지진 조기예보와 해저면 지진계

DOI: 10.3938/PhiT.20.030

이상목·김승섭

Earthquake Early Warning and Ocean Bottom Seismometry

Sang-Mook LEE and Seung-Sep KIM

In this article, we introduce advanced technologies in earthquake monitoring, early-warning systems and underwater ocean observatory networks. One of the core instruments for these systems is the ocean bottom seismometer (OBS), which records the motions of the sea-floor caused by earthquakes. The basic principles of the early-warning system and the underwater cable network are explained.

서론

2004년 12월 26일 인도네시아 자카르타 북서쪽에 위치한 북수마트라섬 서부 해안의 해저 30 km 깊이에서 발생한 규모 9.1의 강진^[1]은 전 세계적으로 지진(earthquake)에 대한 경각심을 불러일으켰다. 지진과 그 결과로 발생한 지진해일(tsunami)이 상상하지 못했던 규모의 인명 및 재산 피해를 남겼기 때문이다. 특히 2011년 3월 11일 일본 동경 북동쪽에 위치한 혼슈 동쪽 해안의 해저 32 km 깊이에서 발생한 규모 9.0의 강진^[1]은 대규모 인명 및 재산 피해를 입힌 지진

저자약력

이상목 교수는 미국 Massachusetts Institute of Technology 박사(1995)로서 영국 University of Durham 선임연구원(1996-1998), 한국해양연구원 선임/책임연구원(1998-2003)을 거쳐 2003년부터 현재까지 서울대학교 지구환경과학부 교수로 재직 중이다. (smlee@snu.ac.kr)

김승섭 박사는 미국 University of Hawaii at Manoa 박사(2010)로서, 현재 서울대학교 지구환경과학부 연수연구원으로 재직 중이다. (seungsep@snu.ac.kr)

Fig. 1. The schematic diagram of the Earthquake Early Warning system developed and operated by the Japan Meteorological Agency.^[2]

해일뿐만 아니라 후쿠시마 원자력 발전소의 붕괴를 촉발시켜 국제사회로 하여금 지진대처에 대한 방안들을 다시 점검하게 만들었다.

이러한 대규모 지진들은 역사적으로도 많이 일어났으며, 이를 대비하기 위해 ‘지진 예측 방법’ 혹은 ‘지진 전조 현상(precursor)’ 규명에 대한 연구들이 19세기부터 이루어져 왔다. 하지만 오랜 기간 동안 단층(fault)대 주변에 저장되어온 응력(stress)이 순간적으로 방출되면서 발생하는 지진의 특성상 지진예측에 대한 연구들은 실패를 거듭지 못하여 왔다. 그렇다면 지진에 대해 인류는 무방비상태로 있을 수밖에 없는 것일까? 해답은 지진 조기예보에서 찾을 수 있다. 지진이 지구내부의 한 지점(진원, hypocenter)에서 일어나면 지각의 진동을 일으키는 지진파(seismic wave)를 발생시킨다. 이 지진

REFERENCES

- [1] <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/epinthenews>.
- [2] <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eeew1.html>.

파는 P파(primary wave)와 S파(secondary wave)로 나뉘어 지각 내부를 통과하며 지진 에너지를 지표로 전달한다. P파는 약 5~8 km/s로 비교적 빠르게 움직이지만 진폭이 작아 피해를 적게 입히는 반면, S파는 약 3~4 km/s로 비교적 느리게 움직이지만 진폭이 크기 때문에 많은 피해를 입힐 수 있다. 만약 지진이 일어난 지역 근처에 지진계(seismometer)가 설치되어 있고 먼저 도착한 P파의 신호를 잡아내게 된다면, 뒤이어 따라오고 있는 S파에 대한 예보를 인접 도시로 전송할 수 있는 시간적 여유가 생기게 된다. 이러한 지진파의 운동과 전파(propagation)에 대한 지식을 활용하여 만든 지진 조기예보 시스템은 가장 현실적이며 효과적인 지진대처 방안이며, 현재 일본에서 사용하고 있는 방법이다 (그림 1).

