JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 359-367 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.359

방사성폐기물 표층처분시설 통합 모니터링 시스템 개발

최세호[1], 강현구[1,*], 권미진[1], 하재철[1]

[1]한국원자력환경공단

Development of an Integrated Monitoring System for the Low and Intermediate Level Radioactive Waste Near-surface Disposal Facility

Se-Ho Choi[1], HyunGoo Kang[1,*], MiJin Kwon[1] and Jae-Chul Ha[1]

[1]Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

Abstract In this study, the function and purpose of the disposal cover, which is an engineering barrier installed to isolate the disposal vault of the near-surface disposal facility for radioactive waste from natural/man-made intrusion, and the design details of the demonstration facility for performance verification were described. The Demonstration facility was designed in a partially divided form to secure the efficiency of measurement while being the same as the actual size of the surface disposal facility to be built in the Intermediate & low-level radioactive waste disposal site of the Korea Radioactive Waste Agency (KORAD). The instruments used for measurement consist of a multi-point thermometer, FDR (Frequency Domain Reflectometry) sensor, inclinometer, acoustic sensor, flow meter, and meteorological observer. It is used as input data for the monitoring system. The 3D monitoring system was composed of 5 layers using the e-government standard framework, and was developed based on 4 components: screen, control module, service module, and DBIO (DataBase Input Output) module, and connected them to system operation. The monitoring system can provide real-time information on physical changes in the demonstration facility through the collection, analysis, storage, and visualization processes.

Key words: Radioactive waste, Disposal, Near-surface disposal facility, Engineering barrier

1. 서 론

2020년 기준, 세계에는 총 445개 사업 발전용 원자로가 가동 중이며 이는 상업 발전의 약 10%를 차지하고 있다. 국내의 경우 1978년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 지난 40여 년간 운영되어 왔으며 국내 총 발전량의 약 26% 수준(2019년 기준)을 차지하고 있다.

방사성폐기물은 원자력발전에 의한 부산물로써, 원자력 발전과 필연적 관계에 놓여있다. 더하여 방사성폐기물의 안전한 관리 방법을 마련하는 것은, 매우 오랜 시간 동안 고민되어온 인류의 큰 숙제이다. 국내의 경우, 약 25여 년 동안 방사성폐기물의 안전한 관리를 위한 후보지 선정을 추진하였으며, 이러한 노력의 결과로 지난 2005년, 경상북도 경주시에 방폐장 부지가 선정되었고, 2015년 처음으로 방폐물이 처분되었다.

한국원자력환경공단이 운영 중인 중·저준위 방폐물 처분장은 현재 1단계로 명명된, 동굴처분방식의 처분시설이 2015년부터 운영되고 있으며, 원전 운영 방폐물 및 원전 해체 방폐물을 안전하게 관리하기 위한 추가적인 처분시설인 표층처분시설 운영을 계획하고 있다. 2단계로 명명된

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** HyunGoo Kang
Tel. +82-42-601-5354 Fax. +82-42-601-5387 E-mail. kanghyungoo@korad.or.kr
Received 6 October 2023 **Revised** 2 November 2023 **Accepted** 15 November 2023

표층처분시설은 지표면 상부에 건설된 구조물 내부에 방폐물을 처분하는 운영형태의 처분시설로써[1], 방폐물 처분시설 중 상대적으로 공사비가 저렴하고 운영 방식이 간단하므로 준위가 낮은 방폐물을 처분함에 적합한 처분시설로 알려져 있으며, 다수의 국가에서 사용되고 있는 처분시설의 형태이다[2].

표층처분시설은 약 300여 년 동안 건전한 상태로 관리되어야 한다[3]. 300년 동안의 장기안전성을 확인하기 위해서는 일반적으로 전산해석을 통하여 안전성을 확인한다[4,5]. 하지만 전산해석의 불확실성과 표층처분시설 건설환경 적용을 위해서는 실증실험이 요구된다[6]. 따라서 본 연구에서는 표층처분시설의 통합 모니터링 시스템 개발을 통하여, 표층처분시설 중 처분덮개의 건전성을 실증하기 위한 시스템을 마련하고자 한다. 경주 방폐장 내 모니터링 시스템 현장시험 수행 결과와 표층처분시설의 장기성능 분석을 위한 실증시험장치 설계 내용과 운영 방안에 대한 내용을 기술하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 표층처분시설의 개념

2.1.1. 표층처분시설

표층처분시설은 퇴적암을 기반으로 하는 불포화 암반 상부에 위치하며, 총 12.5만 드럼(200 L 기준)의 저준위 이하 방폐물을 처분할 수 있는 시설이다. 이는 20개의 사각 콘크리트 처분고로 구성되는데, 각 콘크리트 처분고에 포장물(Package) 처분을 완료하면 그 내부를 시멘트 모르타르로 채운 후 공학적 방벽으로 덮는 방식으로 폐쇄된다[7] (Fig. 1).

