

ORIGINAL ARTICLE

# 유사정적 공진주 시험을 이용한 벤토나이트 완충재와 절리 암반의 역학적 상호작용 특성 평가

김지원<sup>1</sup>, 강석준<sup>2</sup>, 김진섭<sup>3\*</sup>, 조계춘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 박사후연수자, <sup>2</sup>카이스트 박사과정, <sup>3</sup>한국원자력연구원 책임연구원, <sup>4</sup>카이스트 교수

## Evaluation of Mechanical Interactions Between Bentonite Buffer and Jointed Rock Using the Quasi-Static Resonant Column Test

Ji-Won Kim<sup>1</sup>, Seok-Jun Kang<sup>2</sup>, Jin-Seop Kim<sup>3\*</sup>, and Gye-Chun Cho<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Post-Doctoral Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

<sup>2</sup>Doctoral Candidate, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

<sup>3</sup>Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

<sup>4</sup>Professor, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

\*Corresponding author: [kjs@kaeri.re.kr](mailto:kjs@kaeri.re.kr)

Received: December 2, 2021

Revised: December 10, 2021

Accepted: December 14, 2021

### ABSTRACT

The compacted bentonite buffer in a geological repository for high-level radioactive waste disposal is saturated due to groundwater inflow. Saturation of the bentonite buffer results in bentonite swelling and bentonite penetration into the rock discontinuities present around the disposal hole. The penetrated bentonite is exposed to groundwater flow and can be eroded out of the repository, resulting in bentonite mass loss which can affect the physical integrity of the engineered barrier system. Hence, the evaluation of buffer-rock interactions and coupled behavior due to groundwater inflow and bentonite penetration is necessary to ensure long-term disposal safety. In this study, the effects of the bentonite penetration and swelling on the physical properties of jointed rock mass were evaluated using the quasi-static resonant column test. Jointed rock specimens with bentonite penetration were manufactured using Gyeongju bentonite and hollow cylindrical granite rock discs obtained from the KAERI underground research tunnel. The effects of vertical stress and saturation were assessed using the P-wave and S-wave velocities for intact rock, jointed rock and jointed rock with bentonite penetration specimens. The joint normal and joint shear stiffnesses of each joint condition were inferred from the wave velocity results assuming an equivalent continuum. The joint normal and joint shear stiffnesses obtained from this study can be used as input factors for future numerical analysis on the performance evaluation of geological waste disposal considering rock discontinuities.

**Keywords:** High-level radioactive waste disposal, Bentonite erosion, Jointed rock mass, Elastic wave velocity, Quasi-static resonant column test

### 초록

고준위방사성폐기물 심층처분장 내 압축 벤토나이트 완충재는 지하수 유입으로 인해 포화되어 팽윤하고, 이때 발생하는 팽윤압으로 인해 벤토나이트가 처분공 주변 암반 균열 내로 침투하게 된다. 침투한 벤토나이트는 암반의 물리적 특성에 영향을 미치며, 이는 처분장의 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 지하수 유입과 벤토나이트 팽윤에 따른 암반의 역학적 특성을 평가하기 위하여 유사정적 공진주 시험을 수행하였다. 벤토나이트가 침투된 절리 암반 시편을 KAERI 지하 연구 터널에서 얻은 Gyeongju 벤토나이트와 중공 원통형 화강암 원반을 이용하여 제조하였다. 수직 응력과 포화 효과를 평가하기 위하여 P-파와 S-파 속도를 측정하였다. 균열 조건에 따른 균열 수직 및 균열 전단 강성을 동등 연속체 모델을 가정하여 파속도 결과를 통해 추론하였다. 본 연구에서 얻은 균열 수직 및 균열 전단 강성은 향후 지질 폐기물 처분 성능 평가에 고려될 수 있다.



토나이트는 지하수 흐름에 노출되어 공학적방벽 외부로 침식될 수 있고, 이러한 벤토나이트 완충재의 침식 및 질량 유실은 공학적방벽의 물리적 건전성에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 심층처분시스템의 장기 건전성을 평가하기 위해 지하수 유입과 완충재의 암반 균열 침투에 따른 완충재와 근계암반 사이의 상호작용이 평가되어야 한다. 본 연구에서는 유사정적 공진주 시험기를 이용하여 벤토나이트 완충재의 암반 균열 침투가 근계암반의 역학적 거동에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 국내 심층처분장의 완충재 재료로 고려되는 경주 벤토나이트와 한국원자력연구원의 지하처분연구시설에서 채취한 화강암 디스크를 이용해 완충재 충전물이 포함된 등가연속체 절리 암반 시편을 모사하였고, 수직응력 및 포화여부에 따른 탄성파 속도 변화를 측정하여 절리면의 절리수직강성 및 절리전단강성 변화를 유추하였다. 본 연구에서 수행한 실내실험 결과는 향후 불연속면을 고려한 처분시스템 성능평가 해석의 입력변수로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심어:** 고준위방사성폐기물 처분, 벤토나이트 침식, 절리 암반, 탄성파 속도, 유사정적 공진주 시험

## 1. 서론

국내 고준위방사성폐기물 처분을 위해 고려되고 있는 심층처분장의 다중방벽시스템 (Multi-barrier System) 중 공학적방벽 (Engineered Barrier System, EBS)은 처분터널과 처분공, 구리 처분용기, 압축 벤토나이트 완충재 및 뒤채움재로 이루어져 있고, 고준위방사성폐기물로부터 발생하는 방사성 물질 및 핵종을 인간계로부터 장기간 격리하는 역할을 수행한다. 고준위폐기물을 담고 있는 처분용기와 처분공 사이를 메우는 압축 벤토나이트 완충재는 심층처분장 주변 암반으로부터의 지하수 침투를 저지할 뿐만 아니라, 처분공 내 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열을 근계암반으로 분산시키고 외부 충격으로부터 처분용기를 보호하는 기능도 가지는 공학적방벽의 주요 구성요소이다 (Lee et al., 2011a). 심층처분장의 처분터널과 처분공을 굴착할 때 발생하는 발파 및 굴착 응력으로 인해 공학적방벽 주변 근계암반에 손상대(Excavation damage zone, EDZ)가 형성되고, 심층처분장의 운영 중 및 폐쇄 이후에 손상대의 절리나 미세 균열과 같은 암반 불연속면을 통해 지하수가 처분공 내로 침투한다. 지하수 침투로 인해 처분공 내에 설치된 압축 벤토나이트 완충재가 포화되고, 포화된 벤토나이트의 팽윤으로 인해 벤토나이트가 처분공 주변 암반 불연속면 내로 침투하게 된다 (Lee et al., 2020). 침투 벤토나이트의 전단(front)에서는 벤토나이트 평판들이 서로 떨어져 겔 및 졸 거동을 보이고, 벤토나이트 겔이 지하수 흐름에 노출되면 각각의 벤토나이트 평판들이 떨어져 자유입자로 확산해나가 공학적방벽 외부로 침식될 수 있다 (Neretnieks et al., 2009, Hedström et al., 2016). 압축 벤토나이트 완충재의 침식으로 인한 벤토나이트의 질량 유실은 완충재의 밀도 감소를 야기하여 공학적방벽의 물리적 건전성에 영향을 미칠 수 있고, 투수계수 증가로 인한 핵종 이동에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 국내 심층처분장의 완충재 후보물질 중 하나인 경주 벤토나이트를 대상으로 암반 불연속면 내 침식 거동을 보기 위한 실내실험이 수행된 바 있다 (Baik and Cho, 2005, Baik et al., 2007). 선행 연구는 벤토나이트의 불연속면 침투로 인한 질량 유실이 공학적방벽의 물리적 건전성에 거의 영향을 미치지 않는다고 평가하였고, 오히려 지하수와와의 접촉으로 인한 벤토나이트 콜로이드 유출을 더욱 지배적인 침식 현상으로 보았다. 그러나 심층처분장에서 발생할 수 있는 다양한 지하수 침투 시나리오에 대한 검토나 완충재-근계암반의 상호작용 및 복합거동으로 인한 역학적인 물성 변화를 고려한 연구는 수행된 바 없다. 따라서, 지하수 유입과 완충재의 암반 불연속면 침투에 따른 완충재와 근계암반 사이의 상호작용 및 복합거동 변화를 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

벤토나이트 침투에 의한 암반 절리면 충전물은 절리면의 전단강도, 전단강성, 마찰각, 투수계수 등 절리 암반의 수리-역학적 물성에 큰 영향을 미친다. 특히, 절리의 투수계수는 암석보다 상대적으로 매우 높기 때문에 지하수 유동이 절리를 따라 발생하게 된다.

