

국내 지진활동 및 지각구조 연구동향

김성균^{1*} · 전명순² · 전정수²

¹진남대학교 지구환경과학부, ²한국지질자원연구원 지진연구센터

Recent Research for the Seismic Activities and Crustal Velocity Structure

Sung Kyun Kim^{1*}, Myung-Soon Jun² and Jeong-Soo Jeon²

¹*School of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, South Korea*

²*Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea*

Korean Peninsula, located on the southeastern part of Eurasian plate, belongs to the intraplate region. The characteristics of intraplate earthquake show the low and rare seismicity and the sparse and irregular distribution of epicenters comparing to interplate earthquake. To evaluate the exact seismic activity in intraplate region, long-term seismic data including historical earthquake data should be archived. Fortunately the long-term historical earthquake records about 2,000 years are available in Korea Peninsula. By the analysis of this historical and instrumental earthquake data, seismic activity was very high in 16-18 centuries and is more active at the Yellow sea area than East sea area. Comparing to the high seismic activity of the north-eastern China in 16 -18 centuries, it is inferred that seismic activity in two regions shows close relationship. Also general trend of epicenter distribution shows the SE-NW direction. In Korea Peninsula, the first seismic station was installed at Incheon in 1905 and 5 additional seismic stations were installed till 1943. There was no seismic station from 1945 to 1962, but a World Wide Standardized Seismograph was installed at Seoul in 1963. In 1990, Korean Meteorological Administration(KMA) had established centralized modern seismic network in real-time, consisted of 12 stations. After that time, many institutes tried to expand their own seismic networks in Korea Peninsula. Now KMA operates 35 velocity-type seismic stations and 75 accelerometers and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources operates 32 and 16 stations, respectively. Korea Institute of Nuclear Safety and Korea Electric Power Research Institute operate 4 and 13 stations, consisted of velocity-type and accelerometer. In and around the Korean Peninsula, 27 intraplate earthquake mechanisms since 1936 were analyzed to understand the regional stress orientation and tectonics. These earthquakes are largest ones in this century and may represent the characteristics of earthquake in this region. Focal mechanism of these earthquakes show predominant strike-slip faulting with small amount of thrust components. The average P-axis is almost horizontal ENE - WSW. In north-eastern China, strike-slip faulting is dominant and nearly horizontal average P-axis in ENE - WSW is very similar with the Korean Peninsula. On the other hand, in the eastern part of East Sea, thrust faulting is dominant and average P-axis is horizontal with ESE - WNW. This indicate that not only the subducting Pacific Plate in east but also the indenting Indian Plate controls earthquake mechanism in the far east of the Eurasian Plate. Crustal velocity model is very important to determine the hypocenters of the local earthquakes. But the crust model in and around Korean Peninsula is not clear till now, because the sufficient seismic data could not accumulated. To solve this problem, reflection and refraction seismic survey and seismic wave analysis method were simultaneously applied to two long cross-section traversing the southern Korean Peninsula since 2002. This survey should be continuously conducted.

Key words : Seismic stations, Historical earthquakes, Instrumental earthquakes, Focal mechanism, Crustal velocity structure

*Corresponding author: kimsk@chonnam.ac.kr

유라시아판 동남쪽에 위치한 한반도는 판경계로부터 수백 km 떨어진 판내지역에 해당하며, 판내부 지진은 판경계부에서의 지진에 비해 발생하는 지진에 비해 숫자가 상대적으로 적고, 크기도 작을 뿐만 아니라 발생 위치도 매우 불규칙한 편이다. 이는 단층의 활동주기가 매우 길다는 것을 의미하므로, 약 2,000년 동안의 지진역사가 기록되어 있는 우리나라는 이들 자료를 정확히 분석하여 역사시대 동안에 발생한 지진의 활동도 및 특성 등을 규명하여야 한다. 역사지진의 자료에 의하면 지진활동은 조선 중기 즉 16-18세기에 특히 활발했으며, 높은 지진활동의 기간은 중국 북동부와 일치하고 있다. 이는 이 두지역의 지진활동이 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다. 역사지진 및 계기지진 자료에 의하면 대체로 서해안쪽이 활발하며, 한반도 남동부에서 서북서 방향으로 활발한 양상을 보여준다. 우리나라에서의 근대적 지진관측은 1905년 최초로 인천관측소가 설치되어 광복이전 6개소의 지진관측소를 운영하였다. 그 후 지진관측 공백기를 거쳐 1963년 서울에 세계표준지진계가 설치되었으며, 1990년 초에 기상청은 중앙집중식 12개소의 관측소를 본격적으로 운영하기 시작하였다. 그 후 지속적인 확장을 통해 기상청에서는 속도계관측소 35개소, 가속도 관측소 75개소를, 한국지질자원연구원은 32개소의 속도계관측소, 16개소의 가속도 관측소를, 한국원자력안전기술원은 4개소의 속도계 및 가속도 관측소를, 한국전력연구원은 13개소의 속도계 및 가속도 관측소를 운영하고 있다. 27개 지진의 발생원인을 분석한 결과 한반도 및 인접지역에서 발생한 지진의 대부분은 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘과 다스의 역단층 운동이 첨가된 단층운동 특성을 보여준다. 한반도 및 주변에서 단층작용을 일으킨 주응력 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향으로 같은 판내 지역인 북동부 중국 지역의 주응력 방향과 매우 유사하고 동해 동부와는 상당한 차이를 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향도 상당히 작용하는 것으로 해석된다. 지각 속도구조는 지진이 발생한 진원의 위치와 지진규모를 정확히 알아내는데 필수적이다. 그 동안 국내 지진관측망 미비, 한반도 내부의 낮은 지진 발생 빈도 등의 이유로 양질의 지진자료를 구하기 어려워 지진자료를 이용한 지각속도 구조에 대한 연구가 극히 제한적으로 이루어질 수밖에 없었다. 그러나 최근에 국내의 여러 지진관측망에서 축적된 지진기록과 반사 및 굴절 탄성과 탐사를 수행하여 종합적으로 지각 속도구조를 규명하기 시작하였다. 이와 같은 인공발파를 이용한 지각속도구조를 규명하기 위해서는 많은 인원과 예산을 필요로 하므로 관련분야의 전문가들의 적극적인 참여가 필요한 상황이다.

주요어 : 지진관측망, 역사지진, 계기지진, 지진발생 메카니즘, 지각속도구조

1. 서 언

국내의 지진연구는 1970년대 후반 원자력발전소를 건설하기 위해 한반도 및 그 주변의 지진활동을 검토한 것이 그 계기가 되었으며, 1978년 홍성지진의 발생으로 지진연구의 필요성이 국가적 및 사회적으로 제기되었다고 할 수 있다. 이 글에서는 한반도 및 그 주변에 대한 지진활동과 지각구조 연구가 어떻게 추진되어 왔는가를 분야별로 나누어 고찰하기로 한다. 지진연구는 지진관측 자료와 관련이 깊기 때문에, 먼저 국내 지진관측망의 변천에 대하여 서술하기로 한다. 다음으로 지진연구를 지진활동에 관한 연구와 지각구조에 관한 연구에 대하여 현재까지의 연구를 종합적으로 고찰해 보기로 한다.

2. 지진관측망의 변천

국내에서 지진관측을 수행하는 기관은 기상청을 비롯하여, 한국지질자원연구원, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원과 일부 대학을 들 수 있다. 기상청을 비롯한 여러 기관의 관측망 현황에 대해서는 류용규

(2006)에 상세히 기술되어 있으므로 이를 요약하여 인용하기로 한다. 지진관측의 역사는 기상청의 “1978~92지진관측보고(기상청, 1993)”, “지진관측보고 『1978~2000』(기상청, 2001)”, “2003 기상청지진업무(기상청, 2004)”를 참조하였으며, 지진관측기관 현황에 대해서는 한국지질자원연구원의 홈페이지 “<http://quake.kigam.re.kr>”와 한국원자력안전기술원의 홈페이지 “<http://emc.kins.re.kr>”, 한국전력연구원의 “2003년 지진연보(한국전력연구원, 2004)”, “2004년 지진연보(한국전력연구원, 2005)”를 참고하여 정리하였다.

2.1. 기상청 지진관측망

기상청의 지진관측은 1905년 조선총독부 인천관측소에 기계식지진계를 설치함으로써 시작되었고, 40여년간 조선총독부 산하 기상측후소에 지진계를 점진적으로 추가 설치하여 광복이전까지 우리나라는 총 6개소(인천, 부산, 서울, 대구, 평양, 추풍령)의 관측소를 갖는 지진관측망을 운영하였다.

지진관측 공백기를 거쳐 계기지진관측이 재개된 것은 1963년 3월이다. 미국지질조사소(U.S. Geological Survey)의 세계지진관측망(WWSSN: World-Wide Stan-

ardized Seismograph Network) 사업의 일환으로 국립중앙관상대 서울본대(현 기상청)에 세계표준지진계(WWSS: World Wide Standardized Seismograph) 1대가 설치됨으로써 지진관측이 재개되었다.

그 후 1978년 홍성지진(규모 5.0) 발생을 계기로 장비현대화 사업에 힘입어 1990년 초에 12소의 관측점을 갖는 중앙집중식 온라인(on-line) 아날로그 드럼식의 지진감시시스템을 구성하게 되었다.

한편 1996년 12월 13일 영월지진과 1997년 6월 26일 경주지진으로 국가의 지진방재체제에 대한 전면적 보강의 필요성이 제기되었다. 이에 부응하여, 기상청은 1997년 지진관측소 확충사업이 시작된 이래, 초광대역 및 광대역 지진계의 설치작업이 시작되었다. 즉 1999년 4월에 초광대역지진계 1대와 광대역지진계 1대 및 가속도계 1대를 광주에 설치하고, 광대역지진계 7대는 서울, 부산, 대구, 대전, 춘천, 강릉, 울진에 각각 설치하였다. 1998년에는 지진분석시스템(Antelope) 1조, 광대역지진계 3대, 단주기지진계 7대, 가속도계 17대를 구매 계약하여 이듬해인 1999년 6월에 설치하였으며, 구 아날로그식 장비와 비교시험 후 12월부터 현업에서 운영하기 시작하였다. 1999년에는 단주기지진계 7대, 가속도계 24대 및 해일파고계 1대를 계약하여 해일파고계 1대는 같은해 11월 울릉도에 설치하였으며, 나머지 지진계들은 이듬해 3월에 설치하였다.

