

## 고준위폐기물처분장 공학적방벽의 열-수리-역학적 거동 연구: 엔지니어링 규모의 실증실험

이재완<sup>1)\*</sup>, 조원진<sup>2)</sup>

### Thermal-Hydro-Mechanical Behaviors in the Engineered Barrier of a HLW Repository: Engineering-scale Validation Test

Jae Owan Lee and Won Jin Cho

**Abstract** An enhancement in the performance and safety of a high-level waste repository requires a validation of its engineered barrier. An engineering-scale test (named "KENTEX") has been conducted to investigate the thermal-hydro-mechanical behaviors in the engineered barrier of the Korean reference disposal system. The validation test started on May 31, 2005 and is still under operation. The experimental data obtained allowed a preliminary and qualitative interpretation of the thermal-hydro-mechanical behaviors in the bentonite blocks. The temperature was higher as it became closer to the heater, while it became lower as it was farther away from the heater. The water content had a higher value in the part close to the hydration surface than that in the heater part. The relative humidity data suggested that a hydration of the bentonite blocks might occur by different drying-wetting processes, depending on their position. The total pressure was continuously increased by the evolution of the saturation front in the bentonite blocks and thereby the swelling pressure. Near the heater region, there was also a significant contribution of the thermal expansion of bentonite and the vapor pressure in the pores of the bentonite blocks.

**Key words** thermo-hydro-mechanical behavior, validation test, engineered barrier, high-level waste repository

**초 록** 고준위폐기물처분장의 성능 및 안전성 향상을 위해서 공학적방벽(engineered barrier)에 대한 실증이 필요하다. 우리나라 기준처분시스템에 대한 엔지니어링 규모의 실험장치(KENTEX)를 제작·설치하고, 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동 규명을 위한 실증실험을 수행하였다. KENTEX 실험은 2005년 5월 31일에 시작되어 현재 성공적으로 진행 중에 있으며, 지금까지 얻어진 실험결과로부터 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동에 대한 중간결론을 얻을 수 있었다. 벤토나이트 블록 내 온도는 실험 시작 후 수 주 만에 정상상태에 도달하였고, 온도분포는 히터에 가까울수록 높고 멀어질수록 낮은 값을 보였다. 수분함량은 히터 쪽보다는 지하수가 유입되는 실린더 벽면 부근에서 높은 값을 가졌고, 건조-습윤 과정에 의한 벤토나이트 블록의 수화는 측정위치에 따라 달랐다. 실험기간 동안 벤토나이트 블록에 작용하는 압력은 블록의 포화도 (그 결과, 팽윤압)이 증가할수록 증가하였다. 히터 부근에서는 벤토나이트의 열응력이나 블록 공극 내 증기압도 중요한 역할을 하였다.

**핵심어** 열-수리-역학적 거동, 실증실험, 공학적방벽, 고준위폐기물처분장

## 1. 서 론

고준위폐기물처분장에서 공학적방벽은 처분폐기물로

부터 방사성핵종이 유출되는 것을 일차적으로 막아 주고, 유일하게 그 성능을 인위적으로 향상시킬 수 있는 처분장의 중요한 구성요소이다. 그러나 공학적방벽에서는 방사성핵종의 붕괴열에 의해 방벽 내 첨두온도(peak temperature)가 기준치를 초과하여 완충재의 건전성에 영향을 줄 수 있고, 또 지하수와 반응한 압축벤토나이트 완충재의 팽윤압이 처분용기나 주위 암반에 과도한 응력을 줄 가능성이 있기 때문에, 처분안전성 관점에서는 실증실험을 통해 공학적방벽의 성능을 확인하는 것

<sup>1)</sup> 한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구센터 책임연구원

<sup>2)</sup> 한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구센터, 실장, 책임연구원

\* 교신저자 : jolee@kaeri.re.kr

접수일 : 2007년 10월 12일

심사 완료일 : 2007년 12월 17일

이 매우 중요하다.

공학적방벽에 대한 열-수리-역학적 거동 실증실험은 대부분 처분장 건설을 추진하고 있는 원자력선진국을 중심으로 2단계 접근방법으로 수행되어 왔다. 엔지니어링규모의 실험을 통해 시스템의 장치특성과 동적특성을 파악하고, 그 결과를 현장시험(in-situ test)에 적용하여 실험상의 시행착오를 최소화하는 방법으로 수행되었다. 주요 엔지니어링규모의 실증실험으로는 캐나다의 Thermal Performance Test, 일본의 BIG-BEN과 COUPLE, 스페인의 Mock-up Test, 스웨덴의 Buffer Mass Test, 벨기에의 Bacchus Backfill Test, 그리고 현장시험으로는 캐나다의 Whiteshell Buffer/Container Experiment, 일본의 Kamaishi Mine THM Experiment, 스페인의 GTS FEBEX, 스웨덴의 Long-term Buffer Test, 미국의 YMP Tuff Water Migration/Heater Experiment 등이 있다(NEA, 1983, Pusch & Borgesson, 1985, Neerda et al., 1992, AECL, 1994, NAGRA, 1996, Chijimatsu, 1999).

지금까지 수행된 실증실험 결과에 의하면, 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동은 고온·고압의 불포화 매질에서 복잡하게 연동(coupling) 되어 일어나기 때문에 현상 규명, 결과 해석 및 수학적 모델링에서 아직 해결되지 않은 문제들이 있다. 또 그 결과를 토대로 공학적방벽의 성능을 정확히 예측하고 평가하는 데에 한계가 있으며, 이와 같이 대규모로 수행되는 실증실험은 많은 시간과 예산이 소요되기 때문에 실험데이터가 제한되어 있을 뿐만 아니라 그 결과를 처분개념이 서로 다른 나라의 처분시스템 해석에 적용하는 데도 한계가 있다.

이와 관련하여, 한국원자력연구원은 우리나라 고준위 폐기물 기준처분시스템의 공학적방벽에 대한 열-수리-역학적 거동 실증을 위해서 2단계 실증실험계획을 수립한 바 있다. 본 논문에서는 이 실증실험계획의 1단계로 2003년부터 수행되어 온 엔지니어링규모의 실증실험 "KENTEX"를 소개하고, 이 실험을 통해 얻은 운전경험과 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동에 대한 실험결과를 고찰하였다.

## 2. 고준위폐기물 처분개념

고준위폐기물은 수 십 만년이라는 장기간 동안 생태계로부터 안전하게 격리되어야 하며, 이를 위해 고준위 폐기물처분장은 지하 수 백 미터 깊이의 안정한 암반 내에 건설하는 개념이 가장 유력하게 고려되고 있다.