따라서 절리 내에 충전물이 존재할 경우, 충전물로 인한 절리의 투수계수 변화가 암반 전체의 수리학적 복합거동을 지배하게 된다. 절리 암반의 포화는 절리면에 작용하는 유효수직 응력 및 전단 저항을 감소시켜 절리의 미끄러짐을 유발할 수 있고, 물 분자가 암석 내 층격자 광물(layer-lattice mineral) 입자 표면에 흡착해 윤활제 역할을 하여 점착력과 마찰력을 감소시키거나(Horn and Deere, 1962, Morrow et al., 2000), 공극수압 발생으로 인한 유효응력 감소와 절리면의 마찰각 감소가 전단거동에 영향을 미칠 수 있다(Morrow et al., 1992). 절리 암반의 전단특성은 절리면의 돌출부와 충전물 간의 상호작용에 따라 바뀌며 충전물의 두께가 돌출부 크기보다 클 경우, 절리면 돌출부의 영향은 사라지고 충전물의 전단특성이 절리의 전단 거동을 지배하게 된다(Barton, 1973). 벤토나이트는 포화에 따라 팽윤하는 거동을 보이고 함수비에 따라 부드러운 페이스트나 겔(gel), 졸(sol)을 형성하는 특성을 보인다(Pusch, 1983). 실제 공학적방벽에서 압축 벤토나이트 완충재의 암반 불연속면 침투는 Fig. 1과 같이 지하수 내 벤토나이트 함량에 따라 페이스트, 겔, 졸 등 하나의 절리면에서 다양한 상(phase)을 보이고, 절리면은 침투한 벤토나이트의 상에 따라 다른 역학적 거동을 보일 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 완충재-절리면의 상호작용 및 복합거동이 절리 암반의 물성에 어떠한 영향을 미치는지 파악되어야 한다.

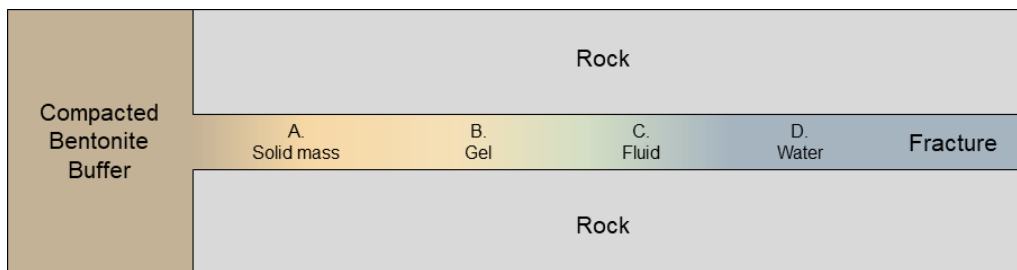


Fig. 1. Schematic diagram of bentonite intrusion into a rock fracture

비파괴 물리탐사기법인 탄성파 탐사는 암반 사면, 기초, 터널, 지열개발, 석유생산 등 사회기반 시설부터 에너지 관련 분야까지 널리 활용되고 있고, 다양한 실내 및 현장 실험을 통해 매질의 물성을 파악하는 데 활용되고 있다(Stokoe and Santamarina, 2000, Kang et al., 2006, Choi et al., 2017, Lee et al., 2011b). 현장의 암반은 일반적으로 절리나 파쇄대 등과 같은 불연속면이 존재하는 매질로, 이러한 불연속면이 암반의 변형특성 및 탄성파 전파특성에 큰 영향을 미친다. 매질의 변화가 발생하는 불연속면에서 탄성파는 스넬의 법칙(Snell's law)에 따라 일부는 반사, 일부는 통과하게 되고 파의 입사각에 따라 파의 전파, 감쇠 및 분산이 일어난다. 절리 암반 내 탄성파 전파는 절리면 거칠기, 충전물, 포화정도 등 절리의 상태 및 조건에 따라 전파 특성이 바뀌므로, 탄성파 속도를 이용해 완충재의 암반 불연속면 침투에 따른 절리 암반의 물성 변화를 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

절리 암반에서의 탄성파 전파 모델은 크게 변위 불연속 방법(displacement discontinuity method; Mindlin, 1960, Schoenberg, 1980)과 유효 변형계수 방법(effective moduli method; Schoenberg and Muir, 1989, Cook, 1992, Li et al., 2010)으로 나눌 수 있다. 변위 불연속 방법은 절리면을 파장 대비 얇은 두께를 가진 불연속적인 계면(non-welded interface)으로 모델링하고, 절리면에서 파로 인한 응력은 연속적이고 변형은 불연속적이라 가정한다. 반면, 유효 변형계수 방법은 절리 암반을 하나의 변형계수를 가지는 등가연속체로 가정한다. 유효 변형계수 방법에서 절리 간 간격보다 파장이 긴 장파(long-wavelength wave)가 전달되면, 암석 블록 사이에 발생하는 위상 차이 및 회복력이 작아 파가 연속체처럼 전파된다고 가정한다. Fratta and Santamarina (2002)는 유효 변형계수 모델을 바탕으로 절리 암반의 응력 의존적 탄성파 전달특성을 평가할 수 있는 유사정적 공진주 시험기(Quasi-Static Resonant Column Test, QSRC)를 개발하였다. 유사정적 공진주 시험기는 시편 중앙에 구멍이 뚫린 중공형 암석 디스크를 수직으

로 쌓아 올려 일정한 절리 간격을 가진 절리 암반 시편을 모사하고, 시편 내 전파되는 탄성파의 파장이 절리의 폭과 암석 디스크 두께의 합보다 매우 크다고 가정하여 절리 암반을 하나의 등가연속체(equivalent continuum)로 해석한다. Cha et al. (2009)는 유사정적 공진주 시험기를 이용하여 등가연속체 암반 시편에서 장파 거동이 발생하는 최적 디스크의 개수에 대한 실험을 수행하였고, 디스크 개수가 9개 이상일 때 탄성파 속도가 수렴하는 것을 확인하였다. 선행 연구에서 유사정적 공진주 시험기를 이용해 암석 종류, 응력 조건, 절리 개수, 절리 거칠기, 절리 고결(cementation), 충전물 종류, 충전물 두께 등이 절리 암반 내 탄성파 전파 특성에 미치는 영향을 보기 위한 연구가 다수 수행된 바 있다 (Cha et al., 2009, Mohd-Nordin et al., 2014, Kim et al., 2018, Kim et al., 2021). 그러나 기존 유사정적 공진주 시험은 절리 암반 시편을 포화시킬 수 있는 구성요소가 없어 완충재의 침식에 필요한 포화 조건을 모사할 수 없다. 따라서, 심층처분장에서 발생하는 열-수리-역학 복합거동을 고려하기 위해서는 기존 유사정적 공진주 시험기의 보완이 필요하다.

본 연구에서는 유사정적 공진주 시험기를 이용해 벤토나이트 완충재의 암반 불연속면 침투가 절리 암반의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 실험에 앞서, 절리 암반 시편을 포화시키고 시편 상태를 육안으로 확인할 수 있는 투명한 포화 셀을 구축하여 유사정적 공진주 시험기를 보완하였다. 이후, 국내 심층처분장의 완충재 재료로 고려되는 경주 벤토나이트와 한국원자력연구원의 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)에서 채취한 화강암 디스크를 이용해 완충재-근계암반 복합체 시편을 제작하였다. 무결암, 충전물이 없는 절리 암반 및 벤토나이트 침투 절리 암반을 대상으로 응력 조건과 포화 여부에 따른 탄성파 속도를 측정해 벤토나이트의 암반 불연속면 침투와 포화가 절리 암반의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 유사정적 공진주 시험

### 2.1 시험 방법

본 연구에서 사용된 유사정적 공진주 시험기는 중공형 암석 디스크를 쌓아 모사한 절리 암반 시편의 탄성파 속도를 측정하기 위해 개발되었다 (Fratta and Santamarina, 2002). 유사정적 공진주 시험기는 Fig. 2와 같이 시편의 하중 재하에 필요한 상부 캡, 하중 재하용 봉, 강철 바닥부 및 하부 지렛대로 구성되어 있다. 절리 암반 시편을 임피던스 차이가 큰 강철 바닥부에 올려 고정단 경계조건을 모사하였고, 시편 위에 상부 캡을 얹은 뒤 하중 재하용 봉을 이용해 하부 지렛대와 연결하여 하중 재하 시스템을 구축하였다. 축 하중은 하부 지렛대에 무게추를 올려 재하하였다. 유사정적 공진주 시험은 입자의 진동 방향과 진행 방향이 동일한 종파(P파)와 진동 방향이 진행 방향과 수직인 전단파(S파) 속도를 측정할 수 있다. 원통형 시편에서 P파는 분산이 있으나, 원주의 길이가 시편의 반지름보다 상당히 길 때 무한길이를 가진 원형봉에서의 종파 속도와 유사한 값을 보이며 속도가 일정해진다 (Kolsky, 1963). 반면 원통형 시편에서 S파는 기하학적 형상의 영향을 받지 않아 무한매질에서의 S파 속도와 같고, 물의 체적계수 등에 영향을 받지 않아 불연속 매질의 성질 연구에 적합하다. P파 속도는 Fig. 2(a)와 같이 지름 10 mm의 볼 베어링을 시편 상부로부터 10 cm 높이에서 떨어뜨려 종파를 발생시켰고, 시편 상하부에 구리스로 부착된 가속도계(상부: PCB352C34 / 하부: PCB352C22)를 통해 파를 측정하였다. 가속도계 신호는 시그널 컨디셔너(PCB482C05)를 이용하여 증폭시켰고 오실로스코프(Agilent DSO-X-3014A)를 통해 디지털 신호로 저장하였다. 유사정적 공진주 시험을 통해 얻은 P파 속도  $V_p^{QSRC}$ 는 Fig. 3(a)와 같이 시편의 길이 ( $L$ )와 상하부 가속도계 신호 간의 도달시간(arrival time) 차이 ( $\Delta t$ )를 이용하여 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_P^{QSRC} = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

입자의 진동 방향이 진행 방향과 수직인 S파 속도는 Fig. 2(b)와 같이 연필심의 취성파괴를 이용해 상부 캡에 접선(tangent)방향으로 미소한 자극을 주어 비틀 전단(torsional shear) 파를 발생시키고, 상부 캡에 축 대칭으로 설치된 상부 가속도계(PCB352C34) 두 개를 이용하여 파를 측정하였다. 연필심을 이용한 자극은 원통형 시편 내 비틀 거동과 휨 거동을 동시에 발생시킨다. 따라서 Fig. 3(b)와 같이 가속도계 신호를 서로 합하여 낮은 주파수의 휨 반응을 상쇄하면 비틀 전단 반응만을 얻을 수 있다.

