해설

심부 단층 대상 국제과학시추 프로젝트 소개: DFDP – Alpine Fault, New Zealand

조영욱^{1*}

¹한국지질자원연구원 지질환경연구본부 심지층연구센터 선임연구원

Introduction of the International Scientific Deep Fault Drilling Project: DFDP – Alpine Fault, New Zealand

Yeonguk Jo^{1*}

¹Senior Researcher, Deep Subsurface Research Center, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

***Corresponding Author.** Yeonguk Jo, joy@kigam.re.kr, Deep Subsurface Research Center, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

Received

5 October 2021

Final version Received

19 October 2021

Accepted

26 October 2021

Abstract

The Alpine fault, located in western South Island, New Zealand, is a fault that forms a part of the terrestrial boundary between the Australian and Pacific plates in southern New Zealand. Previous studies on this fault reported that the Alpine fault were suffered 24 surface ruptures in the past 8000 years, and recently four times reactivation with earthquakes of 8 magnitude in the past 900 years. In addition, some studies indicate that there is a possibility of reactivation within the next 50 years based on paleoearthquake records (in 1717, 1620, 1450, 1100 AD) and their cycles. An international scientific drilling project (Deep Fault Drilling Project [DFDP] – Alpine Fault, New Zealand) was launched with the objective of investigating the physical and chemical behavior of the fault zone before earthquake occurrence, and monitoring seismicity on the fault. This review summarizes the major research activity and lessons learned from this project, and introduces its achievements.

Key words : alpine fault, paleoearthquake, fault behavior, international scientific drilling project, DFDP – Alpine Fault

요약

뉴질랜드 남섬 서부에 위치한 알파인 단층(Alpine fault)은 뉴질랜드 남부 호주판과 태평양판의 육상 경계를 일부 형성하는 단층으로, 이 단층에 대한 기존 연구들은 알파인 단층이 과거 8천년 동안 24회의 표면 파열 및 과거 900년 동안 4번의 재활성과 규모 약 8 M의 지진을 발생시켰다고 보고하고 있다. 또한 이 단층의 고지진 기록(1717, 1620, 1450, 1100 AD)과 그 주기를 감안할 때 향후 50년 이내 파열될 가능성(약 30%)이 제기된 바 있다. 이 단층을 대상으로 지진 발생 이전의 단층대의 물리적, 화학적 거동 관찰 및 지진 감시 등을 목적으로 하는 국제과학시추 프로젝트(Deep Fault Drilling Project (DFDP) – Alpine Fault, New Zealand)가 수행되었다. 본 고에서는 해당 프로젝트를 통해 수행된 주요 연구 활동 및 교훈(lessons learned) 등을 정리하고 주요 연구성과들을 소개하고자 한다.

주요어 : 알파인 단층, 고지진, 단층 거동, 국제과학시추 프로젝트, DFDP-Alpine Fault

서 론

일반적으로 심부 단층에 대한 직접 관통 시추 및 모니터링을 목표로 하는 여러 과학시추 프로그램의 주요 연구 목적 중 하나는 과거 지질시대 동안 단층의 진화 과정(how faults evolve)을 파악하고, 이 단층이 어떻게 지진을 만들어 냈는지(how produce earthquakes)를 규명하는 것이다. 또한 활성단층에서 조사할 수 있는 일부 거동 특성(예를 들어, 온도, 압력, 지화학 상태 등)을 관찰하여 미래에 발생 가능한 지진을 예측하고 분석하기 위함에 있다.

국제 대륙 과학시추 프로그램(ICDP, International Continental Scientific Drilling Program)에서는 이러한 문제들에 접근하기 위하여 심부 단층을 타겟으로 하는 과학시추 프로젝트들에 대해, 적합한 연구 주제들을 발굴하고, 국제 공동연구에 대한 기획 및 기술지원 등을 수행한다. 이 프로그램을 통해 수행된 과학시추 프로젝트들 중 하나인 Deep Fault Drilling Project - Alpine Fault, New Zealand(이하 'DFDP')는 뉴질랜드 남섬 서부에 위치하는 알파인 단층(Alpine fault)에 대한 직접 관통을 목표로 하는 연구로 2008년 기획되었다.

본 프로젝트의 대상 단층은 아래와 같은 몇 가지 이유로 인해 흥미로운 연구 대상으로 인식되었다(Sutherland *et al.*, 2007; Townend *et al.*, 2009).