2.1.2. 공학적 방벽

Fig. 2에는 처분고를 덮어 처분시설의 최종 폐쇄 상태를 유지하는 공학적 방벽을 나타내었다. 이는 표면층, 배수층, 수리방벽 층으로 구성된 다중복토층으로 구성되며, 강우와 지표수 등의 유입과 인간, 동·식물의 침입을 방지하는 기능을 가진다(Table 1). 이러한 방식은 방사성폐기물 처

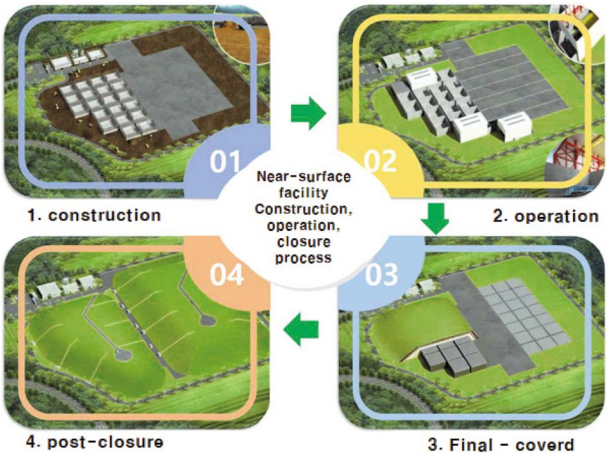

Fig. 1. Operation concept of the near-surface disposal facility.

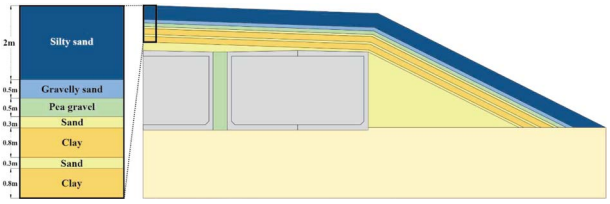

Fig. 2. Component layers of the engineering barrier.

Table 1. Component of the multi layer

Layer	Thickness [m]	Component	Function
Top-soil	0.2	8th: Silty sand	▷ Prevention of inflow of concentrated rain ▷ Human intrusion prevention
Protection (I)	0.5	7th: Gravelly sand	▷ Prevention of animal/plant invasion
Protection (II)	0.5	6th: Pea gravel	
Drainage	0.3	5th: Sand	▷ Horizontal drainage
Barrier	0.8	4th: Clay	▷ Vertical infiltration block
Drainage	0.3	3rd: Sand	▷ (same as 5th)
Barrier	0.8	2nd: Clay	▷ (same as 4th)
Drainage	0.3	1st: Sand	▷ (same as 5th)

분장을 운영하는 다수의 국가에서도 사용하고 있는 방식이지만, 국내 자연환경(기후, 암반조건 등)에서 실 운영된 사례가 없다[8,9].

2.2. 표층처분시설의 모니터링

2.2.1. 계측항목 및 장비

방사성폐기물을 모두 저장한 처분고가 공학적 방벽으로 격리되는 폐쇄 단계는 표층처분시설의 최종 형태이며, 폐쇄가 완료된 시설은 300년의 관리기간 동안 건전성이 유지되어야 한다. 이는 처분시설을 구성하는 재료의 자연적 열화와 같은 현상과, 인간이 시설로 침입하는 등의 같은 인위적 원인에도 그 건전성이 유지되어야 함을 의미한다[10]. 처분시설의 모니터링은 이러한 처분시설의 노화에 관련된 현상을 사전에 파악하고 노화의 진전을 대비하기 위한 공학적 행위이며[11], 이를 구성하는 계측 대상과 장비를 Table 2에 나타내었다.

