

한반도 활성단층지도 제작과정 및 해결과정

김영석^{1,*} · 손 문² · 최진혁³ · 최정현⁴ · 성영배⁵ · 이진현¹

¹부경대학교 지구환경과학과

²부산대학교 지질환경과학과

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부

⁴한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

⁵고려대학교 지리교육과

요 약

지진과 활성단층의 연관성이 알려지면서 한반도 활성단층지도의 필요성은 꾸준히 제기되어 왔다. 따라서 정부에서도 그 필요성을 인식하여 2009년 소방방재청에서 국가활성단층지도 제작사업을 성실히 수행하였으나 많은 전문가들이 동의하여 국민들에게 공개할 만한 수준의 활성단층도 제작에는 도달하지 못하였다. 이에 후속 사업으로 이를 개선하기 위한 과제가 계획되었으나, 정부의 관심과 예산부족으로 이의 진행이 순조롭지 못하였다. 그러다 2016년 울산해역 지진과 경주지진 등으로 이 과제가 급격하게 탄력을 받게 되어 한반도 전체의 활성단층지도제작 사업이 현실화 되게 되었다. 이 과제는 기본적으로 경주지역을 시작으로 2017년부터 4단계로 20년에 걸쳐 외국의 선진조사기법을 도입하여 전국을 대상으로 활성단층(제4기 단층)을 조사하고, 이를 표준화 하여 국가활성단층도를 제작한다는 계획이다. 이를 위해 활성단층연구에 필요한 관련 전공분야의 전문가들이 참여하는 국가활성단층연구단(KAFRG)이 꾸려졌고, 이 연구단에서는 항공라이다(LiDAR) 등 최신 원격탐사자료뿐만 아니라 지형학, 고지진학, 제4기 연대측정학 및 구조지질학 등을 활용하여 활성단층을 추적하고 분석하여 적절히 해석하고, 이를 도면화하는 작업을 수행하고 있다. 특히, 이러한 자료는 데이터베이스화 되어 온 라인상에서 적절히 관련기관이나 국민들에게 제공되고 활용될 수 있도록 할 계획이다. 이 연구의 특성 상 초기에는 정부와 국민의 이해부족으로 사업의 진행에 많은 애로가 있었으나 점차 연구체계가 갖춰지고 있다. 그러나 여전히 연구수행에 매우 중요한 굴착조사에서의 개인토지 사용허가 문제와 전문인력 부족, 도시지역에 대한 활성단층의 추적 등은 앞으로 이 사업의 성공적 수행을 위해 여전히 풀어야할 중요한 숙제로 남아 있다.

주요어: 활성단층, 활성단층지도, 고지진, 제4기 지형, 연대측정

Young-Seog Kim, Moon Son, Jin-Hyuck Choi, Jeong-Heon Choi, Yeong Bae Seong and Jinhyun Lee, 2020, Processes and challenges for the production of Korean active faults map. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 113-134

ABSTRACT: As the relationship between earthquakes and active faults is known, the necessity for the Korean active faults map has been raised. Therefore, the government recognized the necessity and National Emergency Management Agency (NEMA) carried out a research project to produce a Korean active faults map from 2009. Although the project had successfully been finished, it was not enough to get agreement among experts for opening to the public. As a result, a new project was planned to upgrade this map, but the progress was struggled due to the lack of government interest and budget. In 2016, the project has suddenly emerged due to the 2016 Ulsan sea earthquake and Gyeongju earthquake. This project basically adopted advanced research techniques to complete the whole Korean active faults map in four stages for 20 years from 2017 starting from the Gyeongju area. It will investigate potential active faults (Quaternary faults) throughout South Korea and will eventually produce a national active faults map. For effective investigation, the Korea Active Fault Research Group (KAFRG) has been set up with experts from the relevant majors required for active fault research. The research group traces, analyzes, and interprets potential active faults using not only the recent remote sensing data such as airborne-LiDAR, but also geomorphology, paleoseismology, Quaternary age dating and structural geology. The data will be databased and properly serviced to public institutions and to the public on the website. Although there were some hurdles due to the lack of understanding by the government and the public for such a research, the research system is gradually

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

being established. However, the issue of private land permission for excavation survey, the lack of professional manpower, and the tracing of active faults in urban areas remain important tasks to be successfully solved in the future.

Key words: active fault, active faults map, paleoseismology, quaternary geomorphology, age dating

(Young-Seog Kim and Jinhyun Lee, Department of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Jin-Hyuck Choi, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Jeong-Heon Choi, Research Center for Geochronology and Isotope Analysis, Korea Basic Science Institute, Cheongju 28119, Republic of Korea; Yeong Bae Seong, Department of Geography Education, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea)

1. 서론

지진은 상대적으로 짧은 시간 동안 극심한 피해를 줄 수 있는 자연재해이다. 지진동과 지표파열로 인한 건물붕괴와 인명피해를 유발할 뿐만 아니라 지진해일, 산사태, 화재, 액상화, 방사능 누출 등 2차 피해를 유발할 수 있다(Ministry of Construction and Transportation, 1997). 일반적으로 규모 6 이상의 지진이 발생할 경우 본진 이후에도 수차례 여진이 반복적으로 발생하기 때문에 장기간 동안의 피해와 정신적 불안에 시달리게 된다. 지진이 발생하는 원인은 대부분 기존에 존재하고 있던 활성단층이 재활동하는 것이지만, 한반도에서는 발생하는 대규모 지진의 발생빈도가 상대적으로 낮기 때문에 특정 단층대와 지진의 연관성을 규명하는 것은 쉽지 않다. 또한 한반도는 지체구조적으로 판의 가장자리에 위치하고 있어 변위율(slip rate)이 낮고 재발주기(recurrence interval)가 상대적으로 길다. 따라서 이와 같은 지진의 특성 때문에 지진에 대한 대비가 어렵고 소홀하기 쉽다.

최근 경주 지진(2016년 9월 12일; $M_w=5.5$)은 양산단층대에서 발생하여 지진과 단층의 연관성이 한반도에서 최초로 규명된 바 있다(Kim, K.-H. *et al.*, 2016; Kim, Y. *et al.*, 2016; Kim, Y.-S. *et al.*, 2017). 또한 포항 지진(2017년 11월 15일; $M_w=5.4$)은 비슷한 규모의 지진이었음에도 불구하고 얇은 진원과 지반특성으로 인하여 액상화 현상과 함께 포항시에 많은 피해를 발생시켰다(Kim *et al.*, 2018, 2020). 이러한 두 번의 지진을 계기로 국민들의 지진에 대한 관심이 크게 증가하였으며, 동시에 원전관련 시설의 안전성과 활성단층에 대한 관심도 높아졌다.

한반도는 지리적으로 인접한 중국 북동부나 대만

및 일본에 비하여 지진활동이 활발하지 않은 편이며, 큰 규모 지진의 발생빈도도 상대적으로 낮다. 2020년 1월 31일 기준으로(KMA, 2020), 1960년 이후 약 60년간 관측된 규모 3.0 이상의 지진 발생횟수는 총 418회이며, 규모 5 이상의 지진은 10회인 것을 통해 주로 중소규모의 지진이 간헐적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 과거 역사기록에 성곽이 붕괴되고, 100여명이 사망할 정도의 파괴적인 지진이 발생한 기록 등 많은 지진피해 기록이 보고되어 있어 상대적으로 주기가 길기는 하지만 규모 6 이상의 대규모 지진이 발생할 가능성이 없지는 않다(Lee, 1998; Jin *et al.*, 2011; KMA, 2012).

중규모 이상의 천발지진은 기존에 존재하고 있던 활성단층(active fault)에서 대부분 발생하고 있기 때문에 선진국에서는 활성단층도(active fault map) 및 지진재해도(seismic hazard map)를 제작하여 지진재해에 대비한다. 활성단층에 대한 정의는 각 나라와 활용대상에 따라 약간씩 다르게 정의되어 활용되고 있다. 그러나 활성단층은 개념적으로는 “최근 지질시대에 활동을 하였고, 미래에 다시 활동할 수 있는 단층”을 의미하여, 정의의 모호성 때문에 최후 활동시기를 통하여 활성단층을 정의하는 것이 일반적이다. 그러나 사용자들의 목적에 따라 이 최근 지질시대를 언제까지로 정하느냐에 대한 많은 이견이 존재하는데 보통은 과거 1만년 전(Holocene) 이내에 활동한 단층을 의미하지만 경우에 따라서는 제4기(Quaternary)에 활동한 단층들을 활성으로 고려하기도 한다(e.g., https://en.wikipedia.org/wiki/Active_fault).

이렇듯 국가 및 기관마다 활성단층에 대한 기준 및 정의가 상이한 관계로 우리나라에서도 조사·연구의 대상선정에서부터 논란의 여지가 있어 왔다. 따라

서 우리나라에서는 2015년 활성단층정비기획단(단장 경제복)을 통하여 우리나라에 적합한 활성단층을 정의하고 단층이 활동한 시기를 기준으로 활성단층을 제4기(~2,588 ka)내에서 4개의 범주로 구분하기로 한 바 있다. 이 정비기획단에서는 우리나라의 지체구조적 특성과 지진발생 양상에 기초하여 제4기 단층을 활성의 가능성이 있는 단층으로 보고 조사대상으로 삼기로 하였으며, 활성단층의 시대구분을 위하여 ICS (International Commission on Stratigraphy)의 국제 층서 연대표(International Chronostratigraphic Chart, 2019, <http://www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>)를 근거로 삼았다. 따라서 최근 지질시대 단층들을 최후기 활동시기를 근거로 다음과 같이 4개의 그룹으로 구분하고, 활성단층지도에 각 군별로 다른 색으로 표시하기로 하였다; 그룹 I 단층(~ 11.7 ka), 그룹 II 단층(11.7 ~ 126 ka), 그룹 III 단층(126 ~ 781 ka), 그룹 IV군 단층(781 ~ 2,588 ka).

활성단층도 및 지진재해도 제작을 위해서는 활성단층의 분포, 길이, 분절, 단층활동 연대, 재발주기, 변위율 등 많은 데이터가 필요하다. 이러한 데이터를 얻기 위한 가장 일반적인 방법은 고지진학(paleoseismology)을 바탕으로 한 조사이다(e.g., McCalpin, 2009). 고지진학적 조사를 통한 활성단층지도의 제작은 미국, 일본, 이탈리아, 대만 등 지진위험성이 높은 국가들에서 먼저 시작되었다(Lin *et al.*, 2012; AIST, 2020; USGS, 2020). 한국에는 그 필요성이 꾸준히 제기되어 왔음에도 불구하고 정밀조사를 위한 본격적인 예산배정은 경주지진 이후에 이루어져 현재 활성단층지도 제작사업 1단계가 진행 중이다.

