TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.32, No.5, 2022, pp.285-297
https://doi.org/10.7474/TUS.2022.32.5.285 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

TECHNICAL NOTE

국내 대구경 시추공 굴진 중 Extended Leak-Off Test 수행 사례 보고

조영욱[1*], 송윤호[2], 박세혁[1], 김명선[1], 박인화[3], 이창현[2]

[1]한국지질자원연구원 국토지질연구본부 심층처분환경연구센터 선임연구원, [2]한국지질자원연구원 국토지질연구본부 심층처분환경연구센터 책임연구원, [3]한국지질자원연구원 국토지질연구본부 심층처분환경연구센터 책임기술원

Report on Extended Leak-Off Test Conducted During Drilling Large Diameter Borehole

Yeonguk Jo[1*], Yoonho Song[2], Sehyeok Park[1], Myung Sun Kim[1], In-Hwa Park[3], and Changhyun Lee[2]

[1]Senior Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

[2]Principal Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

[3]Principal Technician, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author: joy@kigam.re.kr

Received: September 26, 2022
Revised: October 14, 2022
Accepted: October 17, 2022

ABSTRACT

We report results of Extended Leak-Off Test (XLOT) conducted in a large diameter borehole, which is drilled for installation of deep borehole geophysical monitoring system to monitor micro-earthquakes and fault behavior of major fault zones in the southeastern Korean Peninsula. The borehole was planned to secure a final diameter of 200 mm (or more) at a depth of ~1 km, with 12" diameter wellbore to intermediate depths, and 7-7/8" (~200 mm) to the bottom hole depth. We drilled first the 12" borehole to approximately 504 m deep and installed American Petroleum Institute standard 8-5/8" casing, then annulus between the casing and bedrock was fully cemented. XLOT was carried out for several purposes such as confirming casing and cementing integrity, measuring rock stress states. To that end, we drilled additional 4 m long open hole interval to directly inject water and pressurize into the rock mass using the upper API casings. During the XLOT, flow rates and interval pressures were recorded in real time. Based on the logs we tried to analyze hydraulic conductivity of the test interval.

Keywords: Borehole, Extended Leak-Off Test (XLOT), Flow rate, Interval pressure, Rock mass permeability

초록

본 고에서는 한반도 동남권에 분포하는 주요 단층대에 대한 장기 거동 및 미소진동 관찰을 목적으로 하는 시추공 기반 심부 복합지구물리 모니터링 시스템 구축의 일환으로 수행된 대구경 시추공 굴착 현장에서 이루어진 Extended Leak-Off Test (XLOT)에 대한 내용 및 결과를 보고한다. 다양한 시추공 센서 설치를 위한 모니터링공의 굴착은 ~1 km 깊이에서 최종 구경 200 mm 이상을 확보하는 것을 목표로 하여, 중간 깊이까지 12" 구경의 시추공 굴진 및 케이싱 설치, 이후 최종 심도까지 7-7/8" 구경의 시추공을 굴진하는 것으로 설계되었다. 현장 여건에 맞추어 약 504 m 깊이까지 12" 구경의 시추공이 굴착되었으

© The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2022. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, API 규격의 8-5/8" 케이싱을 설치하고 배면과 암반 간의 틈새(annulus)에 대한 세멘팅 작업을 수행하였다. 이후 하부 구간 굴진(7-7/8")에 앞서 세멘팅 건정성 확인 및 암반 응력 측정 등을 목적으로 XLOT를 수행하였다. 약 4 m 길이의 나공 구간(open hole)을 확보하고, 상부에 설치된 케이싱을 이용해 물을 주입하여 시험 심도의 암반을 가압하였다. XLOT 수행 과정에서 주입 유량에 따른 시험 구간 내 압력 변화 양상을 실시간 모니터링 하였으며, 이 자료들을 일부 활용하여 현장 시추공 조건에서의 암반 투수율을 해석하였다.

핵심어: 대구경 시추공, Extended Leak-Off Test (XLOT), 유량, 압력, 암반 투수율

1. 서 론

시추공 굴착 현장에서 암반의 수리적, 물리적 특성을 파악하기 위해 수행되는 여러 현장 시험들 중 하나인 Leak-Off Test(이하 LOT)는, 별도의 패커 설치 등의 복잡한 절차 없이 시추공 굴진 과정에서 비교적 쉽게 수행할 수 있는 경제적이고 간단한 시험법으로 인식된다(Lin et al., 2008). 이는 대개 석유, 지열수 생산 등을 목적으로 하는 대구경 시추공 굴진 현장에서 케이싱 설치(및 세멘팅) 공정 이후 시추공 자체의 무결성(integrity)을 확인하기 위해 수행되거나(Postler, 1997), 일반적으로 가압조건에서 암반의 인장 파괴 발생 압력을 유추하여 보다 깊은 심도로 시추공을 추가 굴진하는 과정에서 발생할 수 있는 이수 누출(mud loss)을 방지하는 압력 구배(mud window)를 산정하는 데 사용된다(Aadnoy and Larsen, 1989, Kunze and Steiger, 1991, Zhang and Yin, 2017).

또한 이외에도 LOT 또는 이를 확장한 Extended Leak-Off Test(이하 XLOT) 개념은 현장 시험 과정에서 얻어지는 주입 유량 및 압력 자료를 해석하여 심부 암반의 응력상태나 투수성에 대한 정보를 얻기 위해서도 활용될 수 있다(Addis et al., 1998, Raaen et al., 2006, Lin et al., 2008). 이는 만약 케이싱 구간이 적어도 그 하부 나공 구간 암반의 강도 이상으로 세멘팅되어 있고 암반이 신선하다면 수압파쇄 시험과 유사한 원리에 의해 암반의 응력상태에 대한 정보를 얻을 수 있음에 기초한다. 또한 만약 케이싱 하부 나공 구간에 투수성 파쇄대가 존재한다면 수리 시험과 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

과거 국내에서는 이산화탄소 지중저장 시험을 위한 조사 시추공 규모 굴착 현장에서 암반 응력 및 수리특성 파악을 목적으로 수행된 XLOT 사례와 그 결과들이 보고된 바 있으나(Chang et al., 2016, Quach et al., 2018, Kim et al., 2018), 아직까지는 다양한 규모의 시추 현장에서 적용 가능한 LOT(또는 XLOT) 기술이 보편화 되어있다고 보기는 어렵다. 앞으로 고준위 방사성 폐기물 처분 부지 모니터링, 지열수자원 개발 등 여러 목적의 심부 및 대구경 시추공을 이용한 암반 조사 및 개발 수요가 증가할 것으로 예상됨에 따라, 이러한 시추공 현장 시험의 기회도 함께 늘어날 것으로 기대되며, 이에 대응해 시추 현장에서 비교적 용이하게 적용이 가능한 현장 시험들의 방법 및 절차 등을 보다 체계적으로 정립할 필요가 있을 것이다.

