지진 조기경보시스템

조 영 순 (기상청 지진담당관)

1. 서언

우리가 살고 있는 지구는 살아 숨쉬는 생명체와 같이 끊임없이 운동하고 있다. 지상에서는 해양과 대기가 상호 작용하면서 각종 기상변화를 연출하고 있으며, 지구내부에서도 복잡한 구조와 운동을 하고 있음이 화산과 지진활동으로 나타나고 있다. 이러한 지구의 운동은 인류에게 혜택과 시련을 동시에 안겨 주는데 지진은 인류에게 가장 큰 재앙을 가져다주는 자연재해 중 하나이다. 우리나라에서는 큰 지진이 자주 발생하지 않지만 이웃나라 중국은 자연재해에서 지진이 차지하는 비중이 매우 높다. 발생빈도는 전체 자연재해의 6%에 불과하지만 인명피해는 전체피해의 54%에 이른다고 한다. 이는 지진이 다른 자연재해에 비하여 자주 발생하지는 않지만 한번 대규모지진이 발생하면 어떤 다른 재해보다도 큰 피해를 준다는 사실을 잘 대변하고 있다.

지진은 오늘날과 같이 놀라운 과학기술의 발전에도 불구하고 실용성 있는 수준의 예측이 불가능한 것이 현실이다. 따라서 지진과학기술분야의 선진국들은 지진예지에 대한 연구를 계속하는 한편, 지진피해경감을 위한 최선의 대안으로서 지진발생시 보다 정확하고 신속한 정보의 수집과 전파를 위한 지진 조기경보시스템 구축과 개선에 힘쓰고 있다. 이는 대규모 지진이 발생하였을 때, 지진에 의한 직접피해는 어쩔 수 없다하더라도 지진으로 인한 2차적인 피해 즉 화재, 가스폭발 등을 막음으로써 재해를 최소화하는 것이 매우 중요하고 현실성이 높기 때문이다.

확실한 지진정보의 생산과 신속한 전파를 위해서는 지진관측망과 통신망의 구축이 필요하다. 오늘날 전자산업의 발달과 통신기술의 눈부신 발전은 이러한 과제들을 어느 정도 해결하기에 이르렀다. 우리나라도 최근 수년동안 지진관측시스템의 획기적인 변화와 지진정보의 통보체계에 많은 발전을 가져 왔다. 본고에서는 지진관측과 통보체계에 대하여 고찰하고 기상청에서 추진하고 있는 지진 조기경보시스템 구축방안에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

2. 지진관측의 발달

지진이란 땅속의 거대한 암석이 부서지면서 그 충격으로 땅이 흔들리는 현상으로 지구내부의 어디선가 급격한 지각변동이 발생할 때 지진파가 지표에까지 전달됨으로써 지반을 진동시키는 것을 말하는데 이러한 지진을 관측하기 위한 노력은 아주 오래 전부터 시작되었다. 세계 최초의 지진관측기구는 서기 132년에 중국의 張衡(Zhang Heng)에 의해 만들어진 후풍지동의(候風地動儀)이다. 이 기구는 그림 1 과 같이 8방향에 구슬을 가진 용의 머리가 있고 그 아래에 개구리가 입을 벌리고 구슬이 떨어지길 기다리는 모양을 하고 있다. 만약 어디에선가 지진이 발생하여 일정 세기의 지진동이 전달되면 진동이 전달된 방향에 있는 용의 입에서 구슬이 떨어져 개구리의 입속으로 들어간다. 이로써 구슬이 떨어진 방향 어디에선가 지진이 발

그림 1 후풍지동의(候風地動儀)

생하였다는 것을 알게 하는 장치이다.

한편 서양에서는 수은을 가득 담은 그릇에서 수은이 넘쳐 나오는 것을 이용하는 방법을 사용했다. 이것은 De Haute Feuille(1703년)가 이용한 것으로 일본의 명치시대 초기에 쓰였던 Cacciatore(1847년)의 감진기도 이런 종류의 것으로 이러한 지진계는 지진의 발생유무를 아는데 그치는 정도이었다. 그후 이태리의 과학자 Filippo Cecchi(1875년)에 의하여 진자의 원리를 이용한 지진계가 만들어졌다. 이것은 그림 2 와 같이 고정된 버팀대에 수직으로 늘어져 있는 추를 매달아 놓고 추에서 연결된 펜이 닿는 곳에 지면과 같이 움직이도록 지면에 드럼이나 판을 설치한다. 만약 지진이 발생하여 지면이 움직일 때 추는 관성에 의해 움직이지 않으나 지면에 설치한 드럼이나 판이 움직임으로써 추에 연결된 펜이 기록되게 하는 원리이다.