2000년에는 가속도계 21대를 도입하여 주로 기상관측소급의 기관에 설치하였다. 이로써 초광대역지진계 1소, 광대역지진계 11소, 단주기지진계 16소로 구성되는 지진관측망 27소를 구축하였으며, 가속도관측망 68소를 구축하여 어느 정도 조밀한 관측망을 갖추게 되었다. 2001년에는 광대역지진계 1소, 단주기 지진계 1소를 추가하여 지진관측망은 29소가 구축되었으며, 가속도 관측망은 5소가 추가 설치되어 70소를 구축하였다. 또한 2002년에는 단주기 지진계 2소를 추가하여 지진관측망은 31소가 구축되었으며, 가속도 관측망은 5소가 추가되어 75소가 구축되었다. 2003년에는 정읍, 이천에 단주기지진계 2소를 설치하여 지진관측망은 33소로 확충되었다. 2004년 천안, 2005년 보은 관측소를 증설하여 36소로 확충되었다. 현재 기상청에 설치된 초광대역, 광대역, 단주기지진계의 관측소는 Fig. 1과 같으며, 가속도관측소의 분포는 Fig. 2에 도시되어 있다.

2.2. 한국지질자원연구원 지진연구망

한국지질자원연구원은 1982년 IBRD 차관에 의해 지진센서 S-500과 Teledyne사의 아날로그 기록계인

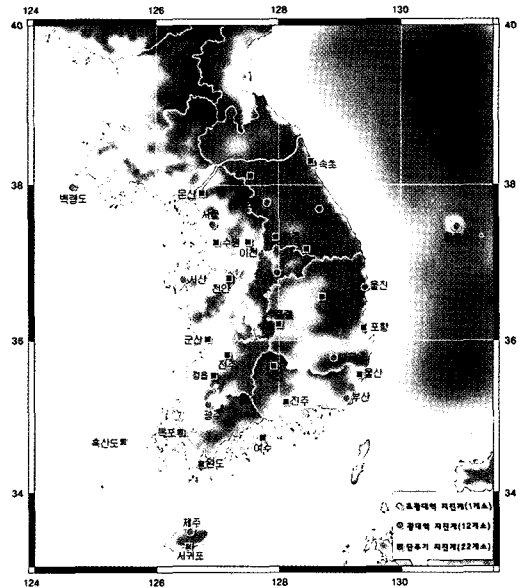


Fig. 1. The broad-band, short-period stations of KMA.

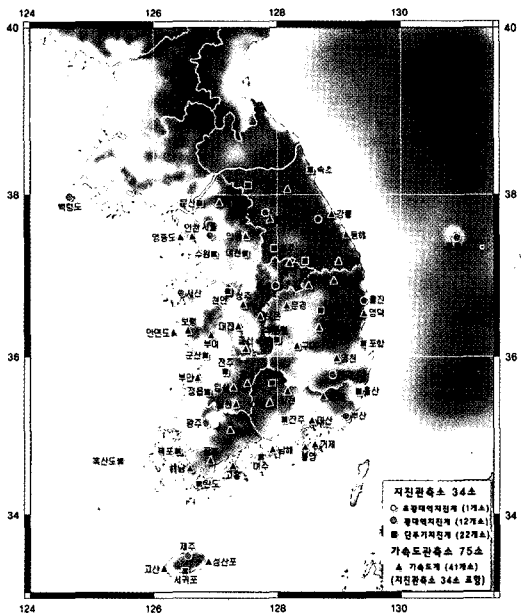


Fig. 2. The accelerograph stations of KMA.

Portercorder 6대로 양산단층 일원에 이동식지진관측망을 구축하는 것을 시초로 하여, 1980년대 매년 약 2~3개월씩 주로 양산단층 일원을 비롯하여 전남 지역과 충청지역에서 이동식 지진관측망을 운영하여 지진 자료를 획득하였다.

1991년 일본과 함께 서태평양과 동남아시아에 걸쳐 광대역 지진관측망을 구축하는 POSEIDON(Pacific

Orient SEismic Digital Observation Network) Project의 일환으로 포항에 광대역지진계 STS-1을 설치하였다.

1994년 월성원전 부근 양산단층 북부 4개의 지역에 3성분 디지털 지진관측소를 설치하여 트리거(Trigger) 방법의 지진자료를 획득하였다. 1995년에는 거제도를 포함한 양산단층 남부에 5개 지진관측소를 추가하였다. 또한 원주 KSRS(Korea Seismic Research Station) 지진자료를 실시간으로 한국지질자원연구원 지진연구센터로 전송받아 분석하고 있다. 1998년에는 미국 SAIC사의 실시간 지진자료 분석 시스템을 도입하여 원주 KSRS자료 뿐만 아니라 유관기관의 지진자료를 전송받아 분석한다.

2000년 3월에 경주시 효동리에 “효동리 종합 지진관측소”를 설치하여 시추공속도, 가속도센서, GPS, 지진관측 시스템을 갖추고 있다. 또한 경상대학교 내에 시추공 관측소를 추가 설치하였다.

또한 2001년부터 디지털 지진관측소를 점진적으로 추가 설치하여 현재 한국지질자원연구원 자체 운영 또는 지진연구 대학과 공동 운영되고 있는 지진연구망 관측소는 2004년 6월 현재 총 30개 관측소로서 광대역관측소는 14소(시추공형: 5, 지표형: 9), 단주기 관측소 14소 그리고 배열식관측소 3소로 구성되어 있으며 초광대역 관측소 1소와 가속도 관측소 16소는 광대역 및 단주기 관측소와 동일 장소에서 운영되고 있다(Fig. 3).

광대역지진계의 지진기록계는 미국의 Quanterra사 Q4128이고, 지진센서는 스위스의 Streckeisen사의 STS-2와 미국 Kinematic사의 ES-T(episensor)이며, 단주기지진계의 지진기록계는 일본 Markrand 사의

JC-V100과 미국 Kinematic사의 ES-T(episensor)이며, 시추공지진계는 미국의 Quanterra사 Q4128과 지진센서는 Gurlap사의 CMG3T-B과 미국 Kinematic사의 ES-DH로 구성되었다.

2.3. 한국원자력안전기술원 및 한국전력연구원 지진관측망

한국원자력안전기술원은 원자력발전소 부지의 지진 안정성 재평가를 위해 각 원전부지 내에 총 4개 관측소(YGN, KRN, WSN, UCN)를 1999년에 설치하여 운영하고 있다. 지진 관측장비의 지진기록계는 미국의 Quanterra사 Q4128, 지진센서는 스위스의 Streckeisen사의 STS-2와 미국 Kinematic사의 ES-T(episensor)를 설치하여 속도와 가속도를 기록하며, 이들 자료는 지진유관기관과 실시간으로 지진자료를 공유하고 있다.

한국전력연구원의 지진관측망은 원전부지 내 및 인근 지역에 지진관측소를 설치하여 원자력발전소의 안정성을 평가하기 위해서 설치된 관측망이다. 1999년 5월에 원전부지 내 및 인근 지역에 8개의 지진관측소를 설치하였으며, 2003년에 한국수력원자력(주)와 공동으로 5개의 관측소를 추가하여 2005년 현재 13개의 관측소를 운영하고 있다. 이들 각 관측소에서 수집된 지진자료는 디지털 전용회선(56 kbps)을 통하여 전력연구원의 지진감시센터로 전송되어 지진분석을 수행하고 있다. 그리고 2003년에 구축된 SRJ, KRC, KR, WSD, UJB는 다이얼업(Dial-up)을 통하여 자료를 획득하고 있다.

지진 관측장비의 지진기록계는 미국의 Quanterra사 Q4128, 지진센서는 일본 Markrand 사의 JC-V100과 미국 Kinematic사의 ES-T(episensor)를 설치하여 속도와 가속도를 기록하며, 이들 자료는 지진유관기관과 실시간으로 공유하고 있다.

3. 지진활동에 관한 연구

어떤 지역의 지진활동을 분석하기 위해서는 그 지역에서 발생한 지진의 진앙지 및 발생시각에 관한 지진자료가 필요하다. 한반도의 지진자료는 약 2000여년에 걸친 역사지진자료와 계기지진자료로 나눌 수 있다.

3.1. 역사지진자료

역사지진자료는 삼국시대의 초기부터 조선시대에 걸쳐, 여러 역사문헌에 서술되어 있다. 역사지진에 관한 연구는 와다(和田雄治, 1912) 이래 여러 연구자에 의하

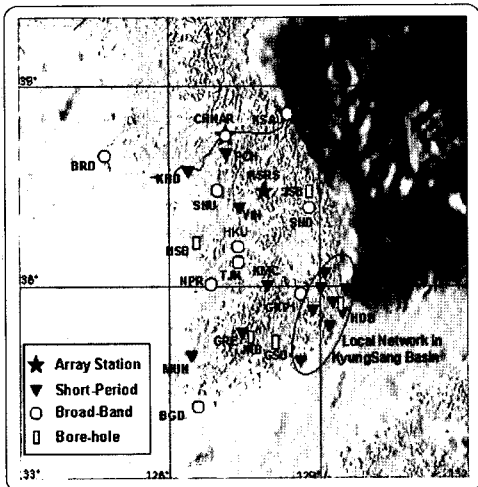


Fig. 3. The seismic stations of KIGAM.

여 수행되어 왔다. 와다(1912)는 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등의 역사문헌 14종으로부터 지진에 관한 기사를 발췌하여, 자신이 만든 진도분류기준(이하 Wada 진도)에 의하여 분류하였다. 그의 진도분류기준은 4등급으로 나뉘어져 있으며, 다소의 피해가 있거나 큰 피해 또는 사상자가 있는 경우는 진도 3, 4를 부여하였다. 진도 3이상의 지진은 총 58개가 추출되었으며, 그 내용을 문헌으로부터 요약하여 제시하였다. 또한 진도 1, 2에 대한 지진으로서 1659개가 추출되었다. 그는 이러한 지진들의 지역별 발생빈도를 분석하여 발생빈도에 따른 진도밀도분포도(震數密度分布圖)를 작성하였다. 또한 무사(武者金吉, 1951)는 한반도 및 일본, 중국의 지진, 지변 및 화산에 대한 기록을 작성하여 제시하였다.