지진재해도는 특정 지역에서 지진으로 인해 발생 가능한 지반운동의 수준을 예측하는 평가를 통해 제작되며, 수행방법에 따라 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분될 수 있다(Kang and Yoo, 2018). 현재 국내에서는 원전부지 지진재해도 평가에 집중을 하고 있으며, 국내·외에서 발표된 역사지진 및 계기 지진 목록을 주로 사용하여 평가하고 있다. 따라서 지진원을 선정할 때 불확실성이 있는 단층대에 대해 선형지진원으로 고려하기가 힘들다(Kang and Yoo, 2018). 따라서 활성단층 정보를 바탕으로 지진재해에 효과적으로 대비하기 위해 활성단층지도가 필요한 상황이며, 이에 따라 정부에서는 2017년도에 국

가활성단층 지도제작에 착수하였다. 양산-울산 단층과 같은 대규모 단층의 해양 연장에 대한 조사는 해양수산부에서 2018년부터 발주한 독립적인 해저활성단층 사업에 의해 추진되고 있다.

이 논문에서는 국가 활성단층지도 제작에 대한 계획, 문제점 및 해결과제에 대해 간략히 정리하고자 한다. 논문 작성중인 시기는 1단계 중 3차년도 종료 후 4차년도 협약단계에 있다. 따라서 현재까지 수립되고 진행된 해당 사업의 목적, 체계와 연구방법, 단층분절 산정기준, 단층표기법 등을 간략하게 소개하고 이에 대한 문제점을 제시하여 해결방안을 토론하고자 한다. 이를 통해 국가 활성단층지도 제작사업이 더욱 효율적이고 성공적으로 수행될 수 있기를 희망한다.

2. 추진배경

국내 활성단층은 1992년 Okada 연구팀과 한국자원연구소(현 한국지질자원연구원)의 굴착 조사로 양산시 월평마을에서 최초로 발견되었다(Okada *et al.*, 1994). 이후 주로 방사성폐기물 및 원자력부지의 안전성 및 지진재해 평가 차원에서 한국지질자원연구원, 한국전력연구원 및 한국원자력안전기술원을 중심으로 다양한 연구가 수행되었다. 그러나 우리나라 전체를 대상으로 한 활성단층조사는 2008년 지진재해대책법이 수립되면서 시작되었고, 이에 따라 정부에서는 2009~2012년 ‘활성단층지도 및 지진위험지도 제작 R&D (舊, 소방방재청; Choi *et al.*, 2012)’ 사업을 추진하였다. 그러나 이 사업은 비록 성공적으로 수행되었지만 그 결과는 전문가들 사이에서 많은 논쟁거리가 되었고, 결국 이 연구로 산출된 결과인 활성단층지도는 당시 국민들에게 공개되지는 못하였다. 따라서 이 결과를 바탕으로 더욱 정밀한 활성단층지도 조사사업을 수행해야 한다는 의견을 바탕으로 후속 사업이 추진되었다. 후속사업에서는 먼저 우리나라의 현실에 맞는 활성단층의 정의를 명확히 할 필요성이 제기되어 2014년 ‘활성단층정비기획단’을 구성하여 외국의 사례를 바탕으로 우리나라에 적합한 활성단층을 정의하는 임무를 수행하였다. 이 과정을 통해 정해진 활성단층의 정의를 바탕으로 2017년부터 5년씩 4단계에 걸쳐 20년 동안 국가활성단층지도를 완성한다는 계획을 갖고 있다.

지진에 의한 실질적인 피해를 예측하고 내진설계 등에 활용하기 위해서는 지진위험지도에 활성단층과 지반특성에 대한 정보도 반영되어야 한다. 따라서 이번 활성단층지도 사업은 그동안 취약했던 국내 활성단층 및 지진지질학 연구의 한계점을 극복하고 선진화를 도모하여, 향후 신뢰성 높은 활성단층 자료를 확보하여 지진재해의 대비에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해 전 국토를 대상으로 제4기 동안에 지표파열을 일으킨 큰 규모의 지진에 의한 흔적을 추적하고 이에 대한 정보를 획득하여 이를 지도화하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 자료는 활성단층을 반영한 국가지진위험지도를 고도화하여 신규로 설치되는 주요시설물(산업단지, 사회기반시설 등)에 대한 지진위험 요소를 파악하는데 기여할 수 있을 것이다.

본 사업은 '제4기 이후 적어도 한 번의 고지진(역사지진 포함)에 의해 지표파열 또는 지표변형을 유

발시킨 단층'을 조사대상으로 하며, 이들 단층의 분포를 웹 기반의 디지털 활성단층지도로 도시하여 국민들에게 공개하는데 목표를 두고 있다. 활성단층 조사에 있어 가장 기본적인 개념 중 하나는 '대부분의 대규모 지진은 이미 존재하고 있는 큰 규모의 단층을 따라 발생한다.'는데 있다(*여기서 말하는 지표파열을 유발하는 대규모의 지진은 일반적으로 규모 6 이상의 지진으로 알려져 있다; Wells and Coppersmith, 1994). 이는 기존 단층들의 고지진 이력을 파악함으로써 미래 잠재지진의 특성을 평가할 수 있음을 의미한다. 매우 드물지만, 지진이 활성이 아닌 것으로 판명된 단층을 따라 발생하는 경우도 있다(Morino et al., 2008; Azad et al., 2011; Barnhart et al., 2019)

이번 '한반도 단층구조선 조사 및 평가기술 개발' 사업의 목표는 제4기 동안의 고지진에 의한 변형기록이 없는 단층은 제외하며, 우리나라 육상 전역을 대상으로 제4기 동안 고지진 이력을 가진 단층들의

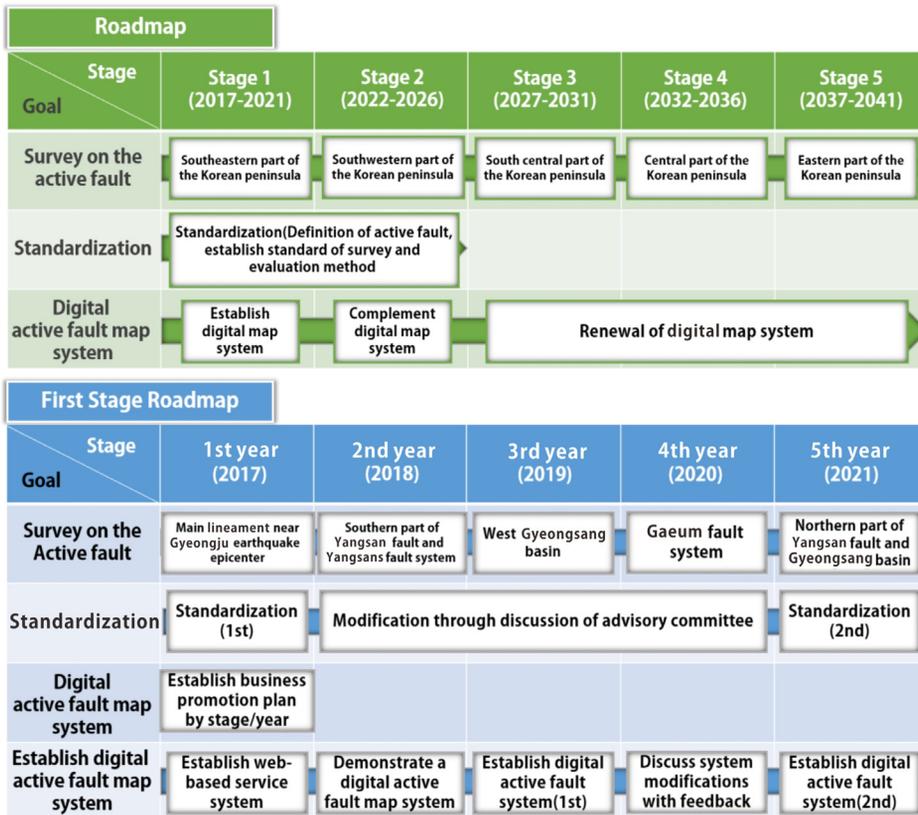


Fig. 1. Long-term roadmap (upper) and short-term roadmap (lower). Each stage has five years and first-stage study area is the southeastern part of Korean peninsula.

분포와 특성을 파악하는데 주력하고 있다. 활성단층 지도 제작의 가장 중요한 목적 중 하나는 ‘활성단층의 분포와 기하를 파악하고 이를 바탕으로 단층분절화를 실시하는 것’이다. 단층분절화(fault segmentation)는 하나의 대규모 단층을 형태적, 구조적 또는 지진학적으로 구분되는 최소 두 개 이상의 구간으로 나누는 작업이다. 아무리 큰 규모의 지진이 발생하여도 모든 단층분절이 동시에 파열되는 것이 아니므로 각각의 단층분절에 대한 지질구조 요소와 고지진 자료를 수집하고 평가할 필요가 있다. 따라서 활성단층 DB는 각 단층분절 단위로 구축되어야 하며, 단층의 노두 및 굴착 분석과 같은 지점 자료는 지점이 속하는 단층분절의 특성을 평가하는데 활용된다. 총 사업기간은 2017년 ~ 2036년(20년, 전국 대상; 그림 1)까지이며, 현재 진행 중인 1단계 사업기간은 2017년 ~ 2021년(5년, 한반도 남동부 대상; 그림 2)까지이다.

3. 추진체계 및 전략

이번 사업에서 활성단층 조사에 적용한 세 가지

의 주요 방법은 1) 제4기 지형분석을 통한 전문적인 선형 구조 분석을 가장 초기 단계의 기본 조사 절차에 포함시켰고, 2) 활성 가능 주요 대규모 단층에 대한 항공 LiDAR (Light Detection And Ranging) 자료를 이용하여 지형 분석의 질적 향상을 도모하였으며, 3) 표준 절차 및 지침서의 작성을 통하여 새로운 연구인력의 투입 시에도 쉽게 이해하고 적용할 수 있도록 하였다.

