



## 21세기 지진과학과 한국 지진의 연구방향

김 소 구 | 한국지진연구소 소장

### 생동하는 지구와 지진현상

1912년 독일의 Alfred Wegener는 과거 지구의 대륙은 한덩어리, Pangaea라는 큰 땅덩어리로 있다가 갈라져 오늘날 여러 개의 대륙으로 분리된 소위 대륙 이동설(continental drift)을 내세웠다. 그러나 당시에는 이론으로 인정받지 못하였다. 오늘날 이 대륙 이동설을 뒷받침하는 이론으로는 판구조론(plate tectonics)과 해저 확장설(sea-floor spreading)을 들 수 있다. 약 2억년 전에 Pangaea로 있던 대륙은 약 1억 8천만년 전에 Laurasia와 Gondwana라는 2개의 대륙으로 갈라지고 약 7천만년 전부터 현재의 대륙 위치로 자리잡기 시작했다. 근래 지구물리이론으로는 지구 구조는 수십에서 수백 킬로미터 두께로 된 여러 개의 판(plate)이 모자이크로 구성되어 서로 부딪치고 벌어지는 운동을 계속한다. 이러한 운동을 판구조론이라고 부르며, 지진은 이러한 판이 서로 만나고 갈라지는 경계에서 주로 일어난다. 그리고 이러한 판이 부딪치는 지역으로는 태평양 판과 유라시아판이 서로 부딪치는 일본 열도 부근, 인도 판과 유라시아판이 만나는 히말라야 지역, 그리고 판이 서로 갈라지는 지역으로는 중앙 대서양 해령으로 특히, 이와 같은 운동을 1962년 미국의 Hess는 해저 확장설

(sea-floor spreading)이라고 불렀으며, 이것은 지진 활동과 더불어 판구조 이론을 증명해 주는 것이다.

약 49억 년 전 지구가 생성되고 위에서 말한 바와 같이 판구조론에 의한 지체구조력이 시작된 이후부터 지구 상에는 늘 지진이 발생하고 있다. 옛날에는 지진을 천재 지변으로 인간에게는 도저히 불가항력적인 재앙으로만 생각하였다. 그래서 고대인들은 이와 같은 지진 자체를 연구하고 도전하기 보다는 오히려 신의 처벌(punishment)로서 겸허하게 받아 들였다. 실제로 역사 문헌을 보면 큰 지진이 일어난 이후에 국왕이 사망하거나 큰 이변이 일어난 사건도 많이 있었다. 이 때문에 과거에는 종교단체, 특히 카톨릭 사제들이 지진에 대한 깊은 관심을 두고 연구해 왔다. 지진 연구는 전 세계에 종교단체를 두고 있는 카톨릭 수도원이 중심이 되어 시작되었다. 그 중에서도 예수회(Society of Jesus)에서는 예수회 지진 협회(Jesuit Seismological Association)가 18세기 말에서 19세기 초에 결속되어 주로 신부들에 의해서 범세계적으로 지진 관측과 분석이 이루어졌다. 이 중에서 유명한 신부들은 St. Louis 대학의 고 매슬웨인(Mac-elwane) 신부와 스타우더(Stauder) 신부, 그리고 스페인 마드리드 대학 우디아스(Udias) 신부 등은 지진 학계의 거장들이다. 물론 이밖에 독일의 구텐베르크

(Gutenberg), 미국 버클리 대학의 바일리(Byerly)와 칼텍의 리히터(Richter), 영국 캠브리지 대학의 제프리스(Jeffreys) 교수 등은 유명한 지진 학자들이다.

이와 같이 끊임없이 발생하고 있는 지진은 지구와 비슷한 행성(Planet)과 위성, 예컨대 화성과 달에서도 일어나고 있다. 다시 말해서 이 우주의 행성들도 살아 움직이는 행성이지만 언젠가 수명이 다하여 사라지게 되면 더 이상의 지진이나 화산 폭발과 같은 재앙은 발생하지 못할 것이다.