본 기술보고에서는 이러한 기술개발의 일환으로서 국내 동남권 지역 대구경 시추공 굴착 현장에서 이루어진 XLOT 수행 사례와 그 결과를 보고한다. 현장에서 이루어진 일련의 시추공 굴착 및 케이싱 설치 과정, XLOT 준비 절차 및 수행 결과를 포함하며, 시험 자료의 활용 예시 등을 소개한다.

2. 연구지역 및 시추공

2.1 대상 지역 및 지질

한국지질자원연구원에서 기본사업으로 수행 중인 TELLUS (The Earth Login Leverage for Underground Signal, 한반도 동남

권 심부 복합지구물리 모니터링 시스템 구축 사업의 영문명) 과제에서는, 동남권 지역에 분포하는 주요 단층대 주변으로 심부 암반의 온도/압력 및 변형 특성, 단층의 미세 거동 및 미소 지진 발생 등 다양한 지구물리 변화를 계측하는 '심부 복합지구물리 모니터링 시스템'을 구축하고 있다. 2023년까지 아래 Fig. 1과 같이 양산단층 및 울산단층 구조선에 인접하여 총 6개의 관측소를 네트워크 형태로 구축하는 것을 우선적인 목표로 하고 있으며, 2020년부터 2022년 7월 현재까지 총 4개의 지역에 TELLUS-A1(노곡리), A2(박달리), C2(제내리) 및 B1(단구리) 관측소를 완공하여 운영 중이다.

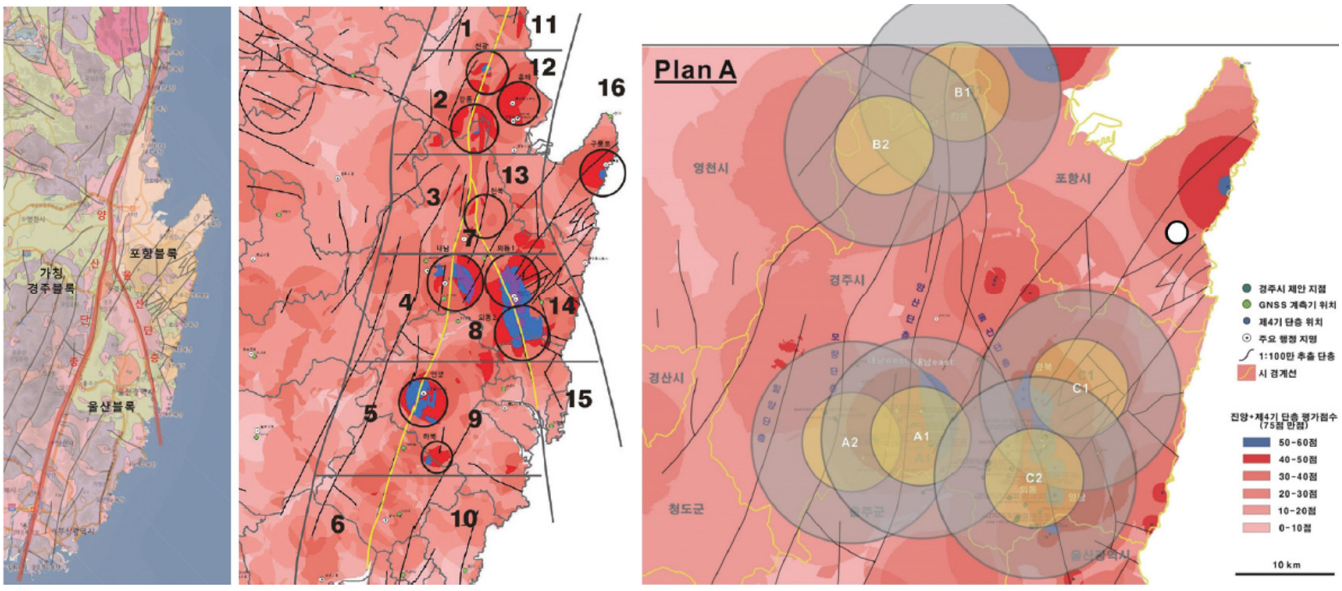

Fig. 1. Deep borehole based geophysical monitoring system installation planning map in TELLUS project (KIGAM, 2021)

해당 과제에서는 심부 암반 모니터링 목적 및 시스템 설치에 적합한 부지 선정 절차부터 광역 지질 조사, 지구물리탐사, 조사 시추공 굴착 및 시추공 현장 시험 등에 이르는 일련의 과정을 통하여 관측소 후보지에 대한 특성화를 수행하고, 심부 시추공 기반의 모니터링 센서를 설치하기 위한 대구경 시추공을 굴착한다. 본 기술보고에서 소개하는 XLOT 수행 사례는 2022년 상반기 완결된 B1(단구리) 관측소 내 대구경 모니터링공 굴착 과정에 진행된 것이며, 아마도 국내에서는 처음으로 미국석유협회(American Petroleum Institute, API) 규격을 만족하는 대구경 시추공 굴착 및 케이싱 설치 조건에서 이루어진 사례일 것이다.

TELLUS-B1(단구리) 관측소 부지는 지표 상에서 양산단층 서쪽에 위치하며, 부지 일대의 광역 지질은 주로 하양층군 대구층(또는 반야월층/기사동층) 퇴적암류로 구성되고 일부 백악기 화산암류와 고신기 화강암이 분포한다. 대구경 모니터링 시추공 굴착에 대한 설계 이전에 관측소 부지 심부 지질 및 암반 상세 특성화를 목적으로 약 1 km 깊이의 조사 시추가 선행되었으며, 전구간 회수된 시추코어로부터 관찰된 단구리 관측소 부지의 심부 암상은 백악기 자홍색 이암, 사암 및 역암 등의 퇴적암이 분포한다(Fig. 2).

