

국내 최초의 중저준위 방사성폐기물 지하공동 처분장 건설 프로젝트



서경원
대우건설
기술연구원
선임연구원



백기현
대우건설
기술연구원
책임연구원



김수정
방사성폐기물관리공단
차장

I. 프로젝트 개요

경북 경주시 양북면에 위치한 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 1단계 주설비공사(이하 ‘방폐장’으로 함)는 국내 최초의 방폐장으로서 총 80만 드럼의 폐기물을 처분하는 규모 중 10만 드럼 규모의 시설이다.

동굴처분방식은 EL. -80~-130m 암반 내 동굴 굴착 후 처분하는 방식으로 자연방벽을 이용하여 방사성폐기물을 인간생활권으로부터 완전 격리하는 시설이다.

주요시설에는 지상에는 인수저장건물, 폐기물건물, 지원건물 등 9개 동이 있고, 지하에는 건설동굴, 운영동굴, 하역동굴 있으며, 방사성폐기물의 저장 시설인 사일로가 6기 있으며 각각의 제원은 다음과 같다(그림 1 참조). 특히 사일로는 높이 50m 폭 30m로서 아파트 20층 규모이다.

- 수 직 구 : 207m(D9m)
- 하역동굴 : 360m(폭 9.5m×높이 9.5m)
- 사일로 : 6개
 - 상부돔 : D27.3m×H15m
 - 바디 : D23.6m×H35m

- 건설동굴 : 1,950m(폭 7.2m×높이 6.5m)
- 운영동굴 : 1,415m(폭 7.2m×높이 6.5m)



