

활성단층의 조사기술 동향

오민수*

한국과학기술정보원 기술·특허정보분석실

Recent Trends of Active Fault Investigation

Mihn-Soo Oh*

Korea Institute of Science and Technology Information Technology & Patent Information Analysis Dept. 52,
Eoeun-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-806, Korea

1. 서 론

1.1. 기술의 개요

1915년 독일의 기상학자였던 베게너(Alfred Wegener)가 제시하였던 “대륙 이동설”에 근거를 두고 있는 20세기 지구과학의 혁명적 사건인 “판구조론(the theory of the plate tectonics)”이 설명하고 있는 지구의 표면을 이루는 거대한 지판(地板)들이 충돌하거나 어긋날 때 판 경계부에는 단층이 만들어지고 이를 따라 지진이 발생한다.

단층이란 단열(fracture)의 일종으로 단열면에 평행하게 변위가 있는 경우 단층이라 부른다. 단층은 기하학적으로 또는 성인적으로 여러 가지로 구분하는데, 특히 단층이 움직인 운동 시기에 따라서 활동성 단층과 비활동성 단층으로 구분하기도 한다.

활동성 단층이란 현재 계속적으로 변위(變位)가 일어나고 있거나 근래에 변위가 일어난 단층을 말한다. 활성단층이라고 하여 항상 움직이면서 지진을 유발하는 것은 아니고, 단지 단층의 변위가 일어난 “시기”와 “운동회수”를 중요한 판별 기준으로 삼고 있다. 반면에 비활동성 단층이란 지질학적 시간으로 오래 전에 단층 작용이 일어난 것으로 단층 생성 이후 더 이상의 변위가 일어나지 않은 단층을 말한다.

사실상 어떤 단층이 활성단층으로 판명되더라도 이는 단층운동이 가까운 장래에 일어날 가능성이 있으며, 또한 그로 인하여 지진의 발생이 우려된다는 뜻이다. 일반인이 이해하기에 따라서는 “활성단층(active

fault)”이라는 용어는 현재 계속적으로 활동하고 있는 것으로 오해할 소지가 있으므로 단층의 운동시기가 최근에 일어난 것으로, 가까운 장래에 다시 움직일 가능성이 있다는 점에서 “잠재단층(capable fault)”이라는 용어를 사용하는 나라도 있다.

1.2. 기술의 특성

활성단층 조사/응용기술은 첨단산업시설과 원전(原電)과 같은 중구조물 등의 구조 설계시 내진 설계의 기준 설정, 댐 건설 및 핵폐기물 처분장 등의 부지선정과 부지 안전성 평가에 활용되는 기술로 앞으로는 모든 산업시설물에 대한 부지선정과 안전성 평가에 적용될 것이다.

하지만 우리 나라는 현재 활성단층의 위험도 분류등급이 명확히 설정되어 있지 않기 때문에 산업시설 부지선정에 대한 정량적 안정성 평가가 어려운 실정일 뿐만 아니라 산업시설물의 내진 설계시 필요한 정보 제공이 정량적으로 이루어 질 수가 없는 상태이다.

그러므로 이러한 문제를 해결하기 위하여서는 단층의 활성여부, 그 규모, 변위량 및 더 나아가서는 단층의 분절화 등에 대한 정확한 자료가 필요하며, 이에 필요한 문제를 해결하기 위하여서는 활성단층 조사/응용기술이 선행되어야만 한다.

2. 국내외 기술동향

2.1. 선진 외국의 기술동향

미국, 일본, 캐나다, 영국, 호주 및 프랑스 등 선진국가에서는 1980년대 초부터 범 국가적인 지원으로 활성

*Corresponding author: mihnsoo@kisti.re.kr

지체구조운동에 대한 활발한 연구가 진행되어, 그 연구 결과들이 산업시설의 건설과 국토의 효율적인 이용 등에 다양하게 활용되고 있다.

미국, 캐나다, 호주, 영국 및 일본 등 소위 선진국가들은 방재 지질학적 측면에서의 단층절대연령측정 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있으며, 국가 규모의 집중적인 투자로 분석 기기, 시료처리 실험실, 전문인력이 확보된 상태에서 최근 10년 동안 비약적인 발전을 하고 있다.

미국 과학재단(NSF)은 ①현생 활성단층인 산 안드레아스 단층(San Andreas Fault)의 활성지체구조 연구와 ②히말라야·티벳지역의 대륙대륙충돌대연구 등 활성지체구조운동 연구에 박차를 가하고 있다.