하지만 지진 조기예보가 가능하기 위해서는 지진이 빈번하게 발생하는 주변이나 혹은 발생가능성이 높은 지역에 지진계가 설치되어 있어야 하고 지진계에 도달하는 지진 신호가 중앙시스템으로 실시간 전송이 되어야 한다. 육상 환경에서 이러한 시스템을 설치하는 것은 비교적 수월하다. 하지만, 인도네시아와 일본의 지진처럼 지진의 진앙(epicenter)지가 해양지각에 위치할 경우, 지진계가 해저면에 설치되어야 하며 해저에 있는 지진계와 실시간으로 통신할 수 있는 케이블망이 필요하다. 육상에 있는 지진계에만 의존하게 된다면 해저에서 발생한 지진파가 육상에 도달했을 때 이미 조기예보의 유효성이 사라지게 된다. 더욱이 자연적으로 발생하는 지진의 약 90%가 해저에서 일어나는 점을 감안해본다면, 해저 지진의 관측이 매우 중요함은 분명하다. 해양환경에서 지진 관측을 가능하게 하는 두 가지 첨단기술들을 여기에 소개한다.

해저면 지진계

해저면 지진계(Ocean Bottom Seismometer)는 해저의 높은 수압을 견딜 수 있는 구 형태의 케이스 내부에 지진계, 배터리, 데이터 저장장치 등을 집적시켜 놓은 첨단 관측기기이다. 그림 2를 통해서 우리는 오랜 시간에 걸쳐 각 중요 부품들에 대한 기술이 발달되면서 해저면 지진계의 내부구조도 함께 변화되어 갔음을 확인해 볼 수 있다. 지진파의 도착시각을 정확히 측정하기 위해 사용되었던 수정시계(crystal clock)

Fig. 2. Advancements in the internal instrumentation of ocean bottom seismometer. The left is the configuration used in 1975^[3] and the right is the current structure.^[4]

Fig. 3. Hardware configuration for short-period (left) and long-period (right) ocean bottom seismometer.^[6]

가 지금은 원자시계(atomic clock)로 대체되어 정확도와 안정성을 높였고, 지진파 데이터를 저장하기 위해 사용되었던 테이프 저장장치(tape recorder)는 하드 디스크(hard disk)를 거쳐 지금은 낸드플래시메모리(NAND flash memory)로 대체되어 전력소모를 줄이고 데이터의 회수율을 높였다. 또한 관측 가능한 주파수 대역 역시 지속적으로 넓어지고 있다. 이와 같이 해저면 지진계는 고도의 첨단기술들이 집약되어 끊임없이 발전하고 있는 관측기기이다.

해저면 지진계의 목적은 해저에서의 지진의 진동을 측정하기 위한 것이므로 이러한 장치들이 내장된 구형대의 케이스를 안전하게 해저면으로 투하(deploy)하고 일정한 시간이 지난 후에 회수(recovery)하기 위한 기계공학 그리고 수중음향

REFERENCES

- [3] T. J. G. Francis *et al.*, Mar. Geophys. Res. **2**, 195 (1975).
- [4] <http://www.who.edu/instruments/viewInstrument.do?id=10347>.
- [5] R. A. Dunn and F. Martinez, Nature **469**, 198 (2011).
- [6] <http://obsip.org/inst.html>.

