중국 원촨단층 과학시추 프로젝트 소개

박도현^{1*}

¹한국지질자원연구원 심지층연구센터 책임연구원

Overview of the Wenchuan Fault Scientific Drilling Project in China

Dohyun Park^{1*}

¹Principal Researcher, Deep Subsurface Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 3 July 2020 Final version Received 13 August 2020 Accepted 25 August 2020

Abstract : After the Wenchuan Ms 8.0 earthquake in May 2008, the Wenchuan Fault Scientific Drilling (WFSD) project was conducted in the Longmenshan fault zone, which is located in the eastern margin of the Tibetan Plateau. Six boreholes were drilled along the co-seismic surface ruptures of the Yingxiu-Beichuan and Guanxian-Anxian faults, which are the main faults in the Longmenshan fault zone. The WFSD project aimed to understand the mineral composition, geological structure, and tectonic settings of the fault zone at deep depths, and the rupture processes of the seismogenic faults during the Wenchuan earthquake. To achieve these aims, the WFSD project observed and analyzed the physical and chemical behaviors of the faults and their energy states. This paper introduces the research activities to explore the key scientific problems arising from the Wenchuan earthquake and important research results from the scientific drilling.

Key words : Wenchuan fault scientific drilling, Wenchuan earthquake, Longmenshan fault zone, Earthquake mechanism

요 약 : 2008년 5월 규모 8.0의 원촨지진이 발생한 이후 티베트 고원 동쪽 끝에 위치하는 룽먼산 단층대를 대상으로 원촨단층 과학시추 프로젝트가 수행되었다. 룽먼산 단층대의 주단층들인 잉슈-베이촨 단층과 관시옌-안시옌 단층의 지표파열대를 따라 총 6개의 시추공이 굴착되었고, 깊은 심도에서 단층대의 광물조성, 지질구조, 지체구조 파악 및 원촨지진이 발생하는 동안 지표파열 과정의 규명을 목적으로 프로젝트가 수행되었다. 이를 위해 단층들의 물리화학적 거동 및 에너지 상태에 대한 다양한 관측과 분석이 수행되었다. 본 고에서는 원촨지진에서 제기된 주요 과학적 문제들과 이를 해결하기 위해 원촨단층 과학시추 프로젝트에서 수행한 연구내용, 과학시추로부터 얻은 중요 연구성과들을 소개하였다.

주요어 : 원촨단층 과학시추, 원촨지진, 룽먼산 단층대, 지진 메커니즘

서 론

일반적으로 단층대 지역을 대상으로 한 과학시추에서 다루는 주요 문제들에는 단층미끄럼의 변형 메커니즘, 단층미끄럼이 지진을 발생시키거나 그렇지 않은 이유, 지진이 발생하는 과정, 지표파열이 발생하고 멈추는 과정, 지진발생과 단층미끄럼의 시작을 나타내는 단층대 주변의 전조현상 존재 여부, 전조현상이 존재한다면 시추공 관측으로부터 지진발생을 예측하거나 조기경보가 가능한지 여부, 지하의 유체함량과 유체압력이 단층작용에 미치는 영향, 지진 사이클 동안 단층대의 투수성 변화, 지진발생이나 단층미끄럼 동안 단층대 내부와 주변의 응력상태, 단층작용 시

분산변형(distributed deformation)과 집중변형(localized deformation)을 제어하는 요인 등이 있다(Harms and Tobin, 2011). 이러한 과학적 문제들을 해결하기 위한 과학시추 프로젝트에는 대표적으로 미국의 샌아드레아스 단층 심부관측(San Andreas fault observatory at depth), 대만 첼룽푸 단층 시추 프로젝트(Taiwan Chelungpu fault drilling project), 중국의 원촨단층 과학시추(Wenchuan fault scientific drilling, 이하 'WFSD'이라고 함) 프로젝트, 일본의 노지마 단층 시추(Nojima fault drilling), 난카이 해구 지진대 실험(Nankai trough seismogenic zone experiment) 등이 있다. Fig. 1은 육상의 단층대를 대상으로 한 과학시추 프로젝트들을 나타낸다.

*Corresponding Author, Dohyun Park, parkdo@kigam.re.kr, Deep Subsurface Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

Fig. 1. Locations of continental fault-zone drilling projects (Horsfield *et al.*, 2014).