2.2.2. 계측기기의 성능요건

계측기기는 공학적 방벽 내부의 물리적 값을 계측하여 육안으로 확인할 수 없는 현상을 파악하기 위하여 활용된다. 따라서 본 연구에서는 온도와 습도, 유량, 변형 그리고 기후정보를 취득하기 위한 계측기기를 Table 2와 같이 선정하였다. 온도(Temperature) 센서의 경우, 표층처분시설 공학적 방벽의 규모를 고려, 광범위한 영역의 온도를 계측할 수 있어야 하므로 분포형 계측기법 적용이 필요하다. 또한 습도의 경우 토양 내부에 존재할 수 있는 염류나 유기물 등의 영향을 받지 않아야 하므로 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 센서와 같이 토양의 유전상수(Dielectric Constant)를 이용한 계측 방법이 요구된다. 공학적 방벽의 유실과 같은 변형 계측에는 경사계를 설치하여 직관적인 변형의 정도를 계측할 수 있으며, 토사 내부 압력 변동에 의하여 발생하는 미세 음향신호를 계측하는 음향(Acoustic) 센서의 적용이 요구된다. 더하여 외부로부터 유입되는 수분의 유입량이 공학적 방벽을 구성하는 각 층에서 분포되는 특성을 파악하기 위하여 유량계를 활용할 수 있으며, 시설의 특성상 상시 포화(Saturation) 상태가 아니므로 발생되는 물의 양을 상시 독립적으로 측정할 수 있어야 한다. 기상 변화 데이터 수집을 위한 기상관측기는 물의 유입조건을 확인하고, 풍속/풍향에 의한 기류의 영향과 일사량 등의 영향을 종합적으로 수집할 수 있어야 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실증시험시설

3.1.1. 실증시험시설 설계

본 연구에서는 표층처분시설 노화에 대한 실험적 자료 수집을 위하여 표층처분시설 경사면을 일부 분할한 형태의 실증실험시설의 설계내용을 기술하였다. 실증시험시설은 실제 표층처분시설의 1/4 규모로, 3면에 옹벽을 설치하여 경사면을 모사하였으며, 설계 유입유량 32 mm yr^{-1} [12]를 고려한 다중복토층으로 설계하였다(Fig. 3, Table 3) [13,14].

3.1.2. 실증시험시설 시공

실증시험시설은 3 m 잡석 치환 기초 상부에 하부 수조구축 공사와 옹벽 공사 순으로 시공하였으며, 옹벽에는 복토층별 매설계측기(FDR, 경사계) 등의 배선작업 효율성 확보를 위하여 배선 공간을 마련하였다. 온도센서와 음향센서 보호를 위한 케이싱 작업을 수행한 후 처분덮개 시공을 수행하였으며, FDR 센서와 경사계는 총 높이의 절반 높이에 매설하였다. 최상단 표토층 시공 후 복토층의 유실 최소

Table 2. Information of the measuring items

Measuring items	Instrument
Temperature, penetration water movement direction	Temperature sensor
Humidity, EC	FDR sensor
Velocity of the displacement	Acoustic sensor
Slope	Inclinometer
Released amount of the penetration water	Flowmeter
Temperature, humidity, wind direction/speed, solar radiation, rainfall	Meteorological reconnaissance aircraft

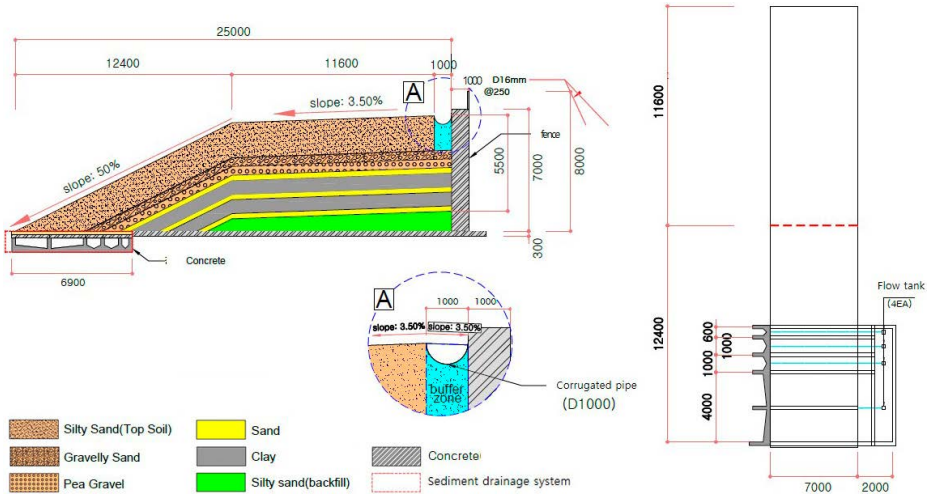

Fig. 3. Design drawing of verification test facility.