미국 지질조사소(USGS)와 스탠포드(Stanford)대학은 공동으로 산 안드레아스 단층 연구의 일환으로 로스앤젤레스(L.A.)와 샌프란시스코와의 중간에 위치하는 파크필드(Parkfield)지역 내의 산 안드레아스 단층으로부터 1.6km 떨어진 지점에서 심도 2.2km를 계획하여, 현재 시추 굴착작업 중에 있으며, 완공(2002년 3/4분기?)되면 지하에 『SANFOD(산 안드레아스 단층심부 관측소)』를 개설하여 단층의 활성운동을 유발하는 응력과 유압, 상부 지각내의 열흐름 등 산 안드레아스 단층의 지질환경특성을 파악하여 단층의 활성시기와 지진 예보에 이용하려하고 있으며, 앞으로 시추심도 3.9km의 시추공도 계획 중에 있다.

미국의 파크필드지역은 19세기 중반 이후 강도 6.0 이상의 지진이 시계처럼 정확하게 반복하여 규칙적으로 발생되어온 지역으로, 1966년에도 지진이 발생하였었고, 그 후 1993년 말까지 강도 6.0이상의 지진 발생 가능성이 95% 정도로 예보되었던 지역이었다. 그러나 아직 큰 지진은 발생하지 않았는데 이는 1983년 5월에 소규모 지진이 발생하여, 예상하였던 대규모지진을 유발시킬 응력을 분산시켜, 지진 발생을 지연시킨 것으로 해석하는 등 지진예보 연구에 심혈을 기울이고 있다.

최근 프랑스 스트라스버그대학과 스위스 바젤대학의 공동연구팀은 스위스, 프랑스 및 독일의 접경지인 바셀 지역에서 ^{14}C AMS(Accelerating Mass Spectrometry) 측정법으로 과거 3번의 활성시기를 규명하였다. 가장 최근은 610년~1,475년이었고, 다른 두 번은 기원 전 850년~기원 후 890년 사이와 기원 전 6,480년~850년 사이로 밝혀 활성단층에 대한 정량적 자료를 제시하고 있다.

최근(2002년 5월 23일)에 일본에서는 1:25,000 축척의 “활성단층상세 Digital Geologic (fracture) Map”이

완성되어 일반에 공급하고 있다. 이 지도상에는 활성단층이 도로와 주요 건물 또는 주택지 등과의 위치 관계를 표시하고 있을 뿐만 아니라, 활성단층이 지나가는 장소의 지질도나 토지이용도 등 다른 디지털 지도와 중첩하여 사용할 수 있기 때문에 국가적인 방재 재해 대책 등에 바로 활용될 수가 있다. 일본 국토 지리원은 “도시권 활성단층도”를 전 국토를 대상으로 공급 중에 있다.

2.2. 국내 기술동향

한반도는 판구조상 유라시아판(Eurasian plate)의 남동부에 위치하며 일본해구 등 판경계부(plate margin)로부터 수백 km 떨어진 판 내부에 속하여 지체운동이 비교적 느리게 일어나므로 지진 안전지대에 속해있다는 전통적인 고정관념 때문에 신기 활성지체구조운동 연구를 상대적으로 등한시 한 채, 일부 학자들에 의하여 개별적인 연구만이 진행되어 왔다.

그러나 최근 들어 국내에서도 규모 4.0 이상의 지진이 자주 발생하고 있으며, 1978년 10월 7일 충청남도 홍성(규모 5.2), 1996년 12월 13일 강원도 영월(규모 4.5) 및 1997년 6월 26일 경상북도 경주(규모 4.0) 등지에서 실제 체감할 수 있는 지진이 지속적으로 발생하여 활성지체구조연구에 필요성을 절감하고 있다.

국내에서는 그 동안 지진을 발생시키는 활성단층이 존재하지 않는 것으로 보고되었으나, 1995년 서해안“굴업도” 주변에서 4조의 활성단층이 최초로 발견되어, 그 후 국토 전반에 걸친 활성단층 조사연구가 학연·산공 등으로 심도 있게 계속 추진되고 있다.

그러나 국내 활성단층 조사기술은 전반적으로 불 때 시작단계로서, 활성단층 조사기술의 중요한 연구 방법인 지진화학적 연구의 핵심적인 활성단층 연대측정은 대부분 선진 외국에 의뢰하고 있는 실정이다.

3. 국가별/기관별 활성/잠재단층의 분류기준

세계 각국은 자기나라의 지질 특성에 따라서 활성단층에 대한 분류기준을 다르게 하고 있으며, 한 나라안에서도 기관별로 그 분류 기준을 달리하기도 하며, 나라에 따라서는 특별한 규정을 두지 않는 나라도 있다(Table 1). 또한 사용하는 용어도 “활성단층”과 “잠재단층”의 두 가지가 혼용되고 있다.