2008년 5월 12일 중국 남서쪽 원촨 지역의 룡먼산(Longmenshan) 단층대에서 규모 Ms(surface-wave magnitude) 8.0의 지진이 발생하였다. 이 지진은 쓰촨지진(Sichuan earthquake) 또는 원촨지진(Wenchuan earthquake)이라고 불리며(이하 ‘원촨지진’이라고 함), 룡먼산에 위치하는 티베트고원과 쓰촨분지 사이에서 발생하였다. 이 지진은 룡먼산 단층대 주변에서 연장 80 km와 270 km인 2개의 대규모 지표파열을 발생시켰다(Li *et al.*, 2013). 지진발생 6개월 후 원촨지진에서 제기된 주요 과학적 문제들을 규명하기 위한 목적으로 과학시추 프로그램인 WFSO 프로젝트가 시작되었다. WFSO 프로젝트는 중국본토의 활성단층대에서 수행된 최초의 과학연구용 프로그램이었으며 세계적으로도 지진발생 후 가장 단시간에 착수된 사업으로 알려져 있다. WFSO 프로젝트는 지진이 발생한 응력환경, 대규모 지표파열이 발생한 원인 및 과정, 지하 유체가 지진발생에 미친 영향, 원촨지진 이후 여진의 강도와 지속시간, 원촨지진의 진앙지 위치 등을 규명하기 위해 수행되었고, 궁극적으로 원촨지진이 발생한 룡먼산 단층대의 지진발생 메커니즘과 현지암반의 물리화학적 특성을 파악하여 향후 지진예측과 조기경보 기술의 향상을 프로젝트 목표로 하였다. 본고에서는 원촨지진으로부터 제기된 과학적 문제와 이를 해결하기 위해 WFSO 프로젝트에서 수행된 연구내용 및 과학시추로부터 얻은 주요 연구성과들을 소개하였다.

WFSO 프로젝트 개요

프로젝트 목표

원촨지진은 2008년 5월 12일 오후 2시 28분에 중국 남서

쪽 원촨 지역의 룡먼산 단층대에서 발생한 규모 Ms 8.0의 지진으로서, 진원깊이는 16~18 km, 진앙위치는 31.084°N, 103.267°E이었다(Fig. 2). 원촨지진은 룡먼산에 위치하는 티베트고원과 쓰촨분지 사이의 전이대에서 발생하였으며(Fig. 3), 룡먼산 단층대의 주단층인 잉슈-베이촨(Yingxiu-Beichuan) 단층과 관시엔-안시엔(Guanxian-Anxian) 단층을 따라 각각 연장 270 km와 80 km인 큰 지표파열이 발생하였다. WFSO 프로젝트는 원촨지진 발생 후 약 6개월이 지난 2008년 11월 7일 착수되었다. 중국정부의 재정지원을 받은 이 프로젝트는 원촨지진으로부터 제기된 다음과 같은 과학적 문제들을 규명하기 위해 수행되었다.

- 어떤 종류의 응력환경에서 지진이 발생하였나?
- 어떻게 큰 규모의 지표파열들이 발생하였나?
- 지하 유체가 지진발생에 미친 영향은 무엇인가?
- 원촨지진 이후 여진의 강도와 지속시간은 어떻게 될 것인가?
- 왜 원촨지진의 진앙지는 양쯔지괴(Yangtze Craton)에 위치하는가?

WFSO 프로젝트는 원촨지진이 발생한 룡먼산 단층대 주변의 과학시추와 이를 이용한 다양한 관측 및 분석을 통해 위의 문제들에 대한 답을 찾고자 하였으며, 최종적으로 지진발생 메커니즘과 현지암반의 물리화학적 특성을 파악하여 지진예측과 조기경보 능력의 향상을 사업목표로 하였다. 세부 목표로는 시추조사로부터 획득된 코어샘플, 암편, 유체샘플에 대한 관측 및 시험을 통해 룡먼산 단층대의 심부 광물조성, 지질구조, 지각특성을 파악하고자 하였다. 또한 원촨지진이 발생하는 동안 암석의 물리화학적 물성(단층 마찰계수, 공극압력, 투수성, 지진속도, 화학조성), 단층

Fig. 2. Map of the Longmenshan fault zone, showing the rupture areas of the 2008 Wenchuan earthquake (Long *et al.*, 2015).

Fig. 3. Transition zone between the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin (UC Berkeley, 2019).

대의 변형에너지 상태, 지표파열 과정을 재구성하고, 지진 발생과 지표파열을 발생시킨 응력환경, 지하 유체가 지진 운동 메커니즘에 미친 영향 등을 분석하고자 하였으며, 단층 시추공에 계측기를 설치하여 장기적인 지진관측소를 구축하고자 하였다(Xu and Li, 2019).