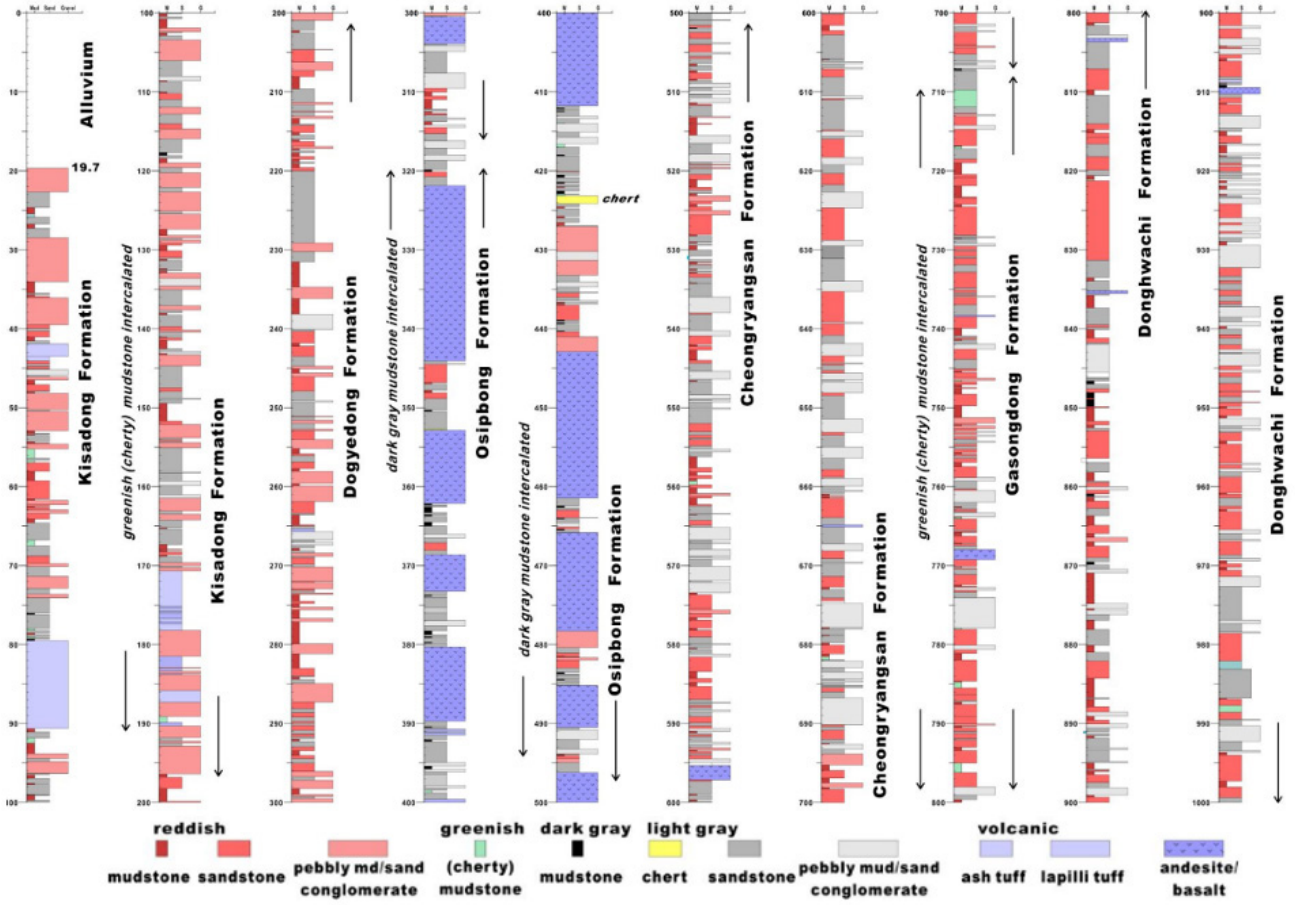

Fig. 2. Simplified drill-core logs derived from the test borehole at TELLUS-B1 site (KIGAM, 2021)

2.2 대구경 시추공 굴착

본 사업에서 구축하고 있는 심부 복합지구물리 관측소에는 심부 암반의 다양한 지구물리 특성을 계측하기 위한 다종의 센서들이 지하(시추공 기반) 또는 지표에 설치된다. 이들 중 시추공을 활용해 심부 암반(또는 케이싱 내)에 직접 설치되는 센서들로는 암반의 온도/압력 변화 감지를 위한 온도/압력센서, 분포형 광섬유 온도 측정(DTS) 센서, 암반 변형 감지를 위한 시추공 변형률계 및 심부 단층의 거동 및 미소 지진을 감지하기 위한 시추공 속도계 및 가속도계(이하 시추공 지진계)가 있다. 상기 심부 시추공 센서 설치 등에 대한 개략적인 모식도는 아래 Fig. 3(a)와 같으며, 보다 자세한 내용은 Choi et al.(2021)에 기술되어있다.

해당 센서들의 설치 요건을 만족하는 직경 200 mm 이상의 대구경 시추공을 목표 심도(~1 km)까지 안정적으로 굴착하기 위해, 중간 깊이까지 12" 직경의 시추공 굴진 및 8-5/8" 케이싱 설치, 이후 최종심도까지 7-7/8"(약 200 mm) 직경의 시추공을 굴진하는 것으로 계획하였다(Fig. 3(b)). 해당 부지 내에서 선행된 조사 시추로부터 얻어진 암추(drill core) 시료에 대한 관찰과 일련의 시추공 물리검층 결과들로부터 천부 굴진 구간 ~308 m, ~437 m, ~496 m 깊이에 파쇄대가 분포함을 파악하였고, 이 구간들을 지나 중간 케이싱을 설치하기 위해 504.9 m 깊이까지 12" 시추공을 굴착하였다. 이후 해당 구간에 대하여 API 5CT 규격의 8-5/8" 철재 케이싱(K-55 등급, 28 lb/ft)을 설치하고, 케이싱과 암반 사이 틈(annulus)을 세멘팅 처리하였다.