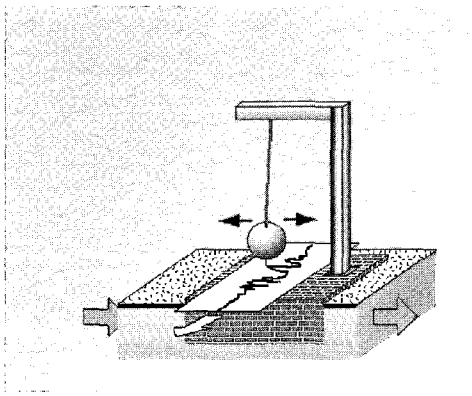

그림 2 지진계의 원리

이것은 초기의 기계식 지진계로서 나중에는 감광지를 태우는 방식도 등장하였다. 우리나라에서 일제시대에 사용되었던 지진계가 바로 기계식 지진계로서 이때의 지진계는 지진이 발생하면 사람이 일일이 판독을 해야할 뿐 아니라 각 지진관측소의 관측자료를 중앙에서 모아서 종합하여 분석하는데 시간이 많게는 수일이 걸렸을 것으로 짐작된다. 이때의 지진관측과 분석은 조기경보의 개념보다는 사후분석에 치우쳐 왔다. 이후 시대변화에 따라 전자기적 원리를 이용한 지진계가 등장하게 되어 지진이 발생하면 중앙본부에 바로 지진파 신호가 수집되고 이를 분석하게 됨으로써 지진분석결과가 나오는 시간이 한시간 이내로 단축되게 되었다. 그러나 여전히 지진파를 사람이 판독하는데서 오는 오차와 분석에 소요되는 시간은 조기에 지진경보를 하기에는 어려웠다. 오늘날에는 디지틀방식의 신호가 광통신선로를 따라 중앙에 초고속으로 집결되면 지진분석 시스템에서 이를 지진파인지 또는 노이즈인지를 판단하여 컴퓨터에서 자동적으로 분석결과를 산출함으로써 지진조기 경보의 가능성이 보이기 시작하였다.

3. 선진국의 현황

일본

일본은 환태평양지진대에 위치하여 세계적으로 지진이 가장 많이 발생하는 국가 중 하나로 한시도 지진에 대하여 안심할 수 없는 형편이다. 따라서 지진대비는 국가적 흥망과 관련이 있는 중대사로서 지진관측을 1872년부터 시작하였으며, 1995년 고베지진을 계기로 엄청난 투자를 하고 있다. 지진계를 전국토에 20 km 간격을 목표로 방재과학기술연구소(NIED: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)에 약 500소, 기상청(JMA: Japan Meteorological Agency)에 180여소, 기타 대학에서 운영하는 지진계를 포함하여 전국적으로 1,000여소를 운영하고 있다. 이중 광대역지진계는 기상청의 20소를 포함하여 총 100여소로서 약 100 km 간격으로 설치되어 있다. 또한 계기진도값을 관측하는 강진동관측망 즉 가속도계는 15 km 간격을 목표로 설치하여 기상청에

600소, 지방자치단체에 3,400여소가 있으며 이중 2,000여소가 기상청에 연결되어 지진발생시 진도발표에 활용되고 있다.

이러한 관측망에 힘입어 일본은 자국에 영향을 미치는 지진이 발생하였을 때 진도가 3이상일 경우 2~3분 이내에 지진발생 위치와 최대진도를 발표하고 있으며, 지진요소 즉 진원시, 진앙과 규모 등은 5~7분 이내에 발표하고 있다. 또한 주변 해역에서 지진이 발생하였을 경우에는 지진해일에 대한 정보를 5분 이내에 발표할 수 있는 체계를 갖추고 있다.

