

한국의 육상 탄성파탐사

권병두*

서울대학교 사범대학 지구과학교육과

On-Land Seismic Survey of Korea

Byung-Doo Kwon*

Department of Earth Science Education, Seoul National University

The on-land seismic survey in Korea was begun in mid-1960s. Kim *et al.*(1967) of Korea Geological Survey reported on the result of gravity and seismic reflection surveys conducted in the Pohang area for the period of 1963-64 to assess its possibility of oil entrapment. Hyun and Kim (1966) carried out a refraction survey on the tunnel wall. Since then, the KGS geophysicists had conducted seismic surveys on Kyungsang sedimentary basin as a main project for several years. In 1970s, on-land seismic surveys had been conducted for various purposes such as site investigation for the nuclear power plants and industrial complex, exploration for ground water, mineral resources and underground tunnel. The first reflection survey with CMP acquisition was attempted in 1978 by using a digital recording system. But most of on-land seismic surveys had employed the refraction method until 1980s. In 1990s, high resolution reflection and various borehole seismic surveys such as tomography, uphole, downhole, cross-hole methods have been attempted by universities and engineering companies. The applications of on-land seismic surveys have been enlarged for both academic and industrial purposes such as investigation of geologic structure of the fault and tidal flat area, construction of highway, railroad and dam, geothermal energy and mineral resource exploration, environmental assessment for waste disposal sites and archaeological investigations. In 2002, the first crustal seismic survey was carried out on the profile of 294km length across the whole peninsular. It is expected that the advanced technology and experience acquired through offshore seismic surveys, which have been conducted in continental shelf of Korea and foreign oil fields, will stimulate the more active on-land seismic explorations.

Key words : on-land seismic survey, refraction method, reflection method, borehole seismic survey

우리나라에서 최초로 육상탄성파탐사를 실시한 것은 1960년대 중반이다. 탄성파탐사와 관련된 최초의 보고서가 나온 것은 국립지질조사소의 김중수박사 등이 1964년 포항지역의 석유부존 가능성을 조사하기 위하여 수행한 반사법 탄성파탐사와 서울대학교의 현병두교수가 탄광의 갱도 주벽의 상태를 조사하기 위하여 실시한 굴절법탐사이다. 이후, 국립지질조사소 기본연구계획의 일환으로 경상계 퇴적분지의 층후 및 지질구조 조사를 위한 굴절법탐사가 실시되었으며, 1970년대 들어서는 지하수조사, 광물자원탐사, 땅굴조사, 원자력 발전소 지반조사 등 탐사의 대상과 목적이 다양해졌으며, 1978년에는 CDP기법을 이용한 반사법탐사가 경상분지 지역에서 처음으로 실시되었다. 이후, 육상 탄성파탐사는 토목건설 분야에서 지반조사를 위한 굴절법탐사를 위주로 이루어지다가, 1990년대 들어서서 고해상반사법탐사와 탄성파도 모그래피 및 다양한 시추공 탄성파탐사가 시도되었다. 이와 함께 응용분야도 단층대나 조간대와 같은 특정 지역에 대한 학술적 목적의 연구와 더불어 고속도로, 철도, 댐 건설 등 각종 토목엔지니어링, 지열과 광물 자원탐사, 매립지나 해수침투 지역 등의 환경영향 조사, 문화재 안전관리를 위한 고고학에의 응용 등 다양한 분야로 확대되었다. 2002년에는 한반도를 가로지르는 축선 상에서 지각규모의 탄성파탐사가 이루어져 육상탄성파탐사 연구의 새 장을 열게 되었다. 그동안 우리나라 대륙붕과 해외 유전지역에서의 활발한 석유탐사를 통하여 이룩한 탐사기술의 자립화와 자료 처리를 위한 소프트웨어 부분에서 이룩한 기술적 발전은 앞으로 육상탄성파탐사의 활성화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

주요어 : 육상탄성파탐사, 굴절법, 반사법, 시추공탄성파탐사

*Corresponding author: bdkwon@mantle.snu.ac.kr

1. 서론

탄성파탐사는 탐사지역에 따라 크게 해양탄성파탐사와 육상탄성파탐사로 구분할 수 있고, 단계별로는 야외의 현장에서의 자료획득, 자료의 전산처리 및 탄성파 단면도의 해석과정으로 구분할 수 있다. 탄성파탐사는 전세계적으로 유전탐사에 가장 많이 이용되나, 광역 지각구조 조사를 비롯하여, 국지적으로는 탄전탐사, 광물탐사, 지하수탐사, 지열탐사, 지반조사, 토목지질조사, 환경조사 등에 두루 응용된다. 그러나 해양탐사와 탄성파탐사자료 처리기법의 발전에 대한 논문은 따로 발표될 것이므로, 여기서는 육상에서 실제 탄성파탐사를 수행하고 그 결과를 발표한 것만을 대상으로 우리나라 육상탄성파탐사의 발전 역사와 성과를 살펴보기로 한다.

2. 우리나라의 육상탄성파탐사의 발전 역사

2.1. 1960년대 이전

우리나라에서 물리탐사가 처음으로 시도된 시기는

1937년도 조선총독부 광무과 지질전문가인 간다(神田四男)가 평안북도 삭주군 부은온천을 개발할 때 전기탐광을 실시한 것으로 알려져 있다. 이후, 총독부 산하의 지질조사소, 경도제대, 일본상공성 지질조사소, 조선광업진흥주식회사에서 물리탐사를 시행하였다. 1942년 지질조사소가 보유하고 있던 물리탐사장비는 전기탐사용으로는 SP 전위차계, 자연전위 측정장치, 라디오미터, 대지저항측정기, 고주파발전기, 자력탐사용으로는 수평자력계와 수직자력계, 탄성파탐사용으로는 7성분 라디오지진계가 있었다. 그러나 당시 주로 시행된 탐사는 자연전위탐사법이였으며, 탄성파탐사는 설비 부족으로 1945년 해방 때까지 수행되지 못하였다(한국동력자원연구소, 1990).