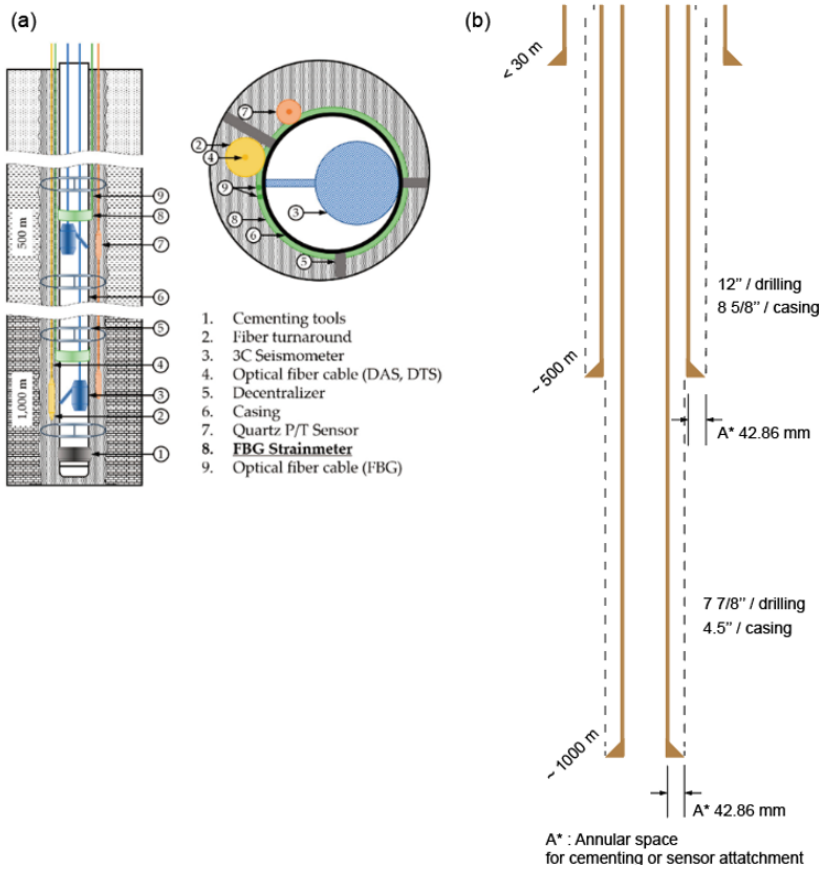

Fig. 3. Schematic diagrams showing (a) borehole monitoring sensor installation design (after, Choi et al., 2021) and (b) well completion design at TELLUS project

일정 기간 세멘팅 양생 후 심부 모니터링 구간(7-7/8" 직경) 굴진에 앞서 상부 구간 세멘팅 건정성 확인 및 암반 물성 측정 등을 목적으로 XLOT를 수행하기 위해, 200 mm 텅스텐 카바이드 드릴 비트를 이용하여 8-5/8" 케이싱 세멘팅 공정에 사용된 와이퍼 플러그, 체크 밸브 등을 회수하고 약 4 m 길이의 시험 구간을 추가 굴진하였다(Fig. 4와 5). 굴진 과정에서 일부 회수된 암편 관찰을 통해 시험 구간 내 단열 발달 여부를 확인할 수 있었고, 추후 보이겠지만 XLOT 전후로 수행된 초음파 영상검층에서 수 개의 단열이 다양한 방향으로 발달되어 있음을 확인하였다.

Fig. 4. Photographs showing drill-bits (left) and core barrels (right) to retrieve cementing wiper plug and check-valves

Fig. 5. Recovered cementing tools (wiper plug and check valves) and partially recovered rock mass at the test interval

3. 대구경 시추공 현장 XLOT

3.1. 현장 장비 구성

아래 Fig. 6은 본 시추공 현장에서 이루어진 XLOT의 대략적인 레이아웃을 보여준다. 기본적으로 시추공 내 물 주입을 위한 주입 펌프와, 주입(유량)에 따른 공내 압력 변화 양상을 관찰하기 위한 계측 장비들로 구성된다. 본 시험에 사용된 압력 펌프(HT-400, Halliburton)는 해외 심부 시추 및 석유 개발 현장에서 세멘팅 또는 원유 회수 증진을 위한 수압파쇄(hydraulic fracturing) 등에 흔히 사용되는 고사양(최소 토출량~100 L/min) 제품으로서, 본 현장에서 수행된 XLOT에서는 별도의 우회(bypass) 배관을 포함하는 매니폴드 시스템을 통해 시험 시 시추공으로 주입되는 유량을 일정 정도 조절할 수 있도록 하였다(Fig. 7). 매니폴드와 정두(wellhead) 사이에 주입 유량 및 압력 계측을 위해 터빈식 유량계와 격막식 압력계를 설치하였으며, 데이터 로깅 시스템을 이용해 물 주입에 따른 압력변화를 실시간으로 기록하였다(Fig. 8). 설치된 모든 계측 장비들은 XLOT 수행 시 압력 펌프의 고유량 출력에도 병목현상이 발생하지 않도록, 현장 주입 배관 규격(50A, 2 inch)에 맞도록 구성되었다.

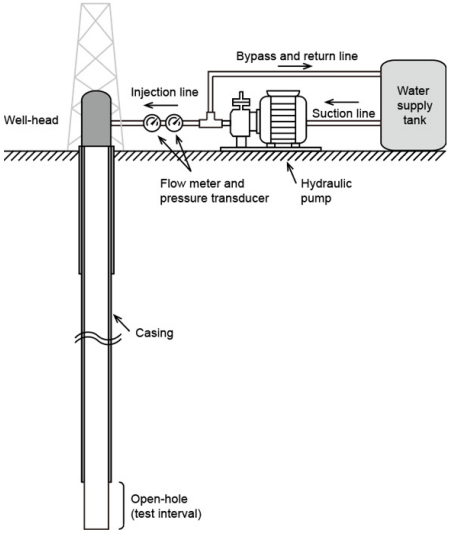

Fig. 6. Schematic diagram showing layout of Extended Leak-Off Test conducted at the TELLUS monitoring borehole drilling site

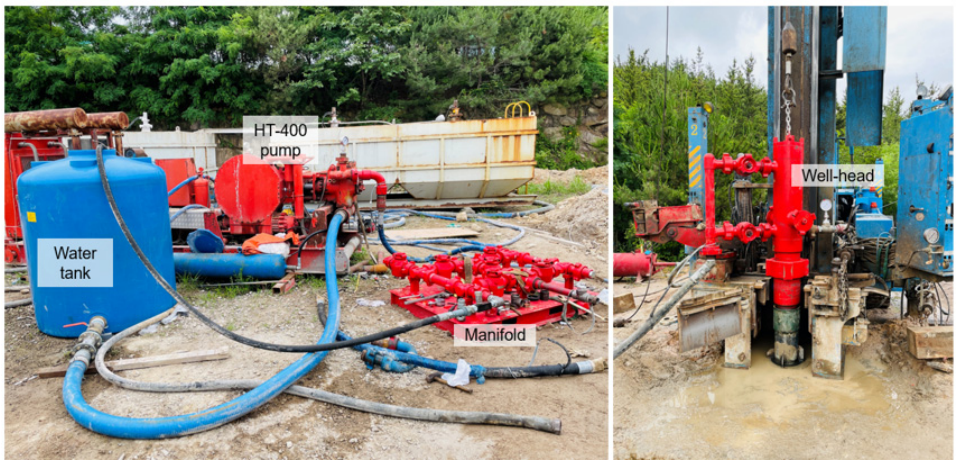

Fig. 7. Photographs showing in-situ layout of the equipment (left) and well-head (right)

