

지진재난관리를 위한 과학적 지진연구

Scientific Seismic Research for Earthquake Disaster Management

윤홍식 | Hong-Sik Yun | 성균관대학교 건축토목공학부 교수

1. 서론

2016년 9월 12일 경주 인근에서 규모 5.8의 지진이 발생하여 지진 안전지대로 생각되던 우리나라가 지진에 대해 더 이상 안전지대가 아니라는 주장이 제기되고 있다. 예상치 못한 규모의 지진이 발생하였기 때문인지 반응이나 대응방안들이 다양하다. 이러한 다양한 반응과 대응방안들을 보면서 좀 더 장기적이고, 과학적인 측면에서 접근하였으면 좋겠다는 생각이 든다.

지진에 대한 연구는 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있는데, 특히 일본은 지진에 관한 다양하고 심도있는 연구를 진행하고 있는 국가이다. 워낙 지진이 많이 발생하고 대규모 지진으로 인한 피해가 막대하다보니 많은 연구자와 연구센터가 있고, 국가에서 막대한 연구비를 투자하고 있다. 그러나 불행하게도 아직까지 지진이 언제 어디서 발생할 것인지를 예측할 수 있는 기술은 개발되지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 지진을 연구하는 학자들은 몇몇 과학적인 연구자료를 바탕으로 어느 지역에서 수년~수십년 내에 발생 가능성을 예상하기도 한다.

과학적인 연구자료에 의한 연구는 과거의 지진 발생 자료를 분석하여 지진 발생빈도를 예측하거나 지진메카니즘의 해석연구, 지질·지각구조와 활동층 조사를 통한 지각활동 메카니즘 연구, 측지학적 방법에 의한 지각변동 연구 및 지각의 아이소스타시(Isostasy) 평형연구 등이 있다. 그 외에도 지진 관련 데이터베이스 구축, SAR영상을 이용한 지표면의 수직변위 조사, 지진관측망의 고도화 및 내진설계 등과 같은 연구가 진행되고 있다.

일본과 같이 지진이 많이 발생하는 선진국들은 위에서 언급한 대부분의 기술들을 활용하여 지진연구를 진행하고 있지만 우리나라는 지진 안전지대라는 인식으로 인해 극소수의 지진연구가 진행되어 왔다. 양산단층과 같은 활성단층이 존재하고 있다는 주장이 대세이지만 어느 곳에 정확하게 단층이 존재하고 있는지, 어느 정도로 활동하고 있는지는 누구도 제시하지 못하고 있는 상황이다. 본고는 그동안 필자가 진행하여 온 우리나라의 지진활동 연구에 관한 과학적인 연구결과와 향후의 지진연구 및 대응방안을 제시하고자 한다.

2. 지진연구결과

지층과 지각이 반전 등을 관측하여 수 백년이 넘는 장기적인 관점에서 지각판과 지표의 움직임은 평균적으로 일정하다는 것이 지질학의 정설이다. 각 지각판의 경계와 단층에서 발생하는 지진은 일정한 속도로 축적되는 왜곡량이 일정한 주기로 방출되면서 발생하는 현상이다. 이러한 현상을 예측하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으나 현재의 지식으로는 수 십년에서 수 백년 단위의 장기적인 예측만 이루어지고 있다. 지진예측이 아닌 지진예지의 경우에도 단층과 지각판 Subduction영역에서 지질조사 및 역사적인 피해자료를 사용하여 장기적인 발생확률과 규모를 예지하는 방법과 단기적인 측면에서 VAN법과 전조현상으로 지각판의 미끄러짐을 감지하는 방법이 있으나 지진을 예지하는 것은 현실적으로 어려운 상황이다.

그러나 이러한 지진예지의 어려움에도 불구하고 다양한 과학적인 방법들을 사용하여 지진을 예지하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 특히, GNSS기술의 발전은 지표면의 이동량을 정밀하게 측정할 수 있게 되어 지각변동을 연구할 수 있게 되었으며, 원격탐사기술로서 PS-InSAR기술은 지표면의 수직운동을 정밀하게 탐사함으로써 지진예지를 위한 자료로 활용되고 있다.

본 고에서는 한반도의 지진예지와 관련된 연구결과로서 한반도의 지질구조, Isostasy평형상태, 역사적 지진자료 분석결과 및 GNSS관측자료 해석을 통해 얻은 한반도의 지각변동량 등에 대하여 설명하였다.