심부지층의 결정질암(crystalline rock)에 건설되는 고준위폐기물처분장은 진입 및 환기 수직갱, 연결터널, 처

분터널 등으로 이루어진다. 처분터널 바닥에 수직 처분공(borehole)을 파고, 처분용기에 넣은 폐기물을 정치시키며, 처분용기와 수직 처분공의 암반 벽 사이에는 벤토나이트와 같은 완충재(buffer material)를 충전시킨다. 처분터널과 연결터널은 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면 뒷채움재(backfill material)로 채운 후 입구를 플러깅재(plugging material)로 막아 폐쇄시킨다. 그리고 진입 및 환기 수직갱은 콘크리트 그라우트 등으로 밀봉시킨다.

처분터널의 경우, 폐쇄 후 시간이 경과되면 수두(hydraulic head) 차이에 의해 주위암반으로부터 지하수가 침투하여 처분터널이 지하수로 포화된다. 시간이 경과됨에 따라 처분용기가 지하수에 의해 부식되어 방벽으로서의 기능을 상실하면, 용기 내에 들어있던 폐기물이 지하수와 직접 접촉하게 되어 폐기물에 함유되어 있던 방사성핵종이 지하수로 침출되어 나온다. 이 때 방사성핵종은 완충재와 뒷채움재를 통과한 후 처분장 주위암반으로 유출된다. 공학적 방벽은 이러한 일련의 과정에서 처분장으로부터 방사성핵종의 유출을 막아주거나 최소화시켜주는 역할을 하는 처분용기, 완충재 및 뒷채움재를 통칭한 방벽을 말한다.

우리나라는 2002년도에 고준위폐기물 기준처분시스템이 제안된 바가 있다(강철형 외, 2002). 이 기준처분시스템(그림 1(a) 참조)은 지하 수 백 미터의 결정질암반에 위치하며, CANDU형 사용후핵연료 처분구역과 PWR형 사용후핵연료 처분구역 구분된다. 1개의 패널(panel)로 된 CANDU 처분구역에는 40 m 간격으로 54 개의 처분터널이, 7개 패널의 PWR 처분구역에는 378 개의 처분터널이 만들어진다. 각 처분터널의 길이는 250 m이다. 그리고 처분용기와 벤토나이트 완충재의 방벽기능이 상실되지 않도록 하기 위해서, CANDU 및 PWR 처분터널 내 처분공 간의 거리는 각각 3 m, 6 m로 하였다. 그림 1(b)는 처분터널의 단면도이다. 기준처분시스템의 공학적방벽은 처분폐기물 중의 방사성핵종이 지하수에 의해 주위암반으로 유출되는 것을 최소화시킬 수 있도록 처분용기, 완충재, 뒷채움재, 콘크리트 플러그 등의 다중방벽으로 구성되며, 이 구성요소들의 배치와 크기는 그림 1(c)와 같다. 그리고 대상폐기물의 처분은 폐기물을 처분용기에 넣은 후 처분터널 바닥의 처분공에 정치시키고, 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이는 국산벤토나이트 완충재로 충전하며, 그 상부는 콘크리트 플러그로 막는다. 이렇게 해서 처분공들이 모두 처분폐기물로 채워지면 처분터널과 시설 내 연결터널들은 뒷채움재로 채운 뒤 그 입구를 콘크리트 플러그로 막아 폐쇄시킨다.

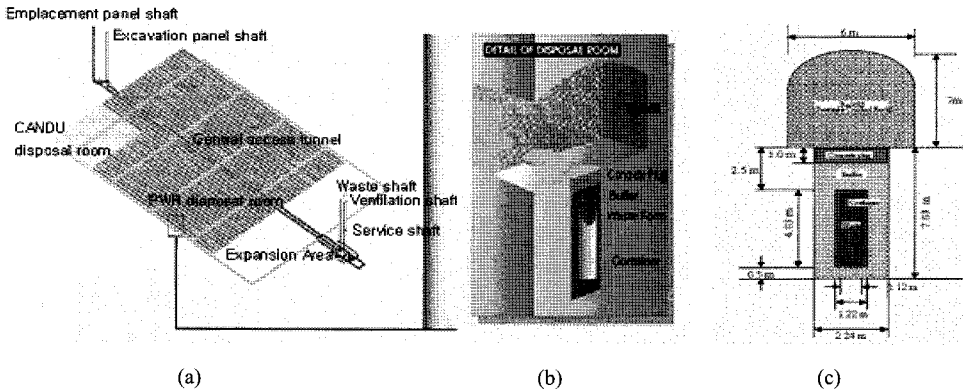
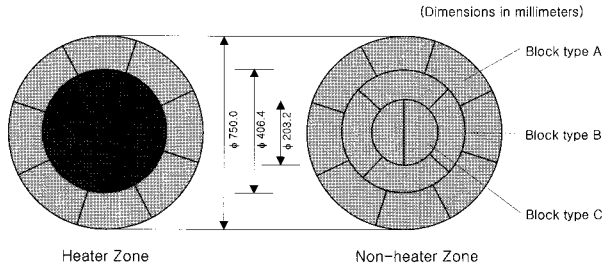


그림 1. 우리나라 고준위폐기물 기준처분시스템과 공학적방벽



Block type	Radius mm		Angle in degrees $\alpha$	Dimensions mm			Thickness mm	Number of blocks (*)
	R	r		a	b	c		
A	375.0	203.2	45	287.4	155.5	172.3	85	128
B	203.2	101.6	90	287.4	143.7	101.6	85	32
C	101.6		180	203.2	203.2	0	85	16

그림 2. KENTEX 장치에 사용된 벤토나이트 블록의 사양

### 3. 엔지니어링 규모 실증실험

#### 3.1 KENTEX 장치

KENTEX(KAERI Engineering-scale T-H-M Experiment for Engineered Barrier System) 장치는 우리나라 고준위폐기물 기준처분시스템의 공학적방벽의 1/3 크기로 설계·제작된 엔지니어링 규모의 실증실험장치이다. 압력실린더(confining cylinder), 가열시스템(heating system), 벤토나이트블록(bentonite blocks), 수화시스템(hydration system), 센서/기기(sensors & instruments), 히터제어시스템(heat-controlling system)/데이터수집

시스템(data acquisition system), 프레임구조물(overall frame-structure) 등의 하드웨어와 실험장치를 모니터링 및 제어하고 또한 센서로부터 나오는 신호를 계측하며 수집·분석하는 운영프로그램 “PRODASH-EN”으로 구성된다.