- 알파인 단층이 미끄러짐에 따라 주변부 암반의 수평 및 수직으로 이동이 발생하며, 이를 통해 과거 심부에 있던 암반이 지표로 비교적 빠른 연대로 노출된다.
- 대상 단층은 약 45°의 경사각을 가지므로 단층대 관통을 위한 특별한 방향 시추 기술(예를 들어 SAFOD 프로젝트)이 요구되지 않으며, 연직 시추공을 이용해 보다 용이하게 단층대의 시료를 채취할 수 있다.
- 알파인 단층은 가까운 시일 내 대규모 지진(~M8)을 발생시킬 수 있을 것으로 예측되므로, 지진 발생 이전에 단층의 상태를 관찰할 수 있는 드문 기회를 제공할 수 있다.

이후 ICDP 주관의 국제 공동 워크숍(2009) 및 연구 제안서 검토(2011) 등의 절차를 거쳐 DFDP의 주요 연구 주제를 확정하고, DFDP-Phase 1(2011) 및 DFDP-Phase 2(2012-2015)의 단계를 통해 프로젝트가 수행되었다.

DFDP를 통해 알파인 단층에 대한 시추 코어 회수, 다양한 종류의 시추공 물리검층, 심부 지열수 채취 등의 활동이 수행되었으며, 알파인 단층 및 주변 암반의 지질 조건, 응력 상태, 지하수 유동 특성, 기반암의 높은 지온 경사 특징 등의 여러 가지 새롭게나 발견된 연구 결과들이 보고되었다.

최근 들어 국내에서도 동남권에 분포하는 단층대(또는 활성단층) 및 지진 발생 메커니즘에 대한 국민적 관심 증가

와 함께 여러 연구들이 수행되고 있으며, 추후 일부 주요 단층을 대상으로 하는 단층 시추 프로젝트에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해서는 먼저 외국 각지 주요 단층대에서 수행되었던 다양한 형태의 심부 시추 프로젝트들에 대해 기획-진행 및 연구-후행계획 등의 내용들을 미리 살펴보고 국내 실정에 적합한 프로그램을 도입 또는 개발할 필요가 있다. 이러한 활동의 일환으로 본 고에서는 DFDP에서 수행된 주요 연구 내용들과 교훈(lessons learned), 그리고 프로젝트로부터 얻어진 주요 연구 성과들을 소개하고자 한다.

DFDP 개요

대상 단층 및 프로젝트 목표

뉴질랜드 남부 호주판과 태평양판의 경계를 형성하는 알파인 단층은 뉴질랜드 남섬 서부에 위치한 우수향 역단층(dextral-reverse fault)으로, 과거 200-400년 주기로 대규모 지진($M_w \sim 7.9$)을 발생시킨 것으로 알려져 있다. 아래 Fig. 1은 뉴질랜드 남섬의 북서부 지역을 가로지르는 알파인 단층의 대략적인 형태와 각 단계가 수행된 지역(Whataroa)의 위치를 보여준다. 고지진 기록들은 단층의 파열(rupture)이 1430 AD부터 1717 AD까지 내륙으로부터 멀어지며 발생하였다고 보고했으며, Sutherland *et al.* (2007)은 이를 근거하여 가까운 시일 내에 수백 km 거리에서 대규모의 지진이 발생할 가능성에 대하여 시사하였다.

지진 발생에 대한 가능성 외에도 프로젝트 기획 당시 해

Fig. 1. Map of South Island, New Zealand showing principal features of the Australia-Pacific plate boundary and some key locations (modified from Sutherland *et al.*, 2007).

당 단층이 주요 연구 대상으로 인식된 이유로는 (1)판 경계의 활성 단층이 어떠한 기작으로 움직이는지 연구하기에 지리적으로 유리한 위치에 있으며, (2)단층 운동에 의한 비교적 빠른 호기율(exhumation rate)로 상대적으로 젊은 연대의 암석(~1 Ma)이 최대 30 km 깊이에서부터 빠르게 용기하여, (3)지표면에 노출된 암석이 과거 지질 시간 동안 겪은 지하 깊은 곳에서의 지각 변동, 지진 발생 및 광물 변성에 대한 기록을 비교적 잘 보존하고 있기 때문이다(Norris and Cooper, 2007; Sutherland *et al.*, 2007; Toy *et al.*, 2015).

