

한반도 및 인근해역의 지진특성

전명순, 전정수(한국자원연구소 지진연구센터)

Seismic characteristics of earthquakes in and around the Korean peninsula

Myung-Soon Jun, Jeong-Soo Jeon

(Earthquake Research Center, Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

요약 : 지진자료를 분석해 지진기록으로부터 산업현장에서 발생하는 인공지진을 식별하여 정확한 지진 카타로그를 제공하는 것은 지진연구에서 가장 기초적인 과정이지만 또한 매우 중요한 과제이다. 특히 지진계에 기록된 지진자료만으로 이를 식별하는 것은 매우 어려운 문제로 선진국에서는 수십 년 전부터 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 현재 국제사회에서 발효를 앞두고 있는 CTBT 체제에서 인공발파와 자연 지진의 식별은 외교 정책적인 면에서 매우 심각한 국제문제를 야기 시킬 수 있다. 본 연구에서는 지진파 - 공중음파 관측소의 자료를 종합 분석하여 지진파와 인공발파를 식별하는 방법을 추천코자 한다.

최근 한반도 및 주변해역에서 발생한 지진들의 분포는 남쪽에서는 서산-포항을 잇는 N60-70°W 방향으로 진앙이 집중되며, 북쪽에서는 주로 평안도와 황해도에 집중된다. 1936년 이후 한반도 및 인근해역에서 발생한 비교적 큰 지진들(규모 4.5 이상) 14개의 메카니즘(mechanism)은 주로 수평이동단층(strike-slip faulting) 형태로 이는 이 지역에 작용하는 주 응력은 압축력임을 나타낸다. 이는 한반도 및 인근해역에 작용하는 응력장이 동쪽에서 유라시아판(Eurasian Plate) 밑으로 침강하는 태평양판(Pacific Plate)의 영향뿐만 아니라 남서쪽에서 충돌하는 인도판(Indian Plate)의 영향도 작용하는 것으로 판단된다.

주요어 : 인공발파, 지진파와 인공발파의 식별, 저주파음파(Infrasound), 지진메카니즘

Abstract : Discrimination between natural earthquakes and man-made explosions is very essential but critical matter in Seismology. In the CTBT Monitoring business, this is very crucial issue and sometimes could occur the international conflict. In this study, we analyzed seismic and infrasound data from Chulwon Seismo-Acoustic Array and would like to introduce routine data processing procedures at the Korea Institute of Geology, Mining and Materials(KIGAM) to discriminate the earthquakes and artificial explosions. We found analyzing acoustic data together with seismic data is very effective way to identify and discriminate man made explosion from natural earthquake.

Recent earthquakes in and around the Korean Peninsula are concentrated in a narrow zone with N60-70°W in southern Korea, and Pyungan and Hwanghae Province in northern Korea. The mechanism of 14 larger earthquakes in and around the Korean Peninsula since 1936 show predominant strike-slip faulting together with minor thrust component. This indicates horizontal compression is dominant in and around the Korean Peninsula.

Keywords : Artificial explosion, Discrimination between earthquake and explosion, Infrasond, Earthquake mechanism

1. 서 론

어떤 지역의 지진활동도를 파악하는 것은 토목구조물의 내진설계 등 실생활과도 깊은 관련이 있지만 지구과학적으로 현재 진행중인 지구조운동을 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 최근 국내에도 지진관측소의 숫자가 증가하면서 관측되는 지진기록의 숫자도 상당히 증가해 가는 추세이다. 이들 지진기록 중 실제 자연 현상에 의해 발생하는 지진과 산업활동과 관련된 인공발파를 분리하여 한반도의 지진발생 상황을 정확히 파악하는 것은 지진학에서 매우 기초적이면서 중요한 과제다.

지진학에서 인공발파에 관심을 갖는 이유는 현재 지구상에서 자연적으로 발생하는 지진에 의한 지진기록(seismogram)보다 채석장이나 광산에서 수행하는 인공발파에 의한 지진기록이 훨씬 많기 때문이다(Richard et al., 1992). 현재 유엔에서 군비축소의 일환으로 핵실험 없는 지구를 만들기 위해 추진중인 포괄적 핵실험 금지조약 (CTBT ; Comprehensive Test Ban Treaty)의 핵실험 감시체제에서 2.0<mb<4.0 규모의 작은 seismic event를 기록하여 그 위치와 크기를 정하고 이들이 자연지진인지 혹은 산업현장에서의 인공발파에 의한 것인지를 정확히 식별하는 것은 매우 중요한 문제다. 세계적으로 많은 나라에서 기록되는 seismic event중 상당수가 채석장이나 광산에서 수행하는 상업용 발파에 의한 event임이 밝혀지면서 지진과 인공발파의 식별에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 한반도에서도 고감도 지진계의 숫자가 증가해 지진탐지능력이 향상되면서 작은 규모의 지진기록을 정량적으로 평가하여 지진인지 혹은 인공발파에 의한 것인지를 식별하여 정확한 지진자료를 생산하는 것은 매우 중요하다. 자연지진과 인공발파의 식별은 종종 국제사회에서 국방, 외교상 인접 국가간 심각한 문제를 야기 시키기도 한다.

2. 지진관측 현황

한반도에서 지진관측이 처음 시작된 것은 1905년 조선총독부 인천관측소에서 시작되어 1937년에는 서울, 대구, 부산, 평양 및 추풍령등 6개소에서 1941년에는 원산관측소가 추가되어 해방전에는 전국 7개소에서 지진관측을 수행하였다(전명순 외, 1997). 해방 후에는 지진관측이 이루어지지 않다가 1963년 3월 미국 지질조사소(USGS; US Geological Survey)가 전세계 표준 지진관측망(WWSSN; World-Wide Standard Seismograph Network) 구축사업의 일환으로 서울 기상청에 지진계를 설치하면서 다시 시작되었다. 1977년에는 기상청에서 서울과 광주에 간이형 지진계를 설치하였고 1978년 홍성지진을 계기로 1980년부터는 서울, 부산, 광주, 강릉, 추풍령 및 서산에 6개 관측소로 관측소를 확장하였고, 1992년에는 전국에 10개 관측소, 1994년에는 12개 On-Line 관측소로 증설되었다. 기상청 지진관측망은 1990년도부터 Digital화 작업이 시작되었다.

한국자원연구소는 기상청의 전국을 대상으로 하는 광역 지진관측망과는 달리 지질학적으로 관심 있는 제한된 지역에서 양질의 Digital 지진자료를 획득하는 방향에서 시작되었다. 한국자원연구소는 1994년 월성 원전 주변의 양산단층 북부에 단층활동성 평가를 위해 5개소에서 digital 3성분 지진관측을 시작한 이래 1996년 양산단층 남부지역에 5개 지진관

측소를 추가하여 양산단층의 지진활동성을 분석하고 있다. 또한 1995년 말부터 미 공군 소유의 원주소재 KSRS(Korea Seismic Research Station)의 자료를 실시간으로 대전 한국자원연구소로 전송 받아 분석하고 있다. 원주 KSRS는 약 30Km×40Km 지역에 단주기 수직성분의 지진계 19개, 장주기 3성분 지진계 6대 및 3성분 광대역 지진계 1대(총 26개 지진계)가 방사상으로 배열한 세계 최대급 지진배열망(Seismic Array)이다. 원주 KSRS의 지진계(Seismometer)는 지하 약 80M 깊이의 시추공내에 설치되어 있어 지표상에 만연하는 잡음(Noise)의 영향이 적어 감도가 매우 높은 지진관측망으로 CTBT가 전세계 핵실험 탐지를 목적으로 구성하는 IMS(International Monitoring System)중 동아시아에서 비중이 매우 높은 50개 주요 지진관측소(Primary Seismic Station)중 하나이다. 한국자원연구소는 1999년 7월부터 철원일대에서 저주파음파(Infrasound)와 지진관측을 위해 작은 규모의 Array를 운영하고 있다. Array 구성은 4개의 지진계와 4개의 microbarometer로 구성되어 있다. 지진계는 수직성분 단주기 지진계로 지하 약 15M 깊이의 시추공내 암반층 위에 설치되어 있다. 지진자료와 Infrasound 자료는 40samples/sec로 디지털화 되어 실시간으로 한국자원연구소로 전송되어 다른 관측소에서 전송되는 지진자료들과 함께 분석된다.

