

## 압축 벤토나이트 완충재의 역학 물성 평가

### Evaluation of Mechanical Properties for the Compacted Bentonite Buffer Materials

윤 석 <sup>1</sup>	Yoon, Seok	홍 창 호 <sup>2</sup>	Hong, Chang-Ho
김 태 현 <sup>3</sup>	Kim, Taehyun	김 진 섭 <sup>4</sup>	Kim, Jin-Seop

#### Abstract

The compacted bentonite buffer is one of the most important components in an engineered barrier system (EBS) to dispose of high-level radioactive waste (HLW) produced by nuclear power generation. The compacted bentonite buffer has a crucial role in protecting the disposal canister against the external impact and penetration of groundwater, so it has to satisfy the thermal-hydraulic-mechanical requirements. Even though there have been various researches on the investigation of thermal-hydraulic properties, few studies have been conducted to evaluate mechanical properties for the compacted bentonite buffer. For this reason, this paper conducted a series of unconfined compression tests and obtained mechanical properties such as unconfined compressive strength, elastic modulus, and void ratio of Korean compacted bentonite specimens with different water content and dry density values. The unconfined compressive strength and elastic modulus increased, and the Poisson's ratio decreased a little with increasing dry density. It showed that unconfined compressive strength and elastic modulus were proportional to dry density. However, there was not a remarkable correlation between mechanical properties and water content.

#### 요 지

압축 벤토나이트 완충재는 원자력발전소에서 발생하는 고준위폐기물을 처리하기 위한 공학적방벽시스템의 가장 중요한 요소 중 하나이다. 압축 벤토나이트 완충재는 외부 하중이나 지하수 침투로부터 처분 용기를 보호하기에, 열-수리-역학적인 요구 조건을 충족하여야 한다. 이러한 완충재의 열-수리 물성에 관한 연구는 많이 진행되어 왔지만, 역학 물성 규명에 관한 연구는 많이 부족한 실정이다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 건조밀도와 함수비에 따른 다양한 국내 압축 벤토나이트 시료를 조성하여 이에 대한 일축압축강도시험을 실시하였으며, 일축압축강도, 탄성계수, 그리고 포아송비를 도출하였다. 압축 벤토나이트의 일축압축강도와 탄성계수는 건조밀도에 따라 증가하였으며, 포아송비는 건조밀도가 증가할수록 약간 감소하는 것으로 나타났다. 일축압축강도, 탄성계수 및 포아송비는 건조밀도와 큰 상관 관계를 보였으나, 함수비와는 특별한 상관성을 나타내지는 않았다.

**Keywords :** Compacted bentonite buffer, Engineered barrier system, Unconfined compressive test

1 정희원, 한국원자력연구원 저장처분기술관리부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Disposal Safety Evaluation Research Division, KAERI)

2 정희원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Disposal Performance Demonstration Research Division, KAERI)

3 정희원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Disposal Performance Demonstration Research Division, KAERI, Tel: +82-42-868-2946, Fax: +82-42-868-8055, [kth@kaeri.re.kr](mailto:kth@kaeri.re.kr), Corresponding author, 교신저자)

4 정희원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Disposal Performance Demonstration Research Division, KAERI)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

원자력발전소 운영 시 발전 과정에 따른 부산물로서 고방사선을 방출하는 사용후핵연료라는 고준위폐기물이 발생하게 된다. 이러한 고준위폐기물은 강한 방사선을 배출하여 인체에 매우 유해하므로 인간 생활권과 완전히 격리되어 지하 수백 미터 깊이의 심지층에 안전하게 처분되어야 한다(Cho, 2017; Zheng et al., 2015). 심층처분 시스템은 크게 자연 상태의 암반층인 천연방벽(Natural barrier)과 인위적으로 개발된 공학적방벽(Engineered barrier)으로 구성된다. 공학적방벽은 크게 사용후핵연료가 담긴 처분용기, 완충재, 뒤채움재 등으로 구성되며, 이 중 완충재는 외부 하중이나 주변 암반으로부터 침투하는 지하수로부터 처분용기를 보호하기에 매우 중요한 요소라고 할 수 있다(Lee et al., 2011; Nilsson, 1985). 이러한 완충재에 적합한 물질을 선정하기 위한 연구가 수십 년에 걸쳐 진행되었으며, 벤토나이트 점토를 압축한 형태인 압축 벤토나이트가 완충재로서 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Dixon et al., 1985; Kim et al., 2019; Lloret et al., 2003; Pusch, 1979; Xiang et al., 2020).