Table 3. Information of the multi-layer material condition

Material	Sieve size [mm]	Penetration ratio [%]	Consideration
Silty sand	Maximum particle diameter < 19 mm		- ASTM D 2487, silty sand - Dry density > 1.5 t m^{-2} - Porosity < 42% - No humulite - Low absorptiveness - Low compressibility
Gravelly sand	19.05	100	- ASTM D 2487 - No organic matter - Percentage of abrasion < 40%
	9.53	75~100	
	4.76	55~100	
	2.00	35~95	
	0.85	20~80	
	0.43	10~5	
	0.15	0~2	
Pea gravel	9.53	100	
	4.76	0~5	
Sand	9.53	100	- ASTM D 2487 - No fine grained soil - Good drainage - Permeability coefficient > 3×10^{-3} cm sec^{-1}
	4.76	95~100	
	2.36	80~95	
	1.18	50~85	
	0.60	5~60	
	0.30	5~30	
	0.15	0~10	
Clay	4.75	90	- Maximum particle diameter < 25 mm - Liquid limit > 30% - Plasticity index 10~30% - Permeability coefficient < × 10^{-7} cm sec^{-1} - Bentonite replacement (Monmorillonite content > 70%, swelling > 24 mL g^{-1})
	0.075	50	

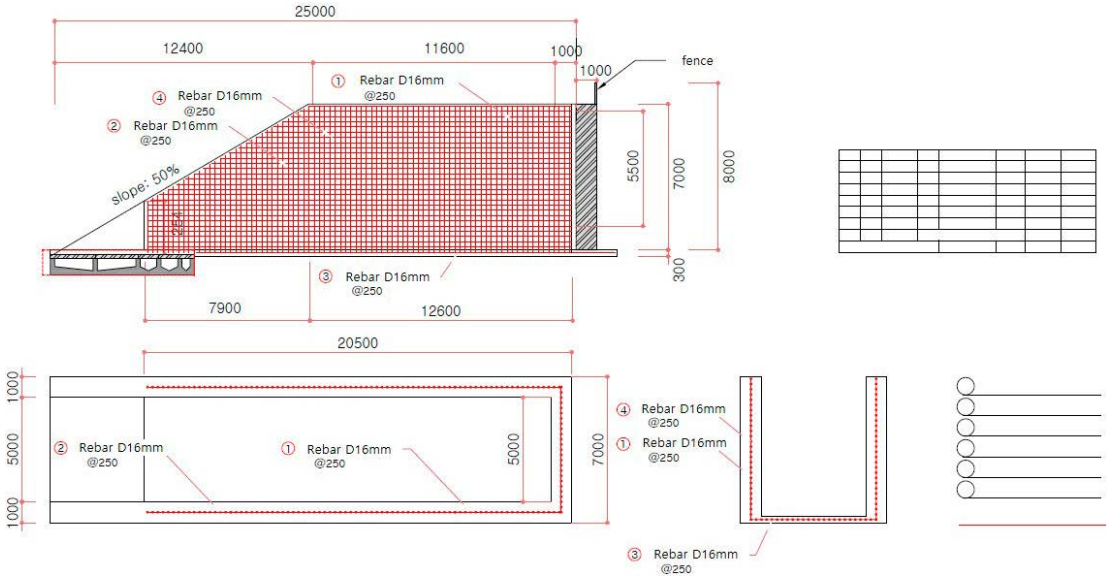

Fig. 4. Design drawing of retaining wall.

Fig. 5. Monitoring room.

Fig. 6. Panoramic view of the facility.

화를 위하여 잔디를 시공하였으며, 시험시설 측면에 위치한 수조 관리와 각종 모니터링 장비를 운용하기 위한 모니터링실을 시공하였다(Figs. 4~6).