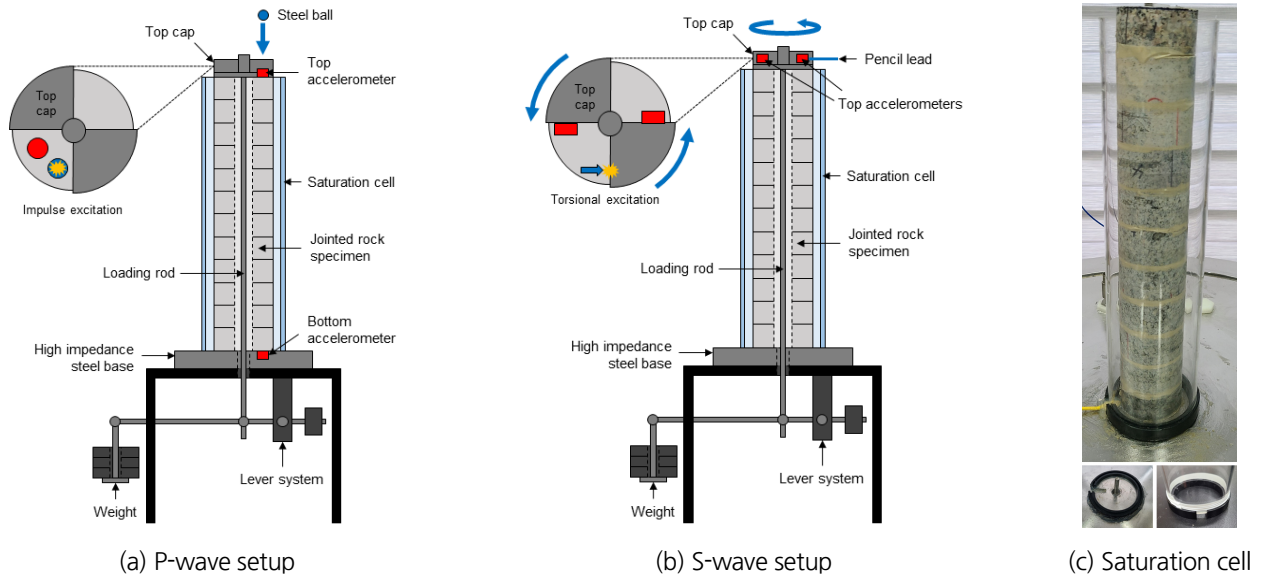


Fig. 2. Quasi-static resonant column test

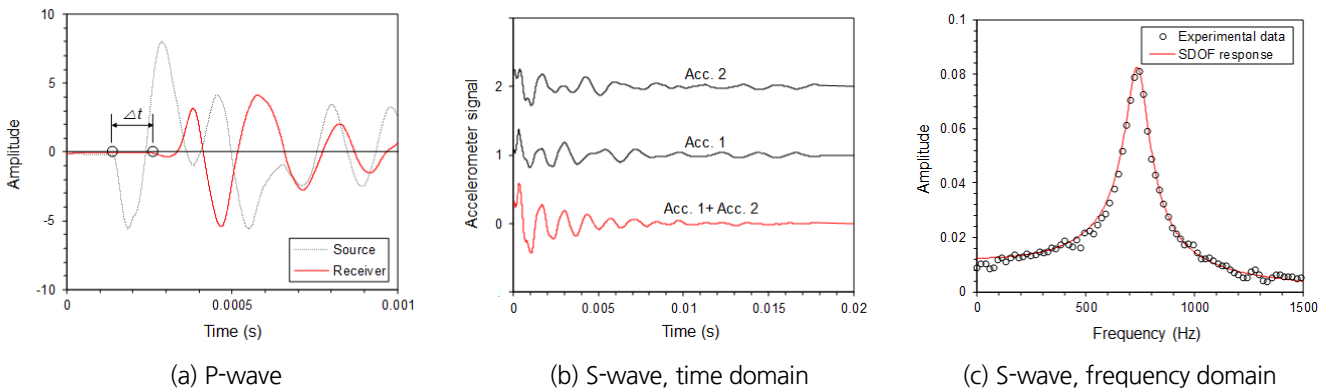


Fig. 3. Typical quasi-static resonant column test results

시편의 공진주파수  $f_n$ 는 합한 두 상부 가속도계 신호의 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transformation)을 통해 구할 수 있다. 시편의 고정-자유 경계조건과 장파 거동을 고려할 때 시편의 길이  $L$ 은 파장  $\lambda$ 의 1/4이고, 유사정적 공진주 시험을 통해 얻은 S파 속도  $V_S^{QSRC}$ 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.



$$V_S^{QSRC} = f_n \lambda = 4f_n L \quad (2)$$

매질의 감쇠에는 크게 파두(wave front)의 크기가 증가하는 기하학적 감쇠(geometric spreading), 파장이 지반재료에 흡수되어 입자마찰 등으로 인해 에너지가 손실되는 재료 감쇠(intrinsic material loss) 및 불연속면에서 부분적인 파의 전달과 산란으로 인한 겉보기 감쇠(apparent attenuation)가 있고, 원형봉 시편에서는 재료 감쇠가 지배적이다(Cha et al., 2009). 유사정적 공진주 시험에서 감쇠비(damping ratio)  $D^{QSRC}$ 는 시편의 주파수 영역 신호  $f$ 를 Fig. 3(c)와 같이 1자유도계(single degree of freedom, SDOF) 이론적 응답으로 모델링할 수 있고, 이론적 응답 함수  $|H(f)|$ 를 유사정적 공진주 시험을 통해 구한 신호의 주파수응답에 회귀분석하여 감쇠비  $D^{QSRC}$ 와 공진주파수  $f_n$ 를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$|H(f)| = \frac{1}{\left| 1 + 2jD^{QSRC} \frac{f}{f_n} - \left( \frac{f}{f_n} \right)^2 \right|} \quad (3)$$

여기서  $j$ 는 허수( $=\sqrt{-1}$ )이다. 기존 유사정적 공진주 시험은 시편을 포화시킬 수 있는 구성요소가 없어, 별도의 포화 셀을 Fig. 2(c)와 같이 추가로 제작하여 구축하였다. 포화 셀은 기존 강철 바닥부에 체결이 가능한 아세탈 링과 투명 아크릴 파이프를 이루어져 있고, 링과 파이프 사이 공간을 테플론 테이프 및 실리콘으로 방수처리를 하였다. 바닥부와 하부 지렛대 사이 하중 재하용 봉이 움직일 수 있는 공간 또한 실리콘으로 방수 처리하였고, P파 측정용 하부 가속도계는 열수축 튜브와 구리스를 이용하여 방수처리를 하였다. 포화 셀 구축 이후, 셀 내부에 물을 주입하여 방수성능을 확인한 후에 포화 조건 시험을 수행하였다.

## 2.2 시편 준비 및 실험 조건

절리 암반을 Fig. 4(a)와 같이 강성  $k$ 를 가진 스프링으로 연결된 질량  $m$ 의 입자들로 고려할 때, 시편의 위상속도(phase velocity)  $V_{ph}$ 와 군속도(group velocity)  $V_g$ 는 식 (4)와 식 (5)와 같이 파의 파장  $\lambda$ 과 내부 단위 길이(internal length scale)인 절리간격  $S$ 와의 비로 나타낼 수 있다(Cha et al., 2005).

$$V_{ph} = \frac{\lambda}{\pi S} V_{long} \sin\left(\frac{\pi S}{\lambda}\right) \quad (4)$$

$$V_g = V_{long} \cos\left(\frac{\pi S}{\lambda}\right) \quad (5)$$

여기서  $V_{long}$ 은 시편의 장파 속도이다. 파장이  $2S$ 에 가까워질수록 이웃 입자 간의 위상 차이로 인해 파 전달이 잘 이루어지지 않고, 이때 절리 암반은 특정 주파수 이하의 파만을 전달시키는 저역 통과 필터(low pass filter)로 작용하여 브리유앵 분산(Brillouin dispersion)이 발생한다. 반면  $\lambda = 20S$ 와 같은 장파 거동에서는 파장이 내부 단위 길이보다 매우 크고, 이웃 입자 간의 회복력으로 인해 파가 불연속매질에서 연속체처럼 전파된다(Brillouin, 1946). Cha et al. (2009)는 절리 암반을 모사하기 위한 암석 디스크의 개수가 10개 이상일 때 탄성파 속도가 수렴하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 브리유앵 분산을 방지하고 절리 암반 내 장

파 거동을 보기 위해 10개 이상의 중공형 암석 디스크를 쌓아 올려 절리 암반 시편을 모사하였다.