한편 서정희 등(1978)은 와다(1912)의 자료 중 주요 지진에 대한 분석을 수행하였으며, 진도는 Wada진도를 그대로 인용하였다. 또한 김소구(1978)는 와다(1912)의 자료를 재검토하여 Wada진도를 JMA진도로 고쳐 지역별 빈도분포도를 작성하였다. 정봉일(1981)은 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록, 일성록 및 동국문헌비고 등의 역사문헌으로부터 총 1766개의 지진을 발췌하여 지역별 시대별 발생빈도를 제시하였다. 이기화(1990)와 Kyung(1989)이 한반도의 지진활동분석에 이용한 역사지진목록은 근본적으로 정봉일(1981)의 자료와 같다. 그들은 역사문헌중의 지진에 관한 서술을 해석하여 MM진도를 부여하였으며, 진도 VIII, IX, X에 해당되는 지진으로서 각각 23, 37, 1개의 지진을 제시하였다.

엄상호 등(1983)은 원자력발전소의 지진에 대한 안전성을 검토할 목적으로 역사지진과 1905년이래의 계기지진목록을 만들어, 이 목록에 근거하여 한반도의 지진활동도를 작성하였다. 이 연구에서는 와다(1912)의 자료에 나타난 지진기사들을 원래의 문헌으로부터 발췌하여, 역사학자들의 충분한 검토해석을 거쳐 진앙지와 진도를 평가하였다. 특히 이러한 평가에서는 미리 설정된 평가기준에 근거하여 평가함으로써 객관성을 높이고자 노력하였다.

위에서 열거한 역사지진에 관한 연구들은 한반도의 지진활동연구에 기여한 바가 크며, 특히 원자력발전소의 지진에 관한 안전성평가에 크게 활용되어 왔다. 그러나 역사지진에 관한 기사들은 문장으로 서술되어 있으며, 시대적으로 기록의 누락 또는 과장 등이 포함되어 자료의 완전성과 균일성, 통일성이 유지되어 있다고 보기는 어렵다. 이러한 이유로 진앙지나 지진의 규모를 평가하는 데에 있어서 연구자의 주관이 개입되기

쉬우며, 그 결과 지진활동의 해석에 서로 상이한 결과를 얻기 쉽다. 예를 들면, 연구자에 따라 일부 지진에 대한 자료의 누락이 나타나며, 특히 진앙지 결정과 진도평가에 큰 차를 보여주고 있다. 즉 정봉일(1981), Kyung(1989) 및 이기화(1990)에서는 최고진도의 지진을 MM진도 X로 평가하고 있으나, 엄상호 등(1983)에서는 VIII로 평가하고 있다.

위에서 지적한 바와 같이 역사지진자료는 역사문헌 중에 서술적인 문장으로 기술되어 있어 진앙지와 진도평가에 주관성이 개입되기 쉬우며, 시대적으로 인구분포와 세력범위가 다른 여러 왕조의 관점이 다른 역사가들에 의하여 기록된 것이므로 누락과 과장, 오기의 가능성을 인정하지 않을 수 없다. 그 예로서 삼국-고려 시대의 지진기록은 대부분 감진지역이 누락되어 있으며, 기간에 비하여 수록된 지진의 수가 조선시대에 비하여 상대적으로 적다. 물론 이러한 사실은 지진활동의 차로서도 해석될 수 있으나, 고대로 갈수록 작은 규모지진의 누락가능성을 배제하기 어렵다.

건설교통부(1997)는 와다(1912)의 자료 중 Wada진도 2이상의 지진자료를 대상으로, 진앙지와 진도를 평가하였다. 여기서의 진앙지 결정기준은 다음과 같다.

- 감진지역 또는 피해지역을 진앙지로 선택한다.
- 감진지역이 광범위한 경우는 먼저 동일 지진에 의한 진동인가를 확인한다. 만일 동일 지진에 의한 경우는 감진지역중 가장 크게 감진된 곳 또는 감진지역의 중심을 진앙지로 선택한다.
- 피해지역이 광범위한 경우는 가장 피해가 심한 곳 또는 피해지역의 중심을 진앙지로 선택한다.
- 감진지역이나 피해지역이 기술되어 있지 않는 경우는 당시의 수도를 잠정적인 진앙지로 정한다.
- 감진지역이 해안근처에 광범위하게 나타나는 경우는 인접 중국북동부와 서남 일본의 역사기록을 조사하여, 진앙지가 한반도가 아닐 가능성을 검토한다.

진도평가에 있어서 하나의 문제점은 가옥, 성곽과 같은 고대의 구조물과 기초가 현대와 다르다는 점이다. 따라서 현대의 구조물에 대한 피해상황으로 기술되어 있는 MM진도를 적용하기 위해서는 고대의 구조물이 현대의 어떤 강도를 가진 구조물에 대응되는가를 먼저 결정할 필요가 있다. 엄상호 등(1983)이 역사학자 6인의 설문을 통하여 조사한 고대구조물의 재질과 입지는 다음과 같다.

- 재질: 고대 평민가옥의 재질은 흙, 돌, 수수대, 목재 등을 주로 하였고, 지붕은 벗짚이었다.

벽돌집과 기와집은 고려시대 이후 귀족의 가옥에 사용되었고, 시멘트, 철근콘크리트는 사용되지 않았다. 주로 단층집이었으며, 사찰, 궁궐 등은 2층으로도 건축되었다.

- 입지: 고대 가옥의 입지는 산밑 또는 하천가의 발에 흙을 평평히 고른 후 주춧돌을 놓고 건립했다.

위의 재질과 입지를 고려하여, 고대의 민가는 분류상 D급 구조물에 대응되며, 사찰, 궁궐, 성곽 등은 C급 구조물에 대응되는 것으로 간주하였다.

건설교통부(1997)는 진도평가를 위하여, 지진동에 의한 기술을 분류하여 MM 진도척도와 대응시키기 위한 진도평가기준이 작성하여 역사지진 목록을 재작성하였다. 목록이 작성된 지진은 MM진도 V이상의 지진 총 389이다. 조선시대 이전의 진앙지는 대부분 역사문헌에 명시되지 않거나 당시의 수도에만 감진기록이 있는 관계로 그 시대의 수도에 지진이 집중되어 발생한 것처럼 나타난다. 이러한 결과는 실제의 지진활동을 그대로 반영하기 보다는 고대의 인구분포, 지진발생에 대한 보고체제상의 결과로 해석할 수 있을 것이다. 이에 반하여 조선시대는 진앙지가 한반도전체에 걸쳐 분산되어 나타난다. 진앙지의 공간분포를 고찰해 보면, 한반도의 동해안쪽 보다는 서해안쪽의 지진활동이 상대적으로 활발하며, 한반도남부의 동서방향으로 지진활동이 활발한 지역이 나타난다.

작성된 목록으로부터 시대별로 지진활동을 검토해 보면 지진활동은 조선 중기 즉 16-18세기에 특히 활발했음을 보여주고 있다. 물론 고대로 갈수록 작은 지진의 누락 가능성이 크다는 사실을 인정할 수 있다. 그러나 비교적 진도가 큰 피해지진의 발생빈도를 비교하더라도 조선 중기의 지진활동이 상대적으로 활발했다고 볼 수 있다.

결론적으로 진앙지의 분포, 진도별 누적발생빈도 등을 참조할 때, 조선시대이전의 역사기록은 통일성과 완전성이 결여되어 있어 확률론적인 지진재해계산에 사용하기 위해서는 특별한 주의를 요한다는 사실이 밝혀졌다. 이에 반하여, 조선시대의 역사기록은 진도 5이상에 대해서는 비교적 누락의 가능성이 적다고 볼 수 있다.

한편 이기화(1998)는 한반도의 역사지진자료를 재편집하여 발표하였다. 그가 발표한 목록은 약 1900여 회의 역사지진자료로 되어 있으며, 그 내용을 요약하면 아래와 같다.

이 지진들의 진앙과 진도는 지진기록과 감진지역에 의하여 분석되었다. 그 결과 대부분의 지진들이 중생

대의 지각변동들의 영향을 가장 적게 받은 북동부를 제외하고는 반도내의 주요 단층이나 지체구조의 경계를 따라서 발생하였음이 발견되었다. 중생대의 지각변동으로 한반도 남부지역과 북서부지역의 지각이 심하게 파쇄되었고 이 때 생성된 단층들의 일부가 현재까지 지진을 발생시켜 온 것으로 추정된다. 한반도의 지진활동은 제 1세기~14세기 간에 비교적 낮은 편이었으나 15세기~18세기에는 이례적으로 매우 높았고 그 이후로는 다시 낮은 상태가 지속되고 있다. 이례적으로 높은 지진활동의 기간은 중국 북동부와 일치하며 이는 이 두지역의 지진활동이 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다. 한반도의 지진활동은 주로 히말라야 산맥에서 유라시아판과 인도판이 충돌할 때 발생하는 응력에 기인하는 것으로 여겨진다. 한반도의 역사지진자료 목록은 아직 완전하다고 볼 수 없으며 이 방면의 연구가 현재도 진행 중에 있다. 본 논문의 주목적은 현재까지 분석된 한반도 역사지진의 목록을 이러한 자료를 필요로 하는 국내 지구과학자와 공학자에게 제공하는 데에 있다고 기술되어 있다.

3.2. 계기지진자료

최근 한반도 주변에서 발생하고 있는 지진들은 비교적 크기가 작고 지역적으로 산만하게 분포하는 판내부 지진(intra-plate earthquakes)의 특징을 보인다. 한반도에서 비교적 상세한 지진자료는 1978년 이후 기상청에서 발표한 것으로 약 20년 동안의 기록뿐이다. 그러나 판내부지진의 경우 큰 지진의 발생 주기가 천년 내외이므로 한반도 주변의 지진특성을 이해하기에는 자료가 매우 부족한 실정이다.

전항에서 언급한 바와 같이, 지진자료는 역사지진과 계기지진으로 나뉘어 진다. 계기지진의 경우 20세기 초반과 후반의 자료는 그 정확도와 신빙도의 차이가 매우 크다. 20세기 전반의 지진자료는 최근의 자료와는 정확도에서 차이가 매우 크고, 기술방법이 역사지진과 유사하여 진앙지가 명시되어 있지 않아 이들 지진의 진앙을 재결정할 필요가 있다. 또다른 지진요소인 규모(Magnitude)의 개념은 1935년 Richter에 의해 제안되어, 일반화된 것은 1950년대 이후이기 때문에 20세기 초반 지진 자료로부터 이들의 규모를 결정하는 것도 역시 매우 중요하다.

따라서 전명순과 전정수(2001)는 1905년부터 1942년까지 38년간의 초기 계기지진 자료를 발굴, 재정리하여 1977년까지의 계기지진목록을 재작성하였다. 그러나 1943년부터 1977년까지 35년간은 조선지진연구

소에서 발표한 지진목록 외에 특별한 자료가 없는 실정이므로 이들 자료를 이용하였다. 이하에 전명순과 전정수(2001)를 요약하여 정리한다.