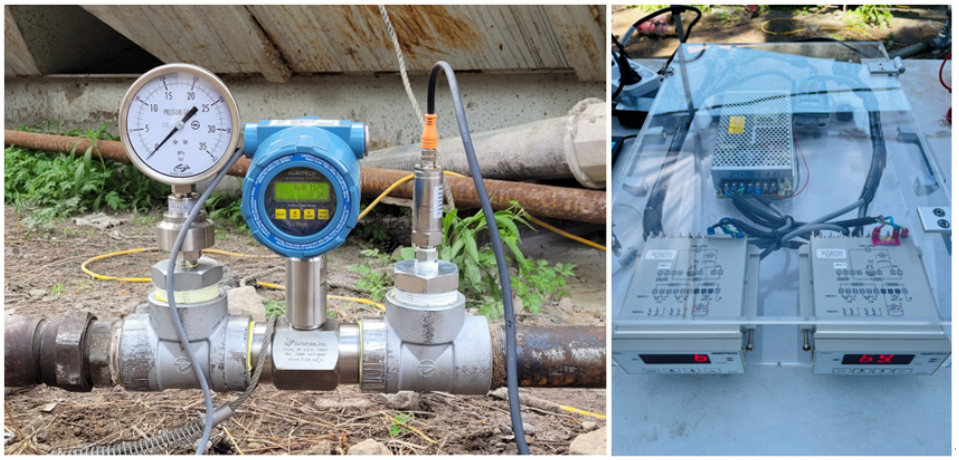

Fig. 8. Photographs showing flowmeter and pressure transducer attached at injection pipeline, and data acquisition system

3.2. XLOT 수행 결과

아래 Fig. 9는 XLOT수행에서 얻은 유량 및 압력 변화 곡선을 보여준다. 본 시험에서는 일정한 유량으로 물을 주입하고 주입량에 따른 압력 변화 양상을 관찰하는 방식(White et al., 2002)을 채택하였으며, 총 7회의 가압 및 shut-in사이클을 반복하였다. 사용된 triplex 펌프의 맥동 문제 때문에 순간적인 유량의 편차가 있지만, bypass 밸브를 조절하여 평균 약 80 L/min의 주입량이 유지되도록 하였다. 시험 구간(~505 m 심도) 내의 압력은 지표에서 측정된 주입압에 상부 케이싱 설치 구간 길이에 해당하는 정수압(~5 MPa) 크기를 더하여 산정하였다.

앞서 시험 구간 굴진 과정에서 언급한 바와 같이 주입 구간 내에는 다양한 규모의 자연 균열들이 분포하기 때문에(Fig. 10(a)), 일반적으로 시추공 내 무결암에 가까운 구간에서 암반응력측정 등을 목적으로 하는 수압파쇄 형태의 시험 결과는 얻기 어려울 것이라 판단하여, 주입에 따른 공내 압력 증가 양상을 실시간으로 모니터링하면서 균열 재개방이 발생했다고 예상되면(유량에 비해 압력 증가 양상이 더딘 경우) 물 주입을 멈추고(shut-in) 압력 감쇠 양상을 관찰하였다.

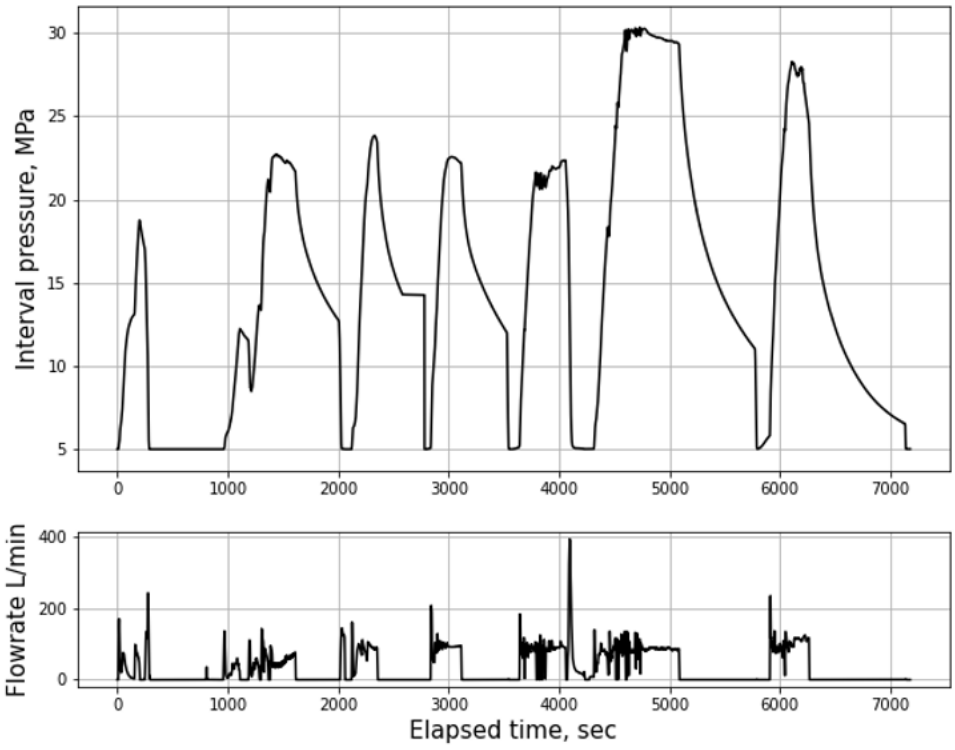

Fig. 9. Flowrate and interval pressure curves as a function of time derived from the Extended Leak-Off Test

총 7번의 가압 사이클 동안 균열개구압력(reopening pressure)은 최대 약 30 MPa로 측정되었다. 흥미로운 점은, 일반적으로 가압 사이클이 반복되면 균열 재개방 또는 균열 전파에 따라 수직강성이 감소하며 균열개구압력이 점진적으로 감소하거나 또는 일정 수준으로 수렴(Raaen et al., 2006, Lin et al., 2008, Lavrov et al., 2016)한다고 예상할 수 있는데, 본 연구의 XLOT 사례에서는 그러한 거동 이후에 6번째 가압 사이클부터 더 높은 압력에서 균열 재개방이 관찰되었다는 것이다.