활성단층의 운동에 의해 제4기 지형면에 남겨진 단층운동의 흔적을 ‘지형지시자(geomorphic indicator)’라고 부른다. 이러한 지형지시자는 활성단층을 추적하고 인지하는데 매우 중요하며, 활성단층지도 제작에서는 원격탐사 및 야외조사를 통한 지형면 분류와 이러한 지형지시자의 분석이 매우 중요하게 수행된다. LiDAR는 원격탐사 방법 중 하나이며 항공기에서 레이저 빔을 이용하여 점단위의 자료(point cloud data)를 획득한 후 기술적으로 수목 등의 효과를 제거하여 지표면의 지형을 나타낸 영상이다. 해당 방법은 건물이나 식생 등 지형분석에 방해가 되는 요소들을 제거할 수 있어 국내와 같이 식생이 풍부하게 발달한 지역에 적합하다. 그러나 영상 획득 비용

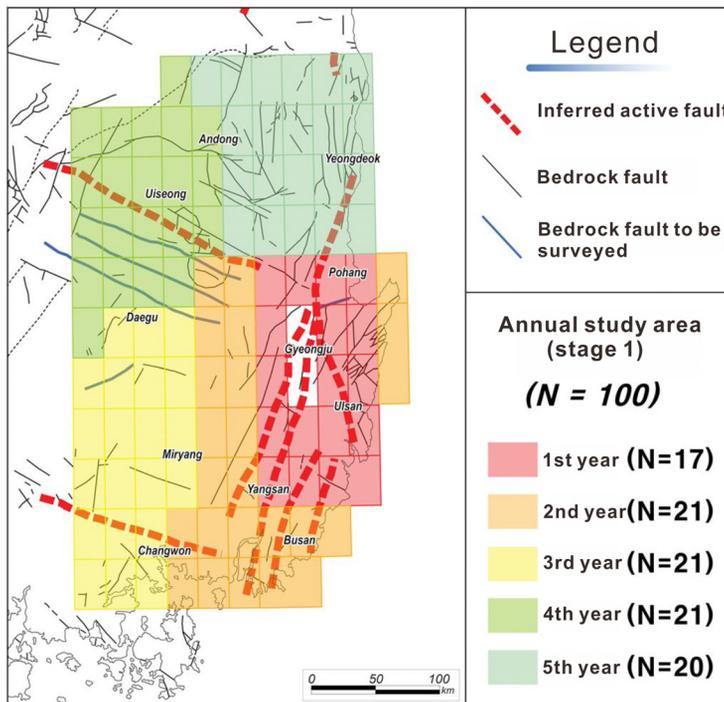


Fig. 2. First stage (2017 ~ 2021) survey and research areas (modified from Choi *et al.*, 2012).

이 비교적 고가이기 때문에 주요 단층대를 따라서만 획득되고 있다.

표준 절차 및 지침서(이하 지침서)는 ‘한반도 단층 구조선 조사 및 평가기술 개발’ 사업의 목적, 조사대상 및 범위, 그리고 추진체제와 중장기 로드맵(그림 1)을 정립하고, 사업 결과물인 활성단층지도의 신뢰도를 높이기 위해 지도제작의 표준절차를 제공하며, 국내 환경에 적합한 표준화된 조사/평가 방법 및 그 기준을 제시하는데 목적이 있다. 활성단층 조사는 일반적으로 기존문헌분석, 영상/지형분석, 야외지질조사, 지구물리탐사, 굴착조사, 연대측정, 고지진학적 해석 순서로 진행되며, 이에 따라 연구단은 상호 유기적으로 관련된 지형분석부(영상/지형분석 수행), 구조분석부(야외지질조사, 지표지질물리탐사, 굴착조사, 고지진해석 수행), 연대분석부(연대측정 수행)로 구성된다(그림 3). 연차별 연구지역은 20 구역(각 200 km²) 내외이며, 육상 조사에 국한된다.

3.1 지형분석부의 연구분야

지형분석부 조사는 다음과 같다; 1) 선형구조 분

포도 작성, 2) 정밀조사구역 선정, 3) 제4기 지형면 및 단층관련지형 분류, 4) 지형분석보고서 작성. 먼저 선형구조 분포도 작성은 수치표고모델(Digital Elevation Model; DEM)을 구축하여 선형구조 1, 2등급을 분류한 후 선형구조 분포도를 제작한다. DEM은 국토지리정보원이 제공하는 1:5,000 축척 수치지도를 기반으로 5 m 공간해상도로 구축되며, LiDAR 영상 촬영지역은 LiDAR 자료를 활용하여 보완 분석이 진행된다. 항공사진을 사용하게 되면 연구자의 판단에 따라 항공사진 획득 시기와 해상도를 고려해서 분석에 적합한 것을 선정한다. 표준절차 및 지침서에 따라 선형구조상에서 활성단층이 보고되었거나, 단층관련 지형(fault-related landforms)이 인지되고 제4기 지형변위가 확인되거나 제4기 지형변위를 수반할 가능성이 큰 선형구조를 1등급으로 분류하였다. 2등급 선형구조는 1등급을 제외한 나머지의 뚜렷한 선형구조이다. 추출된 선형구조는 각각 붉은색(1등급), 검은색(2등급)의 실선으로 음영기복도에 표현한다. 선형구조의 연속성에 대한 정보가 불확실한 경우 파선을 활용하여 표시한다.

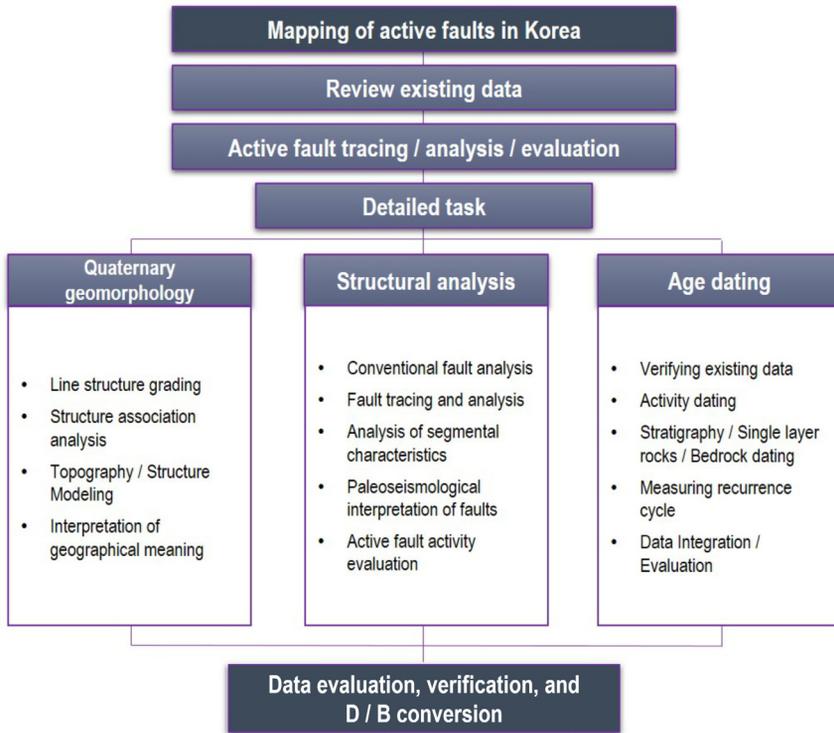


Fig. 3. Active fault survey and research management system.

정밀조사구역 선정은 제4기 지형면이 분포하는 지역 중, 1등급 선형구조가 통과하는 지점을 대상으로 트렌치 작업이 가능하고 고지진학적 자료를 획득할 수 있는 지역을 우선 선정한다. 이는 1등급 선형구조를 대상으로 야외조사를 실시하여 결정하며, 가능한 구조분석부와 야외조사 일정을 공유하여 공동으로 조사하고 선정한다. 정밀조사 구역은 최소 1×1 km² (지도화 구역)로 하되 필요에 따라 조정하고, 약식보고서 형식으로 작성(선정근거 및 각종 근거자료 제시)하여 구조분석부에 전달하고 토론한다.

영상을 이용해 제4기 지형면 및 단층관련 지형 동정 및 분류 후 야외조사를 거쳐 단층관련 지형분류도를 작성한다. 표준질차 및 지침서에서 제4기 지형면 코드, 기호, 표현방식을 정립하였으며, 단층관련 지형목록 및 지도화 범례를 구축하였다(Appendix 1, 2). 결과물은 shp 파일로 제4기 지형면 및 단층관련 지형분류도와 최종 등급별 선형구조 분포도를 구조분석부에 전달한다. 지형분석보고서 작성은 제4기 지형분석 결과를 종합하여 작성한다. 선형구조 분포도는 각 조사구역별로 결과물을 제시하며(그림 4),

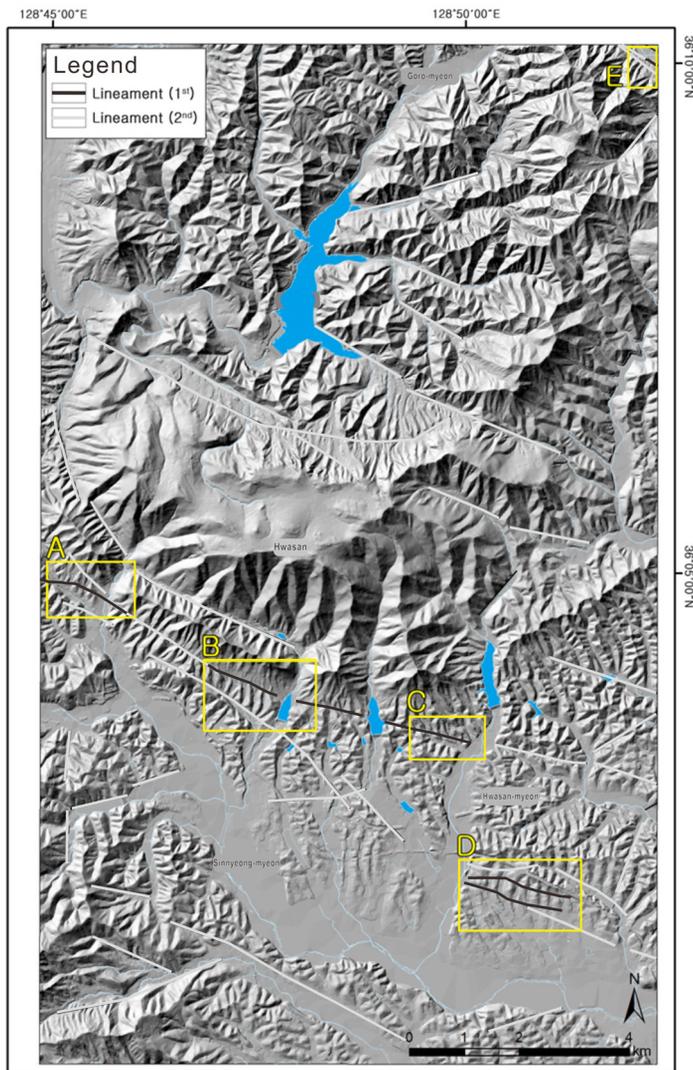


Fig. 4. Example of a lineament map. The results of first- and second-class lineament analysis are presented on DEM-based shaded relief image. Yellow-boxed are intensive research areas.

