

벤토나이트 완충재에서의 기체 팽창 흐름 수치 모델링: DECOVALEX-2019 Task A

이재원^{1*}, 이창수¹, 김건영²

¹한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원, ²한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원

Numerical Modelling for the Dilation Flow of Gas in a Bentonite Buffer Material: DECOVALEX-2019 Task A

Jaewon Lee^{1*}, Changsoo Lee¹, and Geon Young Kim²

¹senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

²Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

*Corresponding author: jwl@kaeri.re.kr

Received: August 18, 2020

Revised: August 25, 2020

Accepted: August 25, 2020

ABSTRACT

The engineered barrier system of high-level radioactive waste disposal must maintain its performance in the long term, because it must play a role in slowing the rate of leakage to the surrounding rock mass even if a radionuclide leak occurs from the canister. In particular, it is very important to clarify gas dilation flow phenomenon clearly, that occurs only in a medium containing a large amount of clay material such as a bentonite buffer, which can affect the long-term performance of the bentonite buffer. Accordingly, DECOVALEX-2019 Task A was conducted to identify the hydraulic-mechanical mechanism for the dilation flow, and to develop and verify a new numerical analysis technique for quantitative evaluation of gas migration phenomena. In this study, based on the conventional two-phase flow and mechanical behavior with effective stresses in the porous medium, the hydraulic-mechanical model was developed considering the concept of damage to simulate the formation of micro-cracks and expansion of the medium and the corresponding change in the hydraulic properties. Model verification and validation were conducted through comparison with the results of 1D and 3D gas injection tests. As a result of the numerical analysis, it was possible to model the sudden increase in pore water pressure, stress, gas inflow and outflow rate due to the dilation flow induced by gas pressure, however, the influence of the hydraulic-mechanical interaction was underestimated. Nevertheless, this study can provide a preliminary model for the dilation flow and a basis for developing an advanced model. It is believed that it can be used not only for analyzing data from laboratory and field tests, but also for long-term performance evaluation of the high-level radioactive waste disposal system.

Keywords: High-level radioactive waste disposal, Gas migration, Dilation flow, Coupled hydro-mechanical analysis, DECOVALEX-2019

초록

고준위방사성폐기물을 처분하기 위한 심층처분시스템의 공학적 방벽은 처분 용기에서 방사성 핵종 누출이 발생하더라도 주변 암반으로의 누출 속도를 늦춰주는 역할을 수행해야하기 때문에 장기적으로 그



성능을 유지하여야 한다. 특히 벤토나이트 완충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에서만 나타나는 기체 흐름 현상인 팽창 흐름은 벤토나이트 완충재의 장기 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이 현상을 명확히 규명하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 DECOVALEX-2019 Task A에서는 팽창 흐름에 대한 수리-역학적 메커니즘을 규명하고, 기체 이동 현상의 정량적 평가를 위한 새로운 수치 해석 기법 개발 및 검증에 수행하고자 진행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 기존의 전통적인 다공성 매질에서의 2상 유동 및 유효응력 개념을 고려한 역학 모델을 기반으로, 손상도 개념을 적용함으로써 매질의 변형에 의한 기체의 팽창 흐름을 모사할 수 있는 수리-역학적 상호작용을 고려한 해석 모델을 개발하였다. 또한 개발된 모델을 이용하여 1차원 및 3차원 기체 주입 시험 결과와의 비교를 통해 모델 검증 및 적용성 검토를 수행하였다. 수치 해석 결과 기체 압력에 의한 팽창 흐름으로 인한 갑작스러운 공극 수압, 응력, 기체 주입량 및 유출량 증가 현상을 확인할 수 있었지만, 개발된 해석 모델에서 수리-역학적 상호작용의 영향이 과소 평가 되는 한계를 확인할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 팽창 흐름에 대한 예비 모델을 제공하고 후속 연구의 발전된 모델을 개발하기 위한 기반을 제공한다는 점에서 의의가 있다. 또한 본 연구에서 개발된 수리-역학적 상호작용을 고려한 수치 모델은 향후 실험실 및 현장 시험 결과 데이터 분석에 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 실제 고준위방사성폐기물 처분 심층처분시스템의 장기 성능평가에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어: 고준위방사성폐기물처분, 기체 이동 현상, 팽창 흐름, 수리-역학 연계해석, DECOVALEX-2019

1. 서론

고준위방사성폐기물을 처분하기 위한 심층처분시스템의 공학적 방벽은 주변 암반으로의 방사성 핵종 누출을 억제해야 하기 때문에 장기적인 건전성 확보가 필수적이다(NEA-EC, 2003). 이 중 벤토나이트 완충재의 경우, 처분 용기에서 방사성 핵종 누출이 발생하더라도 주변 암반으로의 누출 속도를 늦춰주는 역할을 수행해야 하기 때문에 장기적으로 그 지연 성능을 유지하여야 한다. 하지만 최근 벤토나이트 완충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에서 기체 압력에 의한 갑작스러운 기체 이동 현상(gas migration)에 대한 연구가 보고되고 있으며(Daniels and Harrington, 2017, Harrington et al., 2017, Horseman, 1996, Horseman et al., 1997, Horseman et al., 1999), 이는 벤토나이트 완충재의 장기 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이 현상을 명확히 규명하는 것이 매우 중요하다.