통신분야의 첨단기술들을 필요로 한다. 해저면 지진계를 60 일 정도 단기간(short-period) 투하하여 사용할 경우 배터리가 많이 필요하지 않기 때문에 그 설비가 상대적으로 간단하다(그림 3). 해저면 지진계를 단기간 사용하는 경우는 인위적으로 지진파를 일으켜 해양지각의 천부구조를 연구하기 위해서이다.^[5] 하지만 자연지진의 경우 예측이 불가능하기 때문에 해저면 지진계를 1년이 넘는 장기간(long-period) 투하하여 측정하여야 한다. 이 경우, 계획된 투하 기간 동안 필요한 전력을 공급해야 하기 때문에 많은 양의 배터리를 같이 투하할 수 있는 구조가 필요하다(그림 3). 그리고 해저면 지진계와 데이터의 회수를 하기 위해서는 선상에서 보내는 음향 신호를 받아서 해석하고 기계적으로 해저면 지진계를 무거운 추(anchor)로부터 분리하는 과정이 순차적으로 일어나야 한다. 그리고 해저면 지진계는 부력으로 인해 수면으로 떠오르게 되고, 이것을 해양조사선에서 회수하게 된다. 이러한 일련의 과정들에 하나라도 문제가 생기게 된다면 해저면 지진계를 회수하는 데 실패하게 된다. 예로 2006년에 실시된 New Horizon 조사에서 투하된 12개의 해저면 지진계 중 8개는 회수하지 못하였으며, 회수된 4개 중 2개의 해저면 지진계에 저장된 데이터는 훼손된 상태로 회수되었다. 결국 12개 중 2개의 해저면 지진계에서 얻은 자료만이 분석가능하였다. 이렇듯이 해저면 지진계는 내부와 외부의 모든 장치들이 완벽하게 작동해야만 유용한 데이터의 획득이 가능하다.

해저 실시간 케이블 관측망

위에서 살펴본 해저면 지진계는 독립형 구조를 보인다. 즉, 지진이 일어난 이후에 해저면 지진계의 회수 이후에야 지진에 대한 정보를 얻을 수 있다. 하지만, 조기예보를 위해서는 해저면 지진계에 탐지되는 해양지각의 움직임을 실시간으로 육지의 관측소로 보내는 통신수단이 필요하다. 그리고 독립형 해저면 지진계의 경우 배터리의 수명이 투하기간을 결정하기 때문에 지속적인 전력공급을 위한 수단이 필요하다. 이 두 가지 필요성을 만족시키는 방법이 해저면 지진계와 육지의 관측소를 케이블(cable)로 서로 연결하는 것이다. 해저 광섬유케이블(submarine fiber-optic/power cable)을 활용하여 해저면에 설치된 기기들에 전력을 공급하는 동시에 데이터를 실시간으로 육지의 관측소로 보낼 수 있기 때문이다. 이러한 방법을 활용한 것에는 미국과 캐나다가 운영하고 있는 NEPTUNE(Northeast Pacific Time-Series Undersea Networked Experiments)과 일본의 DONET(Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis)이 있다.

NEPTUNE은 광대역규모(regional-scale)의 해저 실시간 관

Fig. 4. NEPTUNE Canada network west of Vancouver Island, British Columbia.^[9]

측망을 목표로 미국과 캐나다에서 공동투자하고 있는 사업이다.^[7] 현재 완전한 케이블 통신망을 갖추고 있는 NEPTUNE Canada(그림 4)의 경우 해안에서 약 300 km 떨어진 Endeavour 중앙해령(Endeavour mid-ocean ridge)까지 실시간 케이블 관측망을 설치하였다. 각 사이트에는 해저면 지진계뿐만 아니라 다양한 생물상과 해수의 변화를 측정하는 센서들도 설치되어 있다. 특히 웹캠(web-cam)이 설치되어 있어 일반 사용자들도 자유로이 해저의 생물체를 실시간으로 볼 수 있다.^[8]

하지만, 일본의 경우 난카이 해구(Nankai Trough)를 따라 규모 8 이상의 지진이 발생할 가능성이 높다는 것을 전제로 하여, 이를 대비하여 설치된 케이블 관측망이 DONET이다.^[10] 역사적으로 100 - 150년 주기로 난카이 해구를 따라 규모 8의 지진들이 반복적으로 일어났으며 1944년 토난카이(Tonankai) 지진과 1946년 난카이 지진이 그 예이다. 향후 30년 안에 이곳에서 규모 8 이상의 지진이 일어날 확률이 60 - 70%로 높다고 판단되어 인접 도시의 피해를 최소화하기 위해 지진 조기예보 시스템을 설치한 것이다(그림 5).