심층처분장 내 처분용기 및 완충재를 포함한 공학적방벽재가 설치된 후, 시간이 경과함에 따라 안쪽에서는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열에 의해 완충재의 온도가 상승하여 완충재가 건조되며, 동시에 바깥쪽에서는 주변 암반층으로부터 유입되는 지하수에 의해 완충재가 포화되기 시작한다(Cho, 2017; Villar, 2004; Yoon et al., 2021). 건조 및 포화과정을 거치면서 완충재의 부피와 밀도가 변화하게 되며, 특히 완충재가 포화되면 벤토나이트의 높은 팽윤성으로 인해 처분용기와 주위 암반에 팽윤압이 작용하게 된다(Komine, 2004). 이와 같이 공학적방벽재의 완충재는 붕괴열에 의한 온도 상승, 지하수에 의한 포화 및 이로 인한 압력 증가가 동시에 발생하는 열-수리-역학 복합기동을 겪으며, 따라서 완충재의 열-수리-역학 물성은 전체 처분시스템의 안전성을 평가하는데 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다(Lee et al., 2020; Rutqvist et al., 2014; Villar, 2004). 완충재의 열-수리 물성에 관한 연구는 국내외적으로 많은 연구가 이루어진 반면에(Cho, 2017; Villar, 2004; Xiang et al., 2020), 역학 물성에 관한 연구는 상대적으로 적은 상황이며, 특히 국내에서 생산되는 경주 압축 벤토나이트의 역학 물성에 관한 연구는 매우 부족하다고 할 수

있다.

따라서 본 연구에서는 국내 경주 압축 벤토나이트를 이용하여 대표적 역학 물성인 탄성계수와 포아송비를 측정하고자 하였다. 이를 위해 다양한 건조밀도와 함수비에 따른 압축 벤토나이트 시료를 조성한 후 각각의 시료에 대해 일축압축강도시험을 수행하여 일축압축강도, 탄성계수, 그리고 포아송비를 도출하였으며, 도출된 실험결과를 통해 건조밀도 및 함수비와 역학적 물성들과의 상관성을 분석하고 이를 소개하고자 한다.

## 2. 일축압축시험

### 2.1 시험 재료

본 연구에서는 ㈜클라리언트코리아를 통해 국내 경주 광산에서 생산된 Ca 타입의 경주 벤토나이트를 사용하였다. 경주 벤토나이트 분말은 압축성과 소성이 큰 고소성 점토로 분류되었으며, 광물조성 분석 결과 팽창성이 큰 몬모릴로나이트 함량은 약 60%로 나타났다(Table 1). 일반적으로 활용되는 벤토나이트 분말의 압축 방법으로는 플로팅 다이 압축(floating die press) 방법과 냉간 정수압 성형(Cold Isostatic Press, CIP) 방법이 있다(Kim et al., 2018). 플로팅 다이 압축방법은 일반적인 압축방법과는 다르게 벤토나이트 파우더를 아래와 위에서 동시에 누르는 방법이며(Fig. 1(a), 1(b)), 냉간 정수압 성형 방법은 벤토나이트 분말을 고무백의 몰드에 넣은 후, Fig. 1(c)와 같이 사방에서 등방의 유체 압력을 가하여 균질한 밀도의 시료를 성형하는 방법이다(Mehrotra, 2014). 만약 시료가 높은 세장비(slenderness ratio)를 가지는 경우, 플로팅 다이 방법으로 완충재를 압축하면 양 끝단 플레이트 주변에서 더 높은 밀도를 가지게 되므로 활용하기 어렵다. 본 연구에 사용된 시료는 일축압축강

Table 1. Quantitative XRD analysis for the Gyeongju bentonite powder (Yoon et al., 2019)

Bentonite type	Gyeongju bentonite			
	Sample No. 1	2	3	Avg.
Montmorillonite	63.4	61.7	60.5	61.9
Albite	19.4	22.8	20.4	20.9
Quartz	5.8	4.9	5.3	5.3
Cristobalite	4.0	4.5	3.7	4.1
Calcite	4.3	3.3	6.8	4.8
Heulandite	3.0	2.7	3.3	3.0