지형분류도는 각 조사 구역 내 정밀조사구역이 있을 경우에 제시한다(그림 5).

3.2 구조분석부의 연구분야

지형분석부의 선형구조 및 지형분류를 기반으로 야외조사를 수행하며, 필요시 별도의 원격탐사를 실시하여 야외조사 시 참고한다. 구조분석부에서는 활성단층에 대한 야외분포 추적 등 구조지질학적 조사 뿐만 아니라 트렌치 단면을 이용한 고지진학적 연구를 주로 수행한다. 야외조사 결과 기반암 단층 및 추정 활성단층을 발견하면 필요에 따라 물리탐사 및 굴착조사를 수행한다(그림 6). 이 조사를 통해 단층의 자세, 운동감각, 변위량, 단층활동 횟수, 변위를, 재발주기 등 최대한 획득 가능한 자료를 생산한다. 조사를 통해 발견된 지점을 명명하고 정밀조사를 통해 획득한 정보를 데이터베이스화 한다(Appendix 3, 4). 단층의 명명법은 조사방법(굴착조사 또는 단층노두), 조사날짜, 조사지점(행정구역)을 고려해서 명명한다. 예를 들어 2017년 8월 17일, 경북 경주시 내남면 용장리에서 수행된 굴착조사인 경우, T_170817_GBgnly로 명명한다(T: 굴착조사, 170817: 2017년 8

월 17일, GB: 경북, g: 경주시, n: 내남면, y: 용장리). 단층 명명방법은 1:50,000 지질도, 보고된 논문, 단층 분포지역을 고려해서 명명한다. 기존에 발견된 지질도에 보고된 단층명이 있으면 이를 해당단층의 이름으로 사용한다. 새롭게 발견된 단층은 발견된 지점에 기 보고된 단층이 없으면 해당 지역명을 고려해서 단층명을 명명한다. 단층의 분절명은 분절 내 가장 처음 보고된 노두 이름을 사용하고, 기 보고된 노두가 없는 경우 가장 처음 발견된 지역의 대표 지명을 사용하며, 각각 다른 분절로 구분되지 않는 여러 조의 가지단층은 뒤에 숫자를 사용하여 구분한다. 예를 들어 양산단층 내 기 보고된 가천지점이 포함된 각기 다른 분절로 구분되지 않는 2조의 분절인 경우, 양산단층/가천분절-1, 가천분절-2로 표기한다.

단층은 기존에 발달한 약대(weak zone)를 따라 재활하여 단층대(fault zone)로 성장을 하며(Holdsworth et al., 1997) 지표파열을 발생시킬 수 있는 중규모 이상의 지진은 기존에 발달한 활성단층이 재활되어 발생할 가능성이 크다. 그러나 개별적인 지진이 발생할 때마다 해당 단층의 전 구간이 파열되는 것이 아니기 때문에 단층 전체에 대해 활성 여부를 판단하

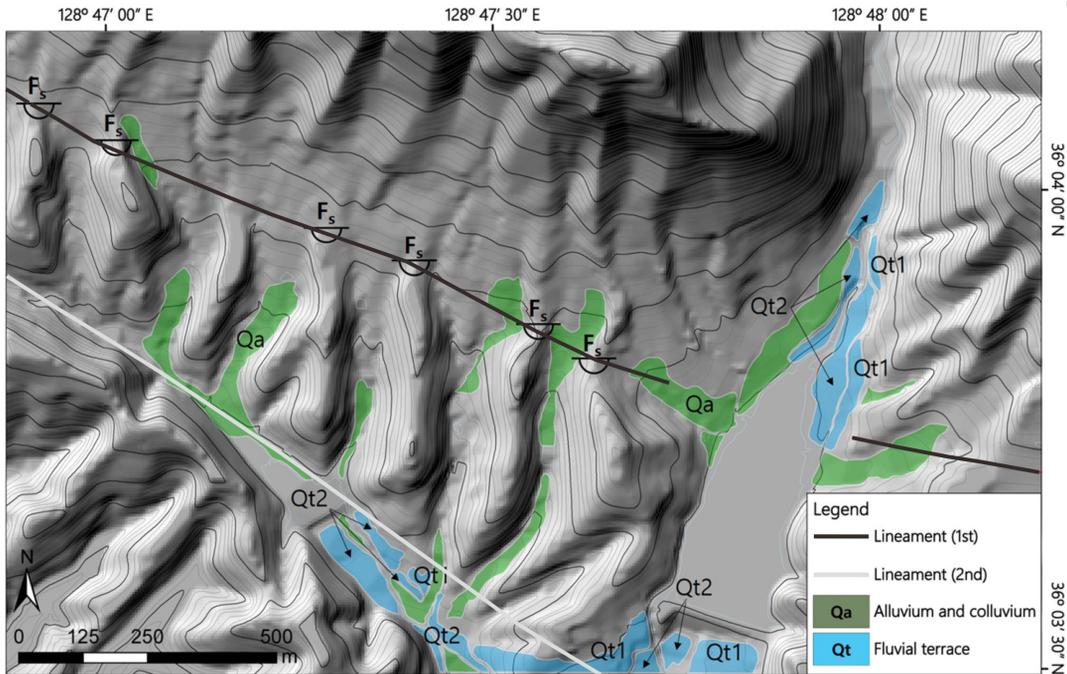


Fig. 5. Example of a geomorphic classification map (Sinnyeong A). Quaternary geomorphology and fault-related structures identified in the research area are displayed together with lineaments (first and second classes).

기 위해서는 단층을 구성하는 각 구간에 대한 정보를 획득하여야 한다. 이때, 유사한 주향/경사 및 유사한 단층특성을 보이는 구간을 ‘분절(segment)’이라고 하며, 이는 전체단층을 구성하는 기본적인 단

위이다. 미국, 일본 등의 사례를 살펴보면, 특정 단층의 분절화를 규명하는 것은 향후 지진재해평가에 중요한 요소 중 하나로서 분절화 개념 및 기준에 따라 크게 구조적 분절(geometric segment)과 운동학적

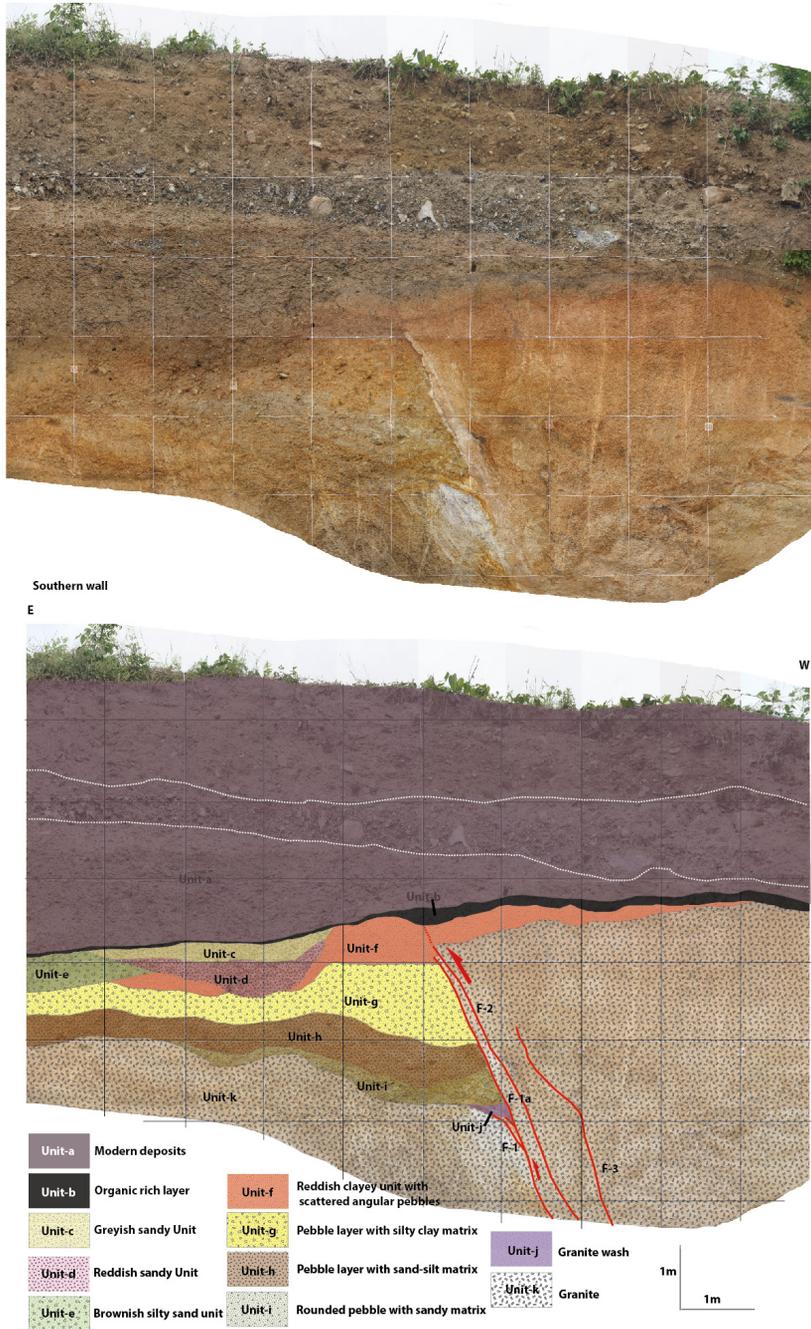


Fig. 6. Example of trench photo mosaic and trench log showing faults and different lithological units exposed on the trench wall of Chungun site.

분절(behavior segment)로 구분한다(Schwartz and Coppersmith, 1984; HERP, 2010; 그림 7).

