TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.30, No.6, 2020, pp.519-539
https://doi.org/10.7474/TUS.2020.30.6.519 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

TECHNICAL NOTES

점토질 퇴적암 내 굴착영향영역 투수특성의 시간경과 변화 파악을 위한 수치해석기법에 대한 고찰

김형목[1], **박의섭**[2*]

[1]세종대학교 지구자원시스템공학과 교수, [2]한국지질자원연구원 지질환경연구본부 책임연구원

Review of Numerical Approaches to Simulate Time Evolution of Excavation-Induced Permeability in Argillaceous Rocks

Hyung-Mok Kim[1] **and Eui-Seob Park**[2*]

[1]Professor, Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University,
[2]Principal Researcher, Deep Subsurface Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

***Corresponding author:** espark@kigam.re.kr

Received: December 14, 2020
Revised: December 21, 2020
Accepted: December 23, 2020

ABSTRACT

We reviewed numerical approaches to assess a hydraulic properties of excavation-disturbed zone (EDZ)created in argillaceous sedimentary rocks. It has been reported that fractures in the sedimentary rocks containing expansive clays are gradually closing due to swelling and their permeabilities are evolving to the level of in-tact rock, which is known as a self-healing or self-sealing process. The numerical approaches introduced here are capable of simulating spatio-temporal variation of EDZ permeability during long-term operation of a repository by including the self-healing characteristics of fractures, which wa observed in laboratory as well as in-situ experiments, The applicability of the numerical approaches was verified from the comparison to in-situ measurements of EDZ permeability at underground research laboratories.

Keywords: EDZ, Argillaceous Sedimentary rock, Self-healing, Self-sealing, Permeability

초록

본 고에서는 점토질 퇴적암 부지에 건설되는 처분갱도 주변 굴착영향영역에서의 투수특성을 평가하기 위한 수치해석기법을 검토하였다. 팽창성 점토를 함유한 퇴적암에 형성된 굴착영향영역 내 균열은 포화과정에서 점진적으로 간극을 상실하고 주변 모암의 투수계수에 수렴해 가는 자기 치유(self-healing) 혹은 자기 밀봉(self-sealing) 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 본고에 소개된 수치해석기법은 실내 및 현장실험을 통해 관측된 균열의 자기 치유 거동을 고려함으로써 처분장 건설 후 장기 운영과정에서 예상되는 굴착영향영역 투수계수의 시공간적 변화를 파악할 수 있는 특징이 있다. 지하연구시설 내 굴착 갱도 주변에서 현장투수시험을 통해 획득한 투수계수 측정치와 수치해석에 의한 결과를 비교 분석함으로서 활용타당성을 검증하였다.

핵심어: 굴착영향영역, 점토질 퇴적암, 자기치유, 자기밀봉, 투과계수

Ⓒ The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2020. 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.

1. 서 론

고준위방사성폐기물(사용후핵연료) 처리를 위한 관리 기본계획이 2016년 7월 수립된 바 있다. 관리 기본계획에는 인허가용 지하연구시설, 중간저장시설, 영구처분시설을 하나의 부지에 단계적으로 확보하고 안전과 경제성을 모두 지향하는 핵심 관리기술을 적시에 개발하여 관리시설을 운영하고 관련 정보를 상시 공개하는 등의 내용을 포함하고 있다. 또한, 2020년 지하연구시설 부지선정, 2030년 처분 실증연구 착수, 2051년 영구처분시설을 운영하는 일정으로 '고준위방사성폐기물 관리절차에 관한 법률' 상정까지 추진된 바 있다. 그러나, 원전지역 주민, 시민사회단체 등 다양한 분야의 의견 수렴이 충분하지 못했다는 지적이 대두되어 2019년 재검토위원회가 출범하여 현재까지 관리정책 방향을 확정하지 못한 상태이다.

2017년 12월부터 시행되고 있는 '고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준'에서 '심층처분'이란 방사성폐기물을 사람의 접근과 방사성핵종의 생태계 유입이 제한될 수 있도록 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리시키는 것으로 정의되어 있다. 처분시설 부지는 미래에 지하자원의 탐사나 지하개발, 고고학적 발굴과 같은 굴착 활동이 일어날 가능성이 낮은 곳이어야 하고, 지질학적으로 안정된 곳으로서 해당 처분시스템의 성능기간에 걸쳐 구조적인 변형이 일어날 가능성이 낮은 곳이어야 한다. 또한, '처분시스템'은 방사성폐기물, 공학적 방벽을 비롯한 설계특징, 천연방벽, 방사선영향에 연관되는 부지환경, 처분시설 운영관리 등 처분시설의 안전성을 구성하는 성분 모두를 지칭하는 것으로 '천연방벽'과 '공학적 방벽'으로 세분할 수 있다. '공학적 방벽'이란 처분환경에서 방사성폐기물의 유출과 처분시설로의 지하수 침투 또는 사람의 침입을 제한하는 역할을 하는 인공물로서 포장용기, 처분용기, 완충재, 처분고 구조물, 뒤채움재 등을 의미하고 '천연방벽'은 공학적 방벽을 둘러싼 자연적인 지하구조 및 지표구조로서 역학적·수리지질학적·지화학적으로 안정된 상태에서 해당 방사성폐기물에 함유된 장반감기 방사성핵종의 이동을 지연시키고 방사성물질이 생태계로 유출하는 것을 제한하는 성질을 가져야 한다. 자연방벽을 이루는 처분장 부지는 크게 결정질암과 퇴적암으로 이분할 수 있다.

고준위방사성폐기물의 심층처분장 계획 초기에는 처분장 굴착 갱도의 역학적 안정성 확보 측면에서 상대적으로 고강도(high strength)의 결정질암에 처분장을 건설하려는 계획이 지배적이었다. 결정질암의 높은 강도는 처분장을 1,000 m 심도수준에 위치시킬 수 있어 지표 생태계와의 격리 관점에서는 유리할 수 있기 때문이다. 그러나, 결정질암은 다양한 스케일의 불연속면(discontinuity)이 필연적으로 존재하기 때문에 이들 연결된 불연속면을 통한 지하수 유동과 방사성 핵종의 누출 위험성이 지적되어 왔다(Choi et al., 2020). 반면 퇴적암질에 건설되는 처분장은 결정질암에 비해 처분장 심도가 얕아지는 제약은 있지만 암반 굴착 과정에서 형성되는 처분장 주변 균열의 자기치유(self-healing) 특성이 확인되면서 핵종 누출 차단 및 밀봉(sealing) 성능 관점에서 상대적으로 유리한 장점이 있다. 균열의 자기치유 특성은 퇴적암에 함유된 팽창성 점토가 포화과정에서 함수율 증가로 인해 체적이 팽창하는데 기인한다. 이후 스위스, 일본 등의 국가에서는 결정질암에의 처분연구를 유보하고 퇴적암질 처분후보지를 중점 검토 대상으로 연구개발 및 사업화를 추진하고 있다. Table 1은 퇴적암에의 처분장 건설을 추진하고 있는 주요 각국의 지하연구시설 및 부지특성을 요약한 것이다.

고준위방사성폐기물 심층처분시설로부터 방사성 핵종의 누출에 영향을 미치는 다양한 인자 중 처분갱도 주변 굴착영향(손상)영역(Excavation Disturbed or Damaged Zone, EDZ)에서의 수리 유동 특성의 영향은 선행연구를 통해 잘 알려져 있다(Lee, 2007, Kwon & Cho, 2008, Tsang et al., 2005, Park & Kwon, 2017, Birkholzer et al., 2019, Kwon & Min, 2020). EDZ 에서는 갱도 굴착 결과로 암반 내 응력의 재분배 및 집중이 발생하여 많은 균열이 형성되고 연결되기 때문에 굴착 과정뿐만 아니라 굴착 후 처분공 폐쇄 및 처분장 운영 과정에서의 지하수 유입량이 증가하게 된다. Fig. 1은 응력조건에 따른 균열 발생 양상을 나타낸 것으로 EDZ

Table 1. Properties of the different URLs constructed in sedimentary rocks (NWMO, 2011)

URL Site	Rock Type/ Formation	In situ Stress (MPa)			UCS (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Porosity	Permeability (m^2)	Age (Ma)
		σ_v	σ_H	σ_h					
HADES URL	Boom Clay	4.5 (isotropic)			2	0.3	0.39	$2/4 \times 10^{-12}$	30
Tournemire URL	Toarcian Argillite	4 isotropic			13-32	28/9 (5)	0.06-0.09	$10^{-13} - 10^{-15}$	~ 200
Mont Terri	Opalinus Caly	6.5 (1)	4.5	2.5	10-16 (anisotropic)	10/4	0.1-0.16	$0.8\text{-}2 \times 10^{-13}$	180
Laboratoire Meuse Haute Marne	Callovo Oxfordian Argillite	14.8 – 12.7 (2)	12.7	12.4	21 (mean)	13-16	0.11-0.17	$<10^{-12}$	150
Tono Mine	Tertiary sediments	3	1.7	1.5	6.6	2.8	0.26	$10^{-7} - 10^{-11}$ (3)	10
Horonobe URL	Wakkanai				10-35	2-5	0.35-0.5	$10^{-5} - 10^{-11}$ (in situ) (4) $10^{-11} - 10^{-13}$ (lab matrix)	3-13
	Koetoi				0-8	0.5-	0.6-0.62	$10^{-7} - 10^{-9}$ (in situ)	3-4

Notes: (1) From Marschall et al. (2008), but note difficulties in stress measurements as discussed in Martin and Lanyon, (2003), (2) From Wileveau et al. (2007) for measurements at ~500 m depth, (3) Pre-excavation measured permeability (Sato et al. 2000), (4) Reported range from in situ hydraulic testing (JNC 2003), (5) Modulus values given as a/b refer to parallel and normal to bedding, respectively.

