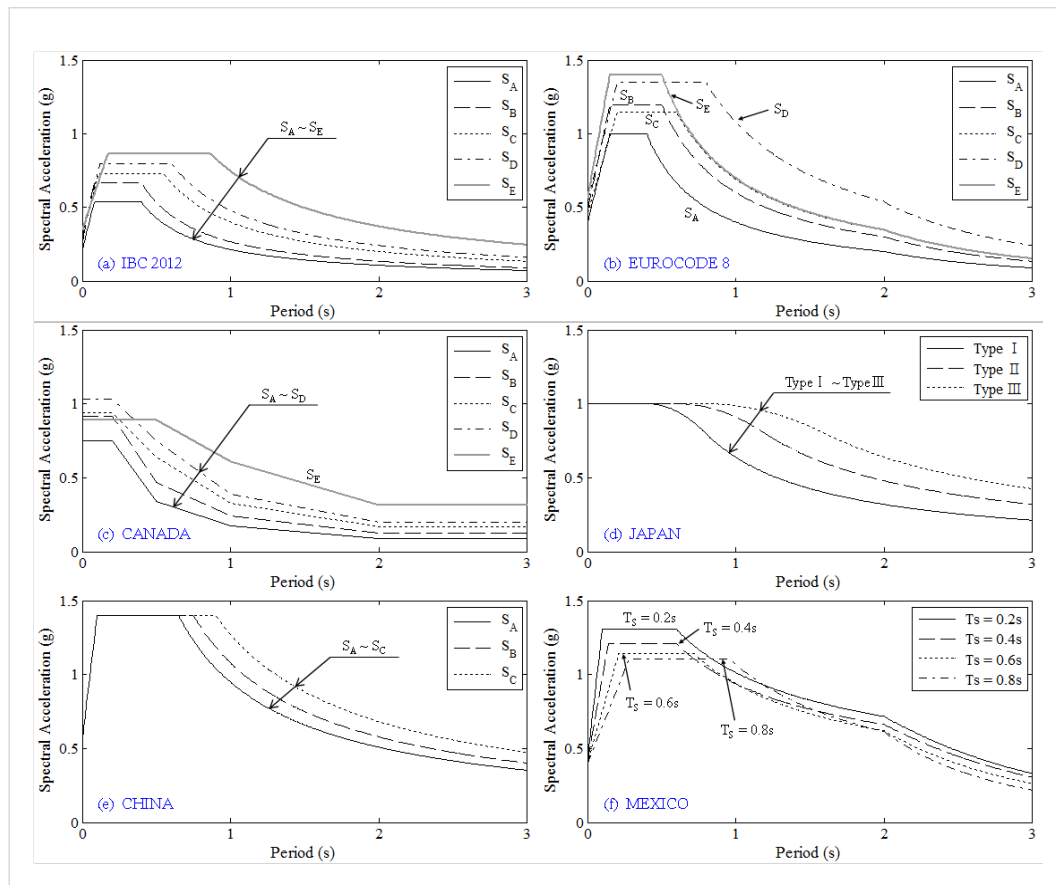


그림 3.4 지반효과를 고려한 세계 각국의 설계응답스펙트럼

### 3.2 국내 지반조건의 특성

그림 3.4와 같이 세계 각국의 설계응답스펙트럼에서는 지반의 효과를 고려하고 있으며, 국내 건축구조기준 KBC 2016에서도 국내 지반특성에 맞도록 설계응답스펙트럼을 정하고 있다. 이러한 경향을 경주지진으로부터 분석하면, USN 관측소에서 측정된 가속도 기록을 바탕으로 USN 관측소 하부의 지반특성을 추정할 수 있다. USN 관측소 하부 토층을 가정하고, 암반 위에 놓인 MKL 관측소에서 기록된 가속도 기록을 USN 관측소 토층 하부 암반에 입력지진동으로 하여 지반응답해석(Site Response Analysis)을 수행하여, USN 관측소에서 기록된 지진동과 비교분석하여 가정된 토층의 적절성을 평가할 수 있다.

그림 2.2(b-2)의 응답스펙트럼과 같이 지진동을 크게 증폭시킨 지반의 진동주기는 약 0.12초였고, 이에 대응하는 USN 관측소는 그림 3.4와 같이 추정될 수 있다. 암반까지의 깊이가 8m, 14m, 그리고 최대 24m로 가정될 수 있으며, 이러한 지반조건에서는 0.5초 이내의 단주기 구조물에 영향을 미치는 지진의 성분을 증폭시키고, 1초 이상의 장주기 구조물에 영향을 미치는 지진의 성분에는 영향이 없다. 이러한 경향으로 그림 2.2(b-2)도 주기가 1초 이상의 구조물에 대한 응답스펙트럼이 크지 않은 것을 알 수 있다.