3.2. 통합 모니터링 시스템

3.2.1. 계측기기 설치

실증시험시설에 사용된 계측기는 온도센서 402개, FDR 센서 16개, 음향센서 1개, 유량계 4개, 경사계 3개 및 기상관측기 1개이며[15,16], 각 장비가 설치된 위치를 Fig. 7에 나타내었다. 다점온도계측기(TLS, Thermal line sensor)는 10 cm 간격으로 온도를 계측할 수 있도록 파이프 내부에 설치하였으며, 온도 변화로 인한 침투수의 유동 깊이, 유동

의 방향, 변형/변위 현상을 직·간접적으로 추정할 수 있도록 하였다(Table 4). 또한 토양의 습도를 100%까지 계측할 수 있는 FDR 센서와 X-Y축 경사를 측정하는 경사계는 매립에 의한 파손 방지를 위하여 별도의 금속 하우징을 제작하여 매립하였다(Fig. 8).

변위 계측을 위한 음향 모니터링 계측기는 토사 내 압력 변화에 의하여 발생하는 음향 발생 빈도를 계측하여 변위의 속도를 산출하는 방식의 계측 방법이 적용된 장비를 활용하였으며[17], 지하수에 의한 물리적 현상과의 분류를 위해 음향 모니터링 계측기가 설치된 위치에 다점온도센서를 함께 설치하였다[18]. 공학적 방벽 덮개로 침투된 강우의 수량을 측정하기 위한 장비는 Tipping spoon 계측 방식의 유량계를 사용하였으며, 마지막으로 기상 관측기의 경우, 강우량을 0.2 mm 단위로 측정할 수 있으며, 계측 온도 0.1°C와 상대습도 1~100% 범위를 계측할 수 있고, 1° 단위의 풍향과, 0.1 m s^{-1} 단위의 풍속, 1 W m^{-2} 단위의 일사량 측정 능력을 보유한 장비를 설치하였다.

3.2.2. 지능형 감시 시스템 설계

본 연구에서는 공학적 방벽 다중복토층의 성능 유지 상태의 실시간 감시를 위하여 강우, 침투수량, 사면의 변형 등의 변수를 계측하고 안전성을 예측하기 위한 지능형 감시 시스템을 설계하였다[19]. 시스템은 데이터의 취득과 취득된 데이터의 전처리 과정, 목표의 예측 그리고 경고를 알리는 프로세스로 구성되어 있으며, 가상물리시스템

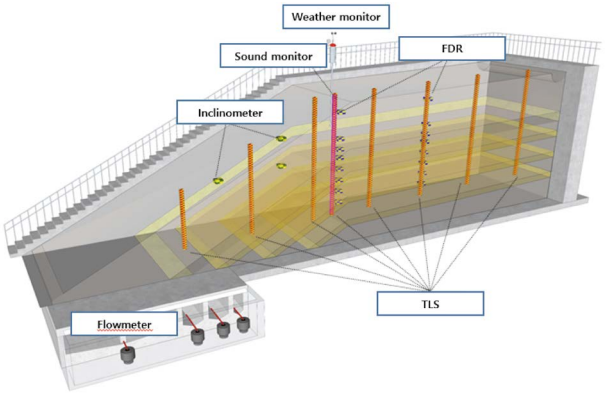

Fig. 7. Measuring item installation.

Fig. 8. Measuring item.

Table 4. Range, accuracy and cycle of measurement target

Factor	Resolution	Measurement range	Accuracy	Measurement period
Wind direction	1°	0~360°	±3°	2.5 sec
Wind speed	0.447 m s^{-1}	0.4~89.4 m s^{-1}	±0.89 m s^{-1}	2.5 sec
Outside temperature	0.1°C	−40~65°C	±0.5°C	10 sec
Outside humidity	1% RH	1~100% RH	±3%	25 sec
Rainfall	0.2 mm	0~999.8 mm	±3%	10 sec
Solar irradiance	1 W m^{-2}	0~1,800 W m^{-2}	±5% FS	50 sec