그림 1. 방사성폐기물 지하공동 처분장 개요

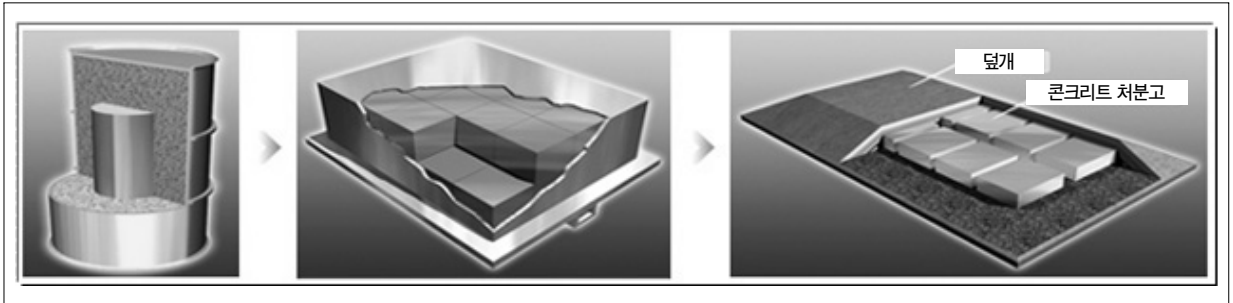


그림 2. 천층처분 방식에 의한 방폐물 처분

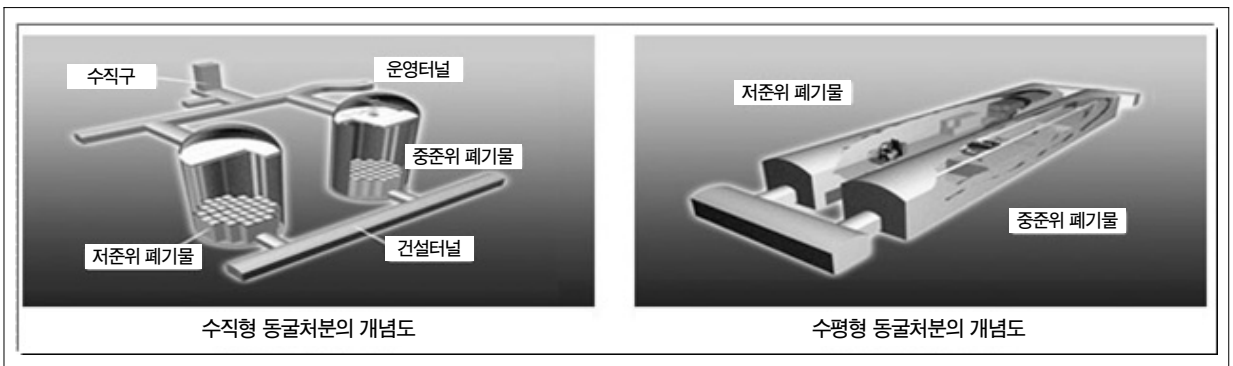


그림 3. 동굴처분 방식에 의한 방폐물 처분

건설동굴은 사일로 굴착시 바디부의 버력처리와 2단계 확장공사시의 진입로 역할을 위함이며 사일로 바디부까지 약 11°의 경사를 갖는 구조물이다. 운영동굴은 사일로 돛부 굴착 및 운영시 지상지원시설에서 처리된 중저준위 폐기물을 사일로에 적치하기 위한 장비 진출입 역할을 하게 되는데 약 10°의 경사로 사일로 상부에 도달하게 된다.

수직구는 운영후 배수, 각종 배관 및 점검용 진출입로 역할을 하게 되며, 하역동굴은 사일로 굴착을 위한 통로 및 운영시에 폐기물 적치를 위한 통로 역할을 하게 된다.

본 공사는 2007년 갱구부 토공작업 착수 이후 2010년 6월 지상지원시설을 완공하였으며 지난 2010년 12월 울진원자력발전소의 방사성폐기물 1,000드럼을 입고 완료하여 최초로 방사성폐기물처분시설의 본격운영을 시작하

게 되었다. 사일로 구조물을 포함한 전체 구조물은 2012년 12월 완공예정이며 현재 74%의 공정율을 보이고 있다.

중저준위 방사성 폐기물의 처리는 크게 천층처분과 동굴 처분이 있는데 암반 상태가 양호한 핀란드, 스웨덴 등에서는 동굴처분 방식으로 처분하고 있으며 영국, 미국, 스페인, 일본 등에서는 천층처분 방식으로 처분하고 있다 (그림 2 참조).

동굴처분방식에는 그림 3과 같이 수평동굴을 굴착하여 적치하는 수평형 동굴처분과, 수직형 동굴을 굴착하여 한 곳에 집중 적치하는 수직형 동굴처분 방식이 있는데 본 프로젝트는 그림 3의 좌측과 같은 수직형 동굴 처분 방식으로 진행되고 있다.

2. 프로젝트 특징

2.1 지질조건

방폐장 및 국도터널 지역의 지반은 백악기 퇴적암류를 제3기의 화강섬록암이 관입한 형태로서 화강섬록암 주변은 이암, 실트스톤, 사암의 호층으로 구성되어 있다. 방폐장 부지는 대부분 화강섬록암과 섬록암, 흑운모화강암으로 구성되어 있다. 실내 및 현장실험 결과 변형계수는 $500,000\text{tf}/\text{m}^2 \sim 3,000,000\text{tf}/\text{m}^2$ 의 범위이며 일축압축강도는 $1,138\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 1,995\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 범위이며 점착력은 평균 $178\text{tf}/\text{m}^2$, 내부마찰각은 58° 의 값을 갖는다. 그림 4에는 방폐장 부지의 광역지질도를 나타내었다.

2.2 설계 및 시공특징

방폐장 진입동굴 및 사일로는 NATM으로 시공되는 구조물로서 일반 도로터널과 비교해서 다음과 같은 특징이 있다(그림 5 참조).