벤토나이트 완충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에서는 기체의 압력이 낮을 경우 기체가 공극수에 용해되어 이류 및 확산 현상에 의해 이동하거나 모세관 현상에 의해 이동하는데, 기체의 압력이 증가하게 되면 매질 입자 사이가 기체 압력에 의해 벌어지면서 미세 균열이 형성되어 갑작스러운 기체 흐름이 발생하게 된다(Fig. 1)(Cuss et al., 2014, Davis and Selvadurai, 2002,

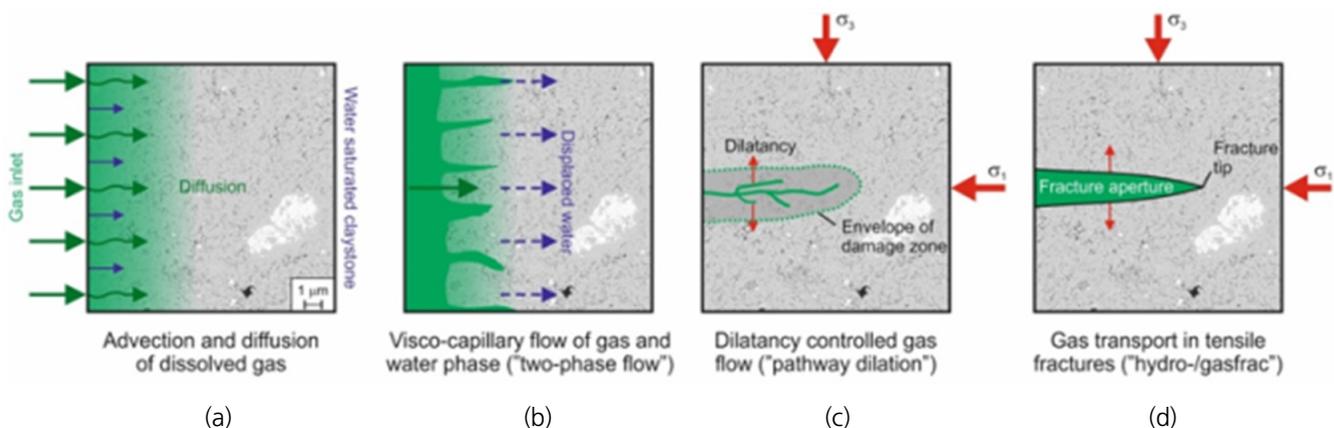


Fig. 1. Four main processes of gas migration in clays (Cuss et al., 2014)

Marschall et al., 2005). 이러한 기체 이동 현상을 팽창 흐름(dilation flow)이라 하는데, 이 현상은 벤토나이트 완충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에서만 나타나는 매우 중요한 기체 흐름 현상 중 하나이다(Marschall et al., 2005). 또한 이러한 미세 균열의 발생은 매질의 공극률 및 투수율을 변화시킴으로써 유체 이동 양상을 변화시키기 때문에, 벤토나이트 완충재의 장기 건전성을 평가하기 위해서는 기체 압력에 의한 매질의 수리-역학적(Hydro-Mechanical) 상호작용에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

팽창 흐름 현상이 공학적 방벽 장기 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위해 다양한 수치 해석적 시도들이 선행된 바 있지만(Nash et al., 1998, Hoch et al., 2004, Fall et al., 2014, Nguyen and Le, 2015), 무작위적인 매질 입자 분포 및 우선 경로(preferential pathway) 생성과 같은 불확실성으로 인해 이 현상을 수치 해석적으로 명확하게 표현하기에는 아직 한계점이 존재한다. 따라서 팽창 흐름에 대한 수리-역학적 메커니즘을 규명하고 이 현상을 포함하는 기체 이동 모델 개발 및 검증에 대해 국제 공동 연구 프로젝트인 DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments-2019 (DECOVALEX-2019) Task A가 수립되었다. 본 논문에서는 DECOVALEX-2019 Task A에 대해 간략히 소개하고, 한국원자력연구원에서 4년간 수행하였던 수치 모델 개발 내용 및 해석 결과를 간단히 요약하였다.

2. DECOVALEX-2019 Task A 소개

DECOVALEX-2019 Task A의 부제는 modElliNg Gas INjection ExpERiments (ENGINEER)로써, 공학적 방벽에서의 갑작스러운 기체 이동 현상 모사를 위한 수치 모델링 기법 개발 및 실내 실험과의 결과 비교를 통한 모델 검증을 수행하고자 제안된 국제 공동 연구 과제이다. Task A는 개념 모델 개발(Stage 0), 일정 체적 경계 조건 하에서의 1차원 기체 주입 시험 모델링(Stage 1), 일정 체적 경계 조건 하에서의 3차원 기체 주입 모델링(Stage 2)의 총 3개의 단계로 진행되었다.

벤토나이트 완충재 블록에서의 기체 이동 현상을 규명하고자 영국 지질조사소(British Geological Survey, BGS)에서는 1차원 및 3차원 기체 주입 시험을 수행하였으며, 시험 장치 및 센서 위치 개념도는 Fig. 2와 같다(Daniels and Harrington, 2017). 직경 60 mm 및 길이 120 mm 크기의 압축 벤토나이트 시료를 기체 주입 시험장치에 설치한 다음 팽윤압(Swelling pressure) 거동을 확인하기 위해 일정 기간 동안 수화과정을 거쳤으며, 팽윤압이 안정화 된 이후 헬륨 기체를 주입하는 본 시험을 수행하였다. 1차원 주입 시험의 경우에는 한쪽 면에는 헬륨 기체를 주입하고 반대 면에는 일정 수압을 유지시켜 기체가 한쪽 방향으로 흐를 수 있도록 유도