3.2.1. 초기 계기지진 자료 (1905-1942)

우리나라에서 지진계에 의한 관측은 1905년 3월 24일부터 조선총독부의 인천 관측소에서 시작되었다. 그 이후 지진관측소는 계속 증가되어 1937년에는 인천과 서울, 부산, 대구, 평양 및 추풍령 등 6곳에서, 1941년 11월에는 원산에서 계기지진 관측이 보고된 것으로 보아 7개 관측소에서 지진계에 의한 지진관측을 수행되었고 이는 아마도 해방 전까지 계속된 것으로 추측된다. 이 연구에서 자료의 수집은 주로 일제시대 조선총독부 기상대에서 운영한 지진관측보고서의 기록을 중심으로 하였으며 중국, 일본 및 국제지진자료는 진앙 위치, 규모 등의 진원요소 결정을 위한 참고자료로 사용하였다. 사용된 참고문헌은 다음과 같다.

- “中國地震目錄” (B.C. 1831-A.D. 1969)
- “朝鮮古今地震考” (2-1912)
- “朝鮮地震目錄” (2-1983)
- “黃海及其周圍地區歷史地震” (2-1949)
- “朝鮮地震報告” (1905-1912)
- “朝鮮氣象30年報” (1905-1934)
- “International Seismological Summary” (1905-1942)
- “Annual Report of the Meteorological Observatory of the Government-General of Tyosen” (1916-1933)
- “地震年報” (1933-1938)
- “Annual Report of the Weather Bureau of Tyosen” (1935-1939)
- “朝鮮總督府氣象臺 地震年報” (1940)
- “朝鮮總督府觀測所 彙報” (1940)
- “朝鮮氣象要報” (1940년 1월-1942년 5월)
- “The catalogue of major earthquakes which occurred in Japan (1885-1950)”

초기 계기지진자료(1905-1942)는 당시 운영되었던 지진계의 숫자와 분포가 제한되어 양질의 지진요소(발생 시각, 진앙, 진원깊이, 규모)를 결정하기는 어려웠다. 1905년부터 1942년까지 38년간 총 533개 지진이 보고되었으며, 이 기간 동안의 연간 지진발생빈도는 평균 14회에 달한다.

이 연구에서 정리한 자료 중 일부는 황해, 동해 및 한반도에 가까운 일본쪽에서 발생된 자료들도 포함되

어 있으며, 이들 지진은 비교적 규모가 큰 지진으로 일본과 중국의 자료에 포함되어 있는 것으로 본 연구에서는 정확한 진앙 및 규모를 결정하는데 참고 자료로 사용하였다.

지진계에 의한 지진자료가 부족한 우리나라 상황에서 초기 계기지진자료의 정리는 한반도 및 인근의 지진발생 양상을 이해하는데 매우 중요하다. 김상조(1980)와 Lee and Jung(1980)은 1926년부터 1943년까지의 계기지진을 정리한 바 있다. 그러나 Lee and Jung(1980)의 경우는 청주, 춘천, 공주, 이리 등의 지진기록을 사용하였으나, 본 연구에서 이들 지진관측소는 존재하지 않았음이 확인되었고, 원산의 지진관측은 1941년 말부터 시작된 것으로 확인되었으나 이들의 연구에는 1930년대부터 원산의 지진기록이 등장하고 있다. 따라서 본 연구에서 정리한 지진자료는 연구 대상 기간동안 지진활동 및 특성을 나타내는 중요한 자료로 판단된다.

총 533개 초기 계기지진 기록 중 이 연구에서는 일차적으로 진앙이 결정되고 지진계에서 진폭이 기록된 60개 지진에 대해 규모를 산정했다. 규모결정을 위해서는 연구대상 기간동안 동일한 기종의 지진계를 사용했던 일본기상청에서 규모 결정에 적용한 Tsuboi공식(Tsuboi, 1954)을 사용했다.

1905년부터 1942년까지 정리한 533개의 지진 중 진앙과 규모가 결정되지 않은 나머지 지진들 중에는 진앙의 위치 및 규모는 표시되어 있지 않지만 감진지역이 기록된 지진이 다수 포함되어 있다. 측정된 진폭으로부터 Tsuboi(1954) 경험식에 의해 규모가 결정된 60개의 지진 중 13개 지진의 경우 감진지역도 표시되어 있으므로, 이들 13개 지진으로부터 감진면적(A)과 규모(M)와의 상관관계식을 구한 후, 감진지역만 표기된 지진에 대해서는 감진지역의 중심을 진앙으로 감진면적으로부터 규모가 결정되었다. 이와 같은 방법으로 진앙지와 규모(Tsuboi, 1954)가 74개 지진에 대하여 결정되었으며 진앙지의 분포는 남한에서는 지리산일대, 한반도 중부 및 홍성일대, 북한에서는 평양일대에 집중된다. 이는 1978년 이후 기상청에서 보고된 진앙의 분포와 대체로 일치한다. 그 밖에 쓰시마해협에서 동해 중부까지 북동 방향의 연장을 보이고, 만주와 황해에 약간의 지진활동을 보인다.

3.2.2. 북한 지진자료(1943 - 1977)

1943년부터 1977년까지 35년 동안 남한에서 지진자료는 획득되지 못하였다. 그러나 북한의 조선지진연구

소(1984)는 서기 2년부터 1983년까지의 지진목록을 작성, 발표하였다. 즉, 서기 2년부터 1889년까지 총 1843개의 역사지진, 1901년부터 1959년까지 58년 동안에 238개의 지진, 또한 1960년부터 1983년까지 24년 동안에 287개의 지진을 포함하여 1981년간 한반도에서 발생한 총 2366개 지진의 발생일시, 규모, 진도 및 간략한 진앙위치를 기술하고 있다. 이것은 이 기간 동안의 한반도에서의 지진활동에 대한 유일한 지진자료이므로, 이 연구에서의 목록작성에서는 1943-1977년 사이의 경우 조선지진연구소의 자료를 이용하였다. 그러나 조선지진연구소에서 결정한 규모에 대해서는 학자들간에 이견이 있으며, 초기 계기지진자료나 기상청 자료와의 일관성을 유지할 필요성이 있다.

3.2.3. 기상청 지진자료(1978-2005)

기상청은 1977년 서울과 광주에서 관측을 시작한 이래로 1980년대 말에 서울, 강릉, 추풍령, 광주, 부산, 및 서산의 6개소에서 지진관측을 시작한 이래 현재 12개소의 광대역 관측소와 34개소의 단주기 관측소 및 75개소의 가속도 관측소를 운영하고 있으며, 이들 관측자료로부터 결정된 지진요소들을 종합하여 지진예보를 발간하고 있다. 따라서 1978년 이후의 계기지진자료는 기상청의 지진자료를 그대로 이용가능하다.

결국 위의 지진자료들(초기지진 자료, 북한 지진자료, 기상청 자료)을 종합, 편집하여 계기지진 목록이 작성되었다(건설교통부, 1997). 이 목록외에도 개별적 연구에 의해 작성된 지진목록(예를 들면, 엄상호 등(1983))은 다수 존재한다.

3.3. 한반도의 지진활동

한반도의 지진활동에 관한 연구는 여러 연구자에 의하여 수행되었다(김소구, 1980; 이기화 등, 1986, 1987, 1988, 1989; Kyung, 1989, 김성균, 1997; 김우한 등, 2004). 이기화 등(1986, 1987, 1988, 1989)은 한반도의 지체구조별로 지진활동에 관한 일련의 연구를 통하여, 대부분의 지진활동이 지체구조선 밀도가 높은 곳에서 발생했다고 보고했다. 한편 Kyung (1989)은 한반도의 지진활동의 시공간 특성, 도상식별을 통한 대지진 발생의 양상, 지진활동과 지형, 중력 등의 관계를 종합적으로 폭 넓게 연구하였다. 김우한 등(2004)은 한반도와 한반도 주변의 지진지체구조 연구를 통하여, 한반도의 지진활동에 대하여 분석하였다. Fig. 4 및 Fig. 5에 이 연구에서 작성된 지진목록을 이용하여 역사지진 및 계기지진 활동도를 제시한다. 지진활동의 공간

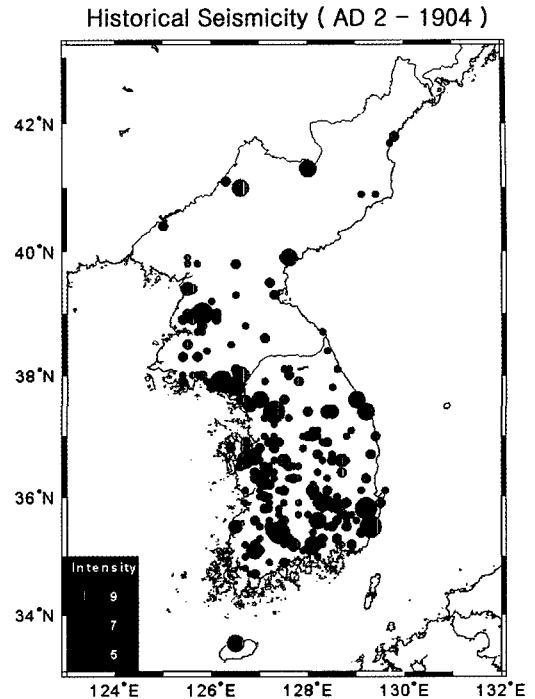


Fig. 4. Historical seismicity from A.D 2 to 1904.

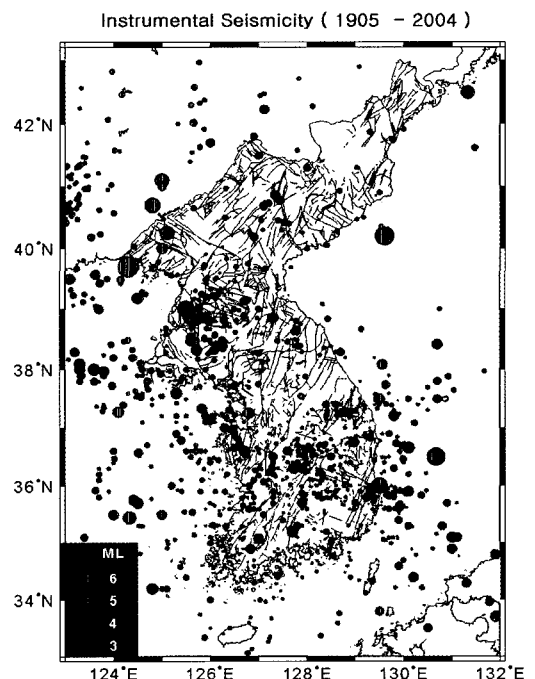


Fig. 5. Instrumental seismicity from 1905 to 2004.