2009년 ICDP 워크숍을 통해 도출된 DFDP의 세 가지 주요 연구 테마는 (1)조산계(orogenic system)의 진화, (2)취성-연성 전이대의 변형 메커니즘 및 상호 작용 규명 및 (3)지진의 발생(seismogenesis)과 지진의 근원지에 대한 연구이다. 이를 달성하기 위해 제안된 DFDP의 기술목표로는 (1)심부 암석, 유체 및 가스에 대한 샘플링, (2) 다양한 시추공 물리검층의 수행과 (3)장기 모니터링용 센서의 설치 등이 있다.

단계별 목표 및 수행 계획

DFDP에서 제안한 포괄적 연구 및 기술 목표는 어떠한 물리적 조건에 의해 활동성 대륙 단층대가 진화하며, 지진을 일으키는가에 대한 해답을 찾는 것이며, 이를 위해 얕은 심도부터 조사를 수행하여 점진적으로 깊은 심도까지 시추

및 암석 시료(코어 또는 커팅)를 얻는 것이다. 이를 위해 본 프로젝트는 조사 단계(Phase 1, 이하 DFDP-1)와 본 단계(Phase 2, 이하 DFDP-2)로 구분되어 수행되었다.

2011년 수행된 DFDP-1은 단층대를 관통하는 시추코어의 연속적인 획득, 단층대를 관통하는 시추공의 물리검층 자료 취득 및 단층내 주변부 시추공 수리시험 수행 등을 목표로 하였다. 1단계 프로젝트가 수행된 Whataroa 남부 Gaunt Creek 지역에는 알파인 단층에 대한 기존 연구가 가장 활발히 진행된 노두가 위치하며(GNS Science, 2013), 이에 인접하여 총 2개의 조사시추공 DFDP-1A(심도 101 m)와 DFDP-1B(심도 152 m)가 굴착되었다. 각 시추공의 91 m, 128 m 깊이에서 단층대를 관통하여 코어시료를 회수하였다(Fig. 2).

DFDP-1A의 시추코어는 단층 상반의 암쇄암(mylnonite) 층서 및 20-30 m 두께의 열수변질대와 약 90 m 깊이에서 약 5 cm 두께의 전단면(slip surface), 그리고 단층 하반의 역퇴적층(fluvial gravle)을 회수하였다. DFDP-1B에서 또한 유사한 상반의 층서를 관찰할 수 있었으며, 약 128 m 깊이에서 20 cm 두께의 주전단면을 관찰하였다. 또한 하반(foot wall) 경계 약 130 m 깊이에서 석영과 장석이 다량 포함된 광범위한 변질대가 관찰되었다.

두 시추공에서는 초음파 영상(acoustic televiewer) 검층, 중성자(neutron) 검층, 완전파형 음파(full-waveform sonic)

Fig. 2. Summary of geological logs of DFDP-1A (left), and DFDP-1B (right) (modified from GNS Science, 2013).

검층, 밀도(density) 검층, 공곡(dipmeter) 검층 등의 광범위한 시추공 지구물리 검층 자료가 수집되었다. 이후DFDP-1A 시추공은 81 m 깊이까지 케이싱 처리 후 하부에 시추공 지진계를 설치하였으며, DFDP-1B 시추공에는 하반 깊이에 지진계를 설치하고, 1인치 직경의 유체 샘플링 튜브와 4개의 진동 감지 센서, RTD 온도센서 등의 단층의 거동을 감시할 관측소가 설치되었다.

DFDP-1(2011)의 성공적인 수행 후 DFDP-2(2012-2015)는 보다 깊은 심도에서 단층을 관통하는 시추공을 굴착하고, 다양한 깊이에서 암석과 유체 등을 샘플링 하는 것을 목표로 하였다. 이를 위한 DFDP-2 시추공은 약 1000 m 심도에서 알파인 단층을 관통하는 최종 심도 1300 m(또는 단층을 만나지 못했을 경우 1500 m) 깊이로 설계되었으며, 본 프로젝트에 참여한 연구팀들이 요구하는 코어회수, 시추공 물리검층, 수리시험, 센서 설치 등의 수요를 반영하여 시추공 굴진 계획을 확정하였다(Fig. 3). 이후 DFDP-1부지에서 약 7 km 이격된 Whataroa valley 지역에서 2014년 8월 DFDP-2A부터 2015년 1월 DFDP-2B까지 시추를 진행하였다. 몇 가지 기술적인 문제로 893 m 깊이에서 시추가 중

료되었지만, 이 시추공을 통해 다양한 지질학, 지구물리학, 지구화학 및 수리지질학적 연구 자료들이 수집되었다. 또한 여러 심도에서 암석 및 유체를 샘플링 하였고, 시추공 지진계를 포함하는 장기 모니터링 관측소가 설치되었다.