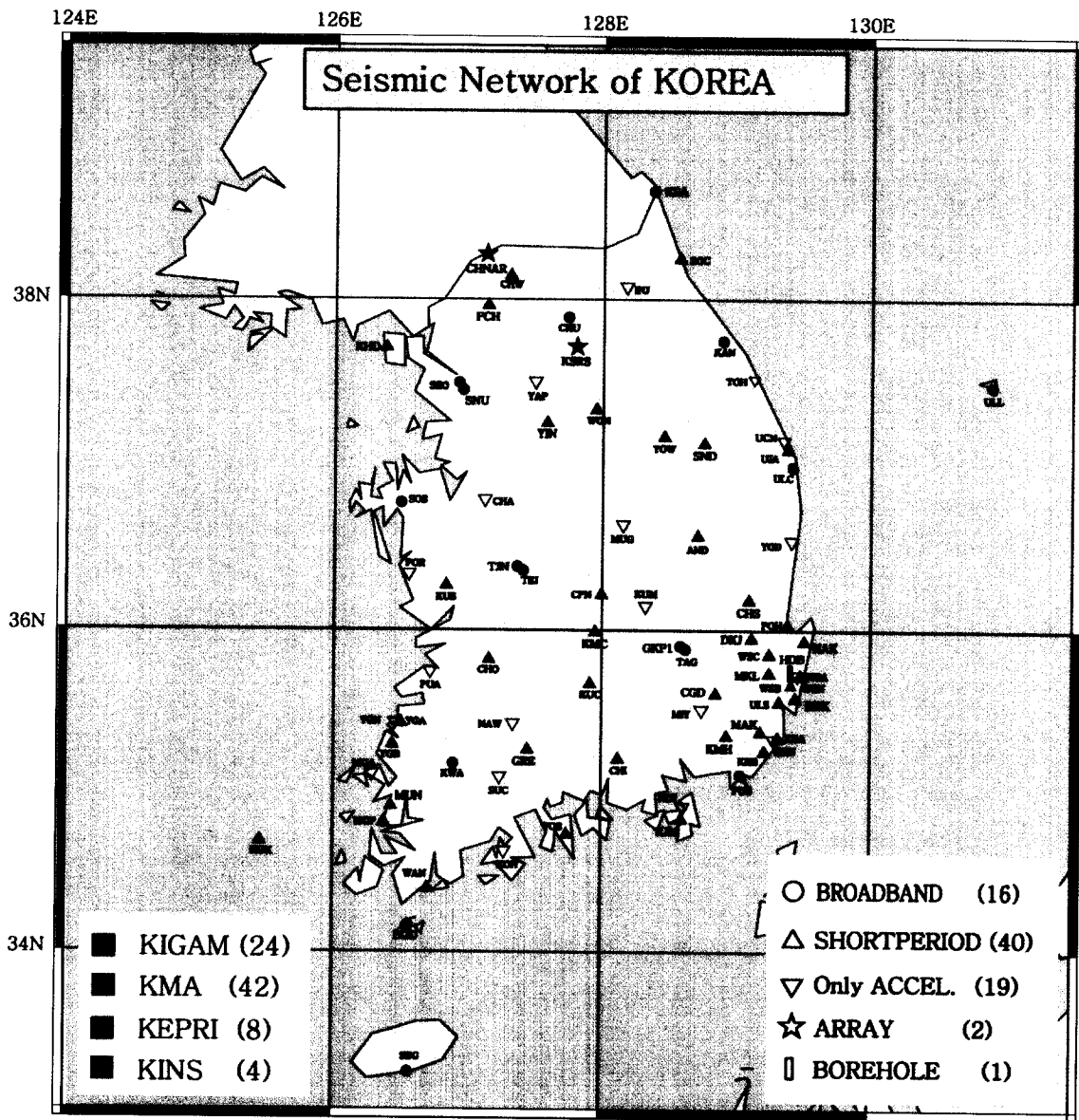
원자력안전기술원과 한국전력연구원도 원자력발전소 부지의 지진안전성 평가를 위해 원전부지 내와 주변에 지진관측망을 운영하고 있으며 이들 자료는 한국자원연구소 지진자료 자동분석 시스템에 연결되어 종합 분석되고 있다. Fig. 1은 2000년 5월 현재 가동중인 지진관측소 분포를 보여준다.

앞으로 우리나라의 지진관측소 숫자는 계속 증가 할 것으로 판단된다. 이는 한전의 경우처럼 산업체에서도 재해에 대한 인식이 증가하면서 독자적인 지진관측소를 설치하는 추세이고 각 지방자치단체 및 대학들도 자체 지진 관측망을 구축하는 추세이기 때문이다. 따라서 각 기관의 관측망 사이의 중복투자를 피하고 연계성을 확보하는 네트워크를 구축하는 것이 필요하다. 이를 위해 한국자원연구소, 기상청, 원자력안전기술원 및 한국전력연구원은 자료 공유를 위한 네트워크 구축을 1999년부터 시작하였다.

3. 한반도 및 인근해역의 지진활동

유라시아판(Eurasia-Plate)의 동쪽 및 동남쪽에 위치하는 한반도는 판 경계(Plate boundary)로 부터 수백 Km 떨어진 판내지역(Intraplate region)에 속하며 한반도 및 그 주변에서 발생하는 지진들은 판내지진(Intraplate Earthquake) 이라 부른다. 일반적으로 판내 지진들의 특징은 지진 발생이 시간 및 공간적으로 산만한 분포를 보이는데, 한반도 및 그 주변에서 발생하는 지진들은 같은 판내지진인 중국 북동부와 일본 서남부에 비해서도 그 숫자가 상대적으로 적고 크기도 작을 뿐만 아니라 발생 위치도 매우 불규칙한 편이다. 그러나 이들 판내지진에 대한 체계적인 연구는 판 내의 응력 상태와 응력 분포에 관한 정보를 제공하는 매우 희귀하고 중요한 자료가 되기도 하다.

기상청은 1978년부터 1992년까지 15년간의 지진자료를 기상청(1992)에서 분석하여 "1978-92 지진관측보고"(1992, 기상청)를 발표했다. 1993년 이후의 지진자료는 기상청 Web Site(http://www.kma.go.kr/seismic/k_seismenu.htm)로부터 구할 수 있다. Fig. 2는 1978년부터 1999년까지 22년간의 지진자료를 기상청에서 분석한 결과를 표시한 한반도 및 주변의 진앙분포도이다. 한반도 남부에서 발생한 지진은 육지에서 주로 포항-서산을 연결하는 N60-70°W 방향으로 집중되어 약 100 Km 폭의 지진대(seismic belt)를 형성하면



2000. 5. 18. 현재

Fig. 1. Distribution of seismic stations.