1. 한반도의 지질과 지체구조

한반도의 지질은 북북동-남남서의 구조로 고준대지 블록으로 형성되어 있는데 이 북북동-남남서의 구조가 한반도의 지형, 지질의 특징이다. 한반도의 동해안쪽에는 1700m 고지대의 산맥을 연결하는 태백산맥, 중부지역에는 소백산맥이 북북동-남남서의 방향으로 뻗쳐있으며, 남부지역의 울산지방에는 가장 신생단층이 존재하고 있는 것으로 알려져 있다. 한반도 주변에 대한 지



진의 메카니즘은 그림 2에 표시한 바와 같이 북북동-남남서의 절면을 가진 횡방향 지형이므로 한반도에는 전단응력이 존재하는 것으로 해석되고 있다. 그림 1은 한반도 주변의 지각구조를 나타낸 것으로서 한반도와 일본의 남서부 지역인 혼수지역(음영처리)이 유라시아판에 속해 있는 것으로 알려져 있다.

2. 한반도 주변의 지진특성

그림 3은 유라시아판에 속한 중국(A지역)과 한반도(B지역) 및 일본의 혼수지역(CW지역)에서

의 지진발생 특성을 표시한 것이다. 1900년대부터 2000년대까지의 지진기록 자료를 분석한 것으로서 동일한 유라시아판에 속한 3개 지역의 지진발생 특성이 상이한 것을 알 수 있다. A지역의 경우에는 1890년을 기준으로 1930년과 1970년 주변에서 규모 6~7의 지진이 집중적으로 발생하고 있고, 그림 4에 표시한 바와 같이 최근의 지진발생 빈도를 보면 2010년에 집중적으로 발생하고 있어 약 40년 주기로 규모 6~7의 지진이 발생하는 특성을 가지고 있는 것으로 분석된다.

B지역인 한반도의 경우에는 1900년, 1940년, 1980년 및 2016년에 규모 4~5가 집중적으로 발생하였고, 주기는 약 40년으로 A지역과 유사하게 40년의 주기를 가지고 집중적으로 발생하고 있으며, 규모는 A지역에 비하여 작게 나타나고 있다. 반면에 CW지역에서는 1920~1940년, 1980년 및 2005년에 규모 5~7의 지진이 집중적으로 발생하고 있어 동일한 유라시아판에 속한 A, B지역과는 매우 다른 발생 특성이 있는 것으로 분석되었다.

