

복합 처분환경 모사조건에서의 KURT 화강암의 역학적 물성 변화 평가

박승훈¹ · 김진섭^{2*} · 김건영³ · 권상기⁴

¹비회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 연구생, 인하대학교 에너지자원공학과 박사수료

²정회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원

³비회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원

⁴비회원, 인하대학교 에너지자원공학과 교수

Evaluation of mechanical properties of KURT granite under simulated coupled condition of a geological repository

Seunghun Park¹ · Jin-Seop Kim^{2*} · Geon Young Kim³ · Sangki Kwon⁴

¹Research Student, Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute and Ph.D. Student, Dept. of Energy Resource Engineering, Inha University

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

³Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

⁴Professor, Dept. of Energy Resource Engineering, Inha University

*Corresponding Author : Jin-Seop Kim, kjs@kaeri.re.kr

Abstract

The rock properties measured under in-situ geological condition can be used to increase the reliability in numerical simulations with regard to the long-term performance of a high-level waste repository. In this study, the change in mechanical properties of KURT (Korea atomic energy research institute Underground Research Tunnel) granite was evaluated under the simulated THM (Thermo-Hydro-Mechanical) coupled condition due to a deep geological formation in the disposal repository. The rock properties such as uniaxial compression strength, indirect tensile strength, elastic modulus and Poisson's ratio were measured under the coupled test conditions (M, HM, TM, THM). It was found that the mechanical properties of KURT granite is more susceptible to the change in saturation rather than temperature within the test condition of this study. The changes in uniaxial compression strength and indirect tensile strength from the rock samples of dried or saturated conditions showed the maximum relative error of about 20% and 13% respectively under the constant temperature condition. Therefore, it is necessary to use the material properties of rock measured under the coupled THM condition as input parameters for the numerical simulation of long-term performance assessment of a disposal repository

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(4)501-518(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.4.501>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 30, 2019

Revised June 12, 2019

Accepted June 21, 2019



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.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: High-level radioactive waste disposal repository, THM coupled condition, KURT granite, Change of mechanical rock property

초 록

심부 지하환경 조건에서 측정된 암석물성의 사용은 고준위폐기물처분장의 장기 안전성 평가 측면에서 해석의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 연구는 지하처분연구시설(Korea atomic energy research institute Underground Research Tunnel, KURT)의 화강암(한국원자력연구원, 대전)을 대상으로 고준위폐기물 처분장에서 예상되는 복합환경 조건을 구현한 후 암석의 역학적 물성 변화를 측정하였다. 실험은 심지층 처분환경이 모사되도록 열-수리-역학적 복합 환경(Thermo-Hydro-Mechanical, THM)이 조절될 수 있는 실험장치를 제작하였다. 다양한 복합 실험조건(M, HM, TM, THM)을 구현하여 일축압축강도와 간접인장강도, 탄성계수, 포와송비 등의 암석물성을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 실험결과, 처분장 근계암반 예상 온도범위 내에서는 KURT 화강암의 역학적 물성이 온도의 영향 보다 포화유무에 따른 변화가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동일한 온도 조건에서 포화 유무에 따른 일축압축시험 결과는 최대 약 20%의 상대적인 차이를 보였으며, 간접인장시험 결과는 최대 13%의 차이가 발생하였다. 따라서 처분장의 장기거동에 따른 성능평가 및 안전성 예측을 위해서는 기존의 상온 실내시험을 통해 도출된 암석물성을 사용하기보다 심부 지하환경을 반영한 암석의 복합물성을 활용하는 것이 해석의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

주요어: 고준위 방사성폐기물장, THM 복합 환경, KURT 화강암, 암석의 역학적 물성 변화

1. 서론

고준위 방사성폐기물(High-Level radioactive Waste, HLW) 처분장은 사용 후 핵연료로부터의 고열 방출 및 방사성핵종 누출 등의 위험요소들이 포함되기 때문에 안전한 관리가 필요한 지하구조물이다. 이러한 지하 구조물에 대해 IAEA (International Atomic Energy Agency)에서는 고준위 방사성폐기물의 심층처분(Deep Geological Disposal)의 개념을 권고하고 있다(IAEA, 1981). 심층 처분 개념은 300~1,000 m의 고심도 암반에 방사성 오염 원으로부터 인간의 생활권을 영구적으로 격리시켜 10만년 이상의 장기간 안전성을 유지하면서 처분하는 방법을 일컫는다. 심층 처분의 환경에서는 고준위 방사성폐기물을 담은 처분용기에서 발생하는 고열과 암반에서 유입되는 지하수로 인한 포화 및 고심도 조건에서의 높은 지중응력이 동시에 작용한다. 이와 같은 동시에 유발되는 열-수리-역학적(Thermo-Hydro-Mechanical, THM) 복합 환경은 처분시스템의 장기거동 관점에서 처분장 구조물의 성능과 안정성에 직결되는 매우 중요한 영향 인자이다. THM 복합 환경에서는 열적, 수리적, 역학적 거동변화가 하나의 특성으로 지배되는 것이 아니라 복합적인 반응이 일어날 것으로 예상된다. 이러한 이유로 처분장에서는 THM 복합 환경을 고려하여 장기 성능 평가를 위한 관련 연구들이 요구된다.

방사성폐기물 처분장의 장기 성능 평가는 현장 암반시험이나 암반 거동을 이해하기 위한 실내 실험과 장기거동 예측을 위한 수치해석기법이 연계된다. 수치해석기법은 처분장의 복합 환경이 반영된 입력 자료들의 확보가

필수적이며, 이를 위해 현장 시험과 실내 실험이 선행된다. 실내 실험은 현장 시험 보다 소규모의 환경을 구성하여 경제적 비용과 시간 측면에서 유리한 점을 갖고 있다. 이러한 실내 실험의 장점을 활용하여 기연구자들은 열적, 수리적, 역학적 환경 변화를 고려한 암석의 특성 분석을 수행하였다. Heo et al. (2014), Park et al. (2015), Ahrens et al. (2018), Kitamura et al. (2010)은 수리-역학적(Hydro-Mechanical, HM) 복합 환경을 가정하여 지하수에 의한 포화와 암석의 가압상태를 고려한 암석 물성 평가를 수행하였다. 이들의 연구에서는 HM 복합 환경에서의 암석 특성 변화를 확인하였으나, 열 환경을 반영한 암석 물성 변화는 고려하지 않았다. Yoon et al. (2011)은 열-수리적(Thermo-Hydraulic, TH) 환경인 온도와 수압조건에서의 암석 물성 영향을 평가하였다. 이들은 TH 환경 조건을 동시에 구성하지 않고 각각의 단일 조건에서 연구를 수행하였다. Zhao et al. (2012), David et al. (1999)은 열-역학적(Thermo-Mechanical, TM) 환경인 가압과 온도조건을 고려하여 암석의 물성 평가와 구조적 변화를 분석하였다. 이들의 실험에서는 TM 복합 환경을 구성하여 암석 물성 변화를 확인 하였으며, 지하수 포화가 반영되는 수리적 환경은 고려하지 않았다. Lee et al. (1998)은 THM 환경을 고려한 암석의 특성 분석을 수행하였다. 이들의 연구에서는 THM 환경 조건을 고려하였지만 열 환경에 의한 변화가 일어난 후에 HM 복합 환경을 구성하여 실험을 수행하였다. 기 연구사례에서는 암석 물성 평가를 위해 다양한 환경 조건을 고려하여 연구가 수행된 것을 알 수 있었다. 그리고 고심도 광산, 폐광산, 지열발전, 가스 저장시설 등을 대상으로 암반 환경에 맞는 열적, 수리적, 역학적 조건을 모사하여 실험을 수행하였다. 반면에, 선행 연구 중에서는 방사성폐기물 처분장 환경을 대상으로 한 연구가 거의 없었으며, THM 복합 환경을 동시에 구성한 암석의 물성 평가 연구가 미미하였다. 방사성폐기물 처분장에서는 THM 복합환경이 필연적으로 발생하므로, 암석 물성 측정하여 거동 변화 예측을 위한 물성 평가와 수치해석을 위한 입력 자료의 활용 측면에서 연관된 연구가 필요하다.