이와 같이 가압 사이클 반복 과정에서 균열개구압력이 급격히 상승한 현상의 원인을 명확히 파악하기에는 관측 자료가 제한적이나, 설명할 수 있는 경우 중의 하나로 복수의 균열에서 균열 재개방이 발생하는 상황을 들 수 있다. 즉 1차~5차 가압 사이클에서 균열이 재개방되어 성장(1차 균열)하다가 암반 내 기존의 다른 균열(2차 균열)에 도달해, 6차 가압 사이클부터는 2차 균열이 더 높은 압력에서 재개방되어 그 압력반응이 우세하게 관측되는 상황에 해당한다. 이러한 기작은 1차 균열이 개구압력 수준에서 성장을 지속하지 못하는 경우에 성립할 수 있는데, 1차 균열이 성장해 2차 균열에 도달하면 통과해 성장하지 못하고 2차 균열의 재개방으로 이어지는 현상이 다양한 실험 및 수치해석 연구에서 보고된 바 있다(Blanton, 1982, Cheng et al., 2014, Janiszewski et al., 2019, Sarmadivaleh and Rasouli, 2014, Zhang et al., 2018). 복수의 균열이 관여하는 또 다른 경우로 시험구간과 직접 연결된 서로 다른 균열이 열리는 경우도 있을 수 있는데, 실험실 및 스웨덴 Äspö 지하연구시설에서 수압파쇄를 수행한 사례에서 지속주입 대비 반복주입(cyclic injection)에 의해 더 많은 수의 균열이 발생했으며 또한 본 연구의 XLOT 결과와 같이 파쇄압력(breakdown pressure) 이후 개구압력이 더 높아지는 현상이 관측되어(Zang et al., 2021), 본 연구에서 통상의 XLOT보다 많은 횟수로 가압 사이클을 수행한 것이 복수 균열의 재개방과 개구압력 상승에 영향을 주었을 가능성도 있다. 한편 유체 주입에 의해 미세 암편, 점토질 침전물 등 공내 고체상 물질이 균열에 침투할 경우 투수율이 낮아져 균열 선단에 도달하는 유체압력이 감소할 수 있는데, 이러한 현상도 균열 성장을 제한하는 작용을 할 수 있다.

매 주입 사이클에서 시험 구간 내 어떠한 단열을 통해 유체가 우세하게 거동하였는지 파악할 수는 없지만, XLOT 후 얻은 시추공 벽 초음파 영상에서는 주입 시험 중 확장(또는 유도)된 균열이 확인된다(Fig. 10(b), 10(c)). 다만 이 균열들은 그 자세로 볼 때 수직 공 내에서 180도 대칭되는 마주보는 방향에 시추공 축방향으로 정렬되어 나타나는 수압파쇄 균열과는 구분되므로, 수압파쇄에 의해 유도된 인장균열이라기보다는 기존 균열 내에 비교적 치밀하게 닫혀있던 부분이 높은 압력에 의해 일부 재개방된 것으로 판단하는 것이 보다 타당할 것이다. 또한 시험 전에는 텔레뷰어 장비가 나공 구간 내에서 저항을 받아 506.3 m 아래로 진입할 수 없었으나(Fig. 10(a)의 no image 구간) 시험 후에는 진입해 영상을 확보할 수 있었는데, 이로 보아 반복되는 물 주입과 가압에 의해 공저면의 침전물이 압밀되어 하강하고 일부는 시험 구간 내 단열로 침투하는 등의 변화가 있었을 것으로 추정되며, 앞서 설명한 균열개구압력 상승 원인에 대한 추론을 어느 정도 뒷받침한다.

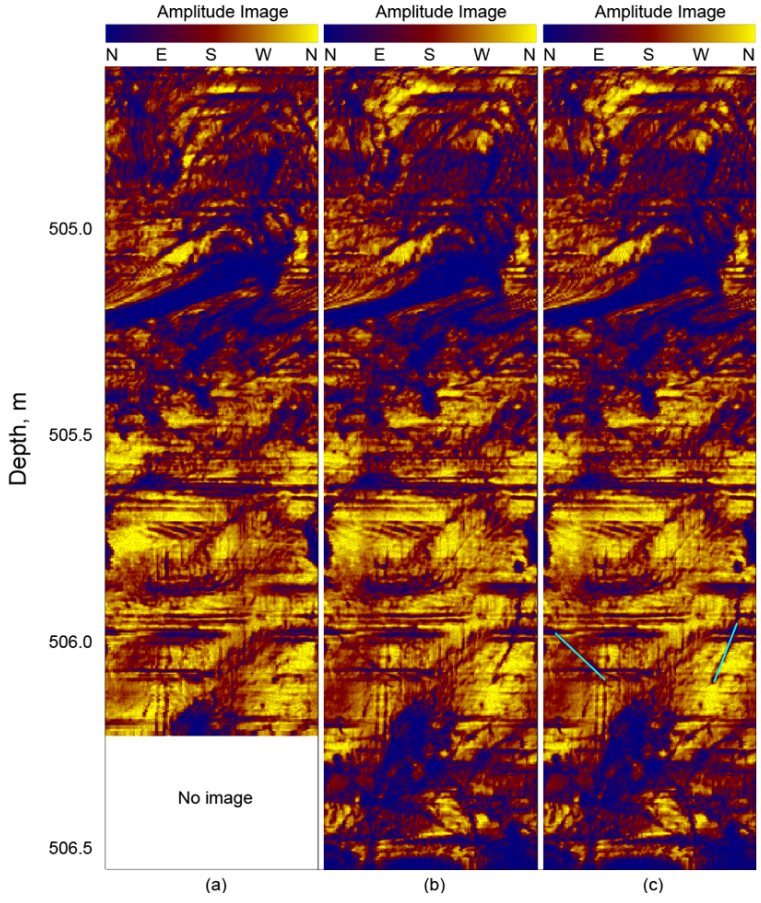

Fig. 10. Unwrapped borehole wall acoustic-images showing (a) before and (b), (c) after the Extended leak-off test conducted. (c) is the same image of (b) including interpretation of re-open crack represented with lines

4. 대구경 시추공 암반 투수성 해석

본 장에서는 XLOT 결과의 활용 예시 중 하나로 현장에서 얻어진 유량 및 압력 자료를 이용해 시험 구간 내 암반의 투수성을 해석한 내용을 소개한다. 아래에 XLOT 자료로부터 암반 투수성을 해석하는 데 필요한 몇 가지 가정 사항 및 관련 내용 등을 간략히 소

개하겠지만, 이에 대한 솔루션들은 여러가지 형태로 이미 잘 알려져 있으며(Theis, 1935, Cooper and Jacob, 1946), AQTESOLV와 같은 상용소프트웨어 또는 MATLAB 및 Python 기반 오픈소스코드인 Hytool (Renard, 2017) 등을 활용해 시험 자료를 비교적 간단히 해석할 수 있다.