처분터널 내 처분공을 모사한 압력용기는 내경 0.75 m, 길이 1.36 m인 스테인레스강 실린더, 상·하부 뚜껑, 지하수 주입부, 센서 관통부 등으로 구성되며, 히터 주위에 벤토나이트블록을 설치하고 외부로부터는 지하수의 유동을 모사할 수 있도록 하였다. 가열시스템은 폐기물로부터 발생하는 붕괴열과 처분용기를 모사한 것으로,

표 1. KENTEX 장치에 사용된 센서

Parameter	Sensor type	Model	Quantity
Temperature	Thermocouple	Watlow-Gordon T-type	42(10*)
Water content	RH & temp. transmitter	Vaisala HMP 234 (for<15%)	5
	Psychrometer	WescorPCT 55 (for>15%)	5
Swelling pressure	Pressure cell	Kulite BG 0234	6

(\*) No. of thermocouples installed on the heater

열원요소(heating element), 산화마그네슘 충전재, 외경 0.406 m, 길이 0.68 m 인 카본재질의 히터용기(outer steel cylinder), 케이블용 파이프(cable-guiding pipe) 등으로 구성하였다. 벤토나이트블록(그림 2 참조)은 제작성, 기술성 및 경제성을 최적화 할 수 있도록 3가지 형태의 물터를 만들어 제작하였다. 수화시스템은 지하수저장/공급탱크, 압력게이지, 안전밸브, 파이프 등을 사용하여 압력실린더로 유입되는 지하수가 실제 처분장에서와 같이 일정한 수압을 유지하며 공급될 수 있도록 제작하였다. 온도, 습도(수분함량), 압력 측정용 센서/기기는 실험기간동안 정확성, 내구성, 편의성 및 안정성이 충분히 확보 될 수 있도록 선정기준을 설정하여 그 기준을 만족하는 것들(표 1 참조)을 사용하였다. 히터제어시스템/데이터수집시스템은 히터 제어를 통해 설정된 실험조건이 잘 유지될 수 있도록 하고, 센서로부터 보내지는 온도, 습도(수분함량), 압력 데이터를 수집하여 컴퓨터에 저장토록 하며, 사고발생 시 긴급연락 및 적절한 조치들을 취할 수 있도록 하였다. 프레임구조물은 위에서 언급한 주요 구성요소 뿐만 아니라 실험에 필요한 그 밖의 헬륨가스탱크, 제어기기, 전원설비, 항온항습기를 설치할 수 있는 충분한 공간을 갖도록 하였으며, 또한 실험장치의 전체 하중을 견딜 수 있는 철제바닥판, 체인블록, 철제 방어벽, 비닐차양 등을 구성요소로 하여 본 실증실험의 편의성과 안전성이 보장될 수 있도록 제작하였다.

### 3.2 설치 및 시운전

KENTEX 장치는 프레임구조물을 세운 뒤 설치의 편의성을 위해서 미리 가열시스템, 지하수 저장/공급탱크, 히터제어시스템/데이터수집시스템을 조립해 두고, 다음의 순서에 따라 설치하였다.

- (1) 압력용기 실린더 내부세척 : 세제와 고압수를 사용해서 실린더 내 잔류물을 제거하였다. 세척 후에는 비닐시트를 덮어 먼지와 같은 이물질이 들어가지 않도록 했다.
- (2) 수화시스템 배관 연결 : 가압 지하수 공급을 위해서 압력용기 실린더와 수화탱크 사이를 1/4" SUS 튜브로 연결하고, 끝부분에는 배수와 공기 배출을 위한 밸브를 설치하였다.
- (3) 노즐청소 및 필터 설치 : 지하수 공급을 위해 설치된 24개의 주입노즐 (injection nozzle)은 고압 질소가스로 청소 하였다. 각 노즐에는 벤토나이트가 팽윤에 의해 밖으로 유실되는 것을 방지하기 위해서 2 종류 (직경 0.95 mm x 두께 0.32 mm x 공극크기 40  $\mu$ m와 직경 0.95 mm x 두께 0.32 mm x 공극크기 100  $\mu$ m)의 다공성 SUS 메탈필터를 설치하고, 나머지 빈공간은 압력실린더 내부의 라이너 (liner)로 사용하는 것과 동일한 부직포 (geotextile)로 마감했다.
- (4) 부직포 라이닝 설치 : 압력용기 실린더 안쪽 면에는 2 겹의 두께 1.8 mm 인 부직포 (200 g/m<sup>2</sup>)를 라이닝으로 설치하여, 지하수 공급을 위한 분배기 역할과 벤토나이트의 유출을 방지할 수 있도록 했다. 라이닝된 부직포는 오염을 최소화 하기 위해 비닐커버를 씌워 벤토나이트 블록을 설치하고 작업이 끝난 후에는 비닐커버를 제거하였다.
- (5) 벤토나이트블록 설치 : 먼저 블록의 위치, 취급 및 설치방법 등을 점검하기 위해서 모형을 이용해 예비 설치 테스트를 하였다. 테스트 결과, 블록은 설계대로 잘 제작되었음을 확인할 수 있었다. 압력용기 실린더에 설치된 벤토나이트 블록은 총 176 개가 사용되었으며, 설치 시 블록과 블록 사이의 틈새는 블록 제작에 사용된 벤토나이트 분말을 채워 넣고 나무 봉으로 다져서 가능한 한 공극을 최소화 할 수 있도록 했다.
- (6) 가열시스템 설치 : 미리 조립 해 둔 히터는 벤토나이트 블록을 그림 4의 섹션 C까지 채운 뒤 정지 (emplacement)를 시켰다. 이 때 히터 주변의 섹션 C~G사이의 블록 설치는 히터와 크기가 동일한 철제 가이드 (steel guide)를 넣어 두고 그 주위에 다 블록을 쌓는 방식으로 하였다. 그리고 준비된

히터는 섹션 G까지의 블록 설치가 끝 난 뒤 가이 드를 빼 내고 그 자리에 정치하였다. 정치된 히터 에는 전원케이블용 파이프를 설치하고 케이블을 연결하였다.