따라서 지진은 우리 인간 생활과 더불어 계속해 일어날 것이며 우리 인간은 이 대자연의 힘을 피할 수 없을 것이다. 21세기 과학과 기술은 아직 풀리지 않은 지진 예보에 관하여 도전하게 될 것이다.

## 동북아시아와 한반도에서 발생한 20세기 큰 지진들

20세기에 들어와서 동북아시아 지역에서는 지진 위험이 급증하고 있는 추세이다. 극동 아시아 지역에서 발생한 주요 큰 지진으로는 1923년 9월 1일 동경 대지진(143,000명 사망), 1957년 12월 4일 몽고 대지진(1,200명 사망), 1976년 7월 27일 중국 당산 대지진(650,000명 사망), 1995년 1월 17일 일본 고베 지진(5,600명 사망), 1995년 5월 28일 사할린 지진(2,500명 사망), 최근 1999년 9월 21일 대만 지진(2,100명 사망) 등을 예로 들 수 있다. 이것은 극동 아시아도 미국 서부, 터키, 이란, 이라크, 남미 등과 같이 지진 피해를 크게 받고 있는 지역임이 틀림없다는 것이다.

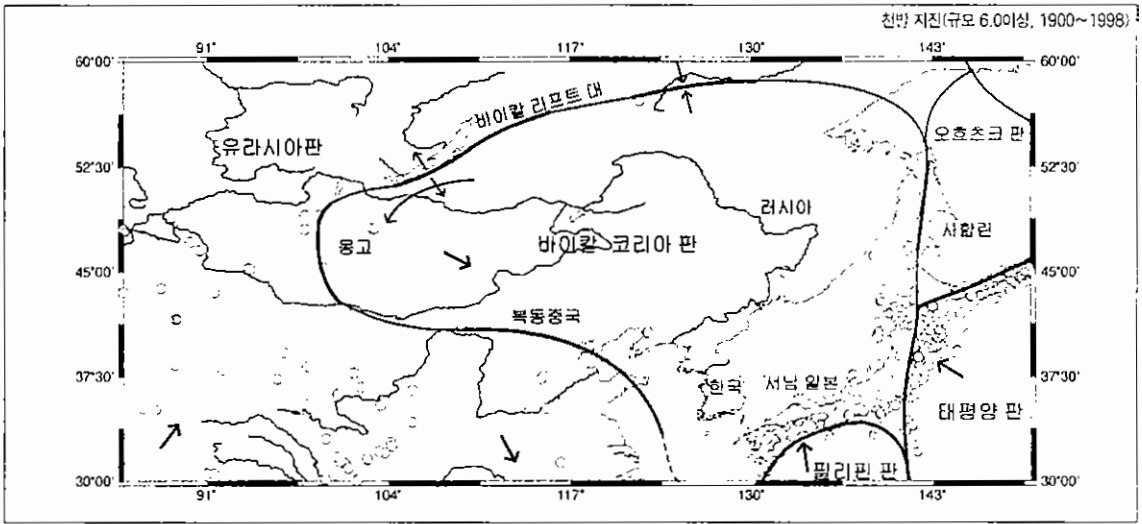
한반도에서는 1936년 7월 4일 지리산 지진(규모 5.3), 1978년 9월 16일 속리산 지진(규모 5.2), 1978

년 10월 7일 홍성 지진(규모 5.0), 1980년 1월 8일 북한 대관 지진(규모 5.0), 1982년 2월 15일 안악 지진(규모 5.1), 최근 1996년 12월 13일 영월 지진(규모 4.8, Mw=5.2), 1997년 6월 26일 경주 지진(규모 4.7, Mw=4.8) 등이 일어났다. 그리고 특히 급년에 일어난 한반도의 총 지진 수는 35회나 되며 이들 중 12개가 강원도 지역에서 발생한 특이한 현상을 보여주고 있다." 그러나 한반도 지진은 동북아시아의 위험 지진과 같이 판 경계보다 판 내부의 국지적 응력 변화에 기인하기 때문에 위에서 말한 재앙 지진과 구별된다고 말할 수 있다.