방사성폐기물 처분 환경에서는 암석의 강도나 강성, 투수계수, 열물성의 변화가 일어나면 처분공 및 터널 설계에 영향을 줄 수 있으며, 완충재의 재포화와 핵종이동 특성 변화를 야기시켜 처분장의 건전성 및 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 THM 복합 환경의 처분장 조건에서는 장기운명을 고려하여 사전에 필요한 암석의 특성과 약이 중요하다. 본 연구에서는 방사성폐기물 처분장 환경을 고려하여 THM 조건을 모사하고 실제 처분장의 현장 조건과 가까운 암석 물성을 평가하고자 하였다.

2. 암석 물성 변화에 대한 선행 연구 분석

본 절에서는 THM 환경에서 암석 물성 변화에 대한 연구 사례를 기술하였다. Fig. 1과 같이 THM 복합 환경이 일어나면 암석의 역학적 물성은 열과 유체의 유입으로 인한 성질 변화가 일어난다. 이로 인해 방사성폐기물 처분장에서는 물성 변화로 인한 처분장의 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 특성 평가와 선행 연구에 대한 이해가 필요하다.

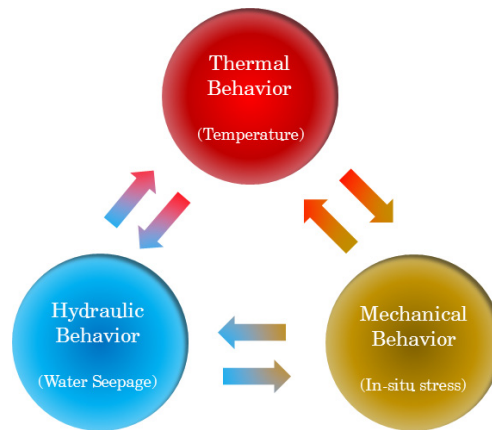


Fig. 1. THM interactions of rock

일축압축강도, 인장강도, 탄성계수 등과 같은 암석의 물성은 암반 구조물을 설계할 때 해석을 위한 입력 자료와 암반 안정성을 평가하는 기반자료로 활용된다. 일축압축강도는 암석의 포화도가 증가하면 강도가 감소된다(Hsu and Nelson, 1993). 또한, 건조와 포화상태에서의 일축압축강도는 강도 감소의 차이가 명확하게 발생하는 것으로 알려져 있다(Török and Väsärhelyi, 2010). Park et al. (2015)은 지하수로 인한 포화와 지반으로부터 받는 상부하중의 영향을 동시에 고려하여 암석 물성 평가를 수행하였다. 실험 결과에서는 가압상태에 따라 건조와 포화 상태에서의 열전도도, 공극률, 일축압축강도, 인장강도 등의 유의미한 차이를 보였다. 특히, 건조와 포화여부에 따라 일축압축강도는 약 12%, 인장강도는 약 15% 차이가 나타났다. Inada et al. (1997)은 고온과 저온의 열환경을 반영하여 암석의 건조와 포화상태에 따라 물성을 평가하였다. 측정된 결과는 100°C와 15°C의 온도조건에서 모두 포화상태 일 때, 일축압축강도가 낮게 나타났다. 뿐만 아니라 포화유무에 따라 인장강도, 탄성계수의 차이도 명확하게 구분되었다. Török and Török (2015)은 온도를 변화시키면서 암석의 역학적 물성 실험을 수행하였다. 이들은 일축압축강도가 300°C를 기점으로 온도가 증가함에 따라 약 30%의 강도 감소가 일어나는 것을 확인하였다. Huang et al. (2017)은 고온 환경에서 암석의 역학적 물성과 파괴 패턴을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 이들의 연구에서는 온도 조건에 따라 파괴 패턴의 차이를 규명하였으며, 온도 변화에 의한 탄성계수가 최대 60%까지 감소하는 것으로 결론지었다.

본 절에서는 선행 연구에서 수행한 암석 물성 평가에 대한 연구 내용을 다루었다. 선행 연구들에서는 포화유무에 따라 암석의 물성 변화 차이가 있는 것으로 확인되었다. 또한, 열 환경하에서 암석 물성 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 선행 연구 결과는 THM 복합 환경을 고려하지 않았지만, 반영된 실험 조건과 연구 방법 및 내용들을 토대로 본 연구에서의 THM 복합 환경을 구성하고 수행한 연구 결과와의 비교 분석을 위한 대조군으로 활용하였다.

3. 복합 환경을 고려한 암석 실험 방법

3.1 KURT의 암석 지질 조건 및 시료 제작

본 연구의 시료는 대전 유성지역의 중생대 화강암을 채취하였으며, 한국원자력연구원내 KURT에서 지하 453~460 m 심도의 암석을 대상으로 하였다. 기반암의 지질 구성은 경기 변성암에 포함되고 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암 및 맥암류로 볼 수 있다(Park et al., 1977). Fig. 2 연구지역의 지질 특성은 전 범위에서 분포하는 중생대 복운모 화강암에 편상화강암이 관입한 형태로 구성된다. 복운모 화강암은 중립 및 세립질 구조이며 주요 구성 광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등으로 관찰된다(Kim et al., 2004).

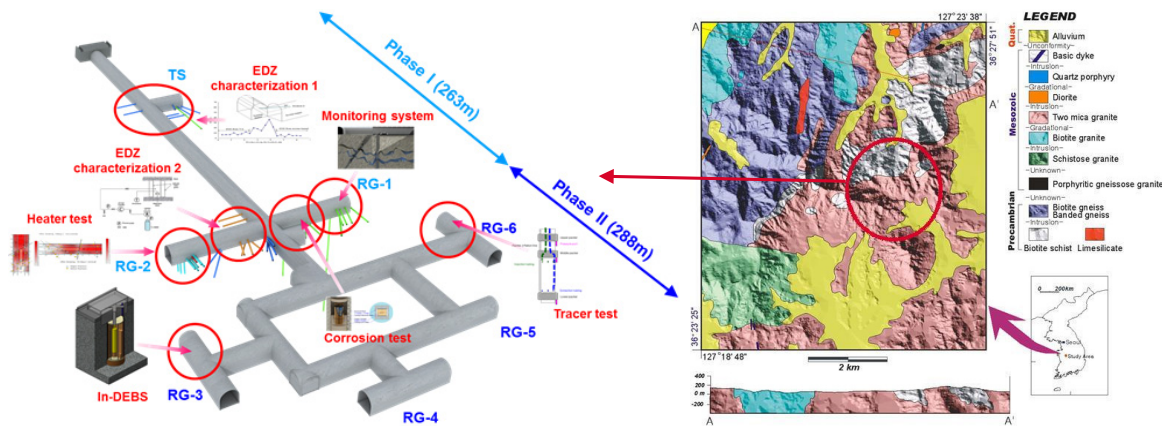


Fig. 2. Geological features and KURT of area of collected rock specimen (Lee et al., 2019)

채취된 암석시료는 절단과 연마 과정을 통해 성형되었다. 모든 시료는 ISRM (2007)에서 제시한 조건을 만족하도록 하였으며, 각 시료의 편평도는 양 단면의 0.02 mm 이내로 수렴되도록 제작하였다. 일축압축시험 및 물리적 특성 측정(비중, 흡수율, 초음파속도)을 위한 시료는 직경 약 50 mm, 높이 약 110~115 mm 내외로 총 24개를 성형하였으며, 인장강도시험을 위한 시료는 동일한 직경에서 두께 약 25~30 mm 내외로 총 24개 제작하였다(Fig. 3).