서 동해로 연장되며 동해에서는 해안선을 따라 남북으로 지진이 다소 집중되고 있다. 북한에서의 지진은 주로 평안도와 황해도 지역에 집중되어 발생하고 있다.

그러나 최근 전등(1999)은 1978년부터 1996년 사이의 기상청 지진자료와 북한의 지진연구소 지진자료를 분석하여 기상청에서 진앙을 북한으로 표시한 63개 events가 북한 지진연구소의 지진자료에는 누락되어 있는 사실을 밝혀냈다. 이들 63개 events의 발생위치는 북한의 인구나 산업이 밀집되어 있는 평안도와 황해도 일대이고, 발생시각은 대부분 오전 10시부터 오후 4시 사이에 집중되어 있어서 산업현장에서 일과시간에 수행한 인공발파일 가능성을 강하게 시사한다. 이런 결과는 북한의 지진자료가 북한 지역에 국한된 것이어서 남한 지역은 비교할 수 없었지만 현재 운영되고 있고 앞으로 증설 될 지진 관측망의 탐지능력을 고려하면 장차 남한에서도 감지

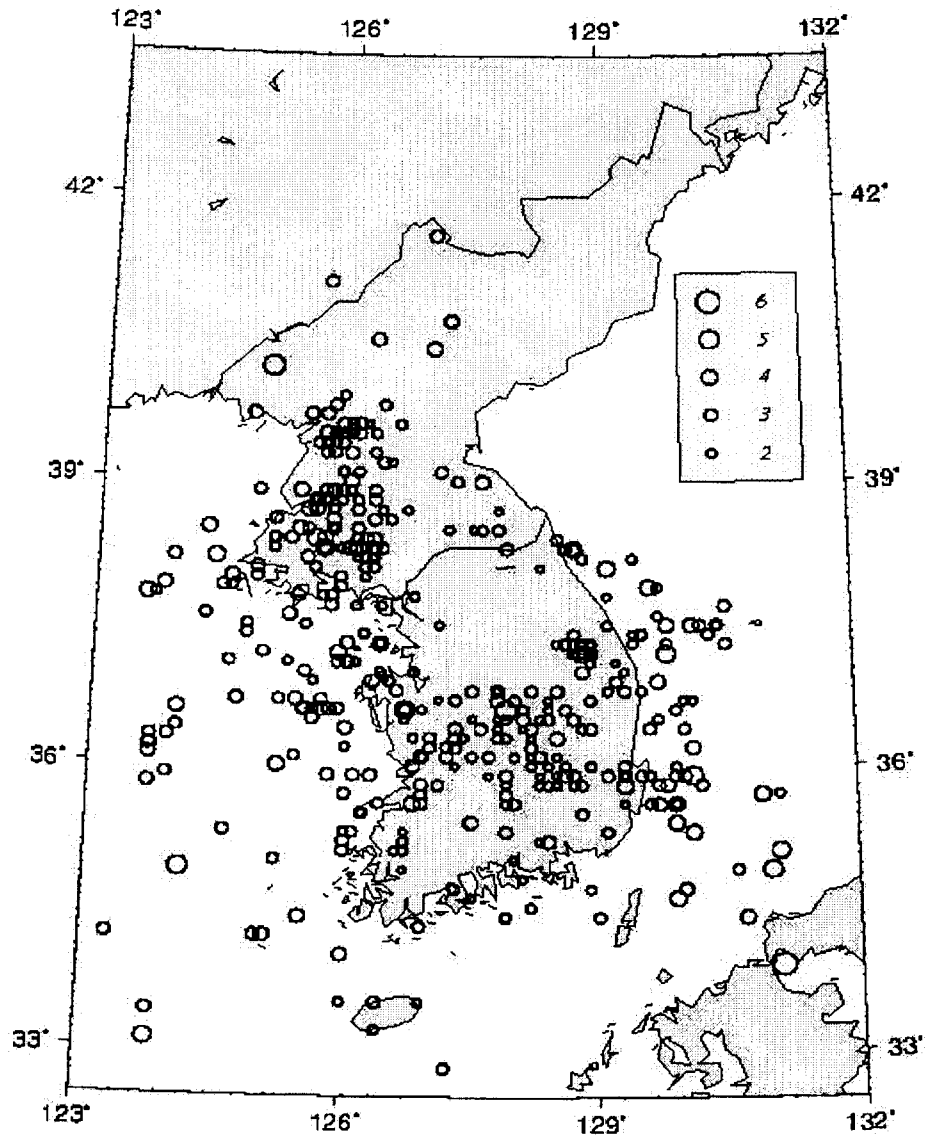


Fig. 2. Epicentral distribution by KMA between 1978 and 1999.

할 수 있는 event의 규모가 점점 작아지면서 그 숫자는 증가 할 것이고, 이런 경우 산업현장에서 수행되는 인공발파를 자연지진과 식별 할 수 있는 기술 개발은 매우 중요한 문제이다.

인공발파와 자연지진을 식별하기 위해서는 국내에서 수행되는 모든 발파자료를 수집하는 것은 매우 필수적인 작업이나 현실적으로는 매우 어려운 문제이다. 우리나라의 경우 각종 산업현장에서 수행되는 인공발파에 의한 소음, 진동 등의 정량적인 정보는 민원과 직결되는 문제이기

때문에 모든 산업체에서 자료를 공개하기를 극도로 꺼리기 때문이다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 국가차원의 제도 개선이 필요하리라 판단된다.

4. 지진과 인공발파의 식별

지진계에 기록된 지진파(Seismic Signal)를 분석해 지진과 인공발파로 식별하는 것은 지진자료 정리에 매우 중요한 기초이나 실제로는 event에 대한 구체적인 정보(Ground Truth Information)가 없는 경우 매우 어려운 문제이다. 이런 문제를 해결하기 위하여 현재 유엔에서 추진중인 CTBT 감시체제인 IMS는 지진파뿐만 아니라, Infrasound, Hydro-Acoustic 등의 다양한 방법을 병행하여 감시체제를 운영하고 있다. 현재 CTBT 사무국에서 운영하고 있는 IDC(International Data Center)에서는 지진과 핵실험을 비롯한 인공발파를 식별하기 위해 다각적인 연구를 시도하고 있는데 지진파를 이용한 연구 내용 중에는 초동, 진앙 위치 및 깊이에 의한 식별, 표면파 규모와 실체파 규모(M_s/m_b)의 비, 주파수 대역별 진폭 분석, spectral scalloping 분석, focal mechanism 분석, depth phase(pP, sP)에 의한 깊이 분석, 파형의 복잡성(complexity) 연구, 특수통계처리를 통한 분석 등이 있으며 이러한 연구를 통해 자연지진과 인공발파를 정확하게 식별코자 노력하고 있다(Li et al., 1996). 그러나 이런 방법들은 event가 발생한 지역과 기록된 지역의 지질학적인 변화에 따라 또는 event가 기록되는 거리에 따라 지진파형이 심하게 변하기 때문에 선진국에서 개발된 방법을 일반화하여 한반도 및 주변 지역에 적용하는데는 한계가 있다.