(7) 센서 설치 : 온도, 압력, 습도 센서는 예비 열-수리-역학적 모델을 사용해서 계산한 결과(그림 3 참조)를 바탕으로, 해당 인자의 변화가 민감하게 나타나는 부분과 관련현상 규명을 위한 실험데이터의 확보가 필요한 부분에 상대적으로 많이 설치했다. 설치 센서에는 센서의 위치 및 수집 데이터의 확인을 위해 AA-BB-CC-DD 형태로 인식코드를 부여하였다. AA는 센서의 종류로서 온도센서는 T, 습도센서는 H, 압력센서는 M으로 분류하였다. BB는 압력용기 실린더의 높이에 따른 섹션을 나타내며 위치에 따라 A~I까지 분류하였다. CC는 각 높이의 단면에서 반경방향의 거리를 나타내며 R1, R2, R3, R4, R5 등 5단계로 분류하였다. 그리고 DD는 각 단면에서 기준위치로부터 90도 (degree)의 간격으로 4등분을 하고 T1, T2, T3, T4 등으로 나누었다. 압축 벤토나이트 블록 내에 설치된 모든 온도, 습도, 압력 센서의 위치는 그림 4에 표시하였다.

(8) 마무리 및 설치 완료 : 벤토나이트블록과 센서 설치를 모두 마친 뒤에는 각종 케이블들을 정리하고, 또 블록과 블록, 블록과 실린더, 센서와 블록 사이에 생긴 틈새에는 벤토나이트 분말을 넣고 다져서 공극률을 최소화 하였다. 그리고 마지막으로 실린더 뚜껑을 덮고 나사를 단단히 조여 실험 도중에 지하수나 수화된 벤토나이트가 밖으로 새어 나오지 않도록 밀봉하였다. 설치가 완료된 KENTEX 장치는 그림 5의 사진과 같다.

KENTEX 장치의 시운전에서는 히터가 정상적으로 작동되는지, 수화시스템에서 지하수의 누출이 없는지, 설치된 센서의 작동이 정상적인지, 그리고 PRODASH-EN 운전 프로그램을 통해 히터 제어와 센서로부터 데이터의 수집 및 저장이 정상적으로 이루어지고 있는지를 점검하였다. 그 밖에 센서 출력신호에 대한 전기적 노이즈 문제 및 작업자의 안전과 관련된 접지 문제 등도 점검하였다. 약 1개월간의 시운전을 통해 KENTEX 실증실험에 필요한 최적 실험조건을 도출하고 운전매뉴얼을 작성하였다.

3.3 실험 조건 및 방법

총 176개의 블록이 채워진 압력용기 실린더 내 벤토

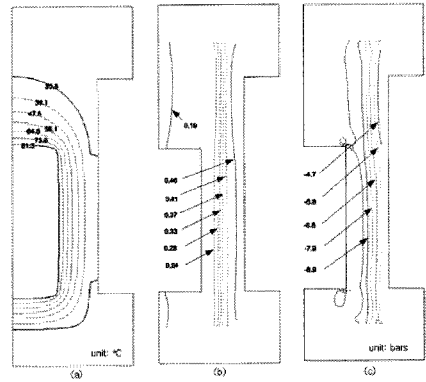


그림 3. ABAQUS코드를 이용한 예비 열-수리-역학적 모델의 계산결과

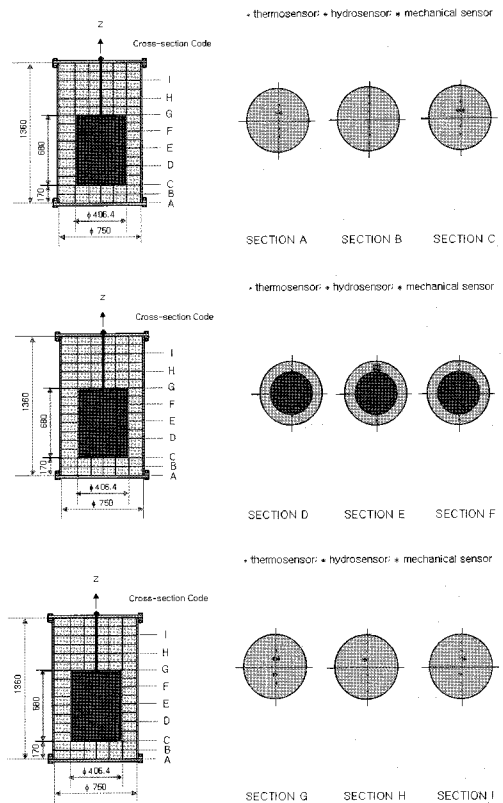


그림 4. 벤토나이트 블록 내에 설치된 센서 및 위치

나이트의 충전 건조밀도는 1.5 Mg/m<sup>3</sup>, 초기 수분함량은 13%였다. 제작된 벤토나이트 블록 각각의 건조밀도는 1.6 Mg/m<sup>3</sup>이었으나, 실린더에 설치 후 충전 건조밀도는 1.5 Mg/m<sup>3</sup>로 감소하였다. 이것은 설치 작업에서 생긴 블록과 센서, 블록과 히터 또는 실린더, 블록과 전

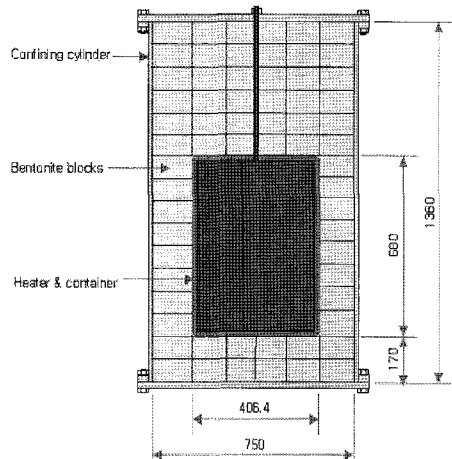
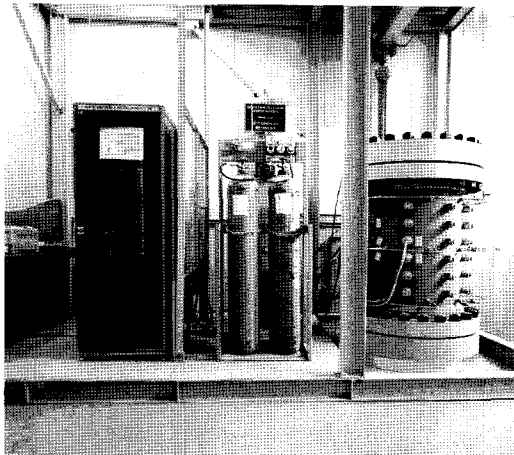


그림 5. KENTEX 장치의 사진과 개략도

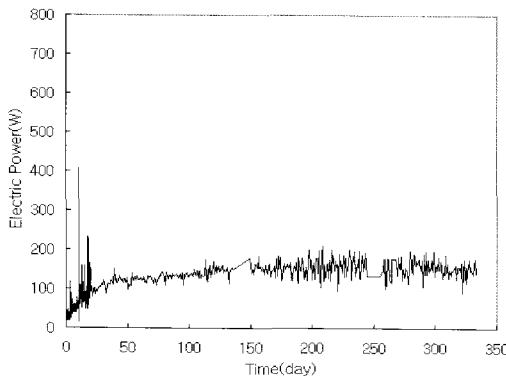


그림 6. 히터에 공급된 전력의 변이

원케이블용 파이프 사이의 생긴 틈새 및 설치작업의 편리성을 위해 만든 빈 공간에 벤토나이트 분말을 채워 넣었기 때문에 그만큼 충전 건조밀도가 감소한 것이다.

