

Overseas Review on the In-situ Demonstration of EBS for IN-DEBS Development

공학적방벽 현장실증 시스템 (IN-DEBS) 개발을 위한 해외 실증연구 현황 분석

Minsoo Lee*, Heui-Joo Choi, Jong-Youl Lee, Changsoo Lee, Jae-Owan Lee, and Inyoung Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeokdaero 989, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea

이민수*, 최희주, 이종열, 이창수, 이재완, 김인영
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received September 5, 2013 / Revised February 4, 2014 / Approved February 7, 2014)

The worldwide Status-of-Art survey for the in-situ experiments of the engineered barrier system for HLW underground disposal was performed as a preliminary action for the design of the in-situ demonstration at KURT. Some nations, which have executed or is ongoing the in-situ experiments at their underground research facilities, were summarized in this review. The demonstration projects reviewed were TBT/Sweden-France, LOT/Sweden, HE-E/Switzerland, PRACLAY/Belgium, FEBEX/Spain, HORONOBE/Japan, and BCE/Canada. The investigated items for the projects were mainly their purposes, constitutional structures, test conditions, monitoring parameters and the measuring tools, and test results. In this review, the hardware design and the assembling of the test system were more concentrated rather than their experimental results, because the purpose of this review is to achieve the necessary information for the practical design of the in-situ experiment to be installed at KURT. A mid scale in-situ demonstration of EBS at KURT, that is called IN-DBES, will be launched right after the completion the expanding project of KURT in 2015. It is hoped that the structural design, installing methods, hardware equipments required in the establishment of IN-DEBS will be referred on this review.

Keywords: Underground disposal, Engineered barrier system, In-situ demonstration, Bentonite buffer

본 연구에서는 한국원자력연구원 부지 내 KURT 연구시설에 심지층 처분실증시험을 수행할 목적으로 사전 해외현황조사를 실시하였다. 고준위폐기물 심지층 처분을 목적으로 지하연구시설을 구축한 나라들을 대상으로 현재 수행되었거나, 수행이 진행 중인 공학적방벽 성능평가 시험들을 조사하였다. 주요 실증시험으로는, 스웨덴/프랑스 TBT, 스웨덴 LOT, 스위스 HE-E, 벨기에 PRACLAY, 스페인 FEBEX, 일본 HORONOBE, 및 캐나다 BCE 등이었다. 각 실증시험에 대하여 시험의 목적, 시험체의 구성, 시험조건, 세부 구성도, 측정 항목, 측정기기, 및 도출된 결과 등을 구체적으로 조사하였으며, 시험결과보다는 시험목적 및 시험물의 구축방법 파악에 더 집중하였다. 왜냐하면, 각국의 공학적방벽 성능시험방법의 검토를 통해 향후 KURT에서 추진하게 될 공학적방벽 실증시설의 설계에 도움을 얻고, 다양한 성능시험을 동시에 수행할 수 있도록 하기 위해서였다. 향후 KURT 확장을 통해 공학적방벽 성능시험 터널을 확보하고, 중규모의 성능 시험시연을 추진하게 될 예정이다. 본 기술검토를 통해 이 때 추진할 시험내역과 시험체의 구성 및 크기 등의 상세 설계에 필요한 기초적인 지식을 얻고자 하였다.

중심단어: 심지층처분, 공학적방벽, 현장실증, 벤토나이트 완충재

*Corresponding Author.

Minsoo Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: minm@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2081

1. 서론

고준위폐기물(HLW, High Level Waste)을 영구적으로 격리하기 위한 방안으로 심지층에 처분하는 방안이 세계적으로 연구되어 왔으며, 이러한 연구들은 최근 몇몇 나라에서는 구체적으로 현실화되는 분위기이다. 고준위폐기물의 심지층 처분에 있어서 공학적 핵심 사항은 수천 년 이상의 오랜 기간 동안 고준위폐기물 내의 방사성 핵종의 유출을 방지할 수 있는 방법의 구축과 그 성능의 확인이다. 따라서 고준위폐기물을 심지층에 처분하고자 하는 다수의 국가에서는 고유의 공학적방벽(EBS, Engineered Barrier System) 설계와 더불어 그 신뢰성을 확인할 수 있는 장기실증시험을 지하시험시설에서 수행하였거나 수행 중에 있다. 이에 고준위폐기물의 심지층 처분기술을 개발하고 있는 한국원자력연구원에서도 고준위폐기물의 처분을 위해 설계된 공학적방벽의 성능 확인을 위한 실증시험을 KURT(Kaeri Underground Research Tunnel) 내에 설치할 것을 계획하고 있으며, 이를 위한 기초단계로서 해외 고준위폐기물 처분 실증시험에 대한 기술현황조사를 수행하게 되었다.

본문에서는 고준위폐기물 심지층 처분을 목적으로 지하연구시설을 구축한 스웨덴, 프랑스, 핀란드, 캐나다, 벨기에, 스위스, 영국 등의 주요 나라에서 이미 수행되었거나, 현재 수행하고 있는 공학적방벽 성능평가 시험을 조사·분석하였다. 본 논문에서는 각국의 시험결과보다는 시험목적과 이를 달성하기 위한 시험물의 구축방법에 더 주목하였다. 왜냐하면 각국의 공학적방벽 성능시험 분석을 통해, 현재 KURT 내에서 추진되는 IN-DEBS (In-situ Demonstration of Engineering Barrier System) 구축에 필요한 준비사항과 상세설계에 도움을 얻고자 했기 때문이다.

향후 KAERI에서는 KURT 확장을 통해 공학적방벽 성능 시험 터널을 확보하고, 성능시험 시연을 추진하게 될 예정이다. 본 논문에서는 각국의 공학적 방벽 성능시험 현황을 정리하고 KURT에서 추진할 IN-DEBS 시험내역과 시험체의 구성 및 크기 등의 상세 설계에 필요한 기초적인 사항을 점검해 보았다.

2. 해외 공학적방벽 실증시험

2.1 스웨덴 · 프랑스

2.1.1 LOT (Long Term Test of Buffer Material)

Äspö Hard Rock laboratory에서 수행된 소규모 실증시험으로서, 실제 KBS-3 (kärnbränslesäkerhet, nuclear fuel safety) 처분시스템의 1/3~1/4 규모이다[1]. 시험공 크기는 직경 300 mm, 깊이 4 m 수직공이며, 내부는 완충재 블록과 히터 및 측정기기로 된 집합체를 외부에서 제작하여 수직공에 삽입하는 방식으로 구축되었다(Fig. 1). 중앙 히터는 길이 4.65 m (가열부 2.0 m), 3개의 스테인리스 (직경 14 mm)관으로 되어 있으며, 상부 플랜지에 접합되어 중앙 구리관 안에서 아래로 달려 있다. 히터 최대 출력은 약 2 kW이다. 구리관은 직경 100 mm, 두께 4 mm, 길이 4.7 m로서 처분용기를 모방하고 있다. 용기 주변 완충재는 용기 내부 붕괴열로 인해 온도구배를 가지게 되며, 이로 인해 주변 암반의 지하수를 흡수한 벤토나이트도 용기 표면에 나란한 방향으로 물의 재배치가 발생된다고 보았다. 실험은 가급적 KBS-3 개념에