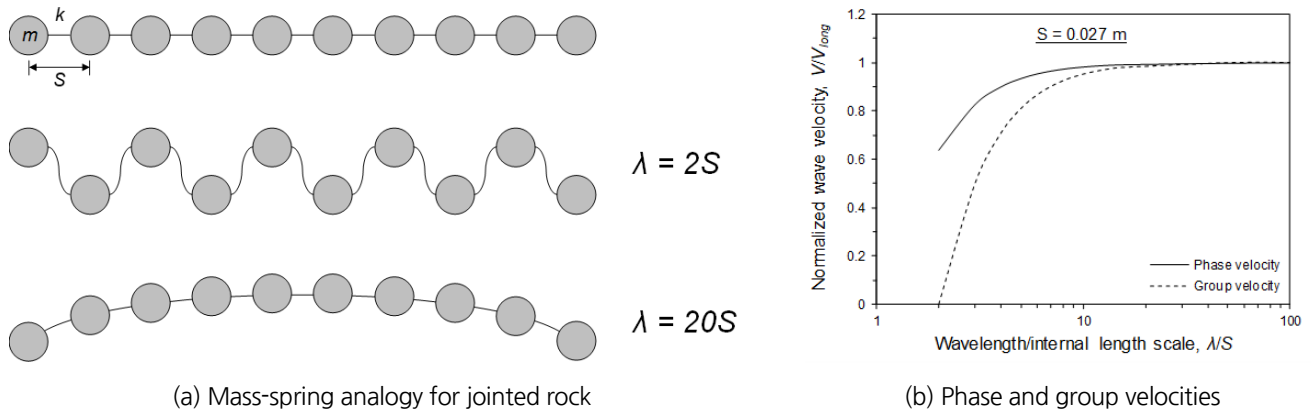


Fig. 4. Long wavelength propagation in jointed rock

본 연구에서 사용된 KURT 화강암 코어 시편의 지름은 51.5 mm로, 워터젯을 이용하여 코어의 축 방향을 따라 중앙에 지름 17 mm의 구멍을 천공하여 중공형(hollow cylinder) 무결암 시편 두 개를 제작하였다. 이후, 제작한 중공형 무결암 시편 중 하나를 다이아몬드 톱으로 가공하여 Fig. 5(a)와 같이 높이 약 27 mm의 중공형 암석 디스크를 11개 제작하였고, 암석 디스크를 쌓아 올려 절리 암반 시편을 모사하였다. 무결암 시편과 절리 암반 시편을 통해 절리 유무에 따른 탄성과 전파특성 변화를 평가할 수 있다. 벤토나이트의 암반 불연속면 침투를 모사하기 위해 절리 사이에 벤토나이트 충전물을 첨가한 벤토나이트 침투 절리 암반 시편을 한 개 제작하였다. Fig. 5(b)와 같이 각 암석 디스크 사이 얇은 플라스틱 멤브레인을 설치해 투명 테이프로 고정하였고, 내부와 외부 멤브레인 사이 공간에 경주 벤토나이트 분말을 4 g 넣어 벤토나이트 충전물을 모사하였다. 절리 충전물은 응력 조건 및 선행 압축 정도에 따라 다른 거동을 보이므로 벤토나이트 충전물 성형 이후, 하중 재하 시스템을 이용해 2 MPa의 선행 하중을 주어 벤토나이트를 압축하였다. 하중 재하 후 건조 조건 벤토나이트 충전물의 평균 두께는 0.68 mm였다. 이러한 압축 벤토나이트 충전물은 실제 심층처분에서 발생하는 포화 벤토나이트 질의 침투와는 다르나, 심층처분 초기 완충재와 처분공 근계암반의 상호작용 및 포화로 인한 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 암반 시편의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties of rock specimens used in this study

Properties	Intact rock	Jointed rock	Bentonite-filled rock
Outer diameter (mm)	51.5	51.5	51.5
Inner diameter (mm)	17.0	17.0	17.0
Height (mm)	277.5	301.5	308.3
Initial density (kg/m <sup>3</sup> )	2,657	2,641	2,617
P-wave velocity of intact rock specimen*	4,885	4,885	4,885
S-wave velocity of intact rock specimen*	2,950	2,950	2,950
Joint condition	None	Planar-jointed, smooth	Gouge fill (avg. thickness 0.68 mm)
Number of discs in column	-	11	11

\* P-wave and S-wave velocities obtained from ultrasonic transducer tests on a cylindrical intact rock core specimen.

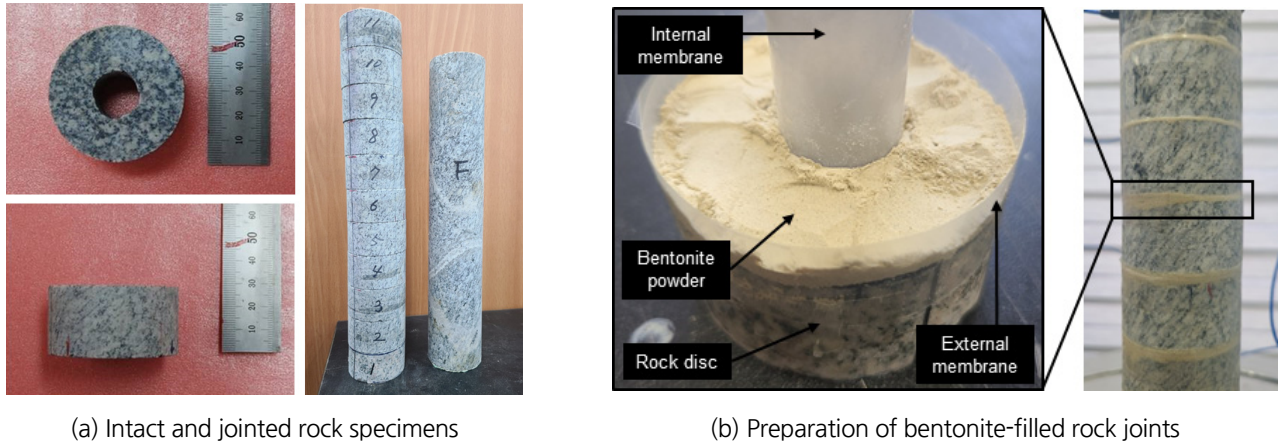


Fig. 5. Specimen preparation

무결암, 절리 암반 및 벤토나이트 칩투 절리 암반 시편을 대상으로 건조 및 포화 조건에서의 유사정적 공진주 시험을 수행하여 지하수 유무와 벤토나이트 칩투에 따른 절리 암반의 거동을 확인하였다. 먼저 건조 조건에서 유사정적 공진주 시험을 수행하여 절리 유무에 따른 암반의 역학적 거동 변화와 심층처분 초기 암반 손상 영역대와 압축 벤토나이트 완충재의 복합거동을 확인하였다. 이후 포화 셀을 사용하여 각 시편에 2 MPa의 선형 하중을 유지한 일정 하중 조건에서 7일간 수중 양생을 시킨 다음, 포화 조건에서 시험을 수행해 지하수 칩투의 영향을 확인하였다. 각 실험에서 하중 재하 시스템을 이용해 시편의 선형 탄성 거동을 보이는 범위 내인 50 kPa, 250 kPa, 500 kPa, 1 MPa, 2 MPa 순으로 수직 응력을 재하하여 응력 조건에 따른 탄성파 전파특성을 관찰하였다.

### 3. 유사정적 공진주 시험 결과

#### 3.1 절리 유무 및 포화 유무

Fig. 6은 건조 및 포화 조건에서의 무결암과 절리 암반의 수직 응력에 따른 탄성파 속도 결과이다. 건조 조건에서 중공형 무결암 시편의 P파 속도는 4,241~4,721 m/s, S파 속도는 2,016~3,692 m/s 사이의 값을 보였고 응력이 증가함에 따라 탄성파 속도가 소폭 증가하는 것을 확인하였다. 이 때, 무결암의 감쇠비는 0.067~0.085 범위 내 형성되었고 응력에 따른 유의미한 변화를 보이지 않았다. 절리 암반 시편의 P파 및 S파 속도는 불연속면 내 파 감쇠로 인해 같은 응력 조건의 무결암 대비 각각 34~65% 및 70~80% 감소하여 P파 속도가 1,465~3,119 m/s, S파 속도가 396~1,102 m/s 사이의 값을 보였다. 절리 암반 시편은 재하 응력이 증가할수록 암석 디스크 사이의 접촉면적 및 절리 강성이 증가하여 무결암에 비해 상대적으로 큰 응력 민감도를 보였다. 감쇠비 또한 절리면에서의 파 에너지 손실 및 감쇠로 무결암 대비 평균 36% 증가하여 0.085~0.134 범위 내 형성되었고 응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하는 경향을 보였다. 이와 같이 동일한 응력 조건하에 불연속면에서 발생하는 파의 전파(transmission)와 반사(reflection)로 인해 절리 암반의 탄성파 속도가 무결암의 탄성파 속도보다 현저히 낮은 것을 확인하였다.