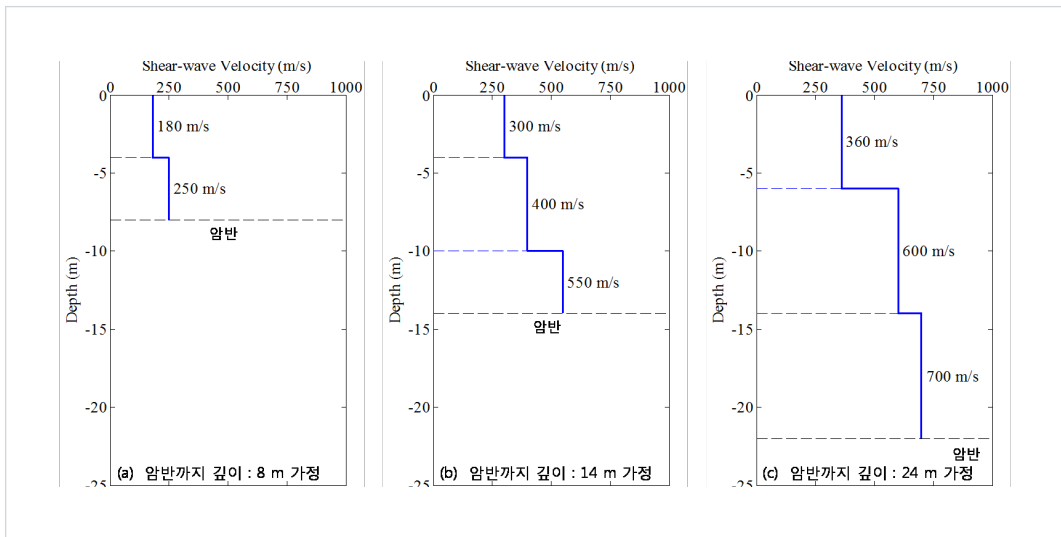


그림 3.5 경주지진 시 USN 관측소 지반특성 추정

그림 3.5의 예와 같이 국내 지반조건 특성은 암반까지의 깊이가 약 30m 이내로 얇은 토사지반조건인 특징이 있다. 다만, 지금까지 국내 건축구조기준은 미국의 구조설계기준인 International Building Code (IBC)를 차용해왔다. IBC는 그림 3.6(a)와 같이 암반까지의 깊이가 100m 이상으로 토사지반이 매우 깊은 특성이 있는 미국 서부해안에서 관측된 지진자료를 바탕으로 개발되었다. 따라서 전체 토층을 파악하기 어렵기 때문에 지표면으로부터 상부 30m의 지반조건만 고려하여 지반을 분류하고, 지반이 연약할수록 설계 응답스펙트럼의 가속도를 증가시킨다.

그러나 국내 지반조건은 그림 3.5(c)의 서울시 지반조건을 분석한 자료와 같이 서울시 전체지역의 95%가 깊이 20m 이내의 얇은 토사지반이고, 주기가 0.25초 이내의 단주기 지반조건이다. 암반까지의 깊이가 얇고, 단주기 지반조건인 경우, USN 관측소에서 측정한 지진기록과 같이 단주기 구조물의 지진하중을 크게 증가시키고, 장주기 구조물의 지진하중에는 영향이 크지 않다. 이는 국내 지반조건에서는 저층 구조물에 대한 지진하중을 미국보다 크게 고려해야 하며, 이에 대한 정확한 내진설계가 필요함을 의미한다.