운동학적 분절은 개별적인 지진사건으로 인해 동시에 파열될 수 있는 단층 구간을 의미한다. 이 때 하나의 운동학적 분절은 2개 이상의 구조적 분절을 포함할 수 있다. 일반적으로 이웃하는 운동학적 분절은 한 번의 지진에 의해 동시에 파열되지 않는다. 따라서 이웃하는 운동학적 분절의 경계부는 대개 수 km 이상의 비교적 큰 단층 불연속성을 가진다. 특정 지역에서 운동학적 분절을 정의하기 위해서는 단층의 주향을 따라 변위분포, 단층활동 연대 및 횡수, 변위율, 재발주기 등 양질의 고지진학적 자료가 필요하며, 이러한 자료는 주로 대규모 지진이 잦은 판 경계 단층에서 얻을 수 있다.

구조적 분절은 단층의 기하와 분포를 기준으로 구분되는 단층의 기본 단위이다. 이웃하는 분절은 단층의 기하학적 불연속성을 기준으로 구분된다. 일반적으로 지진재발모델 및 지진재해평가를 위한 활성단층 조사에서는 대부분 '구조적 분절' 개념을 사용하고 있다(Mann, 2007; Klinger, 2010; Mignan *et al.*, 2015). 그러나 대부분의 경우 역사지진에 의한 지표파열이 발생한 단층구간에 적용되고 있어 구조적 분절과 지진거동(개별적인 지진에 의한 지진파열의 발생범위)과는 직접적인 관련성을 설명할 수 있다. 한편 최근에 지표파열이 명확히 보고되지 않은 과거의 지진발생거동을 해석할 때는 더 많은 정보와 각별한 주의가 필요하다. 즉 개별적인 지진으로 인해 하나의 구조적 분절이 부분파열(partial rupture) 또는 완전파열(entire rupture)될 수 있으며, 2개 이상의 이웃하는 구조적 분절이 동시에 파열될 가능성도 있다. 이러한 지진거동 특성은 주로 지진의 규모

에 따라 좌우된다.

한반도가 판 내부에 위치하며 양질의 고지진학적 자료를 획득하기 어렵기 때문에 이번 사업에서의 '단층분절'은 구조적 분절에 국한한다. 구조적 분절은 그 특성에 따라 4 가지로 구분하였다. 1) 계단식 분절(stepover 또는 jog); 주단층을 기준으로, 지표상에서 단층의 방향성이 5° 이내로 평행 내지 아평행한 이웃하는 단층구간이 수직방향으로 1 km 이상 이격될 경우(그림 8a), 2) 단층 굴곡(bend); 주단층을 기준으로, 지표상에서 최소 2.5 km 길이를 보이는 이웃하는 두 단층구간이 약 5° 이상의 방향성 변화를 보이는 경우(그림 8b), 3) 가지 단층(branch); 주단층에서 가지단층이 갈라지는 지점인 분기 지점으로 부터 최소 2.5 km 이상 연장되면서 주 단층과의 최대 이격거리가 1 km 이상인 가지단층은 새로운 분절로 평가(그림 8c), 4) 불연속성(fault gap); 상기 조건들에는 해당되지 않으나, 1 km 이상의 단층성 또는 불연속성을 보이다 다시 출현하여 2.5 km 이상 연장되는 단층을 새로운 단층분절로 구분하였다(그림 8d).

단층 조사지점과 단층분절에서 수집된 자료들은 D/B화를 위해 표준화된 표로 수집하고 있으며, 이를 종합하여 디지털 지도제작을 할 예정이다(Appendix 3, 4). 이렇게 수집된 자료들 중에 활성단층의 그룹을 결정하는데 중요한 '최후기 운동시기'가 있다. 특정 지역에서 발견된 단층의 마지막 운동시기를 의미하는 최후기 운동시기는 범위로 표현한다. 예를 들어 20 ka 연대를 가지는 퇴적층이 단층에 의해 절단되어 있지만 5 ka 연대를 가지는 퇴적층은 절단되지 않은 경우에 최후기 운동시기는 5 ~ 20 ka 시기에 국한된다. 단층분절 그룹은 최후기 운동시기에 의해

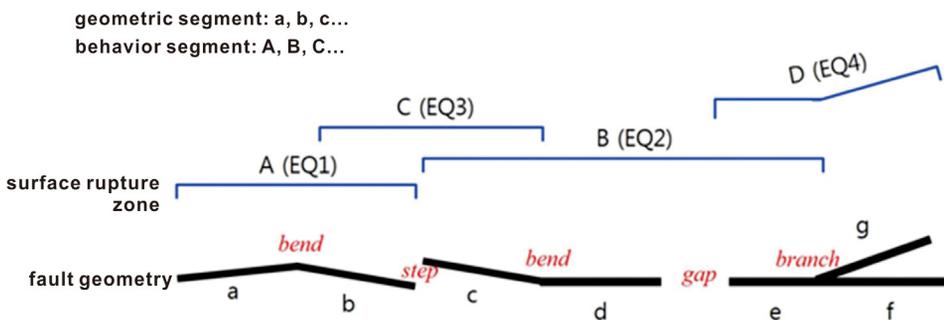


Fig. 7. Fault segmentation concepts and type (map view).

결정되기 때문에(그림 9) 이 경우는 그룹 I ~ II 에 속하게 되며, 절단된 층서(20 ka)를 기준으로 지도에는 그룹 II 의 색(주황)으로 표현한다.

지형분석을 통해 얻어진 선형구조를 따라 야외조사 또는 굴착조사에 의해 제4기층을 절단한 단층을 발견하더라도 발견지점이 소수일 경우 선형구조 전체를 활성단층으로 결정하기는 어렵다. 또한 과거의 지표파열을 발생시킨 단층의 흔적은 활성단층을 따라 모든 지역에서 발견하기 힘들며, 한반도와 같이 제4기 단층운동이 판경계 지역에 비해 강하지 않거나 경작활동 및 도시화로 인해 단층 흔적이 발견되기 힘들 수 있다. 이를 해결하고자 지형분석 및 정밀 야외조사를 통해 굴착조사를 선별적으로 실시하고 있지만 토지를 임대하여 굴착하는 조사 특성상 모든 지역에 굴착을 하기 힘들며, 시간 및 비용 문제도 만만치 않다. 따라서 이러한 경우에는 활성단층 확인 지점(굴착조사 또는 단층노두)을 기준으로부터 선형구조를 따라 최소 연장길이를 산정할 필요가 있다.

단층의 변위량, 지진규모, 지표파열 길이에 관한 여러 상호 경험식들 중 다양한 단층을 포함할 수 있어 상대적으로 한반도 환경에 적합한 Wells and Coppersmith (1994)가 제시한 경험식을 토대로 최소 발생 가능 지표파열 길이를 2 km로 설정하였다. 따라서 확인된 활성단층지점에서 양쪽으로 1 km씩

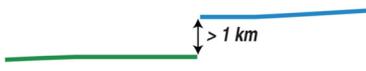
실선으로 표기하고, 이를 벗어나는 지점부터는 제4기 지형변위와 선형구조가 뚜렷한 경우 선형구조를 따라 파선으로 활성단층을 표기한다. 이에 대한 근거는 지표파열을 발생시키는 지진의 최소 규모를 5.5로 가정하면, Wells and Coppersmith (1994)의 경험식에 의하면 이때 단층의 변위는 약 0.21 m 이고 단층 파열길이는 약 2.3 km로 계산된다. 마찬가지로 최소 규모를 5.5로 가정하고 Slemmons (1982)와 Bonilla *et al.* (1984)의 경험식에서 변위와 지표파열길이는 각각 1 cm 와 0.17 km, 3 cm와 1.65 km 가 도출되지만 해당 연구자들이 제시한 제한 범위는 Slemmons (1982): 0.3<변위<4 m, 4<지표파열 길이<120 km; Bonilla *et al.* (1984): 0.4<변위<9.5 m, 18 <지표파열길이<120 km이기 때문에 규모 5.5로 가정했을 때 Slemmons (1982)과 Bonilla *et al.* (1984)의 경험식은 우리나라 활성단층의 범위에 맞지 않아 사용하기 어렵다. 따라서 가장 넓은 범위를 포함하는 Wells and Coppersmith (1994)의 경험식에서 계산된 파열길이 2.3 km의 오차 가능성을 고려하여 제4기층을 절단한 활성단층을 발견한 지점에서 양편 최대 1 km까지 실선으로 표기 하기로 하였다(그림 10).

3.3 연대분석부의 연구분야

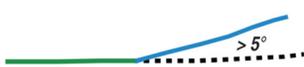
연대분석부는 다음과 같은 업무를 담당한다; 1) 시료의 채취, 2) 시료의 전처리(시료준비), 3) 연대측정 실험, 4) 연대결과의 해석. 시료의 채취는 지형분석부와 구조분석부의 야외조사가 종료되기 이전 실시한다. 시료 채취 대상은 활성단층으로 절단되거나 활성단층을 피복하고 있는 미고결 지층, 활성단층 비지(fault gouge), 그리고 활성단층과 관련된 기반암 시료이다. 연구진에서 실시하는 연대측정의 종류에는 OSL (Optically Stimulated Luminescence, 광여기루미네선스) 연대측정, ESR (Electron Spin

Segmentation by surface geometry

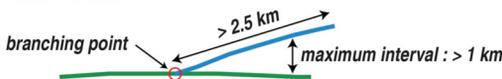
a. Stepover or Jog



b. Bend of more than 5 degrees



c. Branch



d. Gap of more than 1 km



Fig. 8. Classification of fault segmentation types based on fault geometry (map view).

Group I	Now - 11.7 ka	
Group II	11.7 - 126 ka	
Group III	126 - 781 ka	
Group IV	781 - 2,588 ka	

Fig. 9. Classification groups of Korean active faults based on geological time scale and their colors displayed on the map, accordingly.

Resonance, 전자스핀공명) 연대측정, 우주기원핵종 (Cosmogenic Nuclide) 연대측정, 방사성 탄소동위원소(¹⁴C) 연대측정 등이 있다. 시료표기법은 조사시기, 굴착 지점명(영문 3자리), 시료번호 순서이다(시료 채취기준 우측 하단부터 01, 02, 03 ~), 적용 연대측정 방법[탄소(C), OSL (O), ESR (E), Cosmic Ray (CM)]. 예시는 다음과 같다; 2018년 3월 16-17일 경주시 천군동 굴착에서 채취한 OSL 연대측정 시료의 경우: 1803CHG-01-O.