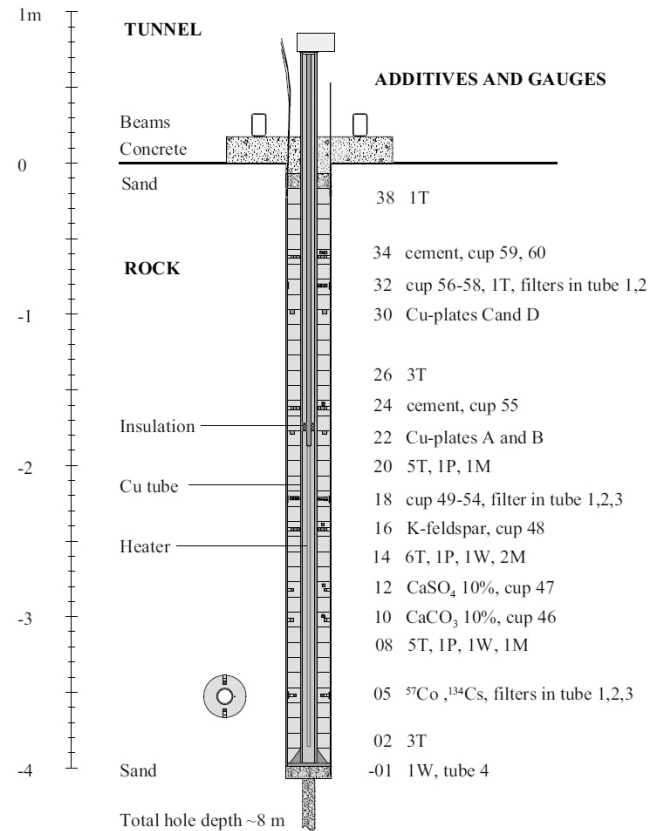


Fig. 1. Cross-sectional view of Long Term Test of Buffer Material (LOT)[1].

충실한 조건에서 진행하였다. 축소 LOT 시험의 장점은, 벤토나이트 완충재의 포화시간을 단축할 수 있고, 완충재 두께 방향으로 높은 열 구배를 형성시킬 수 있고, 한 집합체로 제작하여 설치와 추출이 용이하다. 축소 LOT 시험의 목적은 아래 항목으로 요약될 수 있으며, 이러한 항목들은 앞으로 나열될 기타 현장실증시험들의 목적과도 부합된다.

- 포화된 완충재의 준안정화 상태에 관한 모델링의 검증 데이터 확보 (팽윤압, 양이온 교환능, 수리전도도 자료들)
- 완충재 성능저하 과정에 대한 현존 모델의 점검 (illitization, salt enrichment)
- 완충재 중의 박테리아의 생존, 활성 및 이동에 관한 정보 수집
- 구리 부식에 관한 자료의 검증, 부식형태에 관한 정보 수집
- 기체 투과압과 기체 전달 능력에 관한 자료 수집
- 실험용 시험에서 활용할 수 있는 정보 수집 (완충재 준비, 기기준비, 정보 취급과 평가)

LOT 실험은 2002년 2월 2일 첫 가열이 이루어졌으며, 2001년 10월 23일까지 실증시험이 진행되었다. 시험 기간 동안, 완충재 내부의 온도, 압력, 습도를 모니터링하였으며, 시험 후에는 각 부위별로 해체하여 성분분석을 실시하였다.

2.1.2 스웨덴의 TBT (Temperature Buffer Test)

TBT는 벤토나이트 완충재의 고온(100°C 이상)에서의 거동을 평가하기 위해 프랑스 ANDRA와 스웨덴 SKB가 공동으로 Äspö HRL에서 실시된 공학적방벽 실증시험이다[2-4]. TBT는 완충재의 THM 거동을 이해하고, 이를 모델링하는 것이 주목적이었다. 지하 420 m 심부에 수직 처분공(직경 1.8 m)을 굴착하고, 내부에 2개의 열발생 Probe (직경 0.6 m, 길이 3m)를 수직으로 배열하고 주변에 완충재를 채웠다(Fig. 2). TBT 시험의 주요 특징은 하부 Probe 주위는 벤토나이트 블록을 정상적으로 설치하여, 인접한 완충재가 100°C 이상이 될 수 있게 하고, 다른 상부 Probe는 벤토나이트 블록과 Probe 사이에 모래층을 두고 완충재를 열로부터 보호하였다는 것이다. 초기 불포화 상태에서 시작해서 최종 안정화된 열적구배에 도달하기까지 각 구성분의 열적거동과 고온의 부분적인 탈수로 인한 기계적 효과가 복귀 가능한지에 대한 답을 얻도록 설계되었다.

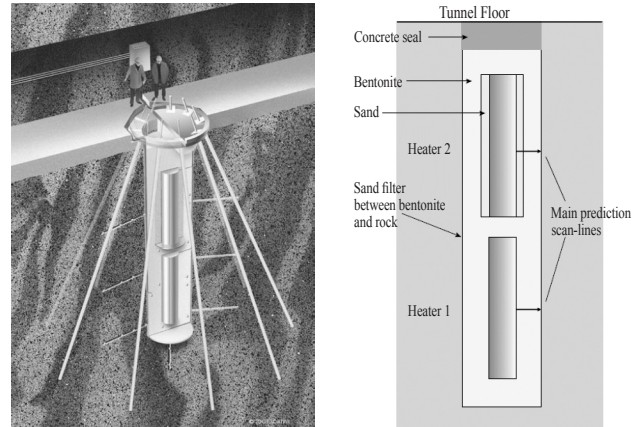


Fig. 2. Schematic views of Temperature buffer test[2].

TBT 장치 설계, 소요 장비 준비, 및 완충재 블록 제조가 2002년부터 실시되었으며, 2003년에 Heater Probe를 제작하고 Äspö HRL에 시험시설이 설치되었다. 2003년 3월 말 시험이 수공급 및 가열이 시작되었다. 초기에는 완충재는 열 충격에 의한 부분적인 탈수효과가 관측되었으며, 주변 모래층에서는 수압이 관측되지 않았다. 국제 공동 모델링 그룹(스웨덴, 스페인, 프랑스)은 예비적으로 예측 모델을 2003년 중반에 보고하였다. 2009년 10월에 TBT 시험을 종료하고, 2010년 4월에 TBT 해체를 완료하였다. 해체 후에는 완충재 샘플을 채취하여 함수율, 밀도 및 화학적/광물학적 분석 등을 수행하였다.

2.2 스위스의 HE-E (Heating & Engineered Barrier experiment)

HE-E 실증시험은 유럽 17개 기관이 수행하는 PEBS (Long-term Performance of the Engineered Barrier System) project의 일환으로 스위스 Mont Terri Rock Laboratory에서 수행 중에 있다[5]. 장기 안전성 관점에서 열-수리-역학적-화학적 복합 거동(THM-C coupled processes)에 대한 심도 깊은 이해는 매우 중요하다. 특히 처분장 폐쇄 후, 지하수 포화 과정에서 붕괴열에 의한 온도 변화, 기체 발생, 그리고 불규칙한 지하수 유입은 공학적방벽에서 팽윤압, 벤토나이트에서의 수리전도도 그리고 확산속도의 변화를 일으켜 이에 대한 이해는 반드시 필요하다. HE-E 실증시험은 다음 두 가지 세부 목표를 달성하기 위해 실시되었다.

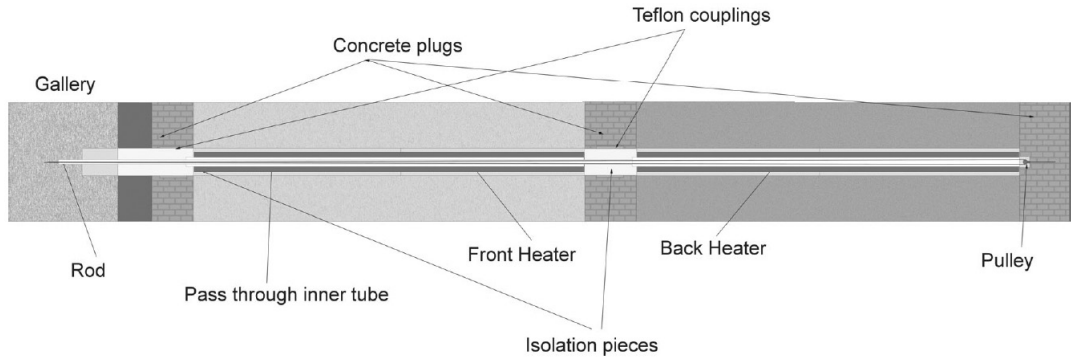


Fig. 3. Schematic lay-out of the HE-E experiment[5].