분포는 대체로 서해안쪽이 활발하며, 한반도 남동부에서 서북서 방향으로 활발한 양상을 보여준다. 한편 시

Table 1. Focal mechanism analysis results of 27 events occurred in and around the Korean Peninsula. (Modified Jun *et al.*, 1999).

No.	Date	Location		Mag.	Nodal plane 1		Nodal plane 2		P-axis		T-axis	
		ϕ° N	λ° E		ϕ_s	δ	ϕ_s	δ	Az.	Dip.	Az.	Dip.
1	1936.07.04	35.20	127.60	5.1	14	64	121	60	67	3	335	42
2	1963.09.06	36.47	130.76	5.7	32	69	129	72	260	2	351	28
3	1963.09.07	36.53	130.79	5.8	25	61	122	79	250	12	347	29
4	1973.11.24	40.25	125.13	4.0	30	70	125.5	75	76.2	3	168	25
5	1976.10.06	35.31	124.18	5.4	199.5	61.8	306.8	61	253	1	163	43
6	1978.08.29	39.18	124.50	4.6	30	75	120.5	84	74.5	5.5	166	15.6
7	1978.11.23	38.37	125.65	4.5	43	75	308.5	75	86	22	176	11
8	1979.12.25	38.82	126.28	3.7	220	70	318	70	268.5	1	358	29
9	1980.01.07	40.22	125.02	5.1	215.7	62.3	309.1	83.6	79	15	176	24
10	1980.07.25	38.88	125.75	3.6	213	65	308	79	258	10.5	353	25
11	1980.09.20	38.30	130.70	4.9	210	60	66	35.5	316	14	83	67
12	1981.04.15	35.78	130.10	5.2	312	75	219	79	266	3	175	19
13	1981.11.19	40.42	127.53	3.4	218.5	80	124	70	262.5	22	169.5	7
14	1982.02.14	38.46	125.65	5.3	245.2	43.8	100.6	52	72	71	174	4
15	1982.02.28	37.00	129.52	4.6	33	75	128.2	70	261.2	4	170.5	26
16	1982.03.27	37.58	125.10	3.7	31	70	126.5	75	78.5	3.5	170	25
17	1982.08.28	37.13	125.90	4.2	37.5	70	137	65	267.8	3.5	176	33
18	1983.01.10	38.79	125.67	3.7	78	59	174	80	220	29	121.8	14
19	1983.09.17	38.33	126.07	4.0	214	85	123	75	259	14	167	10
20	1983.10.11	38.83	125.65	3.8	83.5	80	175.5	80	220	14	310	1
21	1987.04.30	39.48	124.15	3.6	215	70	123	85	256	18	350	10
22	1994.07.25	35.00	124.51	5.5	215.2	37	327.4	74.1	82.5	21.8	200	49.3
23	1996.12.13	37.30	128.80	4.5	181	50	292	65	58	8	158	30
24	1997.06.26	35.82	129.18	4.3	135	52	25	66	83	9	344	46
25	2003.03.23	34.97	124.44	4.9	340	60	200	35	84	13	209	68
26	2003.03.30	37.71	123.83	4.7	345	45	180	50	262	1	169	83
27	2004.05.29	36.63	130.05	5.1	337	56	178	36	76	10	210	77

간접적인 지진발생의 빈도를 조사해 보면, 관측초기에 비하여 최근의 발생횟수가 급증하는 것처럼 보인다. 그러나 이것은 지진관측소 밀도의 증가와 지진계 성능의 향상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 왜냐하면 관측소가 지리적으로 적절히 분포되어 있고 그 수가 많고 지진계의 성능이 좋을수록, 지진관측의 기회가 증가하기 때문이다.

3.4. 지진원 특성 분석

한반도 및 인접지역에서 발생한 지진에 대한 지진원 특성자료를 23개를 수집하였으며(전명순 등, 1999), 그 외 최근 발생한 지진 중 규모 4.0 이상인 4개 지진에 대한 focal mechanism을 구하여 총 27개 지진의 focal mechanism을 구하였다(Table 1).

Fig. 6은 27개 지진의 발생위치와 focal mechanism을 표시한 것으로 한반도 및 인접지역에서 발생한 지

진의 대부분은 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘과 다소의 역단층 운동이 첨가된 단층운동 특성을 보여준다. 그러나 중부 동해안에서 역단층 운동에 의한 지진이 나타나고 황해도 지역에서 정단층 운동에 의한 메카니즘이 나타나는데 이는 지역적인 현상으로 판단된다.

Fig. 7은 인접국인 일본 및 중국지역에서의 주응력축의 방향을 동시에 표시한 것으로, 한반도 및 주변에서 단층작용을 일으킨 주응력 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향을 나타낸다(전명순 등,1999). 같은 판내 지역인 중국 자료와 비교하면 주응력 방향이 매우 유사하고 동해 동부와는 상당한 차이를 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향도 상당히 작용하는 것으로 해석된다.

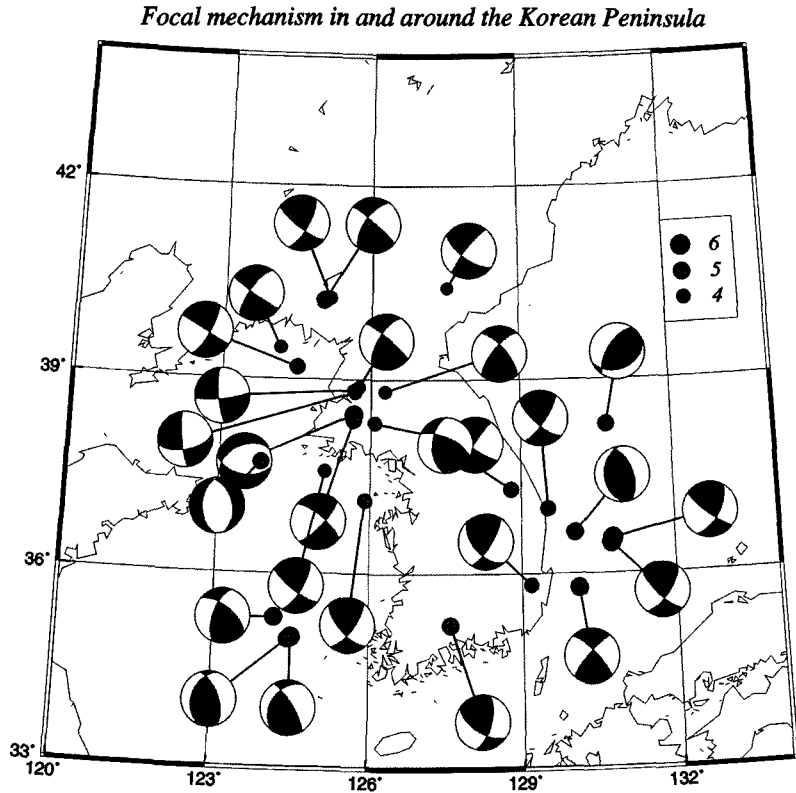


Fig. 6. Focal mechanisms of 27 events in and around the Korean Peninsula (modified Jun *et al.*, 1999).

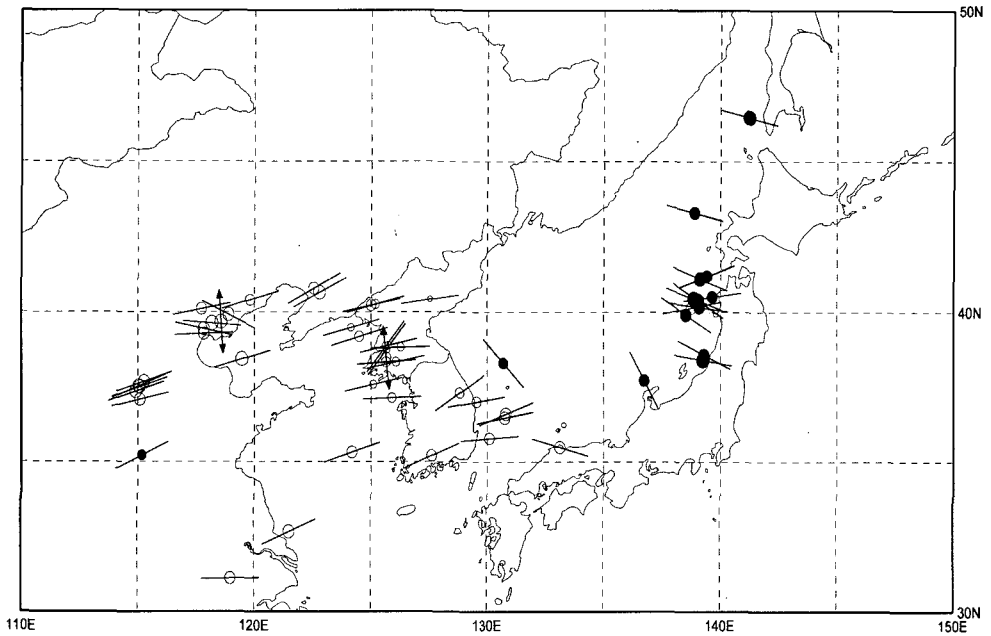


Fig. 7. Direction of major stress axes in and around the Korean Peninsula (after Jun *et al.*, 1999).

4. 지각구조에 관한 연구

어떤 지역 내의 지진활동을 비롯하여 지진과 단층과의 관련성 및 지진발생 메커니즘을 규명하기 위해서는, 상세한 지각 및 상부 맨틀의 지진파속도 구조가 알려져야 한다. 한반도의 지각구조에 관한 연구는 중력과 지진자료를 이용하여 수행되어 왔다. 중력자료 해석에 의한 연구결과(Kim, 1979; 최광선, 1986; Kwon and Yang, 1985)에서는 모호면의 평균심도와 기복이 등고선의 형태로 제시되어 왔다.