2.2. 1960-75년대

우리나라에서 육상 탄성파탐사가 처음으로 수행된 시기는 1960년대 중반으로, 국립지질조사소(현 한국지질자원연구원)의 물탐과 연구진들이 굴절법탐사를 시도하였다. 참고로 물탐과는 1962년 제1차 경제개발 5

慶北道邱 蔚邱洞北方 地震探査走時曲線及解析圖

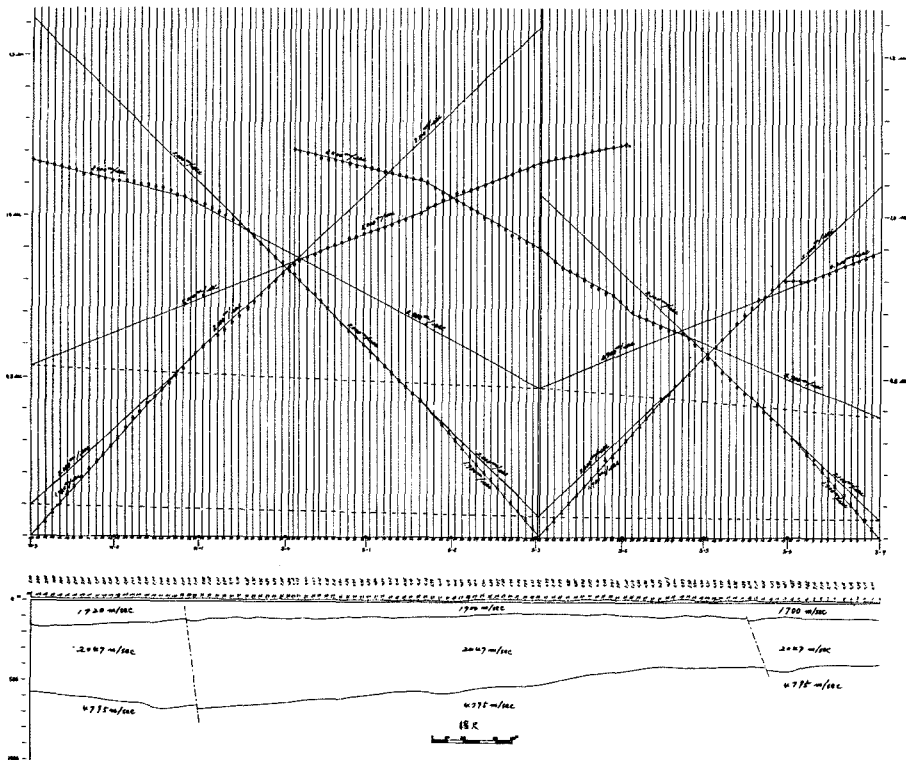


Fig. 1. The travel time curve and its interpretation of the refraction survey conducted on the profile connecting Dongcheon and Dokudong in the Pohang area during 1966-1967 by Kim et al., (1968).

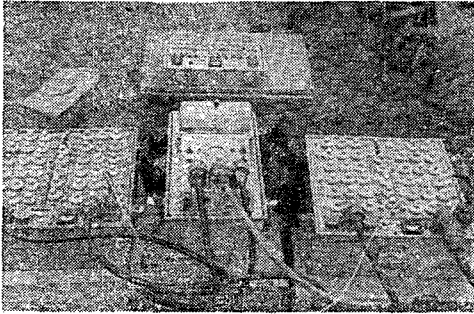
개년계획의 시작과 함께 지질조사소 직제개편에 의하여 탐광부 아래 지화학과, 탐광과와 함께 설치되었으며, 초대 물탐과 과장은 김종수박사가 맡았다. 당시 지질조사소가 보유하고 있던 탄성파탐사기기로는 천부굴절법탐사용 Dynamertic 사의 Seismic Timer와 1964년 도입된 반사법 및 굴절법탐사가 가능한 ETL (Electro-Tech. Lab.)의 12채널 진공관식 포터벨기기가 있었다. 그러나 기술상의 문제로 인하여 반사법탐사는 수행하지 못하고, 굴절법탐사만 시험적으로 수행한 것으로 보인다(Mineral Industries Engineers, Inc, 1965).

이 시기는 또한, 경제개발 5개년 사업의 일환으로 석유자원 조사 대상지역으로 포항지역을 선정하여 유전탐사를 시작하던 때이다. 포항지구의 유전탐사를 위하여 1963년부터 1968년까지 지표지질조사와 중력 및 탄성파탐사를 포함하는 물리탐사를 수행하였으며, 대만과의 기술협력의 일환으로 대구경시추기를 들여와 3개공의 시추탐사를 수행하였다. 탄성파탐사는 1964년 후반기에 중력이상이 나타나는 지역에서 동서방향의 9.6 km 축선 상에서 800 m 간격의 발파공을 뚫어 반사법탐사를 수행하였다. 김종수 등(1967)은 중력탐사와 탄성파탐사 결과를 종합 해석하여 “포항-홍해 지구물리탐사종합보고서”를 작성하였으며, 간략히 스케치된 탄성파단면도가 수록되어있다. 그 후, 1966년 하반기와 1967년 상반기에 포항 남부지역에서 제3기층의 층후와 지질구조를 규명하고 시추 위치를 결정하기 위하여, ETL사의 탐사기기를 이용하여 동촌-도구간 약 5.8 km 축선에 대한 반사법탐사와 굴절법탐사를 수행하였다. 에너지원으로는 평균 8~10 m 정도의 시추공을 뚫어 다이나마이트를 사용하였으며, 굴절법탐사를 위한 수진기 간격은 50 m로 설치하였다. 굴절법탐사 자료로부터 3개층까지 해석을 실시하였으며(Fig. 1), 축선 상에 위치하는 기존의 시추공 PY1공의 시추결과와 대비하였다. 그러나 반사법탐사자료의 해석과 관련된 결과보고는 없었다(김종수 등, 1968). 이 기간 동안 총 6개공에서 시추를 실시한 국립지질조사소는 포항지역의 석유부존 가능성은 희박하다는 결론을 내리고 탐사작업을 중단하였다. 그러나 정우진이라는 개인의 끈질긴 집념과 막후 노력으로 포항지역에 대한 석유탐사는 1975년에 재개되어 1977년까지 추가적인 시추탐사가 실시되었으나 결국 실패로 끝났다. 1976년 1월 16일 한 시추공에서 석유가 발견되었다는 정부의 발표로 한 때 온 국민들이 환호의 도가니에 빠져들기도 했으나, 그 진위는 아직까지 확인이 되지않고 있다(한국석유개발공사, 1994).

한편, 1968년부터 국립지질조사소 물탐과의 기본연구계획의 일환으로 경상계 퇴적분지에 대한 층후 및 지질구조를 규명하기 위하여 탄성파탐사를 시작하였다. 보고서가 정식으로 발간되지는 않았지만, 구자학, 양승진, 유공열이 경상북도 달성지구에서 경상계 낙동층에 대한 탄성파탐사를 처음으로 시도하였다. 1969년에는 유공열 등(1970)이 자인지구에 대한 탐사를 실시하였으며, 1970년에는 서정훈 등이 경북 성주지구, 1971년에는 유공열 등(1972)이 고령지구에서 굴절법탐사를 실시하였다(Fig. 2). 그러나 탐사기기의 성능과 부속장비가 불충분하여 원격조정발파 등을 시도할 수 없었고, 발파공 및 발파작업 등이 문제로 지적되었다. 주시곡선의 해석은 수동식 계산기를 이용하여 3 내지 5개 층으로 해석하였으며, 최하부층의 경우는 자료 부족으로 인하여 기반 여부를 확인할 수 없었다 한다(유공열 등, 1970).