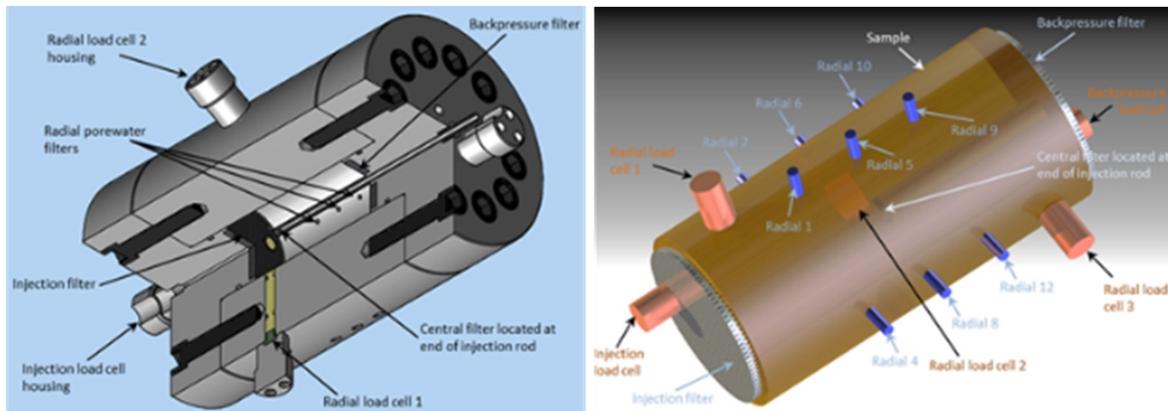


Fig. 2. Cut-away diagram of the pressure vessel and image of the sample with the relative positions of the load cells and pore pressure filters (Daniels and Harrington, 2017)

하였으며, 3차원 주입시험의 경우에는 양 면을 일정 수압으로 유지시키고 압축 벤토나이트 시료에 기체 주입장치를 삽입하여 중심 지점에서부터 구 방향으로 기체가 흐를 수 있도록 유도하였다. 특정 기간 동안 일정 속도로 헬륨 기체를 주입함으로써 기체 압력 증가로 인한 팽창 흐름 현상을 확인하였으며, 이로 인한 공극수압, 기체 주입 및 유출량, 응력 변화를 관찰하였다.

3. 수치 해석 모델

실험에 사용된 압축 벤토나이트 시료는 초기에 수화과정을 거치면서 포화도가 약 98%에 이르며, 이 시료에 기체를 주입하기 때문에 다공성 매질에서의 2상 유동 해석 모델이 필수적으로 요구된다. 또한 수화과정 중 벤토나이트 시료의 팽창으로 인해 팽윤압이 발생하며 기체 주입 시 공극수압 증가로 인한 응력 변화 현상이 관찰되기에, 포화도 및 공극수압을 고려한 역학 해석 모델이 요구된다. 마지막으로 기체 압력에 의해 매질 입자 사이가 벌어지면서 발생하는 갑작스러운 팽창 흐름을 모사하기 위한 새로운 수치 해석 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 전통적인 다공성 매질에서의 2상 유동 및 유효응력 개념을 고려한 역학 모델을 기반으로, 미세 균열의 형성 및 매질의 팽창을 모사하기 위한 손상도 개념 및 이에 따른 수리 물성 변화를 고려함으로써 매질의 변형에 의한 기체의 팽창 흐름을 모사할 수 있는 수리-역학적 상호작용을 고려한 해석 모델을 개발하였다.

3.1 수리-역학적 상호작용

수리 모델에서 전통적인 다공성 매질에서의 2상 유동 해석을 수행한 후 해석 결과인 공극 수압을 이용해 유효응력을 변화시킨 후 역학 손상 모델을 이용하여 역학 해석을 수행하였으며, 역학 해석 결과인 평균 응력과 매질의 손상도를 바탕으로 수리 물성인 공극률과 투수율을 변화시켜 수리 해석을 다시 수행하였으며, 이 과정을 반복적으로 수행해 전체적인 해석을 진행하였다(Fig. 3).



Fig. 3. Modelling approach with Hydro-Mechanical(HM) coupling

기체 압력 증가에 따른 미세 균열 발생 및 이에 따른 역학적 거동 변화를 모사하기 위해 손상도 개념을 갖는 역학 손상 모델을 적용하였다. 매질의 손상도(damage index)는 미세 균열 발생의 정도를 의미하며 0과 1 사이의 값을 갖는다. 손상도가 0일 경우 매질은 무결한 상태를 의미하며, 미세 균열이 많이 발생할수록 손상도가 1에 가까운 값을 갖는다. 암석 및 콘크리트 매질에서는 다양한 역학 손상 모델이 제시되었으나(Mazars, 1986, Simo and Ju, 1987, Lee and Fenves, 1998, Jirásek, 2004, Jason et al., 2006), 벤토나이트 원충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에 대한 역학 손상 모델은 아직 제안된 바가 없기 때문에 매개 변수 불확실성(parameter uncertainty)을 줄이기 위해 가장 단순한 모델 중 하나인 Tang et al. (2002)이 제안한 탄성 손상 모델을 적용하였으며 이는 다음과 같다.

$$\sigma = (1 - D)C : \epsilon \tag{1}$$

여기서 C 는 탄성 계수를 뜻하며, D 는 손상도, ϵ 는 변형률을 의미한다. 만약 매질에 작용하는 응력이 인장 및 압축 강도를 넘어 매질의 파괴가 일어나는 경우, 즉 매질의 손상이 발생하는 경우 탄성 계수가 손상도에 따라 감소하게 되며, 이후 역학적인 거동은 감소된 탄성 계수를 따라 발생한다(Tang et al., 2002).