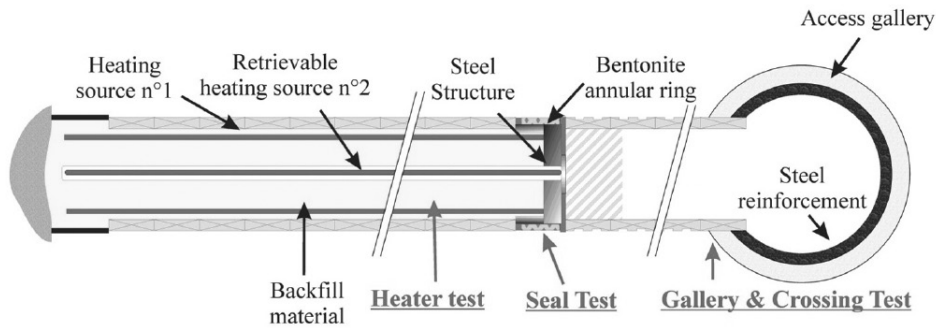


Fig. 4. Conceptual illustration of PRACLAY Heater Experiment [6].

- 폐쇄 후, 초기 포화 과정 동안 완충재에서 발생하는 열-수리-역학적 복합 거동의 모델링 기법을 검증하기 위한 현장 데이터의 확보
- 실험실 시험으로 구한 일부 포화된 완충재(순수 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물)의 열전도도로부터 현장 스케일의 열전도도를 예측할 수 있는 기법의 확보

HE-E 시험은 1/2 규모의 현장시험으로 Fig. 3에 개념도를 나타내었다. 히터는 MX80 벤토나이트 완충재 위에 설치되어 있으며 첫 번째 section과 두 번째 section에는 각각 순수 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물이 채워져 있다. HE-E 시험에서는 처분용기 축소모형 대신에 발열체로서 Steel liner(외경 298.5 mm)와 두 개의 전기 히터(1200 W)로 구성된 히터 시스템이 중앙부에 위치하고 있다.

HE-E 시험은 2011년 6월 28일 가동되었다. 시험 초기에는 일정한 히터 출력을 유지하면서 히터의 온도를 증가시켰으며 그 이후, 히터 온도를 조정하면서 현재까지 시험을 지

속하고 있다.

2.3 벨기에의 PRACLAY (PREliminARy demonstration test for CLAY disposal)

벨기에는 퇴적암층 기반의 처분시스템 개념을 개발 중에 있다. 고준위폐기물 처분시스템 기준 설계의 타당성을 검증하기 위하여 벨기에 방사성폐기물관리청(ONDRAF/NIRAS)과 벨기에 원자력연구원(CEN,SCK)은 EIG EURIDICE라고 하는 전담기관을 통하여 PRACLAY 프로젝트를 HADES(High-Activity Disposal Experimental Site) 지하연구시설에서 수행 중에 있다[6, 7]. 벨기에의 지하처분연구시설인 HADES는 몰(Mol) 시 인근에 위치하며 심도 223 m의 Boom Clay 층(신생대 제 3기 형성 퇴적층)에 고준위폐기물 처분 타당성 연구를 목적으로 건설된 것이다. PRACLAY 프로젝트는 크게 지상시험(PRACLAY Surface)과 지하 URL 시험(PRACLAY In Site)으로 구분된다. 지상시험은 공학적방벽시스템인 EBS

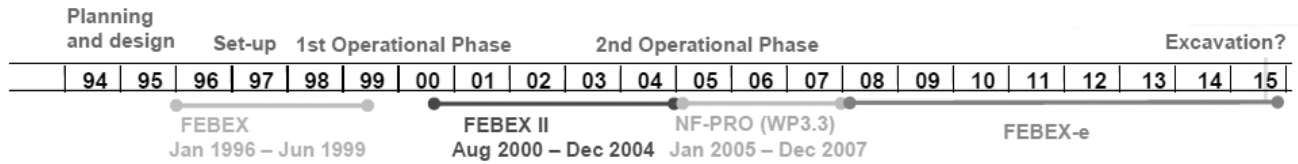


Fig. 5. Time Schedule of FEBEX Project.

에 대한 건설, 취급 및 성능 관련 실증시험이며, 지하시험은 Clay 층에서의 처분장 건설 타당성 실증시험이다.

HADES의 PRACLAY gallery 및 이와 관련된 터널들은 2007년에 건설되었다. PRACLAY 시험용 연구터널은 길이 45 m의 수평터널로서 내경 1.9 m, 외경 2.5 m의 실린더형이다. 주목할 점은 터널은 2개의 전기히터로 구성된 히터 시스템을 갖추고 있다는 점이다. 주 히터는 터널 곡면을 따라 설치되어 있으며, 보조 히터는 내부 중앙 튜브에 설치되어 있다(Fig. 4). 히터시험 터널의 입구부분은 히터 테스트를 위한 적절한 수리 경계조건(Undrained)을 제공하도록 밀봉하고 이에 대한 시험을 수행하였다. 터널 입구 밀봉시험은 벤토나이트(MX-80)를 이용한 밀봉 효과/타당성에 대한 것이며, Na 형 벤토나이트인 MX-80을 사용한 이유는 이곳의 지하수가 화학적으로 Na 영역 (14 mM NaHCO₃)인 Boom clay 환경이기 때문이다.

벨기에 PRACLAY 프로젝트는 2004년 설계를 시작하여 2007년 PRACLAY gallery 건설과 시험설비 설치 및 시운전을 시작하였다. 실제 가열단계 착수는 2009년부터이며, 2013년 예비 1차 결론/예비 안전성·타당성 평가를 실시하고, 2019년 최종 마무리할 예정이다.

2.4 스페인의 FEBEX (Full-scale Engineered Barrier Experiment)

스페인의 화강암 고준위폐기물 처분개념인 “AGP granito” 개념을 기반으로 결정질 암반 고준위 방사성폐기물 처분장의 근계영역에서 공학적방벽의 거동을 연구하기 위해 1994년 EU의 협조 하에 ENRESA에 의해 FEBEX프로젝트가 시작되었다(Fig. 5). FEBEX 프로젝트는 크게 처분장 유사조건에서 실규모로 수행되는 “In-situ” 시험과 실험실에서 실규모에 준하는 수준으로 수행되는 “Mock-up” 실험으로 구분되어 실시되었다[8-10].

FEBEX 프로젝트의 첫 번째 목표는 공학적방벽의 건설

가능성을 입증하는 것으로, 공학적방벽 요소의 제작·취급·설치 및 품질보증 프로그램의 개발 및 적용 등이 이에 포함된다. 두 번째 목표는 완충재의 열-수리-역학적 과정에 대해 연구하는 것이다. 완충재의 거동이 주요 해석대상이며, 이를 통해 기존 해석코드 및 상관식의 검증에 기대하고 있다. 마지막으로, 세 번째 목표는 근계영역에서 열-수리-지화학적 과정을 연구하는 것으로, 구체적으로는 열 및 물질 이동에 의한 완충재의 광물학적·지화학적 변화와 이에 따른 수리·기계·지화학적 특성 변화, 가스 생성 및 이동과 물질의 부식에 대해 연구하는 것이다.