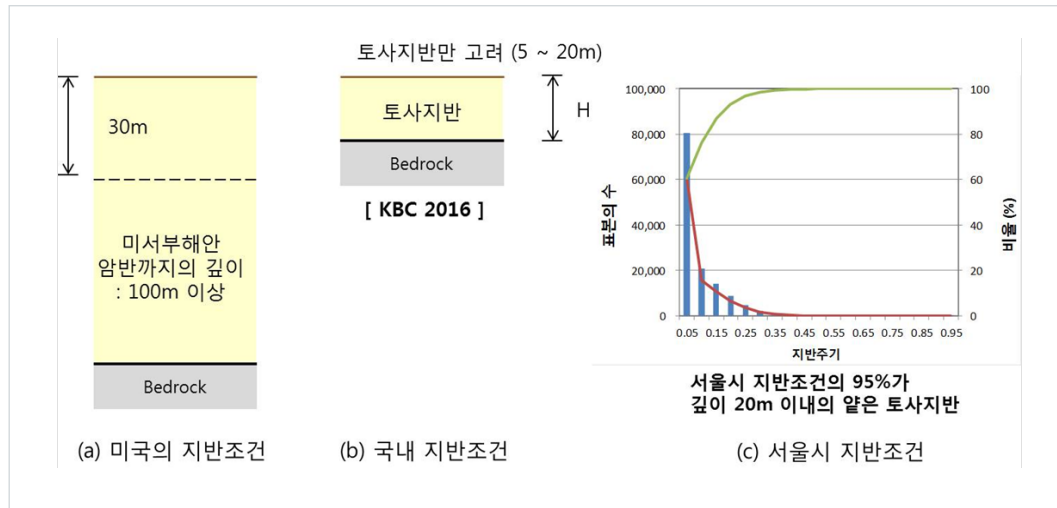


그림 3.6 국내 지반조건 특성

### 3.3 건축구조기준 KBC 2016

2016년에 개정된 건축구조기준 KBC 2016에서는 이러한 국내의 얇은 지반조건 특성을 반영하여 개정되었다 [2]. IBC와 같이 상부 30m의 지반으로 지반을 분류하면, 국내의 경우 암반의 물성이 지반분류에 포함되는 모순이 발생한다. 따라서 건축구조기준 KBC 2016에서는 그림 3.6(b)와 같이 암반(bedrock)까지의 심도가 30m 이내인 경우, 토사지반(5~20m)만 고려하여 지반을 분류하도록 하고 있다.

또한 단주기 및 1초 주기 지반계수 ( $F_d$ 와  $F_v$ ) 결정시, 암반까지의 깊이를 고려하여 다른 지반계수가 적용되도록 정하고 있다. 즉, 암반까지의 깊이가 얇은 지반특성에서는 단주기 구조물에 대한 지진하중을 증가시키고, 장주기 구조물에 대한 지진하중을 감소시키는 경향이다. 이러한 경향이 반영된 건축구조기준 KBC 2016의 설계응답스펙트럼은 그림 3.7과 같다.

그림 3.7(a)와 (b)는 매우 조밀한 토사지반인  $S_c$  지반조건에 대한 각 기준의 설계응답스펙트럼의 예를 나타내며, 이때 유효지반가속도는 0.2g이다. 토사지반의 깊이가 20m 이상인 경우(그림 3.7(a)), KBC기준은 IBC기준과 동일하며, EUROCODE의 Type-1과 유사하다. 토사지반의 깊이가 20m 미만인 경우(그림 3.7(b)), KBC 기준의 단주기 구조물의 가속도는 단주기 구조물의 증폭을 고려한 EUROCODE의 Type-2의 단주기 구조물에 대한 가속도보다 큼에 따라 단주기 지반의 영향을 잘 고려하고 있다.

그림 3.7(c)와 (d)는 단단한 토사지반인  $S_D$  지반조건에 대한 각 기준의 설계응답스펙트럼의 예를 나타낸다. 토사지반의 깊이가 20m 이상인 경우(그림 3.7(c)), KBC 기준은 IBC기준과 동일하며, EUROCODE의 Type-1 보다 단주기 및 장주기 구조물의 가속도가 크다. 또한 단주기 구조물의 가속도를 증가시키는 EUROCODE의 Type-2와 KBC 기준의 단주기 구조물의 가속도는 유사하다. 토사지반의 깊이가 20m 미만인 경우(그림 3.7(d)), KBC 기준은 EUROCODE의  $S_E$  지반조건에 대응된다. KBC 기준의 단주기 구조물의 가속도는 IBC 기준의 단주기 구조물에 대한 가속도보다 크며, EUROCODE의  $S_E$  지반조건에 대한 Type-1과 Type-2 단주기 구조물의 가속도의 중간이다. KBC 기준의 장주기 구조물에 대한 가속도는 EUROCODE Type-1의 장주기 구조물에 대한 가속도와 유사하다.