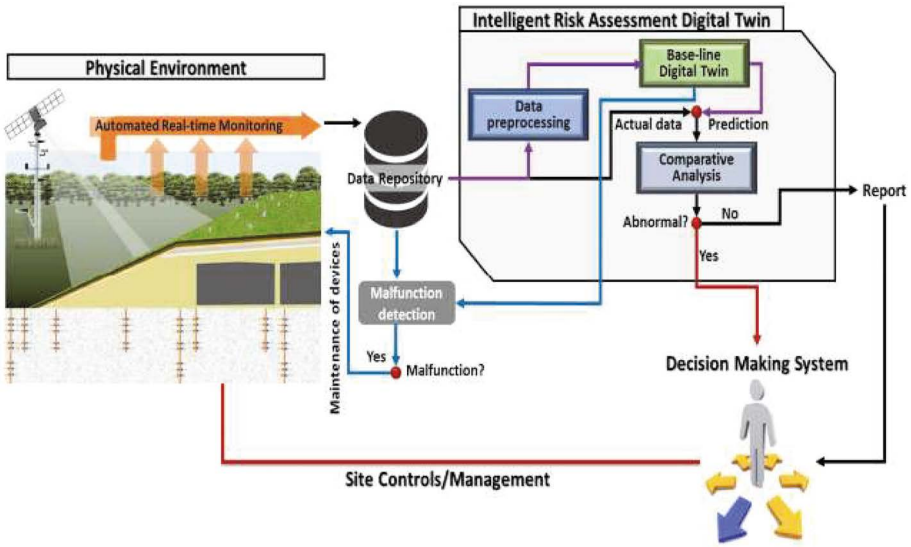

Fig. 9. System design information.

(Cyper-Physical system, CPS)을 기반으로 한다(Fig. 9).

3.2.3. 통합모니터링 시스템 설계

통합 모니터링 시스템의 구축을 위하여 앞서 기술한 계측 기기와 함께 터미널 11기(온도센서 5기, FDR/경사계 5기, 유량계 1기)와 데이터 취득 서버 1기와 3차원 모니터링 시스템(Database 서버 1기, 웹 서버 1기, 시스템 접속용 PC 1기)을 구성하였다. 따라서 본 연구에서 구축한 모니터링 시스템은 데이터의 수집과 처리, 분석, 표현 등을 복합적으로 구현할 수 있는 시스템으로 정의할 수 있다(Fig. 10).

기상 관측기를 제외한 모든 센서의 연결은 동일한 입력 전원과 통신 방식을 가질 수 있도록 터미널을 제작하여 설치하였으며, ① 계측기 모니터링 컴퓨터, ② SDL (Soam Data Logger) interface, ③ 터미널, ④ 계측기로 구성된 모터터링 시스템을 구축하였다. T/T (Thermal line Sensor/Terminal)는 온도센서 터미널을, FDR/T (FDR/Terminal)는 토양수분센서 터미널을, INC/T (Inclinometer/Terminal)는 경사센서 터미널을, AEMOT/T (AEMO Thermal line seonsor/Terminal)는 음향센서용 온도센서 터미널을 의미한다.

통합 모니터링 시스템은 앞서 기술된 하드웨어에 더하여 사용자 친화적인 사용 환경으로 구축하였으며, 소프트웨어의 표준화, 품질, 재사용성 등을 보장하기 위하여 정부에서 제시하는 표준 프레임워크를 사용하였다. 시스템 실

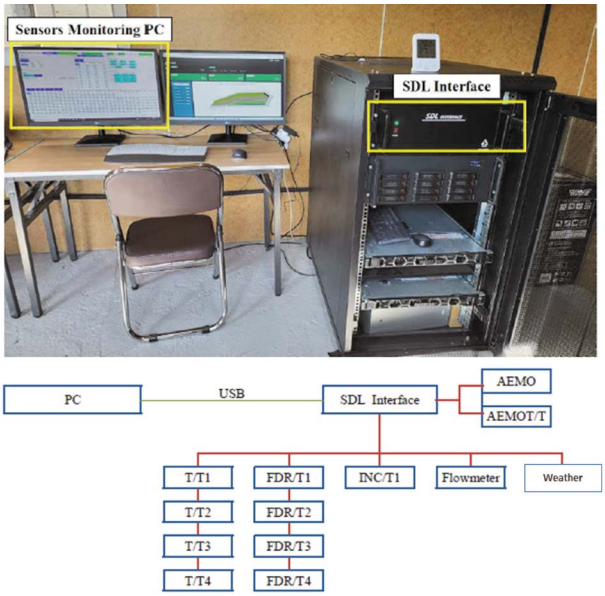

Fig. 10. Measuring item connection detail.