KENTEX 실험에서 지하수는 유성지역 심부지하수를 사용하였다. 이 지하수는 알칼리성으로 pH는 약 10을 나타내었으며, 전형적인  $\text{Na-HCO}_3$  형을 보였다(배대석 외, 2007). 수화시스템의 지하수저장/공급탱크에 채워진 지하수는 5기압으로 가압하여 압력용기 실린더로 공급하였다. 이 때 가압을 위해 헬륨기체가 든 봄베를 사용하였으며, 위에서 아래 방향으로 공급하여 지하수 중에 공기가 유입되는 것을 차단하였다. 압력용기 실린더의 외부 벽으로부터 벤토나이트 블록으로의 공급되는 지하수는 수화시스템에 달린 밸브를 이용하여 수화과정의 시작과 동시에 한꺼번에 이루어지도록 하였다. 그러나 압력용기 실린더의 위와 아래 방향으로부터의 지하수 공급은 없었다.

KENTEX 실험은 초기조건 및 경계조건과 장치 내 불균일성(heterogeneity)을 최소화하기 위해 초기가열(initial heating), 초기수화(initial hydration) 및 정온가열-정압수화(constant temperature -constant pressure hydration)의 3단계과정으로 진행 되었다.

초기가열단계는 물의 공급 없이 히터만으로 Programmable logic circuit를 채택하여 열을 점진적으로 공급하면서 히터와 벤토나이트 블록 경계면에서의 온도가 90°C에 도달하도록 하였다. 이것은 과부하로 인한 히터 열원 요소의 파손을 방지하기 위함이다.

초기수화단계는 블록과 블록 사이 또는 블록과 실린더 사이에 들어 있는 공기 제거, 블록 설치 후 생기는 불연속면의 최소화, 수화 시 물이 실린더 벽에서 히터 쪽으로 서서히 이동하게 하기 위해 다음과 같은 방법으로 하였다.

- 수두(water head)를 이용해서 탱크에 있는 물을 실린더(confining cylinder)에 연결된 원형의 파이프 라인까지 채운다.
- 실린더 상부와 하부에 있는 밸브를 열어 물이 실린더 내부로 들어가게 하고, 물이 상부 밸브에 도달하면 하부 밸브를 잠근다.
- 벤토나이트 블록이 물과 반응하고 그 결과 벤토나이트의 팽윤현상에 의해 실린더 내 빈 공간이 매워질 수 있도록 이 상태에서 약 2일 정도 기다린다.

2일 간의 초기수화과정을 거친 후 KENTEX 장치는 정온가열-정압수화 단계에서의 운전을 시작하였다. 이 과정에서는 히터와 벤토나이트 블록 사이의 온도가 90°C로

일정하게 유지되고, 실린더에 유입되는 지하수는 5 기압의 압력으로 공급되었다. 실린더 주변의 공기온도는 2대의 항온항습기를 가동하여 25 °C를 유지하도록 하였다.

KENTEX 장치에서 얻어지는 실험데이터는 각종 센서로부터 수집된 온도, 습도, 압력 및 히터에 공급된 전력(electric power) 등이다. 이 데이터는 PRODASH-EN 프로그램을 통해 해당 센서로부터 수집되어 컴퓨터에 저장되며, 벤토나이트 블록에서의 열-수리-역학적 거동 특성을 분석 하는데 사용된다. 이 밖에 장치의 유지관리 및 비상조치 관련사항도 모두 수집되어 실험 장치를 최적 실험조건으로 가동하는데 활용하였다.

KENTEX 실험은 2003년 초에 계획되었으며, 장치의 설계, 제작, 설치 및 시운전 단계를 거쳐 2005년 5월 31일에 본격적인 실험이 시작 되었다. 이 실험은 현재도 진행 중에 있으며 2008도에 종료할 예정이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 운전결과 및 센서성능

2005년 5월 31일부터 시작된 KENTEX 실험은 현재 까지 3차례의 보수 및 정전을 제외하고는 정상으로 가동되었다. 2005년 6월 12일 9시간의 정전(UPS 용량=30분)으로 시스템이 정지되었고, 2005년 9월 22일과 2006년 4월 15일에 히터제어시스템/데이터수집시스템의 고장 및 수리 때문에 6시간 동안 시스템이 정지되었다. 프로그램에 의해 히터에 공급된 그 동안의 전력 변이 (electric power evolution)는 그림 6과 같다. 히터 표면의 온도가 90°C에 도달할 때까지는 전력 공급이 빠르게 이루어지고, 도달 후에는 약 160±10 W의 값으로 공급됨을 알 수 있었다. 히터표면에서의 온도는 약 1년 동안 90°C로 잘 조절되었으며, 벤토나이트 블록이 재포화되면서부터는 히터 내부온도에도 민감하게 반응하였다. 또한 2대의 항온항습기로 조절되는 실내온도는 25°C로 비교적 잘 조절되었으나 일교차가 심한 여름과 겨울에 약간 기록을 보였다. 지하수는 저장조로부터 수화시스템을 통해 5기압의 압력으로 일정하게 공급되었다. 총 166개가 사용된 측정센서는 기계적으로 고장이 난 1개의 온도센서와 6개의 습도센서를 제외하고서는 정상적으로 작동되었다. 고장 난 온도센서 T-G-R4-T1은 2005년 7월 8일부터 오르내림(fluctuation)이 심하게 나타났는데, 점검 결과 센서 고장으로 추정되었다. 고장 난 습도센서(H-A-R2-T1, H-C-R2-T1, H-D-R5-T3, H-F-R4-T1, H-F-R5-T3, H-I-R2-T1)는 수화과정 초기부터 그 값이 심하게 오르내리는 현상을 보였는데, 이것은

초기수화단계에서 벤토나이트 블록과 블록 사이의 틈새를 통해 지하수가 갑자기 유입되면서 센서 내부에 물이 들어가 고장 또는 파손이 된 것으로 보인다. 이러한 문제는 외국의 실증실험에서도 나타났는데, 이것은 습도센서 측정기술 상의 한계로 보여진다. 그리고 히터의 온도조절과 측정센서로부터의 데이터 수집, 저장은 자체 개발된 PRODASH-EN 프로그램에 의해 자동으로 이루어졌으며, 현재까지 아무런 문제없이 정상적으로 작동되었다.