한국자원연구소는 현재 유엔에서 추진하고 있는 CTBT(Comprehensive Test Ban Treaty) 체제에서 한국의 자료 송수신 및 기술적인 문제를 협의하는 NDC(National Data Center)를 담당하고 있다. 이는 CTBT 체제에서 한국자원연구소는 한반도 및 인근에서 발생하는 events에 대해 정확한 지진요소를 국제사회에 제공해야하는 의무를 의미한다. 본 연구에서는 현재 한국자원연구소에서 일상적으로 수행하는 자료처리 과정을 소개하고 이에 대해 토론코자 한다.

한국자원연구소는 1999년 7월 SMU(Southern Methodist University)와 공동으로 강원도 철원지역에 지진파 - 공중음파 관측망(Seismo-Acoustic Array)을 설치하여 운영하고 있다 (전명순 등, 1999). 인공발파의 경우 지진파와 함께 음파를 발생하게 되므로, 지진파와 음파를 함께 탐지함으로써 인공발파를 구별할 수 있다. 음파 중 약 0.01-5Hz에 해당하는 저주파수의 음파는 인프라스운드(Infrasound wave)로 정의되며, 대기에서 전파하는 저주파수대 음파의 감쇠는 매우 약하여 상부대기층까지 전파가 가능하며, 지표로 반사되어 수 백km 떨어진 지역에서도 관측이 가능하다.

철원 지진파 - 공중음파 관측망은 중심관측소를 포함한 삼각형모양의 4개 관측소로 이루어 졌으며 관측소간의 최대거리는 약 1.37km로(Fig. 4) 관측망 자료처리(array processing) 시 분석 가능한 주파수는 0.25Hz(340m/s) 이상이다.

Fig. 4는 2000. 1. 18 발생한 자연지진이 철원 지진파 - 공중음파 관측소에서 관측된 기록이고 Fig. 5는 2000. 05. 21 발생한 인공발파에 의한 event의 기록이다. Fig. 4에서 2000. 1. 18 발생한 자연지진에 의한 기록은 처음 3 channel은 공중음파기록으로 뚜렷한 신호가 없는 반면 다음 3channel은 지진기록으로 근거리에서 기록된 전형적인 지진기록의 형태를 보인다. 공중음파의 신호가 기록되지 않은 것은 이 지진이 비교적 지하 심부에서 발생하여 공중에 음파가 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 5의 인공발파에 의한 기록은 처음 4 channel은 공중음파 기록을 다음 4 channel은 지진기록을 보여준다. 지진파는 그 전

달속도가 5-6 KM/SEC로 전파하고, 음파는 대략 340 M/SEC로 전파하여 지진파 보다 약 7 분 정도 늦게 도달한다. 이 event의 지진파와 공중음파 자료로 발생 방향을 분석한 결과 두 자료 모두 같은 방향(Back Azimuth)에서 전달된 것으로 나타났고 지진파와 음파의 도달 시간의 차로부터 계산된 거리는 다른 지진관측소 자료를 종합 분석해 얻은 결과와 일치한다. 이는 Fig. 5에 기록된 2000. 5. 21 event가 자연지진이 아닌 인공발파에 의한 기록일 가능성을 강하게 시사한다. 이는 다른 정보에 의해서도 확인되었다.

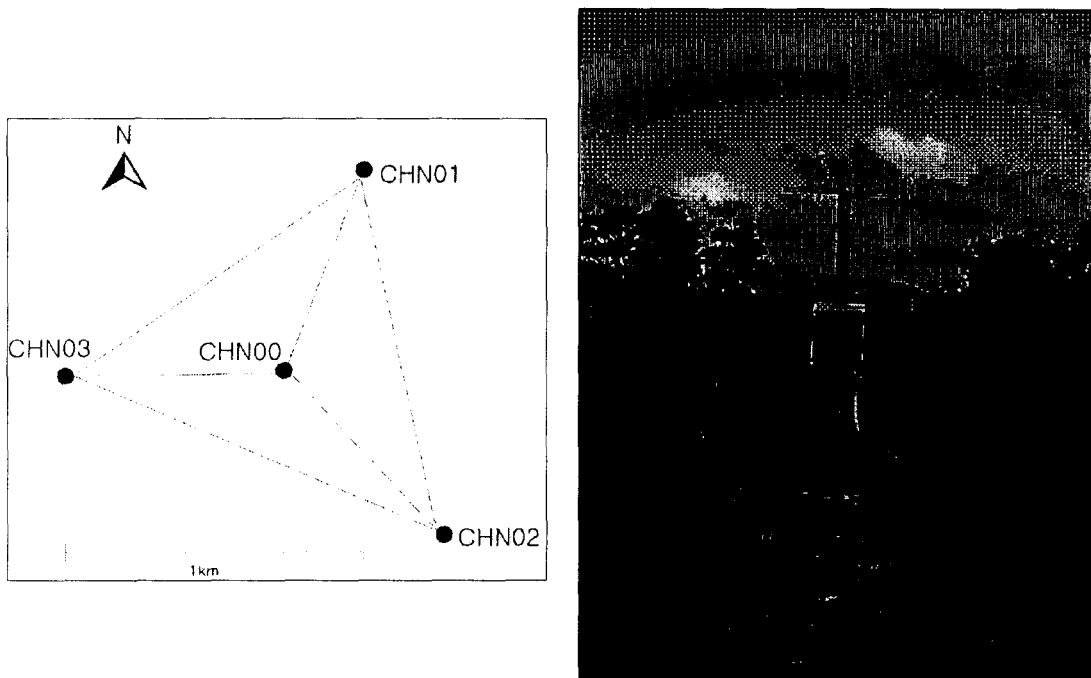


Fig. 3. Configuration of Chulwon Seismo-Acoustic Array and it's site view.

기록된 지진자료에 대한 주파수별 성분을 분석하는 것은 event의 특성을 구별하는데 매우 유용하다. Fig. 6은 2000. 1. 8 발생한 지진의 철원 지진관측소에서 기록된 자료를, Fig. 7은 2000. 5. 21 발생한 event의 주파수별 특성을 10초에서 anti-alias filter인 16Hz 까지 주파수 대역별로 보여준다. 그림에서 가로축은 시간을 세로축에는 bandpass filter의 범위를 나타낸다. 그림에서 두 events 모두 0.1-1.0Hz 사이의 비교적 장주기에서 현저한 Rg파의 발달을 보여주는데 이는 두 events 모두 매우 낮은 깊이에서 발생했음을 알려준다. 이들 Rg파에서 나타나는 분산 (Dispersion) 현상은 events 발생위치와 기록장소 사이의 천부 지각구조를 연구하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다. 1.0-2.0 및 2.0-4.0Hz 사이에서 현저하게 나타나는 phase는 Lg파이다. P 파의 에너지는 고주파 영역에서 우세하게 나타나고 특히 8.0-16.0Hz 대역에서는 모든 파형이 P 파에 의한 것으로 추정된다. 그러나 2000. 5. 21 event의 경우는 고주파 대역에서 Lg파 보다 P 파가 우월하게 나타난다.