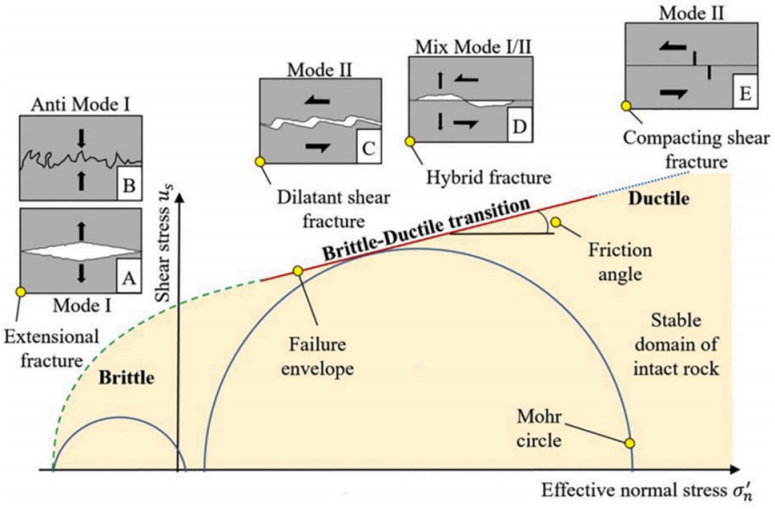

Fig. 1. Simplified Mohr-Coulomb failure criterion diagram illustrating failure at different stress conditions (Phillips et al., 2020)

와 같이 낮은 수직응력에 해당하는 조건에서는 체적팽창(dilatatncy)을 동반한 균열 간극이 큰 전단(Mode II) 균열이 발생하여 지하수 유동 경로를 제공할 수 있다. 처분갱도로의 지하수 유입량 증가는 처분용기와 지하수 반응 속도 및 부식 속도를 가속하여 부식가스(corrosion gas)에 의한 처분장 내 압력 상승을 초래할 뿐만 아니라 및 방사성 핵종이 지하수 흐름에 노출되는 시간이 당초 계획 설계치보다 짧아진다. EDZ 내 균열 밀도의 증가는 지하수 유동 특성을 수 백에서 수 천배까지 증대시켜 지하수 유동을 통한 방사성 핵종이 지표 생태계에 도달하는 방사선량(radiation dose) 계산에 막대한 영향을 미칠 수 있으므로 처분장 건설과정에서 엄격히 관리되고 평가되어야 한다. 인허가 절차를 완료하고 처분장 건설이 진행 중인 핀란드 Olkiluoto 부지에서도 처분 공동 주변 EDZ의

투과특성이 가스압 상승 및 부식 가스 이동에 미치는 영향을 상세 검토한 바 있다. Fig. 2는 가스 유동 통로를 제공하는 지질구조와 EDZ를 포함하여 가스 발생, 가스압 상승, 공극수압 변화, 가스 확산(diffusion) 및 용존(dissolution) 등의 영향을 분석한 결과 이다. 처분갱도 주변 모암의 투과량계수(transmissivity)는 1×10^{-12} m^2/s 수준으로 투과성 EDZ의 경우(투과계수는 3×10^{-20} m^2 및 3×10^{-19} m^2수준), 가스압은 부지 최소주응력인 9 MPa 이하의 값을 보였으나(EDZ leakage added) 완전불투과성 조건(No gas transport 및 Gas diss./diff only)에서는 이를 훨씬 초과하여 인장 균열 생성 등 역학적으로 불안정할 수 있음을 확인하였다.

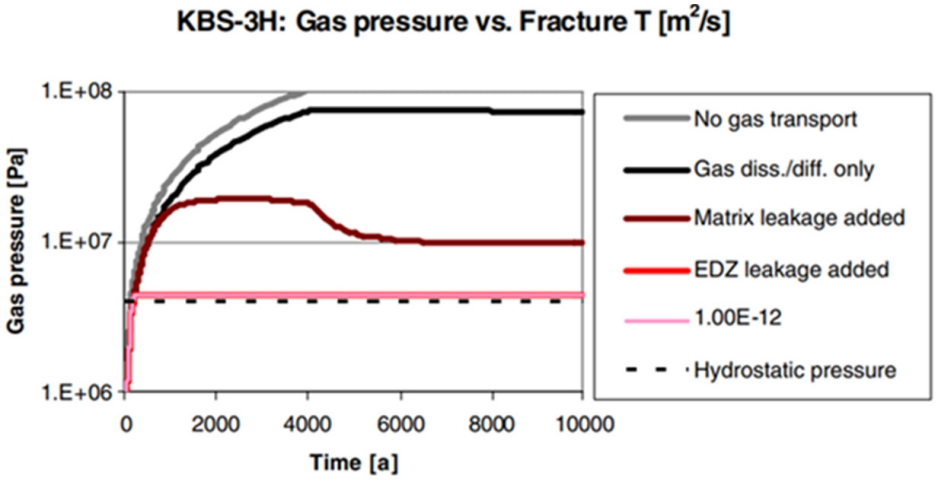

Fig. 2. Evolution of corrosion gas (b) for gas transport analysis at repository domain (Autio et al., 2006)

처분장 갱도 주변 EDZ 영역에서의 수리 특성을 평가하기 위한 실험적 방법으로는 시추공영상촬영장치(Borehole televiewer, BTV), 시추코어를 이용한 통한 균열 매핑, 변형률 측정 및 탄성파 속도 측정 등이 적용되어 왔다(e.g., Sato et al., 2000, Bossart et al., 2002, 2004, Shao et al., 2008, Baechler et al., 2011, Aoyagi et al., 2017, Armand et al., 2014). 이러한 현장 실험을 통해 EDZ의 투수 특성을 직·간접적으로 측정하고 추정하는 것은 고준위 방사성 폐기물 처분 연구 및 처분장 건설 계획에 반드시 필요한 과정이다. 현장 실험결과의 정밀도를 향상시키기 위해서는 충분한 사전 조사 결과를 바탕으로 적절한 실험 계획을 수립하는 것이 요구된다. 한편, 수치해석기법은 다양한 조건에 대한 검토 및 불확실성을 고려한 실험 계획 수립 및 결과 해석에 매우 유용할 수 있다.

고준위방사성폐기물 처분장 건설을 위한 국내 지질 환경은 결정질암에 적합하다는 의견이 지배적이나 최근 제4기 퇴적층을 중심으로 한 부지조사 계획 및 관련 물성 파악을 위한 연구개발 계획이 수립되고 있다 . 본 기술보고에서는 해외 사례 조사를 통해 이 암으로 대표되는 퇴적암질에서의 균열 자기 치유(self-healing) 특성 및 밀봉(sealing) 효과에 관한 실내 및 현장 실험 결과를 소개하고 일본 및 스위스의 처분연구 지하연구시설을 대상으로 수치해석기법을 활용하여 EDZ 투과특성을 추정한 사례와 그 의의를 검토하고자 한다.

2. 퇴적암 균열의 자기 치유(self-healing) 및 자기 밀봉(self-sealing) 특성

처분공 폐쇄 후 지하수 유동방향은 포화 상태의 원계(far field)로부터 불포화 상태의 EDZ로 형성된다. 점토질 암석의 경우 포화가 진행됨에 따라 부피 팽창에 의한 팽창압이 발생하는 것으로 알려져 있다. 함수율 증가에 따른 부피 팽창율은 불구속상태에서

10%까지 발생하고 팽창압의 경우 구속 조건에서 5~12 MPa에 달하는 것으로 보고된 바 있다. 따라서, 팽창성의 점토질 뒤채움재 설치 이후 EDZ에 작용하는 구속압은 증가하고 EDZ 내 균열은 수직응력 증가와 더불어 균열 간극이 지수적으로 감소한다. 균열의 투과특성은 균열 간극의 삼승에 비례하는 것으로 알려져 있으므로 이러한 균열 간극의 감소는 투과특성의 급격한 감소를 가져오게 된다. Fig. 3은 EDZ 내 균열의 형성, 재포화 및 자기 밀봉 과정을 도식화한 것이다. 굴착 전 닫혀있던 균열은 응력 해방에 의한 인장력이 작용하여 벌어지게 되고 균열 간극이 크게 증가하게 된다. 반면 주변 모암에서의 공극 변화는 상대적으로 매우 작다. 또한 균열 내 간극은 불포화 상태로 간극 내 유체 압력은 대기압과 동일하여 주변 모암은 높은 가스침투압(gas entry pressure)으로 인해 포화상태를 유지한다. 굴착 후 처분장 운영이 시작되면 시간 경과에 따라 원계에서의 유입수량이 증가하면서 모암 매질 내 모세관압이 점진적으로 감소하고 균열 내부도 포화상태에 도달하게 된다. 주변 원계로 부터의 공극수 유입은 모암 매질의 부피팽창과 공극률 증가를 초래하여 이는 매질에 내재된 균열의 구속압을 증가시켜 간극은 줄어들고 균열의 투수특성은 급격히 감소하게 된다. 이러한 과정은 유효 응력과 평형을 이룰 때까지 진행되어 균열의 투수특성은 감소하고 매질의 투수특성은 점진적으로 증가하여 균열을 포함한 일정 영역을 대표할 수 있는 값으로 수렴하게 된다.

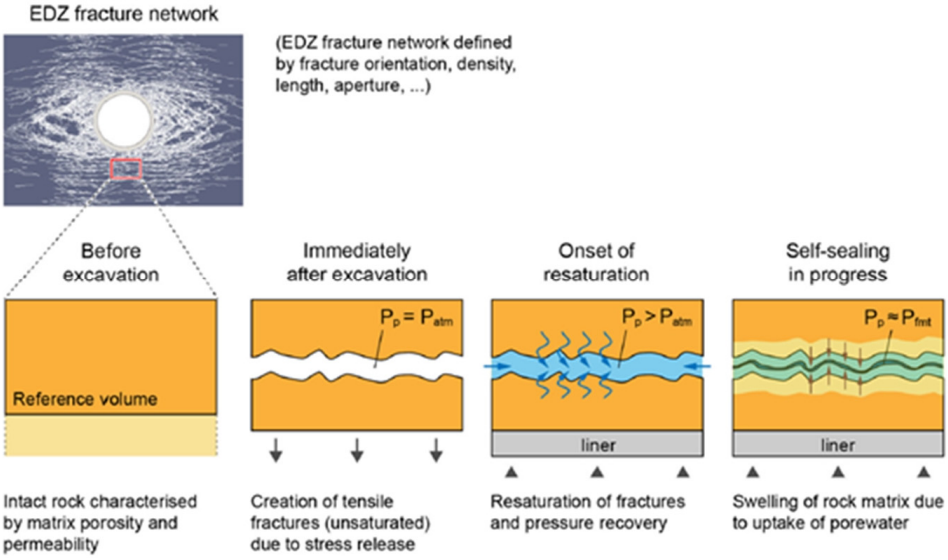

Fig. 3. Concept of EDZ fracture closure from early excavation to static formation pressure recovery (Marschall et al., 2017)

Voltolini & Ajo-Franklin(2020)은 스위스의 Opalinus clay 시료를 대상으로 구속압 증가 및 CO2로 포화된 물 주입에 따른 균열폭의 변화를 synchrotoron X-Ray Micro-Computed Tomography(XR μCT) 기술을 활용하여 확인하였다. Fig. 4는시간 경과에 따른 축방향 및 횡방향 시료 단면에서의 균열폭을 나타낸 것으로 사진에서 어둡게 표현되는 균열 간극이 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 물로 포화시키기 전후의 균열 간극 및 균열 접촉면의 변화를 계산하여 유체유동 경로가 차단되어 유체투과도가 감소할 수 있음을 보였다. Fig. 5에서 맨 우측 사진의 초록색 원은 간극 변화가 크게 발생한 부분을, 하얀색 영역은 접촉 면적이 증가한 곳을 표시한 것으로 점토질 모암이 포화되어 발생하는 체적팽창으로 인해 균열면의 접촉면적이 증가하고 간극은 감소하고 있다.