## 동북아시아의 지체구조력과 한국의 지진

지진의 원인은 범세계적(global)으로 9개 구조판(plate)이 모자이크 식으로 서로 연결되어 부딪치고 밀리는 이동을 하는데 있다. 이것을 판구조론이라 부른다. 또한 국제적으로는 범세계적인 여파로 국지적 응력(regional stress)과 변형(strain)의 관계로 어느 지역에서 응력의 균형이 깨지면서 연약한 부분(단층)을 통하여 탄성에너지가 방출할 때 지진이 발생하게 된다. 특히 후자의 경우에 이러한 지진대의 양상(pattern)을 잘 살펴보면 어떤 소규모 판으로 나누어지는데 이와 같은 소규모 판을 마이크로 플레이트(microplate)라고 부른다. 따라서 대부분 지진은 판경계에서 많이 일어나며 이러한 지진을 판경계 지진(interplate earthquake)이라 하고, 판 내부에서 지진이 발생하거나 소규모 판의 경계부에서 발생하는 지진을 판 내부 지진(intraplate earthquake)이라 부른다. 특히 여기서 말하고 있는 판 내부 지진은 대륙성 지진(intracontinental earth-

1) Mw : 모멘트 규모



동북아시아의 판구조론과 바이칼 코리아 판의 운동

quake)이라 부르며, 대부분 인구 밀집 지역에서 일어나기 때문에 우리 인간에게 막대한 지진 재앙을 가져다 준다. 동북아시아 대지진대는 몽고, 북동 중국, 서남 일본, 사할린을 경계로 '바이칼-한반도 판(Baikal-Korea Plate)'이라고 부르는 하나의 소규모 판이 약 3천만년 전부터 바이칼호에서 시작하여 몽고 중앙을 가로질러서 동남 방향의 반시계 방향으로 움직이기 시작하였다.<sup>2)</sup> 한반도는 이 소규모 판의 끝 가장자리에 위치하고 있기 때문에 북동 중국, 서남 일본, 사할린에 비해서 큰 지진 위험성은 없을 것으로 본다. 그러나 한반도의 약 2,000년간의 지진 목록을 보면 약 3,000개의 지진이 일어났음을 알 수 있다. 그리고 이들 역사 지진과 계기 지진을 확률론적으로 분석해 보면 5.5~6.0 규모의 지진이 향후 2010년까지 일어날 확률이 서울·수도권 지역은 57%, 경주 지역은 35%, 그리고 평양 지역은 29%로 산출되었다. 그리고 b값도 서울·수도권 지역은 0.77, 경주 지역에서는 0.99, 그리고 평양 지역에서는 1.06으

로 산출되었다. b값이 크면 작은 지진이 일어날 확률이 크며, 반대로 b값이 작으면 큰 지진이 일어날 확률이 크다. 그리고 서울·수도권은 지난 200년 동안(18~19세기) 지진 활동이 조용한 지진 정지기(seismic gap)에 있었다. 그러므로 지진 에너지가 많이 축적되었다고 볼 수 있다. 따라서 한반도에서 지진 위험이 제일 높은 곳은 서울·수도권 지역으로 생각할 수 있다. 그러나 이것은 어디까지나 확률적 이론에 바탕을 둔 귀납적 방법(induction)에 의한 것이고, 결코 과학적 연구 방법인 연역적 방법(deduction)이 아니라는 점을 강조하고 싶다. 그리고 규모는 아무리 커도 6.0 이상을 넘지는 않을 것으로 본다.

### 지진은 왜 위험한가?

보통 사람들은 지진 운동을 피해 결과만 가지고 기술

2) 이 이론은 필자가 1999년 7월 19일 영국 IUGG/IASPEI(국제 측지학·지구물리학/국제 지진학회)에서 발표하였음.