수리 모델에서는 무작위적인 매질 입자 분포 및 우선 경로 생성과 같은 불확실성으로 인해 직접적인 미세 균열 발생을 모사하는데 한계가 있어, 미세 균열 발생에 의한 우선 경로를 직접적으로 고려하지 않고 손상도에 따른 등가 투수율 개념을 이용하여 팽창 흐름을 모사하고자 하였다. 기존 손상도와 투수율의 관계를 설명한 다양한 연구들이 진행되어 왔지만(Gawin et al., 2001, Souley et al., 2001, Tang et al., 2002), 본 연구에서는 손상되지 않은 매질의 투수율(undamaged permeability)과 손상된 매질의 투수율(damaged permeability) 변화를 모두 고려하기 위해 Fall et al. (2014)이 제안한 방법론을 이용하였으며 이는 다음과 같다.

$$k = k_{UD} + k_D \tag{2}$$

여기서 k_{UD} 는 손상되지 않은 매질의 투수율, k_D 는 손상된 매질의 투수율을 나타낸다. 손상되지 않은 매질이라도 응력 변화에 의해 투수율이 변화하기 때문에 이를 고려하였으며(Davis and Davis, 1999, Rutqvist et al., 2002), 만약 특정 매질에서 손상이 발생한 경우 투수율은 손상도에 비례하여 증가하게 된다(Meschke and Grasberger, 2003). 또한 미세 균열의 발생은 필연적으로 공극률의 변화를 야기 시키는데, 본 연구에서는 벤토나이트 완충재 내에 존재하는 암석 광물과 같은 고체 입자의 부피 변화는 고려하지 않았기 때문에 공극률이 매질의 부피 변화에 비례한다고 가정하여 해석을 수행하였다.

3.2 해석 모델

1차원 및 3차원 기체 주입 시험을 모사하기 위한 모델의 기하학적 형상은 Fig. 4에 나타난 것처럼 동일하지만, 수치 해석 모델 측면에서 세부적으로 몇 가지 차이가 존재한다(Table 1).

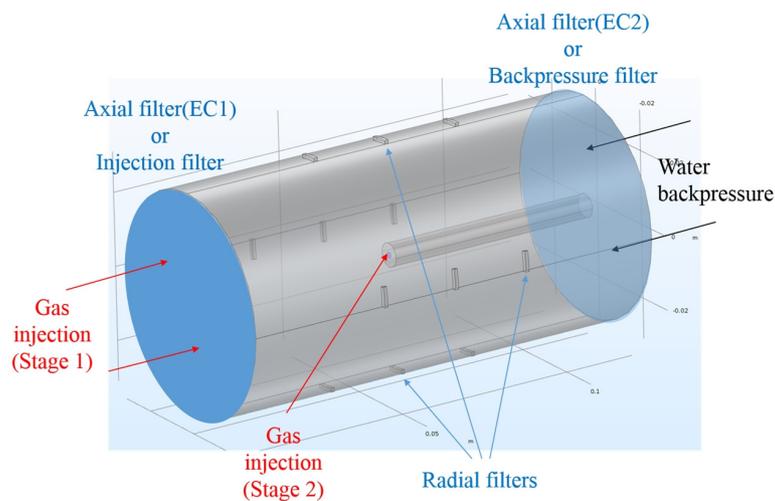


Fig. 4. Geometry of numerical model

Table 1. Numerical model comparison between Stage 1 and Stage 2

		Stage 1	Stage 2
Numerical code		TOUGH-FLAC	COMSOL Multiphysics
Mesh elements		7560 brick elements	7961 tetrahedral elements
Initial condition	H	1.0 MPa water pressure, 98 % saturation	
	M	5.5 MPa swelling pressure (assumption)	7.1 MPa swelling pressure (assumption)
Boundary condition		No flow boundary condition except radial filters	
	H	Radial filters : 1.0 MPa constant pressure	
	M	Roller boundary condition	
Gas injection		Injection rate	Injection pressure

먼저 Stage 1에서는 지반공학 및 암반공학 분야의 범용 수치해석 코드인 TOUGH-FLAC을 이용하였으며(Rutqvist et al., 2002), Stage 2에서는 복합거동 해석에 특화된 COMSOL Multiphysics를 이용하였다(COMSOL, 2018). 최근 한국원자력연구원에서 COMSOL Multiphysics를 이용하여 프로세스 기반 종합안전성평가 코드인 APro를 개발 중에 있으며, 이를 검증하기 위해 Stage 2에서는 해석 코드를 COMSOL Multiphysics로 변경하여 수치 해석을 수행하였다.

메쉬 요소의 경우 Stage 1에서는 7560 개의 6면체 요소를 사용하였으며, Stage 2에서는 7961개의 4면체 요소를 사용하여 해석하였다. 초기 조건의 경우 수리적으로는 1.0 MPa의 공극수압 및 98 %의 포화도를 갖으며, 역학적으로는 각각 5.5 MPa와 7.1 MPa의 팽윤압이 존재한다고 가정하였다. 초기 응력 측정 결과, 기체 주입을 실시하기 전 수화과정에서 벤토나이트 시료의 팽윤으로 인해 팽윤압이 발생하는 것으로 확인되었지만, 수치 모델에서는 포화도의 변화가 발생하지 않기 때문에 추가적인 팽윤압이 발생하지 않아 이를 보완하기 위해 팽윤압을 초기 조건으로 가정하였다.

수리 경계 조건의 경우 반경 필터(radial filter)에서는 1.0 MPa의 일정 수압 경계조건을 사용하였으며, 이를 제외한 나머지 옆면의 경계는 비배수(no flow) 경계조건을 적용하였다. 역학 경계 조건의 경우 일정 체적 경계 조건을 모사하기 위해 롤러 경계 조건(Roller boundary condition)을 사용하였다. 마지막으로 기체 주입 방식의 경우 Stage 1에서는 선형으로 증가하는 기체 주입량을 가정해 기체를 주입한 반면에(Fig. 5), Stage 2에서는 가정 조건을 이용하지 않기 위해 이상 기체 방정식을 바탕으로 기체 주입 펌프의 기체 주입 압력을 계산하여 수치 모델에 적용하였으며 이는 다음과 같다.

$$\frac{\delta(P_g V(t))}{\delta t} = F_{in}(t) - F_{out} \quad (3)$$

여기서 $V(t)$ 는 기체 주입 펌프에 존재하는 기체의 부피, $F_{in}(t)$ 는 기체 주입 펌프로 주입되는 기체의 양, F_{out} 는 기체 주입 펌프에서 압축 벤토나이트 시료로 빠져나가는 기체의 양을 의미한다. 즉, 헬륨 기체가 기체 주입 펌프로 주입되면 기체 압력이 증가하게 되고, 기체 주입 펌프에서 벤토나이트 시료로 빠져나가게 되면 기체 압력이 감소하게 된다. 따라서 이를 이용해 해석 중 실시간으로 변하는 기체 주입 압력을 계산할 수 있었으며, 이 기체 주입 압력을 적용하여 Stage 2 해석을 수행하였다.