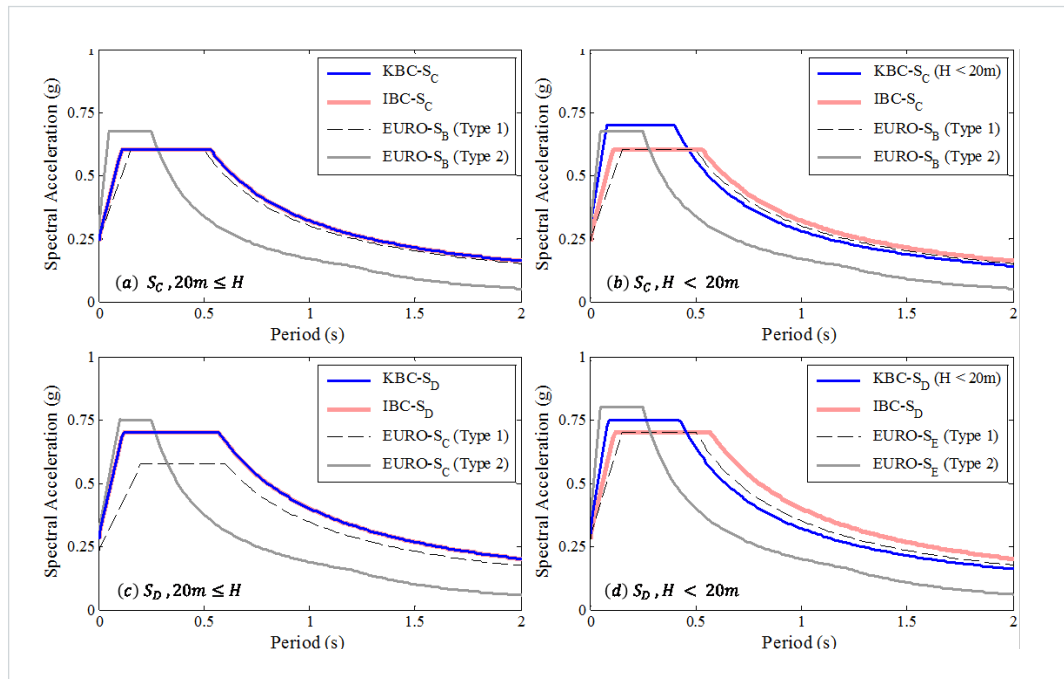


그림 3.7 건축구조기준 KBC 2016의 설계응답스펙트럼

이와 같이 3장에서는 지반에 의한 지진동의 증폭효과에 대하여 기술하였으며, 세계 각국의 설계응답스펙트럼에 적용된 현황과 국내 지반조건을 고려하여 개정된 건축구조기준 KBC 2016에 대하여 소개하였다. 특히 그림 3.7(b)와 3.7(d)와 같이 보통암(Moderate Rock)까지 깊이가 20m 이내인 경우, 파란색의 그래프와 같이 IBC기준과 달리 단주기 지진하중을 증가시키고, 분수함수로 감소되는 부분을 저감시킨 특징이 있다.

# 04 건축물의 내진설계

2장에서는 경주지진을 바탕으로 지진에 대한 이해와 응답스펙트럼 그리고 해당 지역에 예상되는 지진의 수준을 유효지반가속도로 표현하는 것을 소개하였고, 3장에서는 건물이 위치한 곳의 지반에 의한 지진동의 증폭을 고려하여 설계응답스펙트럼을 정하는 것에 대하여 소개하였다. 이는 건축물과 관계없이 건축물에 지진하중을 유발하는 요소에 대한 설명이다. 건축물은 이러한 지진의 크기를 입력으로 받아들여 붕괴되지 않도록 설계되어야 하며, 이것을 내진설계(면진, 제진 포함)라고 한다. 4장에서는 건축물이 지진에 대해 저항하는 방법들에 대하여 소개하고자 한다.

## 4.1 내진, 면진, 제진설계

건축물이 지진에 대해 저항하는 방법은 그림 4.1과 같이 내진, 면진, 제진구조로 세 종류가 있다. 내진구조는 지진에 의해 유발되는 지진하중을 건물의 구조체가 견디도록 설계하는 것으로 건물을 강하게 설계함과 동시에 큰 변형에도 버틸 수 있도록 접합부들이 견고하게 설계 및 시공되어야 한다. 면진, 제진구조와 같이 특별한 장치가 필요하지는 않지만, 4.2절에 소개될 건물의 비탄성 거동이 정확하게 예측되어 설계되어야 한다.

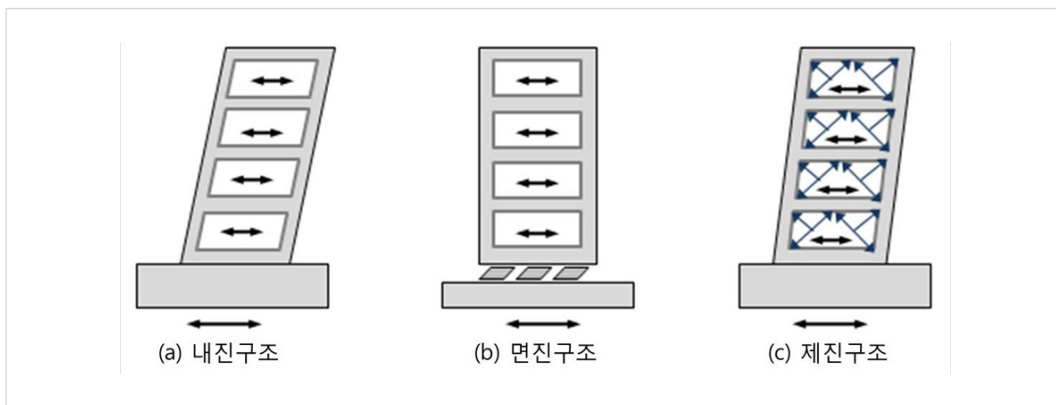


그림 4.1 건축물의 지진력 저항 방법 [7]



면진구조는 그림 4.1(b)와 같이 건물과 지반 사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 분리시키는 방법으로 Base Isolation이라고도 한다. 면진구조는 식 (2.2)의 운동방정식에서 건물 구조체에 입력되는 지진동인  $\ddot{u}_g$ 를 감소시켜서 해당 건물의 지진력을 줄여서 건물 구조체로서는 적은 물량으로 지진에 대해 견딜 수 있도록 하는 방법이다.