『미국 원자력규제위원회(NRC)』의 경우는 과거 35,000년 내 단층운동이 있었거나, 과거 50만년 동안에 2회 이상 단층운동이 있었던 것 등을 기준으로 하는

Table 1. The classification criteria of active/capable fault.

국가/기관	용어	활성/잠재 단층 판별 기준
미국	원자력 규제위원회 잠재단층	①과거 35,000년 이내에 적어도 한번의 단층운동이 있었거나, 과거 50만년동안 2회 이상의 운동이 있었던 단층, ②다른 잠재단층과 구조적 관계를 가지고 있는 경우, ③단층을 따라 큰규모의 계기지진활동이 있는 경우
	환경 보호기구 홀로세단층	신생대 제4기 홀로세 기간에 변위가 있었던 단층
국제원자력기구 (IAEA)	잠재단층	①신생대 제4기에 이동이 있는 경우, ②지표파열이 있는 지형적 모양을 가진 경우, ③단층을 따라 계기지진활동이 있는 경우, ④다른 잠재단층과 연관된 경우
일본	활성단층	신생대 제4기에 활동한 적이 있는 단층으로 A급: $1 \leq S$ (평균변위속도 mm/year), B급: $0.1 \leq S < 1$, C급: $S < 0.1$ 로 세분함.
독일, 스페인, 이태리, 캐나다, 프랑스	-	특별히 규정하지 않음.

*한국은 미국 원자력규제위원회의 규정을 따름(과학기술부 고시 제2000-8호)

*미국은 1997년 35,000년에 한번의 활동시기를 50,000년에 한번의 활동시기로 변경하였으나, 한국은 그대로 35,000년에 한번의 활동시기를 적용하고 있음.

반면에 『미국 환경보호기구』는 신생대 제4기 홀로세(Holocene, 지질학적으로 최근세)기간에 변위가 있었던 단층을 기준으로 하고 있으며, 우리나라는 미국 『원자력규제위원회』의 기준을 따르고(과학기술부 고시 제2000-8호, 2000년 6월 23일) 있다.

『국제 원자력기구(IAEA)』는 활성단층의 판별기준으로 ① 신생대 제4기에 이동이 있는 경우, ② 지표파열이 있는 지형적 모양을 가진 경우, ③ 단층을 따라 계기지진활동이 있는 경우 및 ④ 다른 잠재단층과 연관된 경우 등을 기준으로 하고 있다.

일본은 활성단층의 판별기준으로 신생대 제4기에 활동한 적이 있는 단층으로 A급은 $1 \leq S$ (평균변위속도 mm/year), B급은 $0.1 \leq S < 1$ 및 C급은 $S < 0.1$ 등 단층운동의 평균변위속도를 정량적으로 정하고 있다.

그 밖에 독일, 스위스, 이태리, 캐나다 및 프랑스 등 제국은 활성단층의 판별기준을 별도로 규정하지 않고 있다.

4. 활성단층의 조사기술

신기활성단층을 정확하게 이해하기 위하여서는 제4기 퇴적층에 대한 퇴적환경·층서조사, GPS(Global Positioning System)를 이용한 DGM(Digital Geological Mapping) 또는 DFM(Digital Fracture Mapping) 등에 의한 신기단층도 작성기술, 단층의 분절(segment)화에 대

한 조사기술, 해안단구 조사기술, 신기단층에 대한 고지진학적 방법을 적용한 해석기술, 고지자기 분석기술, 신기단층의 고응력장 조사기술 및 신기단층의 연령측정을 위한 지진화학적 연구기술 등에 의해서 종합된 정성적·정량적 지질정보자료를 필요로 한다. 이들 기술 중 몇가지 중요한 기술을 열거하면 아래와 같다.

4.1. 단층의 연령측정을 위한 지진화학적 연구기술

단층의 활동성 여부를 판단하는 중요한 기준 중의 하나는 가장 최근의 단층의 활동시기와 그 변형속도를 알아내는 것이다. 단층의 활동시기는 단층에 의해 생성된 물질을 대상으로 하여 직접적으로 그 활동시기를 확인하는 것이 최선의 방법이지만, 그런 방법을 적용할 수가 없을 경우는 간접적인 방법으로 유추할 수도 있다. 즉, 다른 인접한 단층에 의해서 절단되거나 단층을 덮고 있는 암석의 연대를 측정하여 알아낼 수도 있다.