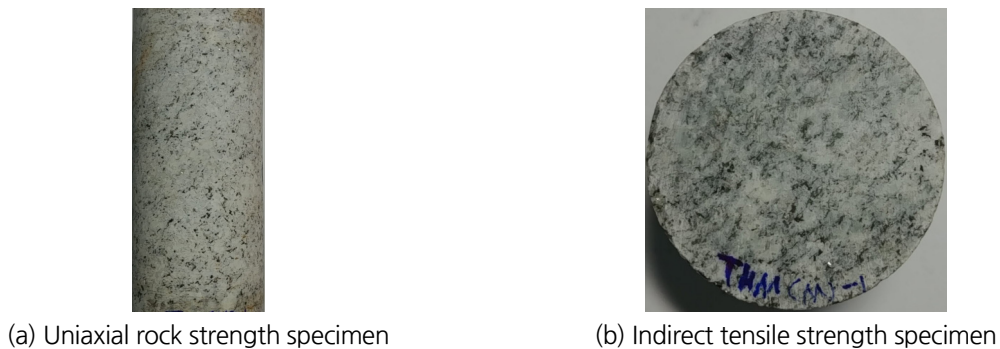


Fig. 3. Specimens for experiment

3.2 암석의 물리적 및 역학적 측정 방법

암석의 물성 측정은 ISRM (2007)에서 제안한 시험법에 따라 시험이 수행되었다. 암석 시료 제작 후 비중, 공극률, 흡수율, 탄성파 속도에 대한 물성을 측정하였다. 비중, 공극, 흡수율은 암석을 48시간 동안 건조 및 포화조건을 유지시킨 후, 무게를 0.01 g까지 측정하여 계산하였다. 초음파(P and S wave) 속도는 건조와 포화된 암석을 측정하였으며, 이를 이용하여 동적 특성치를 계산하였다(ISRM, 2007).

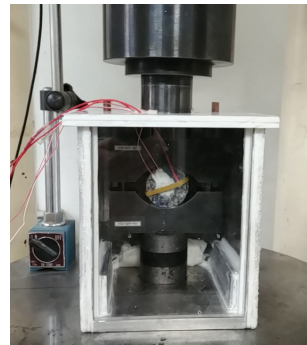
일축압축강도는 암석 시료에 Fig. 4(a)처럼 축방향과 횡방향 변형률계를 부착하고 0.5~1.0 MPa/s 범위의 가압 속도를 조절하여 압축시험기에서 시료가 파괴될 때까지 가압하였다. 파괴되는 하중(P)를 기록하여 일축압축강도(σ_c)를 계산하였다(ISRM, 2007). 간접인장강도(σ_t)는 압축시험기에 인장가압판을 설치하여 0.05~0.35 MPa/s의 속도로 가압하여 파괴되는 하중값을 기록하였다. 간접인장강도 시험에서 얻어지는 Splitting 탄성계수(E_t)와 인장 탄성계수(E_s)는 Jianhong et al. (2009)가 제안한 식 (1)과 같은 방법으로 계산하였다.

$$E_t = E_s \left[\left(1 - \frac{D}{L} \tan^{-1} \left(\frac{2L}{D} \right) \right) (1 - \nu) + \frac{2D^2(1 + \nu)}{4L^2 D^2} \right] \quad (1)$$

여기서, D 는 시료의 직경(mm), L 은 변형률 게이지 길이의 절반 값, ν 는 프와송비이다.



(a) Rock specimen with axial and lateral strain device



(b) Tensile loading plate in constant temperature chamber

Fig. 4. Test device for measuring rock strengths

3.3 THM 복합 환경

본 실험에서의 THM 복합환경은 가압과 지하수로 인한 포화와 핵연료로부터 발생하는 열의 영향을 실험에 구성하였다. 그리고 건조와 포화상태에서의 암석을 상온과 가열조건에 따라 환경을 조합하여 현장 조건에 가까운 THM 복합 환경의 암석 물성 평가를 수행하였다. 실험 환경은 건조와 포화상태를 모사하기 위해 Fig. 4(b)와 같은

항온 챔버를 제작하여 암석의 포화와 온도가 유지되도록 하였다. 항온 챔버 내에서 THM 복합환경이 유지되는 컨셉은 Fig. 5와 같다. 포화상태는 암석이 가압되면서 발생하는 공극수압의 재분포를 고려하지 않고, Choi et al. (2018)의 포화 실험 조건을 참고하여 짧은 시간 동안의 암석 건조가 일어나지 않도록 실험 환경을 유지하였다. 항온 챔버 내에서는 온도조절장치를 장착하여 10~80°C 범위의 온도가 일정하게 유지된다. 실험의 온도 조건은 Cho et al. (2019) 연구의 처분장 조건에서 핵연료로 인한 근계 암반의 최대온도 65~77°C를 기준으로 하였다. 이를 반영하여 원계영역 암반 온도인 15°C와 최대온도 75°C를 설정하고 두 온도의 중간값인 45°C를 목표 온도로 하여 실험 환경을 구성하였다. 구성된 실험 환경은 Table 1과 같으며, 역학 물성을 도출하기 위한 주요실험인 일축압축강도와 간접인장강도 실험과 암석 시료의 특성을 확인하기 위한 기본 물성 측정으로 나누어 실험을 수행하였다.

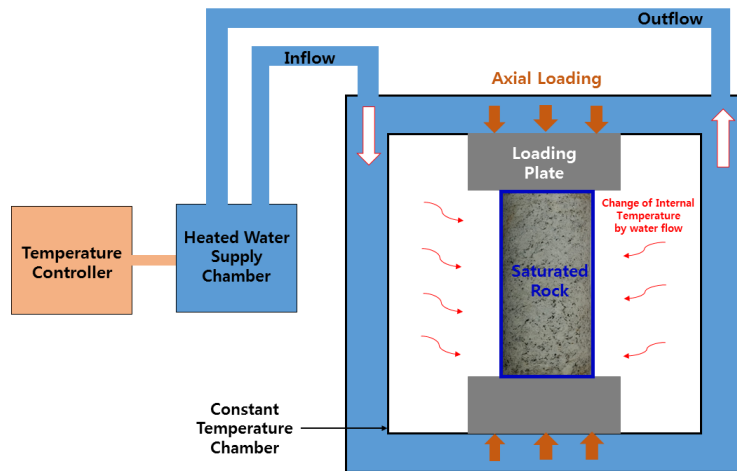


Fig. 5. Layout of Thermo-Hydro-Mechanical test condition

Table 1. Test conditions of rock specimens

Specimen numbers	Test condition	Temperature condition	Rock condition	Main experiments	Sub. experiments
M-1,2,3	Mechanical	20~21°C	Dry	- Uniaxial compressive strength - Indirect tensile strength	- Density - Specific gravity - Porosity - Absorption - P and S wave velocity
TM(L)-1,2,3	Thermo-Mechanical	15°C			
TM(M)-1,2,3		45°C			
TM(H)-1,2,3		75°C			
HM-1,2,3	Hydro-Mechanical	20~21°C	Saturated		
THM(L)-1,2,3	Thermo-Hydro-Mechanical	15°C			
THM(M)-1,2,3		45°C			
THM(H)-1,2,3		75°C			

4. 실험 결과 분석 및 고찰

본 절에서는 실험에 사용된 암석의 물리적 특성과 열-수리-역학적 복합환경을 고려한 역학적 물성 측정 결과를 기술하였다.

