RENO 실험을 위한 지하검출시설 구축

DOI: 10.3938/PhiT.19.054

김재률·박인곤·김성현

Construction of Underground Detection Facility for RENO

Jaeyool KIM, Ingon PARK and Sunghyun KIM

The RENO experiment is to measure the neutrino oscillation parameter, θ_{13} using the neutrino emitted from the Yonggwang reactors. The RENO detectors should be located underground in order to reduce backgrounds from cosmic rays and cosmic ray induced spallation products. A near detector will be located at underground of a 70 m high hill inside the Yonggwang power plant, and a far detector at underground of a 260 m high mountain. In this article, we describe construction of the underground facility including geological site survey, tunnel design and tunnel excavation.

개요

중성미자는 물질과의 상호작용이 매우 작다. 이러한 중성미자 검출시설은 우주선과 같은 외부의 배경신호로부터 구별하기 위해서 주로 지하공간에 설치된다. 이러한 중성미자 지하검출시설은 일본 기후현 Kamioka, 이탈리아 아브루주

저자약력

김재률 교수는 고려대학교 이학박사(1984년)로서 미국 Fermilab., 오히이오 주립대학, 일본 고에너지가속기연구기구(KEK), 스위스 CERN의 연구교수를 거쳐 1979년부터 전남대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. 중성미자 물리, SUSY입자 탐색 등의 연구를 수행하고 있다. (yoolkim@chonnam.ac.kr)

박인곤 교수는 고려대학교 이학박사(1987년)로서 미국 루이지애나 주립대학, 일본 나고야대학 연구교수를 거쳤으며, 1983년부터 경상대학교 물리교육학과에서 교수로 재직 중이다. 중성미자 등의 연구를 수행하고 있다. (igpark@gnu.ac.kr)

김성현 박사는 충남대학교 이학박사(1994년)로써 中國科學院高能物理研究所 Post Doc.을 거쳐 경상대학교, 전남대학교 연구교수를 역임하였고, 일본 기후 및 나고야 대학, 이탈리아 국립핵연구기구(INFN) 그랑사소연구소(LNGS) 방문연구원을 거쳐 현재 전남대학교 우주소립자연구소의 연구원으로 재직 중이다. (kimsh33kr@gmail.com)

Gran Sasso, 캐나다 온타리오주 Sudbury, 미국 미네소타주 Soudan, 미국 사우스다코다주 Homestake 등이 있다. 또한 원자력발전소 중성미자 지하관측시설로서 프랑스의 Double Chooz^[1]와 중국의 Daya Bay가 건설 중에 있다. RENO^[2] 연구팀은 2006년부터 영광원전 부근에 중성미자검출설비구축을 시작하였다. 이 지하시설 구축을 위하여 전남 영광군 원자력발전소 부근의 두 곳에 길이 300 m와 100 m 수평터널을 건설하였다. 지하터널시설 공사는 입지선정, 인허가, 지반조사, 터널 설계 후에 2008년 6월 25일 착공을 하여 2009년 2월에 공정을 마무리하였다. 터널은 2대의 동일한 검출기를 원자로 중심에서부터 근거리(약 294 m), 원거리(약 1.38 km) 지하공간에 설치하기 위해서이다. 근거리검출기는 원자력 발전소 내부에 위치한 동산 70 m 정상부로부터 수직아래 46.1 m 지하에, 원거리검출기는 발전소 바깥에 위치한 200 m 산의 정상부로부터 수직아래 168.1 m 지하에 건설되었다.

우리가 구축한 지하검출터널시설은 특별한 구조물을 만들지 않고 자연 암반상태에 가까운 조건으로 만들어지기 때문에 터널의 안정성이 중요하다. 본 터널은 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법에 의해서 설계되었다. 터널 지반의 불균일한 성질 및 환경조건, 하중조건 및 굴착 중에 발생할 수 있는 주변의 구조물과 지반과의 상호작용을 시뮬레이션 및 수치해석으로 설계 기준을 정하였다. 터널공정에 투입된 총 연인원은 약 4,200명, 장비투입량 800대, 철근 24,000톤, 록볼트 2,400여 개, 굴착화약 27톤의 물량이 투입된 공사였다.

지반조사 및 터널설계

1. 지반조사

광역적 지질특성: 영광터널이 위치한 곳의 암석의 종류는 한국지질자원연구원의 지질도(영광도폭 1:50,000 축척)를 통해서 알 수 있었다. 그림 1의 영광지역 지질도에 나타내어져

REFERENCES

- [1] F. Ardellier *et al.*, Double Chooz Proposal, hep-ex/0606025 (2006).
- [2] J. K. Ahn *et al.*, RENO Proposal, hep-ex/1003.1391 (2010).

Fig. 1. A geological map of Yonggwang area. The RENO tunnel site is marked by a circle in the map.