① 우선 건설(1,950m) 및 운영동굴(1,415m)은 전 구간

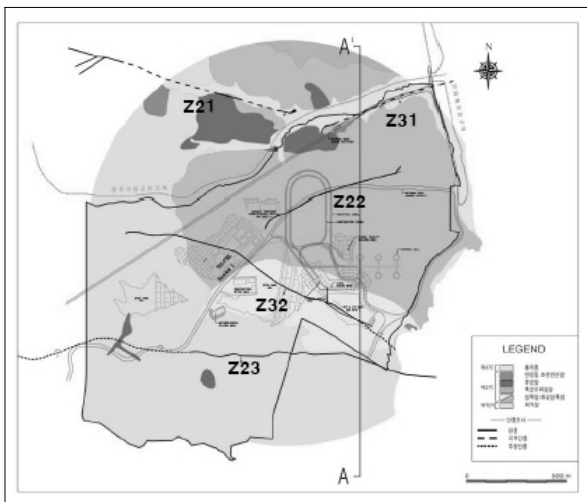


그림 4. 방사성폐기물 처분장의 광역지질도

이 $10 \sim 11^\circ$ 의 하향경사 구조이므로 중장비의 이동에 매우 불리한 조건을 갖고 있다.

② 또한, 하향경사의 동굴이므로 유출된 지하수가 모두 막장에 집중되고 있어 도로터널에 비해 배수계획이 매우 중요하다. 건설, 운영동굴 및 수직구에는 각각의 유량계를 설치하여 각 동굴에서 배출되는 지하수를 모니터링 하였다. 또한, 본 시설은 바다 인근에 위치하고 있어 해수의 침투 등에 대한 모니터링이 매우 중요하며 해안가 및 부지내에 지하수위 관측 및 성분 검사를 주기적으로 실시하였다.

③ 산악터널의 경우 특수 구간에서만 차수그라우팅을 실시하지만 본 현장은 방사성폐기물의 저장이라는 공간적인 특징상 운영시 암반 주변의 지하수 흐름이 매우 중요하며 3~4막장마다 지하수 유출량을 검사하여 그라우팅을 실시하였다. 또한 차수그라우팅시에는 장기적인 안정성을 고려하여 물유리계 등의 유기질재료는 사용하지 않았으며 물-시멘트의 무기질재료만 사용하였다.

④ 사일로는 국내 최초의 형상이라는 점 이외에 방폐물 저장공간이라는 특성상 사회적으로 매우 민감한 구조물 이기에 급격한 지하수 유출이나 붕락 등 지반의 불확실성에 기인하는 불안요소들의 사전분석이 매우 중요하였다. 진입동굴 및 사일로 굴착시에는 매핑분석 등을 통해 파쇄대가 위치할 것으로 예상되는 구간에서는 선진시추를 통해 지반구조를 파악한 후 굴착을 하였다.