행환경 조성을 위하여 구성된 계층(Layer)은 5개 층(① 사용자에게 제공하는 화면 요소 표현 및 데이터를 변환하는 Presentation layer, ② 모니터링 로직을 수행하는 Business layer, ③ 어플리케이션 수행을 위한 데이터의 수집과 생성을 담당하는 Persistence layer, ④ 타 모듈과의 연동을 담당하는 Integration layer, ⑤ 공통 사용기능을 제공하는 Foundation layer)으로 구성하였으며, 모듈별 개발 언어는 JAVA/JSP와 Pyhton을 활용하였다.

Table 5. Facility status information

No	Item	Information
1	Overall state	Comprehensive normal/caution/warning indications
2	Communication status	Displays the number of unconnected buried sensors
3	Water content effect	Determining facility safety with slope safety prediction module
4	Slope change	Safety determination through acoustic sensor data
5	Slope safety	Determining facility safety through predicted values
6	Weather conditions	Real-time weather condition
7	Model panel	3D model control panel
8	3D model	3D image of facility

Fig. 11. 3D monitoring system main GUI.

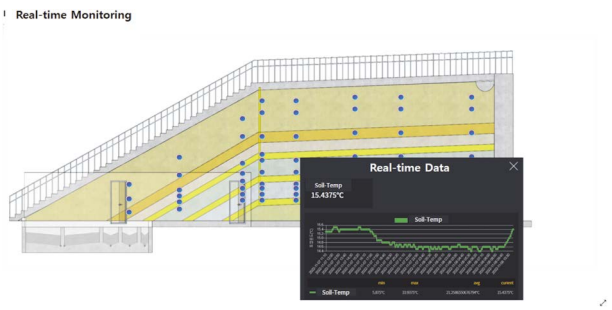

Fig. 12. 3D monitoring system main GUI.

3.2.4. 3차원 모니터링 시스템의 운영

3차원 모니터링 시스템은 지능형 감시 시스템과 통합 모니터링 시스템을 결합하여 실시간 감시 엔진을 통해 관리자가 사전에 설정한 기준으로 정상 여부를 판단하는 분석 과정을 거쳐 현재 상태에 대한 시각화 정보로 사용자에게 그 결과를 알려준다(Fig. 11).

Table 5에는 시설의 현황과 항목별 정보를 기술하였다. 총 8가지 항목에 대한 상태가 표시되며, 해당 정보는 계측 데이터와 예측 데이터를 통하여 시설 안전성에 대한 정보를 실시간으로 확인할 수 있도록 표현된다. 또한 사용자가

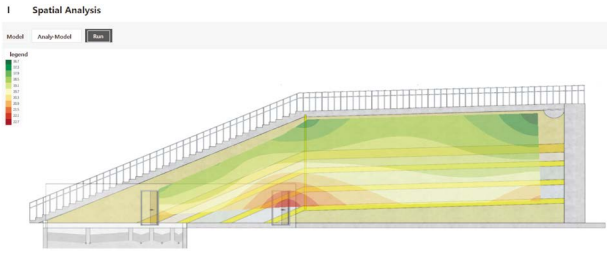

Fig. 13. Spatial analysis model expression screen.

원하는 시점에서 온도, FDR, 경사계 음향계의 실시간 정보를 확인할 수 있다(Fig. 12). 또한 시각화 기능을 통하여 실증시험시설 이미지에 지수, 가우스, 구형으로 표현된 시각화 분석 화면을 확인할 수 있다(Fig. 13). 본 시설은 약 1년간 시범운영 기간을 거친 후 정상 운영을 할 계획에 있으며, 운영 중 발생하는 데이터를 수집, 분석을 통하여 본 시설의 건전성을 확인하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 중·저준위 방사성폐기물의 처분을 위한 표층처분시설을 구성하는 공학적 방벽의 상태를 실시간으로 파악하고 분석하기 위한 실증시험시설의 설계와 구축 기술에 대하여 기술하였다. 표층처분시설을 인간 생활권으로부터 영구적으로 폐쇄하는 방법으로 널리 사용되는 공학적 방벽 처분덮개는 그 구성과 형태의 특성에 따라 유실, 소산 등의 상태변형이 쉽게 발생할 수 있다.