있는 것처럼 분류된 암석의 종류는 캄브리아기 화강편마암을 기반으로 주라기 심성암을 부정합으로 피복하고 있는 백악기 화산암류, 제4기 충적층으로 구성되며, 터널이 위치할 지역은 백악기의 산성화산암류 위에 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다. 산성화산암류는 응회암 및 응회암질 화산암으로 구성되었다.

지반조사: 2007년 5월에 지반조사를 수행하였으며, 지반조사는 시추조사, 물리탐사, 현장시험, 실내시험으로 이루어졌다. 시추조사 결과 지반은 예측한 대로 주로 응회암질 화산암으로 구성되어 있었다. 물리탐사에서는 탄성과 및 전기비저항을 측정하였다. 근거리터널 갱구부에서 탄성파의 속도분포는 풍화도층 700 m/sec 이하, 풍화암 700~1,200 m/sec, 기반암은 1,200 m/sec 이상의 속도로 분포한다. 이를 통하여 토층은 1 m 내외로 낮게 분포하며 하부에 기반암(연암)이 분포함을 알 수 있었다. 원거리의 경우는 토사층은 12 m 깊이로 존재하고, 하부 풍화대가 5.0 m 심도로 하부 기반암과 같이 분포함을 알 수 있었다. 원거리, 근거리에서 전기비저항 탐사 결과를 보면 전반적으로 4층의 구조를 보이고 100~3,000 Ω -m 내외의 비저항대가 분포함을 알 수 있었다. 연구터널이 위치하는 터널의 종점은 대체로 2,000 Ω -m 이상의 양호한 암질분포를 보일 것으로 예측되었으며 대체적으로 신선한 암반으로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 지질조사결과를 토대로 터널암반의 등급을 산출하였으며 이를 그림 2에 나타내었다. 전체적으로 1, 2등급의 양호한 암반상태를 보여주고 있다.

2. 터널설계

터널구성: 터널은 검출기가 설치될 확폭터널과 검출기 지원 시설을 위한 연구터널, 그리고 진입터널로 구성되었는데 이들의 길이 및 배치는 그림 3에 나타내었다.

터널안정성: 터널시공 전에 각종 지질 및 지반조사로 안정한 지보 공법패턴을 설계하였다. 또한 시뮬레이션을 사용하여 터널의 안정성을 검증하였다. 지보패턴별 터널변위 및 지보재

Fig. 2. Rock classification maps of the near(top) and far(bottom) detector sites along the access tunnels.

Fig. 3. A schematic design of the tunnel. The access tunnels are 95 m and 272 m long for near and far detector site respectively.

의 응력해석은 2차원 해석프로그램인 FLAC2D를 사용하였고 접속부의 변위 및 응력해석은 3차원 해석프로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다. 암반의 이완으로 발생하는 하중은 터널 지보재에 압력으로 작용하며 이러한 지보압을 터널에 시공될 슛크리트, 록볼트에 산정하고 표준지보패턴의 적정성을 고려하여 터널의 안정성 평가를 수행하였다.

지하검출시설의 건설

1. 터널건설

갱구부 건설: 산지에 건설되는 대부분 갱구부 지층은 경사면으로 이루어져 있다. 원거리의 경우 주로 토사 및 풍화암

Fig. 4. Pictorial view of the completed access tunnel. The tunnel width and height are 4.45 m and 4.48 m respectively. A ventilation system and an electric cable duct are installed along the access tunnel.

Fig. 5. A possible area in the near cite which can be affected by excavation blasting.

로 이루어져서 조심스럽게 굴착하였다. 그 지역은 자연녹지지역이어서 환경친화적이고 자연훼손을 최소화할 수 있는 방법인 면벽식 갱구부로 입구를 시공하였다. 특히 갱구부는 터널 굴착 작업의 시작점으로 지질 특성상 풍화토의 붕괴 위험이 큰 부분이다. 이러한 시공상의 특징 때문에 굴착면의 사면에 강지보재 보강을 특별히 수행하였다. 근거리터널은 터널의 시작점인 갱구부의 지형이 풍화토 및 붕괴토가 형성되어 있지 않아서 갱문설치 작업이 용이하였고 공정은 원거리 터널과 동일하게 시행되었다.

진입터널 및 연구터널: 2008년 7월에 본격적인 터널굴착 작업이 시작되었다. 굴착으로는 전단면 굴착을 하였으며 터널 굴진과 동시에 진행되는 보강을 위해서 NATM 공법이 적용되었다. 진입터널과 연구터널 분기점의 굴착과정에서는 단면 형태가 서로 같으나 터널이 직교하여 단면의 안전성 관계로 굴착에 특별히 유의하였고, 근거리의 경우도 동일하게 수행되었다. 굴착은 천공, 장약, 발파, 쇄석제거 공정의 반복적인 과정

Fig. 6. Construction of an experimental hall. A cylindrical concrete container of 8.4 m in diameter and 9 m in height is shown (right).