이후 소개될 내용들은DFDP-2에서 수행한 주요 연구 활동(activity) 및 시추 중 얻어진 기술적 교훈(lessons learned)을 포함하며, 그리고 프로젝트 결과로부터 얻어진 몇 가지 연구 성과들을 보여준다.

주요 연구 수행 내용(activities) 및 교훈(lessons learned)

시추 중 지진 모니터링

DFDP연구 대상인 알파인 단층은 200-400년 주기(가장 최근은 1717 AD)의 역사 지진 기록을 가지고 있으며, 호주 판과 태평양판 경계 운동의 60-80%를 수용한다. Sutherland *et al.*(2006), Norris and Cooper(2007), Langridge *et al.*(2010) 등에 따르면 알파인 단층의 전단율(slip rate)은 최대 ~31 mm/년으로, 프로젝트 기간 중에도 단층 운동과

Fig. 3. Summary of geology and technical plans (left) and planned well completion details (right) for the DFDP-2 deep borehole (modified from GNS Science, 2015).

이에 수반한 지진이 지속적으로 발생할 수 있을 것이라 예상되었다.

이에 연구팀은 DFDP-2 단계의 시추 행위가 단층의 파열(및 지진 발생)을 촉진시킬 가능성이 있는가에 대한 검토가 필요했으며, 이를 위해 기존 ICDP 과학시추 프로젝트에 참여한 경험이 있는 연구진들로 구성된 독립적인 평가단을 설치하고 엄격한 안정성 평가의 과정을 수행하였다. 평가단의 안정성 검토(safety review)에서 주로 논의된 내용은 (1) 시추 작업이 알파인 단층의 지진 활성화에 상당한 영향을 미칠 가능성이 있는가? (2) DFDP 시추기술팀은 이에 대한 적절한 대응 프로토콜을 갖출 수 있는가? 그리고 (3) 시추 행위가 영향을 미친다면 이를 억제하기 위한 운영 절차의 수정이 가능한가? 에 대한 것이다.

이에 연구팀에서는 DFDP-2 운영에 기인한 지진의 발생 가능성을 감지하기 위한 모니터링 시스템 및 대응 프로토

콜을 작성하였다(Fig. 4). 총 4개의 시추공 지진계(28 m 깊이)를 시추 부지 반경 1 km 이내에 설치하고, 실시간 네트워크를 운영하여 발생한 진동에 대한 요약 정보, 파형, 진앙 위치 등이 담긴 e-mail 알람 시스템을 운영하였다.

실시간 네트워크가 운영되는 5개월의 기간 동안 총 1121 건의 지진이 감지되었으며, 이들 중 492 건의 지진에 대하여는 후후 그 발생 위치와 규모를 재결정하였다. 같은 기간 중 시추 부지 5 km 이내에서는 지진이 감지되지 않았으며, 가장 가까운 지진은 시추 현장 남서쪽으로 약 5.3 km 떨어진 위치에서 규모 약 1.8 M_L의 지진이 감지된 바 있다.

지질 모델 수립

당초 DFDP-2 시추공은 약 1000 m 깊이에서 단층대를 관통하도록 설계되었으며, 안정적인 시추공 굴진(및 케이싱 설치) 계획 수립을 위해 지질 조건에 대한 예측이 필요하였

Fig. 4. Traffic light system and communication chains to be used in the seismic event near the DFDP-2 drill site (modified from GNS Science, 2015).

Fig. 5. Schematic Geologic cross section through the DFDP-2 drill site and drilling plans (modified from GNS Science, 2015).

다. 알파인 단층 노두들에 관한 기존 연구결과들과 DFDP-1 수행 경험을 바탕으로 연구팀은 DFDP-2 시추 부지 및 주변에 대한 지질 조건을 약 8 m 깊이까지 홀로세의 자갈 층 적층, 이후 약 80 m 깊이까지 자갈과 바위가 포함된 빙하 퇴적층, 그리고 약 250 m 깊이까지 모래 또는 자갈이 혼재된 점토층을 지나 기반암이 출현할 것으로 예상하였다(Fig. 5). 이후 기반암으로서 단층 상반의 Alpine Schist, 단층부의 취성 파쇄석, 그리고 화강암 또는 편마암으로 이루어진 단층 하반을 포함하는 지질 모델을 수립하였다.