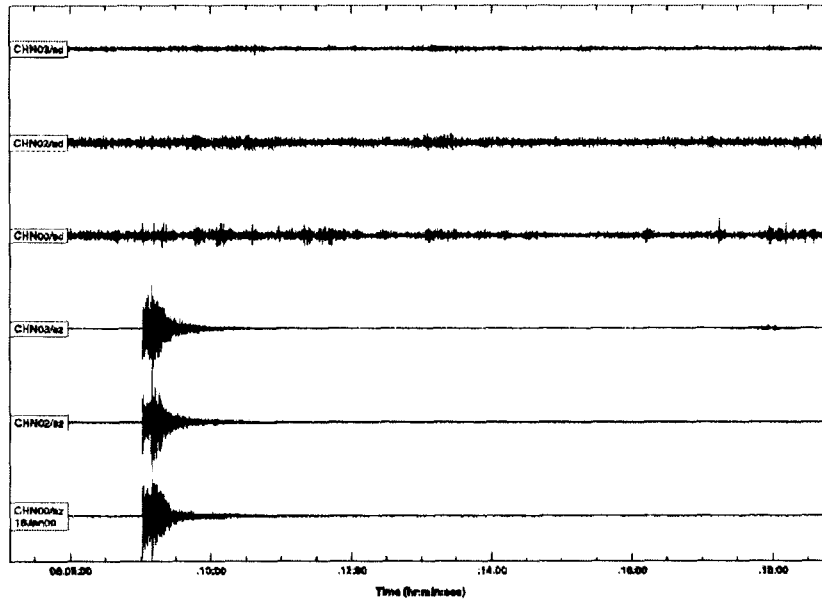


Fig. 4. Seismo-Acoustic data from Chulwon station for 18 Jan, 2000 event.

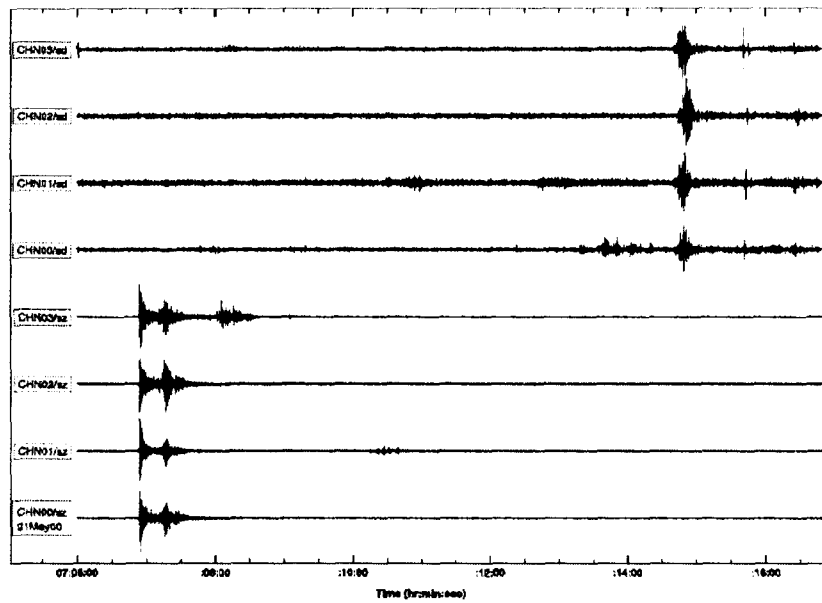


Fig. 5. Seismo-Acoustic data from Chulwon station for 21 May, 2000 event.

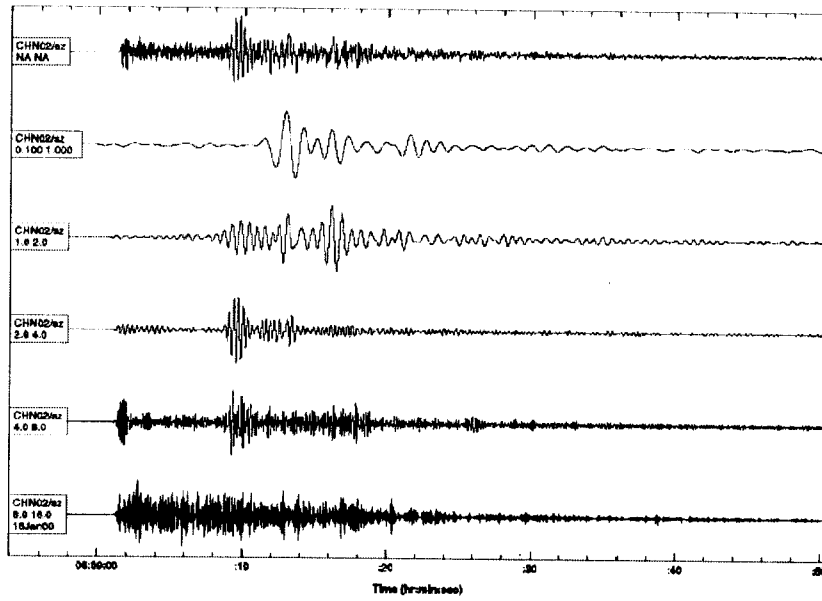


Fig. 6. Filter panel for 18 Jan, 2000 event observed at Chulwon station.

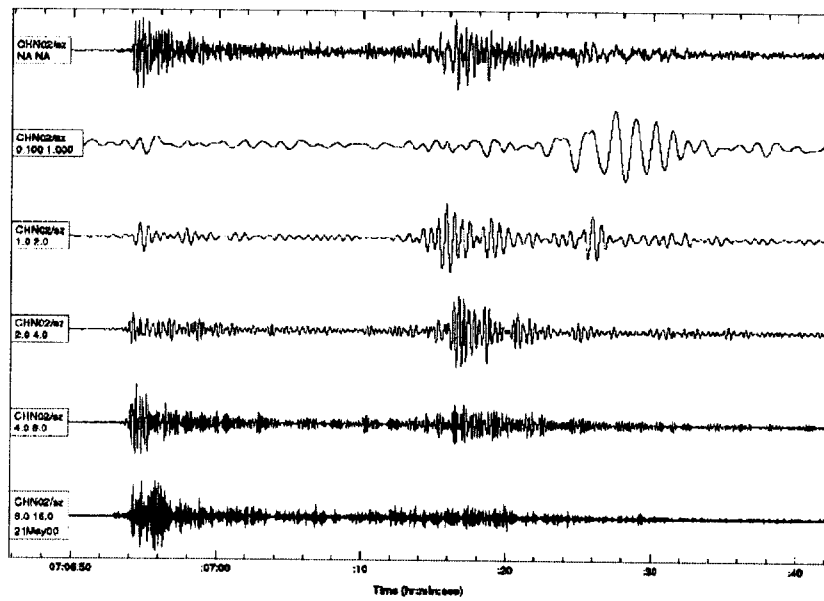


Fig. 7. Filter panel 21 May, 2000 event observed at Chulwon station.

자연 및 인공지진을 식별하는 데 있어 일반적으로 많이 채택하는 방법은 시간별 주파수별 특성을 한꺼번에 분석하는 방법이다. 초동을 포함한 시간대역에 시간 창(time window)을 이동시키면서 주파수의 진폭을 계산하여 이를 주파수-시간 축에 진폭을 도시하는 방법으로 주파수별, 속도별 진폭분석이 가능하다 (Kim et al., 1994). Fig. 8은 2000. 1. 18 지진에 대해 Fig. 9는 2000. 5. 21 event에 대해 시간대별 주파수 특성을 분석한 것이다. 여기서 사용한 시간 창(time window)은 3.2 초이며 시간 창 이동시간은 0.8초이다. 그림에서 가로축은 시간을 세로축은 주파수를 나타내어 시간별 주파수별 특성을 나타낸다. Fig. 8에서 2-3Hz의 Lg파가 가장 우세하고 P파는 3-15Hz 사이에 잘 발달하고 있으며, Fig. 9에서는 P파와 Lg파의 구별이 분명하고 P파는 3-4Hz에서 peak를 이루고 Lg파는 2-3Hz에서 peak를 나타낸다.