미국

미국의 지진관측망은 크게 지역지진관측망(RSNs: Regional Seismograph Networks), 미국지질조사소(USGS)의 국가지진관측망(USNSN: U. S. National Seismograph Network)과 국가강진동관측망(NSMN: National Strong Motion Network)으로 나누어진다.

지역지진관측망은 여러 대학이나 연구소에서 운영하는 해당 지역의 지진, 화산, 지진해일 관측망들로 이루어지며, 미국 전체에 5,000여개의 지진관측소가 있다. 지역지진관측망에서 관측된 지진자료는 미국지질조사소의 국가지진정보센터(NEIC: National Earthquake Information Center)에 제공된다.

미국지질조사소는 미국 뿐만 아니라 전 세계의 자연자원 문제에 관한 정보와 자료를 수집하여 제공하는 기관이며, 지진관측망으로 국가지진관측망과 국가강진동관측망, 지진연구연합(IRIS: Incorporated Research Institutions for Seismology)과 공동으로 전지구지진관측망을 운영하고 있다.

국가지진관측망은 그림 3 과 같이 56개의 미국지질조사소의 자체관측소와 지역지진관측망의 2,500여개 관측소를 연결하여 미국 전역을 균일하게 실시간 관측할 수 있도록 하며, 여기서 관측된 지진자료는 지역지진관측망에서 관측된 자료와 함께 국가지진정보센터에 전달된다. 또 국가지진관측망에서 관측된 자료는 해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 운영하는 지진해일경보시스템(TWS: Tsunami Warning System)의 미국 북서해안과 태평양지역에 대한 지진해일경보를 위한 관측자료로 이용된다.

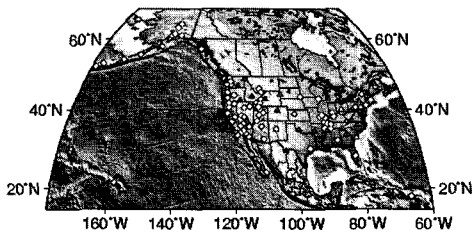

그림 3 미국 국가지진관측망(USNSN)

한편, 미국지질조사소는 지진관측을 현대화하고 표준화·안정화하기 위하여 현재 선진국가지진시스템(ANSS: Advanced National Seismic System)을 추진하고 있다. 이 시스템은 지진위험도가 높은 도시지역에 6,000여개의 강진동관측장비를 추가로 설치하고, 지진활동이 활발한 지역에 1,000여개의 지진계를 현대식 장비로 교체 또는 추가 설치할 계획을 추진중이다.

4. 우리나라의 지진관측 및 분석체계

우리나라의 계기지진관측은 1905년 인천측후소에 기계식지진계가 설치됨으로써 시작되었다. 그후 40여년간 기상관서에 지진계를 점진적으로 추가 설치하여 총 6소의 지진관측소를 운영하였으나, 1945년 이후 광복과 한국전쟁 등 사회적 혼란기를 거치면서 지진관측이 중단되었다.

그후 약 20년간의 지진관측 공백기를 거쳐 1963년 3월 미국지질조사소의 세계표준지진관측망(WWSSN: World-Wide Standardized Seismograph Network) 사업의 일환으로 국립중앙관상대(서울)에 세계표준지진계(WWSS: World-Wide Standardized Seismograph) 1대가 설치되면서 지진관측이 재개되었다. 1978년 홍성지진(규모 5.0)을 계기로 지진관측망의 보강과 함께 장비개선을 꾸준히 계속하여 1990년 초에는 12소의 관측점을 갖는 온라인(on-line) 지진관측시스템을 구성하게 되었다. 그후 1997년부터 현재까지 계속되고 있는 지진관측망

보강 사업으로 새로운 디지털식 지진관측망을 확충하는 등 획기적인 지진관측 및 분석체계의 변화를 가져오게 되었다.