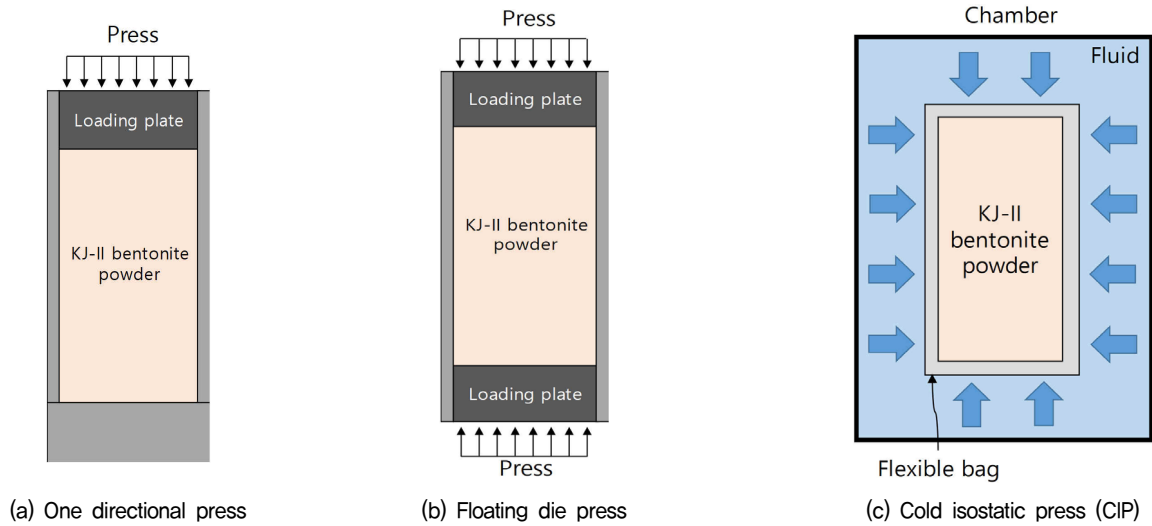


Fig. 1. Bentonite powder compaction methods (Kim et al., 2018)

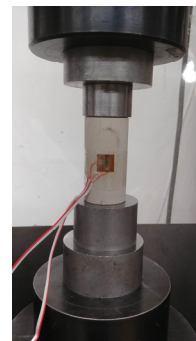
도시험의 표준 실험방법(ASTM D7012-14)에서 제안하고 있는 바와 같이 시료의 길이 대 직경 비율이 2.0~2.5의 범위를 가지도록 직경 30mm, 높이 60mm로 하였으며 냉간 정수압 성형 방법을 활용하여 경주 벤토나이트 분말을 압축시켜 제작하였다.

## 2.2 시험 기기 및 과정

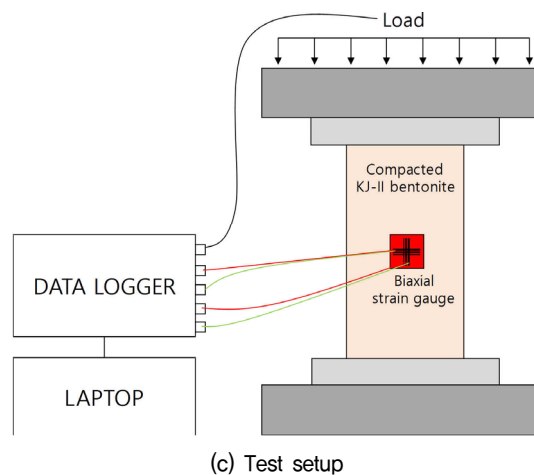
일축압축시험은 지오메카닉스에서 보유한 최대 196.1 kN(20tonf)를 재하할 수 있는 만능재료시험기(ACEONE 08274628)를 활용하여 수행하였다(Fig. 2(a)). 하중재하는 0.5MPa/sec의 속도로 하중을 조절하며 진행하였



(a) Testing equipment



(b) A compacted bentonite specimen with an attached strain gauge



(c) Test setup

Fig. 2. Test setup for an unconfined compression test

며, 시료 표면에 2축 변형률계이지(CAS/AP-11-TS50N-120-EC)를 부착하여 수직 및 수평방향 변형률을 획득하였다(Fig. 2(b)). 시료의 표면은 사포를 활용하여 평탄화하여 스트레인계이지가 표면에 접촉하기 용이하도록 하였다. 각 방향 변형률의 경우 매 0.2초마다 데이터로거(KYOWA PCD 400A)를 활용하여 측정하였고 이를 만능재료시험기의 축방향 하중값과 동기화하였다(Fig. 2(c)).