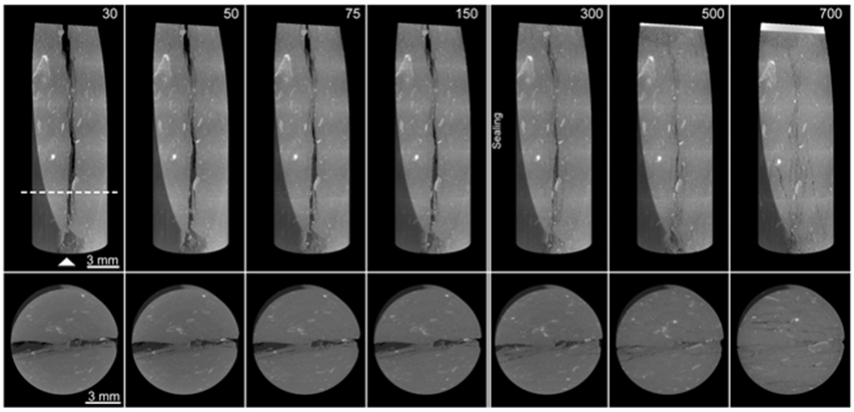

Fig. 4. Volume rendering CT images of the clay sample during the flow experiment (top: subvertical section, bottom: slice of the sample at the dashed line, Voltoni & Ajo-Franklin, 2020)

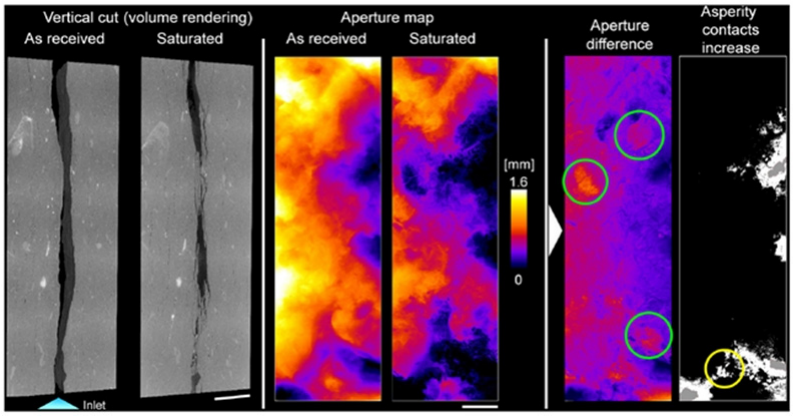

Fig. 5. The change of volume rendering image (left), aperture (middle), and asperity contact (right) due to hydration in the clay, Voltoni & Ajo-Franklin, 2020)

Zhang(2011)은 특별히 고안된 삼축셀 장비를 이용하여 실내 수리 실험을 실시하고 점토질암 균열의 자기 치유 특성을 파악하였다. 조사 대상 시료로는 프랑스의 Meuse/Haute-Marne 지하연구시설(MHM-URL)와 스위스의 Mont-Terri-URL 부지에서 채취한 Callovo-Oxfordian argillite(COX)와 Opalinus clay(OPA)를 사용하였다. 각각의 시료를 실험목적에 맞게 다양한 사이즈로 성형하여 사용하였는데 직경 대 길이비는 각각 50/50, 50/100, 100/200, 280/500 mm/mm이다. 시료의 길이 방향으로 인공 균열을 형성하여 다양한 구속압 조건, 온도, 가스 및 물 유동에 따른 자기 치유 현상을 관측하였다. Fig. 6은 실험에 사용한 삼축셀 장치로 암석시료는 재킷(jacket)을 이용하여 반경방향으로도 15 MPa까지 가압가능하다. 축방향으로 형성된 균열의 변형은 횡방향 변위계(circumferential extensometer)를 이용하여 측정하고 축방향 변위는 시료 상하단에 설치된 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)로 계측하였다. 탄성파 속도 측정을 통해서도 균열의 변형과 벌어짐 정도를 관측하였다. 조사 대상에 해당하는 균열의 투과특성 변화는 시료 하단으로부터 일정압력으로 질소 가스를 주입하여 측정하였다. Fig. 7은 처분장 장기 운영과정에서의 온도변화가 균열 투과 특성에 미치는 영향을 관측하기 위한 장치로 암석 시료를 투수시험 장치에 설치하여 2-3.5 MPa의 정수압으로 구속한 상태에서 오븐에서 20C°에서 90C°로 가열하면서 투수시험을 실시하였다. 투수시험을 위해서는 현지 조건을 고려한 합성 공극수(synthetic pore pressure)를 약 1.5년간 투과시켜 투수성의 변화를 관찰하였다.

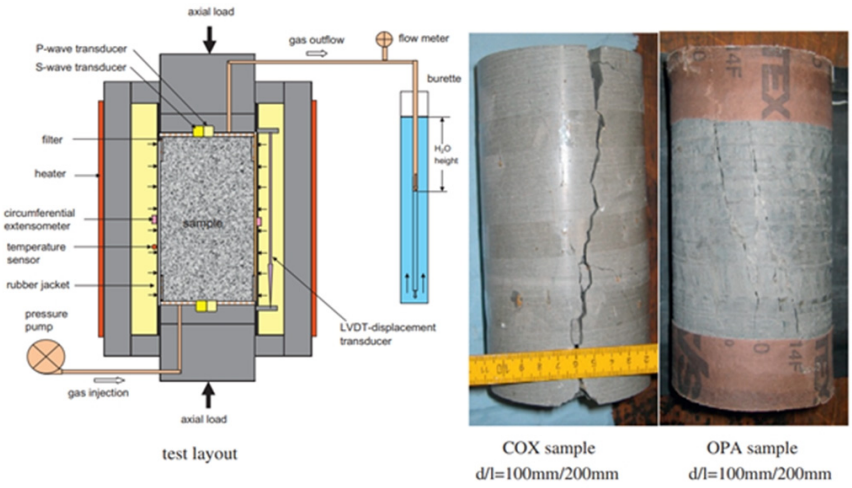

Fig. 6. Schematic diagram of the triaxial sealing tests on fractured samples (left: COX sample, right: OPA sample, Zhang, 2011)

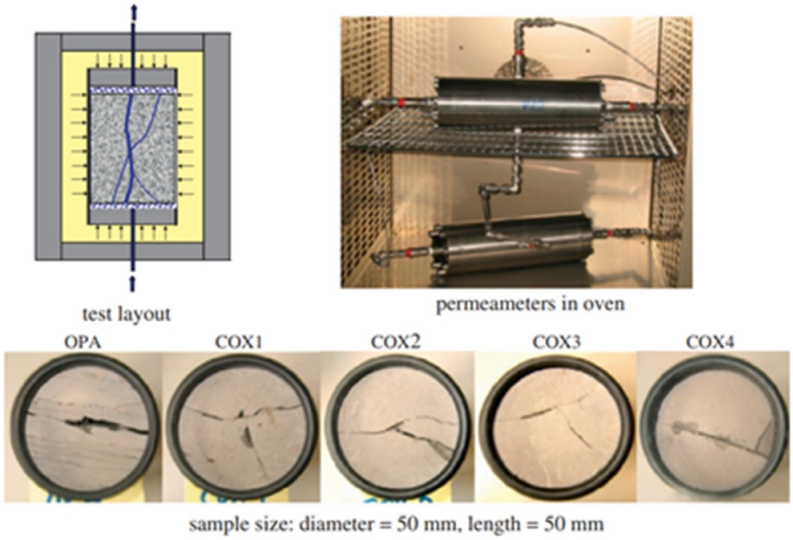

Fig. 7. Experimental setup for the long-term permeability measurement of fractured samples under different confining pressures and temperatures (Zhang, 2011)

Fig. 8은 실험을 통해 관측된 주요변수의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. COX와 OPA 시료 모두에서 구속압이 증가와 더불어 변형이 증대되고 특히 균열에서의 변위 발생으로 반경방향 변형률이 상대적으로 크게 발생함을 확인할 수 있다. 또한 균열 변형으로 인한 간극 감소는 탄성파 속도의 증가를 초래하고 균열 방향에 평행한 축방향으로의 투수성은 크게 감소하는 결과를 보였다. 투과계수는 COX 시료에서는 10^{-13} m^2에서 10^{-16} m^2, OPA 시료에서는 10^{-16} m^2에서 10^{-20} m^2까지 감소하는 결과를 보였고, 탄성파 속도는 COX에서 1,000 m/s에서 3,200 m/s, OPA에서 3,600 m/s로 증가하였다. 제하(unloading) 과정에서 탄성파 속도 및 투과계수가 일부 회복되는 경향을 보였으나 초기치에 비해서는 여전히 낮은 투과성으로 차수효과를 유지함을 알 수 있다.

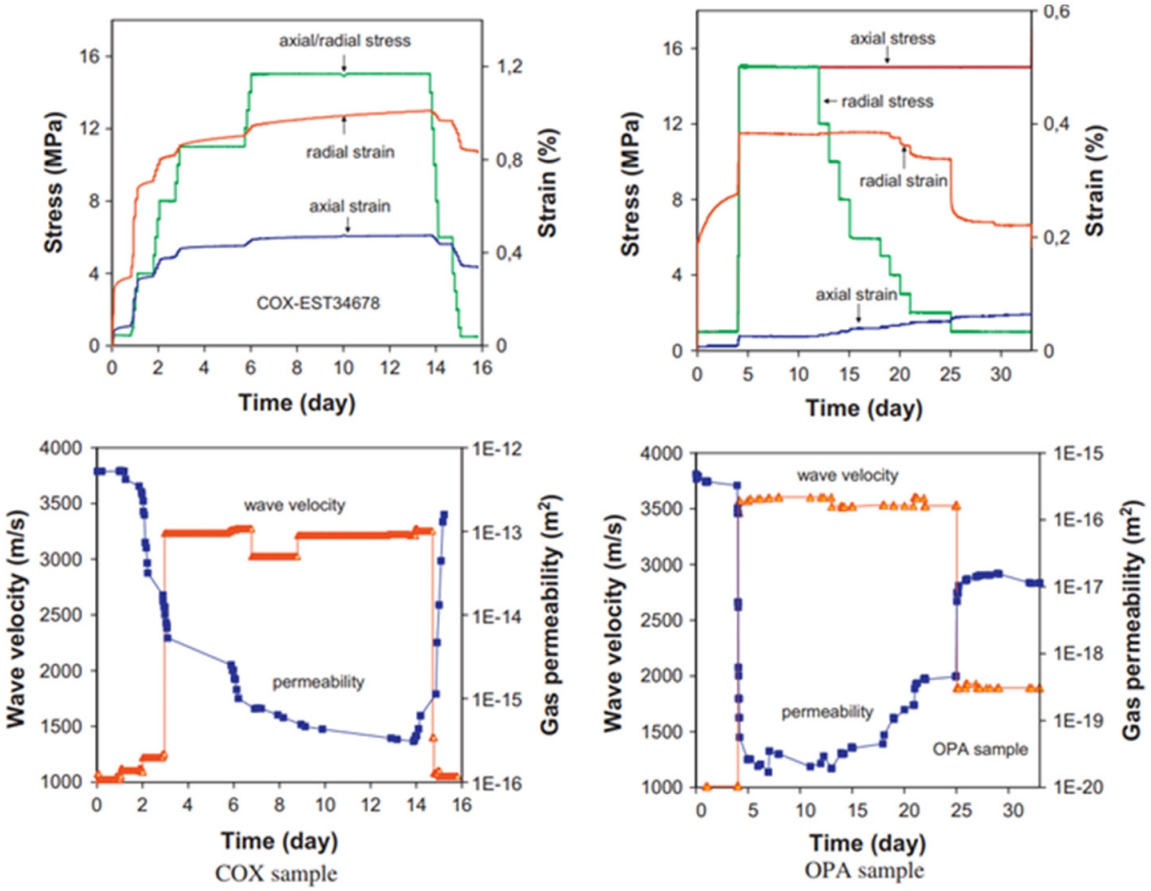

Fig. 8. Representative measurements (stress, strain, wave velocity and gas permeability) of fractured sample during loading and unloading (Zhang, 2011)