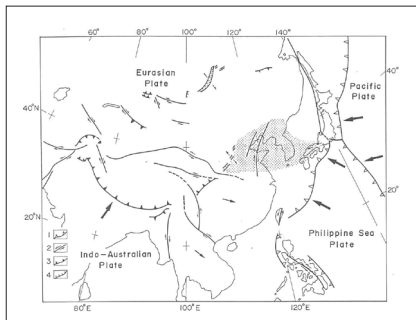


그림 1. 유라시아판에 속한 한반도와 일본의 혼수지역

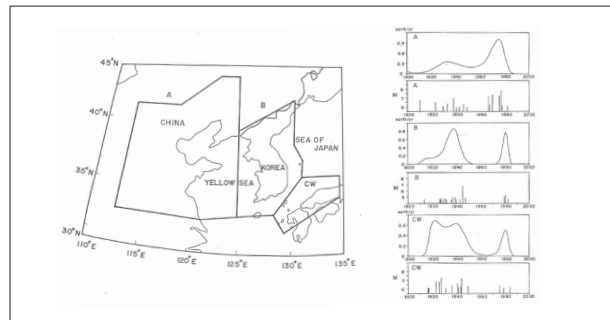


그림 3. 유라시아판에 속한 중국(A지역)과 한반도(B지역) 및 일본의 혼수지역(CW지역)에서의 지진발생 특성

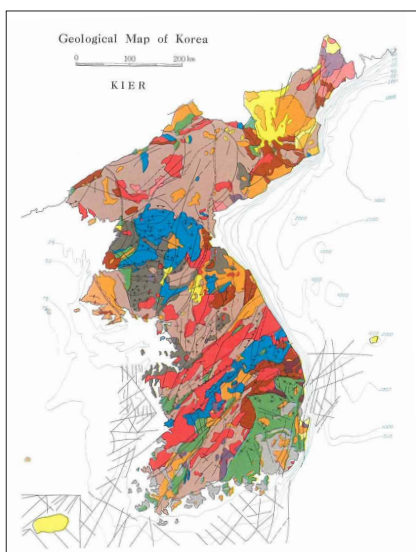


그림 2. 한반도의 지질구조도

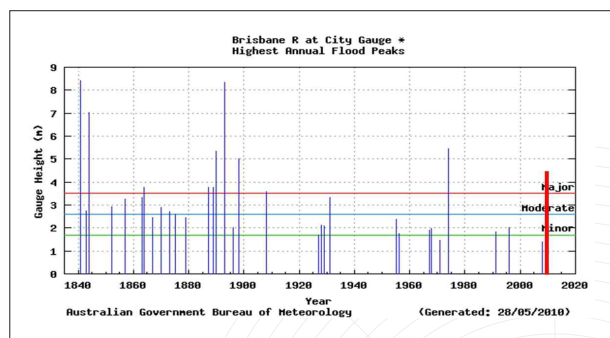


그림 4. 중국의 지진발생

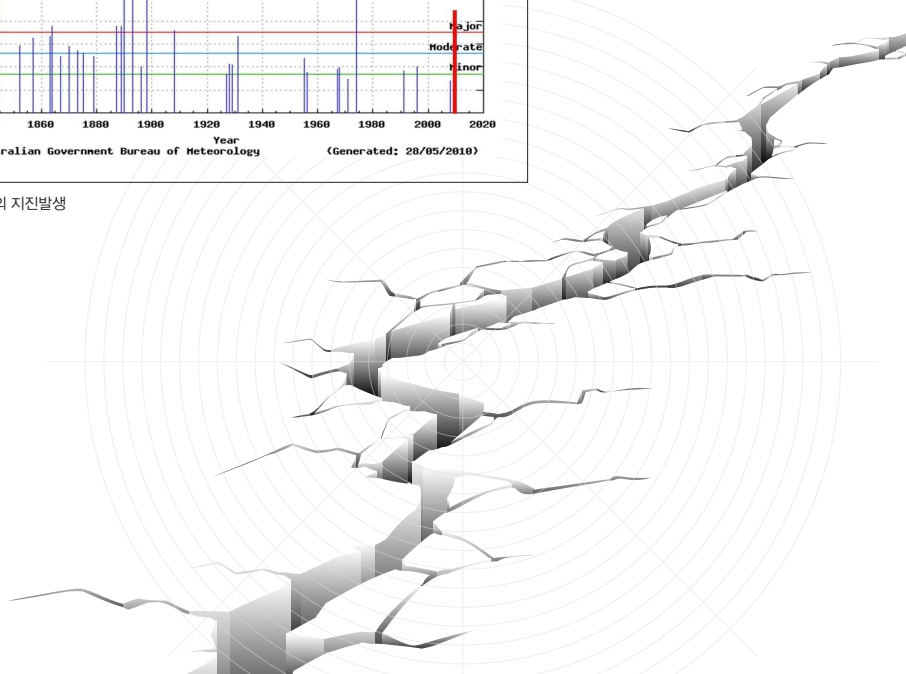


그림 5는 한반도의 역사적인 지진기록자료를 이용하여 자기상관함수(Auto-correlation function)를 작성한 것으로서 그래프에서 Delay=100이 가장 크게 나타났고, Delay=4가 가장 작은 값으로 나타나 한반도는 1000년 주기와 400년 주기에 대응하는 것으로 분석되었다. 따라서 한반도의 지진활동은 주기적인 활동이 특성이라는 것을 알 수 있다. 역사적 지진자료를 분석한 결과 한반도에서는 5이하의 지진이 40년 주기이고, 5이상은 400년 주기이며, 6이상은 1000년의 주기가 있는 것으로 분석되었다.

3. 한반도의 아이소스타시 평형

아이소스타시(Isostasy)는 지구의 지각과 맨틀간의 중력학적 평형상태를 나타내는 것이다. 즉, 지각의 어떤 지역이 아이소스타시 상태에 도달했다는 것은 아이소스타시가 평형상태라는 가설이다. 즉, 지각평형설은 지각이 밀도가 큰 하부층, 즉 연약권에 떠 있으면서 중력적인 평형을 유지한다는 가설이다. Airy(1855)의 가설은 길이가 서로 다른 막대기들이 수은 위에 떠 있는 경우로 지각평형을 비유하였다. 수은면 위에 더 많이 올라온 동막대기일수록 그 밑은 수은 속으로 더 깊게 잠겨

있는 것처럼 고산지대에서는 지각이 맨틀 내부로 더 깊게 내려가고, 해저분지에서는 반대로 알게 나타난다는 것이다. 즉, 지각의 평형은 얇고 딱딱하며 밀도가 균일한 지각이 밀도가 더 큰 맨틀 위에 떠있는 상태이다. 이 때에 가장 깊게 내려간 산맥의 뿌리와 접하는 수평면은 최상의 등압력면이며, 이면 상부에 있는 질량에 의하여 이 면에 작용하는 압력은 어디에서 동일하다는 것을 뜻한다. 아이소스타시 평형은 지형단면에 대응하는 중력측정 결과로부터 얻은 부게이상(Bouguer Anomaly) 단면을 작성하여 비교하면 알 수 있다. 그림 6은 한반도의 남부인 한국의 지형단면과 부게이상 단면을 작성한 것이다. A-A'와 B-B' 단면을 보면 위에서 설명한 Airy의 가설에 따라 지형이 표고가 높은 태백산맥과 지리산을 통과하는 부분에서 부게이상의 깊게 아래로 향하여 지형과 부게이상이 대칭을 이루는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 한반도의 지각평형상태가 매우 안정적이라고 해석할 수 있다.