5. 한반도 및 인근해역의 지진 메카니즘 특성

일반적으로 한반도 및 인근해역에서 발생하는 지진들은 그 규모가 작아서 원거리 지진 기록이 불량하고 근거리 지진은 지진파의 전체 파형을 기록할 수 있는 고감도 지진계가 없어서 정량적인 지진 발생 메카니즘을 규명하는데 어려움이 있었다. 따라서 지진자료를 이용한 한반도 주변의 지진원 요소(Earthquake Source Parameter)에 관한 정보들이 인접한 일본이나 중국 북동부에 비해 매우 제한되어 있는 실정이다. 본 연구에서는 한반도 및 인근해역에서 발생한 지진중 현재까지 메카니즘이 밝혀진 지진들을 종합하여 한반도 주변의 현재의 응력 상태를 고찰하고 이를 판구조론적 관점에서 토의코져 한다.

Jun(1990), Jun and Kim(1990) 및 Jun(1993)은 한반도 및 주변에서 1963년 이후에 발생한 비교적 큰 8개 지진의 원거리(Teleseismic) 실체파(Body-wave)를 Modelling이나 Moment Tensor Inversion에 의해 지진원 메카니즘(Earthquake source mechanism)을 구했다. Shimazaki(1984)는 1936년 당시의 Wichert 지진계에 기록된 지리산 쌍계사 지진의 대구와 부산의 지진 기록 중 P파와 S파를 modelling한 synthetic seismogram으로부터 지진 메카니즘을 추정했다. 비록 매우 제한적인 숫자의 지진자료를 사용하였으나 분석방법이 정량적이고 그 결과가 Jun(1990), Jun and Kim(1990)이 분석한 한반도 주변의 주 응력 방향(principle stress axis)과 유사하여 신빙성 있는 자료로 판단된다. Kang and Choi(1993)는 1936년 지리산 쌍계사 지진부터 1987년까지 한반도에서 발생한 19개 지진의 메카니즘을 발표한 바 있다. 이들이 어떤 자료를 어떻게 분석하였는지 자세한 기술은 없으나 P파의 초동(polarity)을 분석하여 단층면해(fault plane solution)를 구한 것으로 추측된다. 이들 지진의 특징은 주향이동(strike-slip)이 우세하고 동서 방향의 주 응력 방향을 제시하고 있어 위에서 언급한 한반도 주변의 일반적인 지진 특성과 일치한다. 이들 19개 지진 중 본 연구에서는 규모 4.5 이상의 3개 지진(Table 1 참조)을 참고하였다.

김성균외(1996)는 1994. 7. 25 황해 남부 지진에 대하여 지진파형 역산을 통해 메카니즘을 구했고, 박창업 등(1997)은 1996. 12. 13 영월지진에 대해 한반도 및 일본의 자료를 이용하여 격자시험방법을 적용하여 지진 메카니즘을 구했다. Kim and Kraeva(1999)는 1996. 12. 13 영월지진과 1997. 6. 25 경주지진의 메카니즘을 IRIS 관측소(INCN) 자료를 이용한 Moment Tensor Inversion 방법으로 구했다. 이중 영월지진의 메카니즘은 박창업 등(1997)의 결과와 매우 유사하게 나타났다.

Table 1은 본 연구에 사용한 1963년 이후 한반도 및 주변에서 발생한 지진중 지진메카니즘이 비교적 잘 밝혀진 규모 4.5 이상의 14개 지진의 진원특성을 Fig. 10은 이들 지진

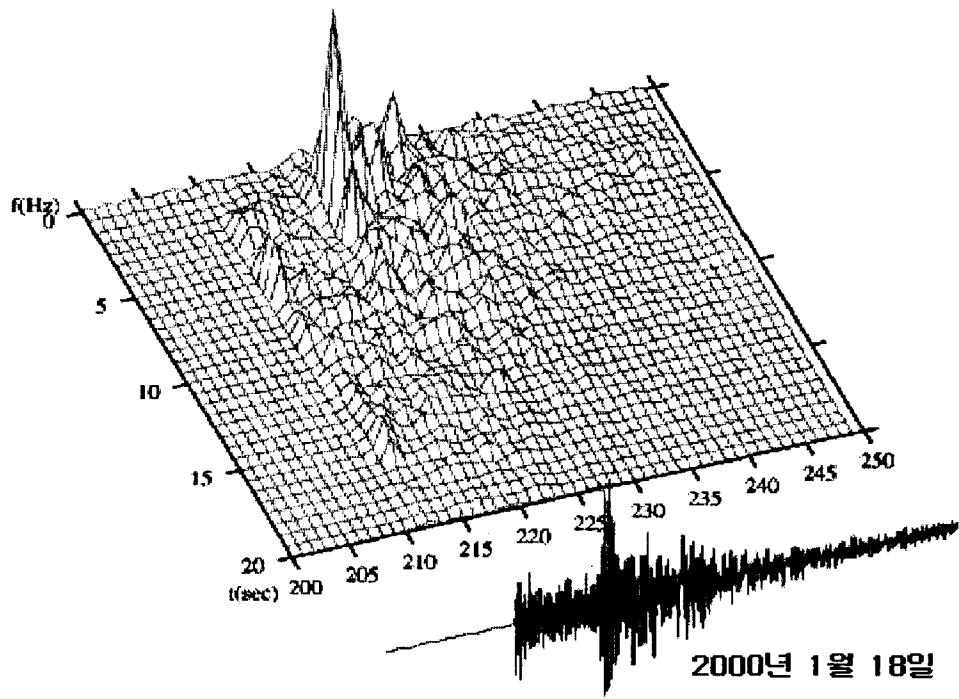


Fig. 8. Spectral contents of 18 Jan, 2000 event observed at Chulwon station.