대상단층 및 지질조건

WFSD 프로젝트에서는 티베트고원 동쪽 경계와 쓰촨분지 사이의 룽먼산 단층대에 분포하는 두 개의 주단층인 잉슈-베이촨 단층과 관시엔-안시엔 단층을 대상으로 하였다. 원환지진이 발생한 룽먼산 단층대에는 원환-마오시엔

(Wenchuan-Maoxian) 단층, 잉슈-베이촨 단층, 관시엔-안시엔 단층으로 구성되어 있으며(Fig. 4), 단층의 미끌림속도는 제4기 후기(late Quaternary period)에 2-3 mm/year인 것으로 보고되었다(Xu *et al.*, 2005). 원환지진은 잉슈-베이촨 단층과 관시엔-안시엔 단층을 파열시켰다. Duan *et al.*(2017)에 따르면 지표파열이 가장 크게 일어난 잉슈-베이촨 단층 주변의 지질조건은 다음과 같다(Fig. 5). 잉슈-베이촨 단층의 남쪽부분은 Proterozoic Pengguan 복합체(complex)와 Triassic Xujiahe 층(formation), 즉 탄산염암(carbonate rock), 쇄설성 퇴적암(clastic sedimentary rock), 화산암이 분포하고, 잉슈-베이촨 단층의 중앙부분의 모암

Fig. 4. Locations of the main faults in the Longmenshan fault zone and the six boreholes (Xu and Li, 2019).

은 고생대 석회석(Paleozoic limestone)과 백운석, 두꺼운 층의 트라이아스기 석회석과 셰일성 퇴적암으로 구성되어 있다. 잉슈-베이촨 단층의 북쪽부분은 백운암질 석회석(dolomitic limestone), 사암, 탄소질 셰일(carbonaceous shale)로 구성된 고생대 지층들로 구성되어 있다.

프로젝트 참여기관

중국의 과학기술부(Ministry of Science and Technology), 국토자원부(Ministry of Land and Resources), 중국지진청(China Earthquake Administration)이 공동 주관하여 WFS 프로젝트 수행하였다(Xu and Li, 2019). 중국 내에서는 중국지질과학원(Chinese Academy of Geological Sciences), 중국과학원(Chinese Academy of Sciences), 북경대학교(Peking University), 중국지질대학교(China University of Geosciences) 등 총 54개 기관이 프로젝트에 참여하였고, 국제적으로는 캘리포니아 대학 산타크루즈(University of California, Santa Cruz), 서던 일리노이 대학(Southern Illinois University), GFZ 독일지구과학연구센터(GFZ German Research Center for Geosciences), 교토대학교 방재연구소(Kyoto University Disaster Prevention Research Institute) 등 총 15개 기관이 참여하였다.

WFS 프로젝트의 수행내용 및 주요 연구성과

수행내용

Xu et al.(2017)에 따르면 WFS 프로젝트에서는 원천 지진으로 인해 단층미끌림이 발생한 룽먼산 단층대의 잉슈

Fig. 5. Geological background of the Longmenshan fault zone (Duan et al., 2017).

Fig. 6. Scientific drilling sites of the WFS project along the Longmenshan fault zone (Xu et al., 2017).

베이촨, 관시엔-안시엔 단층들을 따라 총 6개의 시추공(시추공 이름: WFS1~4, WFS3P, WFS4S)을 설치하였고(Fig. 6), 이들 시추공을 이용하여 지질학적, 화학적, 수

Fig. 7. Well casing and drilling information of WFSD-2 and WFSD-3 (Fang *et al.*, 2018).

리학적 관측을 수행하였다. Fig. 7은 시추공 WFSD-2와 WFSD-3의 케이싱과 시추 정보를 나타낸다. 6개 시추공의 총 굴착 깊이는 9 km 이었고, 룡먼산 지진 파열대의 상반에 설치되었다. 참고로 프로젝트 초기에는 총 5개 시추공이 계획되었으나 최종적으로 WFSD-4S가 추가되었다. 장기 운영을 위한 지진관측소가 설치되었고, 지진 계측, 예측, 경보를 위해 시추공 내부에 지진탐지장비들이 설치되었다. 심하게 파쇄되고 단층점토가 두껍게 분포하는 룡먼산 단층대의 특성을 고려하여 시추기술을 선정하였고, 시추 굴착 및 코어링 효율을 개선하기 위한 기술을 개발하여 적용하였다.

WFSD 프로젝트에서 계획한 세부적인 목표는 다음과 같다.