4.1 물리적 특성 측정 결과

THM 복합환경을 구성하여 암석 물성을 측정하기 전, 각 시료에 대하여 밀도, 비중, 공극률, 흡수율, 초음파 속도 등의 물성을 측정하였다. 측정된 결과는 Table 2와 같이 시험조건별 시료들의 물성을 나낸 것이다. 모든 시료의 평균값은 밀도 2.650 g/cm^3 , 비중 2.659, 공극률 0.686%, 흡수율 0.258%로 확인되었다. 암석 물성은 시료 간의 편차가 적으며, 시료 상태는 균질한 것으로 보여진다.

Table 2. The results of density, specific gravity, porosity, water absorption of granite

Name of specimen	Density (g/cm^3)	Specific gravity	Porosity (%)	Water absorption (%)
M	2.64 ± 0.01	2.66	0.67 ± 0.04	0.25 ± 0.02
TM(L)	2.64 ± 0.01	2.65	0.74 ± 0.01	0.28 ± 0.01
TM(M)	2.65	2.66	0.73 ± 0.03	0.26 ± 0.01
TM(H)	2.65 ± 0.01	2.66	0.70 ± 0.01	0.27
HM	2.65 ± 0.01	2.66 ± 0.01	0.70 ± 0.03	0.26 ± 0.01
THM(L)	2.66	2.67	0.66 ± 0.03	0.25 ± 0.01
THM(M)	2.65 ± 0.01	2.67 ± 0.02	0.62 ± 0.08	0.23 ± 0.03
THM(H)	2.65 ± 0.01	2.67 ± 0.01	0.68 ± 0.08	0.26 ± 0.03
Total average	2.65	2.66	0.69	0.26

본 연구에서는 성형된 암석 시료의 균질성을 확인하기 위해 Ozclik and Ozguven (2014)의 연구 결과와 비교 분석하였다. 이들의 연구에서는 결합이 없고 암석 구조상 비교적 균질한 화강암을 선정하여 물성간의 상관성을 보여줬다. 제안된 선형관계식과 측정된 물성값을 계산한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서는 흡수율과 밀도, 공극률의 양상이 Ozclik and Ozguven (2014)의 제안된 식과 유사하게 선형성을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 평균 밀도가 약 0.23 g/cm^3 , 평균 공극률에서 0.03%의 차이가 나타났다. 이와 같은 결과에서는 흡수율과 공극률 관계의 편차가 미미한 것으로 보여진다. 본 연구의 암석 시료는 비교적 균질성이 뚜렷한 결과를 갖는 것으로 사료되며, 이와 같이 균질성을 갖는 암석 시료들은 THM 복합 환경의 실험에서 역학적 물성 간의 오차가 크지 않을 것으로 예상된다.

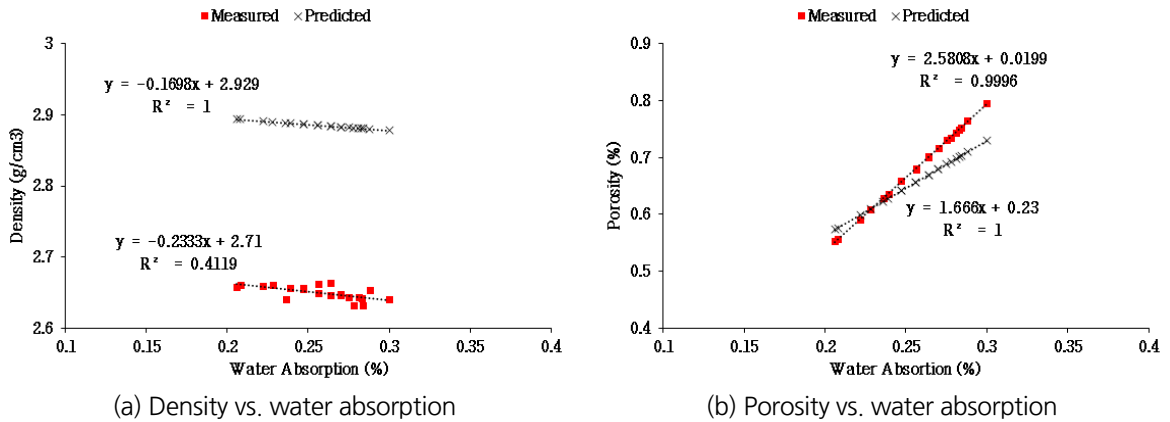


Fig. 6. Analysis results of collected rock specimens

초음파 속도는 건조와 포화상태의 영향을 확인하기 위해 M과 HM 시료를 대상으로 측정하였다. M 시료는 건조상태, HM은 포화상태로 초음파를 측정하였으며, 이 결과는 Table 3에 정리되었다. 건조상태의 시료는 평균 P파 속도가 3,974 m/s, 평균 S파 속도가 2,745 m/s로 측정되었다. 포화상태의 시료는 평균 P파 속도가 5,121 m/s, 평균 S파 속도가 2,745 m/s로 나타났다. 포화 상태를 기준으로 건조상태와의 차이가 P파는 22%, S파는 9%로 포화 암석의 초음파 속도가 더 큰 것을 알 수 있다.

Table 3. Dynamic rock properties of granite

Rock condition	Name of specimen	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E_u (GPa)	ν_u
Dry	M-1	4,189	2,630	42.97	0.174
	M-2	3,923	2,350	35.57	0.220
	M-3	3,811	2,486	37.08	0.130
	Average	3,974	2,489	38.54	0.175
Saturated	HM-1	5,426	2,898	58.15	0.301
	HM-2	4,642	2,569	44.74	0.279
	HM-3	5,294	2,766	53.09	0.312
	Average	5,121	2,745	51.99	0.297

4.2 역학적 특성 측정 결과

일축압축강도, 간접인장강도, 탄성계수 등의 측정은 역학적(M), 수리-역학적(HM), 열-역학적(TM), 열-수리-역학적(THM) 환경의 실험 조건에 따라 수행되었다. 실험에서는 온도 환경 조건을 제외하고 상온상태(21~22°C)에서 역학 물성이 측정되었다. 모든 결과는 Fig. 7의 응력-변형률 관계로부터 얻어졌으며, 측정된 일축압축강도, 탄성계수, 포와송비의 결과는 Table 4와 같다. M 조건 실험에서는 평균적으로 일축압축강도 177.7 MPa, 탄성

계수 55.87 GPa, 포와송비 0.252로 측정되었다. HM 조건 실험에서는 평균적으로 일축압축강도 148.3 MPa, 탄성계수 64.56 GPa, 포와송비 0.272로 나타났다. M과 HM 조건의 건조 포화 유무에 따라 결과를 비교해보면, 포화암석 시료는 일축압축강도가 건조 암석 시료에 비해 약 16.5% 감소되었으며, 탄성계수와 포와송비가 각각 15.6%, 8.0%로 증가되었다.