본 사업에서의 단층 활동시기 결정은 위에서 언급한 다양한 방법 중에서 최소 2개 이상의 방법을 적용하여 논리적으로 해석하려 노력하고 있으며, 같은 방법의 경우에도 중복적인 검증을 통해 연대측정의 오류를 줄이고 신뢰도를 높이기 위해 노력하고 있다. 이 논문에서는 우리나라의 제4기 지층연대측정에 가장 광범위하게 적용될 수 있는 연대측정 방법인 OSL 연대측정에 대해 간략하게 서술하고자 한다: ESR, 우주기원핵종, 방사성탄소 연대측정법 등 활성단층 연대측정 전반에 대해서는 별도의 논문으로 다룰 예정이다. OSL 연대측정은 단층에 의해 변형 혹은 절단되거나, 단층을 피복하고 있는 퇴적층의 연대측정에 적용되어, 단층운동의 시기를 제한하는 데 사용된다. OSL 연대측정이라 함은, 석영을 청색파장으로 여기시켜 발생된 루미네선스 신호를 이용한 OSL 연대측정과 장석을 적외선파장으로 여기시켜 발생된 루미네선스 신호를 이용한 IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) 연대측정을 통칭한다. OSL 연대측

정 결과는 측정대상 물질인 석영이나 장석입자가 퇴적되어 햇빛으로부터 차단된 후, 경과한 시간을 의미하며 일반적으로 “천년 전”을 의미하는 “ka (kilo annum)” 단위로 표현된다.

OSL 연대측정을 위한 시료의 전처리(시료준비)는 등가선량(equivalent dose) 측정을 위한 시료준비비와 연간선량(dose rate) 측정을 위한 시료준비비로 나눌 수 있다. 등가선량 측정을 위해 노두에서 회수한 OSL 시료채취용 파이프를 암실에서 절단하여 조립질(90-250 μm) 혹은 세립질(4-11 μm)의 석영과 장석을 분리한다. 석영과 장석의 분리절차는 다음과 같다; (1) 표준망체를 이용한 습식체질로 90-250 μm 크기의 입자를 분리한다. 세립질입자는 Stokes' law of settling을 사용하여 분리한다. (2) 습식체질을 실시하며 걸러진 입자들을 10% 염산(약 1-3시간, 반응이 없을 때까지)과 10% 과산화수소수(반응이 없을 때까지)로 처리하여 시료에 포함된 탄산염광물과 유기물을 제거한다. (3) 조립질입자들은 10% 불산으로 40분-1시간 정도 처리하여, 석영과 장석을 제외한 다른 광물을 제거하고 세립질 입자들은 hexafluorosilicic acid로 2주간 처리하여 순수한 석영입자를 추출한다. (4) 중액분리를 통해 불산으로 처리한 시료들을 석영과 장석으로 분리(세립질 입자들은 중액분리가 불가능함)한다. 연간선량 측정을 위한 시료는 시료를 오븐에서 완전하게 건조시킨 후, 시료를 분쇄하고 시료가 동위원소 세차평형(secular equilibrium)을 이룰 수 있도록 감마스펙트로미터

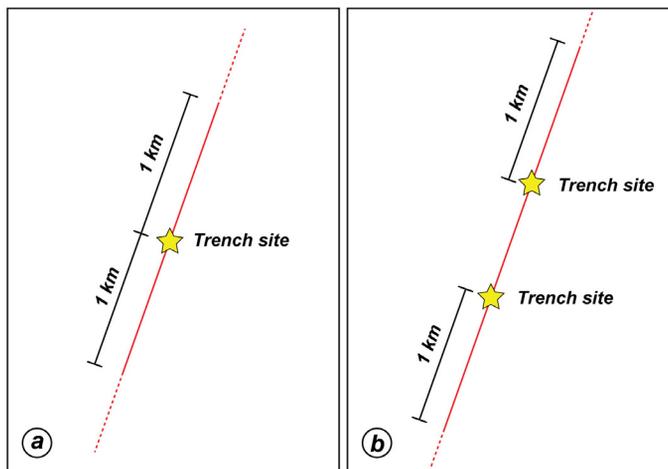


Fig. 10. Schematization standard for the extent of active fault lines.

측정용 컨테이너에 약 3주 동안 보관하여 준비한다.

OSL 연대측정을 위한 등가선량 측정은 현재 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가받고 있는 단일시료재현법(Single-Aliquot Regenerative-Dose법, SAR법)을 적용한다(표 1). 석영 OSL 신호의 발생은 청색광원(blue-LED, 470 nm, FWHM = 20 nm, max. power density: ~ 80 mW/cm²)을 사용하며, 석영 OSL 신호는 광증폭배관(photomultiplier tube)을 사용하여 검출한다(검출파장: ~ 340 nm). 장석 IRSL 및 pIRIRSL

연대측정을 위한 등가선량 측정도 기본적으로는 단일시료재현법을 사용한다. 장석 IRSL/pIRIRSL 신호의 발생은 850 nm (FWHM = 40 nm) 파장의 적외선광원을 사용하며, 장석 IRSL/pIRIRSL 신호는 광증폭배관 앞에 Blue filter pack (BG39 + Corning 7-59) 광학필터를 검출필터로 사용하여 측정한다. 석영 OSL 및 장석 IRSL/pIRIRSL 신호의 감쇄곡선과 성장곡선은 그림 11(예시)과 같다. 각 성장곡선의 특성선량(2D₀) 값은 연대측정 상한(즉, 퇴적층의 최

Table 1. Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol for measuring quartz equivalent dose.

Step	Treatment	Observed
1	Regeneration dose	-
2	Preheat (at 160~300°C for 10 seconds)	-
3	OSL measurements (at 125°C for 40 seconds)	L _i
4	Test dose	-
5	Cut-heat (at 160~220°C for 0 seconds)	-
6	OSL measurements (at 125°C for 40 seconds)	T _i
7	Return to step 1	-

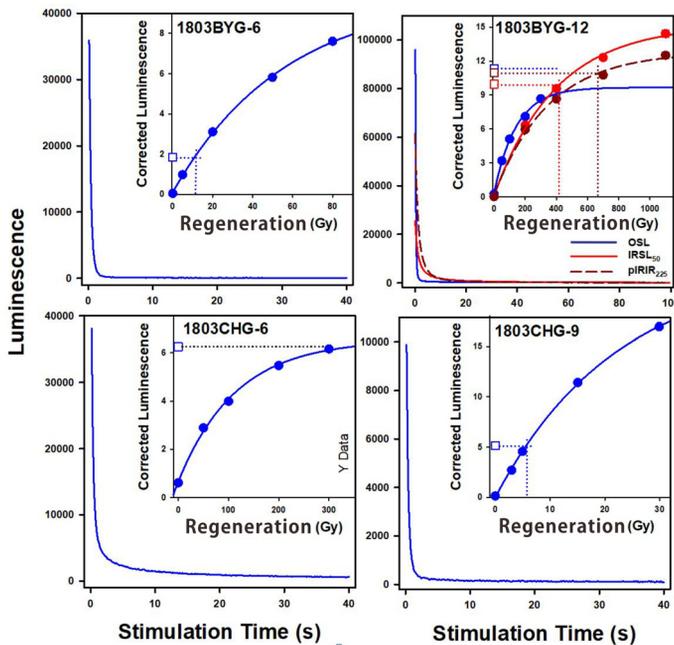


Fig. 11. Attenuation curve and growth curve (blue line) of quartz OSL signal. Attenuation curve and growth curve (red and brown lines) of feldspar IRSL signal and pIRIRSL signal.

소연대)을 추정하는 데 사용된다.

OSL 연대측정 가능상한은 석영이나 장석시료마다 혹은 석영이나 장석 개별입자(individual grains)의 물리적 특성에 따라 다양하지만, 일반적으로 석영 OSL 연대측정 가능상한은 약 150-200 ka (15-20 만년), 장석 IRSL 연대측정 상한은 약 500 ka (50만년)으로 알려져 있다. 퇴적 당시 측정대상 물질들이 햇빛에 충분한 시간(수 초~수 분)동안 노출되지 못하여 OSL 신호가 충분히 제거되지 않았거나, 퇴적 이후의 교란작용으로 인해 퇴적층 내에서 입자의 상하 이동이 심각했을 경우 OSL 연대측정결과는 해당 퇴적층의 퇴적시기를 정확하게 지시하지 못할 가능성이 있다. OSL 연대측정 가능상한 이상의 퇴적연대를 보이는 시료의 경우에는 특성선량(characteristic dose, $2D_0$)값을 사용하여 최소 퇴적연대를 부등호로 표시한다. 예를 들어, 퇴적층 시료의 OSL 연대가 " $> 100 \pm 10 \text{ ka}$ "로 표현되었다면, 이는 해당 퇴적층이 $100 \pm 10 \text{ ka}$ (10 ± 1 만년)보다 이전에 형성된 퇴적층임을 의미한다. 특성선량(characteristic dose, $2D_0$)이란, 측정대상 물질인 석영이나 장석입자내의 격자결함 중 약 86%가 전자(trapped electrons)로 채워졌을 때의 선량(dose)을 의미한다(그림 12).

4. 토론: 국가활성단층 지도제작의 문제점과 해결방안

4.1 활성단층에 대한 이해부족

1993년 이후 양산-울산 단층계 주변으로 활성단층 조사가 이루어지고 있었지만(Okada *et al.*, 1994;

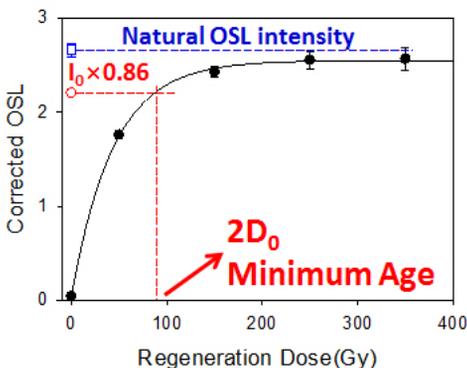


Fig. 12. Estimating method for the minimum deposition age with a upper age limit.

Choi *et al.*, 2012) 아직까지 일반 국민들에게 고지진학은 매우 생소한 학문이며 관련 분야의 전문가들도 타 연구분야와 비교했을 때 매우 소수이다. 현재 50여명의 단층관련 연구 전문가들이 국내에서 활성단층 연구를 위해 활동하고 있으며, 실질적으로 활성단층 조사를 위해 야외조사를 실시하고 고지진학적 해석을 수행할 수 있는 고급전문가는 약 10명 내외에 불과하다.