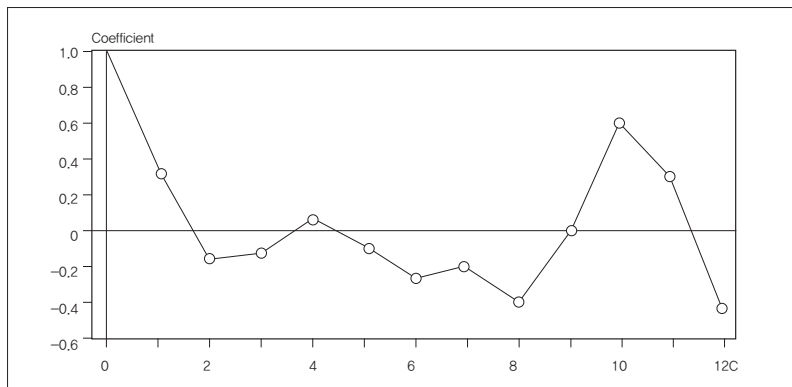


그림 4. 중국의 지진발생

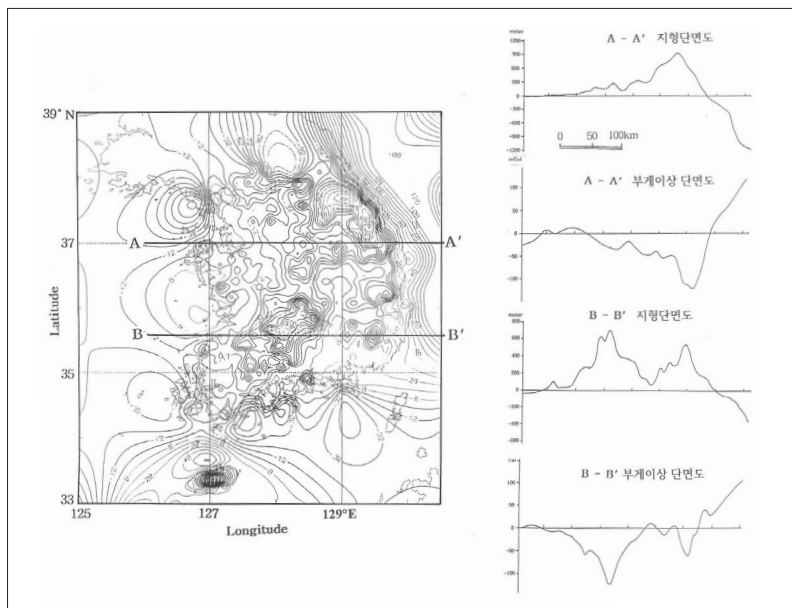


그림 6. 한반도의 아이소스타시 평형상태

4. 측지측량 자료를 이용한 지각변동연구

1960년~1990년대에는 지각변동량을 계산하기 위하여 측지망(Geodetic Network)의 반복측량 결과를 사용하였다. 삼각망으로 구성된 측지망을 일정 주기로 반복측량하여 기선의 길이 변화를 결정하고, 선형변형률을 계산한 후에 Jaeger의 이론을 사용하여 주응력과 방향 및 최대전단변형률을 계산하였다.

우리나라는 1910년~1918년 사이에 조선총독부가 조선토지조사사업의 일환으로 실시한 삼각측량 성과가 일부 남아 있으며, 1975년~1995년까지 EDM과 GPS로 관측하여 구성한 정밀 1차 및 2차 측지망 성과가 있다. 이들 성과들을 분석하여 이용 가능한 부분들을 브락단위로 나눈 후 2차원 변형률 모델을 사용하여 측지선의 변화량으로부터 수평변형률을 계산하였다. 각 브락에서 3개 이상의 측지선 변이량을 사용하여 최소제곱법으로 변형률텐서 성분들을 계산하였다. 이러한 계산 결과를 사용하여 반복관측 주기 약 80년 동안의 누적최대전단변형률이 평균 $1.02 \times 10^{-5} \pm 0.5 \times 10^{-5}$ 로 계산되어 이를 80년으로 나



누어 $(1.2 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ 의 년최대전단변형률이 있는 것으로 계산되었다. 또한, 주응력의 방향은 약 80도로 계산되어 암석의 일반적인 전단응력발생 각도 약 $35 \sim 40$ 도를 고려하면 우리나라의 지질구조(그림 2참조) 약 40도와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지진의 메카니즘해의 결과와 잘 일치하고 있고, 일본의 CW지역에 비하여 1/3 정도이다. 그림 7은 측지측량 자료를 이용하여 계산한 최대전단변형률과 주응력 방향을 나타낸 것이다.