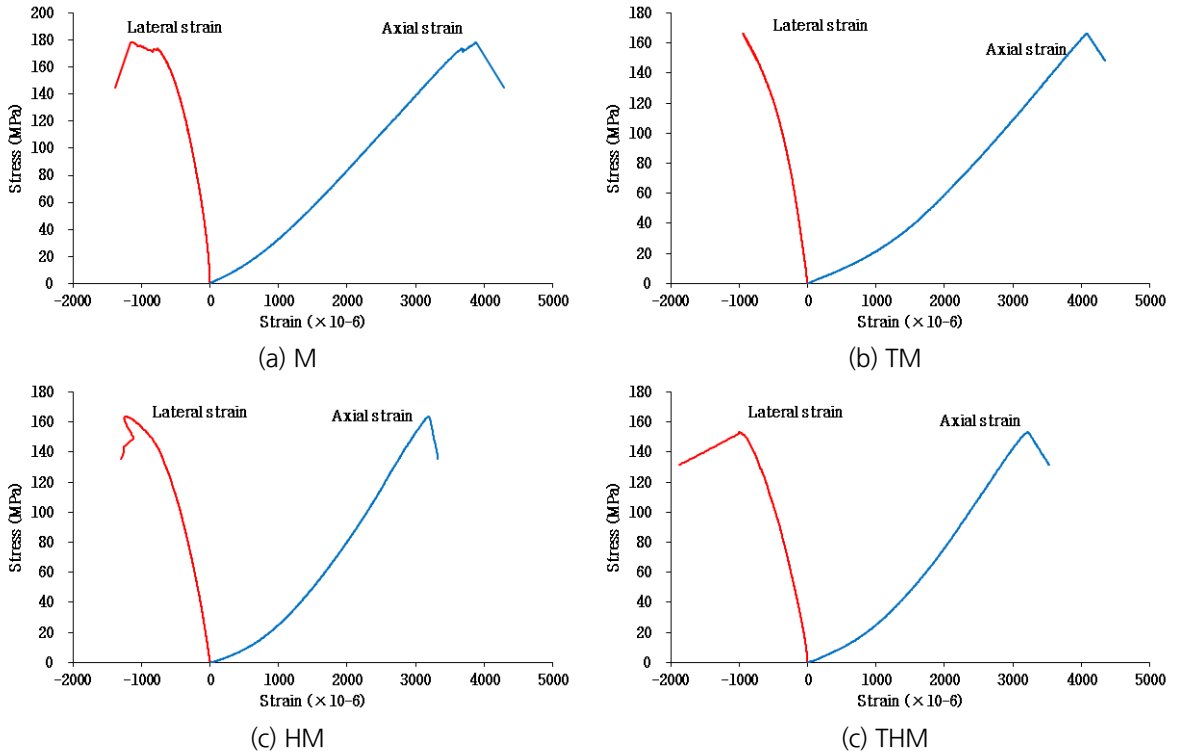


Fig. 7. Stress-strain curve under uniaxial compressive test

Table 4. The results of uniaxial compressive strength, elastic modulus, poisson's ratio of granite

Test condition		Name of specimen	UCS (MPa)	E (GPa)	ν
Mechanical		M	177.7 ± 13.3	55.9 ± 1.1	0.25 ± 0.04
Thermo-Mechanical	15°C	TM(L)	173.8 ± 8.8	52.7 ± 2.0	0.27 ± 0.04
	45°C	TM(M)	183.2 ± 2.4	57.5 ± 2.8	0.30 ± 0.02
	75°C	TM(H)	199.9 ± 5.9	59.1 ± 0.2	0.28 ± 0.03
Hydro-Mechanical		HM	148.3 ± 15.4	64.6 ± 4.6	0.27 ± 0.07
Thermo-Hydro-Mechanical	15°C	THM(L)	145.7 ± 13.3	64.0 ± 3.4	0.30 ± 0.04
	45°C	THM(M)	157.5 ± 11.1	65.8 ± 3.1	0.33 ± 0.02
	75°C	THM(H)	160.3 ± 4.6	73.9 ± 1.3	0.34 ± 0.01

TM 조건 실험에서는 15°C, 45°C, 75°C의 온도 조건이 반영되었으며, Fig. 8에서처럼 온도가 상승할수록 일축 압축강도, 탄성계수, 포와송비가 증가하는 양상을 보였다. 그러나 온도증가에 따른 물성 차이는 각각 약 10% 이내로 확인되어 뚜렷한 경향성을 갖지 않는 것으로 보여진다.

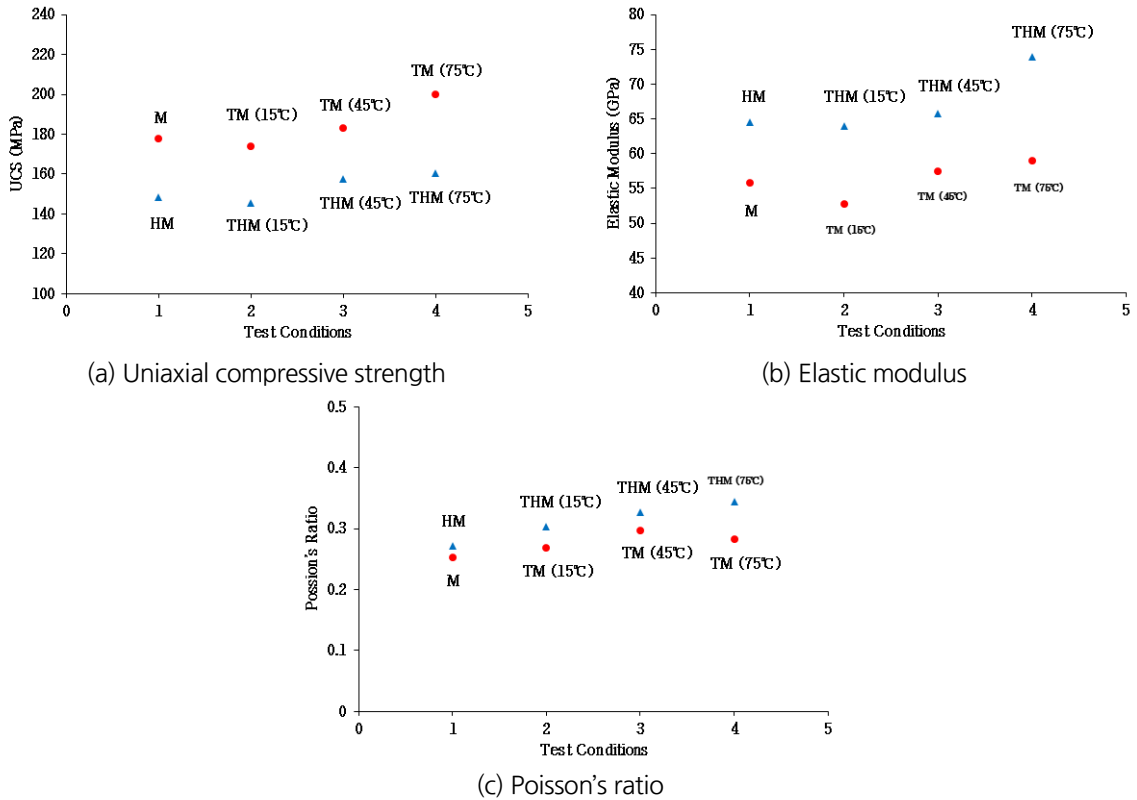


Fig. 8. The changes of uniaxial compressive strength, elastic modulus, poisson's ratio

THM 조건 실험에서는 TM 조건과 마찬가지로 같은 온도 조건에서 실험이 수행되었으며, 측정된 결과도 온도 상승에 따른 일축압축강도, 탄성계수, 포와송비의 변화 양상이 유사하였다. THM 실험과 TM 실험에서의 같은 온도에 대한 각각의 결과를 비교해보면, Fig. 8에서처럼 차이가 뚜렷하게 구분된다. 이러한 각각의 실험 조건에서 역학 물성 차이에 대한 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서는 암석 물성 간의 차이가 온도의 영향보다 상대적으로 포화유무에 따른 영향이 큰 것으로 알 수 있다. 이는 Zhou et al. (2016)의 연구에서 언급된 포화암석에서의 물성 감소로 설명될 수 있다. 이들은 포화로 인해 광물 입자 사이의 연결성 감소와 초기 균열 내의 물의 침투로 마찰력 저하로 인한 균열 축진이 일어날 것으로 예상했다. 이러한 이유로 본 연구 결과에서 나타난 암석 물성 간의 차이는 포화의 영향에 의해 발생된 것으로 해석된다.