신기단층의 연대측정에서 중요한 점은 단층활동과 관련된 적합한 시료물질을 채취하여 가능한한 여러 가지 방법에 의한 연령측정 결과를 확인하고, 그 확인된 연령측정 자료에 대하여 지질학적 관찰내용과의 일치성을 면밀하게 평가하는 것이다.

신기단층의 연령측정을 위한 지진화학적 방법은 다양하며, 각각의 방법별로 연령측정에 이용되는 대상 시료물질이 다르며, 또한 각 방법별로 연대측정의 범

위가 다르다.

4.1.1. 우라늄 비평형계 측정법(U-Th-Pb series : CHIME method)

우라늄 비평형계 측정법은 모(母)핵종과 자(子)핵종 사이의 분리, 농축등이 일어나게 되면 자핵종의 붕괴율이 더 이상 모핵종의 붕괴율 대로 유지되지 않기 때문에 방사성 평형상태가 아닌 방사성 비평형 상태가 된다. 즉, U과 Th은 여러 가지 광물과 마그마 사이의 분배계수에 있어서 작지만 뚜렷한 차이가 있게된다. 따라서 마그마의 생성, 분출 및 광물이 정출되는 과정에서 ^{238}U 의 붕괴계열에 속하는 ^{230}Th 은 모핵종인 ^{238}U 과는 다른 분배비율로 마그마 혹은 광물내로 이동하게 된다. 그 결과 이전에는 1이었던 ^{238}U 과 ^{230}Th 사이의 활동도 비가 1에서 벗어나게 된다. 이러한 비평형상태는 계(system)가 다시 폐쇄계를 유지하면 시간이 지나면서 방사능 평형을 이루는 방향으로 진행되어, 충분한 시간이 흐르면 모핵종과 자핵종의 활동도 비율은 원래대로 1로 복귀한다. 이 때 복귀에 걸리는 시간, 즉 활동도 비율이 시간에 따라서 변화하는 그 비율은 자핵종의 반감기에 따라서 달라진다.

이러한 원리를 이용하면 적당한 모핵종과 자핵종을 선택하여 방사능 비평형 관계가 야기된 사건의 발생시기를 측정할 수가 있다.

실제로 지질학자들은 신기퇴적층 중에 함유되어 있는 산호, 척추동물 또는 단층면상의 방해석에 함유된 동위원소의 반감기를 이용하여 연령측정을 수행하며, 그간 “알파 자연방사능 측정법”이 이용되어 오다가, 새롭게 정밀도가 우수한 “열이온화 질량분석기법”(Thermal ionization mass spectrometry)의 개발로 측정 연대의 오차 범위를 줄였으며, 최근에는 “다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기법”(Multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry)의 개발로 보다 빠르고 간편하게 자료 획득이 가능하게 되었다.

이 방법에 의한 연대측정이 가능한 연령범위는 일반적으로 반감기의 5~10배 이내의 기간이기 때문에 자핵종의 반감기에 따라서 수 년~100만년 범위의 신뢰도를 갖는 연령 결과를 얻을 수가 있다.

4.1.2. ESR(Electron Spin Resonance, 전자자기 공명법) 측정법

전자자기공명법은 어떤 물질 속에 축적된 방사능에 의한 손상의 양을 측정하는 일종의 방사능 절대연령 측정법이다. Zeller(1968)가 처음으로 지질학의 절대연령측정에 이 방법을 시도한 이래, 1982년 부터는 본격적으로 연대측정에 이용되었고, 그 후 Ikeya(1993)에

의해 더욱 발전되었으며, 신뢰도를 주는 연령측정 범위는 200만 년~400만 년 전이다.

단층점토(fault clay)에서 분리한 석영을 분석 대상 물질로 하는 분석법으로, 절대연령측정에 필요한 가정은 석영 속에 존재하는 여러 가지 ESR signals(the E', OHC, Al and Ti signals amongst others)의 세기가 단층활동 중 전단변형작용에 의해서 0(zero)이 된다는 것이다. 단층활동 이후에 ESR signal들은 지나간 시간에 비례하여 ESR signal의 세기가 점점 증가하는 것에 기초를 두고 있다.

연대측정 결과치가 바로 단층활동 시기 그 자체를 나타낸다는 장점과 연령측정 대상 물질(석영)을 쉽게 채취할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

ESR 연령측정 방법은 제4기 퇴적물이 없는 화강암 지역이나 변성암 지역에 발달하는 단층비지를 이용하여 단층의 활동시기를 결정하는데 좋은 방법이기도 하다.