한편, 지진자료에 의한 연구결과로서, Lee (1979)는 쌍계사지진의 주시자료를 이용하여 개략적인 지각구조를 얻었으며, 김상조(1983)는 쌍계사지진, 홍성지진 등의 자연지진기록을 해석하여 지각을 포함한 상부맨틀까지 좀 더 세분된 지진파속도 구조를 제시하였다. 또한 김성균 과 정부홍(1985)은 한반도 남부지역에서의 인공발파에 의한 주시자료를 이용하여 지각내의 지진파 속도구조를 결정하였다. 그러나 상기의 연구들에서 결정된 구조는 사용된 자료에 따라 서로 다를 뿐 아니라, 제시된 구조자체가 너무 단순하다. 그 이유로서는 이용한 자료자체가 불충분하며, 개개의 연구에서 각각 다른 자료와 해석방법을 채용하였기 때문으로 생각된다.

북미 대륙을 포함한 유럽, 일본의 지각구조에 관한 연구는 Moho면과 Conrad면의 발견이후 국지적으로 다양하게 수행되어 왔다. 그 대표적인 예로서 중력과 지진파의 굴절주시를 상호 보완적으로 이용한 연구, 표면파의 분석해석을 이용한 연구 등을 들 수 있다. 중력자료의 해석에 의한 지각구조의 결정은 밀도차에 관한 정보의 결핍과 중력해석 자체의 약점으로 단일한 해를 얻기 곤란하다는 것이 잘 알려져 있다. 또한 자연 지진자료를 이용하는 경우에는 진앙지를 비롯한 발생시간, 심도를 결정하기 위하여 처음에 가정한 속도구조가 결과에 반영되는 난점과 저속도층의 검출이 어려운 약점이 있다. 여기서는 중력연구에 의한 지각구조 연구를 제외하고, 지진파 속도구조에 의한 지각구조 연구만을 대상으로 한다.

4.1. Lee, K.H.(1979)의 지진파 속도구조

Hayata (1940)는 1936년에 지리산 남측 쌍계사를 중심으로 발생한 지리산 지진($M_L=5.0$)에 대하여 상세한 조사보고서를 작성하였다. 이 보고서에는 피해상황이 상세히 보고되어 있으며, 11개 관측소에 대한 초동의 도달시각과 P-S시각이 수록되어 있다. Lee (1979)는 이 주시자료를 이용하여 지진파 속도구조를 계산하였다.

그는 P파속도 5.8 km/sec, 두께 35 km인 지각아래에 7.7 km/sec의 속도를 가진 모호면이 존재하는 단순한 지각구조 모델을 제시하였다. 그 후의 지진파속도구조 모델이 얻어질 때까지 이 모델은 한반도의 개략적인 지각구조를 나타내는 모델로서의 가치를 가지고 있었다고 할 수 있다. 그러나 이 모델을 얻는 데에 이용한 주시자료의 수가 너무 적고 시각에 대한 해상도가 낮아, 현재로서는 이용가치를 상실한 모델이라고 볼 수 있다.

4.2. 김상조(1983)의 지진파 속도구조

이 논문에서는 한반도내에서 발생한 근거리 지진들을 이용하여 지각구조모델을 도출하였으며, 이에 의한 주행시간표를 작성하였다. 그가 이용한 자료는 1936년의 지리산지진, 1978년의 홍성지진, 1981년의 포항지진, 1982년의 사리원지진과 울진지진 자료이다. 이들 지진의 진앙지와 발생깊이 및 발생시간은 중앙기상대(현 기상청), 미국지질조사소, 일본 기상청 등의 자료를 이용하여 재검토되었다. 이 논문에서는 P파와 S파의 직접파는 물론이고, Pg, Sg, Pn, Sn 등의 위상들을 속도구조 결정에 이용하고 있다.

자연지진의 주시자료를 대상으로 하여 지각내의 지진파 속도구조를 구하는 경우, 진앙지, 발생심도 및 발생시각을 결정하기 위하여 어떤 특정의 구조를 미리 가정하기 때문에 결과적으로 얻어지는 속도구조에 초기에 가정한 구조와 관련된 계통적 오차가 포함되기 쉽다. 이러한 관점에서 이 논문에서 얻은 속도구조에는 초기에 사용한 속도구조가 상당한 영향을 주었을 것이다. 또한 이 논문에서는 여러 위상들을 속도구조 역산에 이용하고 있으나, 사용한 자료가 아날로그 기록이고 시각에 대한 해상도가 낮아서, 결과적으로 얻어진 속도구조 모델에 이 영향이 직간접적으로 포함되어 있으리라 생각된다.

이 연구에서 얻어진 속도구조는 지각이 Conrad불연속면을 경계로 상부지각과 하부지각으로 나뉘며, 모호면 아래에 저속도층의 존재를 제시하고 있다. 이 저속도층은 사리원지진의 발생 깊이를 상부맨틀로 간주하여 얻어진 것이다. 일반적으로 지진의 발생 깊이는 진앙지에 비하여 불확실의 정도가 크기 때문에 본 논문에서 제시한 저속도층의 존재여부는 단정하기 어렵다고 볼 수 있다.

4.3. 김성균과 정부홍(1985)의 지진파 속도구조

지구 표층부의 지진파 속도구조는 지역성이 커서 지

역에 따라 다양하게 나타난다. 이러한 표층부의 구조는 자연지진 또는 인공지진의 주시자료로부터 얻을 수 있다. 앞서도 지적한 바와 같이, 자연지진을 대상으로 하는 경우 어떤 특정의 구조를 미리 가정하게 되므로 결과적으로 얻어지는 속도구조에 초기에 가정한 구조와 관련된 계통적 오차가 포함되기 쉽다. 따라서 이 연구에서는 지진원의 위치가 확실한 자연지진만을 대상으로 하여 속도구조를 결정하였다.

이 자료는 경상분지를 포함한 남부지역의 자료로부터 결정된 것이기 때문에 본 연구에서 얻어진 지진파 속도구조는 한반도 전체보다는 남부지역에서만 사용하는 것이 바람직하다.

4.4. 김성균(1995)의 지진파 속도구조

이 연구에서는 중력, 지진파 주시자료 및 표면파 분산자료를 사용하여 지진파 속도구조를 결정하였다. 먼저 중력 이상의 2차원 파워 스펙트럼으로부터 지하밀도 불연속면의 깊이를 계산하였으며, 다음으로 인공발파와 지진자료에 의한 주시곡선을 분석하여, 지진파 속도구조를 얻었다. 여기서 얻어진 속도구조는 관측된 레일리파의 분산곡선을 만족하도록 조정되었다.

이 연구에서는 김성균과 정부홍(1985)과 인공지진 주시자료와 기상청(1993)이 발간한 1972-1992년의 지진자료를 사용하였다. 인공지진자료에 포함된 시가에 대한 오차는 0.125 sec 정도로 평가되며(김성균과 정부홍, 1985), 자연지진 자료의 경우는 종래의 기록시스템이 중앙집중식이 아닌 독립된 것이고 시각장치의 결함때문에 시가에 대한 오차는 0.5 sec 정도가 될 것으로 추정된다.

앞에서 지적한 바와 같이 자연지진 자료의 경우에 초기에 가정한 구조가 결과에 영향을 주기 때문에 반복법으로 속도구조를 결정하였다. 먼저 김성균과 정부홍(1985)이 제시한 속도구조를 초기의 구조로 입력하여 1972-1992년에 발생한 지진들의 진앙지, 발생심도 및 발생시각 등의 지진요소들을 재결정한다. 물론 인공지진자료는 발생원의 위치가 확정적이기 때문에 그대로 사용이 가능하다. 다음으로 재결정된 자연지진자료와 인공지진자료를 이용하여 얻은 지진파의 주시-거리 관계로부터 새로운 속도구조를 계산한다. 이때 초동도 달시각의 계산치와 관측치의 차가 0.5 sec 이상의 자료는 주시자료에서 제외하였다. 이와 같이 결정된 구조가 전 과정의 구조와 거의 일치할 때 계산이 종료되며, 그렇지 않은 경우는 앞의 과정이 반복 실행된다.

지진파 속도구조는 자료의 양과 질을 고려하여 수평 다층구조로 가정하여 계산하였다. 인공지진 자료의 경

우는 항상 발생원이 지표에 위치하지만 자연지진의 발생심도는 지표면에 국한되지 않는다. 자연지진자료를 인공지진 자료와 함께 사용하기 위하여 발생심도가 10 Km 이하인 자연지진의 주시자료를 보정, 사용하였다. 속도계산에는 76개의 인공지진 주시자료와 57개의 자연지진자료가 이용되었다. 여기서 120 km 이내의 근거리에는 인공지진자료가 그 이상의 진앙거리에는 자연지진 주시자료가 대부분이다. 이 자료를 만족하는 4개의 회귀직선으로 부터 지진파 속도구조가 얻어진다. 여기서 얻어진 S파의 속도는 지진기록에서 S파의 위상이 불분명한 경우가 많기 때문에 P파속도에 비하여 부정확한 값으로 볼 수 있다. 지각은 표층과 상부 및 하부지각으로 나누어지며, 지각의 두께는 32.8 km 로서 중력자료해석으로 얻어진 32.6 km와 거의 일치한다. 최종적으로 그는 중력과 지진파 주시자료를 만족하는 지각구조에 추가하여, 표면파의 분산곡선을 만족하는 지각구조를 구했다.

4.5. Kim, S.G. and Li, Q(1998a, 1998b)의 지진파 속도구조

본 2편의 논문에서는 직접파, 반사파, 굴절파에 의한 토모그래피 역산법을 이용하여 한반도의 남부지역(1998a)과 중부지역(1998b)의 3차원의 지진파 속도구조를 제시하였다.

먼저 남부지역에서는 44개 지진에 대한 554개의 지진파선, 중부지역에서는 32개 지진에 대한 404개의 지진파선이 이용되었으며, Pg, Sg, PmP, SmS, Pn 및 Sn의 주행시간을 자료로서 채택하였다. 토모그래피 역산에서는 수평방향으로 경위도를 0.5° 간격으로, 수직방향으로는 4 km 두께로 분할하였으므로, 각 블록의 크기는 0.5°×0.5°×4 km가 된다.

남부지역에서 퇴적암의 평균속도는 5.04 km/sec, 두께는 3-4 km이고, 기반암의 평균속도는 6.11 km/sec로 나타난다. 또한 상부지각에서의 수평 속도분포는 변화가 매우 크며, 하부지각에서의 수평속도분포는 거의 일정하게 나타난다. 모호면의 평균깊이는 30 km 정도이며, 상부맨틀의 속도는 8.0 km 정도로 보인다.