FEBEX “In-situ” 시설은 깊이 450 m에 위치한 스위스 Grimsel 지하연구시설의 북쪽에 위치하고 있다. 시험구성요소는 시험터널, 가열시스템, 완충재, 측정시스템, 계측 및 조작시스템의 다섯 가지로 구성된다. 화강암반에 굴착된 FEBEX 시험터널은 길이 70.4 m, 직경 2.28 m ± 1 cm로 터널 끝에 실험시설이 설치되어 있으며, 이는 콘크리트 플러그로 밀봉되어 있다(Fig. 6). 가열시스템은 처분용기를 모사하기 위한 2개의 히터와 히터삽입을 위한 스틸라이너로 구성되었으며, 히터는 내경 700 mm, 두께 100 mm의 탄소강 케이싱과, 내부에는 선형 발열체가 나선형으로 감긴 직경 660.4 mm의 관이 들어있다. 발열체는 3개의 독립적인 시스템으로 구성하여 다중성을 확보하였으며, 각각의 정격출력은 4,300 W로 설계되어 있어서, 히터와 완충재 접촉면의 온도를 100℃로 유지할 수 있다.

시험시설 설치를 위해 1995년 9월 28일부터 10월 30일에 걸쳐 TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용해 굴착이 진행되었다. 시험시설의 기계적 설치는 1996년 7월 1일부터 1996년 10월 15일까지 총 16 주가 소요되었으며, 1997년 2월 27일까지(실제 작업기간 11 주) 데이터 획득과 컨트롤시스템의 조립 및 설치가 수행되었다. 간단한 테스트 기간을 거쳐 1997년 2월 27일(“Day 0”)부터 히터의 운전이 시작되었다. 1 단계 5년간의 시험 결과 히터의 90%가 작동되고 있어, 첫 번째

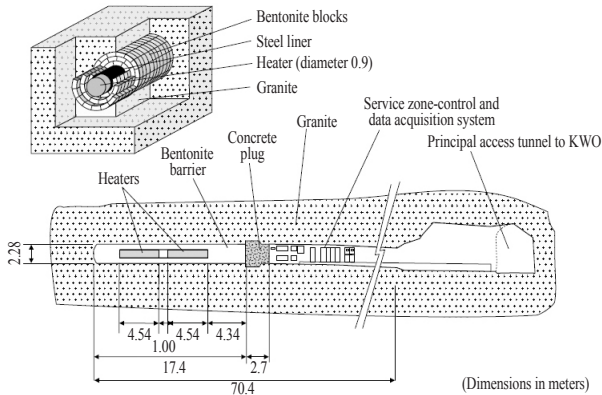


Fig. 6. FEBEX "In-situ" test in Grimsel site[8].

째 히터만 해체하고 두 번째 히터는 계속하여 시험할 것이 결정되었다. 2002년 2월 히터 전원이 차단되었으며, 2002년 6월 해체가 완료되었다. 남아있는 시험영역은 플러그를 대신하여 슛크리트 공법을 이용하여 밀봉되었다.

2.5 일본의 EBS Horonobe Experiment

JAEA가 H-12 보고서에 제안하였던 처분개념은 SKB의 KBS-3 개념의 수직공 방식과 수평처분방식이다. JAEA는 H-12 처분개념을 적용하여, 현재 퇴적암 층에 건설 중인 호로노베 지하연구시설에서 수직공 처분방식을 실규모로 건설하고, THMC 복합거동 연구를 진행할 계획이다. 시험의 목적은 THMC 복합거동에 대한 수치해의 검증(validation)을 위한 EBS와 그 주변의 THMC 현상에 대한 데이터 수집, 그리고 현장 EBS 시스템의 설치 기술 확인이다[11].

Horonobe URL은 홋카이도 북부에 위치한 호로노베(Horonobe) 퇴적층 지역에 지하 500 m 깊이를 목표로 현재 건설 중이며, EBS THMC 복합거동 시험은 굴착이 완료된 지하 350 m 구역에서 수행될 계획이다. 이 지역은 지하 300 m 심도에 지하수 흐름이 활발한 층이 지나고 있으며, 지열구배는 대략 4.7℃/100 m로 비교적 높은 편이다.

EBS 실증시설이 들어갈 처분공의 직경은 2.4 m, 깊이는 4.2 m이다. 처분공 내에 별도의 보강시설은 없으며 완충재는 Kunigel V1 벤토나이트와 모래를 7:3으로 혼합하여 사용할 계획이다. 처분용기는 직경 82 cm, 높이 173 cm, 중량 5.6 ton이고, 재질은 단조강(SFVC1, JIS-G3202)이며, 내부에

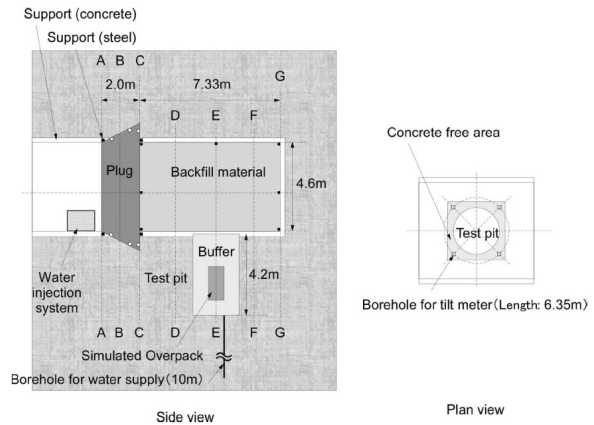


Fig. 7. Schematic illustration of Horonobe EBS Experiment[11].

는 히터가 설치되어 100℃까지 가열이 가능하다. 뒷채움재는 Kunigel V1 벤토나이트와 과쇄석 혼합재이며, 시험시설 폐쇄를 위한 플러그 물질로는 저알칼리 시멘트를 사용할 예정이다. EBS 실증시설의 단면 및 치수는 Fig. 7에 나타내었다. 시험시설의 지하수 포화를 돕기 위한 지하수 주입 시스템이 설치되어 있다.

Horonobe 실증시설 계획은 2012년 착수되었으며, 현재 설계와 성능 예측단계로서 각종 센서류의 배치 및 장기 성능을 시뮬레이션을 통해 분석 중이다. 이 시뮬레이션 단계는 Decovalex-2015 국제공동연구의 Task-B2로 선정되어 참여기관들이 공동으로 예측을 수행하고 있다. 시추공 굴착 및 장치 설치는 2014년에 이루어질 계획이며, 히터의 가동은 2015년 예정되어 있다.

2.6 캐나다의 BCE (Buffer/Container Experiment)

BCE는 1990년대 캐나다에서 사용후핵연료 처분장의 in-floor borehole emplacement 처분방식의 처분공을 모사하여, 히터로부터 열이 공급되고 주변 암반으로부터 지하수가 유입되는 현장조건에서 기준 완충재물질의 거동을 조사한 실규모 실증시험이었다. 시험 목적은 주로 기준 완충재물질의 실규모, 현장조건에서의 성능 평가와 모델 개발, 그리고 현장실증시험에 대한 설계, 제작, 설치, 운전 및 모니터링 기술 축적 등이었다. BCE시험은 Manitoba 주 Lac du Bonnet 에 위치한 URL(Underground Research Laboratory)의 지표

로부터 약 240 m 깊이의 위치에 설치되었다. 약 6 년간의 실험 준비과정을 거쳤고, 본격적인 실험은 1991년 11월에 시작되어 1994년 5월에 종료 되었다. BCE 시험시설의 구성을 Fig. 8에 나타내었다[12, 13].

BCE의 실험 장치는 처분용기를 모사한 히터, 완충재, 뒷채움재, 굴착 처분공을 갖는 화강암반, 완충재의 팽윤압으로 처분공에 설치된 구성요소들이 위로 용기하는 것을 방지하기 위한 지지용 기둥 등으로 구성된다. 구성요소 중, 히터는 기준 처분용기와 동일한 크기를 가지며, 직경 0.635 m, 길이 2.2 m 이었다. 완충재는 Na-벤토나이트와 silica 모래가 동일한 중량비로 된 혼합물로, 히터 주위에 채웠다. 뒷채움재는 75wt% 화강암 쇄석과 25wt% 점토의 혼합물로 처분공 위 쪽 부분에 1 m 두께로 설치되었다. BCE 시험에서 센서는 약 500개 이상 설치되었다. 완충재뿐만 아니라, 뒷채움재와 주변 암반의 열-수리-역학적 데이터는 모두 이 센서를 통해 수집 되었다.