## 4.2 공학적방벽의 열-수리-역학적 거동

### 4.2.1 열적 거동 (thermal behavior)

그림 7-10은 열전대(thermocouple)로부터 측정된 온도 데이터를 나타낸 것이다. 그림 7, 8은 여러 지점에서의 온도변이를 도시한 것이며, 각 그림의 맨 위쪽과 아

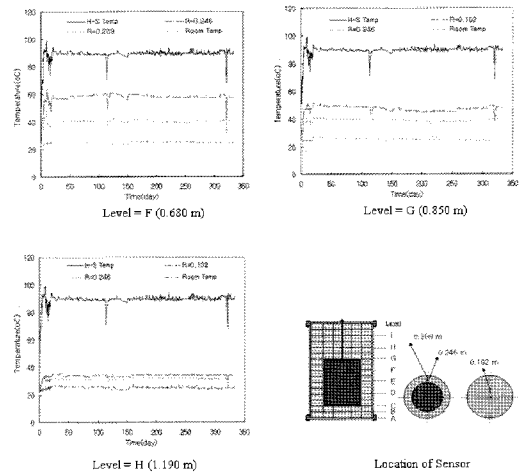


그림 7. 실린더 축방향의 높이에 따른 벤토나이트 블록 내 온도분포

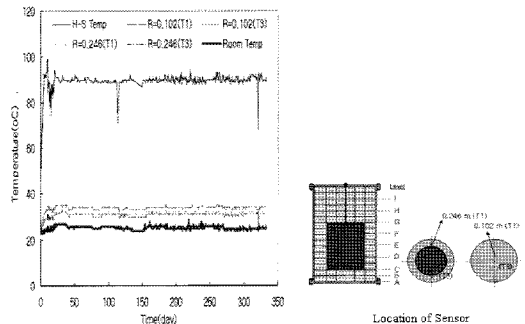


그림 8. Level = I (1.19 m)에서의 벤토나이트 블록 내 온도분포

래쪽 변이 선은 각각 히터-벤토나이트블록 경계면과 실험실의 온도이다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 측정 온도는 히터로부터 공급된 전력에 민감하였지만, 비교적 안정적(stable)이고 균일성(uniformity)을 보였다. 그리고 시간에 따른 온도변이 패턴은 측정 위치에 상관없이 비슷한 경향을 보였다. 처음 약 2주 동안은 빠르게 증가하였고, 그 이후로는 거의 정상상태 (steady state)에 도달하여 일정한 값을 유지하였다. 압축 벤토나이트 블록 내 온도가 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 압력용기 실린더 벽면에 가까울수록 빨랐는데, 이것은 유입되는 지하수와 먼저 접촉을 한 벽면 쪽의 벤토나이트 블록이 서서히 포화되기 시작하면서 열전도도가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 그림 8은 압력용기 실린더 축과 수직인 벤토나이트블록의 한 단면에서 동일한 반경에 위치한 센서에서의 온도 값은 거의 차이가 없고 대칭성(axis-symmetry)을 가짐을 보여 주었다.

그림 9는 실험 시작 후 333일 경과 했을 때 반경 0.246 m 지점에서 축방향의 높이에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 최고온도가 65℃, 최저온도가 33℃로서, 압력용기 실린더의 축을 따라 히터 높이의 가운데 영역이 가장 높고, 그 다음 아래쪽, 위쪽 순의 온도분포를 보였다. 이 온도분포는 실험초기에 정상상태에 도달하기 때문에 반응시간에는 무관하였다. 반경방향의 거리에 따른 온도분포는 대체로 히터에 가까울수록 높고, 대신에 멀어질수록 낮은 값을 보였다. 그림 10은 축 방향의 높이가 1.02 m인 위치에서 반경방향의 거리에 따른 온도분포에 대한 일례를 보여주고 있다. 실린더 벽 가까이에서 지하수와 접촉하는 부분은 안쪽보다 포화도(degree of saturation)가 높고 그 결과 열전도도가 크기 때문에 이웃하는 두 지점 사이의 온도차가 거의 없었다.

4.2.2 수리적 거동 (hydro behavior)

앞에서도 언급했듯이, 설치된 습도센서는 총 7개 중 6개가 고장 또는 파손이 되었고, 현재 1개(H-D-R4-T1)가 정상적으로 작동되고 있다. 정상 작동 중인 이 센서는 히터에 비교적 가까운 곳(높이 0.34 m, 반경방향의 길이 0.246 m)에 위치하며, 그림 11과 같은 습도분포를 보였다. 그림에서 보는 것처럼, 이 지점에서의 습도는 지하수를 공급하는 순간 갑자기 증가하다가, 그 뒤로는 서서히 감소하고, 약 80일이 지난 뒤부터는 다시 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 이것은 다음과 같은 과정으로 인해 나타난 현상으로 보인다. 먼저 실험 시작과 동시에 지하수를 공급할 때 블록과 블록 사이 및 센서와 센서케이블 설치를 위해 만든 틈새로 공급지하수가 빠른 속도로 유입되면서 습도가 갑자기 증가하였기 때문이