위와 같은 해저 실시간 케이블 관측망을 설치하기 위해서

REFERENCES

- [7] <http://www.interactiveoceans.washington.edu>.
- [8] <http://www.neptunecanada.ca/sensors-instruments/locations/endeavour.dot>.
- [9] <http://www.neptunecanada.ca/about-neptune-canada/neptune-canada-101>.
- [10] <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/maritec/donet/index.html>.

Fig. 5. Layout of the cables and ocean bottom seismometers of DONET, Japan.^[11]

는 우선 각 관측점들과 육상 관측소를 이어주는 주광케이블이 설치되어야 한다. 이는 기존의 해저광통신망을 설치한 기술력을 바탕으로 가능하다. 그러나 해저면의 급격한 경사도 변화와 해저면의 지질학적 성질 그리고 심해 해류의 유속에 대한 정보가 설치된 주광케이블을 얼마나 오랫동안 사용할 수 있는지를 가늠케 한다. 만약 해저면이 거친 표면을 가지고 있다면 시간이 지나면서 케이블이 손상될 수 있기 때문이다. 수백 km 길이의 광케이블이 수천 m 깊이의 바다에 설치되었을 때, 손상된 해저 광케이블을 대체하기란 쉽지 않은 작업이다. 그러므로 주광케이블의 투하 이전에 첨단 해양 지구물리 탐사장비를 활용하여 광케이블 설치장소로 가장 적합한 지역을 찾는 작업을 먼저 하게 된다. 그리고 주광케이블과 각 관측점들에 설치된 해저면 지진계 및 기타 해저 관측 장비들이 해저 접합기(junction box)에서 서로 맞물려서 연결된다. 해저 접합기를 이용함으로써 얻는 장점은 다양한 해저 관측 기기를 설치할 수 있다는 점이다. 해저면 지진계 및 기타 해저 관측기기의 설치와 이들 관측기기와 해저 접합기와의 연

결, 그리고 주광케이블과 해저접합기의 연결은 최첨단 장비인 ROV(Remotely Operated Vehicle)를 사용하여 이루어진다. 즉, 해저 실시간 관측망을 설치하기 위해서는 모든 첨단 해양 과학기술들이 적절하게 활용되어야 한다. 마지막으로 해저의 극한 환경 속에 설치된 장비들은 쉽게 손상이 갈 수 있으므로 지속적인 관리 및 유지보수가 필요하다.

결 론

2011년 3월 11일 일본 혼슈 동쪽 해안에서 강진이 발생했을 때 일본 지진 조기예보 시스템은 지진 발생 후 약 3분 후 첫 번째 지진해일 경보를 내보내었다. 이와 같은 신속한 경보가 가능했던 이유는 지진에 대한 이해를 바탕으로 한 해저면 지진계를 활용한 DONET과 같은 실시간 케이블 관측망을 개발하였고 이 관측망과 사회기반시설과의 효과적인 연계 를 하였기 때문이다. 이러한 관측망이 여러 다른 나라들에 의해 확장되어 간다면 지진이 빈번하게 일어나는 곳에 근접한 도시의 인명 및 재산을 보호하는 데 더 효율적일 것으로 예상된다.

인류가 자연과 함께 살아가야 하는 존재인 이상 자연재해로부터 완전히 자유로울 수는 없다. 우리나라가 지진과 지진해일로부터 완전한 안전지대라고 정의하기에는 아직 완벽한 과학적 근거가 부족하다. 우선 해저 지진연구에 필수적인 해저면 지진계를 우리나라는 현재 보유하고 있지 못하다. 즉, 해저 실시간 케이블 관측망으로 나아가기까지 아직 갈 길이 멀다는 것이다. 이와 같은 관측 설비와 관측망이 활용될 때 우리는 귀중한 인명과 재산을 지진과 지진해일로부터 보호할 수 있는 아주 중요한 시간을 얻을 수 있다.

REFERENCES

- [11] <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/maritec/donet/cable/index.html>.