본 연구에서는 다양한 건조밀도와 함수비에 따라 Fig. 2와 같이 일축압축시험을 수행하였으며, 이를 통해 응력-변형률 곡선을 획득한 후 일축압축강도( $\sigma_c$ ), 탄성계수( $E$ ), 그리고 포아송비( $\nu$ )를 측정하였다. 시료의 함수비를 유지할 수 있도록 시료는 시험 직전까지 진공 포장된 상태로 보관하였으며, 함수비 변화에 따른 영향을 최소화할 수 있도록 포장 제거 직후 약 5~10분 내 실험을 완료하였다. 실험 및 물성 측정은 국제암반역학회(International Society of Rock Mechanics, ISRM) 및 한국암반공학회(Korean Society for Rock Mechanics, KSRM)에서 제안한 표준시험법을 따라 수행하였다. 일축압축강도는 시험편이 파괴될 때의 최대 응력값을 의미하며, 시험편의 면적( $A$ )과 파괴 시 하중( $P$ )의 관계로 표현되는 다음 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

응력-변형률 곡선을 통해 탄성계수를 결정하기 위해서 일반적으로 세 가지 방법이 활용되고 있다(Bieniawski and Bernede, 1979). 접선 탄성계수(tangent Young's modulus)는 응력-변형률 곡선에서 일축압축강도의 50% 수준에 해당하는 지점의 접선 기울기로 정의되며, 평균 탄성계수(average Young's modulus)는 응력-변형률 곡선에서 직선 구간의 기울기를 통해 결정할 수 있다. 마지막으로 할선 탄성계수(secant Young's modulus)는 원점과 일축압축강도의 50% 지점을 통과하는 직선의 기울기를 통해 구할 수 있으며, 본 연구에서는 보편적으로 활용되고 있는 평균 탄성계수를 통해 시험편의 영률을 결정하였다. Fig. 3은 일축압축시험을 통해 획득한 경주 벤토나이트 시료의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있으며, 대부분의 시료는 일축압축강도의 40~60% 수준에서 선형 구간이 나타나는 것을 확인하였다. 포아송비( $\nu$ )는 압축에 따른 횡방향 변화량을 나타내기 위한 계수로써, 식 (2)와 같이 축방향 변형률( $\Delta\epsilon_a$ )과 횡방향 변형률

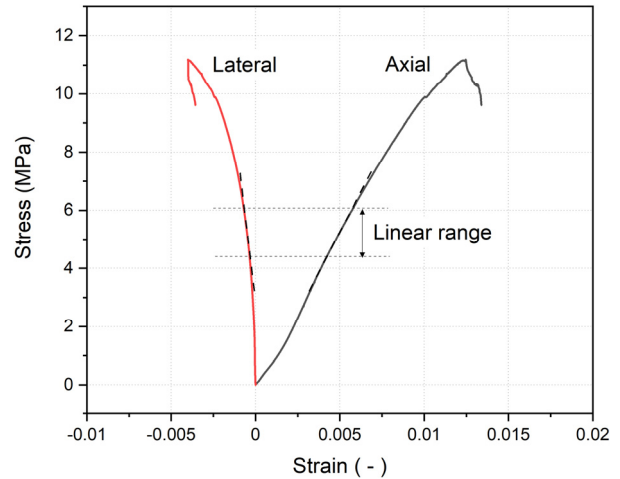


Fig. 3. Stress-strain curve from unconfined compression test of Gyeongju bentonite specimen

( $\Delta\epsilon_l$ )의 비를 통해 계산할 수 있다.

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_l}{\Delta\epsilon_a} \quad (2)$$

### 3. 해석 결과 및 토의

본 연구에서는 함수비와 건조밀도에 따라 20개의 압축 벤토나이트 시료를 조성하여 일축압축강도시험을 수행하였다. 시료 조성 시 적용된 냉간 정수압은 9.8~58.8MPa 범위였으며, 냉간 정수압이 클수록 건조밀도는 크게 도출되었다. 함수비의 경우 벤토나이트 분말의 초기 함수비인 11~12% 이상의 함수비는, 분말에 분무기를 뿌린 후 시료를 압축하였으며, 낮은 함수비 범위는 초기 상태의 함수비에서 압축된 시료를 오븐에 건조하거나, 완전 건조한 시료에 분무기를 뿌려서 조성하였다. 특히 완전 건조된 분말 상태에서는 시료 조성이 불가하기에 압축 점토를 오븐에 완전 건조한 후, 시험에 사용하였다. 시험에 사용된 압축 벤토나이트의 건조밀도 범위는 1.487~1.818g/cm<sup>3</sup> 이었으며, 함수비는 0~18.5% 범위를 나타냈다. 또한 일축압축강도 값은 3.4~19MPa 범위를 나타냈으며, 탄성계수는 0.54~1.81GPa, 그리고 포아송비는 0.159~0.367의 값을 나타냈다. Fig. 4는 20개 시료의 일축압축강도(UCS) 값에 따른 탄성계수와 포아송비를 나타내고 있으며, 일축압축강도가 클수록 탄성계수는 선형적으로 증가하였고, 포아송비는 약간 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig. 5는 건조밀도( $\gamma_d$ ) 및 함수비( $w$ )에 따른 탄성계수