또한 알파인 단층이 지하수 흐름에 대한 수리적 방벽 역할을 할 수 있기 때문에 유한요소법을 활용해 초과지하수 두(over pressure)에 관한 가능성을 검토하였고, 이를 대비하기 위한 적절한 시추 이수(drilling mud) 시스템을 도입하였다.

심부 시추공 굴착 및 코어 시료 회수

상기 지질 모델을 기반으로 시추공 굴착에 필요한 비트(drill bit)의 구성, 로드(rod), 시멘팅, 코어 회수 방법 등에

대한 시추공 굴진 계획과 지구물리검층 및 수리시험 등의 현장 시험에 대한 계획을 수립하였다(Fig. 3 참조). 시추공의 굴진은 크게 두 단계로 계획하였는데, 첫 단계는 천부 구간 굴착 후 철재 케이싱을 설치하여 시추공과 심부 굴진에 대한 안정성을 확보하고, 하부 구간에 대하여는 코어회수를 목표로 하였다.

실제 DFDP-2 시추공의 굴착은 2014년 8월부터 2015년 1월까지 진행되었다. 시추공 굴착에는 비트 굴진과 동시에 케이싱이 회전하며 전진하는 이중 회전식(dual rotary) 방법을 채택하였으며, 시추 압편(drill cutting)을 순환하기 위한 유체로는 공기 또는 물이 사용되었다. DFDP-2A의 경우 천부 구간에서 29 m 깊이까지 12인치 케이싱을, 이후 126 m 깊이까지 10인치 케이싱을 설치하였다. 이후 심부 구간 조사를 위해 임시로 6인치 케이싱을 설치하고, 212.6 m 심도까지 PQ 규격의 코어 시추를 수행하여 일부 구간의 시료를 회수하였다. DFDP-2A 시추공 상부구간을 굴착하는 과정에서 예상한 심도보다 퇴적층이 깊게 출현하여, 안정적인 하부구간 굴착을 위해 보다 큰 공경에서부터 시추공을

Table 1. Summary of samples collected from DFDP-2A

Types	Location	Age	Purpose	Total #	Depth, m
Cuttings	Onsite	Quaternary	Geologic description	127	0-126
Fossil			Age dating	4	58-61.5
Core			Geologic description	37	125.5-212.6

Table 2. Summary of samples collected from DFDP-2B

Types	Location	Age	Purpose	Total #	Depth, m
Cuttings	Onsite	Quaternary	Geologic description	80	0-238.5
Fossil			Age dating	24	19.9-238
Cuttings		Basement	Geologic description	334	238.5-893.2
Drilling mud		Quaternary + Basement	Geological analysis	153	47-893.2
Fossil		Quaternary	Age dating	1	235.9-236
Core		Basement	Geologic description	80	437-478.3
Cuttings		Basement	Thin section	265	238.5-893.2
Unwashed cuttings		Basement	Thin section and geochemical analysis	22	280.1-893.2
Unwashed cuttings		Basement	Mechanical tests	4	299-886
Washed cuttings		Basement	Thin section and geochemical analysis	202	243.5-884
Carbonaceous material	Offsite	Quaternary	Age dating	23	20-233
Gas extracted from drill mud		Quaternary + Basement	Chemical analysis	36	236-892

굴진을 시작하도록 일부 설계를 변경하였다.

이를 위해 DFDP-2B 시추공은 심도 76.8 m까지 16인치 케이싱, 197 m까지 14인치 케이싱, 236.6 m까지 12인치 케이싱, 그리고 243 m 깊이의 기반암 구간까지 10인치 케이싱을 설치하였다. 이후 추가로 9.5인치 공경으로 274.9 m 깊이까지 나공(open hole) 구간을 확보하였으며, 심부로는 8.5인치 대구경 굴진과 코어 시추를 수행할 계획이었다.

893.2 m 이후 굴진하는 과정에서 PWT 케이싱의 파손(436 m)으로 시추공 굴착이 중단되었으며, 목표했던 단층대 구간의 통과와 1300 m 깊이의 도달에는 실패하였다. 하지만 DFDP-2를 통해 굴착된 두 시추공 DFDP-2A 125-212 m 구간과 DFDP-2B 437-478.3 m 구간에서 연구에 중요한 코어시료를 얻었으며, 시추공 전 구간에 대한 압편을 획득하였다(Table 1, 2).

시추공 지구물리검층

DFDP-2A 및 DFDP-2B 시추공에 대한 지구물리검층을 수행하였다. Robertson Geo 사의 1500 m 와이어라인 로깅 케이블이 사용되었으며, 온도, 전기전도도, 유량, 감마선, 감마선 분광, 초음파 영상 등의 다양한 항목에 대한 물리검층이 이루어졌다(Fig. 6).