- 룡먼산 단층대의 유체, 응력, 투수성, 탄성과 속도에 대한 특성 파악
- 단층들의 암석종류(lithology), 지질구조, 물리화학적 물성, 단층대의 지중온도 및 마찰 특성, 유체, 지응력에 대한 조건 파악
- 단층대의 미끄럼속도, 활동 거리(sliding distance)와 단층면 마찰 사이의 관계 규명
- 원판지진이 유발한 지표파열의 생성 과정에 대한 재구성
- 단층대의 지진에너지 상태 및 지진발생 후 회복 주기(healing period), 단층대의 물리화학적 거동이 지진발생에 미치는 영향에 대한 규명

위의 프로젝트 목표를 달성하기 위한 주요 연구수행내용은 7가지로 분류되며, 1) 룡먼산 단층대의 지질구조와 물성

규명, 2) 원판지진의 메커니즘 탐색, 3) 룡먼산 단층대의 열이력(thermal history) 추적, 4) 설치된 시추공 주변에서 미소지진 관측 및 여진 연구, 인공 지진원 생성을 통한 룡먼산 단층대의 탄성과 주시(travel time)에 대한 상시 모니터링, 5) 원판지진 이전과 이후의 유체지화학에 대한 장기 관측 및 지진 후 영향 분석, 6) 원판지진의 지체구조와 심부 지질구조의 재구성, 7) 시추공 내 지진계와 통합 지구물리 탐지장치를 이용한 심부 지진활동 및 지진 후 응력감쇠 측정을 포함한 시추공 장기 관측이었다.

주요 연구성과

WFSD 프로젝트 수행기관이 보고한 주요 사업성과는 6가지로서 1) 원판지진이 발생한 단층대 지역에 과학연구용 시추공의 설치, 2) 원판지진이 발생한 단층대의 지질구조 및 변형 특성 파악, 3) 원판지진의 단층미끄럼 메커니즘과 지진발생 후 회복 과정의 규명, 4) WFSD-1 시추공에서 지진발생에 따른 실시간 이수 가스(mud gas) 반응 측정, 5) 원판지진의 여진 기록 및 여진의 정확한 위치 분석, 6) 동티베트의 지각구조 재구성이었으며 주요 내용은 다음과 같다.

과학연구용 시추공 설치

룡먼산 단층대 주변에 총 6개의 시추공을 설치하였고 총 시추깊이는 약 9 km이었다. 시추공 WFSD-1, WFSD-2, WFSD-3, WFSD-3P, WFSD-4, WFSD-4S의 시추깊이는 각각 1,201 m, 2,284 m, 1,502 m, 552 m, 2,339 m, 1,204 m 이었다(Xu and Li, 2019). 시추공으로부터 측정 및 분석된 항목은 성인에 따른 암석종류 및 암석층서, 단층암석 분포, 단층대 심도 및 두께, 물리검층, 시추코어의 균열밀도, 균열의 극점투영이었다. 물리검층 항목은 공경, 자연감마선, 밀도, 공극률, P파 속도, 전기비저항, 대자율이었다. Fig. 8은 시추공 WFSD-1, WFSD-3, WFSD-3P 위치의 지질단면도를 나타낸다. Xu and Li(2019)에 따르면 대표적으로 WFSD-1 물리검층 결과, 잉슈베이완 단층 주변은 Pengguan 복합체와 Xujiahe 층으로 구성되어 있는데(Fig. 8a), Pengguan 복합체의 P파 속도와 자연감마선이 Xujiahe 층보다 낮고, 반대로 전기비저항, 밀도, 공극률은 Xujiahe 층보다 높은 것으로 분석되어 대비되는 결과를 보였다. 시추공 WFSD-3, WFSD-3P에 대해서는 관시엔-안시엔 단층 주변은 낮은 전기비저항 및 탄성과 속도, 높은 자연감마선을 보이고, 단층점토는 낮은 대자율 특성을 보이는 것으로 분석되었다. Table 1은 시추공 WFSD-4에서 수행된 물리검층 현황과 사용된 장비를 나타낸다.

단층대 지질구조 및 변형 특성 파악

Li *et al.*(2013)에 따르면 시추조사로부터 룡먼산 단층대

Fig. 8. Geological cross-sections of the boreholes (a) WFSD-1 (Kuo *et al.*, 2018) and (b) WFSD-3 and WFSD-3P (Xu and Li, 2019).

Table 1. Logging implemented in WFSD-4 (Konaté *et al.*, 2017)