히터는 1991년 11월 20일부터 전기를 공급하기 시작해서 897일 동안 가동되었다. 처음엔 1000 W의 전력이 공급되었으나, 26일 후 히터 표면 온도 (85℃)를 일정하게 유지하기

위해 1,200 W로 증가시켰다.

3. IN-DEBS 계획

3.1 A-KRS 수평처분 시스템

현재 KAERI에서 개발된 고준위폐기물 처분시스템은 KRS (KAERI Reference System)와 A-KRS(Advanced-KAERI Reference System)로 구분된다. KRS 처분시스템은 PWR 사용후핵연료와 CANDU 사용후핵연료를 심지층에 직접 처분하기 위한 목적으로 설계된 것이며[14], A-KRS 처분시스템은 파이로 공정으로부터 발생하는 고준위폐기물의 처분을 위해 개발된 시스템이다[15]. 파이로 공정에서 발생하는 고준위의 폐용융염은 Monazite 형태의 세라믹 고화를 거친 후, 처분하기로 계획되어 있다. 현재 고려되고 있는 KURT 현장 실증시험인 IN-DEBS의 원형은 A-KRS 수평처분시스템이다. A-KRS 수평처분시스템은 처분용기를 2개씩 직렬로 연결하고 2 m 간격의 완충재를 하나의 모듈로 하여 총 32개 모듈을 한 개 수평처분터널에 처분하도록 되어 있으며, 터널 간 간격은 25 m이다(Fig. 9).

3.2 IN-DEBS 공학적방벽 실증계획

A-KRS 수평처분시스템을 원형으로 계획하고 있는 IN-DEBS 현장시험시스템은 새롭게 추가될 KURT 연구용 터널에 설치될 예정이다(Fig. 10). KURT는 기존의 2개 연구용 터널을 확장하여 2015년경 4개의 연구용 터널을 추가적으로 확보할 예정이다. 현재 정확한 IN-DEBS 설치위치는 확정되지 않았으며, KURT 확장 후, 상세 지질 탐사를 통해 비교적 균질한 상태의 암반에 설치하려고 한다. A-KRS 수평처분공의 처분용기 2개로 구성된 1개 모듈을 2개의 수평 처분공 구조로 하여 약 1/2~1/3 규모 축소시킨 형태다(Fig. 11). 이것은 아직 확정된 크기는 아니지만, 크게 변할 가능성은 없다. 실제 시험에 사용하고자 하는 처분용기는 2개의 처분용기를 일체화한 히터 시스템이다. 현재 추진 중인 IN-DEBS의 구체적인 치수 및 해당 축소율을 A-KRS와 비교하여 Table 1에 나타내었다.

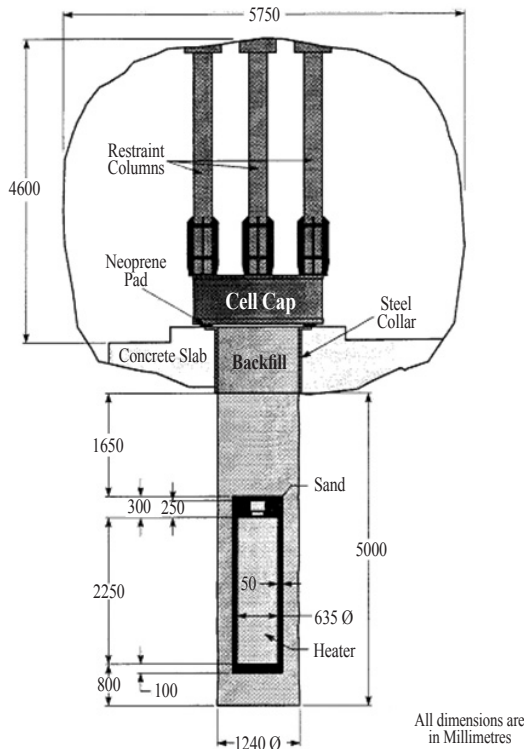


Fig. 8. Schematic illustration of BCE test and its dimensions[12].

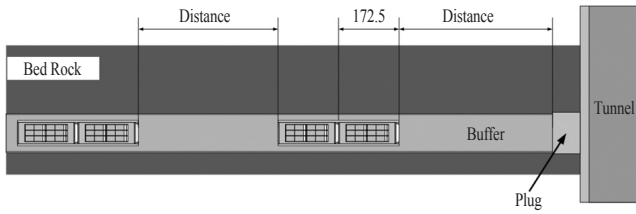


Fig. 9. Horizontal disposition of the disposal canisters suggested in A-KRS.

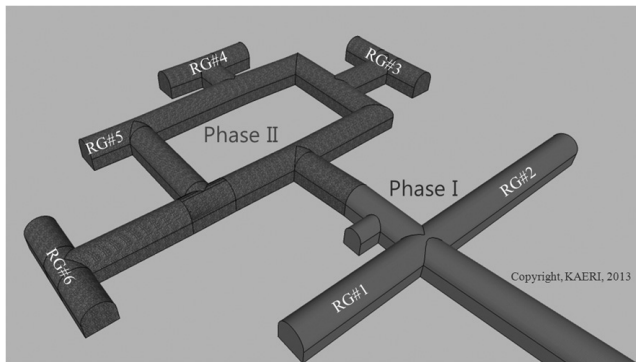


Fig. 10. Brief illustration of the present research galleries (phase I) and the planned expansion galleries (Phase II) in KURT.

4. 토의

4.1 실증시설 규모와 특징

앞에서 언급된 해외 실증시험시설들은 주로 실규모이다. 다만 Äspö LOT는 1/4로 소형이며, Mont Terri HE-E 시험은 1/2이다. 참고로 In-DEBS는 1/3 규모이다. 각국에서 실시된 공학적방벽 실증시험의 규모를 Table 2에 나타내었다. 처분공의 방향은 수평형(Hor)과 수직형(Ver)이 반반이며, 시험이 실시된 지하 암반도 화강암과 퇴적암이 반반 정도로서 자국에서 설계하고 있는 처분시스템 상황에 맞게 수행한 것으로 파악된다. 현재 추진되고 있는 In-DEBS 실증 시험도 A-KRS 수평처분방식을 축소한 형태에 따른다. 공학적방벽 현장 실증 시험 목적이 크게 공학적 건설 타당성 검증과 공학적방벽 성능 검증의 두 가지로 나누어질 수 있으며, 실규모가 아닌 1/3 축소형인 In-DEBS는 공학적 건설 타당성 검증보다는 공학적방벽 성능 검증에 초점을 두고 있다.

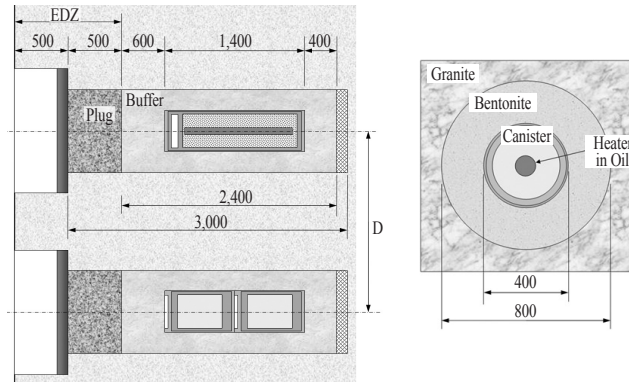


Fig. 11. A plane view of Horizontal type-IN-DEBS (left) and its layered structure (right).