또한 오래된 단층활동의 ESR 기록은 최후의 단층활동 중에 없어지는 경향이 있기 때문에 이 방법으로는 주어진 시료의 최후의 단층활동 시기만을 결정하게 된다.

4.1.3. OSL(Optically Stimulated Luminescence) 측정법

1996년부터 본격적으로 연령측정에 이용되기 시작한 OSL 연대측정 결과치는 퇴적층에 함유된 석영, 장석 및 저어콘 등의 광물이 햇빛을 본 마지막 시기를 지시하는 것으로, 운반과정 동안이나 퇴적지에서 충분히 햇빛을 받아 OSL 신호가 0(zero)으로 된 다음 상위 퇴적층에 의해 햇빛이 가려지고 난 이후 주변에 있는 U, Th, K 등의 자연방사성 원소로부터 받은 방사능에 의해 피폭된 축적선량(equivalent dose)을 측정하고 그를 연간선량율(annual dose rate)로 나눈 값이 OSL 연대가 된다.

그러므로 OSL 연대는 석영이나 장석, 또는 저어콘 등을 포함한 퇴적층의 퇴적시기를 지시한다(Aitken, 1998; 정창식 등, 2000; 홍덕균 등, 2001; 정창식, 2002). OSL 연대측정 자료의 신뢰도가 있는 측정한계는 50만년 전이다.

4.1.4. ^{14}C AMS(Accelerating Mass Spectrometry, 가속질량분석기) 측정법

우주기원 동위원소 중에서 ^{14}C (carbon)은 제4기 연대측정에 가장 많이 이용되는 방사성 원소로서 5,730년의 반감기를 가지고 ^{14}N (nitrogen)으로 붕괴하며, 탄소를 함유하는 모든 시료 물질의 연령 측정이 가능하다. 신뢰도가 있는 연령측정 범위는 수 100년 내외에서 5~6만

년이다.

생물체가 살아있는 동안은 붕괴에 의한 ^{14}C 의 감소는 섭취에 의해서 균형을 이루게 되지만, 그러나 생물체가 죽고 나면 탄소의 재 섭취가 중단되므로 ^{14}C 농도는 시간이 경과함에 따라서 붕괴하게 된다. 시료 내에 잔류하는 ^{14}C 의 농도를 현재 살고 있는 유사한 종류의 것과 비교하게 되면 마지막으로 ^{14}C 을 섭취한 후 경과된 시간, 즉 생물체가 죽은 후 경과된 시간을 측정할 수 있게된다.

이 방법의 측정결과치는 퇴적층에 함유된 유기물에 대한 방사성 탄소연대측정 결과로, 원칙적으로는 퇴적층의 퇴적시기를 직접적으로 지시하는 것은 아니며 유기물이 죽은 시기를 지시한다. 그러므로 이 결과는 퇴적층의 “최소 퇴적시기”(퇴적 후 함유된 식물 뿌리의 측정 결과)를 지시하거나 또는 “최대 퇴적시기”(퇴적 전 죽은 식물 뿌리나 기타 유기물의 측정결과)를 지시한다.

4.1.5. K-Ar 또는 Ar-Ar 측정법

암석절대연령측정과는 별도로 단층활동 이후에 형성된 단층점토의 형성시기를 측정하는 기법으로, 암석내에 방사성 붕괴로 인해 축적된 Ar(argon)가스의 양을 측정하여 그 암석의 생성연대를 측정하는 방법이다.

K(potassium)는 지구지각을 구성하는 8대 원소로 주요 조암광물의 주구성 원소이다. K의 동위원소 중에서 연령측정에 이용되는 ^{40}K 는 전체 K의 0.012%를 차지하며, ^{40}K 는 자연적으로 ^{40}Ca 와 Ar으로 붕괴한다. 이 중에서 11.2%가 ^{40}Ar 으로 붕괴하는 것을 근거로 연령측정을 하는 것이다.

K-Ar 및 Ar-Ar 연령측정법은 이론적으로 K이 함유되어 있는 암석이나 광물이면 모두 다 가능하지만, 질량분석기의 검출하한이 있고, 극히 최근에 만들어진 암석의 경우는 대기 기원의 Ar이 99% 이상 되기 때문에 방사성 기원의 Ar의 양을 정확하게 보정하는 것이 매우 중요하다. 현재 『한국기초과학지원연구원』에서 K-Ar 연령측정을 수행하고 있다.

4.2. 해안단구 조사기술

제4기 단층은 대부분이 제3기 단층이 재 활동한 것들로써, 조구조적 기원 여부를 규명하려면, 제4기에 형성된 단구(段丘, terrace)의 변위가 수반되어야한다.