Table 5. Differences in rock properties under various conditions of uniaxial compressive test

	M vs HM	TM		TM vs THM		
		15°C vs 45°C	45°C vs 75°C	15°C	45°C	75°C
UCS	+16%	+5%	+9%	+16%	+14%	+20%
Elastic modulus	+15%	+9%	+3%	+17%	+12%	+20%
Possion's ratio	+8%	+10%	+5%	+11%	+9%	+17%

간접인장시험에서는 일축압축시험과 동일한 조건에서 실험이 수행되었다. Fig. 9의 응력-변형률 관계로부터 결과값은 측정되었으며, 간접인장강도, Splitting 탄성계수, 인장 탄성계수의 결과가 Table 6에 정리되었다. M과 HM 조건의 건조 포화 유무에 따른 물성 차이가 일축압축시험과 유사하게 포화 암석 시료는 간접인장강도가 건조 암석 시료에 비해 약 11.6% 감소되었으며, Splitting과 인장 탄성계수가 약 7~9% 정도 큰 것으로 확인되었다.

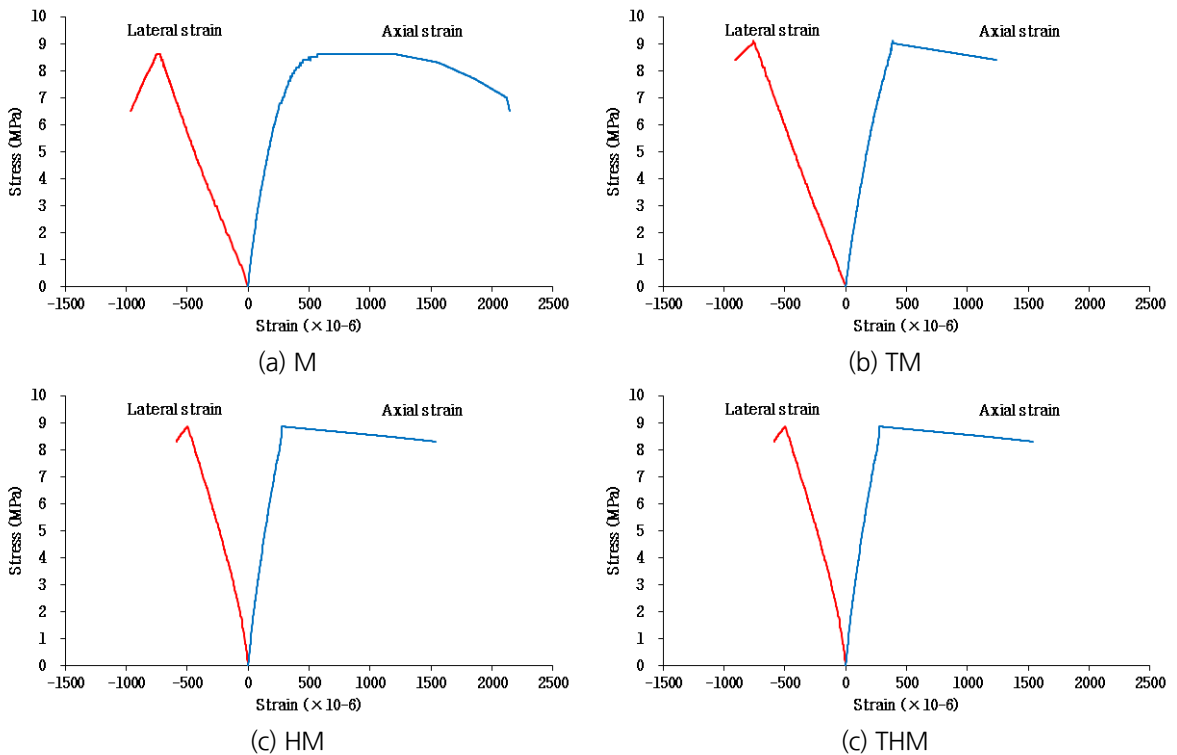


Fig. 9. Stress-strain curve under indirect tensile test

Table 6. The results of indirect tensile strength, splitting elastic modulus, tensile elastic modulus of granite

Test condition		Name of specimen	Tensile strength (MPa)	Splitting elastic modulus (GPa)	Tensile elastic modulus (GPa)
Mechanical		M	9.1 ± 2.4	28.7 ± 2.6	50.1 ± 8.1
Thermo-Mechanical	15°C	TM(L)	9.7 ± 1.6	27.7 ± 0.9	49.3
	45°C	TM(M)	8.4 ± 1.3	28.1 ± 4.0	52.6 ± 8.2
	75°C	TM(H)	9.3 ± 0.6	31.8 ± 0.2	57.8 ± 3.3
Hydro-Mechanical		HM	8.0 ± 0.5	30.7 ± 1.0	54.4
Thermo-Hydro-Mechanical	15°C	THM(L)	8.3 ± 0.7	28.9 ± 0.2	54.7 ± 0.4
	45°C	THM(M)	9.0 ± 1.8	31.1 ± 1.1	60.8 ± 0.1
	75°C	THM(H)	9.1 ± 1.3	32.5 ± 0.8	65.4 ± 2.9

TM 조건 실험에서는 일축압축시험과 동일한 조건이었으며, 온도 증가에 의한 인장 탄성계수를 제외하고 간접 인장강도, Splitting 탄성계수의 변화가 미미하였다(Fig. 10). 또한, THM 조건 실험에서도 변화양상이 거의 없었다. 각각의 실험 조건에 따른 물성차이는 Table 7과 같으며, 일축압축시험 결과보다 상대적으로 물상 간의 차이가

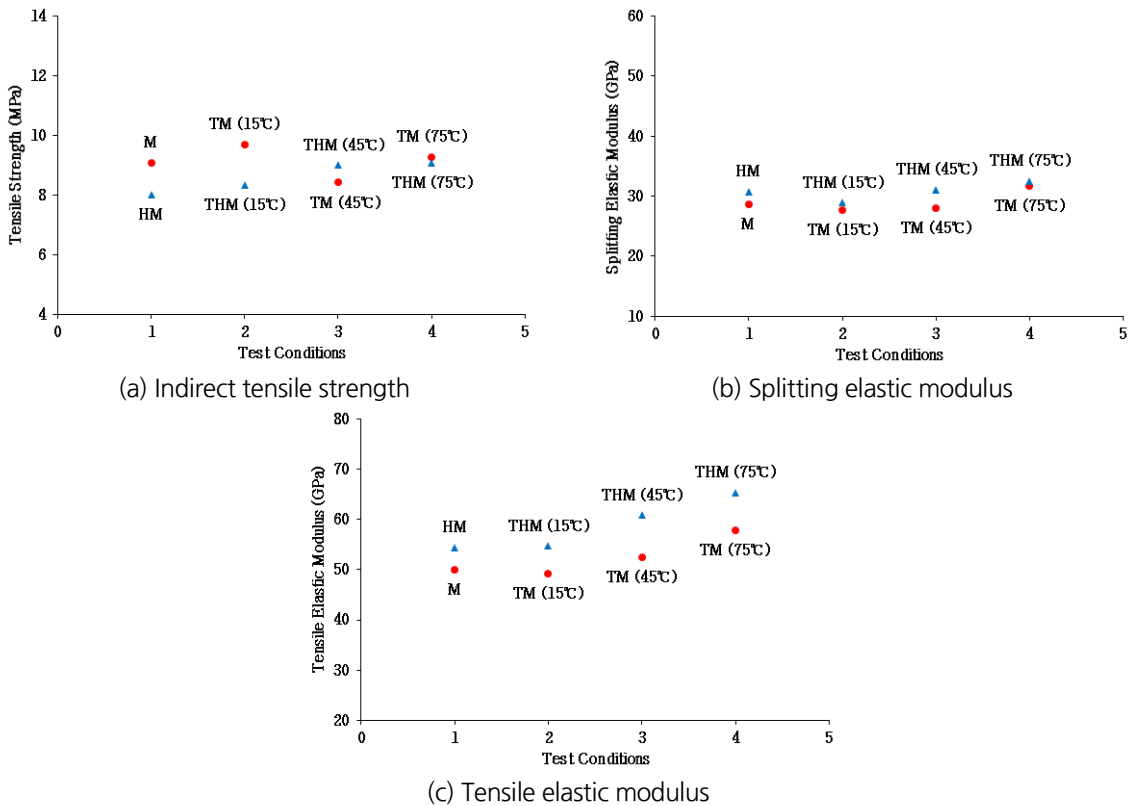


Fig. 10. The changes of indirect tensile strength, splitting elastic modulus, tensile elastic modulus

뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한, 간접인장시험 결과에서는 일축압축시험 결과와 마찬가지로 포화 유무에 따른 물성 변화가 나타났으며, 이는 앞서 언급한 포화 암석에서의 물성감소의 원인으로 짐작할 수 있다.