온도 검층의 경우 시추 중 발생하는 이수 순환과 공벽 청소 과정에서 지층의 온도를 교란시켜, 심부의 지온구배를 정확히 측정하기 어려운 문제가 있기 때문에, 다수의 반복 측정으로 자료를 수집하였다. 특별한 경우 이 작업에만 수일이 소요되기도 했지만, 시추공 온도 평형 조건에 대한 귀중한 기록을 획득하였다. DFDP-2B 시추공에서 수행된 20 번의 시추공 물리검층 기간 중 총 19 km 이상의 자료가 획득되었으며, 4.5 km 이상의 초음파 영상 자료가 취득되었다.

Fig. 6. Summary of borehole geophysical logs obtained from DFDP-2B wellbore (GNS Science, 2015).

DFDP-2B 시추공 완결

케이싱 파손에 의해 굴착이 중단된 DFDP-2B 시추공에 대해서 추가적인 굴진이 어렵다고 판단하여 수정된 시추공 완결(well completion) 계획이 수립되었다. 100 m 깊이까지 공벽과 케이싱 사이의 틈(annulus)에 대해 시멘팅 처리하였고, 약 400 m 깊이까지 재굴진(reaming)을 수행하여 안정적이고, 밀폐된 구간을 확보하였다. 그리고 최종 시추 심도까지 BQ 규격의 파이프를 활용해 광섬유 케이블을 설치하였다(Fig. 7). 이후 케이싱이 설치된 400 m 깊이에 3성분 시추공 지진계를 설치하였고, 정두(well head)와 설치된 장치들을 정리하여 시추공을 완결하였다.

Fig. 7. Schematic diagrams of geology and well completion of borehole DFDP-2B (GNS Science, 2015).

주요 연구 성과

DFDP를 통해 얻어진 32개의 예비 연구 결과들이 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting 2015에서 특별세션 논문으로 소개되었으며, 최근까지도 DFDP 활동으로 얻어진 수 많은 다양한 형태의 연구 결과들이 지속적으로 발표되고 있다(2021년 9월 검색 ICDP Publications 데이터베이스 제공 기준, 총 1146 건, <https://www.icdp-online.org/index.php?type=145&id=38>). 이들 중 DFDP에서 수행된 심부 시추공 굴착, 압편 및 지하수 샘플 회수 등의 직접적인 프로젝트 운영 단계로부터 얻어진 몇 가지 연구 성과를 소개한다.

알파인 단층대 지질구조 및 변형 특성 파악

DFDP-2B 시추공을 굴진하는 동안 기반암 심도(238.5 - 893 m, measured depth)에서 지속적인 압편(또는 일부 구간에서 압추) 등의 지질 시료 회수 및 이들에 대한 분석이 수행되었다(Toy *et al.*, 2017)(Fig. 8). 종합적으로 분석된 알파인 단층대의 압반 층서는 기반암으로써의 Alpine Schist, 이후 단층부로 가까워지며 접촉 압쇄암(proto mylonite)과 후퇴적 복합지형 모암에서 파생된 압쇄암 등으로 구성된다. 연속적인 압편 분석을 통해 규명된 층서 변화는 주변 알파인 단층 노두에서 관찰할 수 있는 것과 유사한 양상을 보인다. DFDP-2B 시추공 일부 구간에서 회수된 압추 시료에서 밀접한 간격의 압쇄암 엽리(foliation)와 전단면의 발달 특성을 관찰하였다(Fig. 9). 전단면은 대개 수 cm 미만의 규모로 이격되어있으며, 엽리와 약 30° 내외의 낮은 경사로 취성 변형의 특징을 보이고 있다.

DFDP-1 시추공으로부터 관찰된 결과들과 종합하여 DFDP-2B 시추 종료 심도(bottom depth) 이후 약 200 - 400 m 깊이에 알파인 단층의 PSZ가 존재할 것으로 예측하였으며(Fig. 10), 알파인 단층의 최대 경사는 약 62° 내외로 추정하였다.