5. GNSS상시관측소 자료를 이용한 지각변동연구
우리나라의 GNSS상시관측소는 1995년 국토지리정보원내에 최초로 설치된 뒤, 2017년 현재 72개가 측량과 항법의 기준점으로 설치되어 활용되고 있다. GNSS의 기준좌표계는 지심좌표계로써 그 중심은 1년에 약 1mm 내외로 극히 작지만 끊임없이 이동하고 있기 때문에 특정 시간에 고정된 좌표계와 GNSS데이터로써 그 좌표를 설정하고 있다. 한 국가 내에서 측량과 지도제작 목적으로 사용되는 GNSS상시관측소는 상대적인 측량

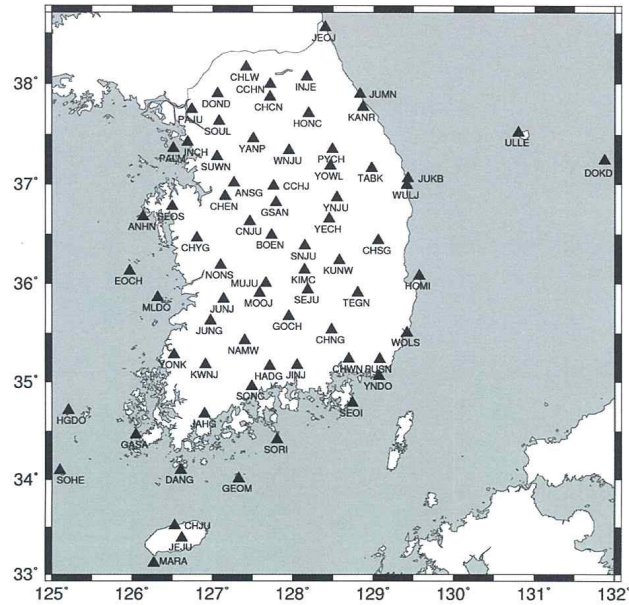


그림 8. 우리나라의 GNSS상시관측 형태와 분포



CHEN



DOND

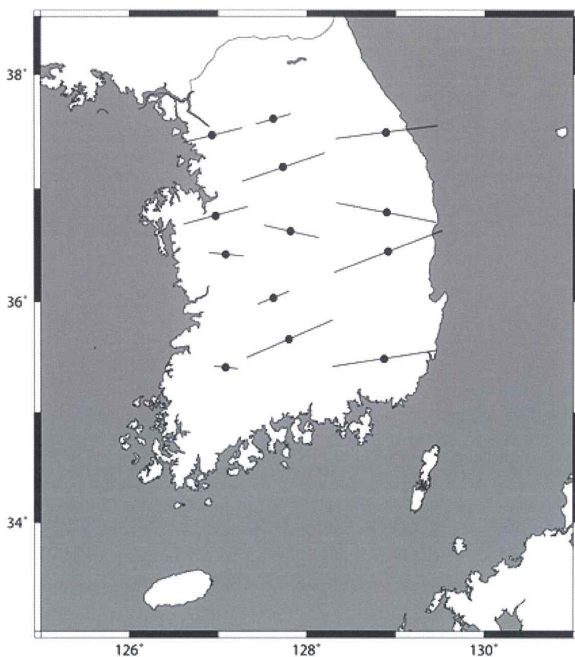


그림 7. 측지측량자료를 이용한 지각변동량 계산결과

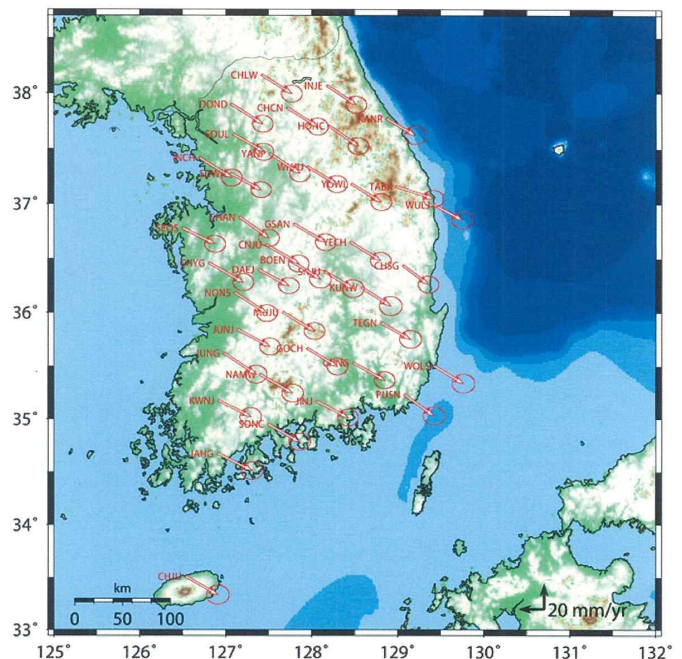


그림 9. GNSS상시관측소의 연간 평균변동속도와 변동방향

의 기준이기 때문에 국가적인 규약에 따라서 특정 시간대의 좌표계를 설정하여 사용하는 것이 혼란을 방지할 수 있다. 그러나 지심의 변화가 아닌 지각변동에 의한 GNSS상시관측소간 기선의 상대적인 변화는 GNSS상대측위의 정확도를 저하시키는 원인이 된다.

우리나라는 비교적 안정된 지각으로 구성되어 있다고 판단되어 왔기 때문에 지각변동에 따른 국가 기준점의 성과갱신을 고려하지 않고 있지만 연구결과에 따르면 지각변동량에 대한 성과갱신이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그림 8은 국가에서 설치하여 운영하고 있는 GNSS상시관측소의 형태와 분포를 나타낸 것으로서 이들 자료를 사용하여 지각변동량을 계산하였다. GNSS관측소 40개소와 우리나라 주변의 국제 GNSS상시관측소 5개를 선정하여 30개월간의 일별 GNSS 데이터를 정밀기선해석을 한 후에 전 세계 130개