이러한 결과 2001년 말 현재 전국에 29개소의 지진관측망과 70개소의 가속도관측망을 구축하여 운영되고 있다. 지진관측망의 주요구성은 그림 4 에서 보여주는 바와 같이 초광대역지진계 1대와 광대역지진계 12대, 단주기지진계 17대로 구성되어 있다. 초광대역지진계는 0.1~400초의 주기가 매우 넓은 범위의 지진파를 감지하는 지진계로, 장주기파의 원거리 지진관측과 표면파 기록을 이용하여 지구의 자유진동 연구 등에 이용된다. 반면, 광대역지진계는 0.02~100초의 주기가 다소 넓은 범위의 지진파를 감지할 수 있어 근거리지진 및 원거리지진을 모두 감지할 수 있는 지진계로서 광대역의 지진파형을 이용하여 국내외의 지진관측은 물론 지진연구 등에 이용된다. 단주기지진계는 0.05~1초의 주기를 갖는 지진계로 근거리지진 등의 일상관측에 이용된다. 가속도계는 지진동의 가속도를 기록하는 장비로서 내진공학 등의 연구 및 응용에 이용된다.

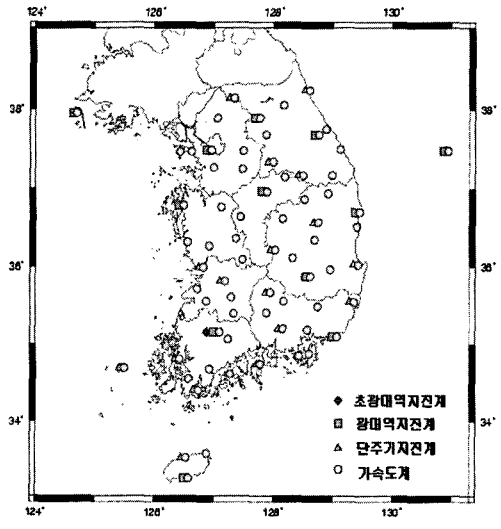

그림 4 기상청 지진관측망과 가속도관측망

전국 각지에 있는 지진계에서 감지된 지진파는 각 사이트의 자료획득장치를 통하여 서울에 있는 본청으로 송신된다. 본청에 수집된 지진자료는 지진분석시스템에서 자동분석되고 재분석과정을 거쳐 재해대책 관련기관이나 언론기관 등에 통보된다.

이 경우 국내에서 발생한 유감지진 또는 피해가 발생한 지진이나, 육상에서 발생한 규모 4.0 이상 또는 연근해에서 발생한 규모 5.0 이상인 지진에 대해서 통보함을 원칙으로 한다. 이 때 지진의 진원시, 진앙, 규모와 함께 진앙 부근에서의 감지 내용이나 지진에 동반된 현상 등을 통보한다. 또한 관측된 모든 지진자료는 인터넷 등을 통하여 일반인들에게 공개한다.

5. 국가지진정보시스템 구축

정확한 지진관측과 분석을 위해서는 관측망을 더욱 확충하여야 할 것이나 현재의 지진관측망은 육상의 경우 규모 2.0이상, 해상의 경우는 거리에 따라 다르나 인근해역의 경우 규모 2.5이상의 지진에 대하여는 고르게 감지할 수 있는 수준의 관측 및 분석체계를 갖추었다고 본다. 지진 조기경보체계는 적정 수준의 관측망과 분석시스템을 갖추고 신속통보체계를 구축하여야만 한다. 기상청의 한정된 예산과 인력으로 지금까지는 시급한 문제였던 낙후된 지진관측망의 보강에 치중하여 온 것이 사실이다.

앞으로는 전국의 지진관측소에서 감지된 지진자료들을 체계적으로 관리하고 보존할 데이터베이스가 시급하다. 그리고 지진방재에 가장 핵심이 되는 지진정보의 신속통보체계의 구축이다. 지진이 발생하면 '언제 어디에서 어느 정도 세기의 지진이 발생하였는가' 하는 정보를 지진발생 즉시 통보함으로써 지진에 의한 2차 피해를 줄이도록 하는 것이다. 이를 위해서는 자동으로 분석된 지진정보를 수작업을 거치지 않고 자동으로 통보문이 작성되어 중앙재해대책본부를 비롯한 방재기관과 국민에게 전해지도록 하여야만 할 것이다. 지진이 발생하면 자기가 있는 지역에 어느 정도 영향을 미칠지를 판단할 수 있도록 지도상에 지진에