지표에서 시추공을 통해 주입된 물은 설치된 철재 케이싱의 심각한 변형 또는 파손 등이 있지 않는 한 케이싱 아래로 굴착된 나공(open hole) 구간으로 도달한다. 이 때 지표로부터 주입되는 물의 양과 시험 구간 내 암반(또는 단열)을 통해 배수(drainage)되는 물의 양이 동일하다면 주입에 의한 압력 변화는 나타나지 않을 것이다. 그러나 암반의 배수용량을 초과하는 유량으로 물을 주입하는 경우 누출되지 못하고 시추공 내에 저류되는 물에 의해 시험 구간 내 압력은 증가한다.

물 주입에 따른 시추공 암반의 압력 증가 양상은 가압 초기 단열 팽창 및 유체의 비정상적 유동(non-steady state flow) 등에 기인해 어느 정도 편차가 있겠지만, 공벽 주변으로 일정 정도 벗어난 현장 규모에서 암반은 등방성(isotropic), 균질성(homogeneous) 매질이며, 시험 구간으로 주입된 물의 흐름이 방사상 정상류 유동을 보인다고 가정했을 때, 지속적인 물 주입(t, time)에 따른 시추공 주변(r, radius)의 압력 변화량(s(r,t))은 아래와 같은 식 (1)로 표현할 수 있다(Theis, 1935).

$$s(r,t) = H_0 + H(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \text{ , where } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \tag{1}$$

위에서 H_0는 초기 수두(시험구간에서는 정수압), $H(r,t)$는 주입에 따른 수두 변화량으로, 주입시험에서 시험 구간 내 압력 증가량은 주입 유량(Q)과 암반 고유의 투수량계수(T, transmissivity)에 의해 지배된다. 일정한 유량으로 물을 주입하는 XLOT의 경우 압력 증가 양상은 당연히 주입 유량이 많을수록, 또는 암반의 투수량계수가 낮을수록 가파를 것이며, 따라서 XLOT 가압 조건에서 주입량(또는 시간) 대비 압력 증가 양상을 분석하면 시험 구간 암반의 수리 상수들을 추정할 수 있다.

아래 Fig. 11은 본 XLOT에서 수행된 7번의 반복 가압 사이클 동안 물 주입에 따른 공내 압력 변화 양상을 보여준다. 대개 가로축을 주입 시간으로 표현하는 것이 일반적이지만, 앞서 언급했듯이 본 현장 시험에서는 가압 중 펌프 맥동에 의해 순간적인 주입량 편차가 있기 때문에, 주입 시간 동안 실시간 기록된 주입 유량을 환산한 적산유량을 산정해 도시하였다.

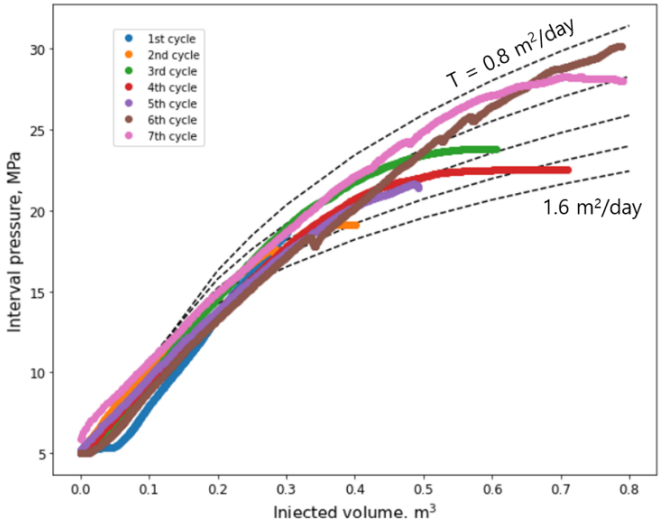

Fig. 11. Relationship between interval pressure and injected water volume corresponding to the seven repeated injection cycles

총 7회의 반복 가압시험 동안 관찰된 물 주입에 따른 압력 증가 양상은 가압 초기에 다소 차이가 있기는 하지만 모든 사이클에서 비교적 유사한 압력 증가율(기울기)을 보였다. 이는 XLOT 수행 동안 시추공 암반 내에 새로운 균열의 생성(수압파쇄 등)이나 기존 균열의 수리전단 등에 기인하여, 구간 내 뚜렷한 투수성 변화가 발생하지 않았을 것임을 시사한다. 위 그림에서 6-7차 가압 사이클의 유량-압력 곡선을 살펴보면, 선형적인 압력 증가 양상이 꺾일 때까지 보다 많은 누적 유량이 필요로 했는데, 이는 앞에서 서술한 2차 균열의 성장 가능성을 뒷받침한다고 볼 수 있다. 시험 구간 주변 암반 내 1차 균열의 모든 공간을 확장된 후 주입수가 2차 균열에 도달하기까지는 보다 많은 유량이 필요로 되기 때문이다.

Fig. 11의 XLOT 유량-압력 곡선과 같이 도시된 점선은 일정한 유량으로 물을 주입할 때 투수량계수(T)에 따른 공내 압력 증가를 모사하는 Theis fitting curve 이다. 이를 통해 대구경 시추공 주변 암반의 투수량계수는 약 0.8-1.6 m^2/day 범위로 유추할 수 있으며, 이는 약 4 m 길이의 나공 구간을 고려하여 약 2.3-4.6×10^{-6} m/sec의 수리전도도(hydraulic conductivity, K)로 환산된다. 이는 같은 부지 내에 위치한 조사시추공에서 수행된 정밀수리시험(Bae et al., 2021)으로부터 얻어진 수리전도도 분포 약 1.99×10^{-8} - 5.24×10^{-6} m/sec 범위와 유사한 결과를 보여준다.

5. 맺음말

본 기술보고에서는 심부 암반 지구물리계측 목적에 따라 설계된 대구경 모니터링공 굴진 과정 중 수행된 Extended Leak-Off Test (XLOT)사례를 소개하였다. 본 시추공 굴착 현장에서 진행된 XLOT는 지표에 설치된 유량/압력 계측 장치를 제외하고는 주입펌프, 매니폴드 시스템 등의 시추 공정에 사용된 설비들을 그대로 활용하여, 패커 설치 등 추가적인 절차에 필요한 시간 소요 및 부대장비 소모 없이 수행되었다.