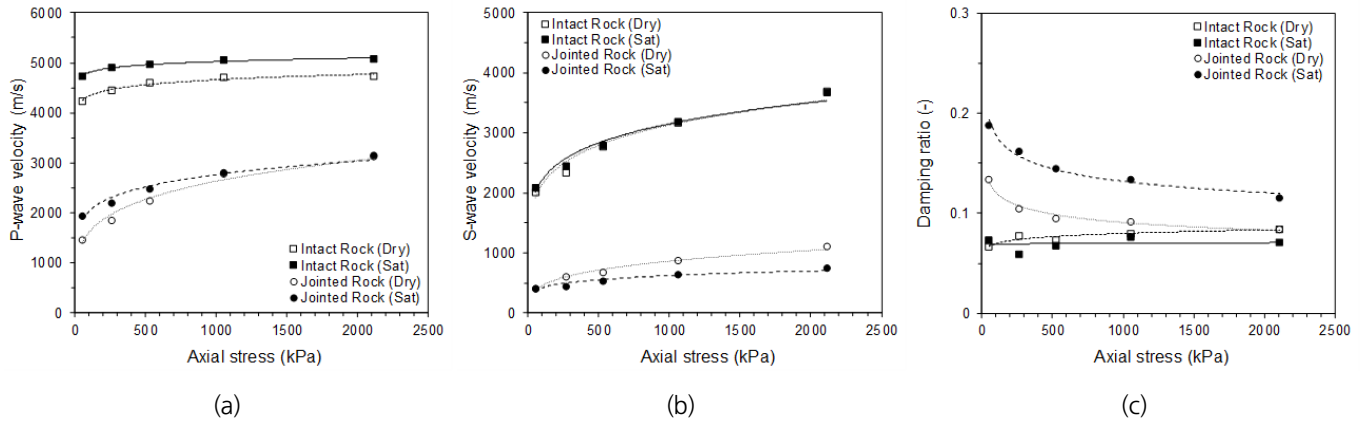


Fig. 6. Effects of rock joints and saturation on the wave propagation characteristics (a) P-wave velocity (b) S-wave velocity and (c) Damping ratio

무결암 시편은 포화로 인해 물이 기존에 비어있던 공극을 채워 파 전파율이 증가해 P파 속도가 7~12% 증가하는 경향을 보인 반면, S파 속도와 감쇠비는 포화에 따른 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 다공성 매질 내 탄성파 속도를 포화율과 공극률로 나타낸 주요 암석 물리 모델(rock physics model)인 Biot-Gassman 식(Gassman, 1951, Biot, 1956a, Biot, 1956b, Biot, 1962)에 부합하는 결과로, 유체의 전단 계수는 0이기 때문에 포화로 인한 암석 시편의 전단 거동 변화는 크지 않은 것으로 판단된다. S파의 감쇠비 또한 포화에 따른 유의미한 변화를 보이지 않았다. 포화 조건 절리 암반 시편의 P파 속도는 건조 조건 대비 평균 13% 증가하여 1,935~3,158 m/s 범위 내 형성되었다. 절리 암반 시편 포화 시, 물이 암석 디스크 내 공극과 더불어 절리면을 채워 절리면에서의 P파 전파율이 증가하였음을 유추할 수 있다. 건조 및 포화 조건의 절리 암반 P파 속도는 1 MPa 이상 응력에서 유사한 값을 보이고, 이는 수직 응력이 증가함에 따라 절리면에 채워진 물보다 암석 디스크 간의 접촉면적 증가가 탄성파 전파에 더욱 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 반면, 포화 조건 절리 암반의 S파 속도는 건조 조건 대비 평균 22% 감소하여 409~748 m/s 범위 내 형성되었고, 감쇠비는 36~55% 증가하여 0.115~0.188 사이의 값을 보였다. 절리면에 존재하는 물은 절리 암반 시편에 작용하는 유효 수직응력 및 전단 저항을 감소시켜 절리의 미끄러짐을 유발하고, 윤활제 역할을 하여 절리면의 점착력과 마찰력이 감소시켜 포화 조건 절리 암반이 건조 조건 대비 낮은 S파 속도를 보인 것으로 판단된다. 포화 조건의 암석 절리면을 대상으로 일축전단시험, 삼축전단시험, 기울임(tilt) 시험 등을 수행한 선행 연구에서 또한 포화로 인한 절리면의 전단강도 및 마찰각 감소 사례가 조사되었다(Jaeger, 1959, Patton, 1966, Rosengren, 1968, Hoskins et al., 1968, Duncan, 1969, Gutierrez et al., 2000, Li et al., 2005, Lee and Chang, 2013, Pellet et al., 2013, Kim and Jeon, 2016, Ulusay and Karakul, 2016). 절리 암반의 포화 여부에 따른 S파 속도 차이는 상대적으로 높은 수직 응력에서도 유지되는 경향을 보였고, 이는 응력 증가로 인한 절리면 접촉면적 및 절리 강성 증가보다 포화로 인한 절리면의 전단 저항 감소가 절리 암반의 탄성파 전파에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

### 3.2 벤토나이트 침투

Fig. 7은 건조 및 포화 조건에서의 벤토나이트 침투 절리 암반의 수직 응력에 따른 탄성파 속도 결과이다. 건조 벤토나이트 침투 절리 암반의 50 kPa 응력 조건 P파 및 S파 속도는 같은 응력 조건의 절리 암반 대비 각각 22% 및 17% 감소하여 벤토나이트 충전물로 인해 절리면에서의 파 에너지 감쇠와 분산이 발생했음을 유추할 수 있다. 벤토나이트 침투로 인한 탄성파 속도 감소는 선행 연구

에서 절리 충전물을 대상으로 수행한 유사정적 공진주 시험 결과와 유사하다 (Fratta and Santamarina, 2002, Cha et al., 2009, Kim et al., 2021). 재하 응력이 증가함에 따라 벤토나이트 충전물이 압축되어 벤토나이트 침투 절리 암반의 탄성과 속도는 절리 암반의 탄성과 속도와 유사한 값을 보였다. 이는 본 연구에서 사용한 평균 0.68 mm 두께의 벤토나이트 충전물이 기존 연구에서 시험한 1~5 mm 충전물 두께 값보다 작아 충전물의 영향이 상대적으로 적은 것으로 판단된다. Fratta and Santamarina (2002)에서 실험한 0.5 mm 두께의 카올리나이트 점토 충전물 시편의 S파 속도 또한 절리 암반 시편의 S파 속도와 유사한 값을 보였다. 감쇠비는 절리 충전물 층에서의 파 감쇠로 인해 절리 암반 대비 12~45% 증가하였다. 건조 조건 시험 이후, 포화 셀을 이용해 벤토나이트 침투 절리 암반 시편을 7일간 수증 양생하여 포화 조건에서 유사정적 공진주 시험을 수행하였다.

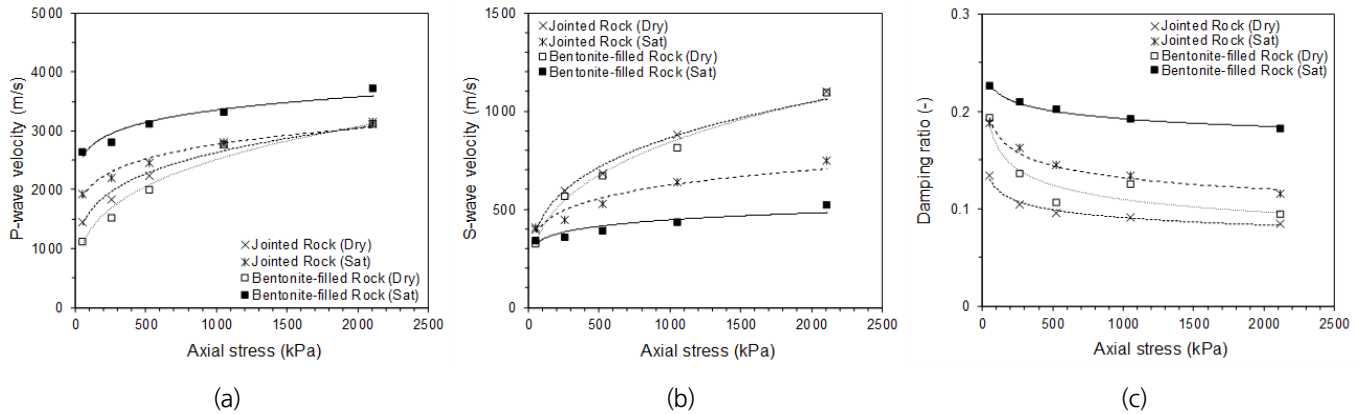


Fig. 7. Effects of saturation on the wave propagation characteristics of bentonite-filled jointed rocks (a) P-wave velocity (b) S-wave velocity and (c) Damping ratio

7일간 포화로 인해 벤토나이트 침투 절리 암반의 P파 속도는 포화 조건의 절리 암반 대비 18~37% 증가하였으나, S파 속도는 16~32% 감소하였고 감쇠비는 20~58% 증가하였다. 벤토나이트 충전물의 포화 전후 차이는 더욱 커, 동일한 응력 조건에서 시편의 포화로 인해 P파 속도는 최대 132% 증가, S파 속도는 최대 52% 감소 및 감쇠비는 최대 93% 증가하였다. 벤토나이트는 함수비에 따라 부드러움 페이스트나 젤, 졸을 형성하는 특성을 보이고 암반 불연속면 및 미세균열에 침투한 벤토나이트는 암석 디스크 간 접촉면적을 증가시키고 동시에 윤회제 역할을 하여 절리면의 전단 저항을 감소시킨 것으로 사료된다. 절리 암반의 포화로 인한 P파의 증가와 S파의 감소가 벤토나이트 충전물의 포화로 인해 더욱 증감하는 경향을 보였다. 이와 같이 포화로 인한 벤토나이트의 물성 변화가 벤토나이트 침투 절리 암반의 역학적 특성에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

### 3.3 역학적 물성 변화

절리 암반은 불연속면으로 인해 개별적인 암석 입자를 가진 입자성 매질(particulate media)로 고려할 수 있고, 이때 탄성과 속도는 다음과 같이 응력 조건에 따른 멱함수 형태로 나타낼 수 있다(Hardin and Richart Jr., 1963, Brady and Brown, 1993).

$$V_P = \alpha_P \left( \frac{\sigma_n}{1 \text{ kPa}} \right)^{\beta_P} \tag{6}$$

$$V_S = \alpha_S \left( \frac{\sigma_n}{1 \text{ kPa}} \right)^{\beta_S} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_n$ 은 수직 응력 (kPa),  $\alpha$ 는 1 kPa 응력조건에서의 탄성과 속도 (m/s),  $\beta$ 는 응력 민감도(sensitivity)이며 P와 S 아래 첨자는 각각 P파와 S파를 나타낸다. 본 연구에서 실험한 암석 시편의  $\alpha$ 와  $\beta$  값은 Fig. 8과 같으며, 선행 연구에서 구한 절리 암반의  $\alpha$ - $\beta$  경향식 또한 나타나 있다 (Cha et al., 2009, Cha et al., 2014). 절리 암반 시편은 절리의 존재로 인해 무결암 대비 탄성과 속도가 감소하였고 응력 민감도가 증가하였다. 건조 조건의 벤토나이트 침투 절리 암반 시편은 건조 조건의 절리 암반 대비 탄성과 속도가 감소하고 응력 민감도는 증가하는 경향을 보였고, 포화 조건에서는 벤토나이트 충전물의 팽윤 및 페이스트 형성으로 인해 벤토나이트 침투 절리 암반이 포화 조건의 절리 암반 대비 큰 탄성과 속도와 낮은 응력 민감도를 보였다.