1972년도에는 왜관 매곡동 지역에 대한 탐사와 전주 삼례지구에서 지하수탐사를 위하여 굴절법탐사를 수행하였다. 이때부터 지질조사소가 수행하는 육상탄성파탐사는 여전히 굴절법탐사를 위주로 하고 있으나, 탐사 대상이나 목적을 다양화하기 시작하였다. 1973년에는 전라북도 김제군 봉남면 평사리 일대에서 사광산분포 조사를 위하여 기반암을 규명하고 구하상의 분포를 조사하기 위한 탄성파탐사를 실시하였다. 1974년도에는 남침용 땅갈 조사 의뢰를 받아 휴전선 부근에서 탄성파탐사를 실시하였다.

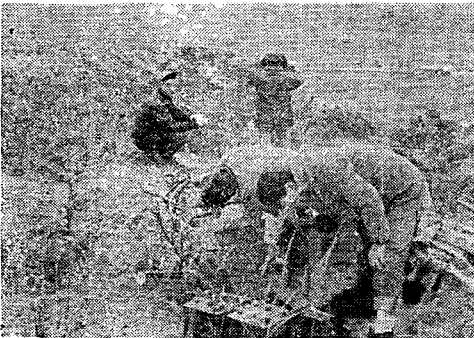
당시 탄성파탐사는 초기의 아날로그시대에서 디지털 시대로 들어서서, 외국 석유회사의 연구소에서는 탄성파자료의 획득과 데이터 처리에 대한 연구가 본격적으로 시행되던 시기였다. 이에 따라 국내에서도 탄성파탐사를 위한 디지털 시스템과 데이터처리에 대한 리뷰 페이지들이 발표되기 시작하였다(조동행, 1971). 한편, 1966년에는 해저자원 조사를 위하여 포항 근해 해역에서 처음으로 해상음파 및 자력탐사를 실시하였다. 그 후 1968년에는 ECAFE의 후원아래 한국, 미국, 일본, 중국 등이 공동으로 황해와 동지나해의 해저 광물자원 조사를 목적으로 3차례에 걸쳐 해상물리탐사를 실시하였다. 조사선은 R/V E.V. Hunt로 탐승 과학자 대표는 미국 Woods Hole 해양연구소의 Emery박사였으며, 우리나라에서는 양승진, 구자학이 1차와 2차에 참가하였다. 물리탐사는 반사법탄성파탐사와 함께 자력탐사, 수심측정 조사가 수행되었다(김종수 등, 1969). 또한, ECAFE-CCOP 활동의 하나로 기술국이 창설된 후, 1972년도 싱가포르에서 처음으로 실시된 “지구물리탐사 자료의 전자계산기 처리 방식 및 해석에 대한 훈련세



탄성파탐사기



조사광경



조사광경



조사광경

Fig. 2. Seismic refraction carried out on Kyungsang sedimentary basin in 1970 by Seo *et al.*, in 1971.

마나”에 다녀온 구자학, 이원영박사의 보고서를 보면 세미나는 탄성파탐사를 중심으로 진행되었으며, MV “R.C. DUNLAP”을 방문하여 탄성파탐사기기를 견학하고, 탐사과정을 소개하는 필름을 시청하였다고 한다(구자학, 1972). 이 시기는 우리나라 주변 대륙붕에서 석유탄사가 외국회사들에 의해 시작되던 시기로 국내 탐사전문가들이 탄성파탐사에 관심을 갖기 시작한 시기로 생각된다.

한편, 학계에서는 1961년 미국 Colorado School of Mine에서 탄성파탐사 분야의 박사학위를 받은 현병구 박사(현 서울대학교 명예교수)가 귀국하였다. 1963년 서울대학교 공과대학 광산학과에 부임하여 지구물리학을 가르치면서 탄성파탐사를 비롯한 물리탐사 분야의 연구를 본격적으로 수행하게 된다. 광산학회지(현 지구시스템공학회지)에 게재된 초기의 탄성파탐사 관련 논문들을 보면, 탄광의 갱내에서 갱도주벽의 균열 또는 파쇄대의 상태 및 채굴작업이 갱도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 갱도주벽에 대한 굴절법탐사를 처음으로 수행하였다(현병구와 김동기, 1966; 홍준기 등, 1967). 토목건설 분야와 관련된 탄성파탐사로는 1968년 홍준기 등이 울산석유공업단지에 대한 지반조사를 위하여 물리탐사를 수행하면서 굴절법탐사를 수행하였

다. 당시 사용한 기기는 지질조사소가 보유하고 있던 Dynametric사의 Seismic timer를 사용하였다. 1960년대에 우리나라의 물리탐사를 주도하던 국립지질조사소 물탐과 연구원들은 당시 전기탐사나 방사능, 자력탐사 등에는 어느 정도의 경험과 지식을 축적하고 있었으나, 처음으로 시도하는 탄성파탐사는 전문 인력이 부족하고 탐사기기도 충분치 못하여 많은 어려움을 겪었던 것으로 생각된다. 그러나 현병구교수의 연구실에 대학원생들이 늘어나고, 일부 졸업생들은 외국으로 유학을 가게 되면서 탄성파탐사 분야 인재 양성의 발판이 구축되었다.

2.3. 1975년-1990년

1973년부터는 국립지질조사소와 국립광업연구소가 통합되어 국립지질광물연구소로 운영되다가, 1976년에는 국제수준의 연구소 구축을 목적으로 과학기술처 산하의 특정출연 연구기관으로 재단법인 자원개발연구소로 재발족하게 되었다. 이때부터 국내의 고급인력의 유치가 본격화되고, 연구장비의 현대화도 가속화하게 되었다. 물리탐사는 탐사부 아래 육상물리탐사실, 해양물리탐사실 및 기초연구실이 연구와 탐사활동을 수행하게 되었다. 특히, 초대 연구소장으로 현병구교수가 선임됨으로써 물리탐사 분야에 대한 관심이 고조되고, 연

구소와 학계의 공동연구를 통한 전문인력 양성도 활기를 띠게 되었다.