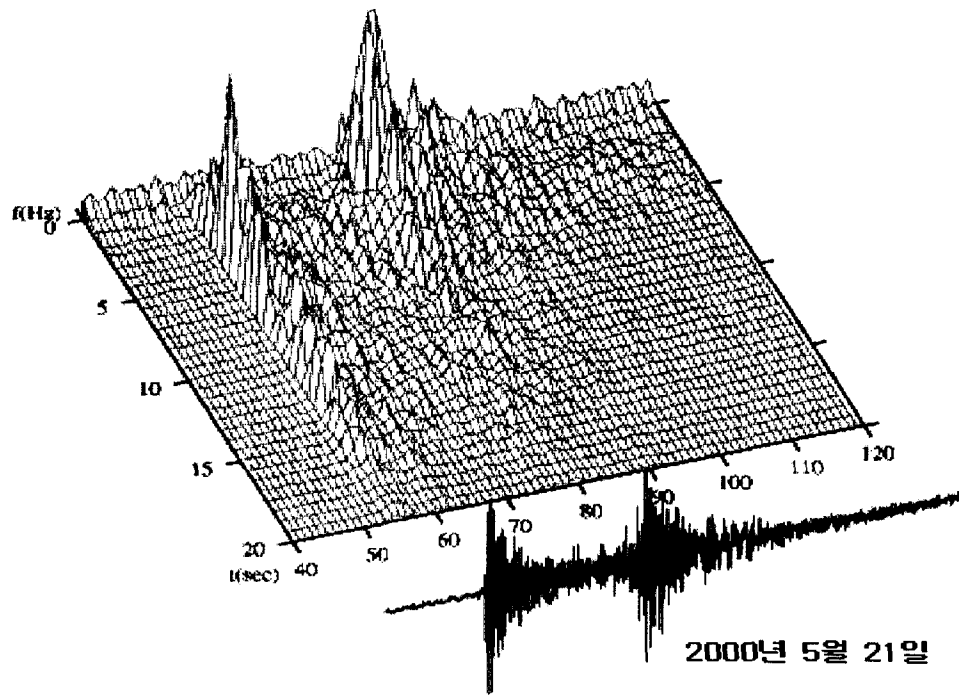


Fig. 9. Spectral content of 21 May, 2000 event observed at Chulwon station.

Table 1. Source parameters of 14 earthquakes.

No.	Date	Location		Mag.	Nodal plane 1		Nodal plane 2		P-axis		T-axis	
		$\phi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$		ϕ_s	δ	ϕ_s	δ	Az.	Dip.	Az.	Dip.
1	1936.07.04	35.20	127.60	M_w 5.1 ^a	14	64	121	60	67	3	335	42
2	1963.09.06	36.47	130.76	M_w 5.7 ^b	32	69	129	72	260	2	351	28
3	1963.09.07	36.53	130.79	M_w 5.8 ^b	25	61	122	79	250	12	347	29
4	1976.10.06	35.31	124.18	M_w 5.4 ^b	199.5	61.8	306.8	61	253	1	163	43
5	1978.08.29	39.18	124.50	M_L 4.6 ^c	30	75	120.5	84	74.5	5.5	166	15.6
6	1978.11.23	38.37	125.65	M_L 4.5 ^c	43	75	308.5	75	86	22	176	11
7	1980.01.07	40.22	125.02	M_w 5.1 ^b	215.7	62.3	309.1	83.6	79	15	176	24
8	1980.09.20	38.30	130.70	M_w 4.9 ^d	210	60	66	35.5	316	14	83	67
9	1981.04.15	35.78	130.10	M_w 5.2 ^b	312	75	219	79	266	3	175	19
10	1982.02.14	38.46	125.65	M_w 5.3 ^b	245.2	43.8	100.6	52	72	71	174	4
11	1982.02.28	37.00	129.52	M_L 4.6 ^b	33	75	128.2	70	261.2	4	170.5	26
12	1994.07.25	34.99	124.50	M_b 5.5 ^e	215.2	37	374.4	74.1	82.5	21.8	200	49.3
13	1996.12.13	37.30	128.80	M_L 4.5 ^f	181	50	292	65	58	8	158	30
14	1997.06.25	35.82	129.18	M_w 4.8 ^f	135	52	31	72	87	13	346	40

a:Shimazaki(1984), b:Jun(1990), c:Kang and Choi(1993), d:Jun(1993), e:김성균등(1996),
f:Kim and Kraeva(1999)

의 지역적 분포와 단층면 해를 보여준다. Fig. 10에서 작은 점(solid circle)은 지진의 진앙을, beach ball은 lower-hemisphere equal area projection에 의한 지진 메카니즘을 나타낸 것이다. 그림에서 진앙부근에 표시된 숫자는 Table 1의 event 번호를 나타낸다. Beach ball에서 검은 부분은 압축(compression)을 흰 부분은 확장(dilatation)을 나타내고, 검은 부분 내의 작은 점(open circle)은 신장력(T-axes)의 위치를 흰 부분 내의 작은 점(solid circle)은 압축력(P-axes)의 위치를 나타낸다. 대부분의 지진이 주향이동(strike-slip) 단층 운동에 의한 메카니즘에 다소의 역단층(thrust) 운동이 첨가된 단층운동 특성을 보여준다. 그러나 중부 동해안에서 역단층(thrust) 운동에 의한 지진이 나타나고 황해도 지역에서 정단층(normal faulting) 운동에 의한 메카니즘이 나타나는데 이는 지역적인 현상으로 판단된다.

Fig. 11은 lower-hemisphere equal area projection에 의한 14개 지진의 주응력축(principle stress axis)의 분포를 보여준다. 그림에서 13개 지진은 주향이동 혹은 역단층 운동을 보여 압축력(P-axes)의 위치를 검은 점으로 표시했고, 정단층 운동을 보인 한 지진은 그 신장력(T-axes)의 위치를 흰(open circle)으로 표시했다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 한반도 및 인근에서 지진을 일으키는 주응력축의 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향의 압축력(compressional force)에 의한 것으로 나타난다. 이는 Jun(1990)이 한반도 주

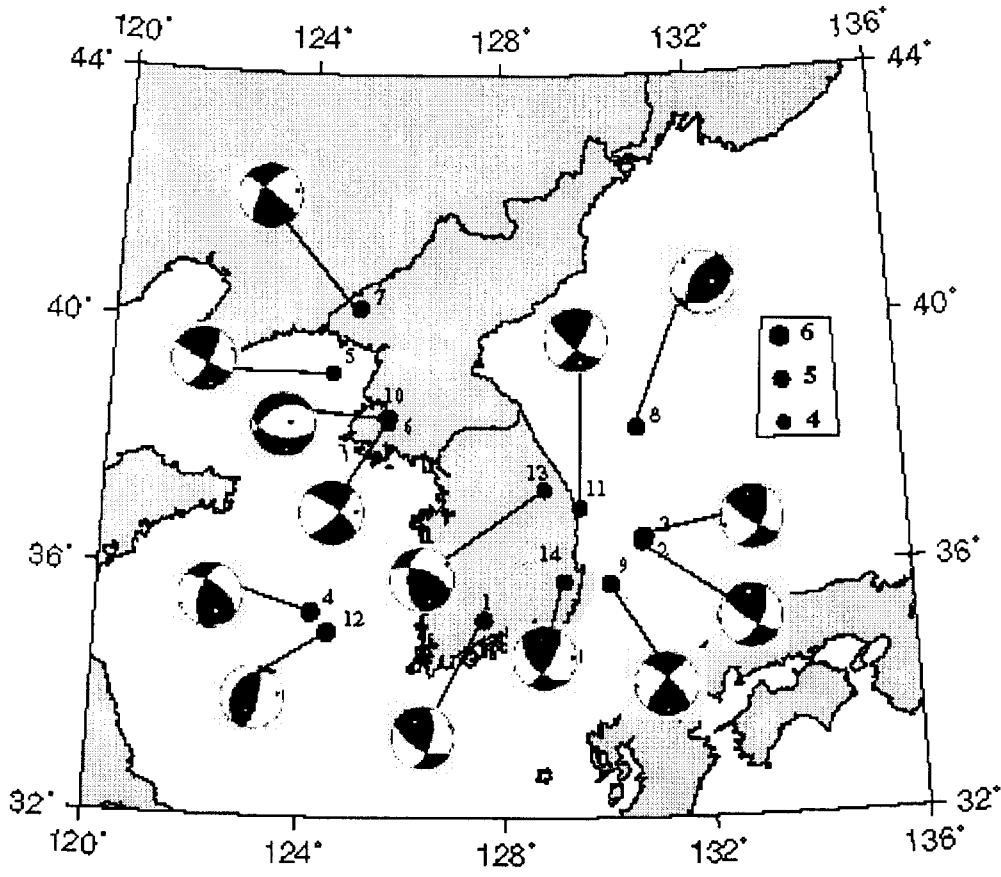


Fig. 10. Epicentral distribution(solid circles) and fault plane solutions (lower - hemisphere equal-area projection) for major 14 events from 1936-1997. Solid and open quadrants correspond to compression and dilatation; small solid circles in open quadrants and open circles in solid quadrants show the position of P- and T- axes respectively.