한편, 중부지역에서 퇴적암의 평균속도는 5.15 km/sec, 두께는 3-4 km이고, 기반암의 평균속도는 6.12 km/sec로 나타난다. 또한 남부지역과 마찬가지로 상부지각에서의 수평 속도분포는 변화가 매우 크며, 하부지각에서의 수평속도분포는 거의 일정하게 나타난다. 모호면의 평균깊이는 30 km 정도이며, 상부맨틀의 속도는 7.97 km 정도로 보인다.

본 연구는 최근의 토모그래피 기법을 이용하여 상세한 3차원의 구조를 얻으려 했으나, 사용한 자료의 질과 각 위상의 시각에 대한 해상도가 낮아 얻어진 결과에 상당한 오차가 내재되어 있는 것으로 판단된다. 즉 본 연구에서 사용한 자료의 일부는 아날로그 자료로 시각의 해상도가 지극히 낮은 기상청의 자료이다. 이 자료의 시각에 대한 해상도는 60초가 60 mm로 되어 있어, 시각에 대한 해상도는 0.5초 이상이다. 더구나 과거의 기상청자료는 각 관측소에서의 시각의 동시성이 보장되어 있지 않다. 다른 하나의 문제는 지진기록에서 각 위상을 읽을 때의 문제로써, Pg, Sg, PmP, SmS, Pn 및 Sn과 같은 위상의 식별이 곤란한 경우가 많다. 이러한 관점에서 본 연구에서 얻어진 결과가 실제와 잘 맞을런지는 의문이다.

4.6. 이승규와 김소구(1998)의 지진파 속도구조

본 연구에서는 원격 수신합수를 이용하여 서울과 인천관측소 하부의 지각내 지진파 속도구조를 계산, 제시한 것이다. 서울, 인천지역에서의 콘라드 불연속면의 깊이는 21-22 km의 깊이에 있는 것으로 보이며, 모호면의 깊이는 서울에서 약 30 km, 인천에서 30-34 km에 존재하는 것으로 나타난다. 또한 지진파 속도는 거의 직선적으로 증가하며, 모호면에서 급증하는 결과를 얻었다. 이 속도구조는 서울-인천 부근의 상세한 구조를 나타내고 있으나, 국지적인 구조이므로 한반도 전체에 대한 대표치로 볼 수 없다.

4.7. 정태웅(1995)의 지진파 속도구조

11개 지진관측소가 설치된 1991년부터 1994년 사이에 일어난 11차례의 지진의 초기미동 자료를 이용하여 한반도 지각구조를 구하였다. 선형적 정보를 가미한 정량적 역산을 행한 결과, 지각은 $15.00 \pm 0.03 \text{ km}$ 와 $6.40 \pm 0.02 \text{ km/s}$ 의 두 층으로 이루어졌으며, $32.02 \pm 0.25 \text{ km}$ 깊이의 모호면 밑에 $7.83 \pm 0.05 \text{ km/s}$ 속도의 상부 맨틀층이 존재하는 것으로 해석되었다. 관찰자료로부터 지각속도는 비교적 잘 결정된 반면, 저속도일 것으로 예상되는 표층의 존재는 확인되지 못하였다.

4.8. Chang and Baag(2005)의 연구

1999년부터 2003년까지 한반도 남부에 위치하고 있는 22개의 광대역 관측소에 기록된 원거리 지진으로부터 구한 수신합수와 표면파 분산을 유전자 알고리즘을 기반으로 함께 사용하여 한반도 남부의 지각구조를 계산하였다. 역산으로 구한 모호면의 깊이는 내륙에서 26~36 km에 이르며, 일반적으로 지표면의 지형과 일치한다. P파의 평균속도는 6.02~6.51까지 분포하며 (Fig. 8), 몇몇 관측소 하부에서는 8~10 km깊이에 뚜렷한 불연속면이 관측되었다.

4.9. 한반도 지각속도구조 연구(<http://bh.knu.ac.kr/~jung/>)

한반도 지각속도구조연구는 경북대학교 이정모 교수를 연구책임자로 하는 연구팀에서 수행하여 왔다. 지각 속도구조는 지진이 발생한 진원의 위치와 지진규모를 정확히 알아내는데 필수적이다. 또한 지진으로 인한 지반 진동의 크기를 예측하기 위해서는 지진파가 생성되어 전달되는 지각구조를 파악하여야 한다. 이를 위해서는 개략적이며 광역적인 지각 구조와 지역적인 세부 구조 연구가 수행되어야 한다. 이러한 연구결과 파악된 한반도 지각구조에 관한 신뢰할 수 있는 정보와 양질의 지진자료를 바탕으로 한반도에서 발생한 진원 위치를 정확히 계산함으로써, 지진파 단층(선구조)의 관계를 설정할 수 있을 것이다. 그 동안 국내 지진 관측망 미비, 한반도 내부의 낮은 지진 발생 빈도 등의 이유로 양질의 지진자료를 구하기 어려운 형편이었다. 그러므로 지진자료를 이용한 지각속도 구조에 대한 연구가 극히 제한적으로 이루어질 수밖에 없었다. 이 연구에서는 최근에 국내의 여러 지진관측망에서 축적된 지진기록을 이용하고, 시범지역을 선정하여 굴절 단성과 탐사를 수행하였다. 2002년도에는 서산-영동-경주를 잇는 선상에 지진계를 약 200여 지점에 설치하여

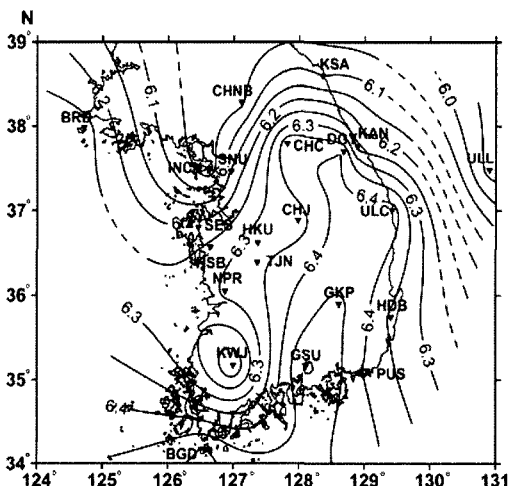


Fig. 8. Average P-wave velocity distribution in the crust of Southern Korea.(Chang and Baag, 2005).

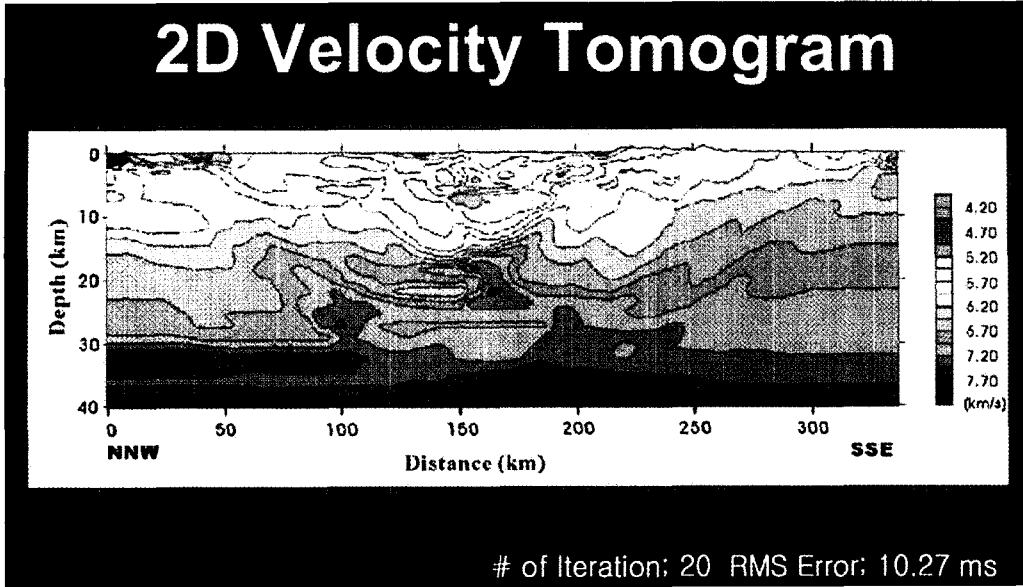


Fig. 9. P-wave velocity structure on Yeonchon-Gosung cross section (<http://bh.knu.ac.kr/~jung/>).

은 자료를 분석하여 지진파 속도구조를 얻었다. 또한 2004년에는 연천-고성을 연결하는 약 380여 km의 장거리 축선을 설정하여 양질의 자료를 얻었으며, 그 결과의 일부가 발표되었다. Fig. 9는 2004년도의 관측 자료를 해석하여 얻은 결과이다.

5. 토의 및 결론

유라시아판 동남쪽에 위치한 한반도는 판경계로부터 수백 km 떨어진 판내지역에 해당한다. 판경계에서는 판들 사이의 상호작용이 활발히 진행되고 있으므로 이에 의해 발생하는 지진의 크기도 크고 발생 빈도도 높다. 반면 판내부 지진의 특징은 지진발생이 시간 및 공간적으로 분산된 분포를 보이며, 판경계부에 비해서 발생하는 지진에 비해 숫자가 상대적으로 적고, 크기도 작을 뿐만 아니라 발생 위치도 매우 불규칙한 편이다. 이는 단층의 활동주기가 매우 길어 수만년 혹은 수십만년에 한번씩 재운동하면서 지진을 발생시키는 것을 의미한다.

이런 관점에서 약 2,000년 동안의 지진역사가 기록되어 있는 우리나라는 이들 자료를 정확히 분석하여 역사시대 동안에 발생한 지진이 단층과 관련되어 있는지를 밝히는 것은 매우 중요하다. 우리나라의 역사지진 기록은 약 2,000년 동안 7,000여건의 책자에 기록되어 있는 방대한 양으로 이들 자료에 대한 체계적인 정리는 현재까지 만족할 만하지 못하다. 결국 한반도

의 역사지진 자료를 재평가하기 위해서는 다수의 지진 학자와 역사학자 및 당시의 건축, 구조물의 특성을 이해하는 토목, 건축학자들이 합동으로 수행하여야 할 것이다.