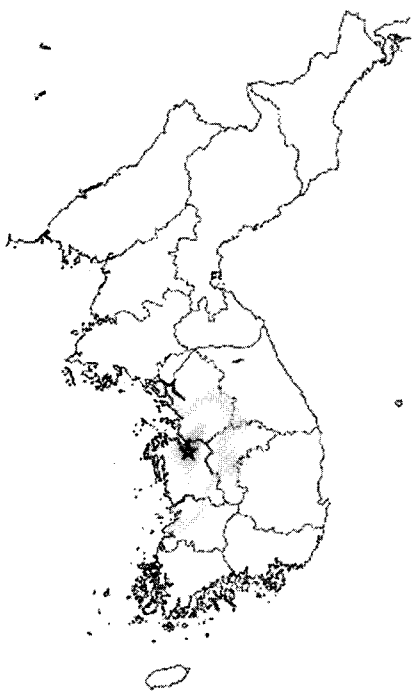

그림 5 가상 진도분포도

의한 영향의 정도를 표시하여 TV나 인터넷을 통하여 볼 수 있도록 해야 할 것이다. 그림 5 는 이와 같은 가상 진도분포도를 보여 주는 한 예이다.

기상청은 앞에서 말한 통보체계의 개선을 위하여 금년 중에 국가지진정보시스템을 구축할 계획이다. 이 사업이 마무리될 금년말에는 지진분석시스템에서 분석된 결과가 자동적으로 지진통보문으로 작성되고 동시에 FAX와 E-mail, 또는 PC로 볼 수 있게 될 것이다. 지진정보를 받기를 희망하는 방재유관기관에서는 제공되는 간단한 S/W를 구비하면 그래픽 처리된 지진의 계기진도분포도를 볼 수 있게 될 것이다. 특히, 지금까지는 지진통보문이 지진발생 후 15분 정도 소요되던 것을 5분 이내에 통보할 수 있게 하여 선진국 수준의 지진 조기경보가 가능토록 할 계획이다.

또한, 하루에 2 GByte가 넘는 자료가 생산되는데 지금까지는 겨우 10일 정도의 저장기능을 가지고 있어 자료의 관리와 보존에 애로가 많았으나 앞으로는 1년 정도 저장이 가능하게 된다. 이렇게 되면 1년 동안의 지진자료를 전국 어느 지점의 자료든지 수시로 인터넷망을 이용하여 받아볼 수 있고 지진에 관한 연구를 하거나 논문에 인용할 수 있을 것이다.

6. 앞으로의 과제

지진재해 경감을 위한 지진 조기경보시스템은 계속해서 발전되어야 할 과제이다. 앞으로 남은 과제는 지진이 어느 지역에서 갑자기 발생했을 때 고속철도의 운행을 자동으로 중지시키는 시스템을 운영하는 일본의 사례와 같이 주요 기간산업시설들에 대한 대비책이다. 즉, 반도체 산업이나 정밀 가공산업은 지진에 의한 작은 진동에도 큰 피해를 입을 수 있으며, 특히 병원에서의 뇌수술 등 인명과 직접 관계되는 민감한 작업장에는 수분 단위의 지진 조기경보로는 그 의미를 잃을지도 모른다. 이러한 산업시설이나 작업장에 대해서는 거의 실시간적인 지진 조기경보시스템 구축이 요구되는데 이는 앞으로 해결해야 할 중요한 과제이다. 그러나 무엇보다도 재해예방에 중요한 수단은 지진발생의 예측이다. 비록 지금은 불가능하다고 하나 주변 과학기술의 눈부신 발전이 언젠가는 지진예보가 지금의 일기예보와 같이 실현될 날이 올 것으로 믿는다. 그러기 위해서는 선진국에서 활발하게 연구하고 있는 지진예지를 위한 기반구축이 시급하다. 또한 지진연구는 수년 또는 수십년간의 자료만으로 효과적인 연구를 하기에는 너무나 부족하기 때문에 장기간의 과학적인 관측자료들이 축적되어야 한다. 이를 위해서는 지진예지연구에 기반이 되는 지진관측을 비롯한 지각변위관측, 지자기관측, 지하수관측 등 선진국에서 시도하고 있는 각종 지진예지연구와 관련된 관측체계와 기술을 축적해야 할 것이다.