처분장 운영과정에서는 폐기물에서 발생하는 붕괴열로 인해 EDZ의 온도는 점진적으로 상승하게 된다. Fig. 9은 처분장 장기 운영과정에서 온도증가가 COX 및 OPA 시료의 투과특성에 미치는 영향을 관측한 결과이다. 폐기물 적치 후 초기 온도는 20C°로 설정하고 붕괴열로 인해 최고 90C°까지 단계별로 상승하는 것으로 가정하였다. 축방향 하중은 2.5 MPa, 구속압은 2 MPa로 일정하게 유지한 상태에서 1 MPa의 압력으로 유체를 주입하여 지하수 유동을 모사하였다. 초기 온도에 해당하는 20C° 부근에서는 함수율 증가에 따른 부피팽창이 발생하고 이에 따른 투수계수의 감소가 지배적으로 관측되었다. OPA시료에서는 1×10^{-15}에서 3×10^{-18} m^2, COX 시료에서는 1×10^{-17}에서 5×10^{-19} m^2까지 투수성이 감소하였다. 이후의 온도 증가 구간에서는 투수계수의 감소량이 둔화되는 양상을 보이다가 최고 온도 90C°이후 초기 온도 20C°까지의 냉각과정에서 일부 계단식으로 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과로부터 온도 변화에 따른 투과계수(k)의 감소량은 포화에 의한 변화량에 비해 상대적으로 크지 않음을 확인하였다.

점토질암에서의 균열 자기 치유 현상은 현장 실험에서도 보고되고 있다. Fig. 10은 Mont Terri URL의 Opalinus clay에 굴착된 갱도 주변 EDZ 영역의 투수량 계수를 장기 관측한 결과이다. 실제 처분장에서의 뒤채움재 설치 후 발생하는 벤토나이트의 팽창압에 해당하는 압력을 반경방향으로 최대 5 MPa까지 가압하고 800일 동안 투수량계수 변화를 관측한 결과, 초기 5×10^{-7} 에서 2×10^{-9} m^2/s 수준이던 EDZ 투수량 계수가 2×10^{-11} m^2/s까지 감소하는 것이 확인되었다.

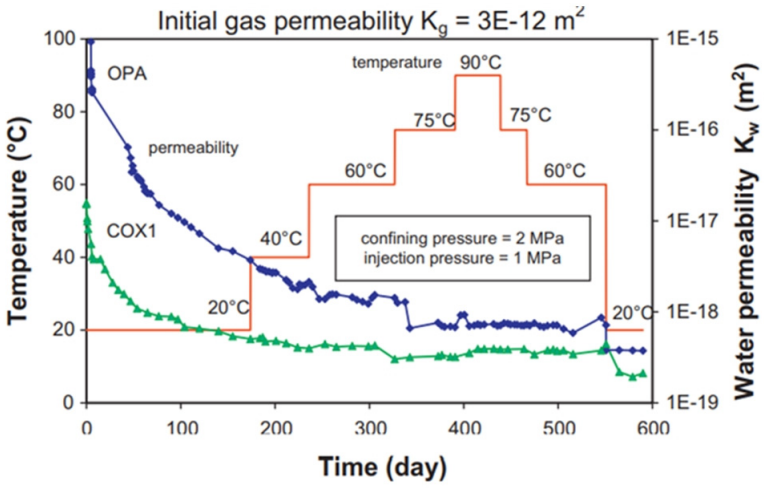

Fig. 9. Long-term evolution of water permeability on fractured COX and OPA samples under temperature change (Zhang, 2011)

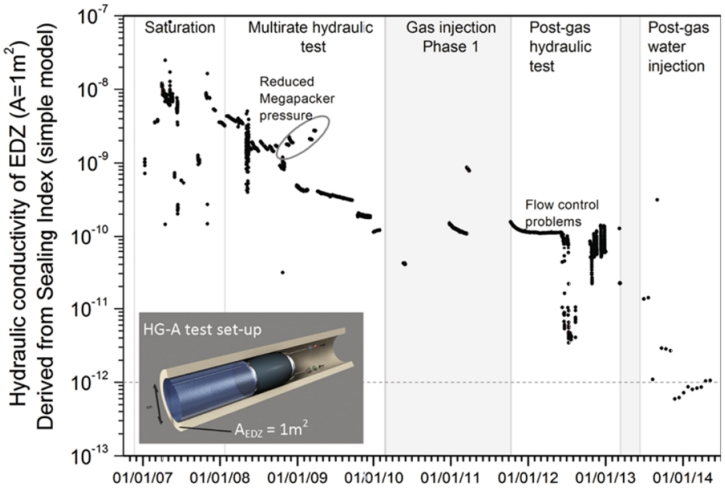

Fig. 10. Decrease of hydraulic conductivity in the EDZ during the different phases of the HG-A experiment. The hydraulic conductivity was estimated from a simplified sealing index (Marschall et al., 2008)

3. 일본 호로노베 지하연구시설(Horonobe Underground Research Laboratory) 굴착갱도 주변 EDZ 수리 특성의 수치해석적 평가

3.1 부지 특성 및 현장수리시험

일본원자력기구(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)에서는 퇴적암질 부지에서의 고준위방사성폐기물 처분장 건설 관련 연구 수행을 위해 홋까이도 호로노베 지역에 지하연구시설(Horonobe URL)을 건설하여 운영하고 있다. Fig. 11은 호로노베 URL의 갱도 배치도로 환기 목적의 중앙 수직갱을 포함하여 총 3개의 수직갱이 365 m 심도까지 굴착되었으며 140 m, 250 m, 350 m 심도에 이들 수직갱을 연결하는 현장실험 연구용 수평갱도가 건설되어 있다.

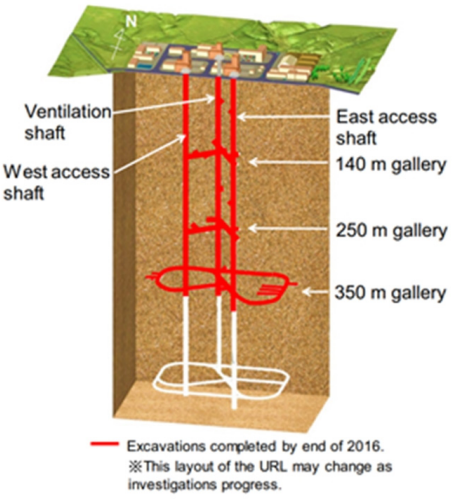

Fig. 11. Layout of the Horonobe URL in Japan (Aoyagi & Ishii, 2018)

EDZ에서의 투수특성 평가를 위한 조사는 350 m 심도의 Neogene siliceous mudstone으로 구성된 Wakkanai층에서 실시되었다. 먼저 굴착 갱도 주변의 균열 발달 양상을 파악하기 위하여 BTV 조사를 실시하였다. Fig. 12는 BTV 조사를 위한 시추공 위치와 투과특성 파악을 위해 수리 시험을 실시한 구간을 표시하였다. BTV는 고해상도의 CCD 카메라와 영상처리장치(BIP)로 구성되며 0.1 mm 미만의 균열 간극을 판별할 수 있는 해상도를 가진다. Fig. 13은 BTV 조사에서는 EDZ에서의 시추공벽 영상과 H2-1공에서의 시추코어 사진이다. 시추공벽 영상 분석 결과, 공동 벽면으로부터 0~0.2 m 구간에 균열이 집중적으로 분포되어 EDZ가 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한, 시추코어 단면에서 관측되는 깃털선(hackle plume) 분석을 통해 굴착과정에서 형성된 균열과 기존 균열을 판별할 수 있었다. Fig. 14는 BTV 조사와 수리시험을 통해 파악된 균열 위치와 투수 계수를 도시한 것으로 H2-1공에서는 EDZ에 해당하는 Sec-5 구간 투수계수가 3.53×10^{-6} m/s, 그 외 지역에서는 2.88×10^{-11} 에서 4.06×10^{-11} m/s 범위의 값을 보였다. 여타 시추공에서도 균열 분포에 따른 정도의 차이는 있으나 벽면에서 투수계수가 상대적으로 크게 나타나는 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

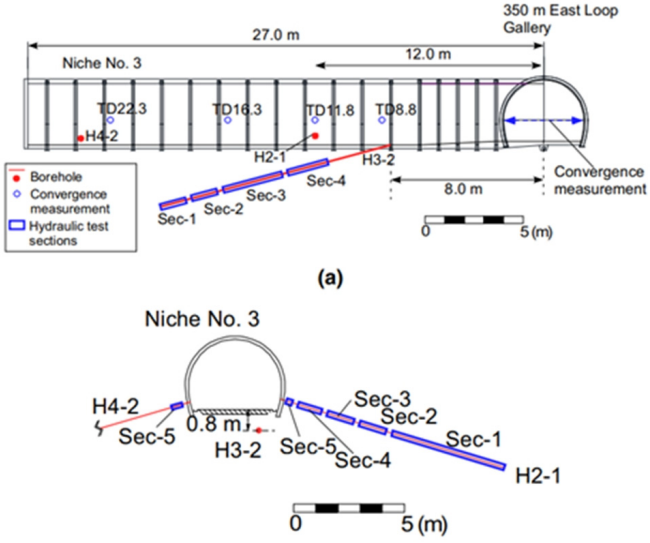

Fig. 12. Locations of boreholes and test sections of hydraulic conductivity (Aoyagi & Ishii, 2018)