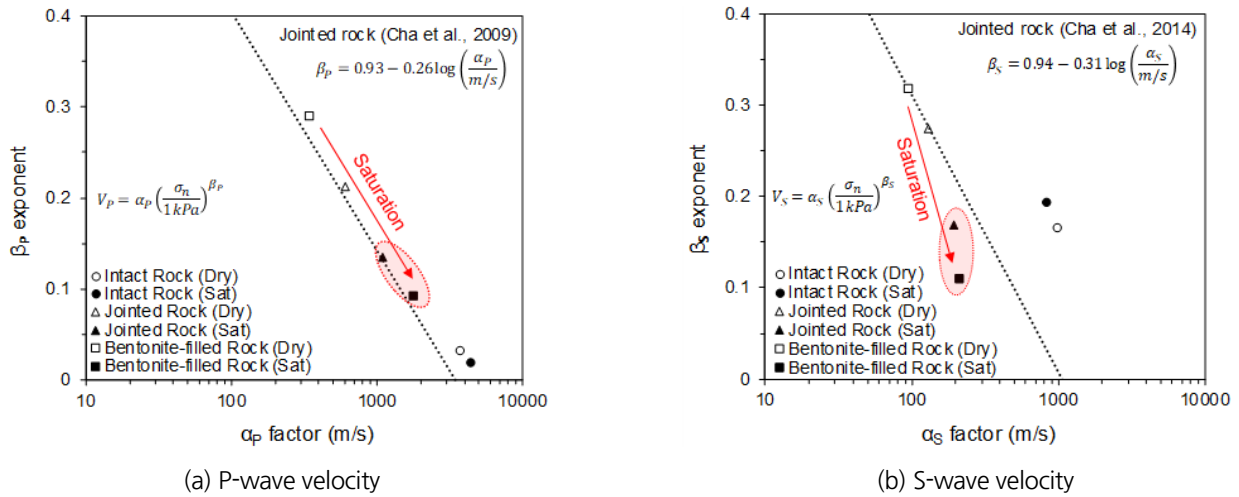


Fig. 8. Wave velocity-stress power relationship

벤토나이트 침투 및 포화에 따른 절리면의 역학적 거동 변화는 등가연속체 탄성과 속도 모델을 사용하여 절리수직강성 (joint normal stiffness)  $k_n$ 과 절리전단강성 (joint shear stiffness)  $k_s$ 로 표현해 정량화할 수 있다. Fig. 9와 같이 탄성계수  $E$ 와 전단계수  $G$ 를 가진 암반에 절리수직강성  $k_n$ 과 절리전단강성  $k_s$ 를 가진 절리가 등간격  $S$ 로 존재할 때, 절리 암반은 등가 탄성계수  $E_{eq}$ 와 등가 전단계수  $G_{eq}$ 를 가진 등가연속체로 가정할 수 있다. 절리 암반 시편에 수직응력  $\sigma$ 이 작용할 때, 시편의 변형은 암석 디스크에서의 변형 ( $\sigma/E$ ) $S$ 와 절리에서의 변형 ( $\sigma/k_n$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 유사한 방법으로 절리 암반 시편에 전단응력  $\tau$ 이 작용할 때, 시편의 변형은 암석 디스크에서의 변형 ( $\tau/G$ ) $S$ 와 절리에서의 변형 ( $\tau/k_s$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 이때, 등가 탄성계수와 등가 전단계수는 식 (8)과 식 (9)와 같다 (Goodman, 1989, Mavko et al., 1998).

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{k_n S} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G_{eq}} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{k_s S} \quad (9)$$

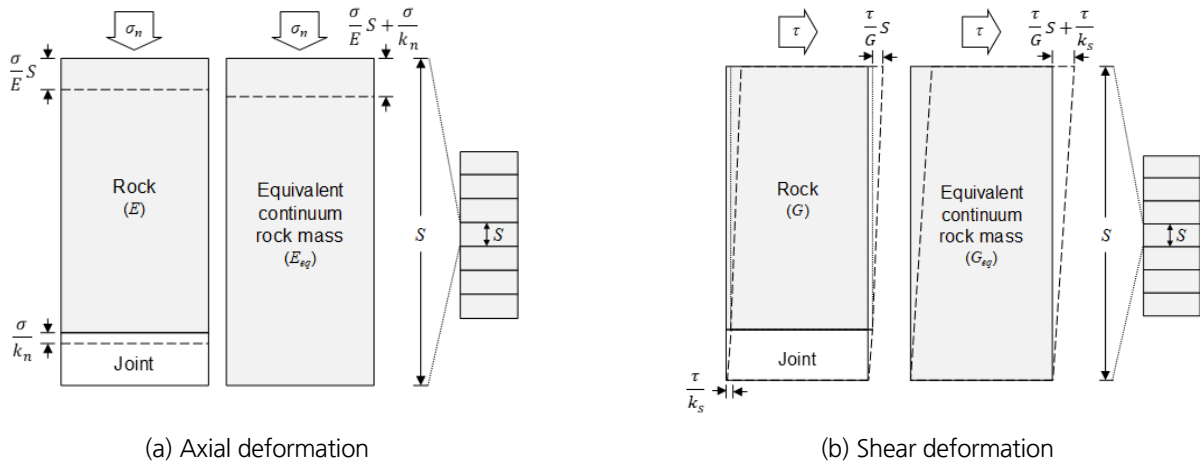


Fig. 9. Deformation characteristics in equivalent continuum rock mass

유사정적 공진주 시험에서 절리 충전물의 절리면 방향 변형(lateral strain)은 암석 디스크의 마찰에 의해 구속되어 있으므로 변형 특성은 탄성계수  $E$ 가 아닌 구속탄성계수(constrained modulus)  $M$ 와 유사한 강성을 보인다(Cha et al., 2009). 따라서 유사정적 공진주 시험 결과를 바탕으로 시편의 등가 구속탄성계수와 등가 전단계수를 이용해 등가 탄성계수를 유추할 수 있다. 유사정적 공진주 시험의 미소변형률 영역 탄성파 속도 결과를 이용하여 시편의 등가 구속탄성계수  $M_{eq}$ 와 등가 전단계수  $G_{eq}$ 는 식 (10)과 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$M_{eq} = \rho_{eq} V_P^{2QSRC} \tag{10}$$

$$G_{eq} = \rho_{eq} V_S^{2QSRC} \tag{11}$$

여기서  $\rho_{eq}$ 는 등가연속체 시편의 밀도이다. 등가 구속탄성계수는 단축 응력 조건에서의 축 방향 변형률과 응력의 비로, 균질한 등방성 등가연속체 절리 암반을 고려하여 등가 탄성계수  $E_{eq}$ 를 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$E_{eq} = \frac{G_{eq}(3M_{eq} - 4G_{eq})}{(M_{eq} - G_{eq})} \tag{12}$$

탄성파 속도 결과를 이용해 유추한 절리 암반 및 벤토나이트 칩투 절리 암반의 절리수직강성 및 절리전단강성은 Fig. 10과 같다. 모든 절리 암반 시편의 절리수직강성 및 절리전단강성은 수직 응력이 증가함에 따라 더욱 높은 강성을 보였다. 건조 조건에서 절리 암반과 벤토나이트 칩투 절리 암반의 절리수직강성 및 절리전단강성은 각각 42~366 GPa/m와 14~117 GPa/m 범위 내에서 서로 유사한 값을 보였고 포화에 따라 절리 강성이 감소하였다. 포화 조건 절리 암반의 절리수직강성은 49~167 GPa/m, 절리전단강성은 17~56 GPa/m 범위에 형성되어 건조 조건 절리 암반 대비 평균 43% 감소하였고, 포화 조건 벤토나이트 칩투 절리 암반의 절리수직강성은 31~72 GPa/m, 절리전단강성은 10~24 GPa/m 범위에 형성되어 건조 칩투 조건 대비 평균 70% 감소하였다. 벤토나이트 칩투 절리 암반은 모든 수직 응력 조건에서 가장 낮은 절리 강성을 보여 벤토나이트의 절리 칩투 및 포화가 공학적방벽의 완충재-절리

면의 복합거동에 지대한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Fig. 10의 절리수직강성 및 절리전단강성 값은 유사정적 공진주 시험을 통해 유추한 값으로, 벤토나이트 충전물이 존재하는 절리면을 대상으로 직접전단시험이나 삼축압축시험을 수행하여 벤토나이트 침투에 따른 정확한 절리 강성의 변화를 확인할 필요가 있다. 직접전단시험 및 삼축압축시험을 통해 도출한 절리 강성 값과의 비교를 통해 탄성과 속도 기반 완충재-근계암반 상호작용 물성 평가의 정확도를 평가하고 보완점을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 벤토나이트 완충재의 포화 및 침식으로 인한 암석 절리면의 절리 강성 저하는 불연속면을 고려한 심층처분시스템 수치해석에 반영되어야 하고, 이때 본 연구에서 도출한 절리수직강성 및 절리전단강성 값은 절리면의 해석 입력 인자로 활용 가능할 것으로 예상된다.