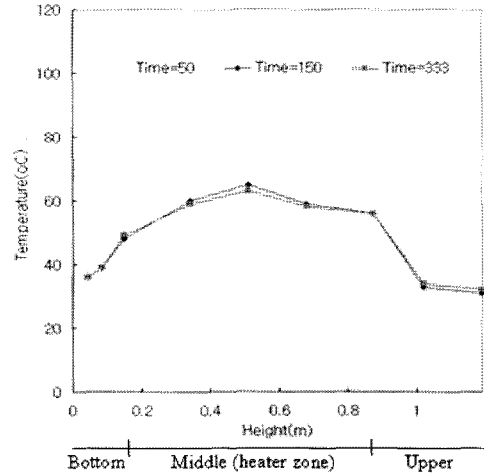


그림 9. 반경방향의 길이 R=0.246 m 인 지점에서 높이에 따른 벤토나이트 블록 내 온도분포

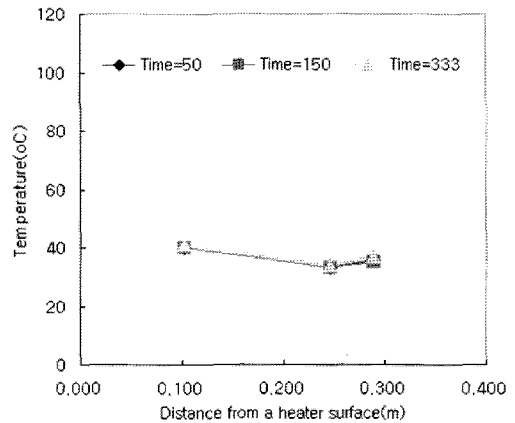


그림 10. Level = H (1.09 m)에서 히터로부터 떨어진 반경 방향의 거리에 대한 벤토나이트 블록 내 온도분포

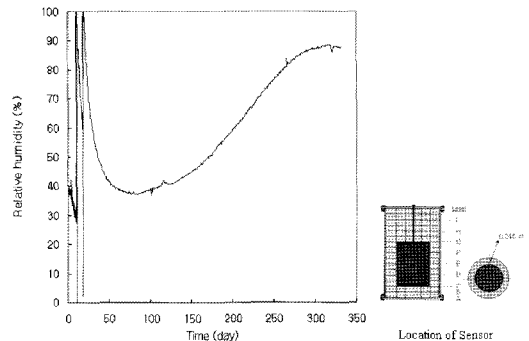


그림 11. Level = D (0.34 m), R=0.246 m인 지점에서 벤토나이트 블록 내 상대습도의 변화



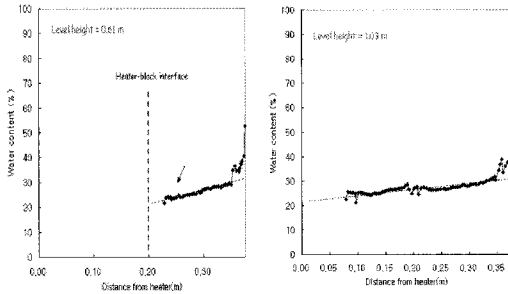


그림 12. 코어-드릴링 방법으로 결정한 반경방향의 수분함량 분포 (반응시간=350일)

고, 둘째는 유입된 지하수가 온도 구배(thermal gradient)에 의해 차가운 곳으로 빠져나가 건조되면서 습도가 감소하기 때문이며, 셋째는 실린더 외부로부터 지하수가 계속 유입되고 그 결과 벤토나이트블록이 포화되면서 습도가 증가하기 때문으로 생각된다.

벤토나이트블록 내 포화특성을 파악하기 위해서는 더 많은 데이터가 필요하다. 그러나 고장 난 습도센서의 수리나 교체가 불가능하기 때문에, 부족한 데이터는 코어-드릴링 장치(core-drilling device)를 제작하여 직접 수분함량을 측정하는 방법으로 확보하였다. 그림 12는 높이 0.61 m의 히터 영역에서 샘플링 한 시료와 높이 1.03 m의 히터가 없는 영역에서 샘플링 한 시료의 수분함량 분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 실험이 약 350일 경과 했을 때 벤토나이트블록 내 수분함량은 지하수가 공급되는 실린더와 가까운 곳(반경방향 길이  $R > 0.32 \text{ m}$ )에서는 축 방향으로의 높이에 상관없이 거의 포화상태 ( $\omega_s=0.31$ )에 도달하였고, 대신에 실린더 벽에서 떨어진 곳, 즉 히터에 가까운 곳에서는 건조과정이 일어나기 때문에 여전히 불포화상태로 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 실린더 벽 근처의 벤토나이트블록의 수분함량이 포화 수분함량보다 훨씬 높은 값을 나타내는데, 이것은 코어 드릴링을 위해 볼트형 플러그(bolt-type plug)를 압력용기 실린더에서 뺄 때와 드릴링 시 주위의 부직포에 있는 지하수가 유입되어 생기는 것으로, 코어-드릴링 시 발생된 실험오차로 생각된다.

4.2.3 역학적 거동 (mechanical behavior)

벤토나이트블록 내 압력센서로부터 측정된 전체압력(total pressure)은 열전대 온도센서처럼 비교적 안정적(stable)이고 균일성(uniformity)을 보였다. 그림 13, 14에서 보는 바와 같이, 측정된 압력분포는 벤토나이트블록 내 측정 위치에 따라 그 형태가 달랐다. 지하수가 유입되는 바깥부분에서는 실험 시작 후 얼마 지나지 않아

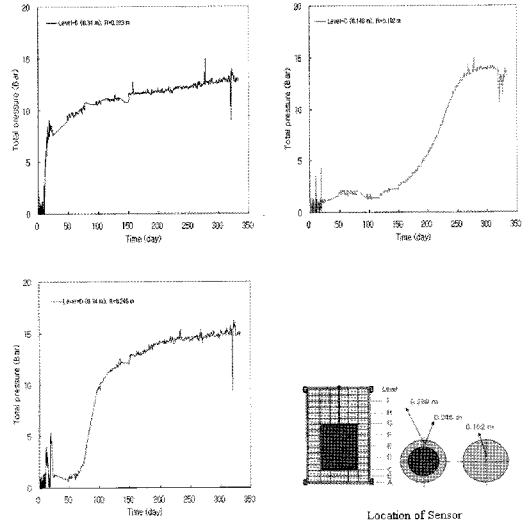


그림 13. 여러 측정지점에서 벤토나이트 블록 내 압력 변화

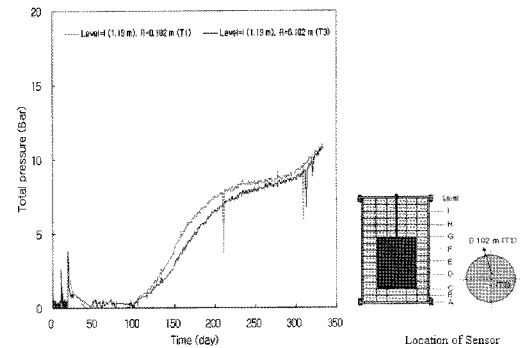


그림 14. Level = I (1.19 m) 섹션에서 위치에 따른 벤토나이트 블록 내 압력 변화

압력이 증가하였고, 반면에 실린더 벽면과 멀리 떨어져 있는 부분에서는 어느 정도 시간이 경과한 후로부터 압력이 증가하기 시작하였다.