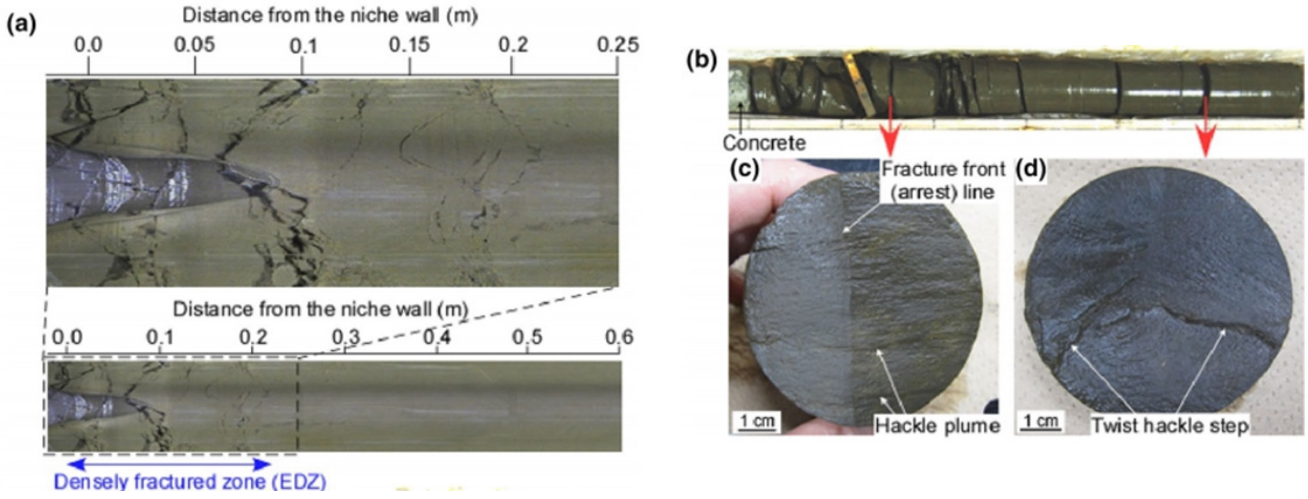

Fig. 13. Observed fracture distribution from BTV survey and rock core surface (Aoyagi & Ishii, 2018)

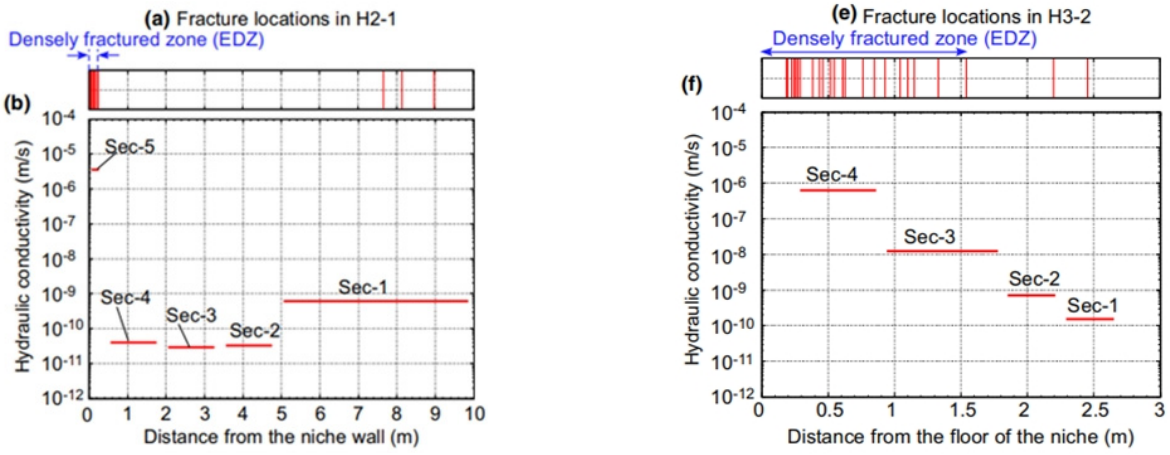

Fig. 14. Fracture distribution and the results of hydraulic tests (Aoyagi & Ishii, 2018)

3.2 수치 해석을 통한 EDZ에서의 투수특성 평가

Ishii(2015)는 유효 평균 응력과 인장 강도의 비로 식 (1)과 같이 Mean Stress Index(MSI)를 정의하고 MSI를 이용하여 굴착 갱도 주변 균열대에서의 투수량 계수를 평가하는 방법을 제안하고 6개소의 URL 부지(일본의 Horonobe URL, 스위스의 Wellenberg, 스웨덴의 Forsmark, 핀란드의 Olkiluoto, 스위스 북부, 영국의 Sellafield)를 대상으로 균열투수량계수와 MSI의 관계식을 도출한 바 있다(Fig. 15). Fig. 15에서 수평방향 막대는 인장 강도 측정치의 불확실성을 고려한 오차범위를, 점섬은 상관식의 표준오차 구간을 나타낸다.

$$MSI = \frac{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - p\right)}{\sigma_t} = \frac{\sigma_m{}'}{\sigma_t} \tag{1}$$

$$\log T = -3.51 \log MSI - 6.54 \quad \text{(standard error = 1.25 in logT)} \tag{2}$$

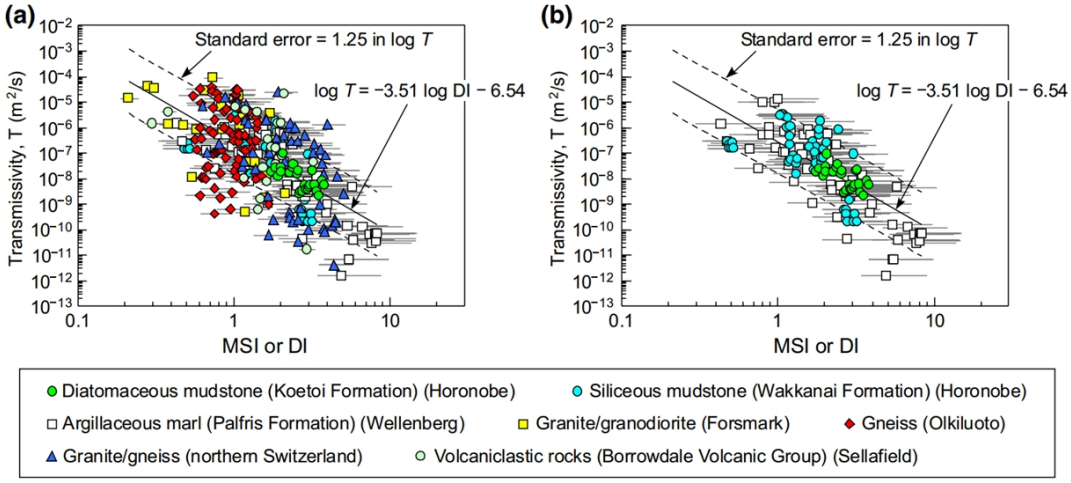

Fig. 15. Correlation between MSI and fracture transmissivity values in six different URLs (DI is the ductile index and indicate the same physical meaning of MSI, Ishii, 2017)

MSI를 이용한 투수특성 파악을 위해서는 먼저 갱도 주변 영역을 대상으로 수리-역학 연계해석을 실시하고 MSI 계산에 필요한 응력분포를 계산한다. 수리-역학 연계해석은 FLAC3D(v. 4.00.89) (Itasca Consulting Group 2009)을 이용하였으며 균열 발생 범위, 내공변위, 주변 공극수압 분포 등을 현장 모니터링 결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 확인하였다. Fig. 16은 해석 영역 및 조건을 나타낸 것으로 굴착 갱도 벽면에 설치되는 숏크리트 및 강지보재도 요소를 포함하고 모델 상부 및 우측 측벽 경계에서 공극수압을 고정한 조건에서 해석을 수행하였다. 해석 순서는 일반적인 터널 굴착 해석과 동일하고 굴착 이후 78%의 응력해방율을 가정하고 지보재를 설치한 후 완전히 응력을 해방하였다. 굴착면은 배수경계로 설정하고 배수조건에서 수리해석을 실시하고 현지에서의 측정결과와 비교를 수행하였다. 균열 발생 범위 산정을 위한 균열 개시 응력(crack initiation stress, CI)은 응력-변형률 곡선이 직선 구간을 벗어나는 시점으로 정의하였다. 이는 기존 연구 결과(Bieniawski, 1967, Lajtai, 1974, Perras and Diederichs, 2014)

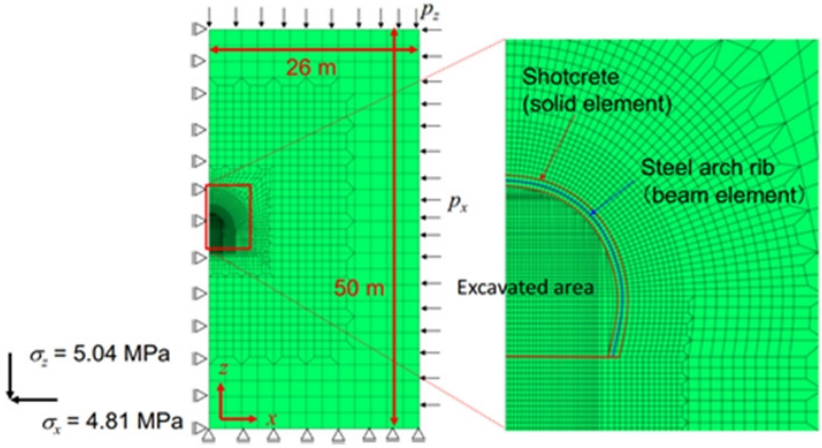

Fig. 16. Analysis model and boundary conditions (Aoyagi & Ishii, 2018)

에서 알려진 최대 응력의 30~50% 수준에 해당하고 해석된 응력 결과를 바탕으로 CI 응력값을 사용하여 EDZ 영역을 판정한 결과는 Fig. 17과 같다. Fig.17에 표시된 바와 같이 측벽에서는 최대 0.9 m까지, 바닥부 및 천정부에서는 각각 1.3 m 및 0.3 m까지 EDZ가 형성되었으며 이는 현장에서 파악한 결과(측벽부: 0.6 m, 바닥부: 1.6 m)와 매우 유사한다.

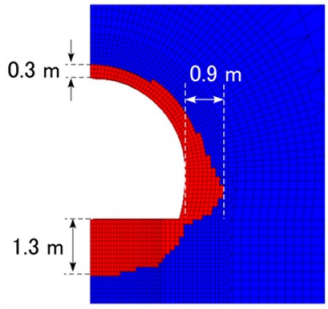

Fig. 17. Extent of the EDZ (Aoyagi & Ishii, 2018)

MSI를 이용한 투수량계수 추정법은 단일 균열에 대해 적용가능하고 현장수리시험과 같이 일정 구간에서의 투수량계수는 단열대에 존재하는 균열 개수의 합으로 아래 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \sum_i T_i|_{x=x_i} = \sum_i 10^{(-3.51\log MSI_i|_{x=x_i} - 6.54)} \tag{3}$$

여기서, x_i는 균열 위치, MSI_i는 해당 균열의 MSI값, T_i는 해당 균열의 투수량계수 추정치, T_e는 수리시험을 실시하는 구간의 투수량 계수를 나타내고 T_i의 합으로 표시된다.