으로 진행되었으며 터널의 종단경사는 주행의 안정성, 환기의 효율성, 방재설비, 배수 등을 고려하여 결정하였다. 진입터널의 경우에는 하향 0.3%이어서 길이가 약 290 m인 원거리 터널입구에서 터널 끝까지의 표고차가 거의 30 cm이다. 완공된 진입터널의 모습이 그림 4에 나타나 있다.

발파진동의 영향평가: 터널굴착에 사용되는 폭약의 발파진동에 의해서 원전가동에 절대로 영향을 미치지 않아야 한다. 따라서 발전소 지진트리거의 진동가속도(g) 설정치(0.01 g)의 1/2 이내인 0.005 g에서 진동제한을 규정하여 진동설계를 실시하였다. 특히 근거리 터널굴착이 진행됨에 따라 원자로와 가까워져 점점 더 진동이 커져서 이를 제한할 수 있는 진동치를 정하는 것이 중요하였다. 진동계 및 지진계를 설치한 모습이 그림 5에 나타내어져 있다. 시험발파에서 제시된 1회 연속발파 화약량 2 kg에서 측정된 지진계의 값이 약 0.002 g로서 제한값인 0.005 g 값에 미치지 않았고, 특히 원전의 지진트리거 장치에 감지되지 않아서 근거리에서 굴착작업을 무사히 마칠 수 있었다.

확폭터널 및 수직터널: 확폭터널은 진입터널 종점에서부터 완만한 확폭으로 굴착하여 길이 22 m, 폭 12 m, 높이 7 m인 공간으로 굴착되었다. 이 확폭터널 밑으로 수직터널을 굴착하였고, 이 수직터널에는 직경 8.4 m, 깊이 9 m인 40 cm 두께의 콘크리트 수조를 만들어 Veto 검출기로 사용하였다. 시공시에 앵커볼트 연결체를 콘크리트 수조 바닥에 설치하여 콘크리트를 타설하였다. 시공과정이 그림 6의 왼쪽에 보여주고 있다. 오른쪽 그림은 수직터널에 설치된 Veto 검출기용 수조의 완성된 모습이다.

Fig. 7. Ventilation duct inside tunnel(top) and shutter system in the tunnel entrance(bottom).

2. 검출설비 부대시설

전기설비 및 전기 안전시스템 운용: 검출시설의 인입전기는 특 고압 22,900 V(3Φ 4 W, 60 Hz)의 전원을 380 V 전원으로 변압하여 사용하는 시스템이며, 이러한 인입계통 때문에 자체적인 무인고압수배전반을 설치하였다. 인입전기는 4개 분전반으로 분기되었다. 전기안전설계기준은 전기사업법 및 동법시행령, 전기설비판단기준(전기설비기술기준) 내선규정, 한국산업규격(KSA-3701,3703, 조도기준)과 소방시설설치유지 안전규정에 의거하였으며 실제 허용전기용량은 90 kW로 설계되었다. 안전시스템인 누전차단기는 정격감도전류 15 mA, 동작시간 0.03초를 기준으로 설치하였다. 전기안전시스템을 위한 접지 및 피뢰침도 설치하였다.

기타시설: 환기설비(그림 7 위 사진)는 터널이 폐쇄적 공간 구조이고 라돈 위험성 때문에 근거리에서는 2.2 kW, 원거리에서는 3.7 kW의 SIROCO팬 형태의 급배기시설을 갖추어 연구원들의 쾌적한 작업공간을 구성하였다. 또한 중요 검출시설의 방호를 위해서 자동식 셔터문을 설치하였다(그림 7 아래 사진). Veto 검출기에 물을 채울 수도시설은 원거리에서는 터널 근처에 기존의 우물에서 물을 공급하며 근거리는 원전의

Fig. 8. Water purification system by water supply.

Fig. 9. Research cabins in front of tunnel gate.

산업용수를 통하여 물을 공급하고 있다. 검출기 설비 중 필요한 터널 내의 통신시설은 초고속 인터넷 망을 기본으로 하며, 터널 내부가 휴대폰 전파에 취약하여 증계시설을 설치하였다. 또한 확폭터널 내에 검출기 설치 중 클린룸(clean room)을 설치하여 발생하는 먼지를 최소화하였다.

검출기 부품의 세척과 비토검출기에 사용되는 깨끗한 물을 만들기 위하여 그림 8에서처럼 3차 증류수를 생산하는 정수장치를 연구터널 내에 설치하였다. 이외에도 그림 9에서처럼 터널 입구에 연구원들을 위한 컨테이너 타입의 연구동 2동을 설치하였다.

맺음말

국내 최초로 중성미자 연구를 위한 지하검출시설을 성공적으로 건설하였다. 다른 검출시설에 비해 적은 비용으로 연구에 적합한 지하시설을 구축하는데 최선을 다하였다. 이 지하시설에서 두 대의 중성미자검출기가 거의 완공되어 가고 있으며 2011년 초부터 실험을 시작하게 될 것이다.