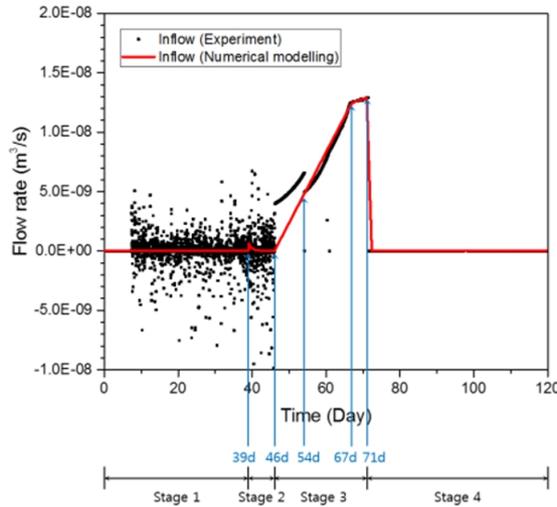


Fig. 5. Gas flowrate into the bentonite sample(Lee et al., 2019)

본 해석에 사용된 물성은 Table 2에 나타나 있다. 탄성 계수, 포아송 비, 공극률, 고유 투수율은 Task 제안 기관인 BGS에서 제공한 물성이고, 압축 강도, 잔류 압축 강도, Biot 상수, 입자 밀도, 잔류 포화도, 모세관압 계수, 비손상 투수율 계수, 최대 손상도는 참고 문헌에서 얻은 값이며, 그 외 나머지 물성은 가정한 값이다. 모세관압의 경우 COMSOL Multiphysics로 해석 시 수렴성 문제로 인해 매우 낮은 값을 적용하였을 뿐, 나머지 물성은 Stage 1 및 Stage 2에서 모두 동일한 값을 이용하였다.

Table 2. Properties of bentonite sample

Properties		Stage 1	Stage 2
Elastic model	Elastic modulus (Pa)	*3.07E+8	
	Poisson ratio	*0.4	
	Tensile strength (Pa)	#1.0E+6	
	Residual tensile strength (Pa)	#2.0E+5	
Damage model	Uniaxial compressive strength (Pa)	a)12.0E+6	
	Residual compressive strength (Pa)	a)3.0E+6	
	Tensile strain limit ϵ_{tu}	#5.0E-3	
	Biot coefficient	b)0.86	
Grain density (kg/m ³)	c)2700		
Porosity (-)	*0.44		
Intrinsic Permeability (m ²)	*3.4E-21		
Relative permeability (Fatt and klikoff, 1959)			
$K_{rl} = S_c^3, K_{rg} = (1 - S_c)^3, S_c = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$	S_{lr}		c)0.01
Capillary pressure curve (Van Genuchten, 1980)			
$P_c = -P_0 ([S^*]^{-1/\lambda} - 1)^{1-\lambda}, S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$	λ	-	c)0.45
	S_{lr}	-	c)0.01
	P_0 (Pa)	-	c)1.8E+7
	P_{max} (Pa)	-	c)1.0E+10
Undamaged permeability factor A			c)22.2
Maximum damage value Dkmax			a)1.0
Maximum permeability kmax (m ²)			#1.0E-19

Note: The values with a), b), and c) are presented at the Fall et al. (2014), Harrington and Horseman (2003), and Rutqvist et al. (2002), respectively. The values with * means given properties from BGS, and # means assumed values.

4. 수치 해석 결과 요약

4.1 1차원 기체 주입 시험 모델링(Stage 1)

1차원 기체 주입 시험 모델링 결과는 Lee et al.이 2019년 본 학회지를 통해 발간한 논문에 자세히 나타나 있으며(Lee et al., 2019), 결과를 요약하면 다음과 같다.

수치 해석 결과 기체 주입으로 인한 기체 주입 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 최대 공극 수압 및 최댓값 이후(post-peak) 거동이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 반경 필터의 경우, 특정 기체 주입 압력(약 8.5 MPa)을 넘었을 때 갑작스러운 공극 수압 증가 현상을 확인할 수 있었으며, 이는 반경 필터로의 팽창 흐름이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 응력 증가 현상 및 최대 응력 이후 감소하는 경향을 모사할 수 있었으며, 배압 필터에서의 팽창 흐름으로 인한 갑작스러운 기체 유출 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 공극 수압, 응력, 기체 유출량의 최댓값이나 최댓값 이후 거동 등 일부 결과들이 실험실 시험 결과와 다르게 나타났으며, 이는 본 연구에서 개발된 해석 모델이 수리-역학적 상호작용의 영향을 과소평가 하는 한계를 확인할 수 있었다.