와 포아송비를 나타내고 있다. 건조밀도가 클수록 흙이 공학적으로 안정하기에 탄성계수 역시 선형적으로 증가하였으며, 포아송비는 감소하는 경향을 나타냈다. Lim

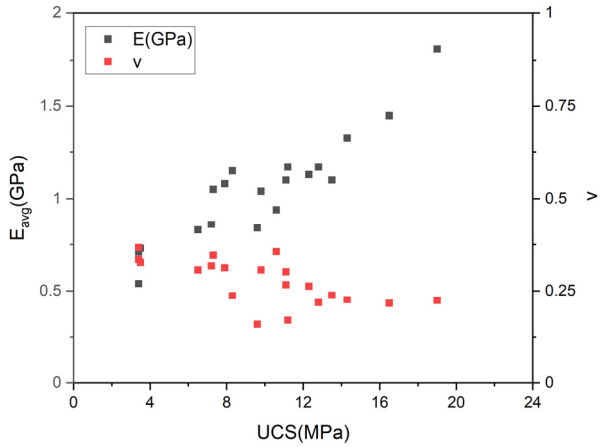


Fig. 4. Elastic modulus and Poisson's ratio according to the unconfined compression strength

et al.(2020) 역시 조립토와 세립토에 대해 삼축압축시험을 수행하였으며, 흙의 건조밀도와 포아송비는 반비례한다는 결과를 도출한 바 있다. 함수비에 따른 탄성계수와 포아송비의 상관성은 나타나지 않았으며, 이는 함수비가 낮은 시료 생성 시 초기 함수비에서 조성된 블록을 건조한 경우도 있었기에 다짐곡선과는 다른 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 함수비가 0% 일 때의 시료는 초기 함수비를 갖는 블록을 건조하여 조성한 것으로, 건조 과정에서 압축 벤토나이트의 건조밀도가 초기 상태보다 3~4% 증가하였다. 본 시험을 통해 도출된 압축 벤토나이트의 일축압축강도와 탄성계수는 건조밀도와 매우 큰 상관성을 보였기에, 함수비가 0%인 시료에서의 탄성계수와 포아송비의 변동성은 꽤 크게 나타났다. Fig. 6(a)은 함수비가 0%일 때 건조밀도에 따른 탄성계수와 포아송비를 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 함수비가 12~13%일 때 건조밀도에 따른 탄성계수와 포아송비

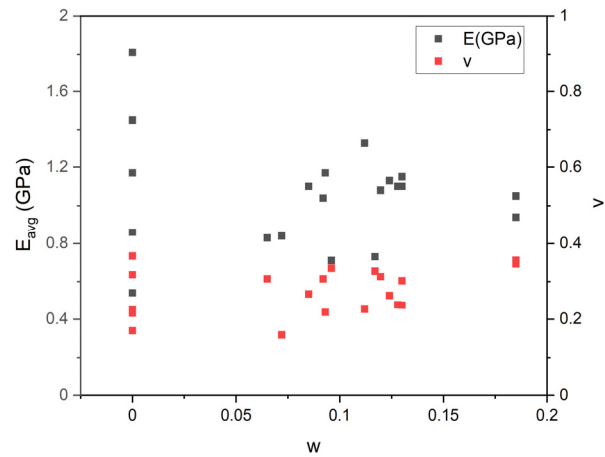
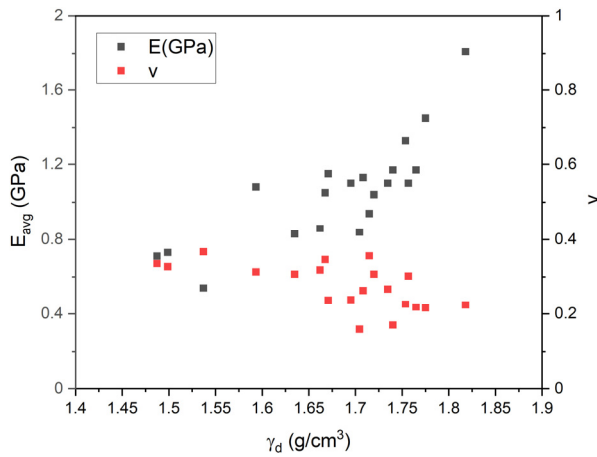