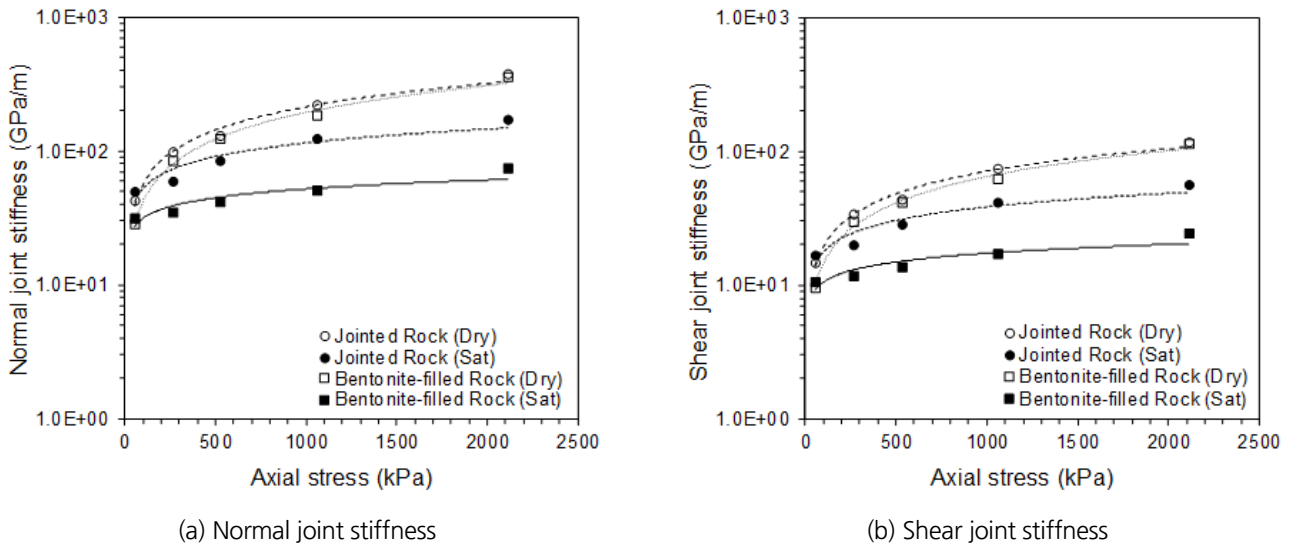


Fig. 10. Joint stiffness estimation

#### 4. 논의

본 연구에서는 공학적방벽에서 발생할 수 있는 벤토나이트 완충재의 암반 불연속면 침투현상을 모사한 절리 암반 시편을 제작하여 유사정적 공진주 실험을 통해 벤토나이트 침투 및 포화에 따른 절리 암반의 역학적 거동 변화를 확인하였다. 암석 시편을 포화시킬 수 있는 포화 셀을 구축하고 KURT 화강암 무결암, 절리 암반 및 벤토나이트 침투 절리 암반을 대상으로 건조 및 포화 조건에서의 탄성과 속도를 계측하여 벤토나이트 완충재 침투가 근계암반에 미치는 영향을 평가하였다. 유사정적 공진주 시험을 통해 벤토나이트 완충재의 절리면 침투 및 포화로 인한 절리 암반의 탄성과 속도 변화를 확인하였고, 이를 바탕으로 절리면의 절리 강성 변화를 유추하였다. 유사정적 공진주 실험 후 건조 및 포화 조건 벤토나이트 침투 절리 암반 시편의 형태는 Fig. 11과 같다. 건조 조건 시편은 실험 전에 비해 큰 변화가 없었으나, 포화 조건 시편은 벤토나이트 충전물의 팽윤으로 인해 절리 충전물 부근의 멤브레인이 변형된 것을 확인하였다. 이러한 시편의 변형은 도출한 탄성과 속도 결과 값에 영향을 미칠 것으로 판단되고, 향후 연구에서는 시편의 단순 포화만 모사할 수 있는 시험 셀이 아닌 구속압을 모사할 수 있는 시험 셀 설계가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 심층처분 깊이에서 작용하는 현장의 높은 구속응력 조건을 모사할 수 있는 적절한 응력 재하 방법을 설계하여 유사정적 공진주 시험기를 보완할 필



요가 있다. 본 연구에서 수행한 유사정적 공진주 시험은 벤토나이트의 불연속면 침투 및 팽윤에 따른 공학적방벽의 완충재-근계암 반 경계면의 상호작용 및 복합거동 평가에 있어, 선행 연구 및 예비 시험 측면에서 결과가 유의미하다고 판단된다.

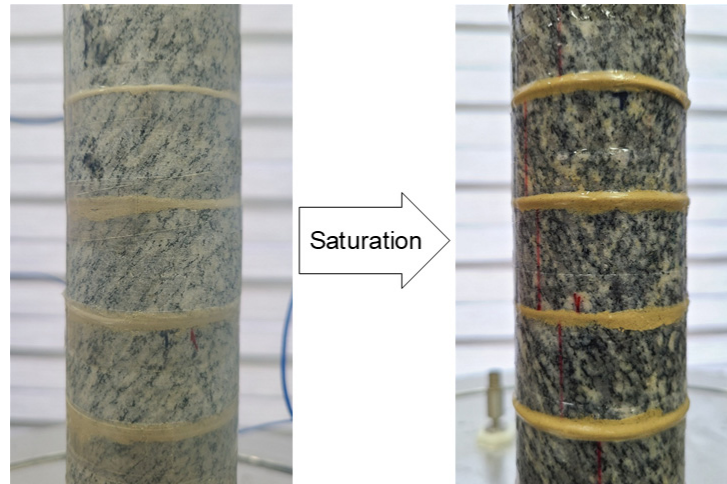


Fig. 11. Specimen deformation at the bentonite-filled joints with water-induced swelling

본 연구에서 실험한 압축 벤토나이트 분말 충전물은 고체 형태로, 실제 벤토나이트 완충재의 침식에 따라 유실되는 벤토나이트 겔 또는 졸과는 다른 특성을 가진다. 벤토나이트의 수분함량이 증가할수록 벤토나이트는 점성을 가진 유체와 유사한 거동을 보일 것으로 예상하므로, 벤토나이트의 절리 침투로 인한 영향을 정확히 파악하기 위해서는 벤토나이트의 상에 따른 절리 암반의 역학적 거동변화 실험이 수행되어야 한다. 또한, 벤토나이트의 침투 거동은 절리 간극(asperity)과 연관성이 있으므로 등가연속체 시편 내 절리의 수리적 간극 및 수리전도도에 대한 평가가 필요하다. 향후 벤토나이트 겔 및 졸 충전물을 모사해 벤토나이트의 침투 진행 정도에 따른 완충재-근계암반의 물성 변화를 단계별로 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

벤토나이트 침투에 따른 절리 암반의 역학적 거동 변화는 암반 및 충전물의 물성과 절리면의 특성에 따라 다른 결과를 보인다. 본 연구에서는 경주 벤토나이트와 KURT 화강암 디스크를 사용하였으나, 국내 고준위방사성폐기물 처분장 건설 부지는 아직 선정된 바 없고 처분장에서 사용될 벤토나이트 종류 또한 결정되지 않았다. 벤토나이트 내 몬모릴로나이트의 층간 교환성 양이온의 종류에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 나뉘며 벤토나이트의 종류에 따라 침식 가능성 및 특성이 다르다 (Madsen and Müller-Vonmoos 1989, Karland and Birgersson, 2006). 또한, 벤토나이트의 침식 특성은 이온강도, 염도, pH 등 지하수의 화학적 조성에 따라 바뀌므로 향후 처분장 부지에서 취득한 암석 시편과 처분장 부지의 지하수 환경을 고려한 시험이 수행되어야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고준위방사성폐기물의 효율적인 처분을 위해 고안된 심층처분장에서 발생할 수 있는 압축 벤토나이트 완충재의 침식 및 암반균열로의 침투를 모사한 실내실험을 수행하였다. KURT 화강암 디스크와 경주 벤토나이트를 활용하여 벤토나이트 침투 절리 암반 시편을 모사하였고, 포화 조건을 모사할 수 있도록 보완된 유사정적 공진주 시험기를 사용하여 수직응력 및 포화 조건