해안단구는 과거 빙기~간빙기의 순환과 관련되어 나타나는 해수면 변동과 지반의 융기에 의해 형성된 지형이므로, 이를 정확하게 이해한다는 것은 신기 지체 운동, 제4기 해수면 변동과 기후변화 등을 해석하는데

가장 필수적인 도구가 되며, 여기에 추가하여 연대측정 정보자료는 그 결과 해석에 관건이 된다.

해안단구에 대한 연대측정법으로는 ① 절대연대 측정법, ② 상대연대 측정법, 및 ③ 지형 대비법 등이 있다.

절대연대 측정법은 지진화학적 연구 방법에서 소개한 것 중에서 CHIME 방법, OSL 방법, 및 ^{14}C AMS 방법을 이용하고 있다.

상대연대 측정법은 지형적인 특징과 토양학적인 특징에 의해서 측정하는데, 지형적 특징으로는 단구의 고해안 절벽은 상부의 사면 퇴적층에 의하여 덮이게 되므로 시간이 경과함에 따라서 경사가 완만하게 변한다. 한편 시간과 함께 변화하는 단구 퇴적물의 토양학적 특징으로는 점토광물의 양과 광물조성, 산화도, 토양화 작용이 일어나는 층(solum)의 두께와 적색도, 대자율, ph, 원소의 농도(Si, Ca, Mg, K, Na) 등을 들 수가 있다.

지형 대비법은 일정한 융기율을 가정하고, 절대연령 자료가 있는 단구의 고도로부터 다른 고도에 위치하는 단구의 절대연령을 구하는 방법이다. 이 경우 융기율과 융기정도를 구하기 위해서는 과거 해수면 변동을 이해하는 것이 필수적이다.

최근 미국 등 선진국에서는 고도의 정밀도를 갖는 GPS를 이용하여 보다 정확한 지형고도 값에 수평분포 값을 표기하는 해안/하안단구 mapping방법으로 얻은 정량적 자료에 의한 지질학적 특성을 규명하고 있다.

4.3. 단층의 분절(Segment)화 조사기술

단층의 분절화란 첨단산업계, 특히 원자력 산업계에서 내진 설계의 목적으로 조구조적 기원(tectonic origin)인 활성단층(active fault)을 규정지을 때에 필요로 하는 활성단층의 규모 중의 한 항목으로, 한 조(組)의 독립된 활성단층의 길이를 의미한다. 즉 ① 하나의 활성단층이 연장되다가 첨멸 될 때까지의 길이 이거나, ② 첨멸이 되지 않더라도 다른 단층과 서로 역관관계로 만나거나 또는 서로 공액관계를 보여주며 분기되어 나아갈 때에는, 바로 그 위치가 분절되는 것으로 보고, ③ 활성단층이 다른 단층에 의해 절단된 경우에도 분절된 것으로 간주한다.

미국의 산 안드레아스 단층은 분절의 길이가 평균 12km 정도로 확인되었으며, 국내 양산단층계의 분절화는 조구조적 규모로 보아 약 10km 미만일 것으로 보고된 바 있다(최 위찬 등, 1999).

4.4. 신기단층에 대한 고지진학적 해석기술

1970년대 초반만 하더라도 미국과 소련 등 선진국에서조차도 지진재해를 줄이기 위한 방법으로 역사지진기록과 계기지진기록만을 이용하여 활성단층을 평가하였지만 만족할만한 결과를 얻지 못하였다. 그러므로 최근 대부분의 국가에서는 주요 시설물과 연관된 단층대에 대한 고지진학적 자료를 근거로 하여 활성단층에 대한 평가를 시도하고 있다.

즉, 지질시대 동안에 지진에 의해 형성된 여러 가지 지질학적 자료와 증거를 이용하여 단층대의 시공간적 단층활동의 특성을 해석하고 있다. 여기서 우리에게 필요한 단층활동의 시공간적 특성으로는 ① 단층활동과 이에 수반된 모든 변형작용의 주기성 파악, ② 단층암의 미세구조를 이용한 단층활동의 주기성 파악, 및 ③ 층서학적 자료와 구조지질학적 자료를 이용한 단층활동의 주기성 파악 등을 들 수가 있다.

4.5. 고지자기 분석기술

단층활동에 의해서 생성된 단층면내에 발달하는 단층점토(fault clay) 또는 단층비지(fault gouge)에 포함되어 있는 점토광물에 대한 고지자기 분석을 통하여 활성단층의 마지막 활동시기를 결정하는 방법/기술로서, 점토광물의 고보자력(high-coercivity)과 역자력(reverse polarity) 성분은 화학적 잔류자기(chemical remanent magnetization)로서 단층의 마지막 활동시기 이후에 단층을 통과하는 유체에 의해 형성되므로, 화학적 잔류자기 형성시기가 바로 단층의 활동시기를 지시한다. 그러나 이 결과치는 다른 절대연령 측정법을 이용하여 보정을 하여야 하는 불편이 있다(Hailwood *et al.*, 1992).