Date	Depth (m)	Logging tool	Instrument model
2012.08.31.- 2012.09.01	2.77-513.02	Gamma ray, spontaneous potential, caliper, dual laterolog, microspherical focused resistivity, compensated neutron, litho-density, natural gamma ray spectrometry, Orthogonal multipole array acoustic, inclination, azimuth deviation, wellbore fluid resistivity, well temperature Electrical imaging, acoustic imaging	ECLIPS 5700 EXCELL-2000
2012.10.24.- 2012.10.30	501.73-1300.84	Gamma ray, spontaneous potential, caliper, dual laterolog, microspherical focused resistivity, compensated neutron, litho-density, natural gamma ray spectrometry, Orthogonal multipole array acoustic, inclination, azimuth deviation, wellbore fluid resistivity, well temperature Electrical imaging, acoustic imaging	ECLIPS 5700 EXCELL-2000
2012.11.10.- 2012.11.11	1300.84-1444.55	Gamma ray, spontaneous potential, caliper, dual laterolog, microspherical focused resistivity, compensated neutron, litho-density, natural gamma ray spectrometry, Orthogonal multipole array acoustic, inclination, azimuth deviation, wellbore fluid resistivity, well temperature Electrical imaging, acoustic imaging	ECLIPS 5700 EXCELL-2000
2013.01.04.- 2013.01.06	1400-1980	Gamma ray, spontaneous potential, caliper, dual laterolog, compensated neutron, litho-density, natural gamma ray spectrometry, digital acoustic, inclination, azimuth deviation, wellbore fluid resistivity, well temperature Electrical imaging	ECLIPS 5700 EXCELL-2000
2013.05.07.- 2013.05.09	1972.3-2273	Gamma ray, spontaneous potential, caliper, dual laterolog, compensated neutron, litho-density, natural gamma ray spectrometry, digital acoustic, inclination, azimuth deviation, wellbore fluid resistivity, well temperature Electrical imaging, acoustic imaging	ECLIPS 5700 EXCELL-2000
2013.08.30	-	Burst loose	-
2013.10.02.- 2013.10.04	1850-2140	Burst loose, cement bond logging	ECLIPS 5700
2014.02.08.- 2014.02.09	1950-2295	Perforation, gyro logging	GYRO-50

Fig. 9. Temperature anomalies and a core with fault gouge for WFSD-1 (Togo *et al.*, 2016).

의 지질구조를 분석하였는데, 대표적으로 시추공 WFSD-1로부터 잉슈-베이촨 단층의 심도는 585-598 m, 단층 폭은 지표노두에서는 190 m, 시추코어에서는 105 m, 경사는 68-73°인 것으로 확인되었다. 잉슈-베이촨 단층을 구성하는 암석은 파쇄암, 단층각력암, 단층점토이었다. 잉슈-베이촨 단층 점토에 대한 현미경 관찰을 통해 단층의 전단변형 방향을 확인하였고, 원촨지진의 주미끄럼대(principal slip zone)는 낮은 마찰계수, 높은 대자율 특성, 비이상적인 지중온도 분포를 보인 심도 590 m의 단층면인 것으로 분석되었다. 단층점토에서 높은 대자율을 보이는 것은 단층미끄럼 동안 마찰에 의해 유발된 지중온도 증가와 이로 인한 자성광물(magnetic mineral)의 증가에 기인한 것으로 분석하였다. 이러한 결과는 지진에 의해 발생한 단층미끄럼은 지중온도를 증가시킬 수 있고, 이는 단층면 주변 지반의 물리·화학적 변화를 야기할 수 있음을 나타낸다. Fig. 9는 시추공 WFSD-1에서 파악된 지중온도 분포와 단층점토를 함유한 코어를 나타낸다.

단층미끄럼 메커니즘과 단층회복 과정의 규명

WFSD 프로젝트의 단층미끄럼 메커니즘과 단층회복 과

정의 규명과 관련하여 4가지 연구성과가 있었다. 첫 번째로 단층미끄럼과 마찰특성의 저감 메커니즘으로 공극유체의 열적 가압(thermal pressurization)을 입증하는 증거를 발견하였다. 시추공 WFSD-1로부터 회수된 시추코어에 대한 SEM(scanning electron microscopy), TEM(transmission electron microscopy), XRD(X-ray diffraction) 분석으로부터 단층 미끄럼대에서 흑연이 발견되었다. 이는 지진발생 동안 단층미끄럼의 주요 원인이 공극 유체의 열적 가압이고 단층의 강도(마찰계수)가 매우 낮았음을 의미하는 것으로 분석되었다(Kuo *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015a, 2015b). 여기서 공극 유체의 열적 가압은 단층미끄럼 시 발생하는 마찰열에 의해 단층 주변의 온도가 증가하고 이로 인해 공극 내 유체의 팽창과 주변 암석의 구속에 의해 공극 유체의 압력이 증가하는 것을 의미한다. 단층 미끄럼대에서 흑연의 농집도(enrichment)는 미끄럼에 의한 마찰열 발생 여부와 큰 규모 지진의 발생 가능성을 정량화하는 데 활용될 수 있는 것으로 검토되었다. 두 번째 성과는 원촨지진이 발생한 단층대의 매우 낮은 단층 마찰계수의 확인이었다. 원촨지진 동안 발생한 마찰열($< 29 \text{ MJ/m}^2$)과 WFSD-1의 장기적 온도측정 결과를 이용하여 원촨지진 발생 당시

Fig. 10. Hydrogeologic properties of the well-aquifer system in WFSD-1 (Xue *et al.*, 2013).