역사지진의 경우 조선시대 이전의 진앙지는 대부분 역사문헌에 명시되지 않거나 당시의 수도에만 감진기록이 있는 관계로 그 시대의 수도에 지진이 집중되어 발생한 것처럼 나타난다. 이러한 결과는 실제의 지진 활동을 그대로 반영하기 보다는 고대의 인구분포, 지진발생에 대한 보고체제상의 결과로 해석할 수 있을 것이다. 이에 반하여 조선시대는 진앙지가 한반도전체에 걸쳐 분산되어 나타난다. 진앙지의 공간분포를 고찰해 보면, 한반도의 동해안쪽 보다는 서해안쪽의 지진활동이 상대적으로 활발하며, 한반도남부의 동서방향으로 지진활동이 활발한 지역이 나타난다. 작성된 목록으로부터 시대별로 지진활동을 검토해 보면 지진활동은 조선 중기 즉 16-18세기에 특히 활발했음을 보여주고 있다. 물론 고대로 갈수록 작은 지진의 누락 가능성이 크다는 사실을 인정할 수 있다. 그러나 비교적 진도가 큰 피해지진의 발생빈도를 비교하더라도 조선 중기의 지진활동이 상대적으로 활발했다고 볼 수 있다. 이는 이기화(1998)의 연구결과에서도 한반도의 지진활동은 제 1세기~14세기 간에 비교적 낮은 편이었으나 15세기~18세기에는 이례적으로 매우 높았고 그 이후로는 다시 낮은 상태가 지속되고 있다. 이례적으로 높은 지진활동의 기간은 중국 북동부와 일치하며 이는 이

두지역의 지진활동이 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다. 또한 지진활동의 공간분포 역시 서해안쪽이 활발하며, 한반도 남동부에서 서북서 방향으로 활발한 양상을 보여준다.

1936년 이후 발생한 비교적 규모가 큰 27개 지진의 지진발생 메카니즘에 의하면 한반도 및 인접지역에서 발생한 지진의 대부분은 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘과 다소의 역단층 운동이 첨가된 단층운동 특성을 보여준다. 한반도 및 주변에서 단층작용을 일으킨 주응력 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향을 나타낸다. 같은 판내 지역인 중국 자료와 비교하면 주응력 방향이 매우 유사하고 동해 동부와는 상당한 차이를 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향도 상당히 작용하는 것으로 해석된다.

지진에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 지진의 발생원인을 규명하고, 발생 특성을 분석하여 정확한 지진위험도 및 최대발생가능 지진의 위치 및 규모 등을 결정하여야 하며, 내진설계를 위한 기본 입력자료가 필요하다. 정확한 지진요소를 결정하기 위해서는 정확한 지각속도구조가 우선적으로 확보되어야 한다. 그동안 국내 지진관측망 미비, 한반도 내부의 낮은 지진 발생 빈도 등의 이유로 양질의 지진자료를 구하기 어려워 지진자료를 이용한 지각속도 구조에 대한 연구가 극히 제한적으로 이루어질 수밖에 없었다. 또한 자연 지진을 이용한 지각속도구조를 규명하기 위해서는 정확한 지진원 요소가 필요하고, 정확한 지진원 요소를 구하기 위해서는 정확한 지각속도구조가 필요한 상호 의존적인 문제점이 있어 학자들 간에 많은 이견이 있는 상황이다.

그러나 국내의 여러 지진관측망에서 축적된 지진기록을 이용하고, 인공발파를 이용한 반사 및 굴절 탄성과 탐사를 수행하는 연구가 국내에서 2002년부터 수행되기 시작하여 서산-영동-경주 및 연천-고성을 연결하는 2개 축선에 대해 실시되었다. 이와 같은 인공발파를 이용한 지각속도구조를 규명하기 위해서는 많은 인원과 예산을 필요로 하므로 관련분야의 전문가들의 적극적인 참여가 필요한 상황이다.

참고문헌

기상청 (1993) 지진관측보고(1978-1992). 기상청, 112p.
 기상청 (2001) 지진관측보고(1978-2000). 기상청, 166p.

기상청 (2004) 2003 기상청 지진업무. 기상청.
 기상청 국가지진정보센터 홈페이지(<http://www.kmancis.go.kr/>)
 건설교통부 (1997) 내진설계 기준연구(II), 건설교통부. p.279-359.
 경북대학교 이정보교수 홈페이지 (<http://bh.knu.ac.kr/~jung/>)
 김상조 (1980) Study on earthquakes of Korea based on the local data of 1926-1943. 광산지질, 13권, p.1-19.
 김상조 (1983) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 한양대학교 석사학위논문, 68p.
 김성균, 정부홍 (1985) 한반도 남부지역의 지각구조, 광산지질, 18권, p. 151-157.
 김성균 (1995) 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, 31권, p. 393-403.
 김성균 (1997) 한반도의 지진활동: 과거, 현재, 미래, 콘크리트학회지, 9권, p. 4-12.
 김소구 (1978) 한반도의 지진활동, 자원개발연구소, 자원개발연구소보문.
 김소구 (1980) 한반도와 그 인접지역의 지진활동. 광산지질, 13권, p. 51-63.
 김우한, 김성균, 조봉곤, 최광선, 이희권 (2004) 한반도와 한반도 주변의 지진지체구조. 한국과학재단 보고서.
 류용규 (2006) 국내 지진관측망의 효율적인 운영방안 및 실시간 지진자료 분석에 관한 연구. 전남대학교 대학원 박사학위논문, 166p.
 서정희 등 (1978) 원자력발전소 내진설계를 위한 지진학적 및 지질학적 기술지침 작성을 위한 연구(1), 서울공대 생산기술연구소.
 엄상호, 양승진, 전명순, 김정호 (1983) 한반도의 지진위험도. 한국동력자원연구소 연구보고서, 295p.
 이기화, 정봉일, 김광호 (1986) 한반도의 지진활동(I): 홍성일대의 지진활동. 지질학회지, 22권, p. 164-175.
 이기화, 권병두, 장태우 (1987) 한반도의 지진활동: 3. 경기 육괴의 지진활동. 지질학회지, 23권, p.257-276.
 이기화, 권병두, 박창일, 장태우, 김광호 (1988) 한반도의 지진활동: 4. 옥천대의 지진활동. 지질학회지, 24권, p. 464-488.
 이기화, 권병두, 장태우 (1989) 한반도의 지진활동: 5. 영남육괴의 지진활동. 지질학회지, 25권, p. 474-494.
 이기화 (1990) 경상분지의 지진활동 (부록 1), 양산단층조사 중간보고서, 한국전력기술주식회사.
 이기화 (1998) 한반도의 역사지진자료. 지구물리, 1권, p. 3-22.
 이승규, 김소구 (1998) 원격수신합수를 이용한 서울과 인천관측소 하부의 지각속도구조와 Moho 불연속면 특성 연구. 자원환경지질, 31권, p. 339-347.
 전명순, 전정수 (2001) 한반도 초기계기지진자료(1905-1942). 자원환경지질, 34권, p. 573-581.
 전명순, 전정수, 제일영 (1999), 한반도 지진의 메카니즘, 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 3권, p. 58-63.
 정봉일 (1981) 한국의 고지진에 관한 연구, 지질학회지, 17권, p. 257-268.
 정태웅 (1995) 1991-94년의 지진자료를 이용한 한반도 지각구조의 정량적 연구. 한국지구과학회지, 16권, p. 152-157.
 조선지진연구소 (1984) 조선지진목록 (2-1983). 69p.
 최광선 (1986) 한반도 남부의 중력에 대한 연구. 서울대학교 박사학위논문, 110p.
 한국원자력안전기술원 지진감시센터 홈페이지(<http://emc.kins.re.kr/>)

- 한국전력연구원 (2004) 2003년 지진연보.
 한국전력연구원 (2005) 2004년 지진연보.
 한국지질자원연구원 지진연구센터 홈페이지(<http://quake.kigam.re.kr>)
- 朝鮮總督府 觀測所 (1905-1912), 朝鮮地震報告 (1905-1912).
 朝鮮總督府 氣象臺 (1940-1942) 朝鮮氣象要報 (1940-1942).
 朝鮮總督府 氣象臺 (1943) 地震年報 1940.
 中國地震局 (1983) 中國地震目錄. 科學出版社, p. 894.
 武者金吉 (1951) 日本及隣接地域 地震, 噴火, 地變年表, 日本地震史料, 毎日新聞社.
 隼田公地 (1936) 朝鮮氣象30年報, 朝鮮總督府觀測所.
 隼田公地 (1940) 智異山南麓 雙溪寺強震報告, 朝鮮總督府觀測所 彙報, 第1號, p. 145-157.
 吳戈 (1995) 黃海及其周圍地區歷史地震, 地震出版社, 347p.
 和田雄治 (1912) 朝鮮古今地震考, 朝鮮總督府 觀測所 學術報文 第2卷, p. 16-38.
- Central Meteorological Observatory of Japan (1952) The catalogue of major earthquakes which occurred in Japan (1885-1950). Seismological bulletin of the Central Meteorological Observatory, p. 99-184.
- Chang, S. J. and Baag, C. E. (2005) Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Teleseismic Receiver Functions and Surface-Wave Dispersion. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 1516-1534.
- Hayata, K. (1940) Report of Ssanggye-sa strong earthquake on the southern foot of Mount Chiri(in Japanese). Bulletin of the Meteorological Observatory of the Government General of Korea, v.1, p.145-157.
- Kim, S. G. and Li, Q.(1998a) 3-D crustal velocity tomography in the southern Part of the Korean Peninsula, Econ. Environ. Geol. Korea, 31, 89-99.
- Kim, S. G. and Li, Q.(1998b) 3-D crustal velocity tomography in the central Korean Peninsula, Econ. Environ. Geol. Korea, 31, 235-247.
- Kim, S. K. (1979) Geodetic and geophysical analysis of gravity data in Korea, Kor. Inst. Mining Geol., v. 12, p. 17-28.
- Kwon, B. D. and Yang, S. Y. (1985) A study on the crustal structure of the southern Korean Peninsula through gravity analysis. Jour. Kore. Inst. Mining Geol., v. 18, 309-320.
- Kyung, J. B. (1989) The characteristics of the seismicity of the Korean Peninsula, Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., 327p.
- Lee, K. (1979) On crustal structure of the Korean Peninsula, Jour. Geol. Soc. Korea, v. 15, p. 134-150.
- Lee, K. and H. O. Jung (1980) A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula, Jour. Geol. Soc. Korea, v. 16, p. 32-45.
- Meteorological Observatory of the Government-General of Chosen (1918-1934) Annual report of the meteorological observatory of the Government-General of Chosen for the year 1916-1932.
- Tsuboi, C. (1954) Determination of Gutenberg-Richter's magnitude of earthquakes occurring in and near Japan, Zishin, 7, 185-193.
- Weather Bureau of Tyosen (1935-1940) The seismological bulletin of weather bureau of Tyosen for the year of 1933-1938, The Government General of Tyosen.

2006년 7월 8일 원고접수, 2006년 8월 11일 게재승인.