하게 된다. 왜냐 하면 아무리 큰 지진이라도 60초 이내에 지진동이 끝나기 때문이다. 다시 말해서 단위 시간에 가장 큰 재앙을 불러오는 것은 지진 밖에 없다. 그리고 지진 운동은 순간적이지만 3차원 운동, 즉 상하, 좌우 또는 회전운동까지 동시에 일어나기 때문에 피해가 막대한 것이다. 토목·건축구조 전문가는 구조물 자체에 대한 지진 강도를 높게 두고 설계에 치중하지만, 문제는 이러한 지진 운동이 그 구조물을 받치고 있는 지질 구조와 분리되어 진행되는 것이 아니고, 수 km에서 수십 km 깊이까지 한 덩어리가 되어서 구조물과 함께 움직인다는 것이다. 그래서 지상 구조물 하나만 가지고 지진 위험을 줄인다고 생각하는 것은 매우 어리석은 일이다.

보통 이러한 지진 메커니즘은 크게 세 가지 운동으로 분리하여 이동 블록이 밑으로 떨어지는 정단층(normal fault), 이 경우는 양쪽으로 장력(tension)이 작용된 것이고, 반대로 압력(compression)이 작용하면 이동 블록이 위로 움직이게 된다. 이러한 단층을 역단층(reverse fault)이라 한다. 그리고 끝으로 수평 이동만 작용하여 두개의 블록이 서로 어긋나게 운동하는 것을 주향 이동 단층(strike-slip fault)이라고 부른다. 어느 지진 운동도 이 세 가지 운동을 동시에 갖고 일어나기 때문에 지진의 진원(source)을 보통 이중 우력(double couple)이라고 부른다. 그리고 이러한 지진 메커니즘은 이 세 가지 운동 중에서 어느 운동이 심하게 일어났느냐 혹은 지질 구조에 따라 크게 차이가 나타나기 때문에, 지진 피해를 최소화하는 지진 공학(내진 공학)이 이와 같은 복잡한 물리적 역학을 고려하지 않으면 별로 실효를 거두지 못한다. 다시 말해서 지하의 지층 구조를 모르고 무조건 지진 규모만 큰 것을 택하여 내진 설계를 했다고 지진 위험에서 안전하다고는 전혀 말할 수 없다. 지진은 이와 같이 진원(source)의 크기와 메커니즘은 물론 지진파가 전달하는 여정의 지층 구조, 그리고 구조물이 들어가는 부지의 하부 지질 구조를 정확히 알아야만 실용적 내진 설계를 성취할 수 있다.

## 인간의 도전

지진 예보는 아직까지 성공률이 30%를 넘지 못한 실정이다. 중국이나 일본에서는 지진이 발생하기 전에 동물의 기묘한 행동, 즉 개미떼의 이동, 겨울철에 뱀의 출현, 메기(catfish)의 활발한 움직임 등으로 지진이 임박하였다는 관례적 추측이 있었으나 과학적 설명이 뒷받침되지 않고 있다. 따라서 현재까지 지진 예보를 알려주는 과학적인 전조 현상(물리적 단서)은 다음과 같다.

첫째, 지진이 발생하게 되면 두개의 파, 즉 종파(P파라 부름)와 그보다 조금 늦게 나타나는 횡파(S파라 부름)가 생기게 된다. 보통 P파는 S파보다 약 1.752배 빨리 도착하게 되는데(즉, P파 속도=1.752×S파 속도), 이 P파와 S파의 P파속도/S파속도 비율이 감소되면 지진이 일어날 가능성이 있다.

둘째, 지진이 발생하기 전에는 지표면의 융기 현상이 일어난다는 것이다. 이러한 현상은 미국 산안드리아스 단층에서 크게 관측되었다.

셋째, 지진 발생 전에 깊은 우물 속의 검출 라돈 가스 양이 증가한다. 이는 활단층 지역의 지하 암석이 붕괴되며 대기 속으로 불활성 기체인 방사성 원소 라돈이 방출된다. 이와 같은 현상은 러시아, 중앙아시아 지역에서 관측되었다.