5. 종합분석 및 발전방안

지진은 단층의 운동에 의해 발생하는 것으로서, 지진의 예측 및 파악을 위해서는 신기단층의 정확한 분포와 운동특성 및 활성가능성 여부를 정밀하게 판단하는 것이 중요하다.

국내에서도 21세기를 진입하면서 GPS (Trimble XR model, 수평거리 오차한계 수 cm 이내, 고도 오차한계 약 50cm 이내)에 의한 해안지구 mapping 방법이 시도되고 있으며, 자료처리 또한 Pathfinder Office와 MS Office, Fieldmate 등의 Software로 현장에서 실시간으로 전산처리를 하고 있으므로 앞으로 정확한 자료에 의한 고차원의 결과가 양산될 것이며, 이로 인한 신

기 단층의 지질학적 정보를 이용한 활성단층 조사기술의 급속한 발전이 전망된다.

활성단층의 집중적 조사기술을 통해 지질구조 자료의 database가 구축되고, 활성단층의 선진 평가기법이 확립되어 활성단층 주변의 지진재해를 평가할 수 있을 것이다.

활성단층의 정량적 조사기술의 발전을 위해서는 전문인력은 물론 측정 또는 분석장비의 원활한 투입이 필요하다. 그러나 국내의 현실은 이러한 인력과 장비에 대한 투자가 빈약하여 거의 초보적 단계에서만 조사기술/연구가 수행되고 있다.

막대한 인명적·경제적 재난을 가져올 수도 있는 지진과 활성단층에 대한 조사는 결코 미룰 수 없는 시급한 과제이다. 그러나 국내에서의 지진대 기술연구는 초보적인 단계에 불과하며, 이를 위해서는 한반도 내에 분포하는 활성단층의 정확한 분포 및 그 형성과정, 운동특성의 정성적·정량적 자료의 획득이 매우 중요하므로 조속히 실행되어야 할 것이다.

2,000년도에 들어서면서 선진 제국에서는 지금까지 답습하여 오던 “종이(지형도) 지질조사(Paper Geological Mapping; PGM)방법”에서 “Digital Geological Mapping(DGM)” 시대로 전환하고 있으므로, 오래 전부터 공학분야에서 요구하고 있는 모든 지질자료의 수치화 내지는 정량화가 가까운 시기 내에 이루어질 것이다.

모든 첨단산업분야, 특히 원자력 산업분야에서 요구하는 기초 지반지질조사의 지질학적 자료는 사회적으로나 경제적으로, 더 나아가서는 국내·외적으로 민감한 기본 정보자료가 되므로, 질적 및 양적으로 논란의 여지가 없는 정량적인 것이어야 함을 감안한다면 조사방법을 지금까지의 지형도 대신에 GIS(Geological Information System)시대에 걸맞게 수치지형파일로 대체된 DGM기법 사용은 향후 모든 지질자료 생산에 필수적이다.

6. 결 론

신기 활성단층에 대한 연구/조사기술은 학술적 가치뿐만 아니라 고도 산업화에 따른 인구의 밀집화와 대형 구조물 및 원자력 시설 등의 안전을 위해서도 필요 불가결한 것이다.

활성단층 조사기술은 모든 산업시설물의 부지 선정 및 안전성 평가와 밀접하게 관련된 기술이므로 그 수요는 무한하다. 특히 산업시설물 중에서 전기와 전화,

물과 관련된 산업시설은 공공시설물로서 우리생활과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이러한 시설물 건립시 부지의 안정성은 대단히 중요하므로, 다른 어떤 기술보다도 선행되어야 한다. 즉 댐, 교량, 해저 케이블, 원자력발전소, 공단 등을 건립할 때 부지 안전성 평가가 선행되어야 하기 때문에 이 활성단층기술 개발후의 그 수요는 무한할 것이다.

활성단층 조사기술/연구를 통해 지진재해 대응기술의 주요한 기반구축은 물론 국가적인 지진재해 대처능력이 극대화 될 것이다.

한반도 활성단층 분포도, 지구구조 특성, 지진위험도의 정량적 분석 등이 이루어지면 학문적·기술적 발전은 물론 산업시설의 안정성 평가에 중요한 자료로 활용되어 국가재해방지대책에 기여할 것이다.