경주지진 이전 활성단층은 원자력 건설사업과 관련하여 일부 이슈화가 되었을 뿐이기 때문에 정부와 일반 국민들은 활성단층에 대한 인식 및 기본 개념이 매우 부족한 실정이다. 이러한 이유 때문에 일부에서는 현재 움직이고 있거나 지금 지진을 발생시키고 있는 단층만을 활성단층으로 오해하거나 단기간에 한반도 활성단층지도를 제작할 수 있다고 생각하기도 한다.

또한 연구과정에서 고지진학적 조사를 위해서는 굴착조사가 매우 중요한 요소를 차지하는데 이를 위해서는 국가소유 토지 뿐만 아니라 개인소유의 토지에 대한 사용이 불가피하다. 그런데 일반국민들이 이 조사의 중요성을 충분히 인식하지 못하여 토지사용의 허가에 비협조적인 경우도 있어 중요한 자료를 획득하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 토지 실소유주가 해당 지역에 거주하지 않거나 토지주와 연락이 되지 않아 굴착조사가 지연되고 있는 경우도 있다. 특히, 신기의 퇴적층이 쉽게 쌓일 수 있는 저지대는 경작지인 경우가 많은데 농번기를 제외한 시기는 11월 ~ 2월로 한정되어 있어 더욱 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 국민을 대상으로 지진과 활성단층 조사의 중요성에 대한 교육 및 홍보를 실시할 필요가 있으며, 조사에 필요한 경우 개인토지의 사용협조를 받을 수 있도록 좀 더 구체적이고 제도적인 장치의 마련이 필요해 보인다.

4.2 장기적인 계획의 필요성

지질학을 교육시킬 수 있는 대학기관은 전국에 약 14개이며, 이중에 활성단층과 관련된 교육과 연구를 수행하는 전문가는 매우 소수이다. 판 경계부에 위치하는 나라와 달리 우리나라는 지진 활성도가 상대적으로 낮기 때문에 활성단층과 관련된 자료를 충분히 획득하기 어렵고, 현재까지의 연구경험과 연구결과 및 조직의 부족으로 더 많은 시간이 요구된

다. 그럼에도 불구하고 때로는 성급한 결과물을 요구하기도 하여, 연구결과물의 충실성을 확보하는 데 어려움이 있다.

4.3 고지진학의 불확실성에 대한 이해부족

지질환경은 통제되고 제한된 요소들만 관여하는 폐쇄계가 아닌 자연의 다양한 제어요소들이 상호작용하는 매우 복잡한 열린계이다. 조사 매체 또한 대기나 물과 같이 상대적으로 쉽게 제거할 수 있는 것이 아닌 암석과 토양이다. 또한 우리나라는 지진활동도가 높지 않고 침식은 빨라 지진활동의 결과가 명확히 지표에 남아있기 어렵다. 또한 야외조사에 기초한 지질학적 자료는 통계적이고 경험적인 부분들이 많기 때문에 여전히 많은 불확실성을 내포하고 있음에도 불구하고, 이에 대한 이해가 부족하여 자료의 신뢰도에 의문을 제기하거나 조사자체의 과학적 근거를 의심하는 경우가 있다. 따라서 과학으로서의 고지진학에 대한 이해뿐만 아니라 그 내포된 불확실성에 대한 이해가 요구된다.

4.4 조사의 한계

한반도는 판 경계에 위치한 일본이나 대만에 비해 변위를, 재발주기가 상대적으로 낮아 지표파열의 발생이 드물다. 활성단층에 대한 조사 및 추적을 하려면 먼저 지형변형 흔적인 선형구조가 선명하게 지표에 남아있어야 하지만, 양산-울산 단층계와 같이 중규모 이상의 단층대 일부분에서만 뚜렷한 선형구조가 남아있다. 노두 및 굴착 단면에서 여러 번의 지진사건이 인지되고, 절단된 지층의 연대측정이 가능하다면 국가지진위험지도(지진재해도)와 지진안정성 평가에 활용할 수 있는 단층지진원 정보를 제공할 수 있다. 그러나 선형구조의 추적과 야외조사를 통해 단층을 확인하더라도 실제로 굴착조사를 통해 활성단층을 발견할 확률은 매우 낮으며 활성단층이 발견된다 하더라도 단층지진원 정보를 모두 획득하지 못하는 경우가 많다.

굴착조사를 위해 우선 기존의 원격탐사자료(예, 항공사진, 위성사진 등)의 분석이 필요하지만 한반도 기후 특성상 대부분의 신기지형이 침식삭박에 의해 훼손되어 단층에 의한 지형적 변형을 찾고 해석하는 것이 쉽지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이번 사업에서는 건물과 식생 등 순수지형 해석

의 장애물을 제거하여 항공사진과 위성사진에서 인지하기 어려운 단층을 좀 더 쉽게 인지하도록 도와주는 고해상도의 LiDAR 영상기법을 도입하였다. 따라서 이번 조사에서는 LiDAR 분석을 통해 활성단층의 존재가능성이 있는 지역을 먼저 선정한 후 야외조사와 지구물리탐사를 진행하여 최종적으로 굴착조사 지점을 선정한다. 따라서 LiDAR 영상획득은 이 사업을 위해 매우 중요하고 기초적으로 획득되어야 하는 자료이지만 LiDAR 영상기법은 고비용의 문제 이외에도 식생으로 인하여 고해상도의 영상을 얻기 위해서는 초봄과 늦가을 등 매우 제한된 시기에만 촬영을 할 수 있는 문제가 있어 적절한 예산편성이 필요하다.

활성단층 조사에서 중요한 굴착지역 선정을 위해서는 LiDAR, 위성 및 항공사진 분석을 이용한 선형구조 분석, 지형학적 변형특성 분석, 정밀야외조사, 지구물리탐사 등 여러 연구방법이 선행되어야 한다. 또한 이러한 선행연구를 통해 활성단층이 지나가는 지역을 선정하였다 하더라도 신기 퇴적물이 발달하지 않는 지역에서의 굴착조사는 많은 정보를 제공할 수 없다(Kim *et al.*, 2011). 즉, 제4기 퇴적층을 절단하지 않고 기반암에 발달하는 활성단층의 경우 최후기 단층운동의 시기를 특정하기가 어려우며 다양한 지진변수를 얻기도 힘들다.

1단계 연구지역인 한반도 남동부는 부산, 울산, 대구 등 대도시가 위치하지만 상대적으로 뚜렷한 선형구조를 가지는 단층의 발달과 비도시화 지역이 대부분이다. 그러나 2단계 수도권 지역은 도시화가 한반도에서 가장 높은 지역이며, 도시지역에서는 대규모 단층의 발달을 뚜렷하게 인지하기 어렵다. 따라서 도시화가 진행된 지역의 활성단층 조사를 위해 더욱 고도화된 지구물리탐사 및 원격탐사 기법의 개발로 차별화된 연구방법을 적용할 필요가 있으며, 이를 위해 외국의 선진기술을 도입하고 1단계 기간 동안 축적된 경험과 조사방법을 더욱 발전시킬 필요가 있다.

4.5 해결과제

지형분석부, 구조분석부 그리고 연대분석부로 구성된 3개 연구팀에 사업연차별 할당된 연구지역은 20개 구역 내외(1개 구역은 200 km²에 해당)로 현재의 연구인력에 비해 상당히 넓은 조사지역이다. 원

격탐사를 통해 지형면 분류와 선형구조를 추출하여 조사지역을 최소화 하더라도 조사 구역이 반대하여 시간적 여유가 충분하지 않다. 또한 동시에 대국민공개를 위한 다양한 준비와 보고서 작성 등이 함께 이루어지고 있어 사업진행에 어려움이 있지만 관리기관과의 소통을 통해 다양한 해결방안을 찾고 있다.

활성단층을 조사하는 세계적인 추세는 고지진학적인 조사방법이지만 여러 최신 기법들이 계속적으로 개발되고 있어 일부는 국내에 아직 도입되지 못하고 있다. 그러한 예 중의 하나가 정밀변형을 감지하는 측지학인데, 특히 활성단층을 가로지르는 정밀 GPS 네트워크는 활성도가 높은 단층들에 시도해볼 가치가 있을 것이다. 현재 GPS 기술은 실생활에 널리 사용되고 있으며, 정밀도는 미약한 지각운동을 인지할 수 있을 만큼 뛰어나다. 우리나라에서도 일부 GPS를 이용한 지표변형의 특성을 감지하고 있지만 단층을 가로지른 보다 정밀한 관측망을 설치하여 국내의 활성단층 또는 추정활성단층 지역에 적용한다면 단층대를 따른 변위량과 단층들의 활동도를 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

국가활성단층지도제작 사업은 20년이 소요될 예정으로 대규모의 장기적인 사업이다. 세밀한 계획에 따라 사업이 진행되지만 사업의 특성을 반영하지 못하여 적절한 연구를 수행하는데 많은 장애가 있어 연구비 운영과 관리에 있어 특수성을 감안한 유연성이 요구된다. 비록 지진단층관련 국가과제를 통합적으로 운영하고 조정하기 위하여 지진단층관련 범부처공동사업단(단장 오금호)이 구성되어 많은 민감한 사안들을 적극적으로 조율하고 있어 큰 개선이 이루어지고 있지만, 사명감으로 임하고 있는 연구진의 사기를 저하시키거나 전문연구인력의 부족으로 적절한 평가위원이 선정되지 못하여 연구진의 노력이 인정받지 못하는 것은 매우 안타깝다.

5. 결 론

한반도는 큰 규모 지진의 발생이 빈발한 판의 경계보다는 가장자리에 위치하고 있지만 역사지진 기록에 있는 대규모 지진기록, 최근 울산해역지진, 경주지진 그리고 포항지진으로 인해 국가활성단층 지도제작의 필요성이 제기되었다. 대규모 지진의 대부분은 기존의 활성단층을 따라 발생하고 있기 때문에

지진재해를 최소화하기 위해서는 활성단층 조사가 무엇보다 중요하다. 이를 위해 2008년 지진재해대책법에 기초해 2009~2012년 사이에 소방방재청에서 '활성단층지도 및 지진위험지도 제작 R&D 사업'을 성공적으로 수행하였지만 국민에게 공개하는 것은 많은 이견이 있어 이루어지지 못하였다. 따라서 후속사업이 추진되고 있는 와중에 9.12 경주지진이 발생하여 국민들의 원전 안정성에 대한 우려가 높아졌으며, 범정부 차원의 적극적인 대책수립이 필요하게 되었다. 이에 2017년도에 '한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술 개발' 사업이 시작되었으며 현재 조사가 진행 중이다.