변에서 최근 발생한 가장 큰 7개 지진들의 Moment Tensor 성분을 중첩하여 얻은 P-axes 방향인 N71°E와 매우 유사하다. 이는 한반도 및 그 주변의 응력장이 동쪽에서 유라시아판 (Eurasian Plate) 밑으로 침강하는 태평양판(Pacific Plate)의 영향뿐만 아니라 남서쪽에서 충돌하는 인도판(Indian Plate)의 영향도 작용하는 것으로 판단된다.

6. 결론 및 토론

지진관측소의 숫자가 증가하면서 지진계에 기록되는 자료의 양도 이와 비례해서 증가한다. 한반도처럼 판내 지진구역에 속해 큰 규모 지진의 숫자가 많지 않은 경우 규모 2.0 - 4.0에 해당하는 작은 규모의 지진도 지각구조 연구 등 지진학 연구에 매우 유용하게 이용될 수 있는 자료이다. 그러나 한반도의 지진발생 상황을 이해하기 위해서는 이런 작은

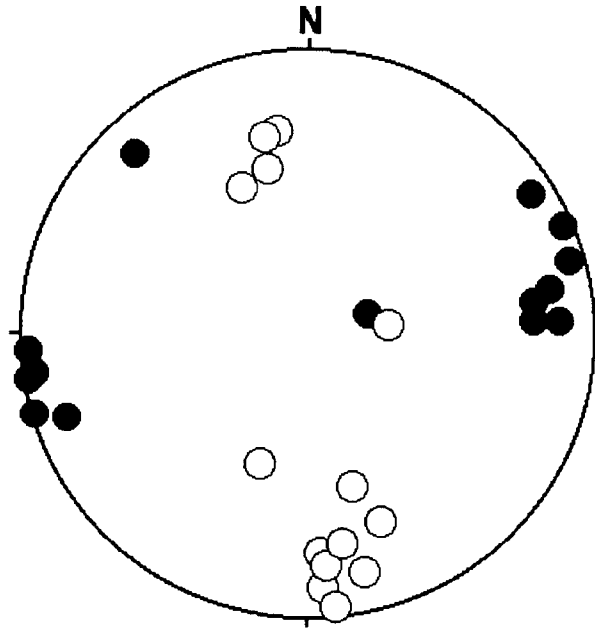


Fig. 11. Lower-hemisphere equal area projection of the P(solid circle) and T (open circle) axes of earthquakes listed in Table 1 and shown in Fig. 10.

규모의 지진 중 산업현장에서 수행하는 인공발파에 의한 자료들을 정확히 식별하여야 한다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 각 산업현장에서 정확한 정보가 제공되어야 하나 현실적으로는 이들이 민원과 직결되는 문제이기 때문에 산업체의 협조를 기대하기 어려운 문제이다. 이런 문제는 장차 제도를 개선하여 해결하여야 될 것으로 판단된다. 이런 점에서 Infrasound 자료를 지진자료와 함께 분석함으로써 자연지진과 인공발파의 식별 가능성을 높일 수 있으리라 판단된다.

최근 한반도 주변에서 발생하는 비교적 큰 지진들의 메카니즘(mechanism)은 주로 수평이동단층(strike-slip faulting) 형태로 나타난다. 지진 메카니즘으로부터 구한 이 일대에 작용하는 응력장은 ENE - WSW 방향($N71^{\circ}E$)의 거의 수평한 압축응력이 작용하고 있다. 이는 한반도 및 그 주변의 응력장이 동쪽에서 유라시아판(Eurasian Plate) 밑으로 침강하는 태평양판(Pacific Plate)의 영향뿐만 아니라 남서쪽에서 충돌하는 인도판(Indian Plate)의 영향도 작용하는 것으로 판단된다.

사 사 : 이 연구는 과학기술부에서 지원하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업과 국무조정실 공공이사회에서 지원하는 기관고유사업으로 수행된 것이다.

참고문헌

- 기상청, 1992, 1978-92 지진관측보고: 기상청 관측담당관실.
- 김성균, 김민선, 서구원, 1996, 지진파형 역산에 의한 황해남부 지진의 메카니즘: 한국지구과학회지, 17권, 4호, 326-329.
- 박창업, 지현철, 강익범, 신진수, 1997, 1996년 12월 13일 영월지진의 지진요소: 추계 한국지진공학회 논문발표집, 인천대학교, 58-63.
- 전명순, 전정수, 石川有三, 1997, 한국의 초기계기지진 자료 분석(1905-1942): 춘계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 서울대학교, 41-48.
- 전명순, 김동균, 강익범, 전정수, 김성배, 김용성, 1999, 원주 KSRS에 관측된 한반도 지진특성: 한국자원연구소 논문집, 3, 22-27.
- 전명순, 전정수, 신인철, 김동균, 제일영, 김용성, 박정호, B. Stump, C. Hayward, J. McKenna, 1999, 철원 지진-공중음파 관측망 설치: 추계 한국지진공학회학술대회논문집, 인천대학교, 52-57.
- Jun, M. S., 1990, Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsular and Yellow Sea. *Tectonophysics*, 192 : 345 - 357.
- Jun, M. S. and Kim, W. Y., 1990, Source mechanism of shallow earthquakes in the western Sea of Japan and their tectonic implication. In M. S. Jun, Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsular and their tectonic implication. Doctoral Thesis, Uppsala University.
- Jun, M. S., 1993, Source properties of earthquakes in and around the Korean Peninsula. In Proceedings of 1993 Joint conference of seismology in east Asia : 170 - 173.
- Kang, S. D. and Y. C. Choi, 1993, On the seismicity of Korea, in *Continental Earthquakes, selected papers of the second International Conference on Continental Earthquakes*, 185-193.
- Kim, S. G. and N. Kraeva, 1999, Source Parameter Determination of Local Earthquakes in Korea Using Moment Tensor Inversion of Single Station Data: *Bull. Seismo. Soc. Am.*, v. 89, n. 4, 1077-1082.
- Kim, W.Y., D. W. Simpson, and P. G. Richard, 1994, High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 84, 1365-1386.
- Li, Y., M.N. Toksoz, and W. L. Rodi, 1966, Discrimination of small earthquakes and explosions, in *Proceeding of the 18th annual seismic research symposium on monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*, 574-583.
- Richards, P. G., D. A. Anderson, and D. W. Simpson, 1992, A Survey of Blasting Activity in the United States: *Bull. Seismo. Soc. Am.*, v. 82, n. 3, 1416-1433.
- Shimazaki K., 1984, Mid-plate, plate-margin and plate-boundary earthquakes stress transmission in far east, in *A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquakes prediction(ISCEP)*, 132-147.