GNSS상시관측소망과 결합조정함으로써 GNSS상시관측소의 연간 변동량을 계산하였다. 그림 9는 GNSS상시관측소의 연간 지각변동량을 계산하여 표시한 것으로서 평균변동속도는 28.99 ± 1.44 mm/yr이고, 평균변동방향은 $(120 \pm 3)^\circ$ 로 계산되었다.

이러한 연구결과를 통해 한반도의 지각변동은 방향과 변동속도가 일정하여 매우 안정적이라는 것을 알 수 있다. 일반적으로 여러개의 지각판들로 구성되어 있는 경우에는 변동속도의 크기가 다르거나 방향이 다르게 나타나며, 지각판들간에 응력이 크게 작용하여 전단력이 발생하게 되므로 지진이 발생할 경우에는 심각한 피해를 줄 수 있다. 한반도의 경우에는 측지측량자료를 이용한 연구에서 $(1.2 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ 의 연간 최대전단변형률이 있는 것은 계산되었으나 우려할 수준은 아니며, GNSS관측결과인 평균변동속도와 방향을 보더

라도 안정적이라는 것은 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 2011년 3월 11일 일본의 산리쿠연안(센다시 동쪽 70km)에서 발생한 규모 9.0의 도후쿠 지진으로 인하여 발생한 우리나라의 지각변동을 표시한 것이다. 지진 발생 전후의 GNSS상시관측소 자료를 해석하여 지진발생 전과 발생후의 위치변화량을 계산하였다. 모든 관측소의 위치변화는 진앙지를 향하여 변동한 것으로 나타났으며, 변동량은 독도가 5.8cm, 울릉도가 5.0cm, 동해안의 위치들이 3.01~3.58cm 변동하였다. 또한, 서해안의 경우에는 1.8cm에서 2.56cm가 변동한 것으로 계산되었고, 제주도는 1.5cm 정도가 변동하였다. 이후 2014년에 동일한 GNSS상시관측소 자료들을 해석하여 분석한 결과, 약 2cm 정도가 원상태로 회복된 것으로 계산되었다.