그러므로 수리시험을 실시한 구간의 길이를 L이라 하면, 해당 구간의 투수계수(k_e)는 투수량계수와 시험구간 길이를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$k_e = \frac{T_e}{L} \tag{4}$$

Fig. 18은 현장투수시험을 통해 얻은 투수계수 측정값과 MSI 지수를 이용하여 산출한 투수계수를 비교한 것이다. Fig.18의 붉은색 막대는 추정값의 오차범위를 나타낸 것으로 갱도 측벽부 및 바닥부의 시추공에서 실제 측정한 투수계수가 MSI 지수를 이용한 추정오차 범위 내에 위치함을 확인할 수 있다.

EDZ 내 균열 형성은 굴착 방식, 굴착 갱도 형상, 지보 패턴, 기존 자연 균열 분포 및 응력 조건 등과 같은 요인에 영향을 받는다. MSI 지수를 이용한 투수계수 추정은 이러한 제반 조건을 반영한 응력 계산 결과에 기반하고 있어 기계굴착 방식으로 갱도가 굴착되고 기존 균열의 빈도가 매우 낮은 조건에 해당하는 호로노베 URL 부지에서의 EDZ 내 투수특성 추정에 매우 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

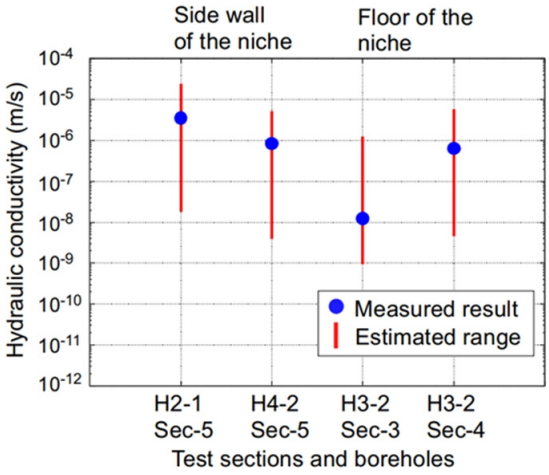

Fig. 18. Comparison of hydraulic conductivities between in-situ measurements in the EDZ and estimations by MSI model approach (Aoyagi & Ishii, 2018)

4. 스위스 몽테리 지하연구시설((Mt. Terri Underground Research) 굴착갱도 주변 EDZ 수리 특성 평가를 위한 수치해석

4.1 EDZ 균열 특성 파악

스위스 몽테리 URL에서는 굴착 갱도 주변 EDZ에서의 균열 조사 결과를 이용한 수치 해석 모델을 구축하고 EDZ 영역에서의 투수특성의 시공간적 변화를 예측하는 기법을 개발하여 현장 계측치와 비교하는 연구가 수행되었다. Fig. 19는 몽테리 URL 갱도 주변에서 관찰되는 균열 발생 양상을 나타낸다. 갱도 굴착 직후의 응력 해방과 재압밀(re-compression) 과정에서 인장 균열(extensional fractures)과 층리면에서의 spalling 및 buckling 파괴가 발생하고 있음을 확인하였다. 이러한 파괴 양상은 갱도 굴착에 따른 응력 재분배 과정에서의 축차응력(deviatoric stress) 증가에 기인한 파괴(stress-controlled failure)와 구조지질학적 파괴양상(structurally controlled failure)이 복합적으로 작용한 결과이다(Martin et al., 2003).

EDZ 영역 판정 및 특성 평가를 목적으로 100여 개 이상의 시추공 조사가 실시되었다(Yong, 2007). 갱도 벽면에서부터 0.5 m이

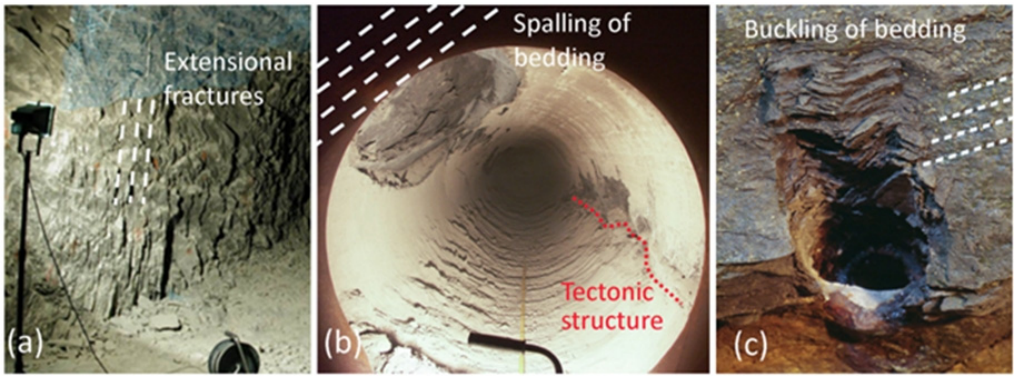

Fig. 19. Excavation-induced failures in Opalinus clay in Mont Terri URL (Marshall et al., 2017)

내의 균열 빈도(fracture count)는 약 10(; 균열 간격 5 cm에 해당) 수준으로 2.5 m에서 3.0 m 떨어진 지점의 2에 비해 월등히 높은 값을 보였다. 대부분의 시추공에서 또 갱도 위치와 무관하게 높은 균열 빈도를 보이는 EDZ의 형성이 관측되었으며 EDZ 구간은 20 cm에서 70 cm에 걸쳐 분포하는 것으로 파악되었다.

몽테리 URL에서는 합성수지 주입(resin injection)법을 적용한 EDZ 내 균열 발달 양상을 효과적으로 파악할 수 있었다. 벽면에서의 파일럿 공(pilot hole)을 통해 형광물질을 혼합한 합성수지를 주입 후 직경 101 mm의 오버코어링을 실시하여 코어를 회수, 사진 판독을 통해 균열의 유무 및 연결성을 파악하는 방식으로 갱도 위치 및 조건에 따라다양한 균열 발달 양상이 확인되었다 (Bossart et al., 2002).

4.2 EDZ 투수특성 파악

EDZ 영역 내 개별 균열의 투수량계수를 파악하는 것은 DFN 모델 구축 신뢰성을 제고하는데 매우 중요한 요소이다. 몽테리 URL에서는 멀티패커시스템(multi-packer system)을 개발하여 갱도 벽면으로부터 10~50 cm 간격으로 현장수리시험을 실시하고 투과계수를 산정하였다. 갱도 벽면으로부터 충분히 이격된 지역은 포화상태를 유지하고 있어 물 주입(water injection) 시험을 실시하고, 벽면 인근의 경우 불포화 상태이므로 가스시험법(pneumatic tests)을 적용하여 투과특성을 파악하였다. Fig. 20은 갱도 위치별로 벽면으로부터의 거리에 따른 투과계수 변화를 나타낸 것으로 EDZ에 해당하는 벽면 인근에서 상대적으로 높은 투과계수를 보여 20~40 cm 구간에서 최대 10^{6}에서 10^{7} m^2 수준까지 증가하는 결과를 보였다. 이들 투과계수 증가 구간은 균열 조사를 통해 파악된 균열 빈도가 높은 구간과 잘 일치한다.

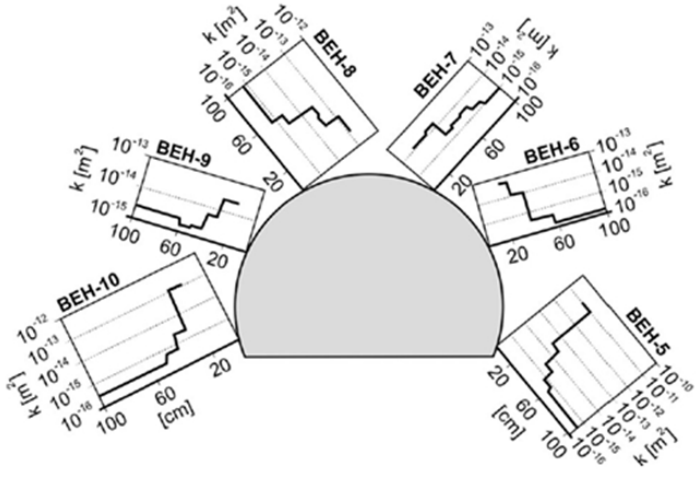

Fig. 20. Permeability values around the excavated cavern measured by in-situ hydraulic tests (Bossart et al., 2002)

4.3 EDZ 투수특성 평가를 위한 하이브리드 해석기법

처분장 안정성 평가를 위한 방사선량 계산은 처분장 심도에서 지표면까지의 광범위한 영역을 대상으로 하기 때문에 처분 갱도 주변 EDZ를 포함한 구성 성분들을 간략화하여 표현할 필요가 있다 . 따라서, 개별 균열이 잘 발달된 EDZ를 쉘(shell)형태의 연속체 매질로 등가(equivalent)하여 등가 매질의 두께, 투수계수 및 공극률을 산정하여 처분장 안정성 평가에 활용하는 방식이 보편적으

로 적용된다(Nagra, 2016).

EDZ 영역을 등가다공질매체(Equivalent Porous Media, EPM)로 표현하고 지하수 유입량 및 뒤채움재의 재포화(resaturation) 현상을 설명하는 접근법의 한계점으로는 재포화와 팽창압에 의한 개별 균열의 닫힘과 투수계수의 감소를 설명하기 어려운 점을 지적할 수 있다. Alcolea et al.(2016)은 EDZ 영역 내 균열을 통한 국부적인(localized) 지하수 유동과 구속압 증가에 의한 투수계수의 점진적 감소 및 밀봉 효과의 발현, 균열 투수계수가 모암 수준에 도달한 이후 관측되는 국부적 유동에서 분산(distributed) 지하수 유동에 이르는 처분장 운영 전과정에서의 EDZ 수리-역학 거동을 설명할 수 있는 수치해석 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 3단계에 걸쳐 수행된다(Fig. 21). 첫 번째 단계에서는 hybrid finite-discrete element method (FDEM)를 이용하여 EDZ 영역 내 균열의 기하학적 및 역학적 특성을 반영한 해석을 수행한다. FDEM 해석은 유한요소 해석과 개별요소 해석을 혼합하여 균열 생성, 진전 및 상호작용을 해석하는 기법이다(Lisjak et al., 2015). 해석영역은 삼각형의 선형탄성요소로 이산화하고 삼각형 요소의 접촉면에는 불연속요소(interface element)를 삽입, 요소 절점의 결합과 분리를 통해 균열의 생성 및 진전을 모사하는 원리이다. 불연속요소는 모드 I, II 및 혼합모드의 균열 전파를 나타낼 수 있다. 두 번째 단계에서는 FDEM 해석 결과를 FEM 해석요소에 반영하여 수리 해석을 수행하여 균열 및 모암 매질의 수리 특성 및 재포화에 따른 시공간적 변화를 파악한다. 마지막으로 뒤채움재를 포함한 처분갱도 주변 근계시스템(near field system)이 완전포화된 상태를 해석하게 된다.