넷째, 관심을 끄는 지진 지대의 암석 전기 전도율의 변화이다. 이는 지진이 발생한 화강암의 균열과 공극(틈)을 채운 물의 침투는 체적을 증가시키면서 전기 저항을 떨어뜨린다. 현재 이 방법은 매우 고무적인 방법으로 간주되고 있다.

다섯째, 지진이 발생하기 전에 강도가 약한 소규모 지진의 발생 빈도수의 변화가 심하게 일어난다. 그리고 바로 본진 전에는 조용해진다. 이 방법은 지진학적으로 중요하게 관측되고 있는 현상이다.

우리는 지진이 일어나는 현상을 다섯 단계로 나누어 설명할 수 있다. 즉, 첫 단계는 지하의 구조력(tectonic

force) 때문에 탄성 변형이 서서히 형성되며, 이 단계는 모든 지진 변수는 표준값을 유지한다. 두번째 단계에서는 단층대에서 암석의 균열이 생기며 전체 부피는 늘어난다. 이것을 dilatancy라고 부른다. 따라서 팽창한 체적을 통과한 P파 속도는 감소하고 지표면은 올라오고, 라돈가스는 방출되며 전기저항은 떨어진다. 근처에서 미소지진의 발생률은 변화가 생긴다. 세번째 단계에서는 물이 흡수공이나 미소한 균열을 통하여 확산하여 균열에 물이 채워짐에 따라 그 지역을 통과하는 P파의 속도는 다시 증가하게 되고 지각의 응기는 멈추고, 새로운 균열로부터 라돈가스 방출은 감소하고 전기저항은 더욱 떨어진다. 네번째 단계에서는 본진(mainshock)이 일어나는 순간이다. 그리고 끝으로 다섯째 단계는 응력이 격감함으로 여진(aftershock)이 따라오게 된다. 이상은 지진 발생 과정을 물리학적 관측 방법으로 설명한 것이다.

21세기 새 천년에는 인간이 해결해야 할 가장 중요한 연구 과제로 지진 예보를 들 수 있으며, 온 인류는 이에 도전하여 앞으로 닥쳐올 대지진을 성공적으로 예보함으로써 인명과 재산의 피해를 막아야 할 것이다.


## 결론 및 제언

한국의 지진 연구는 현재 세 가지 측면으로 설명할 수 있다. 첫째는 국가연구기관인 자원연구소, 기상청 및 원자력 안전기술원의 지진팀, 서울대 지진공학팀, 그리고 대학의 지진과학팀으로 볼 수 있다. 즉, 자원연구소, 안전기술원 및 기상청은 주로 지진 관측망 운영과 자료 수집에 치중하고, 서울대 지진공학센터는 내진 공학에 초점을 기울이고 있다. 그 반면에 대학의 지진 과학 및 한국지진연구소(전 한양대학교 지진연구소) 등에서는 지진 연구 및 응용에 치중하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 한반도는 다행하게도 판 경계(plate boundary)에서 빗겨 나가서 위치하고 있기 때문에 이웃 몽골, 중

국, 대만, 서남 일본 및 사할린 등지와 같이 치명적 지진 위험은 없을 것으로 본다. 그리고 지진(과학) 연구는 세 가지 분야 즉, 자료 수집, 내진 공학, 지진 연구 중에서 현재 가장 중요한 지식 기술분야지만 지원이 제일 떨어지고 있는 형편이다. 구술이 아무리 많다고 하더라도 그것을 빼어 놓지 않으면 가치가 없듯이, 아무리 관측망과 지진 Data를 많이 갖고 있더라도 과학적 분석과 응용 없이는 아무런 효과가 없는 것이다. 더욱이 정밀한 기초 자료와 지진 연구 없이 내진 설계를 한다는 것은 한국과 같이 저지진 활동(low seismicity) 지역에서는 명시적 효과에 불과하며 언젠가 지진 연구와 Data 확보에 따라 변화할 수 있다. 정말로 한국의 지진 과학 발전과 고급 지진 인력 양성을 위해서는 무엇보다도 이론과 지식에 바탕을 둔 학문으로서의 순수 지진 연구에 지원이 더욱 필요하다.