Fig. 5. Elastic modulus and poisson ratio with respect to dry density and water content

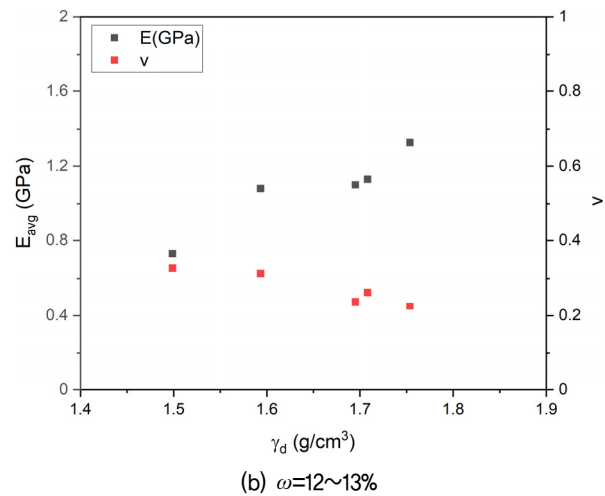
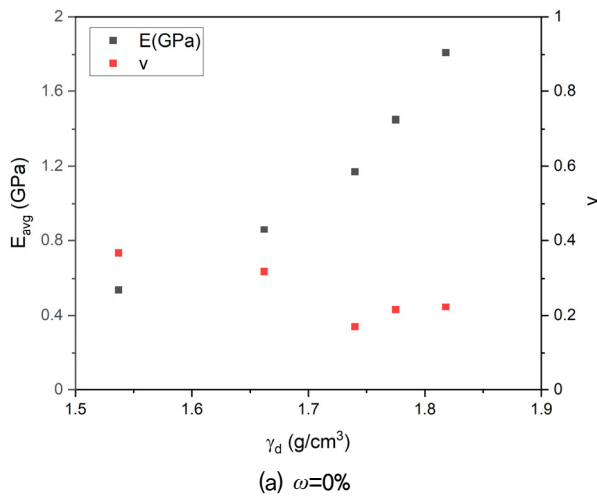


Fig. 6. Elastic moduls and poisson ratio with respect to dry density under the constant water content condition

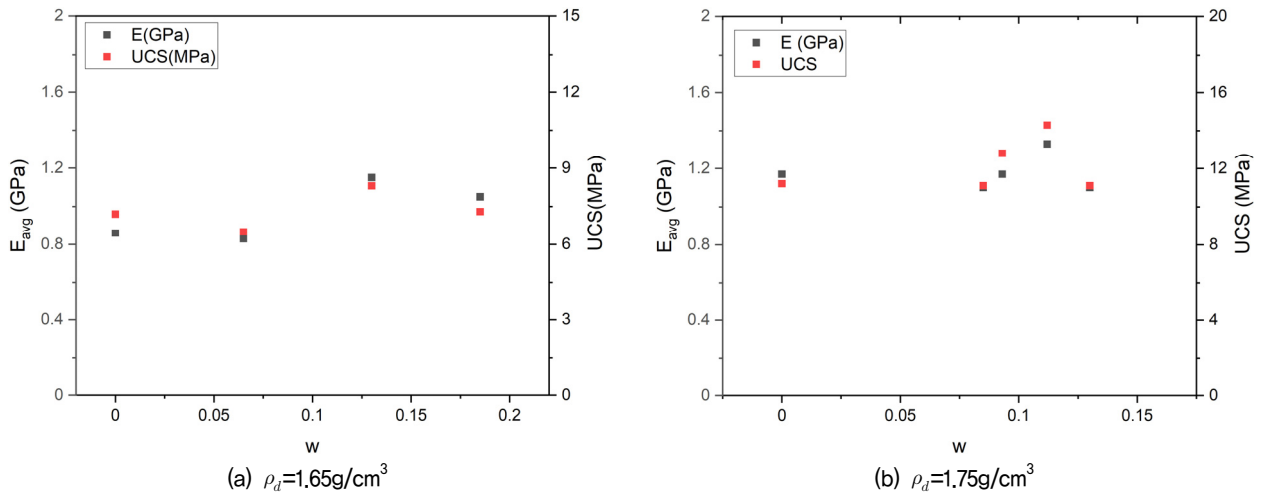


Fig. 7. Elastic modulus and poisson ratio with respect to water content under the constant dry density condition