Table 1. Dimensional comparison of A-KRS and In-DEBS(mm)

Item	A-KRS (Horizontal Type)	In-DEBS	Scale
Canister Diameter	1,031	400	1/2.58
Canister Height	1,725(canister)×2 = 3,450	1,300	1/2.65
Tunnel Diameter	1,800	800	1/2.25
Tunnel Length	3,450+2,000(Distance) = 5,450	2,000	1/2.73
Buffer Thickness	380	200	1/1.90

4.2 가열용기의 특징

공학적방벽 실증시험에서 처분용기 대응으로 사용된 가열용기들은 실제 처분용기 구조 혹은 용기 재료를 그대로 사용하기보다는 비슷한 크기의 가열용 히터를 넣고, 주위 완충재의 THM 변화를 관측하는 목적에 주력하였다. 단지 실제 처분용기 재료 평가는 별도의 부식시험용 시편을 완충재에 삽입하는 경우가 많았다. 각국에서 실시된 공학적방벽 실증시설에서의 가열용기 성능 비교를 Table 3에 나타내었다.

가열용기는 주로 내부에 약간 작은 원통 튜브를 넣고 튜브 외면에 히터를 감아올려서 원주 방향으로 배치시키는 방법을 주로 사용하였다. 히터선은 만약을 위해 2개 내지 3개의 선으로 분리하여 한 개가 정지하더라도 나머지 히터선이 열용량을 감당할 수 있도록 하였다. 이 밖에 Äspö LOT 시험과 같이 용기가 작은 경우에는 단순히 히터봉 3개를 크기에 맞는 구리관에 열매 없이 넣은 식으로 된 것도 있으며, PRACLAY와 같이 내면에 배치된 히터선에 대한 예비전력으

Table 2. The Scale, borehole direction, borehole size, Heater size, and rock type of EBS demonstrations worldwide (Unit; m)

Project	Scale/ Direction	Borehole (buffer) (m)	Heater (m)	Rock Bed
Äspö-TBT	Full / Ver.	D1.8 H8.0	D0.6 H 3.0×2	Hard rock
Äspö-LOT	1:4 / Ver.	D0.3 H4.0	D0.1 H 4.7	Hard rock
Mont Terri-HE-E	1:2 / Hor.	D1.3 L10	D0.22 H 4.0×2	Sediment
Hades-PRACLAY	Full / Hor.	D1.9(2.5) L30		Boom Clay
NAGRA-FEBEX	Full / Hor.	D2.3 L17	D0.9 L 4.5	Granite
Horonobe	Full / Ver.	D2.4 H 4.2	D0.82 H 1.73	Sediment
Bonnet-BCE	Full / Ver	D1.24 H 5.0	D0.64 H 2.2	Granite
KURT-DEBS	1/3 / Hor.	D0.8 L 3.0	D0.4 H 1.3	Granite

Ver.=Vertical, Hor.=Horizontal

로 중앙에 히터봉을 넣은 경우도 있었다. 이 경우 내부는 모래와 같이 열전도가 높은 고형물을 채워 넣었다. 가열용기의 재료는 주로 탄소강이 가장 많았으며, 예외적으로 90년대 캐나다에서 실시된 BCE 시험의 경우에는 알루미늄관을 사용하였다.

히터의 용량은 시험하고자 하는 목표 온도영역에 맞추어서 제작하였다. 대개의 시험은 고온시험의 경우에는 100~180℃ 정도에서 수행되었으며, 그 밖에는 처분온도인 80℃ 내외에서 실시되었다. 온도 조절 방식은 항온 방식과 정전력 방식 두 가지로 나누어진다. 스웨덴의 Äspö에서 실시된 LOT 시험과 TBT 시험은 전력을 일정하게 하는 방법을 사용하였지만, 기타 실증시험은 주로 온도를 일정하게 하는 시험이었다. 방벽의 온도를 올리는 방법은 대부분 서서히 원하는 온도 지점까지 올려서 시험하였다. 초기에는 일정 전력을 유지하여 몇 주에 걸쳐서 서서히 온도를 올린 후에 나중에 일정 온도 조건으로 유지시키는 방법이 많았다.

In-DEBS 가열용기의 경우, 실규모가 아니고 1/3 규모로서 앞서 언급된 실증시험의 가열용기보다 작다. 그리고 실제 가열용기는 통상적인 히터구조가 아니라, 실제 처분용기 구조를 모사하여 제작될 예정이기 때문에 내부 중앙에 가열체를 두고 그 주변을 열매로 채우는 방안이 유력하게 검토되고 있다. 열매로는 누설의 우려가 없는 고체분말로 용기 내부를 채우는 것이 유력하다. 그리고 중앙 가열체는 고장에

Table 3. Dimension, Heat capacity, Shell material, and test temperature of Heating canisters in EBS demonstrations worldwide (Unit; m)

Project	size	Capacity	Shell Material	Temperature (°C)
Äspö-TBT	D0.6 H 3.0×2	0.98×3	Carbon steel	CP 1.0-2.0 kW
Äspö-LOT	D0.1 H 4.7	2.0 kW	Cu pipe	CP 850 W
Mont Terri-HE-E	D0.22 H 4.0×2	1.2 kW×2	Stainless	CT 140
Hades-PRACLAY	D1.9(2.5) L30		Concrete	CT 80
NAGRA-FEBEX	D0.9 L 4.5	4.3 kW	Carbon steel	CT 100
Horonobe	D0.82 H 1.73		Carbon steel	Max. 100
Bonnet-BCE	D0.64 H 2.2	5 kW×3	Aluminum	CT 85 (Max.175)
KURT-DEBS	D0.4 H 1.3		Copper	CT 80

CP: constant power mode, CT: constant temperature mode

대비하여 별도의 전력선으로 이루어진 2~3개의 히터봉을 삽입할 예정이다.

4.3 완충재

앞서 언급된 공학적방벽 실증시험에 사용된 완충재는 대부분 MX-80 Na bentonite였다. 그리고 Horonobe는 Kunigel 벤토나이트와 모래를 7:3으로 섞은 블록을 사용할 계획이지만, 벤토나이트는 Na 형이다. 완충재의 선택은 실제 처분에 사용될 완충재를 사용하였다. 따라서 In-DEBS에서는 A-KRS에서 적용된 경주산 Ca-벤토나이트를 사용할 예정이다. Table 4에 각국 공학적방벽 실증시설에서의 완충재 및 채움재를 비교하였다. 물론 Na형 벤토나이트는 팽윤성이나 수밀성과 같은 기본적인 완충재 성능에서 Ca 보다 우수한 점이 있기는 하지만 장기적 화학 안정성을 고려했을 때 한국 지반에서는 Ca가 더 안정할 수 있다. 왜냐하면 한반도 암반은 Na보다는 Ca가 풍부하기 때문이다.

한편, 최근에는 고열효율 첨가재를 혼합한 고열전도도 완충재가 개발되었기 때문에 이중층 구조의 완충재를 In-DEBS에서 적용하는 것도 가능하다. 즉, 가열용기 주변을 고열전도도 완충재로 배치하고 처분공 바깥을 일반 완충재로 하는 방안이다. 이렇게 하면 열 분산을 훨씬 효과적으로 할 수 있을 것으로 보인다. 현재 In-DEBS에서 고려되는 2열의

처분공 중에서 1열에는 일반 완충재를 사용하고, 다른 1열에서는 고열효율 완충재를 시험할 수 있다.