면진장치는 그림 4.2와 같이 구조물과 지반 사이에 기초에 위치하게 된다. 그림 4.2(a)는 건물 하부 기초 판을 구면으로 만들고 베어링으로 연결된 상부구조물이 진자운동을 하여 지진력이 적게 유발되는 구면 면진장치이다. 그림 4.2(b)는 면진장치로 가장 많이 사용되는 고무 면진장치로써 탄성상태에서 전단변형이 큰 고무의 특성을 활용한 장치이다. 그림 4.2(c)는 스프링을 활용한 면진장치로 지진 시 스프링의 강도가 초과되어 스프링이 파단되지 않고, 탄성상태에서 전단변형이 될 수 있도록 정밀한 설계가 요구된다.



그림 4.2 면진장치의 종류 [8], [9], [10]

제진구조는 그림 4.1(c)와 같이 건물에 감쇠장치를 부가하여 지진 시 유발되는 지진력을 해당 장치가 흡수하도록 하는 시스템이다. 이는 식(2.2)의 운동방정식에서 감쇠항  $c$ 를 증가시켜서 나머지 구조물에 지진력이 덜 발생하도록 하는 경우이다. 하지만, 감쇠장치의 경우 특정변위나 속도 이상에서 작동을 하기 때문에 감쇠장치의 성능이 발휘되기 위한 건물의 정확한 거동의 예측과 이에 따른 감쇠장치의 설계가 요구된다.

제진장치의 대표적인 예는 그림 4.3(a)와 같이 현재 학교건축물의 내진보강으로 많이 사용되고 있는 가새점탄성 감쇠기가 있다. 이는 학교 외벽에서 부가적으로 설치하므로 작업이 용이한 장점이 있지만, 점탄성 감쇠기를 부가함에 따라 지진 시 기존 구조체에 부가적인 하중을 유발하여 손상을 야기할 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 동시에 이루어져야 한다. 또한 다른 감쇠기로는 건물의 질량과 감쇠기의 질량을 조절하여 진동을 저감하는 동조질량감쇠기가 있다. 그림 4.3(c)는 대만에 있는 101층짜리 Taipei 101 건물에 적

용된 진자형 동조질량 감쇠기의 개념도이다. 약 660톤의 쇠구슬을 건물 상부에 매달아 지진이나 바람이 작용할 때 건물과 반대로 거동하여 진동을 감소시키는 장치이다. 국내에도 이와 유사한 장치로 그림 4.3(b)와 같이 강변 테크노마트에 수직 및 수평 동조질량감쇠기를 설치하여 바람, 지진 및 사람에 의한 진동을 저감하고 있다.

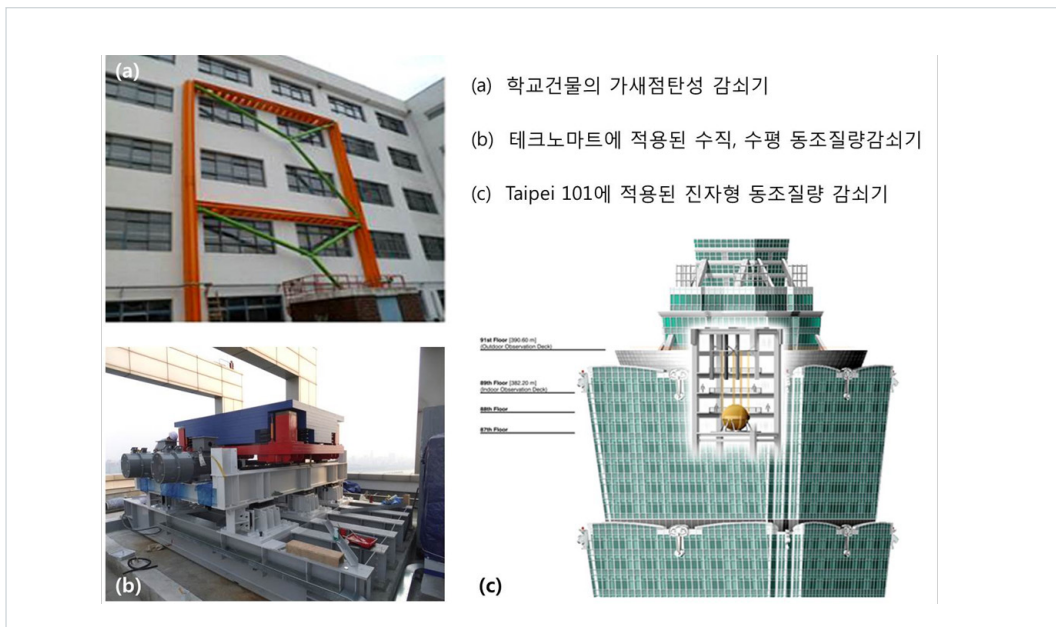


그림 4.3 제진장치의 종류 [11], [12], [13]