한편, 학계에서는 1970년대 중반 들어 미국에서 지구물리학 박사학위를 받은 서정희, 민경덕, 이기화박사가 귀국하여 대학에 자리를 잡았다. 이로써 당시 서울대학교 광산학과와 현병구교수와 지질학과와 정봉일교수와 함께 지구물리학 및 물리탐사 각 분야의 연구에 박차를 가하면서 대학원 과정의 전문 인력의 양성도 본격적으로 시작되었다. 비슷한 시기에 지질조사소에서 근무하다가 미국 유학 중이던 양승진박사도 귀국하여 연구소로 복귀하면서 탄성파탐사 분야에서는 탄성파탐사자료 처리기법에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 이후, 외국 대학에서 학위를 받은 여러 사람들이 계속 귀국하고, 1980년대에 들어서는 국내 대학에서도 지구물리·물리탐사 분야의 석·박사들이 본격적으로 배출되면서 연구 분위기가 활성화되고, 응용 분야도 점차 확장되었다. 또한, 우리나라 대륙붕에서 얻은 탄성파탐사자료의 처리 및 해석과 관련된 여러 작업들이 시작되었다.

1978년에는 자원개발연구소가 아시아개발은행(ADB)으로부터 차관을 얻게 되어 많은 연구기자재가 도입되면서 물리탐사분야의 연구활동도 크게 활기를 띠게 되었다. 당시 전기전자, 중·자력, 방사능탐사 분야에서는 어느 정도 기술력과 경험이 축적되어 본격적인 발전의 계기를 맞이하였으나, 육상에서의 탄성파탐사 활동은 다소 침체된 분위기가 이어졌다. 그러다가 1977년에 반사법탐사용 DFS-V 탐사기가 도입되어, 이듬해 국내기술진에 의한 본격적인 반사법탄성파탐사가 처음으로 경남 진해 및 해남지역에서 실시되었다(조동행 등, 1979). 이때 처음으로 CDP 중합기법을 적용하여 6.2km의 축선에 대하여 1200% CDP 반사법탐사를 수행하였다. 그러나 당시 전산처리용 컴퓨터 및 소프트웨어가 없어 GSI(Geophysical Survey International) 싱가포르시에 탐사자료 마그네틱 테이프를 보내어 처리하였다. 자료 처리 결과, 탐사지역의 퇴적층의 속도는 함안층의 4,200 km에서 낙동층 7,300 km까지 대단히 높은 값을 보인다.

1970년대 들어서 우리나라에 원자력 발전소가 건설되기 시작하면서, 고리, 월성, 영광, 울진 등지의 예비안정성조사를 위한 사전 부지조사에 탄성파탐사가 응용되기 시작하였다. 국립지질조사소 시절부터 시작하여 그동안 굴절법탐사에 대한 어느 정도의 노하우를 갖추게 된 당시 자원개발연구소 물리탐사팀은 1978년부터 1983년까지 경상북도 월성, 전라남도 영광 계마리



Fig. 3. Dr. S. J. Yang with the cross-hole seismic survey instrument used for nuclear power plant sites.

지역과 강원도 부구지역에서 세부지질조사의 일환으로 굴절법탐사를 수행하였으며, D'Appolonia Consulting Engeers를 비롯한 외국의 용역회사들의 기술자들이 내한하여 함께 시추공을 이용한 크로스홀, 다운홀 조사 등을 수행하였다. 이 시기에는 양승진박사(현 한양대학교 명예교수)가 기초연구실 실장으로 탐사팀을 이끌었으며, 서상용, 정승환과 필자 등이 참여하여 현재 원자력발전소 부지를 비롯하여 당시 예비 후보지로 거론되던 여러 지역에서 탐사를 수행하고 PSAR(Preliminary Safety Analysis Report) 작성에 참여하였다. 1980년도에는 크로스홀 탐사기를 도입하여 원자력발전소부지 조사에 이용하기 시작하였으며, 토목지질 분야의 시추공 탄성파탐사에 응용할 수 있는 발판을 마련하였다(Fig. 3). 현재는 국립공원으로 지정되어 있는 변산반도의 격포 지역을 비롯하여 당시 후보지로 올라있던 여러 곳에서 광산에서 사용하는 다이내마이트를 터뜨리면서 탐사를 실시했었는데, 요즘 환경운동하는 사람들이 그 광경을 보았다면 기절초풍했을 것이다. 한편, PSAR 작성을 계기로 한반도의 지진활동에 관한 연구가 본격적으로 이루어지게 되었으며, 내진설계와 관련된 지진공학 분야의 관심도 고조되었다.

탄성파탐사의 응용 대상이 확대됨에 따라, 1979년도에는 봉명 흑연광산에서 탄성파탐사를 실시하였으며, 행정수도 이전계획이 수립됨에 따라 공주-조치원 사이에서 구자학, 이태섭이 굴절법탐사를 실시하였다. 1980년도에는 심부지질구조 파악을 위하여 경상북도 의성 지역과 전라남도 해남지역에서 DFS-V를 이용하여 반사법탄성파탐사를 수행하였다. 탄광지역에 대한 탐사는 이상규 등이 1983년에 보은탄전 서부지역과 봉명탄광 지역에서 반사법탄성파탐사와 전자탐사를 실시하였으며, 다음 해에는 호남탄전 화순지역에서 반사법, 굴절

법탐사와 전기 전자탐사를 수행하였다. 1987년에는 독일에서 학위를 받고 연구 중이던 김종열박사가 귀국하여 탄성파탐사를 위한 축소모형 실험연구를 시작하였으며, 유층구조 및 탄층구조 모형에 대하여 실험을 시도하였다(김중열, 1986, 1989).

한편, 이 시기에는 경제 발전과 더불어 도로 건설이나 대단위 공단 부지 조성 등 산업활동이 활기를 띠면서 토목지질 분야에서 지반조사를 위한 굴절법탐사를 어느 정도 수행한 것으로 보인다. 건설부 작성한 1975년도 터널공사 표준시방서 및 동해설에도 굴절법탄성파탐사가 소개되어 있다. 그러나 조사결과가 공식적으로 발표된 것은 찾아보기 힘들고, 국내 학회지에도 육상탄성파탐사와 관련된 연구논문은 많이 발표되지 않았다.

우리나라 대륙봉에서의 석유탐사는 앞에서 언급한 바와 같이 1960년대 후반 시작하였으나, 당시 우리나라의 경제적 능력과 기술수준을 감안하여 정부에서는 외국의 석유개발회사에 조광권을 부여하여 걸프, 셀, 텍사코, 코암사 등이 탐사를 계속하게 된다. 그러다가 1979년 한국석유개발공사(현 한국석유공사)가 설립되고, 1984년 반잠수식인 시추선 두성호를 건조함으로써 우리기술진에 의한 자주적인 석유탐사개발 기반이 조성되었다. 1970년대 말 대륙봉 단독광구에서 외국의 조광권자들이 석유를 발견하지 못하고 철수함으로써, 1983년부터는 석유개발공사는 자체적으로 계획을 수립하여 물리탐사를 수행하게 된다.