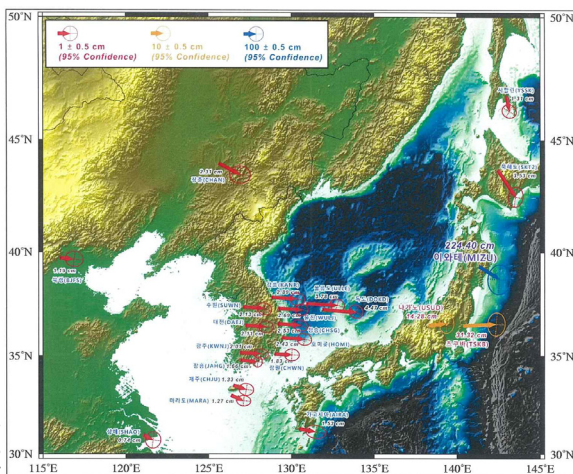


그림 10. 도후쿠 지진으로 인한 한반도 주변의 GNSS상시관측소 변동량

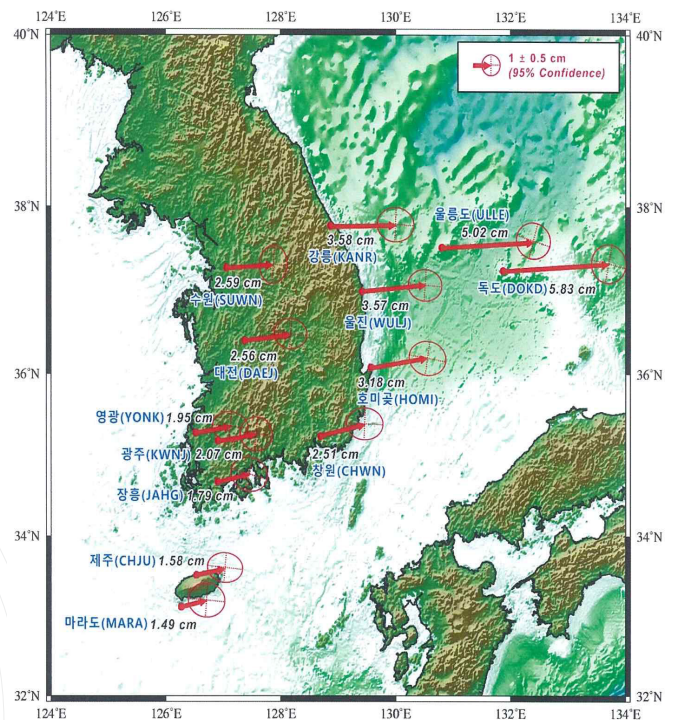


그림 11. 도후쿠 지진으로 인한 한반도의 GNSS상시관측소 변동량

6. InSAR위성영상을 이용한 지각변동 연구

간섭형 합성개구레이더 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)는 지상과 해양에 대해 위성에서 마이크로파 대역의 전파를 순차적으로 발사한 후에 전파가 굴곡면에서 반사되어 되돌아오면 미세한 시간차를 순서대로 합성하여 지표면의 고해상도 영상을 취득하는 센서이다. InSAR기술은 1960년대부터 주로 군용 정찰장비로 개발되기 시작했으며, 1980년대 들어 와서 점차 화산, 지진, 지각 변동 등 지표의 변화를 관찰하는데 주로 사용되고 있다.

InSAR 기술을 통해 수 개월에서 수 년에 걸친 시간간격을 통해 지표의 융기와 침하같이 서서히 발생하는 변화를 정량적으로 관찰하게 되며, 그 정확도는 사용되는 전자기 파장에 길이에 비례한다. 양호한 조건에서는 연간 수밀리미터 정도의 지표변위를 관측할 수 있기 때문에 지진과 화산 모니터링에 사용되고 있다.

저자는 'InSAR영상을 이용한 고속철도의 연약지반침하 분석 및 리스크평가'에 관한 연구를 수행하고 있다. InSAR영상을 활용하여 호남고속철도 전 구간에 대한 지반침하량을 정량적으로 정밀하게 측정하여 지반거동을 조사하고, 리스크평가를 수행하여 연약지반 침하에 따른 고속철도 주변 구조물의 리스크 저감대책 수립을 위한 데이터를 구축하고 있다. 그림 12는 InSAR영상을 이용한 지표면 변위를 관측한 예이다.

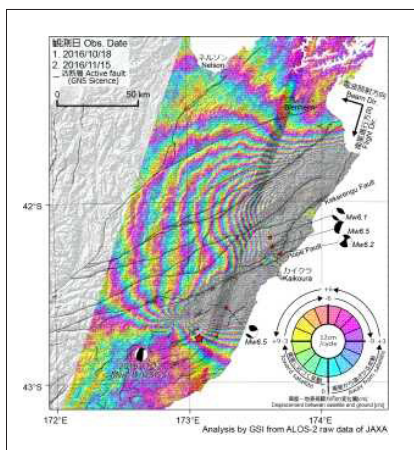


그림 12. InSAR영상을 이용한 지표면 변위 관측결과

3. 결론

본 고는 한반도와 그 주변 지역에서의 지진활동 예지를 위하여 저자가 수행해온 과학적인 연구 결과들을 정리하여 설명한 것이다. 연구결과들을 종합적으로 고려하여 보면 한반도에는 대규모 지진이 발생할 가능성이 매우 낮고, 막대한 피해를 일으킬 정도로 심각하다고 판단하기는 어렵다.