단층의 유효마찰계수가 0.02 이하로 분석되었다(Li *et al.*, 2015). 이 마찰계수 값은 자연단층에서 획득된 마찰계수 중 가장 작은 값인 0.1(Di Toro *et al.*, 2011)보다 더 작은 값으로서, 원환지진 시 단층들이 빠르게 마찰력이 감소하는 미끌림약화(slip weakening)를 경험했음을 의미한다. 세 번째 성과는 원환지진 발생 후 빠른 단층회복 특성의 발견이었다. 시추공 WFSD-1에서 장기적 지하수위 계측을 통해 잉슈-베이촨 단층의 투수성이 빠르게 감소함을 확인하였고(Fig. 10), 이는 원환지진 발생 이후 단층단합(fault sealing), 즉 지진 후 빠른 회복이 일어나고 있음을 의미한다(Xue *et al.*, 2013). Fig. 10의 검은색 점들은 2차원 등방 균질인 대수층 흐름방정식을 토대로 비구속 역산(unconstrained inversion)에 의해 계산된 자료, 붉은색 점들은 저류계수를 고려한 역산으로부터 얻은 자료를 나타내고, 수직 점선은 투수성이 급격히 변하는 시기를 구분하는 선, 회색 점선은 분할구역 자료들에 대한 회귀분석 최적선이다. 이러한 단층대의 지진 후 회복 과정은 지진 메커니즘과 지진 사이클을 분석하는 데 활용 가능한 것으로 보고되었다. 네 번째 성과는 룽먼산 단층대의 관시엔-안시엔 단층에 대한 크립 특성을 파악한 것이었다. 시추공 WFSD-3P로부터 회수된 단층암석과 관시엔-안시엔 단층에서 발생한 지표파열대의 암석에 대한 상세 구조분석과 XRD 분석으로부터 단층암석이 압력용해구조(pressure solution structure)를 주로 보이고 점토광물이 풍부한 것으로 조사되었는데, 이는 관시

엔-안시엔 단층이 장기적인 크립 거동을 하고 있음을 의미한다(He *et al.*, 2018). 또한, 시추공에 대한 P와 속도 물리 검층으로부터 관시엔-안시엔 단층이 천부심도에서는 크립 거동을 보이고 깊은 심도에서는 변형이 없는 고정 상태인 것으로 분석되었는데, 이 결과는 원환지진 시 지표파열 메커니즘을 설명할 수 있는 자료로 활용 가능한 것으로 검토되었다.

여진에 대한 실시간 이수 가스 반응 측정

시추공 WFSD-1에서 실시간으로 룽먼산 단층대에서 발생한 소규모에서 중규모의 3,918회 여진에 대한 시추 이수 가스의 반응을 조사하였고, 고려된 이수 가스의 종류는 Ar, CH₄, He, ²²²Rn, CO₂, H₂, N₂, O₂이었다(Gong *et al.*, 2017). 각 지진발생 전과 후로 2시간 동안 이수 가스 반응과 농도를 측정하였고, 이수 가스가 지층에 미치는 영향을 파악하기 위해 탄성과 속도의 진폭, 에너지 밀도, 정적 변형률을 계산하였으며, 분석결과는 지진으로 인한 지층의 수리적 변화를 파악하는 데 활용하였다. Fig. 11은 시추공 WFSD-1에서 측정된 이수 가스 반응과 지진기록을 나타낸다.

여진 기록 및 발생위치 결정

Xu and Li(2019)에 따르면 원환지진의 여진과 심부 지각 구조 사이의 관계를 파악하기 위해 원환지진의 여진에 대한 상세한 위치 분석이 수행되었다. 신뢰도 높게 지진파도

Fig. 11. Real-time drilling mud gas and earthquakes response measured in WFSD-1 (Gong *et al.*, 2017).

달시간을 획득하기 위해 파형 상호상관(waveform cross-correlation) 기술을 적용하였고, 여진 위치결정의 정확도를 향상시키기 위해 이중차분측위(double difference positioning) 기술이 적용된 것으로 보고되었다. 2008년 5월 12일부터 2012년 5월 12일까지 4년에 걸쳐 지진계측이 수행되었으며 총 80,995회의 여진이 기록되었다. 지진 규모(M)별로 M

6.0~7.0의 5회 여진, M 5.0~6.0의 70회 여진, M 4.0~5.0의 690회 여진, M 3.0~4.0의 4,576회 여진, M 2.0~3.0의 22,587회 여진이 발생하였고, 진원 깊이는 10~20 km로 분석되었다. Fig. 12는 2008년 5월부터 2012년 5월까지 측정된 원촨지진의 여진 기록을 나타낸다.