최근 국내에서 지속적으로 발생하는 규모 4.0 이상의 지진활동은 한반도가 더 이상 지진의 안전지대가 아니며, 판 경계부 보다는 느리지만 신기 지체구조운동이 활발하다는 인식이 확산되어 신기 활성단층에 대한 조사기술/연구가 활발하게 진행될 것이다.

최근 국내에서는 원자력 증장기 산·학·연 공동연구사업의 일환으로 국내 지질환경에 적합한 활성단층 판별기준과 평가방법 개발 및 원전 부지의 지진안전성에 영향을 미치는 지질현상 규명 등을 목표로 활발한 연구가 진행 중에 있으므로, 앞으로 2010년경에는 우리도 우리 나름대로의 활성단층 판별기준은 물론 중구조물 구조 설계시, 또는 첨단산업부지 선정시 등 내진에 필요한 정량적 지질정보 자료를 독자적으로 해결할 수 있을 것이다.

참고문헌

과학기술부 (2000) 원자로시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기술기준. 과학기술부 고시 제2000-8호(2000년 6월 23일), 2p.
 경재복, 이기화, Okada, A. (1999) 양산단층대의 고지진학적 연구 - 변위지형 분석 및 트렌치 조사, 지구물리, 2권 3호, p. 155-168.
 성군호, 심준필 (1991) 신기단층의 활동년대 결정방법. 지질과학, 5권, p. 44-48.
 이봉주, 류충렬, 최위찬 (1999) 경주시 양남면 일대의 제4기 단층, 지질학회지, 35, p. 1-14.
 이봉주, 최성자, 최위찬, 류충렬 (1999) 양산 월평지역의

제4기 단층운동 특성. 지질학회지, 35권 3호, p. 179-188.
 정창식 (2002) 해안단구에 대한 연대측정. 지질학회지, 38권 2호, p. 279-291.
 정창식, 최정현, 홍덕균, 이광식, 최성자, 최위찬, 정기영, 임창복, 장천중, 장호완 (2002) 경주시 양남면 관성 지역 제2단구 퇴적층의 OSL 연대. 한국암석학회제11차 정기총회 및 학술발표회(초록), 전북 전주 전북대학교, 5월 24-25일, p. 35-36.
 홍덕균, 최정현, 한정희, 최만식, 정창식 (2001) 광여기 루미네선스를 이용한 신기 퇴적층의 연대측정. 암석학회지, 10권, p. 202-211.
<http://www.asahi.com/science/news/>
<http://www.eurekaalert.org>
<http://www.iaea.org/worldatom>
<http://www.koreath.net>
<http://www.nrc.gov/NRC/CFR/PART100/part100-appa.html>
 Aitken, M.J. (1998) An introduction to optical dating. Oxford Science Publications, Tokyo, 267p.
 Buhay, W.M. et al. (1988) ESR dating of fault gouge; the effect of grain size. Quaternary Science Reviews, v. 7, p. 515-522.
 Chen, J.H. and Wasserburg, G.J. (1988) High precision mass spectrometric determinations of U234 and Th230 -Application to Quaternary geology. Chemical Geology, v. 70, 173p.
 Doblas, M. (1998) Slickenside kinematic indicators. Tectonophysics, v. 295, p. 187-197.
 Haliday, A.N., Lee, D.C., Christensen, J.N., Rehkaemper, M., Yi, W., Luo, X., Hall, C.M., Ballentine, C.J., Pettke, T. and Stirling, C. (1998) Applications of multiple collector-ICPMS to cosmochemistry, geochemistry, and paleoceanography. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 62, p. 919-940.
 Ikeya et al. (1982) Dating of a fault by Electron Spin Resonance on intra fault materials. Science, v. 215, p. 1392-1393.
 Lee, H.K. and Schwarcz, H.P. (1994) Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, Southern California. Tectonophysics, v. 235, p. 317-337.
 Muhs, D.R., (2000) Dating marine terraces with relative-age and correlated-age methods. In Noller, J.S., Sower, J.M. and Lettis, W.R.(eds.) Quaternary geochronology: Methods and applications. AGU Reference Shelf 4, American Geophysical Union, p. 434-446.
 Schwarcz, H.P. and Lee, H.K. (1998) Electron Spin Resonance dating. In Sowers, J., Noller, J. and Lettis, W.J. (eds.) Dating and Earthquakes: review of Quaternary geochronology and its application to paleoseismology. U. S. Nuclear Reg. Comm. NUREG/CR 5562p.

2002년 8월 19일 원고접수, 2002년 12월 23일 게재승인.