그림 13에서 높이 0.34 m, 반경방향 길이  $R=0.289 \text{ m}$ 인 히터영역 지점에서의 전체압력은 실험 시작 후 얼마 되지 않아 가파르게 증가하다가 약 2주 후부터는 느리게 증가하는 경향을 보였다. 실린더 벽에서 약간 더 안쪽에 위치하는 지점  $R = 0.246 \text{ m}$ 에서의 압력분포는  $R=0.289 \text{ m}$ 의 경우보다 초기압력이 증가하는 시점은 더 느리나 압력 분포곡선의 패턴은 비슷하였다. 초기에 나타난 2차례의 갑작스런 압력증가는 지하수 가압 시 벤토나이트 블록 사이 또는 압력센서와 센서 설치를 위해 만든 틈새로 먼저 들어온 지하수의 수압에 의해 나타나는 일시적인 현상으로 생각된다. 높이 0.148 m, 반

경방향 길이  $R=0.102$  m에 대한 압력분포도 초기 압력이 증가하는 시점이 더 늦게 나타날 뿐 압력분포는 비슷한 형태를 보였다. 그림 14는 높이 1.190 m, 반경방향 길이  $R=0.102$  m인 섹션 내 서로 다른 두 지점에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 두 압력분포는 거의 일치하고 있는데, 이것은 벤토나이트블록 내 압력이 축을 중심으로 반경방향에 대해 대칭성을 가짐을 말해주고 있다.

일반적으로 벤토나이트블록 내 압력분포는 벤토나이트 수화에 의한 팽윤압, 모세관현상에 의한 부압(negative pressure), 외부로부터 공극을 통해 작용하는 압력, 온도구배에 따른 열응력 및 증기압 등이 상호작용하여 결정된다. 그림 13, 14의 압력분포를 보면, 벤토나이트블록 내 전체압력은 주로 지하수에 의한 벤토나이트의 포화도(그 결과, 팽윤압)에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 즉, 바깥부분에 있는 벤토나이트블록은 실험 시작부터 지하수와 접촉하면서 생긴 팽윤압에 의해 빠른 압력 증가를 보이고, 반면에 안쪽부분은 어느 정도 시간이 경과한 후 블록이 포화되면서부터 팽윤압에 의해 압력이 증가되었다. 그러나 그림 13, 14의 초기단계 압력을 비교해 보면, 히터에 가까운 영역에 위치한 지점에서의 압력(그림 13의  $R=0.148$  m)은 멀리 있는 쪽의 것(그림 14)보다 큰 값을 보이는데, 이것은 실험초기에 지하수와 접촉하지 않은 벤토나이트 블록의 전체압력이 팽윤압보다 열응력 및 증기압에 의해 더 많은 영향을 받기 때문으로 생각된다.

## 5. 결론 및 향후계획

우리나라 고준위폐기물 기준처분시스템의 공학적방벽에 대한 열-수리-역학적 거동 실증연구를 위해서, 엔지니어링 규모의 실험장치(KENTEX)를 설치하고, 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동 규명을 위한 실증 실험을 수행하였다. KENTEX 실험은 2005년 5월 31일에 시작되어 현재 성공적으로 진행 중에 있으며, 지금까지 얻어진 실험결과로부터 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동에 대한 중간결론을 얻을 수 있었다. 벤토나이트 블록 내 온도는 실험 시작 후 수 주 만에 정상상태에 도달하였고, 온도분포는 히터에 가까울수록 높고

멀어질수록 낮은 값을 보였다. 수분함량은 히터 쪽보다는 지하수가 유입되는 실린더 벽면 부근에서 높은 값을 가졌고, 건조-습윤 과정에 의한 벤토나이트 블록의 수화메카니즘은 측정위치에 따라 달랐다. 실험기간 동안 벤토나이트 블록에 작용하는 압력은 블록의 포화도(그 결과, 팽윤압)이 증가할수록 증가하였다. 그러나 실험 초기단계에 지하수와 접촉하지 않은 히터 부근에서의 압력은 팽윤압보다 열응력이나 증기압에 의해 좌우되었다. 현재 진행 중인 KENTEX 실험은 2008년에 종료할 예정이며, 공학적방벽에서의 열-수리-역학적 거동에 대한 최종적인 결론은 이 결과를 바탕으로 한 수학적 모델링과 정확한 해석을 수행함으로써 얻어질 것이다. 본 연구결과는 한국형 고준위처분시스템의 신뢰도 향상과 공학적방벽의 성능 및 안전성 평가를 위한 기초자료로 활용될 것이다.

## 참고문헌

1. AECL, 1994, Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, AECL-10711, Atomic Energy of Canada Limited Report.
2. Pusch, R. and Borgesson, L., 1985, Final Report of the Buffer Mass Test, SKB Technical Report 85-12 Vol. II.
3. Neerda, B., Meynendonckx, P., and Voet, M., 1992, The Bacchus Backfill Experiment at the Hades Underground Research Facility at Mol, Belgium, Final Report, EUR 14155.
4. NAGRA, 1996, Grimsel Test Site (GTS), 1996, NAGRA Bulletin No. 27.
5. NEA, 1983, The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes, NEA/OECD.
6. Chijimatsu, M., Sugita, Y., Fujita, T., and Amemiya, K., 1999, Experimental Results of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Test in Kamaishi In-situ Experiment Site, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN8400 99-024.
7. 강철형, 김진용, 전판식, 박정화, 조원진, 최종원, 이재완, 이연명, 김승수, 황용수, 김성기, 권상기, 2002, 고준위폐기물처분기술개발/심지층처분시스템개발, KAERI/RR-2336/2002, 한국원자력연구소.
8. 배대석, 김천수, 김경수, 고용권, 김건영, 박경우, 지성훈, 한필수, 최종원, 김진용, 김성기, 박정균, 권상기, 2007, 고준위폐기물처분기술개발/심부지질환경특성연구, KAERI/RR-2783/2006, 한국원자력연구소.



### 이재완

1975년 영남대학교 공과대학 화학공학과  
학사

1983년 고려대학교 대학원 화학공학과  
공학석사

1998년 한국과학기술원 원자력공학과 공  
학박사

Tel: 042-868-2852

E-mail: jolee@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 고준위폐기물처  
분연구센터 책임연구원



### 조원진

1979년 고려대 화공과 학사

1984년 한국과학기술원 핵공학과 공학  
석사

1990년 한국과학기술원 원자력공학과  
공학박사

Tel: 042-868-2852

E-mail: wjcho@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 고준위폐기물처  
분연구센터, 실장, 책임연구원