지진 연구는 크게 세 가지 즉, 지진 메커니즘(source), 지진파 전파 경로에 의한 지구 구조 연구, 지진 예보 등으로 나누어 볼 수 있다. 이 중에서 특히 지진 메커니즘은 지진 원인과 밀접하며 단층 생성 및 조사, 핵실험과 자연 지진의 구별과 같은 CTBT(포괄적 핵실험 금지 조약) 등에 활용한다. 1996년부터 UN에서는 포괄적 핵실험 금지조약을 발동하여, 지구상의 어떤 핵실험도 금지하고 있으며 이것을 탐지할 수 있는 첨단 기술은 지진학 분야 중 폭발 지진학(explosion seismology)이 해당된다. 그리고 지진파 전파는 지구 내부의 구조를 정확히 촬영할 수 있는 3차원 토모그래피 기술에 응용되어 지구 구조의 고체지구물리학적 기초 자료를 산출하는데 응용된다. 지진 예보는 앞으로 일어날 수 있는 지진의 크기(Magnitude), 장소(Epicenter), 시간(진원시) 등을 미리 예측할 수 있는 과학으로 인류가 도전할 수 있는 21세기의 가장 중요한 연구 과제 중 하나일 것이다.

특히 지진 과학의 실제 응용으로 들면, 주요 구조물 공사에 있어서 천부층을 시추하지 않고 면밀하게 들여다 볼 수 있는 3차원 토모그래피 기술이다. 앞으로 대형 주

요 구조물(고층 건물, 대교, 고가도로, 원전 등)을 설계할 때, 지상의 구조물에 지진 크기만 가지고 내진 설계를 고려하는 것 보다 지하, 심부 지층 구조를 정밀 분석하여 단층, 파쇄대, 또는 지하수 같이 위험한 지역을 미리 찾아 구조물 설계를 작성하는 것은 그냥 지진 규모 크기만 가지고 설계하는 것 보다 더욱 실효가 있을 것으로 본다. 따라서 이 분야를 위해서 한국에서 지진 연구, 즉 지진파의 전파와 고해상 3-D 속도 토모그래피 기술 개발과 같은 것은 실제 주요 토목공사에 응용할 수 있을 뿐만 아니라, 심부층 지각 구조, 석유·가스 탐사, 지열 개발 등에 크게 활용할 수 있기 때문에 적극적인 정부 지원이 필수적이라는 것은 더 말할 필요도 없다. 

#### 김소구

서강대학교 물리학과를 졸업하고, 미국 Saint Louis 대학에서 지구물리학(지진학) 박사를 받았다. 학위를 받은 후, 미국 Tulsa, Seismograph 회사 선임 지진연구원, 미국 NOAA/CIRES, Univ. of Colorado에서 POSTDOC, 한국 동력자원연구소 선임연구원을 거쳐 현재 한양대학교 물리학과와 지구해양학과 교수 및 한국지진연구소 소장으로 활동하고 있다. 미국 지진학회(SSA), 지진연구연합회(IRIS) 회원, 독일 Hamburg 대학 지구물리연구소, 호주 New England 대학 지구물리연구소 교환 교수를 지냈고, 호주 지진연구소 객원 연구원을 역임했다. 주요 저서로는 『탄성파 이론』, 『지구과학』, 『Seismic Investigation』, 라-영역, 주요 논문으로는 “모멘트 텐서와 한국 지진 메카니즘”, “동북아시아 지진 메카니즘과 지체 구조력” 등을 미국 지진학회지(BSSA)와 지체 구조 물리학(Tectonophysics)에 발표하는 등 160여 편 논문이 국내·외 전문학회지에 게재되어 있다.