4.2 3차원 기체 주입 시험 모델링(Stage 2)

3차원 기체 주입 시험 모델링 결과 기체 주입 펌프에서 기체 주입으로 인한 기체 주입 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6(a)). 실험실 시험 결과 세 번의 최댓값 현상이 관찰되었는데, 이는 미세 균열 발생 및 전파(gas breakthrough)이후 압력이 감소하면서 미세 균열이 다시 닫히게 되고 이로 인해 다시 압력이 증가하면서 미세 균열이 또다시 생성되는 과정을 반복하면서 나타난 현상으로 판단된다. 이 현상을 수치 모델링으로 모사할 수는 없었지만, 최대 공극 수압, 최댓값 이전(pre-peak) 및 최댓값 이후 공극 수압 거동과 같이 이를 제외한 공극 수압 변화 양상은 실험실 시험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 배압 필터에서는 기체 압력에 의한 팽창 흐름으로 인해 갑작스러운 공극 수압 증가 현상을 확인할 수 있었으며, 최댓값 이후의 공극 수압은 기체 주입 압력을 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 다만 실험실 시험 결과 EC1 배압 필터의 경우 공극 수압 증가 정도가 크지 않은데, 이는 EC2 배압 필터 및 반경 필터 방향으로 미세 균열이 발생하여 팽창 흐름이 발생한 반면 EC1 배압 필터 방향으로는 팽창 흐름이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 하지만 수치 모델링에서는 매질이 균질하고 기체 주입 지점에서 양 배압 필터까지의 거리가 동일하기 때문에, 양 배압 필터에서 모두 팽창 흐름이 발생하는 결과를 얻을 수 있었다.

응력의 경우 초기 조건으로 가정한 7.1 MPa의 응력을 유지하다, 팽창 흐름 발생 이후 급격한 응력 증가 현상을 확인할 수 있었다(Fig. 6(b)). 하지만 붉은색으로 표현된 축 방향 응력의 경우 실험실 시험 결과와 수치 해석 결과가 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞서 설명한 것처럼 실험실 시험 결과 EC1 배압 필터 방향으로 팽창 흐름이 발생하지 않아 응력 변화가 거의 발생하지 않았지만 수치 해석에서는 배압 필터 방향으로 팽창 흐름이 발생하였기 때문에 응력이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

기체 주입량의 경우 팽창 흐름 이전에는 거의 발생하지 않다가, 팽창 흐름 이후 급격히 증가하고 최댓값 이후에는 점차 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 6(c)). 반경 필터에서의 유출량 또한 팽창 흐름 이후에 급격히 증가하고 시간이 지나면서 점차 감소하는 것을 알 수 있었다(Fig. 6(d)). 실험실 시험 결과 기체 주입량과 유출량 모두 미세 균열 발생과 닫힘의 반복으로 인해 세 번의 최댓값 현상이 나타났지만, 수치 해석으로는 이 현상을 모사할 수 없었다. 또한 최댓값 지점에서의 최대 기체 주입량 및 유출량이 실험실 시험 결과에 비해 과소평가됨을 확인할 수 있었지만, 최댓값 이후 기체 주입량과 유출량은 실험실 시험 결과와 수치 해석 결과가 유사한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로 벤토나이트 시료 내부에서 손상도는 기체 주입 지점에서부터 구 방향으로 점진적으로 발생함을 확인할 수 있었으며, 758일 이후에는 시료 전체에서 손상도가 발생함을 확인할 수 있었다(Fig. 6(e)).