## 4.2 내진설계 시, 건물의 비탄성 거동

진술한 바와 같이, 지진 시 건물의 관성력에 의하여 각 부재에 지진력이 유발된다. 현재 국내 건축구조기준 KBC 2016에서는 재현주기 2400년의 2/3 수준의 지진에 대하여 내진설계를 수행하고 있다. 이는 발생 빈도가 2400년에 한번으로 낮고, 지진의 크기는 매우 큰 지진의 2/3 수준에 대해 설계하는 것으로 이에 대하여 탄성상태에서 설계하는 것은 경제적으로 불합리하며, 시공하기 어렵다. 탄성상태는 재현주기 2400년의 2/3 수준의 지진에 대하여 구조물에 아무런 손상이 없이 즉시 복원가능 한 상태인데, 이를 위해서는 건

물의 구조체가 매우 비대해져서 해당건물의 사용성을 확보하기 어렵다. 따라서 건물의 내진설계 시, 그림 4.4와 같이 건물의 손상에 따른 구조물의 비탄성거동을 고려하여 건물을 설계한다.

그림 4.4에서 X축은 구조물의 변형이고, Y축은 그에 대응하는 하중이다. 앞서 언급한 바와 같이 탄성상태는 구조물의 변형과 그에 대응하는 하중이 비례적으로 증가하지만, 실제로 건물의 거동은 콘크리트와 강재 재료의 항복 및 응력의 재분배에 의하여 일정변위( $\Delta_y$ ) 이상이 되면, 더 이상 힘을 받지 못하고 변형만 증가하게 되고 최대변형( $\Delta_{max}$ ) 이후로 구조물이 붕괴된다. 여기서 구조물의 변형이 유지되는 비율( $\Delta_{max} / \Delta_y$ )을 연성능력이라고 한다.

그림 2.5의 건축구조기준 KBC 2016의 설계응답스펙트럼은 구조물의 탄성상태를 가정하여 도출된 것으로 그림 4.4에서는 ① 탄성강도에 대응된다. 다만, 탄성강도에 맞추어 설계를 하다 보면, 부재가 매우 커지기 때문에 건물의 손상과 변형에 대한 연성능력을 고려하여 구조물의 ② 실제강도로 낮출 수 있다. 또한 건물은 구조재료의 초과강도와 건물구조시스템에 의한 초과강도를 보유하고 있기 때문에 실제강도보다 낮추어 ③ 설계강도를 정할 수 있다.

이와 같이 건축물의 내진설계는 건물의 손상과 비탄성 거동을 고려하여 2400년에 한번 발생하는 지진의 2/3 수준에 대하여 구조물이 인명을 보호할 수 있도록 설계하고 있다. 다만, 국가기간시설물, 병원, 특수생산시설 등 지진 시에도 기능수행이 요구되는 건물에 대해서는 건물의 손상이 없어야 한다. 이를 위해서는 건물의 내진성능이 정확히 예측 및 평가되어 설계되어야 하므로 4.3절에서 이에 대한 성능기반 내진설계를 소개하고자 한다.