활성단층대에서 고온 지열수 환경 관찰

지역마다 다른 지하수의 온도 및 압력구배는 암반의 변형에 관여하며, 또한 단층대의 광화작용(mineralization)과 지진 발생 분포에도 영향을 미치는 요소로 알려져있다(Sibson, 1982). 일반적으로 판 내부 대륙 지각에서는 대개 정수압(hydrostatic)의 지하수압 및 약 31 ± 15°C/km의 지온구배를 가지지만(Pollack *et al.*, 1993), 드물게 활성 판 경계 단층부를 대상으로하는 심부 시추 프로젝트 등에서 고온의 지열수 환경이 관찰된 바 있다(대표적으로 산안드레아스 단층 등). DFDP에서도 알파인 단층 상반을 굴진하는 동안 유체의 온도 및 압력에 대한 자료가 수집되었다(Sutherland *et al.*, 2017).

Fig. 8. Datasets of rock samples obtained from the DFDP wellbores, and lithological-, structural-, and chemical interpretations (Toy *et al.*, 2017).

Fig. 9. Structural observations using drill cores from the depths of 475.5 – 476 m MD of the DFDP-2B borehole (Toy *et al.*, 2017).

Fig. 10. Compiled lithological summary log derived from DFDP-1 and DFDP-2, showing sequence of Alpine fault zones (Toy *et al.*, 2017).

DFDP-2B 시추공 893 m 구간에서 정수압보다 약 10%를 상회하는 지하수압과 평균 $125 \pm 55^\circ\text{C}/\text{km}$ 의 지온구배가 관찰되었다(Fig. 11). 이러한 극단적인 열수 환경은 비교적 빠른 단층 운동에 의한 열 운반과 지열수가 계곡으로 집중되는 지형적 특성에 기인한 것으로 해석되었다(Fig. 5 참조). 이 과정에서 단층면의 전단에 의한 지하수의 가열에 대한 가능성은 배제하였다.

DFDP-2B에서 관찰된 지하수 온도에 대한 지속적인 모니터링 자료는 판 경계 단층대 직상부에서 전단면의 미끄러짐, 암석 변형 및 파쇄 등에 의해 매우 높은 유체 압력과 온도 구배가 생성될 수 있음을 보여주었다.

Fig. 11. Mean temperature observed during a 7-14 month period after drilling and estimated fluid pressure (left) and temperature gradient with inferences for aquifers and aquitards (right) (modified after Sutherland *et al.*, 2017).

맺음말

DFDP(Deep Fault Drilling Project)는 태평양판과 호주 판의 활성 경계에 형성되어있는 알파인 단층에서 수행된 심부 단층 과학시추 프로젝트이다. 이 단층의 고지진 주기를 감안할 때 비교적 가까운 미래에 대규모 지진이 발생할 가능성이 보고 되었으며, 지진의 전조에 단층대 주변에서 관찰할 수 있는 심부 암반 변형, 온도/압력 조건, 광물 충전 특징, 지열수 및 지하화 특성 등의 변화 양상을 모니터링하기 위한 단층 직접 관통 시추를 목표로 수행되었다.

DFDP 현장 운영 및 시추공 굴착 단계에서 취득된 압편, 압추, 시추 이수(및 가스) 등에 대한 실시간 분석이 이루어졌으며, 기존 알파인 단층 노두를 통한 연구들로부터 추론되어 온 심부 단층대 주변 지질 구조를 보다 자세히 관찰하였다. 압추 분석을 기반으로 단층 인근 암반 파쇄대의 변형 및 미구조 발달 특성을 파악하고 기존 연구 내용들과 종합하여 알파인 단층의 심부 구조를 제시하였다. 또한, 활성 단층대에서 드물게 관찰할 수 있는 빠른 열 유동에 의한 고온의 지열수 환경을 관찰하였으며, 조산 및 단층대를 포함하는 지구조 모델을 종합한 수리 모형이 제시되었다. 예기치 못한 문제로 단층대 관통 이전 시추가 중단되었으나, 시추공 완결 이후 심부 시추공 지진계 및 모니터링 시스템 등을 설치하여 알파인 단층의 거동에 대한 모니터링이 수행되고 있다. 또한 DFDP-2B 수행 현장 및 남아있는 시추공, 압편, 압추 등의 보존 자료들은 뉴질랜드 및 인근 지역 뿐만 아니라 전세계 관련 기관의 방문 및 교육 자료들로 다수 활용되

고 있다.