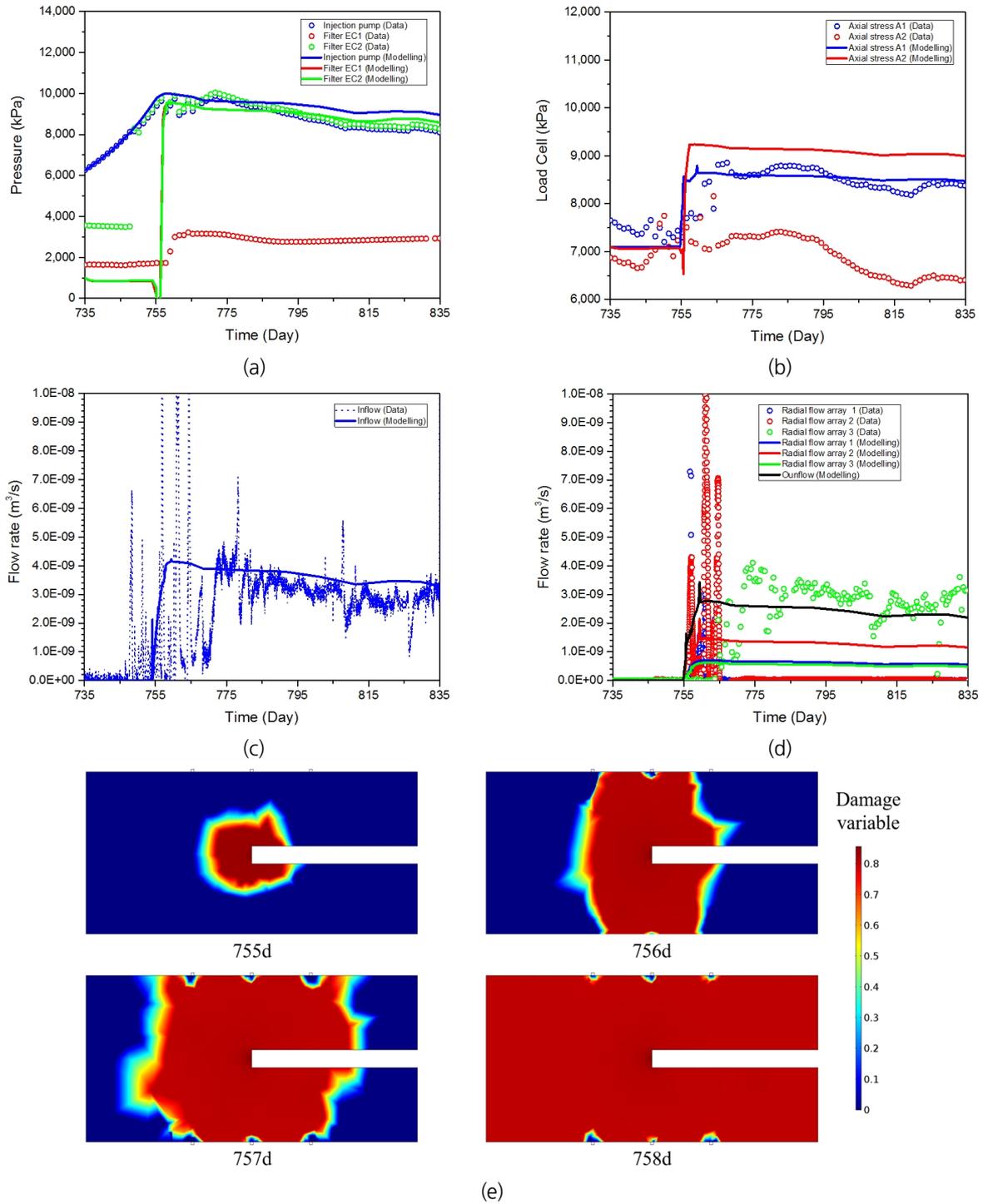


Fig. 6. Stage 2 results: (a) injection pressure and radial pressure, (b) axial load cell, (c) inflow rate, (d) radial flow rate, and (e) damage evolution

4.3 논의 사항

벤토나이트 완충재에서의 기체 팽창 흐름 수치 모델링 결과 팽창 흐름에 의한 갑작스러운 공극 수압 증가, 응력 증가, 기체 주입량 및 유출량 증가 현상은 모사가 가능하였지만, 공극 수압, 응력, 기체 주입량 및 유출량의 최댓값이나 최댓값 이후 거동 등 일부 결과들이 실험실 시험 결과와 다르게 나타났는데, 이는 본 연구에서 개발된 해석 모델에서 수리-역학적 상호작용의 영향이 과소평가됨을 의미하기에 모델 개선에 관한 추가적인 연구가 필요하다. 특히 본 연구에서는 무작위적인 매질 입자 분포 및 우선 경로 생성과 같은 불확실성으로 인해 직접적인 미세 균열 발생을 모사하는 데 한계가 있어 미세 균열 발생에 의한 우선 경로를 직접적으로 고려하지 않고 손상도에 따른 등가 투수율 개념을 이용하여 팽창 흐름을 모사하고자 하였는데, 본 연구에서 개발된 해석 모델이 실제 실험실 시험에서 발생하는 복잡한 물리적 현상들을 정확히 모사하기 힘들기에 새로운 해석 방법론에 대한 깊은 고민이 필요하다. 또한 수치 해석 결과와 실험실 시험 결과를 비교하기 위해 손상도와 관련된 모델들의 변수들을 임의로 가정하였는데, 이 변수들이 어떠한 물리적 의미를 갖는지에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다. 마지막으로 미세 균열 발생 및 전파는 암석 광물의 분포에 따라 무작위적인 우선 경로를 형성하기 때문에, 추후 이 문제를 심도 있게 접근하기 위해서는 매질의 불균질성에 대한 고려가 필수적이며, 팽창 흐름에 영향을 주는 인자의 중요성을 평가하기 위해 민감도 분석을 수행함과 동시에, 입력 자료 및 모델 자체의 불확도 평가도 같이 이루어져야 한다.

5. 결론

고준위방사성폐기물을 처분하기 위한 심층처분시스템의 공학적 방벽은 처분 용기에서 방사성 핵종 누출이 발생하더라도 주변 암반으로의 누출 속도를 늦춰주는 역할을 수행해야하기 때문에 장기적으로 그 성능을 유지하여야 한다. 특히 벤토나이트 완충재와 같이 점토 물질을 다량 함유한 매질에서만 나타나는 기체 흐름 현상인 팽창 흐름은 벤토나이트 완충재의 장기 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이 현상을 명확히 규명하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 전통적인 다공성 매질에서의 2상 유동 및 유효응력 개념을 고려한 역학 모델을 기반으로, 미세 균열의 형성 및 매질의 팽창을 모사하기 위한 손상도 개념 및 이에 따른 수리 물성 변화를 고려함으로써 매질의 변형에 의한 기체의 팽창 흐름을 모사할 수 있는 수리-역학적 상호작용을 고려한 해석 모델을 개발하였으며, 1차원 및 3차원 기체 주입 시험 결과와의 비교를 통해 모델 검증 및 적용성 검토를 수행하고자 하였다.

수치 해석 결과 기체 주입으로 인한 기체 주입 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 전체적인 공극 수압 변화양상은 실험실 시험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 기체 압력에 의한 팽창 흐름으로 인한 갑작스러운 공극 수압, 응력, 기체 주입량 및 유출량 증가 현상을 확인할 수 있었지만, 공극 수압, 응력, 기체 주입량 및 유출량의 최댓값이나 최댓값 이후 거동 등 일부 결과들이 실험실 시험 결과와 다르게 나타났기에 본 연구에서 개발된 해석 모델에서 수리-역학적 상호작용의 영향이 과소평가 되는 한계를 확인할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 점토 물질을 다량 함유한 저투수성 매질에서의 기체 압력 증가로 인한 팽창 흐름에 대한 소개 및 이를 수치 해석적으로 모사가 가능하다는 것을 보여주며, 팽창 흐름에 대한 예비 모델을 제공하고 후속 연구의 발전된 모델을 개발하기 위한 기반을 제공한다는 점에서 의의가 있다. 또한 본 연구에서 개발된 수리-역학적 상호작용을 고려한 수치 모델은 향후 고준위방사성폐기물 심층처분시스템의 장기 성능평가에도 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 세일자원의 수압파쇄로 인한 팽창 흐름 및 공급압 감소에 따른 유체투과율 감소 등 다른 분야의 수리-역학 모델링 연구로도 확장 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Nuclear Research and Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF-2017M2A8A5014857) funded by the Minister of Science and ICT.