를 보여주고 있다. 또한 Fig. 7(a), (b)는 각각 건조밀도가 약  $1.65\text{g/cm}^3(\pm 1\%)$ 와  $1.75\text{g/cm}^3(\pm 1\%)$ 일 때 함수비에 따른 일축압축강도와 탄성계수 값을 보여주고 있으며, 일축압축강도와 탄성계수 모두 완전 건조상태일 때를 제외하고는 다짐곡선과 상당히 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

실제 처분환경에서 처분용기와 맞닿은 지점에서의 완충재의 함수비는 붕괴열에 의해 감소할 것이며 이로 인한 건조밀도 값은 증가할 것이기에(Villar, 2004), 이에 따른 강도 역시 건조밀도에 비례할 것으로 예상된다. 또한 시간이 지날수록 지하수 침투에 의해 완충재의 포화도가 증가할 것이며, 완충재의 강도와 탄성계수는 다짐곡선과 본 시험결과 값을 토대로 약간 감소할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

지하 500~1,000m 깊이의 심지층 환경에서 압축 벤토나이트 완충재는 1)지하수가 침투하여 처분용기와 접촉하는 것을 제한하고, 2)처분용기로부터 발생하는 고온의 열량을 주변 암반으로 잘 전달하며, 3)처분용기가 부식되어 방사성핵종이 주변 암반으로 유출되는 것을 지연시키는 기능을 가지고 있기에 심지층처분의 안전성을 확보하는데 있어서 매우 중요한 역할을 수행한다. 특히 완충재는 붕괴열에 의한 온도의 상승, 지하수 및 붕괴열에 의한 완충재 안팎의 포화도 변화, 그리고 이에 따른 팽윤압이 동시에 발생하는 열-수리-역학 복합 거동을 겪는다. 완충재의 열-수리 물성 규명에 관한 연

구는 많이 진행된 반면 역학 물성 규명에 관한 연구는 부족하기에, 본 연구에서는 건조밀도 및 포화도에 따른 국내 경주 압축 벤토나이트에 대한 일축압축강도, 탄성계수, 그리고 포아송비를 규명하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 우선, 국내 경주 벤토나이트 분말을 냉간 정수압 기법을 통해 압축하여 다양한 함수비와 건조밀도를 갖는 시료 20개를 조성하였다. 압축 벤토나이트 시료는 직경 30mm, 높이 60mm의 원기둥 형태였으며, 총 20개 시료의 건조밀도의 범위는  $1.487\sim 1.818\text{g/cm}^3$ , 함수비는 0~18.5% 범위를 나타냈다. 총 20개 시료에 대한 일축압축강도값은 3.4~19MPa, 탄성계수는 0.54~1.81GPa, 그리고 포아송비는 0.159~0.367의 값을 보였다. 압축 점토의 일축압축강도가 증가할수록 시료는 공학적으로 안정한 상태이기에 탄성계수는 비례하여 증가하였으며, 포아송비는 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 일정한 건조밀도에서의 함수비에 따른 탄성계수 값은 완전 건조상태일 때를 제외하면 다짐 곡선과 상당히 유사한 값을 보였다. 이는 완전 건조상태의 시료는 초기 건조상태의 분말을 압축한 것이 아니기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 실제 심지층 처분환경에서는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열에 의해 처분용기와 맞닿은 지점에 위치한 완충재의 함수비는 감소하면서 건조밀도는 증가할 것이며, 이에 따라 강도와 탄성계수도 건조밀도에 비례하여 증가할 것이다. 반면에 시간이 경과함에 따라 주변 지하수 침투에 의해 완충재의 건조밀