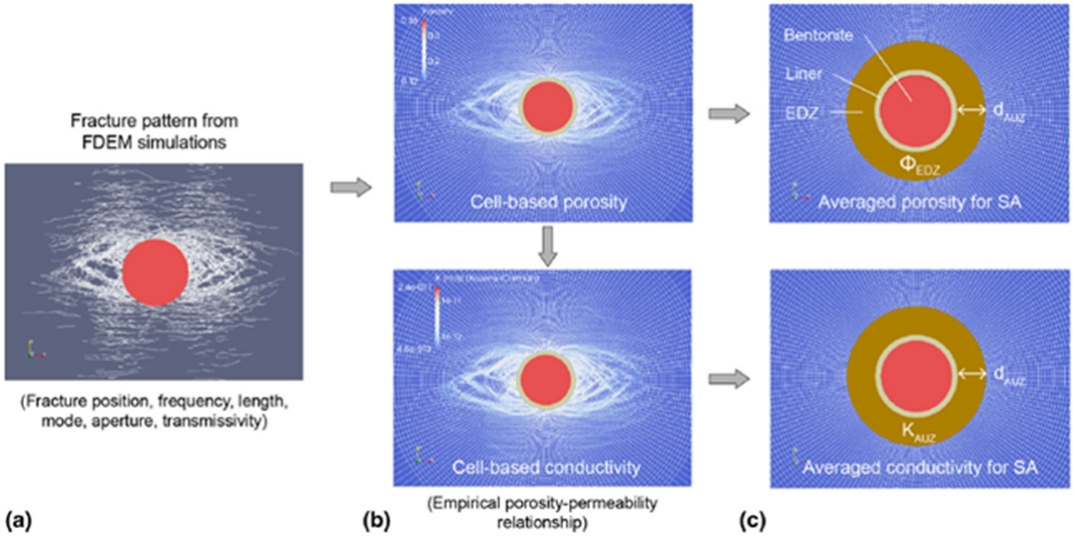

Fig. 21. Procedures of EDZ representation for safety assessment including discrete fractures using FDEM (Alcolea et al., 2016)

EDZ 투수계수의 시간적 변화를 파악하기 위한 해석은 EDZ 형성과 재압축(re-compression) 과정의 크게 2 단계로 나누어 수행하게 된다. 첫 번째 단계에서는 굴착 영역 요소의 변형계수를 감소시켜 EDZ 형성을 해석한다. 굴착 영역 요소의 변형계수는 초기 탄성계수의 100분의 1까지 감소하는 것으로 설정하였다. 첫 번째 단계인 굴착에 의한 EDZ 형성과정은 균열이 추가로 형성되지 않는 시점(T_p) 까지 진해된다. 두 번째 단계는 재포화 과정에서의 팽창압 발현 과정으로 현장실험에서는 갱도 내부에 패커를 설치하여 내압을 가압하는 과정에 해당하므로 해석에서는 T_p에서 가압 개시 후 3 MPa까지 선형적으로 증가하는 것으로 설정하였다 (Fig. 22).

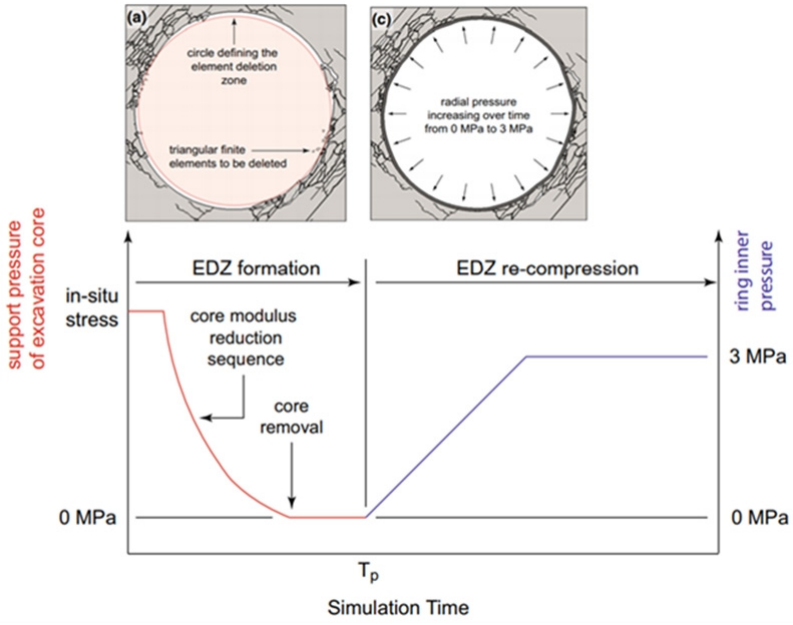

Fig. 22. Prescribed radial pressure in simulating EDZ formation and re-compression (Modified from Lisjak et al., 2015)

Fig. 23는 몽테리 URL에서 EDZ 내 균열 발달 양상을 해석한 사례이다. 굴착 초기 처분갱도 주변부터 층리면을 따라 균열이 생성되기 시작하고(a: 50,000 time steps) 모드II 형태로 진전된다(b: 100, 000 time steps). 해석에서는 현장 지질조건에 해당하는 기존 수평 경사의 불연속면 구조를 고려하였으며 층리면을 가로지르는 불연속면과의 상호 작용으로 인해 균열 진전이 가로막히고(c: 140,000 time steps) 불연속면 주변에서 전단균열이 집중되어 쐐기형태의 파쇄구조를 형성하는 결과를 보였다(d: 200,000 time steps).

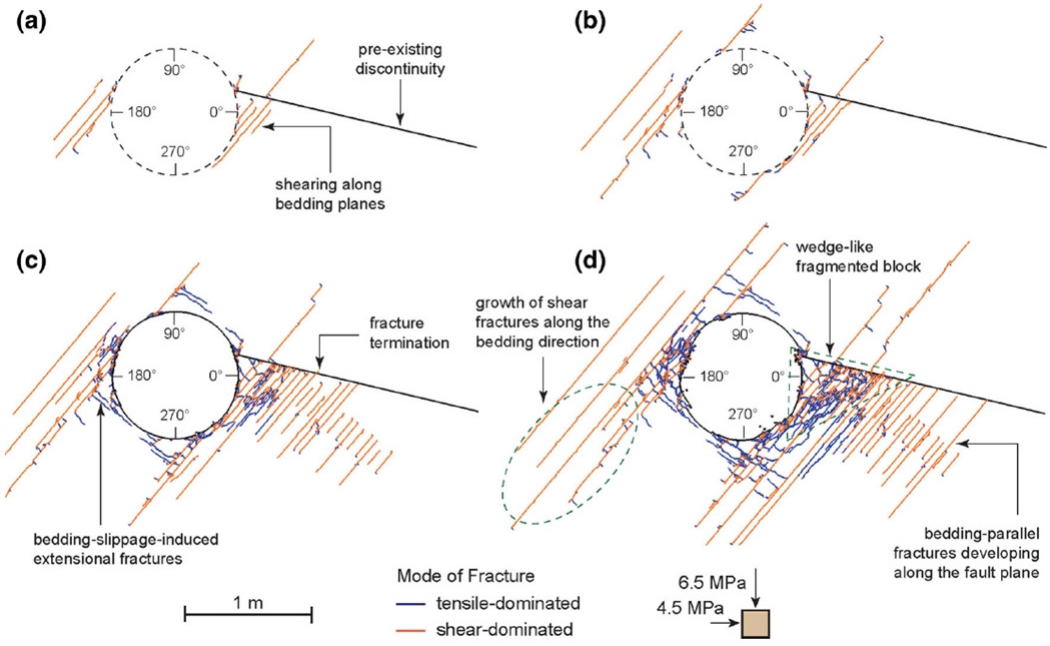

Fig. 23. EDZ formation process simulated using FDEM in HG-A-F hole in Mont Terri URL (Marshall et al., 2017)

Fig. 24는 위의 FDEM 해석결과를 이용하여 처분갱도 주변의 등가 공극률 및 투수계수를 산출한 결과로 EDZ 영역에서의 공극률은 12에서 40%, 투수계수는 10^{-11}에서 4.5×10^{-14} m/s 범위를 보여 현장 측정값과 유사한 결과를 보였다. Fig. 25은 이와 같이 얻어진 셀 단위의 수리 파라미터 정보를 이용하여 HG-A 갱도에서 실시한 물주입 및 가스유동시험을 해석한 결과이다. 가압 및 shut-in 등과 같은 시험조건 변동에 따른 현장측정 수압의 변화를 잘 모사할 수 있었으며 EDZ 영역 내의 연결된 균열을 통해 발생하는 가스유동 통로가 현장 관측과 동일하게 해석됨을 확인할 수 있었다.

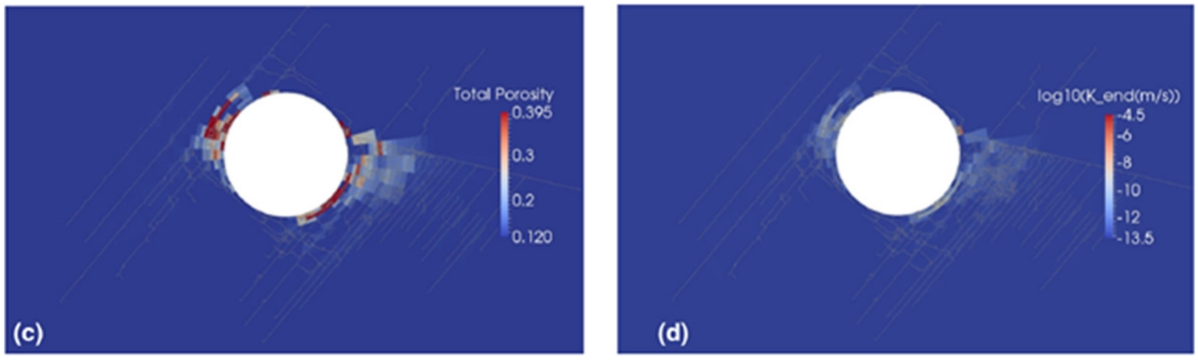

Fig. 24. Equivalent hydraulic parameters in EDZ around the HG-A microtunnel in Mont Terri URL (left: equivalent porosity, right: equivalent logarithm hydraulic conductivity, Marshall et al., 2017)

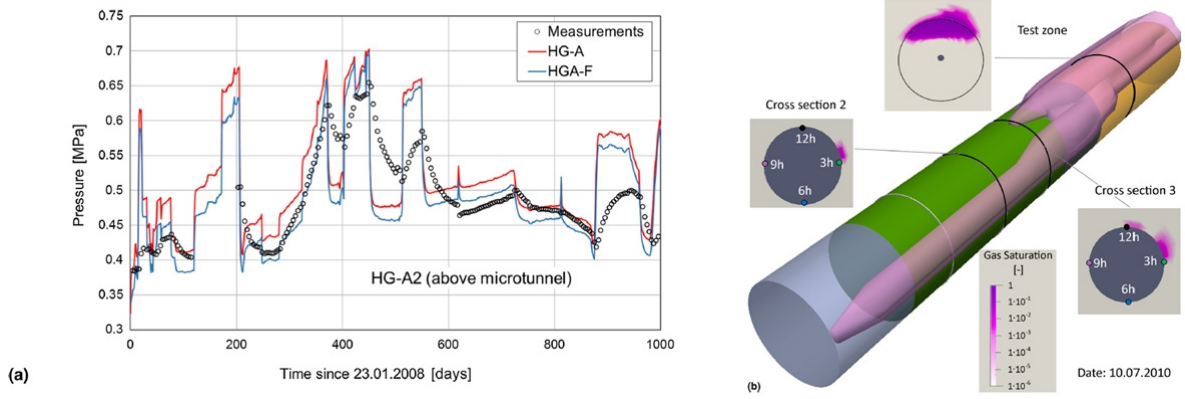

Fig. 25. History matching of pressure during the long-term water injection test (a) and gas injection test (b) in Mont Terri URL (Marshall et al., 2017)

5. 결 론

본 고에서는 점토질 퇴적암에서의 균열 자기 치유(self-healing) 특성 및 밀봉(sealing) 효과에 관한 실내 및 현장 실험 결과를 소개하고 일본과 스위스의 처분연구시설에서 EDZ 투과특성을 파악하는데 적용된 수치해석 기법을 검토하였다.