해당 사업의 추진전략은 다음과 같다; 1) 지점조사가 아닌 활성단층 선형화를 통한 활성단층지도 구축, 2) 지형분석부, 구조분석부, 연대측정부의 전문성을 바탕으로 한 체계적이고 유기적인 조사, 3) 활성단층 지도제작을 위해 '표준 철차 및 지침'을 작성하여 조사 및 평가방법을 표준화, 4) 연구지역에 발달하는 주단층을 따라 LiDAR 영상을 구축하는 자료의 고도와 등이다. 특히, 제4기 지형분석, 고지진 및 구조해석, 그리고 제4기 연대측정 전문가들의 협동연구로 업무의 분업화를 실현하고, 키포프 미팅, 자체평가회의, 국내 및 국외 전문가 자문을 통해 연구의 객관성 및 질적 향상을 위해 노력하고 있다.

따라서 사업을 계획적으로 추진하고 수행하려고 노력하고 있지만 국내 연구인력과 기술력의 부족뿐만 아니라 국민과 공무원의 활성단층에 대한 이해부족으로 많은 어려움을 겪고 있다. 특히, 활성단층 조사를 위해 매우 중요한 굴착조사를 위한 토지사용의 허가를 받는데 많은 어려움이 있다. 또한 급격한 도시화로 원지형이 많이 훼손되어 양질의 연구자료를 획득하는데 어려움이 있어 특히 다음 단계인 수도권 지역의 조사에는 새로운 기술의 도입이 요구된다. 이러한 예상하지 못했던 많은 문제점들을 해결하기 위해 관리기관과 다양한 해결방안을 모색하고 있으며, 국민들에게도 해당 사업의 중요성을 적극 홍보하여야 할 것이다. 이러한 과정에 의해 체계적으로 제작된 활성단층지도는 국민들에게 공개되었을 때 신뢰를 확보할 수 있을 뿐만 아니라 실질적인 지진재해의 대비에 활용될 수 있으며, 지진에 대한 과도한 두려움을 극복하는데에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의글

본 논문을 개선하도록 도움을 주신 익명의 심사위원님, 편집위원님, 그리고 편집위원장님께 감사드립니다. 본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발 사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-006)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Azad, S.S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M.-R., Zadeh, M.S. and Ritz, J.-F., 2011, The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506, 73-85.
- Barnhart, W.D., Hayes, G.P. and Gold, R.D., 2019, The July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence: Kinematics of Slip and Stressing in Cross-Fault Ruptures. *Geophysical Research Letters*, 46, 11859-11867.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, J.J., 1984, Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 2379-2411.
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Song, K.-Y., Kim, H.-C., Kim, Y.-H., Choi, P.-Y., Chwae, U.C., Han, J.-G., Ryoo, C.-R., Sun, C.-G., Jeon, M.S., Kim, G.-Y., Kim, Y.-B., Lee, H.-J., Shin, J.S., Lee, Y.-S. and Kee, W.-S., 2012, Active faults and seismic hazard map. NEMA, Seoul, 882 p.
- Headquarter of Earthquake Research Promotion (HERP), 2010, Report on methods of evaluating active fault. preliminary version (in Japanese).
- Holdsworth, R.E., Butler, C.A., Roberts, A.M., 1997, The recognition of reactivation during continental deformation. *Journal of the Geological Society*, 154, 73-78.
- Jin, K., Lee, M., Kim, Y.-S. and Choi, J.-H., 2011, Archaeoseismological studies on historical heritages sites in the Gyeongju area, SE Korea. *Quaternary International*, 242, 158-170.
- Kang, T.-S. and Yoo, H.J., 2018, Suggestion on Seismic Hazard Assessment of Nuclear Power Plant Sites in Korea. *Economic and Environmental Geology*, 51, 203-211 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Lee, S.-H. and Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: Temporary seismic network for monitoring aftershocks. *Geosciences Journal*, 20, 753-757.
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W., 2018, Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360, 1007-1009.
- Kim, K.-H., Seo, W., Han, J., Kwon, J., Kang, S.Y., Ree, J.-H., Kim, S. and Liu, K., 2020, The 2017 M_L 5.4 Pohang earthquake sequence, Korea, recorded by a dense seismic network. *Tectonophysics*, 774, 228306.
- Kim, Y., Rhie, J., Kang, T.-S., Kim, K.-H., Kim, M. and Lee, S.-J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. *Geosciences Journal*, 20, 747-752.
- Kim, Y.-S., Kim, T., Kyung, J.B., Cho, C.S., Choi, J.-H. and Choi, C.U., 2017, Preliminary study on rupture mechanism of the 9.12 Gyeongju Earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 407-422 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Jin, K., Choi, W.-H. and Kee, W.-S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent researches. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- Klinger, Y., 2010, Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B07306.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2012, Historical Earthquake Records in Korea (2~1904), Yale Jeongpan, Seoul, 142 p (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020, http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp?startTm=1960-01-01&endTm=2020-01-31&startSize=5.0&endSize=6&startLat=&endLat=&startLon=&endLon=&lat=&lon=&dist=&keyword=&x=40&y=6&schOption=T (January 31, 2020).
- Lee, K., 1998, Historical earthquake data of Korea. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 1, 3-22 (in Korean with English abstract)
- Lin, C.-W., Lu, S.T. and Chen, W.-S., 2012, Active Fault Map of Taiwan (1:500,000). Central Geological Survey, Ministry Of Economic Affairs (in English).
- Mann, P., 2007, Global Catalogue, Classification and Tectonic Origins of Restraining- and Releasing Bends on Active and Ancient Strike-Slip Fault Systems. *Geological Society London Special Publications*, 290, 13-142.
- McCalpin, J.P., 2009, Paleoseismology: 2nd ed. Academic Press, San Diego, 613 p.
- Mignan, A., Danciu, L. and Giardini, D., 2015, Reassessment of the Maximum Fault Rupture Length of Strike-Slip Earthquakes and Inference on M_{max} in the Anatolian

- Peninsula, Turkey. *Seismological Research Letters*, 86, 890-900.
- Ministry of Construction and Transportation, 1997, A Study on Seismic Design Code (II). The Earthquake Engineering Society of Korea (in Korean).
- Morino, M., Malik, J.N., Mishra, P., Bhuiyan, C. and Kaneco, F., 2008, Active fault traces along Bhuj Fault and Katrol Hill Fault, and trenching survey at Wandhay, Kachchh, Gujarat, India. *Journal of Earth System Science*, 117, 181-188.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126 (in Japanese with English abstract)
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J., 1984, Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples From the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 89, 5681-5698.
- Slemmons, D.B., 1982, Determination of design earthquake magnitude for microzonation. Third International Earthquake Microzonation Conference proceedings, U.S. National Science Foundation, Washington, DC, 1, 119-130.
- The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2020, https://gbank.gsj.jp/active-fault/index_e_gmap.html (January 31, 2020).
- U.S. Geological Survey, 2020, https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/faults?qt-science_support_page_related_con=4#qt-science_support_page_related_con (January 31, 2020).
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 794-1002.

Received : March 1, 2020

Revised : April 29, 2020

Accepted : April 30, 2020

Appendix 1. List and mapping legend for fault-related landforms.

Classification	Type	Code	Symbol	Way of display
Fault-related landforms	Linear valley	Lv		dot
	Fault scarp	Sfa		
	Fold scarp	Sfo		
	Triangular facet	Tf		
	Fault saddle	Fs		
	Kernbut	Kb		
	Bench	Bn		
	Pressure ridge	Pr		
	Shutter ridge	Sr		
	Sag (pond)	Sp		
	Offset stream	So		
	Deflected stream	Sd		
	Beheaded stream	Sbe		
	Wind (air) gap; In-valley divide	Ga		
	Water gap	Gw		

Appendix 2. Mapping legend for lineaments and Quaternary geomorphic surfaces.

Classification	Type	Code	Symbol	Way of display
Lineaments	First grade	Lm		Line
	Second grade			
Quaternary geomorphic surfaces	Floodplain	Qp		Plane
	Valley bottom alluvium/colluvium	Qa		
	Fluvial terrace	Qt1 Qt2, Qt3, ...		
	Coastal terrace	Qm1 Qm2, Qm3, ...		
	Alluvial fan	Qf1 Qf2, Qf3, ...		
	Delta	Qd		
	Beach	Qb		
	Coastal sand dune	Qs		

Appendix 3. Example of fault information database.

Survey location	Survey reference	Location information		Picture					
		Administrative district	GPS coordinate						
T_000000_GBgny	Kim <i>et al.</i> , 2018	Gyeongbuk Gyeongju 00-ri	N00°00'00.00" E000°00'00.00"						
Fault information									
Quaternary displacement									
Fault type	Strike	Dip	Slickenline	Displacement (m)		Age	Slip rate (mm/yr)	Last event age	
				Indicator	Horizontal				Vertical
RL+R	N00°E	00°SE	000°/00°	River terrace	-	2	00 ka	0.00	< 00 ka
Bedrock and age dating									
Age dating method	Bedrock		Quaternary geomorphic surface / Sediment			Fault gouge		Reference	
	Forming age		Age dating method	Deformation age		Event age			
	Sample number	Age		Sample number	Age	Sample number	Age		
Ar-Ar	Ar_1	00 Ma	¹⁴ C	C14_1	00 Cal yr BP	ESR	ESR-1	000 ka	
	Ar_2	00 Ma		OSL_1	00 ka		ESR-2	000 ka	
			OSL						

Appendix 4. Example of fault segmentation database.

Fault	Segment	Trend	Dip	Length (km)	Fault type	Group	Last event age (ka)	Event number	Total displacement (m)		Slip rate (mm /yr)	Survey number	Refer ence
									Horizo ntal	Vertical			
Yangsan	A	15°	70°	8.3	RL	II	125 - 150	2	-	20			
	B	160°	80°	15	RL	III	2.2 - 2.7	3	0.15	-			
	C	340°	80°	12	RL+R	II	15 - 21	2					
	D	xxx°	xx°	X	RL+R	IV	XX - XX	1					