2.4. 1990년대 이후

1990년대로 접어들면서 대륙봉에서 탄성파탐사가 본격적으로 계속되고, 한국해양연구원과 한국지질자원연구원에서 자체적으로 탐사선을 건조하여, 석유공사와 더불어 탐사에 나서 많은 양의 양질의 자료를 얻게 되었다. 이 결과 탄성파탐사자료 처리기법에 대한 연구가 활력을 받아 크게 발전하였으며, 일부 기술영역의 경우 세계적인 수준에 올라갈 정도로 비약적인 발전을 하게 된다. 또한, 국내외에서 광물자원탐사가 활기를 띠면서 한국지질자원연구원과 대한광업진흥공사의 물리탐사팀이 주도하여 많은 탐사작업이 수행되었으며, 학계에서는 물리탐사기법에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 그러나 육상탄성파탐사의 경우, 지형적으로 탐사를 수행하기가 쉽지 않고, 에너지원으로 다이내마이트 사용하기에는 제약이 너무 많아 일부 지역에서 제한적으로 시도되었다.

현재 학계에서 육상탄성파탐사를 실제 수행하면서

연구를 하고 있는 사람은 그리 많지 않은데, 그 중에서도 가장 활발하게 연구 활동을 하고 있는 사람은 강원대학교 지구물리학과와 김기영교수이다. 김교수는 1989년 미국에서 박사학위를 받고 귀국하여 한국해양연구소에서 반사법탄성파탐사 자료처리에 대한 연구를 계속하였다. 대학으로 자리를 옮긴 후, 1997년에는 야외탐사를 통하여 풍암분지 퇴적지층의 지진파속도 및 탄성계수를 산출하였고, 풍암분지 북동부지역 및 중부지역에 대한 고해상도 탄성파탐사를 수행하였다(김기영 등, 1998a; 김기영과 허식, 1999a, 1999b). 1998년에는 양산단층 지역에서 수행한 수직균열에 의한 탄성과 이방성을 측정된 결과를 발표하였다(김기영 등, 1998b). 한편, 해양연구소 연구원들과 함께 시화호내 과거 조간대 지역에서 고해상도탄성파탐사를 실시하였다(홍종국 등, 1999). 그 후 울산시 약수지역의 울산단층대에 대한 굴절법탐사(이광자 등, 2000; 김기영 등, 2002), 경주시 천북목장 부근의 기암암 분포조사를 굴절법탐사(이광자와 김기영, 2000), 경주시 감산사단층 부근에서의 굴절법탐사(김기영과 김동훈, 2002a)를 수행하였다. 2002년도에는 경북대학교 이정모교수를 연구책임자로 하는 한반도지각 속도구조 연구가 시작되면서, 대규모발파 후보지의 지하구조를 확인하기 위한 굴절법탐사를 수행하였다(김기영과 김동훈, 2002b).

그 외에도 탄성파탐사를 수행한 연구자로는 충남대학교 송무영교수가 1993년 연약지반에서의 P파, S파 반응의 비교 연구를 수행하였으며(송무영과 유영준, 1993), 천수만 간척지(송무영 등, 1989), 서산간척지(김팔규 등, 1995) 등과 지하철 공사 구간을 비롯하여 여러 토목건설 현장에서 탄성파탐사를 수행하였다. 또한, 시추공을 이용한 탄성과 토모그래피(송무영과 송민호, 2000; 송무영 등, 2001; 서기황 등, 2003)와 음파검층과 탄성과 속도 분석을 위한 연구(송무영 등, 2003)도 수행하였다. 군산대학교 정희욱교수는 1995년 매립지 천부지반조사를 위하여 탄성파탐사를 수행하였으며, 1996년부터는 지반의 S파 속도구조를 조사하기 위한 표면파탐사 기법에 대한 연구를 수행하였다(정희욱, 1995, 1997, 2001, 2004). 공주대학교 서만철교수는 감은사지, 미륵사지, 공산성, 불국사 등지에서 지반조사를 수행하는 등, 고고학과 관련된 분야에 탄성파탐사를 비롯하여 물리탐사기법을 적용하였다(류제라와 서만철, 2001; 서만철 등, 2002, 2003; 오진용과 서만철, 2005). 한성대학교 이두성교수 등은 강원도 도계 탄광지역에서 3차원 반사법탄성파탐사와 굴절법탐사를 이용하여 지반침하 형태를 분석하였으며(고광범과 이두성, 2000; 윤상호 등,

2000), 동아대학교 김진후와 김현도(2004)는 비고결 퇴적물에 대한 다운홀탄성파탐사를 실시하여 횡파속도를 연구하였다.

한편, 한국지질자원연구원의 김중열박사팀은 탄성파 모형실험을 본격화하여, 천부 지질구조조사를 위한 탄성파 발생원 개발 연구를 수행하였다(김중열, 1994; 김중열 등, 1994a, 1994b, 1994c) 또한, 탄성파 지오토모그래피에 대한 연구를 시작하여 1995년에는 기차 전복사고가 일어난 구포지역의 지반조사를 위하여 야외탐사를 수행하였다(김중열 등, 1994d, 1995; 김중열, 1995). 그 후, 고분해탄성파탐사와 지오토모그래피에 대한 연구를 계속 수행하였으며(김중열, 1996, 2000; 김중열 등, 2001), 2002년도에는 탄성파탐사 전문 용역회사 소امن컨설팅트를 설립하여 활동하고 있다.

또한, 이 시기에는 한국도로공사, 토지공사, 환경청을 비롯한 각 기관에서 시행하는 토목 건설공사 및 응용지질조사 시방서에 탄성파탐사를 비롯한 다양한 물리탐사가 포함되고, 토목엔지니어링 분야에 물리탐사기법이 본격적으로 활용되면서 지질자원연구원 연구팀 외에도 지반조사를 전문분야로 하는 용역회사들이 다수 설립되었다. 1980-90년대에 걸쳐 학계 및 연구소 등에서 발전시킨 다양한 탐사기법이 이들 회사에 보급되고, 지구물리탐사 관련 학과 출신의 석·박사급 전문 인력들의 진출도 많아지면서 기술 수준이 크게 향상되었다. 현재 물리탐사를 전문적으로 수행하는 곳은 회송지오택, 지오텍컨설팅트, 지하정보기술, 지오제니컨설팅트, 휴먼앤어스 등 다수의 회사들이 있으며, 이들은 필요에 따라 지질자원연구원 및 학계와 협동으로 탄성파탐사를 비롯한 다양한 물리탐사를 수행하고 있다. 따라서 물리탐사의 응용 분야도 한층 넓어져 고속도로 및 대규모 토목공사 현장의 지반조사(이윤재, 1987; 한국도로공사, 1998), 지하수, 지열탐사를 비롯하여, 문화재 안전진단(조철현 등, 2004), 제주도 해안지역을 비롯한 연안지역에서의 해수침투, 폐광산으로부터의 산성광산 배수 유출 탐지(황세호 등, 2005; 박권규, 2006) 및 매립지의 침출수 유동 문제 등 환경문제를 해결하기 위한 물리탐사 연구가 수행되었다.