처분갱도 주변에 형성된 EDZ는 모암에 비해 균열 빈도가 상대적으로 높기 때문에 일반적으로 투과특성이 증가한다. 반면 균열의 자기 치유 성능이 발현될 경우 EDZ의 물성은 시간이 지남에 따라 일반적으로 초기치보다 감소하는 경향을 보이는데 현장 실험

을 통해 EDZ 물성 및 장기 운영과정에서의 변화를 지속적으로 측정하는 것은 매우 어려운 작업이다. 한편, 수치해석기법은 다양한 시니리오 해석을 통해 실험계획을 수립하고 현장 실험 과정에서의 기술 난제를 해결하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 일본 호로노베 URL에서 적용된 MSI 지수를 활용한 EDZ 투과 특성의 수치해석적 평가기법은 갱도 주변 응력 상태와 인장 강도를 입력조건으로 하여 균열 투과량계수를 산정할 수 있는 장점이 있다. 다만, 응력수준과 균열 투수량계수의 경험적 관계식으로부터 투수특성을 도출하고 있어 국내 적용을 위해서는 국내 지질환경에의 적용성 검증과 보완이 선행되어야 할 것이다. 스위스 몽테리 URL에서 사용된 FDEM 해석의 장점은 EDZ 내 개별 균열의 생성, 진전 및 상호작용을 고려하여 등가 투수 파라미터를 도출할 수 있다는 것으로 균열 거동 모사를 위해 인터페이스 요소를 추가적으로 사용해야 하기 때문에 실적용을 위해서는 계산 용량 및 균열 파라미터의 특정에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

고준위방사성폐기물 처분장 건설을 위한 국내 지질 환경은 결정질암에 적합하다는 의견이 지배적이나 제4기 퇴적층을 대상으로 한 퇴적암 내 처분장 건설도 검토해 볼 수 있다. 점토질 퇴적암 내 균열의 자기치유 성능은 구속압 증가와 같은 역학적 요인과 재포화과정에서의 체적 팽창 및 팽창압 발현 등의 수리-역학적 요인 이외에도 점토광물의 종류 및 함유율, 균열 벽면에의 광물 침전과 같은 지구화학적 요인도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 국내 지질환경 조건에 적합한 균열 자기치유모델 개발과 이를 반영한 균열 암반 투수특성의 수치해석적 추정기법의 검토가 국내 처분연구에서도 검토되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

한국지질자원연구원 2020년 주요사업의 일환으로 수행되었으며, 제1저자는 과학기술정보통신부의 재원으로 수행되는 한국연구재단의 기초연구사업(2019R1F1A1058711)의 지원을 받았습니다. 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

Alcolea, A. Kuhlmann, U. Marschall, P., et al., 2016. A pragmatic approach to abstract the excavation damaged zone around tunnels of a geological radioactive waste repository: application to the HG-A experiment in Mont Terri, Radioactive Waste Confinement: Clay in Natural and Engineered Barriers. Geological Society, London, Special Publications 443.

Armand, G., Leveau, F., Nussbaum, C., Vaissiere, RL, Noiret, A, Jaeggi, D, Landrein, P, Righini, C. 2014. Geometry and properties of the excavation-induced fractures at the Meuse/Haute-Marne URL drifts. Rock Mech Rock Eng 47:21-41.

Aoyagi, K., Ishii, E., Ishida, T. 2017. Field observation and failure analysis of an Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory. J MMIJ 133:25-33.

Aoyagi, K., & Ishii, E. 2018. A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone. Rock Mechanics and Rock Engineering. doi:10.1007/s00603-018-1577-z.

Autio, J., Gribi, P., Johnson, L., Marschall, P. 2006. Effect of excavation damaged zone on gas migration in a KBS-3H type repository at Olkiluoto, Physics and Chemistry of the Earth 31:649-653.

Bieniawski, ZT. 1967. Mechanism of brittle fracture of rock, parts I, II and III. Int J Rock Mech Min Sci 4:395-430.

Birkholzer, J.T., Tsang, CF., Bond, AE., Hudson, JA., Jing, L., and Stephansson, O. 2019. 25 years of DECOVALEX − Scientific

advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 122, 103995.

Bossart, P., Meier, PM, Moeri, A, Trick, T, Mayor, JC. 2002. Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. Eng Geol 66:19-38.

Bossart, P., Trick, T, Meier, PM, Mayor, JC. 2004. Structural and hydrogeological characterization of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). Appl Clay Sci 26:429-448.

Baechler, S., Lavanchy, JM, Armand, G, Cruchaudet, M. 2011. Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ around drifts at level?490 m of the Meuse/Haute-Marne URL: a methodology for consistent interpretation of hydraulic tests. Phys Chem Earth 36:1922-1931.

Choi, S., Kihm, Y.H., Kim E., Cheon, D.S., 2020, Rock Mechanical Aspects in Site Characterization for HLW Geological Disposal: Current Status and Case Studies, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.30, No.2, 2020, pp.136-148.

Ishii, E., 2017. Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 100:10-22.

Itasca Consulting Group Inc. 2009. FLAC3D Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions user's guide. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis

JNC 2003. Horonobe Underground Research Laboratory project plans for surface-based investigations (Phase 1). JNX TN5510 2003-002.

Kwon, S. Cho, W.J. 2008. The influence of an excavation damaged zone on the thermalmechanical and hydro-mechanical behaviors of an underground excavation. Engineering Geology 101(3-4), 110-123.

Kwon, S. Min, K.B., 2020. An Introduction to the DECOVALEX-2019 Task G: EDZ Evolution − Reliability, Feasibility, and Significance of Measurements of Conductivity and Transmissivity of the Rock Mass, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.30, No.4, 2020, pp.306-319.

Lajtai, EZ. 1974. Brittle fracture in compression. Int J Fract 10:525 −536.

Lee, H.S., 2007. Analysis of Benchmark Test Model for Evaluation of Damage Characteristics of Rock Mass near Radioactive Waste Repository, Tunn. Undergr. Sp. 17(1), 32-42.

Lisjak, A., Tatone, B. S. A., Mahabadi, O. K., Grasselli, G., Marschall, P., Lanyon, G. W., Nussbaum, C. 2015. Hybrid Finite-Discrete Element Simulation of the EDZ Formation and Mechanical Sealing Process Around a Microtunnel in Opalinus Clay. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(5), 1849-1873. doi:10.1007/s00603-015-0847-2

Marschall, P., Trick, T. Lanyon, GW. Delay, J. Shao, H. 2008. Hydro-Mechanical evolution of damaged zones around a microtunnel in a claystone formation of the Swiss Jura mountains, The 42nd US Rock Mechanics Symposium (USRMS).

Marschall, P., Giger, S., De La Vassiere, R., Shao, H., Leung, H., Nussbaum, C. Alcolea, A. 2017. Hydro-mechanical evolution of the EDZ as transport path for radionuclides and gas: insights from the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). Swiss Journal of Geosciences, 110(1), 173-194. doi:10.1007/s00015-016-0246-z

Martin, C.D. and G.W. Lanyon. 2003. Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40(7-8), 1077-1088.

Nagra. 2016. Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept. Nagra Technical Report, NTB 16-03, Nagra, Wettingen, Switzerland. http://www.nagra.ch.

NUMO. 2011. Excavation Damaged Zones Assessment, NWMO DGR-TR-2011-21

Park, S., Kwon, S., 2017. Status of researches of excavation damaged zone in foreign underground research laboratories constructed for developing high-level radioactive waster disposal techniques, Journal of Korean Society of Explosive & Blasting

Engineering 35(3): pp.31-54.

Perras, MA, Diederichs, MS. 2014. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. Geotech Geol Eng 32:525-546.

Phillips, T., Kampman, N., Bisdom, K., Forbes Inskip, N. D., den Hartog, S. A. M., Cnudde, V., & Busch, A. 2020. Controls on the intrinsic flow properties of mudrock fractures: A review of their importance in subsurface storage. Earth-Science Reviews, 103390. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103390.

Sato, T., Kikuchi, T., Sugihara, K. 2000. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in neogene sedimentary rock at tono mine, central Japan. Eng Geol 56:97-108.

Shao, H., Schuster, K., Sonnke, J., Brauer, V. 2008. EDZ development in indurated clay formations?in situ borehole measurements and coupled HM modeling. Phys Chem Earth 33:5388-5395.

Tsang, C.F., Bernier, F. Davies, C. 2005. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - In the context of radioactive waste disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42(1), 109-125.

Voltolini, M., Ajo-Franklin, J. B. 2020. The Sealing Mechanisms of a Fracture in Opalinus Clay as Revealed by in situ Synchrotron X-Ray Micro-Tomography. Frontiers in Earth Science, 8. doi:10.3389/feart.2020.00207

Wileveau, Y., Cornet, FH. Desroches, J. Blumling, P. 2007. Complete in situ stress determination in an argillite sedimentary formation. Physics and Chemistry of the Earth 32(8-14), 866-878.

Yong, S. 2007. A three-dimensional analysis of excavation-induced perturbations in the Opalinus Clay at the Mont Terri Rock Laboratory. Ph.D dissertation, Swiss Federal Institute of Technology in Zu¨rich, Zu¨rich, Switzerland, p. 167.

Zhang, C.-L. 2011. Experimental evidence for self-sealing of fractures in claystone. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 36(17-18), 1972-1980. doi:10.1016/j.pce.2011.07.030.