Table 7. Differences in rock properties under various conditions of indirect tensile test

	M vs HM	TM		TM vs THM		
		15°C vs 45°C	45°C vs 75°C	15°C	45°C	75°C
Tensile strength	+12%	+13%	+10%	+14%	+4%	+10%
Splitting elastic modulus	-7%	+1%	+13%	+6%	+10%	+13%
Tensile elastic modulus	+9%	+7%	+10%	+2%	+2%	+11%

4.3 복합환경을 고려한 암석 물성 실험에 대한 고찰

본 연구에서는 THM 환경을 고려한 역학 물성 실험을 수행하였다. 실험에서는 고준위 방사성폐기물 처분장의 암반 환경을 고려하여 근계암반의 최대 온도인 75°C를 반영하고 지하수로 인한 포화와 가압환경이 모사되었다.

본 연구에서 측정한 건조와 포화상태에서의 물성 차이는 KURT 암석을 대상으로 역학적 물성을 측정한 Park et al. (2015)의 연구 결과와 비교하여 약 1~4%의 편차를 보였다. 이는 KURT 화강암의 건조 포화로 인한 물성

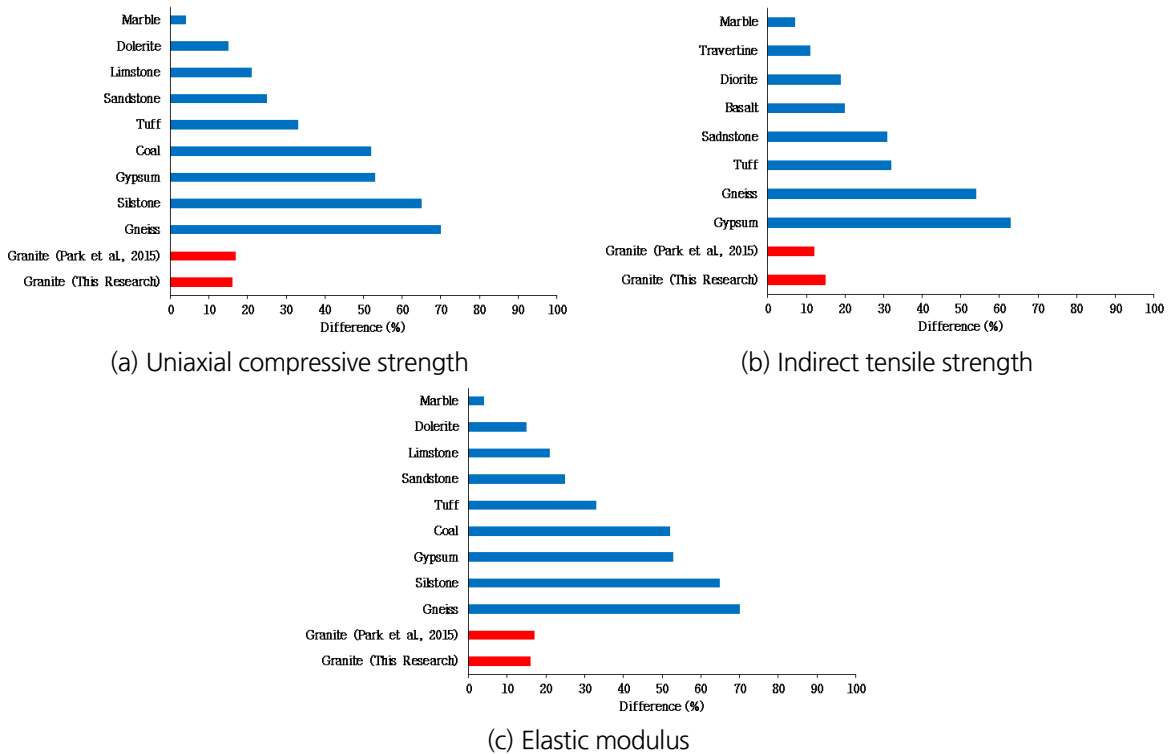


Fig. 11. Difference of saturated and dried properties on rock types (modified from Choi et al., 2018)

차이가 Fig. 11에서의 범주 내에 있을 것으로 판단된다. 암석 포화에 의한 강도 감소는 암종에 따라 큰 차이를 보인다. 이는 암석에 포함된 공극 정도, 공극 구조, 광물 입자 크기 및 구조적 차이 등으로 인해 발생된 것으로 예상된다. TM 및 THM 조건에서는 온도에 의한 물성 차이보다 포화에 의한 상대적인 차이가 있었다. 특히, 암석 강도에서 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 이유는 포화상태에서 암석 광물 입자의 결속력 약화로 강도 저하가 발생하는 것으로 예상되며(Cho et al., 2012), 결속력 저하의 이유는 균열내로 침투한 물이 균열에서의 공극압으로 작용하여 강도 감소가 일어나는 것으로 보여진다(Zhou et al., 2016). Atkinson (1984)는 규산염광물이 물에 의해 광물간의 약한 결합력을 발생시켜 응력부식(Stress corrosion)에 원인이 되는 것으로 설명하였다. 화강암이 주로 규산염광물로 이루어져 있기 때문에 물로 인한 암석 강도의 원인은 광물 간의 결합력 저하에 의해 발생할 것으로 예상된다.

측정된 암석 물성 결과에서는 온도 증가에 의한 변화를 예상하기 어려웠다. 방사성 폐기물 처분에서는 근계 암반 온도가 최대 75°C로 예상되기 때문에 온도에 의한 암석의 역학적 물성 변화가 처분장 안정성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 하지만, 암반의 변형 계수나 열전도도 등의 물성이 약 20~80%의 물성감소가 일어나는 암반손상대가 근계 암반에 존재한다면(Lee et al., 2011; Park et al., 2018), 온도 변화에 의한 예상하지 못하는 물성 변화가 있을 것으로 사료된다. 이에 대한 분석을 위해서 추가 실험을 통해 온도 변화를 고려한 물성 평가나 많은 시료를 확보하여 통계적인 경향성에 대한 실험의 신뢰도 향상시켜 유의한 결과를 보여줄 필요가 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 확인된 THM 복합환경에서의 암석 실험 결과는 지하수 유입으로 인한 포화가 암석 물성 변화를 주는 것으로 알 수 있었다. 이는 처분장 암반의 포화로 인한 암반 거동 변화에 영향을 줄 것으로 예상되며, 처분장 설계에 있어서 포화로 인한 역학적 물성 변화를 고려해야 할 것이다. 본 논문에서 제시한 THM 복합환경에서의 역학적 물성 변화는 추후 계획되는 고준위 방사성폐기물 처분장에서 암반 거동에 대한 이해와 공학적 기초자료 활용에 도움이 될 것으로 기대한다.

5. 결론

본 연구에서는 고준위 방사성폐기물 처분장에서 예상되는 복합환경 조건을 모사하여 KURT 화강암의 역학적 물성을 평가하였다. 처분장을 모사하기 위하여 다양한 복합 실험조건(M, HM, TM, THM)을 구현하여, 물리적 및 역학적 특성을 측정 후 그 결과를 비교·분석하였다. 본 연구를 통해 확인된 주요 결과는 다음과 같다.