그동안 지반조사를 위한 탄성파탐사에서는 주로 굴절법탐사와 반사법탐사가 많이 이용되었으나(유영준 등, 1999), 근래에 와서는 토목공학적 파라미터를 보다 정확하게 얻기 위하여 시추공을 이용한 다운홀탐사(Downhole seismic survey), 수직탄성파탐사(Vertical seismic profiling; VSP), 크로스홀탐사(Cross-hole seismic survey) 및 탄성파토모그래피가 활성화되었다.

탄성파토모그래피 기법은 지반의 상세한 속도분포를 파악하고, 그로부터 파쇄대, 공동 등의 지질이상대를 해석하기 위하여 이용되며, 서해대교 등과 같은 대규모 토목구조물의 기초 하부나 고층 빌딩 하부의 지반조사에 적용되고 있다(서상원, 1997). 또한, 표준관입시험시 발생하는 탄성파를 이용하는 SPT 업홀탐사(SPT uphole survey) (김동수 등, 2005), 터널 굴착 과정에서 주위의 파쇄대와 같은 불연속면을 조사하기 위한 막장전방 탄성파탐사(TSP; Tunnel Seismic Profiling) 기법 등이 다양하게 응용되고 있다(장현삼 등, 1999; 차성수 등, 1999; 김학수, 2003). 또한, 토목분야의 비파괴 조사기법의 하나로 탄성파를 이용하는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves)와 충격반향법(Impact Echo) 기법이 도입되어 공항의 활주로와 같은 공사현장의 다짐효과를 조사한다거나, 터널이나 교각, 옹벽 등의 콘크리트 구조물의 의 건전도를 평가하는 데에 응용이 되고 있다(정연문, 2000).

2000년대 들어 우리나라의 육상탄성파탐사 분야의 연구 활동에 새로운 획기적인 시도가 시작되었다. 경북대학교의 이정모교수 등은 한반도 지각의 속도구조를 밝히기 위하여 대규모 탄성파탐사를 계획하고, 2001년에 축소형 지침실험을 경상북도 청송군에 위치하는 경북대학교 연습림에서 실시하였으며, 이 내용은 매스컴에서 인공지진 실험으로 크게 보도되었다(Fig. 4). 2002년 12월에는 서산-영동-경주를 잇는 북동-남서 방향의 294 km 축선을 따라 198대의 이동식 지진계를 평균 1.5 km 간격으로 설치하고, 서산과 영동지역에서 다이내마이트 1톤과 0.5톤을 발파하는 대규모 굴절법 탄성파탐사를 실시하였다. 탐사자료는 굴절파토모그래



Fig. 4. Television news report of the preliminary crustal seismic survey conducted at Cheongsong, Kyung-sangbuk-Do, by Lee et al., in 2001.

피와 다중위상자료 분석을 통한 속도단면도와 표면파 분산분석에 의한 천부지각속구조 해석 등 다양한 연구를 실시하고 있다(이정모 등, 2003; 김기영 등, 2004; 장용석 등, 2004). 또한, 2004년도에는 연천-고성 구간의 북북서-남남동 방향의 337 km 축선에 대한 탄성과 탐사를 실시하였다.

3: 결 론

우리나라에서 제일 처음으로 육상탄성과탐사가 실시된 시기는 1960대 중반이다. 당시 국립지질조사소에서는 석유부존 가능성이 있다는 포항지역에 대하여 제3기층의 층후와 지질구조에 대한 조사를 위하여 중력탐사와 함께 반사법탄성과탐사를 실시하였다. 이후, 경상계지층에 대한 물리탐사의 일환으로 탄성과탐사를 시작하였고, 원자력발전소 부지 안전성조사를 위하여 굴절법탐사와 더불어 크로스홀탐사가 수행되었다. 학계에서는 현병구교수가 탄광에서 갱도의 안정성을 조사하기 위한 탄성과탐사와 공업단지의 지반조사를 위한 탐사를 처음으로 실시하였다. 1980년대까지는 대륙붕지역의 석유탐사를 위하여 해양탄성과탐사는 활발하게 진행되었으나, 육상탄성과탐사는 주로 국립지질조사소 연구진들에 의하여 지하수, 사방, 탄층 조사 및 땅굴이나 국토이용을 위한 지반조사를 위한 탐사가 간간히 수행되었다. 한편, 터널이나 고속도로 건설 등 일부 토목엔지니어링 분야에서도 굴절법탄성과탐사가 시도되었다. 1990년대에 들어서는 토목건설 분야의 각종 시방서에 물리탐사가 포함되고, 상당수의 대규모 토목사업이 탄키체도로 발주되면서 여러 물리탐사 전문용역회사들은 굴절법, 반사법탐사 외에도 시추공을 이용한 다양한 탄성과탐사 기법들을 도입하거나 개발하였다. 크로스홀, 다온홀, 수직탄성과탐사 및 지오토모그래피법이 실용화되었으며, 터널 굴착 과정에서 주위의 파쇄대와 같은 불연속면을 조사하기 위한 TSP기법도 이용되고 있다. 한편 일부 대학에도 탄성과탐사기기를 도입하여 본격적인 연구가 가능하게 되었다.

그동안 우리나라의 육상탄성과탐사는 굴절법탐사 위주로 이루어져 왔으나, 근래에 와서는 고분해능 반사법탄성과탐사, 표면파를 이용한 탐사와 지오토모그래피 등 각종 시추공 탄성과탐사를 단층대나 조간대의 지질구조조사, 도로나 터널공사, 각종 국토이용을 위한 지반조사, 지하수와 광물자원탐사, 매립지나 폐기물 처분장 등에 대한 환경영향 평가, 고고학분야에 응용하는 등 다양한 지역에서 다양한 목적으로 수행하고 있다.

또한, 토목공학 분야의 구조물 비파괴 조사에 이용되는 표면파탐사(SASW; Spectral Analysis of Surface Wave)나 충격반향법(Impact Echo) 등도 크게 보면 탄성과를 이용한 탐사기법으로 시추공 없이도 탐사를 수행할 수 있다는 점에서 응용분야가 확충될 것으로 보인다. 또한, 자립화가 어느 정도 진행된 해양탄성과탐사와 탄성과탐사자료 처리기술의 발전에 힘입어 육상탄성과탐사의 발전가능성은 매우 크다고 볼 수 있다. 앞으로의 과제는 우리나라의 지형 및 환경적 문제를 충분히 고려한 효과적인 에너지원의 개발이 중요할 것이고, 지형효과를 고려한 탐사자료의 처리 및 해석기술의 개발이 뒷받침되어야 할 것이다. 특히 최근에 지각규모의 탄성과탐사가 성공적으로 이루어져, 한반도의 지각속도에 대한 보다 정확한 정보를 제공하게 되었다. 이러한 정보들은 보다 정확한 지진의 진앙과 진원을 결정하는 데에 필수적인 정보이며, 동북아시아의 광역지질구조를 연구하는 데에도 유용하게 이용될 것이다.