공학적방법 실증시험에서 완충재의 두께는 상당히 중요하다. 왜냐하면 실증시험의 주목적이 지하수의 침입과 처분용기의 붕괴열로 인한 완충재의 THM 현상 변화를 측정하는데 있기 때문이다. 따라서 완충재의 온도와 응력 변화를 측정하기 위해 다양한 센서가 배치될 수 있는 충분한 두께를 갖추어야 한다. 실규모 실증 시험의 경우에는 완충재 두께, 즉 가열용기 외벽과 처분공 사이 간격은 보통 0.5-0.8 m 정도이다. 그러나 현재 추진 중인 In-DEBS의 경우에는 0.2 m로 다소 작다. 따라서 반지름 방향으로 센서를 많이 배치할 수 없을 뿐만 아니라, 센서 봉을 반지름 방향으로 눕히기 힘들다. 왜냐하면 센서의 길이가 보통 0.15 m 정도이기 때문이다. 따라서 센서를 수평으로 배치하기보다는 용기의 길이 방향으로 배치해야 하므로, 완충재 블록에 구멍을 뚫고, 연결선을 반지름 방향으로 뽑아내는 방안이 유력하다.

완충재 블록과 가열용기 사이 혹은 완충재와 암벽 사이에는 설치에 따른 유격이 존재하며, 이러한 유격을 메워 주어야 지하수 포화 후에도 높은 밀도의 포화된 완충재 층을 얻을 수 있다. 앞선 실증 시험에서는 주로 모래를 사용하여 메우고 있으며, Mont Terri나 Äspö TBT 실증시험에서는 벤토나이트 pellet을 사용하였다. 가장 좋은 상황은 처분공을 매끄럽게 원하는 크기로 천공하고, 완충재 블록을 딱 맞게 제

작하여 유격을 2-3 mm 이하로 유지하여 채움 물질의 필요성을 없게 하는 것이다. 하지만, 불필요하게 유격이 커질 경우에 대비하여, 이에 적합한 채움재를 In-DEBS에서도 고민해야 할 것이다.

4.4 급수 방법

완충재는 물과 접촉하면 팽윤하여 강력한 차수 효과를 발휘한다. 따라서 완충재 블록이 내부까지 포화되기 위해서는 수년 이상의 오랜 시간이 걸린다. 따라서 처분공 주변 암반에 물이 풍부하지 않거나 빠른 포화를 원한다면 강제적으로 외부에서 물을 공급해 주어야 한다. In-DEBS에서는 실제 가열용기 주변 완충재의 두께가 약 20 cm 정도로서 앞선 실규모 실증시험에 비해서 두꺼운 편은 아니지만, 수평 처분공은 갤러리 바닥면보다 위쪽에 설치되므로 주변 암반의 수분이 많지 않다면 인위적인 물 공급을 준비할 필요가 있다. 수 공급 방식은 처분공 반대편 끝단으로 공급용 수관을 위치시키고, 입구 쪽에 회수용 수관을 두는 방식이 일반적이다. 포화속도를 높이는 방안으로 초기에 가열용기의 온도를 낮추는 방안이 고려될 수도 있다. Table 5에 각국의 공학적방법 실증시설에서의 수공급 방법, 방벽 설치 방법, 처분공 마개 및 바닥면 처리 방법을 비교하여 나타내었다.

4.5 설치방법

앞서 언급된 실규모 실증시험들은 처분공의 크기가 작업자가 충분히 드나들 수 있을 정도로 크기 때문에, 완충재 블록이나 가열용기를 조립 순서에 맞게 처분공 내에서 순차적으로 설치할 수 있다. 이 경우에는 까다로운 센서 선의 통로를 암벽에 조성하거나, 암벽과 완충재 블록 사이의 빈틈을 완충재나 모래 등으로 다져 넣는 작업이 수월하다(Table 5). 하지만 In-DEBS의 경우, 처분공 직경이 0.8 m 수준에서 결정될 예정이기 때문에 실제 작업자가 들어가서 작업할 수는 없다. 따라서 Äspö-LOT와 같이 외부에서 조립하여 삽입하는 방법이 고려된다. 하지만 하나의 완전 조립체를 수평으로 삽입하려면 고하중의 조립체를 밀어넣는 방안이 필요하다. 물론 조립체를 수평으로 밀어 넣기 용이하게 하기 위해서는 처분공에 약간의 하부 경사를 줄 수도 있으나, 조립하기 전에 처분공에 물이 채워질 수 있는 단점이 있다. 그리고

Table 4. Compact bentonite size, species, gap filling materials in EBS demonstrations worldwide (Unit; m)

Project	Bore size	Material	In-Shield Material	Out-Gap filling
Äspö-TBT	D1.8 H8.0	MX-80	Sand-2	Pellet-up Sand
Äspö-LOT	D0.3 H4.0	MX-80		
Mont Terri-HE-E	D1.3 L10	MX-80 (block base, pellet-1, pellet/sand-2)		
Hades-PRACLAY	D1.9(2.5) L30	MX-80(seal)	M34 Sand	Concrete lining
NAGRA-FEBEX	D2.3 L17	MX-80	Steel liner	
Horonobe	D2.4 H 4.2	Kunigel V1/sand 7/3		sand
Bonnet-BCE	D1.24 H 5.0	Na bentonite	Silica Sand	
KURT-DEBS	D0.8 L 3.0	Ca-bentonite	Pellet	Pellet

블록과 처분공 압벽 사이의 마찰을 최소화시켜 쉬게 미끄러질 수 있어야 하며, 조립체를 밀어 넣는 기계적 장치도 개발되어야 한다.

4.6 바닥면과 입구 마개

바닥면은 아무 처리 없이 압벽에 벤토나이트 블록을 그냥 삽입하기도 하지만, 편평한 벤토나이트 블록과 접하게 되는 바닥면을 고르기 위해 콘크리트로 마감처리를 하기도 한다. 수평 처분공을 가진 In-DEBS의 경우에는 끝단을 콘크리트로 마감하기에는 어려움이 있으므로 초기 굴착 시에 깨끗한 면을 얻는 것이 중요하다. 한편, 바닥면에서 강제 급수를 하게 된다면, 끝 면에 모래를 채운 메쉬를 밀어 넣게 되므로 끝단이 깨끗하지 않아도 된다.

입구 쪽에는 벤토나이트가 팽윤되어 나오지 않도록 마개로 막을 필요가 있다. Table 5에서 보듯이 대부분의 실증 시험에서는 콘크리트 플러그로 마감하였으며, 마감된 콘크리트 플러그를 고정하는 방법을 달리하였다. 콘크리트 플러그위를 금속판으로 누른 후 앵커로 압반에 고정시키기도 하고(Äspö-TBT), 아니면 콘크리트 플러그 윗면에 지주를 세워

Table 5. Water supplying method, EBS installation method, and Lid & bottom finishing methods in EBS demonstrations worldwide

Project	Saturation	Installation	Lid& bottom (mm)
Äspö-TBT	Compulsory UW→DW	Inside constitution	Up: Concrete 500 Base: Concrete 50
Äspö-LOT	Compulsory UW	Parcel inserting	Up: Concrete, Sand 100 Base: Sand 100
Mont Terri-HE-E	Natural	Assembling & filling	In: concrete Mid concrete End: concrete
Hades-PRACLAY	Natural	Concrete lining constitution	In: metal plate + B ring End: Bentonite block
NAGRA-FEBEX	Natural	Block, steel liner & heater inserting	Concrete plug 2.7 m
Horonobe	Compulsory UW		Backfilling of tunnel Tunnel Plugging
Bonnet-BCE		Inside constitution	Backfilling
KURT-DEBS	Natural	Inserting	In: concrete plug End: Metal filter, Sand

반대편 압벽에 받치기도 하였다(Bonnet-BCE). 혹은 콘크리트 플러그를 쇠기형으로 제작하여 외부로 빠져 나오기 힘들게 한 것도 있다(FEBEX). 입구 쪽 플러그의 제작 시 유념해야 할 사항 중의 하나는 시험 종료 후, 분석을 위해 해체가 용이해야 한다는 점이다. 따라서 쇠기형보다 앵커를 이용한 플러그 고정이 소규모 실증시설인 In-DEBS에서는 유리해 보인다.