본 연구에서 제시한 실증시험시설에 적용된 기술은 이러한 공학적 방벽 처분덮개의 상태를 실시간으로 파악할 수 있으며 예견된 위험을 사전에 예측할 수 있는 기술로써, 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분장에 건설 예정인 표층

처분시설에 적용하여 방사성폐기물의 안전한 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 더하여 해당 기술은 현재 원자력발전소를 적극 운영중인 국외 기술시장에서도 충분한 활용도가 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 에너지기술평가원(KETEP)의 "표층처분시설의 공학적 방벽 장기성능 검증 기술 개발" 과제(과제번호: 20193210100130)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Atomic Energy Agency. 2014. Near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA Specific safety Guide, No. SSG-29, International Atomic Energy Agency, pp. 51-56.
2. International Atomic Energy Agency. 2001. Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1256, International Atomic Energy Agency, pp. 20-26.
3. Jacques D, Leterme B, Beerten K, Schneider S, Finke P and Mallants D. 2010. Long-term evolution of the multi-layer cover. NIROND-TR 2010-03E, ONDRAF/NIRAS, pp. 13-19.
4. Jeong J, Kwon M and Park E. 2018. Safety Assessment of Near Surface Disposal Facility for Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste (LILW) through Multiphase-Fluid Simulations Based on Various Scenarios. *Econ. Environ. Geol.* **51**(2):131-147. https://doi.org/10.9719/EEG.2018.51.2.131.
5. Ha J, Lee J and Yoon J. 2017. Simulation of Unsaturated Fluid Flow on the 2nd Phase Facility at the Wolsong LILW Disposal Center. *J. Nucl. Fuel Cycle And Waste Technol.* **15**(3):219-230. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2017.15.3.219.
6. Jeong MS, Yi J, Ahn J and Jun S. 2021. Development of Monitoring System based on Cyber Physical System for Long-Term Performance Assessment of Near Surface Disposal Facility. Joint Fall Meeting of Korean Geological Societies, pp. 335-335.
7. Korea Radioactive Waste Agency. 2016. Low- and Intermediate level Radioactive waste 2nd repository Safety Analysis Report. 1st ed. Korea Radioactive Waste Agency.
8. Bhatt RN and Porro I. 1998. Evaluation of engineered barriers at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/CON-97-00968, Idaho National Engineering and Environmental Lab.
9. Cartwright K, Larson TH, Herzog BL, Johnson TM, Albrecht KA, Moffett DL and Stohr CJ. 1987. A study of trench covers to minimize infiltration at waste disposal sites, NUREG/CR-2478-VOL. 3, Illinois State Geological Survey.
10. International Atomic Energy Agency. 2001. Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1256, International Atomic Energy Agency, pp. 8-18.
11. US EPA. 1989. Technical Design Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments, EPA-530-SW-89-047, US EPA, pp. 33-34.
12. Kwon MJ, Kang HG and Cho CH. 2021. Study on Rainfall Infiltration into Vault of Near-surface Disposal Facility based on Various Disposal Scenarios. *J. Nucl. Fuel Cycle And Waste Technol.* **19**(4):503-515. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2021.042.
13. Rhee CG, Lee EY, Park SM, Kim CL and Yeom YS. 2001. A Conceptual Design on Performance Test Facility of Disposal Cover for the Near Surface Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste. *J. Eng. Geol.* **11**(3):245-254. https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200111920895872&oCn=JAKO200111920895872&dbt=JAKO&journal=NJOU00291704.
14. Chang KM, Park JW, Yoon JH, Park HJ and Kim CL. 2000. Water Balance Evaluation of Final Closure Cover for Near- surface Radioactive Wastes Disposal Facility. *Nucl. Eng. Technol.* **32**(3):274-282. https://koreascience.kr/article/JAKO200011921633548.
15. INTERGRATE Maxim. 2008. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, Manual Documents, INTERGRATE Maxim.
16. KORINS. 2011. 2010/2011 Catalog (DAVIS-KORINS) meteorlogical measuring instruments, Manual Documents, KORINS: 235-236.
17. Physical Acoustic Corporation, R6α Sensor General Purpose, 60 kHz Resonant Frequency Acoustic Emission Sensor, Manual Documents, Physical Acoustic Corporation.
18. Nam JW. 2015. Experimental Study on Temperature-Moisture Combined Measurement System for Slope Failure Monitoring. *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.* **19**(2):33-39. https://doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.2.033.
19. Kim YH, Park HJ, Jeong J, Park EG, Gwon GJ, Kwon MJ and Park CH. 2020. Development of Probabilistic Estimation System for Long-term Performance Verification of Multilayer Covers in Nearsurface LILW Disposal Facility,Korean Engineering Geology Society, Proceding of the Geological Society of Korea, pp. 253-253.