DECOVALEX is an international research project comprising participants from industry, government and academia, focusing on development of understanding, models and codes in complex coupled problems in sub-surface geological and engineering applications; DECOVALEX-2019 is the current phase of the project. The authors appreciate and thank the DECOVALEX-2019 Funding Organisations Andra, BGR/UFZ, CNSC, US DOE, ENSI, JAEA, IRSN, KAERI, NWMO, RWM, SÚRAO, SSM and Taipower for their financial and technical support of the work described in this paper. The statements made in the paper are, however, solely those of the authors and do not necessarily reflect those of the Funding Organisations.

REFERENCES

- Cuss, R., Harrington, J., Giot, R., Auvray, C., 2014, Experimental observations of mechanical dilation at the onset of gas flow in Callovo-Oxfordian claystone, In: Norris, S., Bruno, J., (eds) *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 400, pp. 507-519.
- COMSOL, Inc., 2018, *COMSOL Multiphysics - Reference manual version 5.4, Documentation for COMSOL Multiphysics 5.4*, USA.
- Daniels, K.A., Harrington, J.F., 2017, The response of compact bentonite during a 1D gas flow test, *British Geological Survey Open Report, OR/17/067*, British Geological Survey, s.l.
- Davis, J.P., Davis, D.K., 1999, *Stress-dependent permeability: characterization and modeling*, Society of Petroleum Engineers, SPE Paper no. 56813.
- Davis, R.O., Selvadurai, A.P., 2002, *Plasticity and Geomechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Fall, M., Nasir, O., Nguyen, T., 2014, A coupled hydromechanical model for simulation of gas migration in host sedimentary rocks for nuclear waste repositories, *Engineering Geology*, Vol. 176, pp. 24-44.
- Fatt, I., Klikoff, W.A., 1959, Effect of Fractional Wettability on Multiphase Flow Through Porous Media, *AIME Transactions*, Vol. 216, pp. 246.
- Gawin, D., Majorana, C.E., Schrefler, B.A., 2001, Modelling thermo-mechanical behaviour of high performance concrete in high temperature environment, In: de Borst et al., (Eds.), *Fracture Mechanics of Concrete Structure*.
- Harrington, J.F., Graham, C.C., Cuss, R.J., Norris, S., 2017, Gas network development in a precompacted bentonite experiment: Evidence of generation and evolution, *Applied Clay Science*, Vol. 147, pp. 80-89.
- Harrington, J.F. and Horseman, S.T., 2003, Gas migration in KBS-3 buffer bentonite: Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, SKB TR-03-02, SKB, Sweden.
- Hoch, A.R., Cliffe, K.A., Swift, B.T., Rodwell, W.R., 2004, *Modelling Gas Migration in Compacted Bentonite: GAMBIT Club Phase 3, Final Report, POSIVA, Olkiluoto, Finland*.
- Horseman, S.T., 1996, Generation and migration of repository gases: some key considerations, *Radioactive Waste Disposal, Proc.*

- International 2-Day Conference, London, 21-22 November 1996, IBC Technical Services.
- Horseman, S.T., Harrington, J.F., Sellin, P., 1997, Gas migration in Mx80 Buffer Bentonite Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX, Boston, Materials Research Society, pp. 1003-1010.
- Horseman, S.T., Harrington, J.F., Sellin, P., 1999, Gas migration in clay barriers, *Engineering Geology*, Vol. 54, pp. 139-149.
- Jason, L., Huerta, G., Pijaudier-Cabot, S., Ghavamian, S., 2006 An elastic-plastic damage formulation for concrete: application to elementary tests and comparison with an isotropic model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 7077-7092.
- Jirásek, M., 2004, Non-local damage mechanics with application to concrete, *French Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, pp. 683-707.
- Lee, J., Fenves, G.L., 1998, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, pp. 892.
- Lee, J., Lee, C., Kim, G.Y., 2019, Numerical Modelling of One Dimensional Gas Injection Experiment using Mechanical Damage Model: DECOVALEX-2019 Task A Stage 1A, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 29, No. 4, pp. 262-279.
- Marschall, P., Horseman, S.T., Gimmi, T., 2005, Characterisation of gas transport properties of the opalinus clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal, *Oil and Gas Science and Technology - Rev. IFP*, Vol. 60, pp. 121-139.
- Mazars, J., 1986, A description of micro and macroscale damage of concrete structure, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25, pp. 729-737.
- Meschke, G., Grasberger, S., 2003, Numerical modeling of coupled hydromechanical degradation of cementitious materials, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129(4), pp. 383-392.
- Nash, P.J., Swift, B.T., Goodfield, M., Rodwell, W.R., 1998, Modelling Gas Migration in Compacted Bentonite: A report produced for the GAMBIT Club, POSIVA, Helsinki.
- NEA-EC, 2003, Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories, State-of-the-art Report, EUR 19964 EN, Brussels: European Commission, Paris: OECD, ISBN 92-64-18498-8.
- Nguyen, T., Le, A., 2015, Simultaneous gas and water flow in a damage-susceptible bedded argillaceous rock, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 52, pp. 18-32.
- Rutqvist, J., Wu, Y-S., Tsang, C.F., Bodvarsson, G., 2002, A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, pp. 429-442.
- Simo, J., Ju, J., 1987, Strain- and stress-based continuum damage models-I formulation, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 23, pp. 821-840.
- Souley, M., Homand, F., Pepa, S., Hoxha, D., 2001, Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 38 (2), pp. 297-310.
- Tang, C.A., Tham, L.G., Lee, P.K.K., Yang, T.H., Li, L.C., 2002, Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 39, pp. 477-489.
- Van Genuchten, M., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898.