경주지진으로 인하여 언론과 학계 및 관련 기관에서 다양한 주장들이 나오고 있고, 지진에 대한 국민의 불안심리가 커진 상황이다. 역사적 기록에는 경주에서 규모 5.0 정도의 지진이 몇차례 있었음을 알 수 있다.

지진은 지각판에 에너지가 축적되어 어느 한계 상태에 다다르면 에너지가 방출되는 현상이다. 따라서 작은 지진들이 자주 발생하여 에너지를 방출하면 안전하다 라는 것이 정설이다. 한반도의 지각판에 축적되는 에너지 방출구가 경주 부근이 아닌가 하는 이야기도 있다. 또한, 경주지진 몇일전에 북한의 핵실험(규모 5.0 해당)으로 인한 에너지가 방출된 것 같다는 이야기도 있다. 경주지진발생후 모 기관에서는 GNSS관측자료를 해석한 결과 경주부근이 2.0cm가 변동하였다고 언론을 통해 주장하기도 하였다. 그러나 저자와 국토지리정보원이 GNSS관측자료를 정밀 해석한 결과 전혀 변동이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

이렇듯 경주지진은 우리사회에 많은 해프닝을 일으켰고, 정부도 다양한 정책들을 추진하고 있다. 2층 이상 건물에 대한 내진설계 적용, 지진전문가 양성, 연구개발 및 담당부서 확대 등 많은 방안들이 마련되고 있다.

가까운 일본이나 선진국을 살펴보면 장기적인 관점에서 지진을 연구하고 대응을 하고 있는 것은 잘 알려져 있다. 지진활동에 대한 연구와 내진설계 적용에 문제를 장기적인 측면에서 연구하고, 정책을 추진하고 있다. 지진활동을 연구한다고 해서 지진을 예측하고 피할 수는 없다. 내진설계 기준을 강화하여 적용하면 건축주는 부담을 갖게 되고 건설시장을 위축시킬 수 있는 여

지도 있다. 이러한 부분들은 보다 장기적인 관점에서 검토하는 것이 바람직할 것이다.

또한, 활성단층으로 알려져 있는 양상단층의 위치를 명확하게 조사하는 연구와 경주부근에 대한 과학적인 연구를 위해 GNSS망을 구축하여 지각변동조사 연구를 수행할 필요가 있다. 장기적으로 1~2년 주기로 InSAR와 같은 위성영상 자료를 분석하여 지표면 변화를 연구할 필요도 있다. 그보다 우선해야 할 것은 지진이 발생한 후의 재난대응과 복구를 위한 재난관리 정책수립과 국민들에 대한 지진대피 교육 및 훈련이라고 생각된다. 세월호 사건과 최근의 경주지진이 우리에게 주는 교훈은 그 동안 우리 사회가 재난에 대비한 교육과 훈련이 미흡하고, 국민들이 재난에 대한 인식이 낮다는 것이다. 최근의 경주지진에 대한 과민한 반응은 잠재되어 있는 세월호 참사의 아픈 기억 때문인 것 같다. 무엇보다 지진에 대한 과학적인 연구를 통해 정확한 정보를 제공하는 것은 국민들의 불안한 심리를 줄일 수 있는 최선의 길이라고 생각된다.

WRITER INTRODUCTION



윤홍식 교수는 성균관대학교에서 토목공학에서 학부와 석사학위를 취득하고 박사과정을 수료한 후에 국립부산해운대학교 대학 측지학과에서 중력데이터를 사용한 "한반도의 정밀지오이드 결정"에 관한 연구로 박사학위를 취득하였다. 1999년부터 성균관대학교에서 근무하며, 측지학·지구물리학적 연구와 GPS정밀처리, GIS분야에서 많은 논문을 발표한 바 있다. 2013년부터 대학원에 방재안전공학과를 설립하여 운영하고 있으며, 특별히 GIS기술을 이용한 재난리스크평가에 관한 기술을 개발하고 있다. 현재 국민안전처로부터 재해경감활동 관리체계 구축지원 프로그램 및 관리기술개발에 관한 연구를 수행하고 있으며, 저서로는 "재난안전방재법규"와 "재난리스크평가론"이 있다.

yoons@skku.edu

기획 | 김성일 편집위원장 ksi11997@hanmail.net