Fig. 12. Wenchuan earthquake aftershocks record from May 2008 to May 2012 (Xu and Li, 2019).

Fig. 13. Two models of the Longmenshan uplift that, were proposed in previous studies (Burchfiel *et al.*, 2008).

동티베트 지체구조의 재구성

룽먼산은 티베트고원의 동쪽 가장자리에 위치하고 룽먼산 서쪽의 Songpan-Garze 조산대와 동쪽의 쓰촨분지를 연결한다. 기존 연구들로부터 룽먼산의 용기를 설명하는 2개의 해석모델이 제시되었는데(Fig. 13), WFSD 프로젝트를 통해 지각구조를 재구성하였다. WFSD 프로젝트에서 수행된 룽먼산 단층대의 지표파열 지역에 대한 지질조사, 시추공 자료, 심부 반사법 탄성과 탐사자료를 조합하여 룽먼산의 지각구조를 재구성하고 새로운 조산모델을 제시하였다(Fig. 14).

맺음말

WFSD 프로젝트는 중국의 활성단층대에서 수행된 과학 연구용 시추 프로젝트로서 작업여건이 좋지 않은 강한 여진들이 발생하는 급경사의 산악지역과 심하게 파쇄된 원환 지진 단층대에서 시추, 코어채취, 물리검층을 포함한 다양한 관측과 연구가 수행되었다. WFSD 프로젝트를 통해 얻은 중요 성과들은 원환지진이 발생한 단층대의 구조 파악, 원환지진 시 단층약화의 주요 메커니즘이 열적 가압임을 규명, 세계적으로도 가장 낮은 단층 마찰계수 확인 및 강진 발생 이후 빠른 단층회복 특성의 관측, 원환지진 단층대의

Fig. 14. Schematic of the structural framework of the Longmenshan fault zone (Xu and Li, 2019).

지체구조 재구성 및 관련되는 새로운 조산모델의 제시, 원촨지진 이후의 여진 발생위치 분석과 시추공 주변의 지진 관측을 통해 지진활동과 단층대의 공간적 관계의 수립, 대규모 지진의 형성과정을 규명하기 위한 기초자료로서 심부 단층대에서 지진활동과 지하 유체특성과의 관계의 발견이었다. 특히, 단층대에 분포하는 흑연이 대규모 지진의 발생 가능성을 평가하는 데 활용가능함을 확인하고, 매우 낮은 수준의 단층 마찰계수 확인 및 지진 후 빠른 회복 특성이 최초로 관측된 것은 중대한 과학적 발견 및 성과인 것으로 보고되었다.

최근들어 국내에서도 지진이 빈번히 발생하고 있는 상황으로 지진 발생빈도가 높거나 큰 규모의 지진이 예상되는 지역을 대상으로 단층 과학시추 프로젝트를 추진할 필요가 있다. 단층 과학시추는 시추공에 기반한 관측 및 실험, 단층대 분포물질에 대한 분석, 장기 계측 등을 통해 지진발생 메커니즘에 대한 중요한 기초자료를 제공할 수 있다. 따라서 국내에서도 단층 과학시추 프로젝트를 수행하여 지진발생 메커니즘과 지진의 전조현상 등을 분석하고 이를 토대로 국내 여진에 적합한 지진예측과 조기경보 기술을 확보할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘한반도 동남권 지진 단층 활동 평가를 위한 심부 복합지구물리 모니터링 시스템 구축(과제코드 GP2018-009)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Burchfiel, B.C., Royden, L.H., van der Hilst, R.D., Chen, Z., King, R.W., Li, C., Lü, J., Yao, H., and Kirby, E., 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18, p.4-11.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M., and Shimamoto, T., 2011. Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, 471, p.494-500.
- Duan, Q., Yang, X., and Chen, J., 2017. Hydraulic properties of a low permeable rupture zone on the Yingxiu-Beichuan