물 주입에 따른 공내 압력 증가 양상은 아마도 가압초기에 시추공벽 스킨 효과(skin effect), 단열 팽창 등으로 추정되는 원인에 의해 다소 차이를 보였지만, 총 7회의 반복 시험 동안 전반적으로 유사하게 관찰되었다. 이를 동일한 유량 조건에 대하여 암반 고유 투수량계수에 따른 이상적인 압력 증가 양상과 함께 도시하여, 본 대구경 시추공 주변 암반의 수리전도도를 일정 범위 내로 유추할 수 있었다.

최근 들어 국내에서도 여러가지 목적의 심부 암반 특성화 연구 및 개발 수요가 증가함에 따라서 시추공 물리검층, 수압파쇄시험 등의 현장 시험들에 대한 수요도 함께 증가할 것으로 예상된다. 이러한 관점에서 본 현장에 적용된 XLOT 기법은 앞으로 이루어질 여러 형태의 관련 사업에서, 시추공 굴진 과정 중 별도의 독립적인 장비나 추가 시간의 소요 없이 암반의 수리특성을 파악하기 위한 비교적 용이한 시험법으로 잘 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업 '한반도 동남권 지진·단층 활동 평가를 위한 심부 복합지구물리 모니터링 시스템 구축' 과제(GP2018-009)의 일환으로 작성되었음을 밝힌다. 현장 시험 준비 및 수행 과정에 도움을 주신 동남권 심부 복합지구물리 관측소 구축 용역 사업 (주)테라이지-(주)어스이엔지 컨소시엄 및 연구원 내외 관계자들께 감사드린다.

REFERENCES

Aadnoy, B.S. and Larsen, K., 1989, Method for Fracture-Gradient Prediction for Vertical and Inclined Boreholes, SPE Drill. Eng., 4, 99-103.

Addis, M.A., Hanssen, T.H., Yassir, N., Willoughby, D.R., and Enever, J., 1998, Comparison of leak-off test and extended leak-off test data for stress estimation, Proc. SPE/ISRM Rock Mech. in Petrol. Eng. Conf., 1, 131-140.

Bae, S., Kim, H., Kim, J., Park, E. S., Jo, Y., Ji, T., and Won, K., 2021, Hydraulic Characteristics of Deep and Low Permeable Rock Masses in Gyeongju Area by High Precision Constant Pressure Injection Test, Tunnel and Underground Space, 31(4), 243-269.

Blanton, T.L., 1982, An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures, In SPE unconventional gas recovery symposium, SPE-10847-MS,

Chang, C., Jo, Y., Quach, N., Shinn, Y. J., Song, I., and Kwon, Y. K., 2016, Geomechanical characterization for the CO_2 injection test site, offshore Pohang Basin, SE Korea, Proceedings of 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 1064-1069.

Cheng, W., Yan, J., Mian, C., Tong, X.U., Zhang, Y., and Ce, D., 2014, A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space, Pet. Explor. Dev., 41(3), 371-376.

Choi, S.-J., Park, K.G., Park, C., and Lee, C., 2021, Protection and Installation of FBG Strain Sensor in Deep Boreholes for Subsurface Faults Behavior Monitoring, Sensors, 21, 5170.

Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, Trans., Am. Geophys. Union, 27(4), 526.

Janiszewski, M., Shen, B., and Rinne, M., 2019, Simulation of the interactions between hydraulic and natural fractures using a fracture mechanics approach, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 11(6), 1138-1150.

KIGAM, 2021, Development of integrated geophysical monitoring system at depth for assessing earthquake and fault activities at south-eastern Korea, KR-2021-Basic-005-2021, KIGAM, Daejeon, South Korea

Kim, S.-K., Chang, C., Shinn, Y.J., and Kwon, Y.K., 2018, Characteristics of Pohang CO_2 Geological Sequestration Test Site, J. Eng. Geol., 28(2), 175-182.

Kunze, K.R. and Steiger, R.P., 1991, Extended Leakoff Tests to Measure In Situ Stress During Drilling, 32nd US Symp. Rock Mech., Norman, Oklahoma, ARMA-91-035.

Lavrov, A., Larsen, I., and Bauer, A., 2016, Numerical modelling of extended leak-off test with a pre-existing fracture, Rock Mech Rock Eng, 49(4), 1359-1368.

Lin, W., Yamamoto, K., Ito, H., Masago, H., and Kawamura, Y., 2008, Estimation of Minimum Principal Stress from an Extended Leak-off Test Onboard the Chikyu Drilling Vessel and Suggestions for Future Test Procedures. Scientific Drilling, 6, 43-47.

Postler, D.P., 1997, Pressure Integrity Test Interpretation, SPE/IADC Drill. Conf., SPE-37589-MS.

Quach, N.Q., Jo, Y., and Chang, C., 2018, Rock Permeability Estimation from Hydraulic Injection Tests in a Sealed Borehole Interval. J. Eng. Geol., 28(1), 1-9.

Raaen, A.M., Horsrud, P., Kjørholt, H., and Økland, D., 2006, Improved routine estimation of the minimum horizontal stress component from extended leak-off tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43(1), 37-48.

Renard, P., 2017, Hytool: an open source matlab toolbox for the interpretation of hydraulic tests using analytical solutions, The Journal of Open Source Software, 2(19), 441.

Sarmadivaleh, M., Rasouli, V, 2014, Modified Reinshaw and Pollard criteria for a non-orthogonal cohesive natural interface intersected by an induced fracture, Rock Mech. Rock Eng., 47(6), 2107-2115.

Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Trans., Am. Geophys. Union, 16(2), 519-524.

White, A. J., Traugott, M. O., and Swarbrick, R. E., 2002, The use of leak-off tests as means of predicting minimum in-situ stress, Petroleum Geoscience, 8(2), 189-193.

Zang, A., Zimmermann, G., Hofmann, H., Niemz, P., Kim, K.Y., Diaz, M., Zhuang, L., Yoon, J.S., 2021, Relaxation damage control via fatigue-hydraulic fracturing in granitic rock as inferred from laboratory-, mine-, and field-scale experiments, Scientific reports, 11(1), 1-16.

Zhang, J. and Yin, S.X., 2017, Fracture gradient prediction: an overview and an improved method, Petroleum Science, 14(4), 720-730.

Zhang, L., Zhou, J., Braun, A., and Han, Z, 2018, Sensitivity analysis on the interaction between hydraulic and natural fractures based on an explicitly coupled hydro-geomechanical model in PFC2, J. Pet. Sci. Eng., 167, 638-653.