1. 본 시험에 사용된 KURT 화강암은 평균적으로 밀도 2.650 g/cm³, 비중 2.659, 공극률 0.686%, 흡수율 0.258%이었으며, 시료 간의 편차가 적고 비교적 균질한 암석에 속한 것으로 확인되었다. 탄성파 속도는 건조와 포화 상태에서 차이를 보였으며, S파에서는 큰 차이가 없었지만 P파의 경우 약 22%의 차이가 나타났다.

2. 일축압축시험에서는 건조와 포화의 유무에 따라 일축압축강도, 탄성계수, 포와송비가 본 실험 조건에서 각각 16.5%, 15.6%, 8%의 차이를 보였다. TH 및 THM 조건에서 15~45°C, 15~75°C, 45~75°C의 온도 간 일축압축시험의 물성 차이는 약 15% 이내로 나타났다. 동일한 온도 조건에서 포화 유무에 따른 일축압축시험 결과는 최대 약 20%의 상대적인 차이를 보였다. 암석 물성 변화는 다양한 복합조건에서 포화에 의한 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 광물 입자간의 결속력 저하와 기존 균열에 유입된 물이 공극압으로 작용하여 균열 전파에 유리한 역할을 한 것으로 판단되며, 추후 연구를 통해 분석할 필요가 있을 것으로 보인다.
3. 간접인장시험에서는 건조와 포화의 유무에 따라 간접인장강도, Splitting 탄성계수, 인장 탄성계수가 12%, 7%, 9%의 차이가 나타났다. 온도 증가에 따른 물성 변화는 일축압축시험과 유사하게 뚜렷한 경향성을 갖지 않는 것으로 나타났다. 또한, 일축압축시험과 유사하게 포화 유무에 따라 차이가 발생하였으며, TH 및 THM 조건에서도 온도 간의 간접인장시험의 물성 차이는 약 13% 이내로 확인되었다.

고준위 방사성폐기물 처분장의 THM 복합환경을 모사한 실험조건에서, KURT 화강암의 역학적 물성은 온도의 영향보다 포화에 의한 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다. 처분장의 장기거동에 따른 성능평가 및 안전성 예측을 위해서는 기존의 상온 실내시험을 통해 도출된 암석물성을 사용하기보다 심부 지하환경을 반영한 암석의 복합물성을 활용하는 것이 해석결과의 신뢰도 향상에 기여할 것이다. 본 연구는 복합 처분환경 조건에서 암석의 손상모형을 개발하기 위한 사전연구의 일환으로 수행되었으며, 현재 개발된 KURT 암석의 손상모형을 활용하여 THM_D (Thermo-Hydro-Mechanical Damage) 코드개발을 위한 연구를 진행 중이다.

감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: NRF-2017M2A8A5014857).

References

1. Ahrens, B., Duda, M., Renner, J. (2018), "Relations between hydraulic properties and ultrasonic velocities during brittle failure of a low-porosity sandstone in laboratory experiments", *Geophysical Journal International*, Vol. 212, No. 1, pp. 627-645.
2. Atkinson, B.K. (1984), "Subcritical crack growth in geological materials", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 89, No. B6, pp. 4077-4114.
3. Cho, H.J., Moon, J.K., Jeong, I.S. (2012), "A study on decreasing behavior of strength & elastic parameters due to water infiltration in rock cores (I)", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 9, pp. 69-83.

4. Cho, W.J., Kim, J.S., Kim, G.Y. (2019), "Effects of excavation damaged zone on thermal analysis of multi-layer geological repository", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 75-94.
5. Choi, S.B., Lee, S.D., Jeon, S.W. (2018), "Experimental study on the change of rock properties due to water saturation", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 28, No. 5, pp. 476-492.
6. David, C., Menendez, B., Darot, M. (1999), "Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, No. 4, pp. 433-448.
7. Heo, J., Lee, J.C., Seo, J.B., Park, S.H., Park, J.C., Kwon, S.K. (2014), "Variation of thermal and mechanical properties of crystalline granite under saturated-loading condition", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 24, No. 3, pp. 224-233.
8. Hsu, S.C., Nelson, P.P. (1993), "Characterization of cretaceous clay-shales in North America", *Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks*, Vol. 1, pp.139-146.
9. Huang, Y.H., Yang, S.Q., Tina, W.L., Zhao, J., Ma, D., Zhang, C.S. (2017), "Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 912-925.
10. IAEA (1981), *Recommendations on underground disposal of radioactive wastes, Basic Guidance, Safety Series 54*.
11. Inada, Y., Kinoshita, N., Ebisawa, A., Gomi, S. (1997), "Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 140.e1-140.e14.
12. ISRM (2007), *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, ISRM Commission on Testing Methods*.
13. Jianhong, Y., Wu, F.Q., Sun, J.Z. (2009), "Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, No. 3, pp. 568-576.
14. Kim, G.Y., Kim, S.J., Koh, Y.K., Bae, D.S. (2004), "Mineralogical characteristics and genesis of phlogopite in the talc deposits of the Chungnam area, Korea", *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, Vol. 17, No. 3, pp. 221-233.
15. Kitamura, K., Takahashi, M., Mizoguchi, K., Masuda, K., Ito, H., Song, S.R. (2010), "Effects of pressure on pore characteristics and permeability of porous rocks as estimated from seismic wave velocities in cores from TCDP Hole-A", *Geophysical Journal International*, Vol. 182, No. 3, pp. 1148-1160.
16. Lee, C.S., Kwon, S.K., Choi, J.W., Jeon, S.W. (2011), "An estimation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 21, No. 5, pp. 359-369.
17. Lee, C.S., Yoon, S., Cho, W.J., Jo, Y.G., Lee, S.D., Jeon, S.W., Kim, G.Y. (2019), "Study on thermal, hydraulic, and mechanical properties of KURT granite and Gyeongju bentonite", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol. 17, No. S, pp. 65-80.

18. Lee, H.K., Kim, Y.G., Lee, H.S. (1998), "A study on characteristics of jointed rock masses and thermo-hydro-mechanical behavior of rock mass under high temperature", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 8, No. 3, pp. 184-193.
19. Ozcelik, Y., Ozguven, A. (2014), "Water absorption and drying features of different natural building stones", *Construction and Building Materials*, Vol. 63, No. 3, pp. 257-270.
20. Park, H.I., Lee, J.D., Jung, J.I. (1977), Manuscript of drawing paper on Yoosung of Korea geological map, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, pp. 21.
21. Park, S.H., Heo, J., Lee, J.H., Park, J.C., Kwon, S.K. (2015), "An evaluation of the influence of the rock property change under saturated-loading conditions on rock stability", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 52, No. 3, pp. 309-321.
22. Park, S.H., Kim, J.S., Kwon, S.K. (2018), "Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel", *Geosystem Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 165-181.
23. Török, A., Török, Á. (2015), "The effect of temperature on the strength of two different granites", *Central European Geology*, Vol. 58, No. 4, pp. 356-369.
24. Török, Á., Väsárhelyi, B. (2010), "The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameter of travertine, examples from Hungary", *Engineering Geology*, Vol. 115, No. 3-4, pp. 237-245.
25. Yoon, Y.K., Baek, Y.J., Jo, Y.D. (2011), "Effects of temperature and water pressure on the material properties of granite & limestone from Gagok mine", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 21, No. 1, pp. 33-40.
26. Zhao, Y., Wan, Z., Feng, Z., Yang, D., Zhang, Y., Qu, F. (2012), "Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 52, pp. 132-138.
27. Zhou, Z., Cai, X., Zhao, Y., Chen, L., Xiong, C., Li, X. (2016), "Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No. 7, pp. 1919-1925.