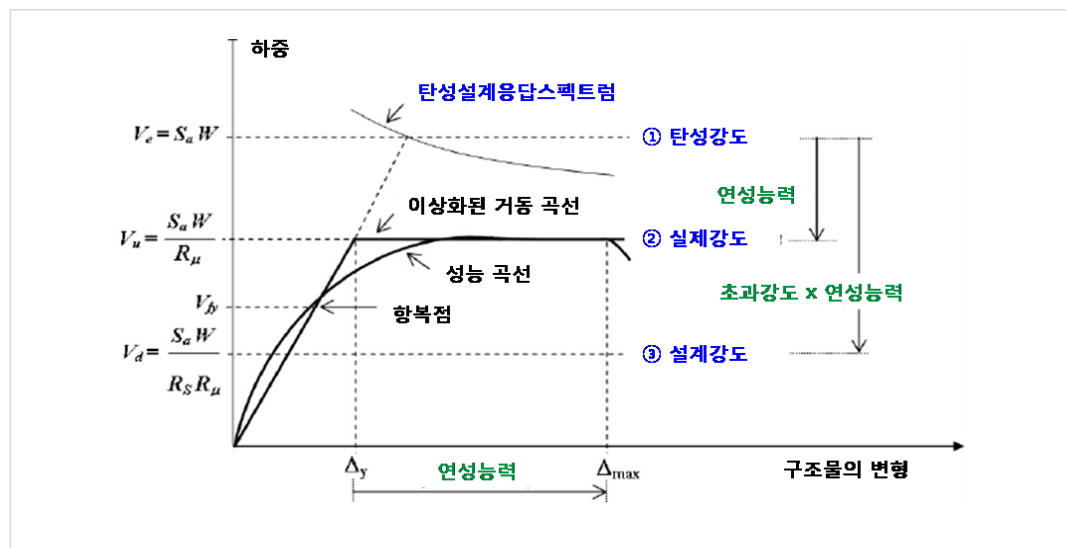


그림 4.4 구조물의 비탄성 거동과 설계하중

### 4.3 성능기반 내진설계

국가지진위험지도에서 정하는 지진수준을 바탕으로 건축구조기준 KBC 2016에 따라 내진설계를 수행하는 것은 과정지향적(Process-Oriented) 설계방법이다. 이러한 방법은 기준에 따라 내진설계를 수행하지만, 해당 건물이 지진에 어떠한 손상을 받는지에 대해서 예측하기는 어렵다. 따라서, 지진 시 건축물의 용도별 성능수준을 정하고 그에 맞는 설계방법이 필요하다. 즉, 그림 4.5와 같이 지진발생 후 예상되는 건물의 상태를 가정하고, 그에 맞는 성능수준이 발현될 수 있도록 내진설계를 수행하는 결과지향적(Product-Oriented) 설계방법을 성능기반 내진설계법이라고 한다.

그림 4.5에 도시된 지진발생 후 건물의 성능수준은 총 4단계가 있다.

- (a) 기능수행수준은 지진이 발생하더라도 지진발생 이전의 강성과 강도가 유지되어 건물에 거의 손상이 없다.
- (b) 즉시입주수준은 지진발생 후, 구조체에 대한 손상은 거의 없으나 경미한 수선이 필요한 정도로 그림에서는 형광등의 불이 꺼져서 이에 대한 교체가 필요한 정도이다.
- (c) 인명안전수준은 구조체와 비구조체 모두 상당한 손상이 발생하였으나 인명을 보장하고, 여진에 대한 저항능력을 제공할 수 있는 상태이다. 따라서, 해당건물은 향후 보수 및 보강을 통하여 거주가 가능하다. 즉시입주수준인 그림 4.5(b)와 인명안전수준인 그림 4.5(c)의 차이는 구조체의 손상여부이다.
- (d) 붕괴방지수준은 지진발생 이전의 횡력에 대한 강성과 강도가 거의 손실된 상태이고, 기둥이나 벽체는 중력하중에 대해서 떠받치고 있는 수준의 붕괴직전 상태이다. 또한 이러한 상태는 여진에 의해 붕괴될 가능성이 높다. 그림 4.5(d)에서는 건물 구조체에 과대한 변형이 발생하여 구조체의 손상뿐 만 아니라 현관 캐노피와 외벽의 마감이 떨어지고, 유리창이 깨진 상태를 나타낸다.

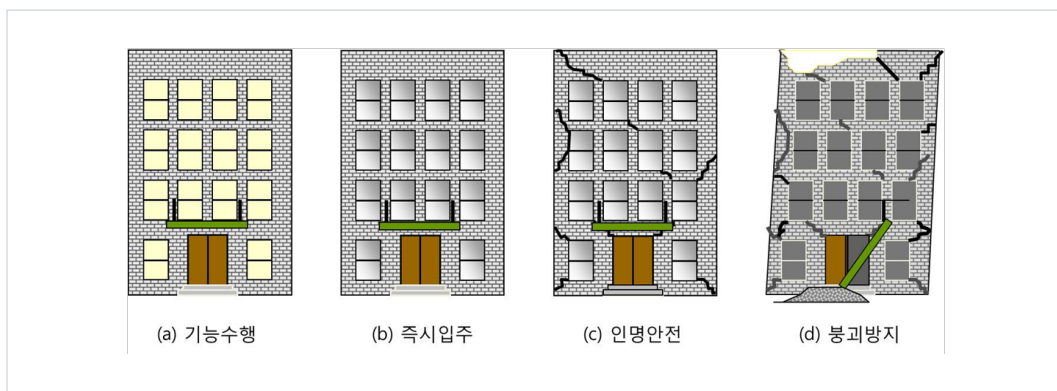


그림 4.5 건축물의 단계별 성능수준 [14]

표 4.1은 건축구조기준 KBC 2016에서 정하는 성능기반 내진설계를 위한 내진등급별 성능수준을 나타낸다 [2]. 건물에 대한 구조설계 시, 건물의 용도 및 규모에 따라 중요도와 내진등급을 정하고 있다. 내진등급 특등급의 건축물은 유출시 인명 피해가 우려되는 독극물 등을 저장·처리하는 건축물과 응급비상 필수시설물로 지정된 건축물, 통신국 등이 있으며 지진 시 긴급대피수용시설로 지정된 건축물도 특등급이다. 이에 대하여 일반적으로 설계하는 재현주기 2400년 지진의 2/3 수준에 대해서는 그림 4.5의 (a) 혹은 (b)와 같이 기능이 수행되거나 즉시 거주가능한 성능이 구현되도록 설계되어야 한다. 또한 이러한 특등급의 건축물들은 재현주기 2400년 지진에 대해서는 인명안전수준이 확보되어야 한다.