4.7 모니터링

현장실증연구의 추진 목적은 첫째, 실규모 혹은 중형의 공학적 방법을 설치해 봄으로써, 관련 건설기술을 확보 및 검증하는 것이고, 두 번째는 완충재의 THM evolution을 장기적으로 모니터링하는 데 있다. THM을 모니터링하기 위해서는 정확한 온도, 압력, 습도 측정이 매우 중요하다. 왜냐하면 모니터링 결과는 향후 건설될 처분장 안전해석에 필요한 기본 자료로 사용되기 때문이다. In-DEBS에서는 기존의 완충재의 THM 모니터링 외에도, 완충재에서의 미생물의 거동, 구리용기의 부식성과 밀봉기능을 함께 점검할 계획이다.

완충재에서의 정확한 온도, 압력, 수분 변화의 측정이 공학적방법 THM 모델을 고정하는 길이 된다. 따라서 완충재와 가열용기에는 수십 개의 온도 센서가 부착되며, 완충재에는 압력센서, 공극수압 센서, 습도센서 등이 설치된다. 이 밖의 모니터링 항목으로는 완충재의 화학적 특성 변화를 관찰하기 위한 수공급 라인을 통한 용액 검출, 금속 재료의 부식을 살펴보기 위한 부식시편의 완충재 삽입, 핵종의 이동을 보기 위한 추적자 물질의 완충재 삽입, pH의 영향을 보기 위한 시멘트 시편의 완충재 삽입 등이 있을 수 있다. 수공급 라인을 통해서 급수 압과 급수 속도를 통해 수리전도도의 변화를 가능하는 것도 가능하다. 플러그에 압력계와 변위계를 설치하여 완충재의 수화에 따른 팽윤압과 마개 변위를 측정하는 것도 가능하다. 이와 같은 모니터링은 앞선 실증 프로그램에서 모두 시도된 것으로서, In-DEBS에서도 설치가 적극 고려되고 있다. 하지만, 대부분의 센서들이 완충재에 설치되어 완충재의 THM 변화를 측정하는 데 목적을 두고 있지만, 압력 센서나 습도 센서는 그 지름이 10 mm 내외, 길이가 100 mm 내외로 작지가 않다. 따라서 In-DEBS와 같이 완충재의 두께가 200 mm 정도인 경우에는 반지를 방향으로 많은 센서를 설치하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 이점을 고려하여 센서의 배치를 고려해야 한다.

5. 결론

본 연구에서 한국원자력연구원 부지 내 KURT 연구시설에 심지층 처분실증시험을 수행할 목적으로 사전 해외현황 조사를 실시하였다. 고준위폐기물 심지층 처분을 목적으로 지하연구시설을 구축한 나라들을 대상으로 현재 수행되었거나, 수행하고 있는 공학적방벽 성능평가 시험을 조사하였다. 조사된 나라와 주요실증시험으로는, 스웨덴/프랑스 TBT, 스웨덴 LOT, 스위스 HE-E, 벨기에 PRACLAY, 스페인 FEBEX, 일본 HORONOBE, 및 캐나다 BCE 등이었다. 각 실증시험에 대하여 시험의 목적, 시험체의 구성, 시험조건, 세부 구성도, 측정 항목, 측정기기, 및 도출된 결과 등을 구체적으로 조사하였으며, 시험결과보다는 시험목적 및 시험물의 구축방법 파악에 더 집중하였다. 이는 각국의 공학적방벽 성능시험방법의 검토를 통해 향후 우리나라가 추진하게 될 공학적방벽 시험의 설계에 도움을 얻고, 다양한 성능시험을 동시에 수행할 수 있도록 하기 위해서였다.

추가적으로, 본문에서는 조사된 각국의 현장실증시험의 디자인을 종합적으로 검토하여 KURT에 설치하게 될 중규모 공학적방벽 실증시험인 In-DEBS의 설계를 대략 가능해 보았다. 실증용 처분공의 크기에 따른 가열용기의 크기 비교, 시험 온도에 따른 가열용기의 열용량, 가열용기 및 완충재 종류, 시험 온도, 완충재의 구성방식, 방벽의 간극 채움재 종류, 인공 급수시스템, 처분공 입구 플러그 처리 방법 등을 검토하여 In-DEBS 설계에 반영하고자 하였다. 마지막으로, 본 연구를 통해 향후 KURT 내 추진할 중규모 공학적방벽 성능시험인 In-DEBS에 필요한 구조적 상세 설계뿐만 아니라 시험 방법 및 진행일정의 결정에 도움을 주고자 하였다.

REFERENCES

- [1] Svensk Karnbranslehantering AB, Technical Report TR-09-31, "Long term test of buffer material at the Äspö HRL, LOT project, Final report on the A0 test parcel" (2011).
- [2] Svensk Karnbranslehantering AB, Technical Report TR-12-04, "Temperature buffer test, Final report" (2012).
- [3] Lars-Erik Johannesson, Torbjörn Sandén, Mattias Åkesson, P-12-02, "Temperature buffer test; Installation of buffer, heaters and instruments in the deposition hole" (2010).
- [4] Peder Thorsager, International Progress Report, IPR-02-62, "Temperature Buffer Test; Detailed design materials. Foundation and artificial saturation" (2002).
- [5] Nagra Arbeitsbericht NAB 11-25, "Long Term Performance of Engineered Barrier Systems (PEBS) : Mont Terri HE-E experiment: as-built report" (2011).
- [6] X. L. Li, W. Bastiaens, and P. Van Marcke, "Design and development of large-scale in-situ PRACLAY heater test and horizontal high-level radioactive waste disposal gallery seal test in Belgian HADES", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (2010).
- [7] TIMODAZ, "Large scale excavation and heater in-situ experiment: the PRACLAY experiment modelling. Deliverable D13 –Annex 6", EC 2010.
- [8] Irina Gaus, "FEBEXe: Full-scale Engineered Barrier Experiment-extension", 10th International Steering Committee meeting (2012).
- [9] ENRESA, "FEBEX project final report: full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock" (2000).
- [10] P.L. Martin, J.M. Barcala, and F. Huertas, "Large-scale and long-term coupled thermo-hydro-mechanic experiment with bentonite: the FEBEX mock-up test", Journal of Iberian Geology, 32(2), pp. 259-282 (2006).
- [11] T. Fujita, N. Taniguchi, H. Matsui, K. Tanai, K. Maekawa, A. Sawada, H. Makino, H. Sasamoto, H. Yoshikawa, M. Shibata, K. Wakasugi, K. Hama, H. Kurikami, T. Kunimaru, E. Ishii, R. Takeuchi, K. Ota, K. Miyahara, M. Naito, and M. Yui, Horonobe Underground Research Laboratory Project Synthesis of Phase I Investigation 2001-2005 Volume "Geological Disposal Research", JAEA-Research 2011-001, JAEA (2011).
- [12] N.A. Chandler, A.W.L. Wan, and P.J. Roach, "The buffer/container experiment: design and construction

- report”, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-11792, COG-97-186-1 (1998).
- [13] N.A. Chandler, D.A. Dixon, P.J. Roach, and A.W.L. Wan, “The buffer/container experiment: results, synthesis, issues”, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-11746, COG-97-46-1 (1998).
- [14] H.J. Choi, J.Y. Lee, S.S. Kim, S.K. Kim, D.G. Cho, K.Y. Kim, J.T. Jeong, and K.S. Jeon, “Korean Reference HLW Disposal System”, KAERI Technical Report, KAERI/TR-3563/2008.
- [15] J.W. choi, “Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Nuclear Fuel in Korea”, KAERI Technical Report, KAERI/RR-4525/2011.