최근 들어 국내에서도 동남권 주요 단층(예를 들어, 양산 단층 등) 및 주변 지역에서 발생하는 지진에 대한 국민적 관심 이 지속적으로 증가함에 따라, 이들 단층들에 대하여 노 두 조사 또는 트렌치(trench) 분석, 지구물리기법 등을 활용 한 다양한 형태의 연구들이 선행되고 있다. 이 같은 방법들 은 한반도 내 광역적 단층 분포도 작성 및 단층들의 운동 감 각과 그 시기에 대한 연대 측정, 심부 단층의 자세(geometry) 등에 대한 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것이다. 이를 기 반하여 추후 일부 주요 단층들에 대한 상세 조사를 수행한 다면, 심부 시추 조사 기법은 아마도 교란되지 않은 심부 단 층암의 역학적/구조적 특성, 내부 충전물의 구성, 지진 발생 기작 등의 연구를 위한 가장 직접적인 자료를 생산하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

현재 여러가지 방법으로 진행 중인 동남권 단층들에 대 한 기초 연구들이 종료된 이후에는 향후 예상되는 지진 발 생 빈도 및 그 규모 등을 기준으로 추가적인 연구가 요구되 는 특정 단층들에 대하여 과학시추 프로그램을 포함한 보 다 심도 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업 ‘한반도 동남 권 지진·단층 활동 평가를 위한 심부 복합지구물리 모니터 링 시스템 구축’ 과제(GP2018-009)의 일환으로 작성되었 음을 밝힌다.

References

- GNS Science, 2013. *Operation and well completion report for boreholes DFDP-1A and DFDP-1B, Deep Fault Drilling Project, Alpine Fault, Gaunt Creek, New Zealand*, GNS Science Report 2011/48, Lower Hutt, New Zealand, 107p. https://shop.gns.cri.nz/sr_2011-048-pdf/
- GNS Science, 2015. *Deep Fault Drilling Project (DFDP), Alpine Fault Boreholes DFDP-2A and DFDP-2B Technical Completion Report*, GNS Science Report 2015/50, Lower Hutt, New Zealand, 283p. http://shop.gns.cri.nz/sr_2015-05-0-pdf/
- Langridge, R.M., Villamor, P., Basili, R., Almond, P., Martinez-Diaz, J.J., and Canora, C., 2010. Revised slip rates for the Alpine fault at Incheon: Implications for plate boundary kinematics of South Island, New Zealand, *Lithosphere*, 2(3), p.139-152.
- Norris, R.J. and Cooper, A.F., 2007. The alpine fault, New Zealand: Surface geology and field relationships, *Geophysical Monograph Series*, 175, p.157-175.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., and Johnson, J.R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set, *Reviews of Geophysics*, 31(3), p.267-280.
- Sibson, R.H., 1982. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(1), p.151-163.
- Sutherland, R., Berryman, K., and Norris, R., 2006. Quaternary slip rate and geomorphology of the Alpine fault: Implications for kinematics and seismic hazard in southwest New Zealand, *Bulletin of the Geological Society of America*, 118(3-4), p.464-474.
- Sutherland, R., Eberhart-Phillips, D., Harris, R.A., Stern, T., Beavan, J., Ellis, S., Henrys, S., Cox, S., Norris, R.J., Berryman, K.R., Townend, J., Bannister, S., Pettinga, J., Leitner, B., Wallace, L., Little, T.A., Cooper, A.F., Yetton, M., and Stirling, M., 2007. Do great earthquakes occur on the alpine fault in central South Island, New Zealand? *Geophysical Monograph Series*, 175, p.235-251.
- Sutherland, R., Townend, J., Toy, V.G., and DFDP Science team, 2017. Extreme hydrothermal conditions at an active plate-bounding fault, *Nature*, 546(7656), p.137-140.
- Townend, J., Sutherland, R., and Toy, V.G., 2009. Deep Fault Drilling Project-Alpine Fault, New Zealand, *Scientific Drilling*, 8, p.75-82.
- Toy, V.G., Boulton, C.J., Sutherland, R., Townend, J., Norris, R.J., Little, T.A., Prior, D.J., Mariani, E., Faulkner, D., Menzies, C.D., Scott, H., and Carpenter, B.M., 2015. Fault rock lithologies and architecture of the central Alpine fault, New Zealand, revealed by DFDP-1 drilling, *Lithosphere*, 7(2), p.155-173.
- Toy, V.G., Sutherland, R., Townend, J., and DFDP Science Team, 2017. Bedrock geology of DFDP-2B, central Alpine Fault, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 60(4), p.497-518.

조영욱

2011년 충남대학교 자연과학대학 지질환경
경과학과 이학사

2014년 충남대학교 대학원 지질학과 이학
석사

2019년 충남대학교 대학원 우주지질학과
이학박사

현재 한국지질자원연구원 지질환경연구본부 심지층연구센터
선임연구원

(E-mail; joy@kigam.re.kr)