- Fault activated during the Wenchuan earthquake, China: Implications for fluid conduction, fault sealing, and dynamic weakening mechanisms. *Tectonophysics*, 721, p.123-142.
- Fang, Z., Liu, Y., Yang, D., Guo, L., and Zhang, L., 2018. Real-time hydrogen mud logging during the Wenchuan earthquake fault scientific drilling project (WFSD), holes 2 and 3 in SW China. *Geosciences Journal*, 22(3), p.453-464.
- Gong, Z., Li, H.B., Tang, L.J., Lao, C., Zhang, L., and Li, L., 2017. Real time drilling mud gas response to small-moderate earthquakes in Wenchuan earthquake Scientific Drilling Hole-1 in SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, p.416-426.
- Harms, U. and Tobin, H.J., 2011. Deep scientific drilling. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Springer, Dordrecht, p.91-103.
- He, X., Li, H., Wang, H., Zhang, L., Xu, Z.Q., and Si, J.L., 2018. Creeping along the Guanxian-Anxian fault of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake in the Longmen Shan, China. *Tectonics*, 37, p.2124-2141.
- Horsfield, B., Knebel, C., Ludden, J., and Hyndman, R., 2014. *Unravelling the workings of planet earth science plan for 2014-2019*, International Continental Scientific Drilling Program, Potsdam, Germany, 29p.
- Konaté, A.A., Pan, H., Ma, H., Qin, Z., and Traoré, A., 2017. Integrated core-log interpretation of Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project borehole 4 (WFSD-4). *Acta Geophysica*, 65, p.683-700.
- Kuo, L.W., Huang, J.R., Fang, J.N., Si, J., Li, H., and Song, S.R., 2018. Carbonaceous Materials in the Fault Zone of the Longmenshan Fault Belt: 1. Signatures within the Deep Wenchuan Earthquake Fault Zone and Their Implications. *Minerals*, 8, p.1-13.
- Kuo, L.W., Li, H., Smith, S.A.F., Toro, G.D., Suppe, J., Song, S.R., Nielsen, S., Sheu, H.S., and Si, J., 2014. Gouge graphitization and dynamic fault weakening during the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake. *Geology*, 42, p.47-50.
- Li, H., Wang, H., Xu, Z., Si, J., Pei, J., Li, T., Huang, Y., Song, S.R., Kuo, L.W., Sun, Z., Chevalier, M.L., and Liu, D., 2013. Characteristics of the fault-related rocks, fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, 584, p.23-42.
- Li, H., Xue, L., Brodsky, E.E., Mori, J.J., Fulton, P.M., Wang, H., Kano, Y., Yun, K., Harris, R.N., Gong, Z., Li, C., Si, J., Sun, Z., Pei, J., Zheng, Y., and Xu, Z., 2015. Long-term temperature records following the Mw 7.9 Wenchuan (China) earthquake are consistent with low friction. *Geology*, 43, p.163-166.
- Long, F., Wen, X.Z., Ruan, X., Zhao, M., and Yi, G.X., 2015. A more accurate relocation of the 2013 Ms7.0 Lushan, Sichuan, China, earthquake sequence, and the seismogenic structure analysis. *Journal of Seismology*, 19, p.653-665.
- Togo, T., Yao, L., Ma, S., and Shimamoto, T., 2016. High-velocity frictional strength of Longmenshan fault gouge and its comparison with an estimate of friction from the temperature anomaly in WFSD-1 drill hole. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, p.5328-5348.
- UC Berkeley, 2019. Today in Earthquake History: Sichuan 2008, 2020.06.24., seismo.berkeley.edu/blog/2009/05/12/today-in-earthquake-history-sichuan-2008.
- Wang, H., Bing, L.H., Liang, S.J., Sun, Z.M., Fu, X.F., Liu, D.L., Pei, J.L., Li, C.L., Zhang, J.J., Song, S.R., Kuo, L.W., Mori, J., Xue, L., Brodsky, E.E., Yun, K., and Gong, Z., 2015a. Progress in the study of the Wenchuan earthquake faulting. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(3), p.257-269.
- Wang, H., Li, H., Janssen, C., Sun, Z., and Si, J., 2015b. Multiple generations of pseudotachylite in the Wenchuan fault zone and their implications for coseismic weakening. *Journal of Structural Geology*, 74, p.159-171.
- Xu, X.W., Zhang, P.Z., Wen, X.Z., Qin, Z.L., Chen, G.H., and Zhu, A.L., 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the Western Sichuan province and its adjacent regions. *Seismology and Geology*, 27(3), p.446-461.
- Xu, Z. and Li, H., 2019. The Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD) Project. *Earthquake and Disaster Risk: Decade Retrospective of the Wenchuan Earthquake*, Springer, Singapore, p.69-105.
- Xu, Z., Yang, J., Wang, C., An, Z., Li, H., Wang, Q., and Su, D., 2017. Fifteen years of the Chinese continental scientific drilling program. *Scientific Drilling*, 22, p.1-18.
- Xue, L., Li, H.B., Brodsky, E.E., Xu, Z.Q., Kano, Y., Wang, H., Mori, J.J., Si, J.L., Pei, J.L., Zhang, W., Yang, G., Sun, Z.M., and Huang, Y., 2013. Continuous permeability measurements record healing inside the Wenchuan earthquake fault zone. *Science*, 340, p.1555-1559.

박도현

현재 한국지질자원연구원 심지층연구센터 책임연구원
(本學會誌 第56卷 第3号 参照)