내진등급 I의 건축물은 특등급보다 작은 규모의 위험물을 저장·처리하는 건축물, 응급비상 필수시설물, 붕괴 시 인명에 상당한 위해를 주거나 국민의 일상생활에 상당한 경제적 충격이나 대규모 혼란이 우려되는 건축물로, 재현주기 2400년 지진의 80% 수준에 대하여 인명안전수준, 재현주기 2400년 지진에 대한 붕괴방지수준이 되어야 한다.

내진등급 II의 건축물은 붕괴 시 인명피해 위험도가 낮은 건축물로 재현주기 2400년 지진의 2/3 수준에 대하여 인명안전수준, 재현주기 2400년 지진에 대한 붕괴방지수준이 되어야 한다.

표 4.1 건축구조기준 KBC 2016의 내진등급별 성능수준 [2]

내진등급	성능목표	
	성능수준	지진위험도
특	기능수행(또는 즉시거주)	재현주기 2400년 지진의 2/3
	인명안전 및 붕괴방지	재현주기 2400년 지진
I	인명안전	재현주기 2400년 지진의 80%
	붕괴방지	재현주기 2400년 지진
II	인명안전	재현주기 2400년 지진의 2/3
	붕괴방지	재현주기 2400년 지진

## 05 향후 연구 전망

지진에 대하여 건축물이 안전하게 저항함과 동시에 사용자의 편의를 위하여 건축적으로 넓은 공간을 확보하고, 경제적인 건물을 구조설계하는 연구와 업무는 종합적인 지식과 경험이 요구된다. 연구자는 단순히 정지상태에서의 건물 안전성과 더불어 본 원고에서 소개한 지진에 대한 이해, 지반의 영향, 건축재료에 대한 이해와 구조동역학을 바탕으로 내진설계를 수행하게 된다.

우리나라는 지금까지 법적으로 내진설계 대상 건물이 제한적이어서 내진설계가 간과되어 왔기 때문에, 2016년 11월 기준 서울시 건축물의 내진설계 현황은 주거용 건축물의 29.9%, 비주거용 건축물의 23.7%만 내진설계가 되어 있다 [15].

2016년 9월 12일 경주지진 이후로, 국내에서 신축 건축물의 내진설계와 기존 건축물의 내진성능평가에 대한 수요가 급증하고 있다. 하지만, 연간 약 12만건의 건축물 허가대상에 대하여 국내 건축구조기술사는 941명에 불과하여 이에 대한 전문가는 부족한 실정이다 [16]. 따라서 내진설계에 대한 지식을 갖춘 전문가가 수행할 업무는 더욱 증가할 것으로 전망된다.

또한 본 원고에서 소개한 국내 지반특성에 맞는 지진동의 증폭효과, 건축물에 대한 면진과 제진장치, 그리고 성능기반 내진설계 등의 분야는 아직 국내에서 많은 연구가 이루어지지 않은 분야로서 학문적으로 흥미를 가질만한 분야로 판단된다.

## Kim Dong-Kwan

저자

김동관

학력

서울대학교 건축학과 박사  
서울대학교 건축학과 석사  
서울대학교 건축학과 학사

경력

現) 센구조연구소 연구팀장  
前) 단국대학교 연구전담 조교수  
前) 서울대학교 건축학과 BK21+ 연구단 연구원

## 참고문헌

---

1. 김익현, 박광순, 9.12 지진 피해현장조사결과, 한국지진공학회, 가을학술대회, 경주지진 특별세션, 2016.
2. 대한건축학회, 건축구조기준 KBC 2016, 기문당, 2016.
3. 소방방재청, 국가지진위험지도, 2013.
4. [www.theguardian.com](http://www.theguardian.com)
5. <http://inside.sfuhs.org/>
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic\\_site\\_effects](https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_site_effects)
7. <http://www.gigumi.com/>
8. <http://21stcenturybuilder.org/>
9. <http://www.techstar-inc.com/>
10. [Civildigital.com](http://Civildigital.com)
11. 대한전문건설신문
12. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
13. <http://www.tesolution.com/>
14. 이철호, Damage Potentials of the 912m 5.8gyeong-Ju Earthquake and Earthquake Engineering Implications, 한국지진공학회, 가을학술대회, 경주지진 특별세션, 2016.
15. <http://goodhousing.eseoul.go.kr/>
16. <http://www.engdaily.com/news/articleView.html?idxno=6275>



융합연구정책센터  
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 (TEL) 02-958-4984