참고문헌

- 건설부 (1975) 터널공사 표준 시방서 및 동해설.
 고광범, 이두성 (2000) 지반침하지역에서의 3차원 탄성과 반사법에 의한 지하구조 영상화 사례. 농업현장에 필요한 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 2000 특별 심포지엄, p. 56-64
 구자학 (1972) 1972년 지구물리 탐사자료 처리 및 해석에 관한 세미나에 참가하고. 지질광상, 18호, p.56-64.
 김기영, 허식 (1999a) 고해상도 탄성과자료를 이용한 풍암 분지 북동부의 퇴적구조 및 퇴적환경 연구. 지구물리, 2권, p. 91-99.
 김기영, 허식 (1999b) 풍암분지 중부지역의 고해상도 탄성과자료 해석. 지구물리, 2권, p. 201-208.
 김기영, 김동훈 (2002a) 경주시 감산사단층 부근에서의 탄성과 굴절법 조사. 지구물리, 5권, p. 41-50.
 김기영, 김동훈 (2002b) 대규모 말파후보지의 지하구조 확인을 위한 탄성과 굴절법 조사. 지구물리, 5권, p. 153-161.
 김기영, 홍종국, 김교홍 (1998b) 양산단층 지역에서 수직균열에 의한 탄성과 이상성 측정. 지질학회지, 34권, p. 73-80.
 김기영, 김현규, 우남철, 정미숙 (1998a) 풍암분지 경계부근에서 중력추를 이용한 반사파 탐사. 한국자원공학회 정기학술발표회, p. 239-242.
 김기영, 김동훈, 신현조, 김연중 (2002) 굴절파 주시토토모그래피를 이용한 울산시 약수지역의 울산단층 지질구조 연구. 지질학회지, 38권, p. 509-518.
 김기영, 이소영, 이정모, 문우일, 박창업, 정희옥 (2004) 2002년도 대규모 말파 반사파자료 해석을 통한 한반도 지각구조. 대한지질학회 2004년 추계학술발표회 초록집, p. 37.
 김동수, 방은석, 김종태 (2005) SPT 업홀 기법을 이용한 지반의 Vs 분포 도출. 제7회 특별심포지움 시추공 물리탐사, 한국지구물리탐사학회, p. 93-116.
 김종수, 구자학, 김현준, 이헌기, 장정진, 유공열, 김주태,

- 조규장, 김대규 (1967) 포항-홍해 지구물리탐사 종합보고서. 국립지질조사소, 물리탐사보고, 1권, p. 5-60.
- 김중수, 구자학, 양승진 (1969) 황해 동지나해 해상물리탐사 종합보고서. 국립지질조사소, 물리탐사보고 3권, p. 3-20.
- 김중수, 구자학, 양승진, 서정희 (1968) 포항지구 탄성파탐사 보고서. 물리탐사보고, 1권, 국립지질조사소, p. 211-217.
- 김중열 (1986) 반사법 탄성파탐사에 의한 지하터널 탐지 가능성. 대한광산학회지, 23권, p. 364-370.
- 김중열 (1989) 탄층구조 모형실험 연구. 과학기술처.
- 김중열 (1994) 탄성과 발생원개발 및 응용성. 한국자원공학회지, 31권, p. 248-257.
- 김중열 (1996) 소규모 탐사단면에 대한 탄성과 토모그래피의 현장 적용 한계성 연구. 지질공학회지, 6권, p. 15-22.
- 김중열 (2000) 임해매립층/해상저토 경계면 규명을 위한 탄성과 이용기술. 지반조사를 위한 물리탐사기술, 2000년도 한국지구물리탐사학회 한국지반공학회지반조사위원회 공동특별강연 논문집, p. 48-86.
- 김중열, 현해자, 김기석 (1994d) 채널과 탐사에 의한 탄층 연속성 조사. 한국자원공학회지, 31권, p. 235-247.
- 김중열, 김유성, 정형기 (2001) 탄성과 반사주시 역산법에 의한 지하 폐광도 탐지. 지구시스템공학회지, 38권, p. 301-309.
- 김중열, 현해자, 김기석, 김유성 (1994) 시추공 횡파 발생원 개발 및 그 응용성. 한국자원공학회지, 31권, p. 502-508.
- 김중열, 김유성, 현해자, 김기석 (1994a) 갱내 지오토모그래피에 의한 탄층 연속성 조사. 한국자원공학회지, 31권, p. 413-418.
- 김중열, 김유성, 현해자, 김기석 (1994b) 천부 지질구조 규명을 위한 P면 발생원의 응용성. 한국자원공학회지, 31권, p. 407-412.
- 김중열, 김유성, 현해자, 김기석 (1994c) 탄성과 축소 모형 실험에 의한 유층구조 연구. 한국자원공학회지, 31권, p. 315-324.
- 김중열, 장현삼, 김유성, 현해자, 김기석 (1995) 구포 기차 전복사고 지역의 지반상태 파악을 위한 탄성과 토모그래피 응용. 지질공학회지, 5권, p. 1-20.
- 김진후, 김현도 (2004) 비고결 퇴적물에서 다운홀 탄성파탐사, MASW, SCPT로 구한 횡파 속도 단면과 시추결과 비교 연구. 한국지구과학회지, 25권, p. 270-276.
- 김팔규, 송무영, 김연천 (1995) 서산간척지 연약지반의 토질역학과 물리탐사 비교연구. 한국지구과학회지, 16권, 292-298.
- 김학수 (2003) 탄성과 토모그래피의 현장 적용성, 지구시스템공학회지, 46권, p. 485-491.
- 류제라, 서만철 (2002) 익산 미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구. 지구물리, 4권, p. 1-10.
- 박권규 (2006) 폐광산 지역 산성광산배수 유출담수를 위한 지구물리탐사: 부산 입기광산. 지구시스템공학회지, 43권, p. 34-43.
- 서기항, 유영철, 유영준, 송무영 (2003) 지하 공동 지역에서 시추공간 탄성파토모그래피 탐사자료의 진폭 특성: 사례연구. 지질공학, 13권, p. 129-137.
- 서만철, 오진용, 최희수 (2002) 불국사 석탑의 지반 특성에 대한 지구물리탐사. 지구물리, 5권, p. 143-151.
- 서만철, 최희수, 이찬희, 오진용 (2003) 감은사지 3층석탑(서탑)의 지반 특성을 위한 지구물리탐사. 지구물리, 6권, p. 39-46.
- 서상원 (1997) 서해대교 사장교 기초 시공보고. 기술논문집, 한국도로공사, p. 3-92.
- 서정훈, 유공열, 김창기, 김원식 (1971) 경상계 탄성파탐사 보고서 (경북 성주지구). 지구물리 화학탐사 연구보고, 5권, 국립지질조사소, p. 87-102.
- 송무영, 유영준 (1993) 연약기반에서의 P파, S파 반응 비교 연구. 한국지구과학회지, 14권, p. 338-347.
- 송무영, 송민호 (2000) 탄성과 토모그래피를 이용한 지하구조 파악에 관한 연구. 대한지질학회 추계공동학술발표회, 100p.
- 송무영, 김여상, 경제복 (1989) 천수만 간척지 퇴적층에 대한 굴절 탄성과 탐사반응. 한국지구과학회지, 10권, p. 93-101.
- 송무영, 서기환, 유영철, 유영준 (2001) 지하공동 및 저속도층에서의 탄성과 토모그래피 주파수 반응 특성. 대한지구물리학회 제4차 정기총회 및 학술발표회, p. 12.
- 송무영, 박정민, 유영철, 유영준 (2003) 철원 비무장지대에서의 시추공 영상촬영결과와 공동토모그래피 탐사 사례중심: 북한의 남침용땅굴지역. 한국지구과학회, 한국지형학회 공동추계학술발표회, p. 162-163.
- 오진용, 서만철 (2005) 탄성파탐사를 이용한 공주 공산성 원형 연못의 지반조사. 자연환경지질, 38권, p. 623-631.
- 유공열, 김인빈, 김창기, 홍무선 (1970) 경상계 퇴적층에 대한 탄성파탐사보고서. 국립지질조사소, 지구물리화학탐사연구보고, 4권, p. 38-49.
- 유공열, 김인빈, 이정오 (1972) 고령지구 탄성파탐사 보고서. 국립지질조사소, 지구물리화학탐사연구보고서, 6권, p. 51-70.
- 유영준, 조창수, 박용수, 유인걸 (1999) 탄성과굴절법탐사를 이용한 지반속도 분포 해석 - 터널 및 절토사면에의 적용 사례. 건설현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회 학술발표회, p. 48-64.
- 윤상호, 지준, 이두성 (2000) 탄성과 굴절법을 사용한 지반침하 형태분석 적용사례. 농업현장에 필요한 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 2000 정기총회 및 특별 심포지움, p. 132-146.
- 이광자, 김기영, 김우혁 (2000) 굴절과 속도 이방성 분석을 통한 울산단층 분절구간 연구. 지구물리, 3권, p. 49-56.
- 이광자, 김기영 (2000) 탄성과 굴절법을 이용한 경주시 천북목장 부근의 기반암 분포 연구. 지구물리, 3권, p. 215-226.
- 이윤재 (1987) 리퍼빌리티 추정을 위한 탄성파탐사, 기술논문집, 한국도로공사, p. 323-378.
- 이정모, 문우일, 박창업, 정희옥, 김기영, 조봉곤, 김우한, 김성균 (2003) 서산-영동-경주 지각규모 굴절파실험 초기분석결과, 대한지질학회 2003년 추계학술발표회 초록집, 31p.
- 장용석, 정희옥, 이정모, 문우일, 박창업, 김기영, 조봉곤 (2004) 인공발파의 단주기 표면파 자료의 해석을 통한 한반도 상부 지각구조, 대한지질학회 2004년 추계학술발표회 초록집, 32p.
- 장연삼, 임해룡, 홍재호 (1999) 시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적인 응용. 건설현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회 학술발표회, p. 176-201.
- 정연문 (2000) 물리탐사기술의 토목분야 적용연구사례, 지반조사를 위한 물리탐사기술. 2000년도 한국지구물리탐사학회 한국지반공학회지반조사위원회 공동특별강연 논문집, p. 87-120.
- 정희옥 (1995) 탄성파를 이용한 매립지반의 천부지반 구조연구. 한국지구과학회지, 16권, p. 352-357.