도는 감소하면서 함수비는 증가할 것이며, 이에 따라 강도와 탄성계수도 감소할 것으로 판단된다. 특히 완충재의 탄성계수와 포아송비는 공학적방벽시스템의 장기 안전성을 평가하기 위한 중요한 역학 물성 입력 자료이기에, 본 연구에서 제시한 함수비 및 건조밀도에 따른 시험 결과는 실제 처분환경에서의 벤토나이트 완충재의 장기 거동 변화 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 압축 벤토나이트 완충재의 탄성 특성 외에 압밀 팽윤 거동에 관한 소성 특성 규명에 관련된 연구도 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 사용후 핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단(2021M2E1A1085193)과, 한국연구재단 원자력연구개발사업(2021M2E3A2041351)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. ASTM D7012-14 (2014), "Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures".
2. Bieniawski, Z. T. and Bernede, M. J. (1979), "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials: Part 1. Suggested Method for Determining Deformability of Rock Materials in Uniaxial Compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, Vol.16, No.2, pp.138-140.
3. Cho, W. J. (2017), "Radioactive waste disposal", KAERI/GP-495/2017.
4. Dixon, D. A., Gray, M. N., and Thomas, A. W. (1985), "A Study of the Compaction Properties of Potential Clay-sand Buffer Mixtures for Use in Nuclear Fuel Waste Disposal", *Engineering Geology*, Vol.21, pp.247-255.
5. Kim, J. S., Yoon, S., Cho, W. J., Choi, Y. C., and Kim, G. Y. (2018), "A Study on the Manufacturing Characteristics and Field Applicability of Engineering-scale Bentonite Buffer Block in a High-level Nuclear Waste Repository", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol.18, No.1, pp.123-136.
6. Kim, M. J., Lee, S. R., Jeon, J. S., and Yoon, S. (2019), "Sensitivity Analysis of Bentonite Buffer Peak Temperature in a High-level Waste Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.123, pp.190-199.
7. Komine, H. (2004), "Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites", *Engineering Geology*, Vol.71, pp.265-279.
8. Lee, C., Lee, J. W., and Kim, G. Y. (2020), "Numerical Simulations of Coupled Thermo-hydro-mechanical (THM) behavior of FEBEX Bentonite", KAERI/TR-8162/2020.
9. Lee, J. O., Cho, W. J., and Kwon, S. (2011), "Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository", *Tunnel and Underground Space*, Vol.21, No.4, pp.264-273.
10. Lim, S., Yu, S., Kim, Y., and Kim, M. (2020), "Poisson's Ratio Prediction of Soil Using the Consolidation Undrained Triaxial Compression Test", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.62, No.4, pp.45-51.
11. Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., and Alonso, E. E. (2003), "Mechanical behavior of Heavily Compacted Bentonite under High Suction Changes", *Geotechnique*, Vol.53, pp.27-40.
12. Mehrotra, P. K. (2014), "1.07-Powder Processing and Green Shaping", *Comprehensive Hard Materials*, V.K. Sarin, Elsevier, Oxford, 213-235 (2014).
13. Nilsson, J. (1985), "Field Compaction of Bentonite-sand Backfilling", *Engineering Geology*, Vol.21, pp.367-376.
14. Pusch, R. (1979), "Highly Comapcted Sodium Bentonite for Isolating Rock-deposited Radioactive Waste Products", *Nuclear Technology*, Vol.45, pp.153-157.
15. Rutqvist, J., Zheng, L., Chen, F., Liu, H. H., and Birkholzer, J. (2014), "Modelling of Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes with Links to Geochemistry Associated with Bentonite-backfilled Repository Tunnels in Clay Formation", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.47, pp.167-186.
16. Villar, M. V. (2004), "Thermo-hydro-mechanical Characterization and Process in the Clay Barrier of a High Level Radioactive Waste Repository", State of the Art Report. Informes Técnicos Ciemat 1044, Octubre.
17. Xiang, G., Ye, W., Xu, Y., and Jalal, F. E. (2020), "Swelling Deformation of Na-bentonite in Solutions Contaning Different Cations", *Engineering Geology*, Vol.277, pp.105757.
18. Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., and Liu, H. H. (2015), "On the Impact of Temperature up to 200°C in Clay Repositories with Bentonite Engineered Barrier System: A Study with Coupled Thermal, Hydrological, Chemical, and Mechanical Modeling", *Engineering Geology*, Vol.197, pp.278-295.
19. Yoon, S., Go, G. H., Lee, J. O., and Kim, G. Y. (2019), "Evaluation of Water Suction for the Compacted Bentonite Buffer Considering Temperature Bariation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.7-14.
20. Yoon, S. and Kim, G. Y. (2021), "Measuring Thermal Conductivity and Water Suction for Variably Saturated Bentonite", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.53, pp.1041-1048.

Received : July 27<sup>th</sup>, 2021

Revised : September 23<sup>rd</sup>, 2021

Accepted : September 30<sup>th</sup>, 2021