에 따른 탄성파 속도 변화를 확인하였다. 건조 조건 절리 암반의 P파와 S파 속도는 불연속면에서의 파 감쇠 및 반사로 인해 건조 조건 무결암 대비 각각 34~65% 및 70~80% 감소하였고, 응력에 따라 탄성파 속도가 크게 변하는 높은 응력 민감도를 보였다. 감쇠비 또한 절리면에서의 파 에너지 손실 및 감쇠로 인해 평균 36% 증가하였다. 건조 조건 벤토나이트 침투 절리 암반은 낮은 응력 조건에서 충전물 내 파 에너지 분산으로 P파와 S파 속도가 절리 암반 대비 22% 및 17% 감소하였으나, 재하 응력이 증가함에 따라 절리 암반과 유사한 탄성파 속도를 보였다. 포화 조건 무결암은 공극의 물 채움으로 인한 P파 속도 증가를 보였으나, S파 속도는 물의 전단 계수가 0인 관계로 큰 변화를 보이지 않았다. 포화 조건 절리 암반은 물의 절리면 채움으로 인한 파 전파율 증가로 P파 속도가 평균 13% 증가한 반면, 물이 윤활제 역할을 해 절리면의 전단 저항을 감소시켜 S파 속도가 평균 22% 감소하였다. 포화 조건 벤토나이트 침투 절리 암반에서는 벤토나이트 충전물이 부드러운 페이스트를 형성하고, 벤토나이트 페이스트가 암석 디스크 사이 미세균열로 침투해 디스크 간 접촉면적을 증가시켜 P파 속도가 18~37% 증가하였다. 그러나 벤토나이트 페이스트의 전단 저항은 디스크 간 마찰저항보다 낮아 S파 속도가 16~32% 감소하였고 감쇠비는 20~58% 증가하였다. 탄성파 속도를 통해 유추한 암반 절리면의 절리 수직강성과 절리전단강성은 포화 벤토나이트 침투조건에서 가장 낮은 값을 보여, 포화 벤토나이트의 불연속면 침투가 완충재-근계암반 경계면의 절리 강성을 저하하는 것을 확인하였다. 향후 불연속면을 고려한 심층처분시스템의 수치해석에 있어 이러한 완충재-근계암반 경계면의 역학적 거동 변화와 벤토나이트 침식으로 인한 절리 강성 변화 특성이 반영되어야 한다. 또한, 최종 심층처분 부지의 환경과 실제 처분 재료를 고려한 시험 수행을 통해 보다 정확한 완충재-근계암반 상호작용 및 복합거동 특성을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사사

이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단의 지원(2021M2E1A1085193, 2020M2C9A1062949)을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Baik, M.H. and Cho, W.J., 2005, An experimental study on the erosion of a compacted calcium bentonite block, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, 3(4), 341-348.
- Baik, M.H., Cho, W.J. and Hahn, P.S., 2007, Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite, *Engineering Geology*, 91(2-4), 229-239.
- Barton, N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7(4), 287-332.
- Biot, M.A., 1956a, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2), 168-178.
- Biot, M.A., 1956b, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2), 179-191.
- Biot, M.A., 1962, Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *Journal of Applied Physics*, 33(4), 1482-1498.

- Brady, B.H. and Brown E.T., 1993, *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- Brillouin, L., 1946, *Wave propagation in periodic structures*, New York: McGraw-Hill.
- Cha, M. S., Cho, G. C. and Baak, S. H., 2005, Elastic Wave Propagation in Jointed Rock Mass, In *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, Korean Geotechnical Society, 515-520.
- Cha, M., Cho, G.C. and Santamarina, J.C., 2009, Long-wavelength P-wave and S-wave propagation in jointed rock masses, *Geophysics*, 74(5), E205-E214.
- Cha, M., Santamarina, J.C., Kim, H.S. and Cho, G.C., 2014, Small-strain stiffness, shear-wave velocity, and soil compressibility, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(10), 06014011.
- Choi, Y.C., Kim, J.S., Park, T.J. and Kim, G.Y., 2017, Analysis for the Crack Characteristics of Rock and Concrete using Strain and Elastic Wave, *Tunnel and Underground Space*, 27(5), 253-262.
- Cook, N.G., 1992, Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress, In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 29(3), 198-223.
- Duncan, N., 1969, *Engineering Geology and Rock Mechanics*. Vols. 1 and 2., Leonard Hill, London, UK.
- Fratta, D. and Santamarina, J.C., 2002, Shear wave propagation in jointed rock: State of stress, *Géotechnique*, 52(7), 495-505.
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poroser medien, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich*, 96, 1-23.
- Goodman, R.E., 1989, *Introduction to rock mechanics*, 2nd ed.: John Wiley & Sons, Inc..
- Gutierrez, M., Øino, L.E., and Høeg, K., 2000, The effect of fluid content on the mechanical behaviour of fractures in chalk, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33(2), 93-117.
- Hardin, B.O. and Richart Jr., F.E., 1963, Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 33-65.
- Hedström, M., Hansen, E.E., and Nilsson, U., 2016, Mechanisms and models for bentonite erosion, Technical Report TR-15-07, Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Horn, H.M. and Deere, D.U., 1962, Frictional characteristics of minerals, *Geotechnique*, 12(4), 319-335.
- Hoskins, E.R., Jaeger, J.C., and Rosengren, K.J., 1968, A medium-scale direct friction experiment, In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 5(2), 143-152.
- Jaeger, J.C., 1959, The frictional properties of joints in rock, *Geofisica pura e applicata*, 43(1), 148-158.
- Karland, O. and Birgersson, M., 2006, Montmorillonite stability: With special respect to KBS-3 conditions, Technical Report TR-06-11, Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Kang, S.S., Hirata, A., Obara, Y. and Haraguchi, N., 2006, Evaluation of rock damage zone using seismic logging method, *Tunnel and Underground Space*, 16(1), 50-57.
- Kim, J.W., Chong, S.H. and Cho, G.C., 2018, Experimental Characterization of Stress-and Strain-Dependent Stiffness in Grouted Rock Masses, *Materials*, 11(4), 524.
- Kim, J.W., Chong, S.H. and Cho, G.C., 2021, Effects of Gouge Fill on Elastic Wave Propagation in Equivalent Continuum Jointed Rock Mass, *Materials*, 14(12), 3173.
- Kim, T. and Jeon, S., 2016, A study on shear characteristics of a rock discontinuity under various thermal, hydraulic and mechanical conditions, *Tunnel and Underground Space*, 26(2), 68-86.
- Kolsky, H., 1963, *Stress waves in solids*, Vol. 1098, Courier Corporation, Chelmsford, MA, USA.
- Lee, C., Cho, W.J., Kim, J.S. and Kim, G.Y., 2020, Penetration of Compacted Bentonite into the Discontinuity in the Excavation Damaged Zone of Deposition Hole in the Geological Repository, *Tunnel and Underground Space*, 30(3), 193-213.
- Lee, J.O., Cho, W.J., and Kwon, S.K., 2011a, Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean

- HLW Repository, Tunnel and Underground Space, 21(4), 264-273.
- Lee, J.S., Moon, J.K. and Choi, W.E., 2011b, Analysis of correlation between velocity of elastic wave and mechanical properties of rocks, Tunnel and Underground Space, 21(1), 50-65.
- Lee, S. and Chang, C., 2013, Laboratory experiments on fracture shearing induced by pore pressure increase, In Proceeding of fall joint conference of the geological science, Jeju, Korea, 314-315.
- Li, Z., Sheng, Y. and Reddish, D.J., 2005, Rock strength reduction and its potential environmental consequences as a result of groundwater rebound, In Proceeding of 9th international mine water congress, 513-519.
- Li, J., Ma, G. and Zhao, J., 2010, An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115(B3).
- Madsen, F. T. and Müller-Vonmoos, M., 1989, The swelling behaviour of clays, Applied Clay Science, 4(2), 143-156.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 1998, The rock physics handbook, Cambridge University Press.
- Mindlin, R.D., 1960, Waves and vibrations in isotropic, elastic plates, Structure Mechanics, 199-232.
- Mohd-Nordin, M.M., Song, K.I., Cho, G.C. and Mohamed, Z., 2014, Long-wavelength elastic wave propagation across naturally fractured rock masses, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(2), 561-573.
- Morrow, C.A., Moore, D.E. and Lockner, D.A., 2000, The effect of mineral bond strength and adsorbed water on fault gouge frictional strength, Geophysical research letters, 27(6), 815-818.
- Morrow, C., Radney, B. and Byerlee, J., 1992, Frictional strength and the effective pressure law of montmorillonite and Illite clays, International Geophysics, 51, 69-88.
- Neretnieks, I., Liu, L. and Moreno, L., 2009, Mechanisms and models for bentonite erosion, Technical Report TR-09-35, Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, In 1st ISRM Congress, OnePetro.
- Pellet, F.L., Keshavarz, M. and Boulon, M., 2013, Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities, Engineering Geology, 157, 33-38.
- Pusch, R., 1983, Stability of bentonite gels in crystalline rock- physical aspects, Technical Report TR-83-04, Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Rosengren, K.J., 1968, Rock mechanics of the Black Star open cut, Mount Isa., Ph.D. Dissertation, Australian National University, Australia.
- Schoenberg, M., 1980, Elastic wave behavior across linear slip interfaces, The Journal of the Acoustical Society of America, 68(5), 1516-1521.
- Schoenberg, M. and Muir, F., 1989, A calculus for finely layered anisotropic media, Geophysics, 54(5), 581-589.
- Stokoe, K.H. and Santamarina, J.C., 2000, Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering, In ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, November 2000, OnePetro.
- Ulusay, R. and Karakul, H., 2016, Assessment of basic friction angles of various rock types from Turkey under dry, wet and submerged conditions and some considerations on tilt testing, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(4), 1-17.