- 정희옥 (1997) 표면파분석에 의한 침부지반의 지반공학적 성질에 관한 연구. 한국지구과학회지, 18권, p. 420-425.
- 정희옥 (2001) 금강하구 천해성 퇴적층의 연약지반에 관한 연구: 표면파 역산에 의한 S파 속도 구조와 해상도. 한국지구과학회지, 22권, p. 179-185.
- 정희옥 (2004) 다중채널 표면파 자료를 이용하여 구한 S파 속도와 감쇠지수 구조: 낙동강 하구의 연약지반 특성. 한국지구과학회지, 25권, p. 774-783.
- 조동행 (1971) 탄성파탐사 데이터의 현대적 처리 방법. 지질광상, 14호, 국립지질조사소, p. 67-75.
- 조동행, 김상길, 구자학 (1979) 경상분지 진주지역에 대한 반사법 탄성파탐사연구. 광산학회지, 16권, p. 232-241.
- 조철현, 오현덕, 방기문, 이효진, 최재화, 차영호 (2004) 문화재 안전진단에 적용된 물리탐사 사례. 지구시스템 공학회지, 41권, p. 51-56.
- 차성수, 김세훈, 윤상필, 배정식, 이진무 (1999) TSP탐사를 이용한 지하 유류저장 공동 및 도로터널의 시공 중 설계변경. 건설현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회 학술발표회, p. 117-136.
- 한국도로공사 (1998) 암반의 굴착난이도 평가에 관한 연구.
- 한국동력자원연구소 (1990) 한국동력자원연구소 70년사, 297p.
- 한국석유개발공사 (1994) 한국석유개발공사15년사. 한국석유개발공사, 832p.
- 현병구, 김동기 (1966) 갯도주벽 이완대의 발달상태와 지압에 관한 연구. 광산학회지, 3권, p. 1-12.
- 홍종국, 김기영, 최동립 (1999) 시화호내 과거 조간대에서 의 고해상도 탄성파 탐사. 지구물리, 2권, p. 251-258.
- 홍준기, 김동기, 현병구, 이경운 (1967) 탄층가행이 하반 주깁도에 미치는 영향. 광산학회지, 4권, p. 170-180.
- 홍준기, 김재국, 현병구 (1968) 울산석유공업단지 지구물리탐사. 광산학회지, 5권, p. 55-64.
- 황세호, 박권규, 신제현 (2005) 국내 폐광산의 광산재해에 대한 물리탐사 적용사례 분석. 지구시스템공학회지, 42권, p. 61-67.
- Mineral Industries Engineers (1965) Development of Mineral Resources Republic of Korea. Contract Aid / FE-47 Concluding Report.

2005년 12월 10일 원고접수, 2006년 6월 2일 게재승인.