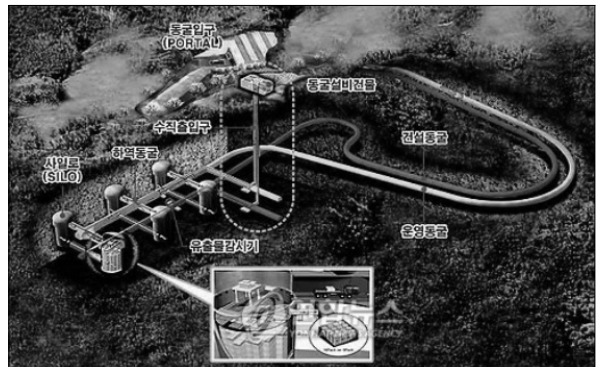


그림 5. 지하시설물 상세

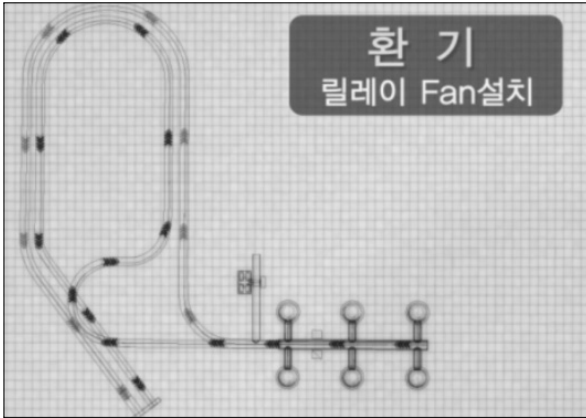


그림 6. 방폐장 환기시스템 개요

⑤ 사일로 돔은 폭 27.3m, 높이 15m에 이르는 대형 구조물이므로 굴착순서에 따라 지반의 역학적 거동이 크게 틀려질 수 있으므로 삼차원 원형 돔의 형상을 발파굴착으로 구현하기 위해서는 정확한 천공과 장약, 여굴제어 등이 매우 중요하였다.

⑥ 사일로 상부에서는 최대 8막장에서 동시에 작업이 진행되므로 입기, 배기팬 위치 설정 등 환기계획이 매우 중요한 요소인데 사일로의 환기개선을 위해 하역동굴의 환기 튜브를 6기의 사일로 각각으로 분기시켜 환기를 하였고 운영동굴은 1.4km의 장대터널이므로 동굴 중간에 부스터팬을 설치하여 풍량을 증대시켰다. 그림 6에는 사일로 굴착초기의 환기시스템에 대해 나타내었다.

이하에는 각 동굴 시공시의 특징에 대해 세부적으로 기술하였다.

3. 진입동굴의 시공

3.1 그라우팅

건설동굴 및 운영동굴의 시공에서 천공-발파-버력처리-지보재설치의 반복되는 과정 이외에 가장 중요한 것은 그라우팅이었으며 진입동굴에서 시행된 그라우팅의 종류는 표 1과 같다. 특히 진입동굴은 위에서 언급하였듯이 10~11°의 경사로 하향굴착하기 때문에 용출된 지하수는 모두 막장에 집중되는 특징이 있어 막장작업시 매우 위험하게 된다. 또한, 본 공사는 향후 구조물의 유지관리 시 건설/운영동굴, 수직구, 하역동굴, 사일로에서 최종 펌핑되는 용량을 약 2,000톤/일로 설정하였기에 지하수의 유출을 최대한 억제하는 차수그라우팅이 매우 중요하였다. 차수그라우팅은 굴착전에 시공하는 프리그라우팅, 그라우팅후 록볼트 설치시 및 후방측벽 및 아치 구간에서 누수되는 곳을 위한 애프터그라우팅, 라이닝 타설전에 인버트부에서 시행하는 포스트그라우팅으로 구분하여 시행하였다.

이중 막장전방에 시행하는 프리그라우팅이 가장 효과적이거나 굴착 사이클을 감안하여 애프터그라우팅, 포스트그라우팅을 추가적으로 시행하였다.

프리그라우팅은 막장에서 상부 1공, 하부 2공을 약 15m 천공하여 유출량을 조사하여 시행여부를 결정한다.

프리그라우팅의 1회 시공은 약 16~25공/단면이고 길이는 10m를 천공하고 4m를 중첩하였다. 양호한 암반에서는 점보드릴(Ø51mm)로 천공하고 암질이 불량한 곳은 이중관 방식의 크롤러드릴(Ø105mm)로 천공하게 된다.

표 1. 당 현장의 그라우팅 종류

명칭	강관보강그라우팅	차수그라우팅		
		프리그라우팅	애프터그라우팅	포스트그라우팅
시행	누수량이 많고 지반의 붕락이 예상되는 암질이 불량한 구간에서 시행	누수량은 많으나 지반의 붕락이 예상되지 않는 구간에서 시행	프리그라우팅 후 측벽 및 아치부의 잔류 누수를 차단하기 위해 시행	기굴착 지역에서 누수량을 설계 기준치 이하로 규제하기 위하여 라이닝 타설전에 최종적으로 시행

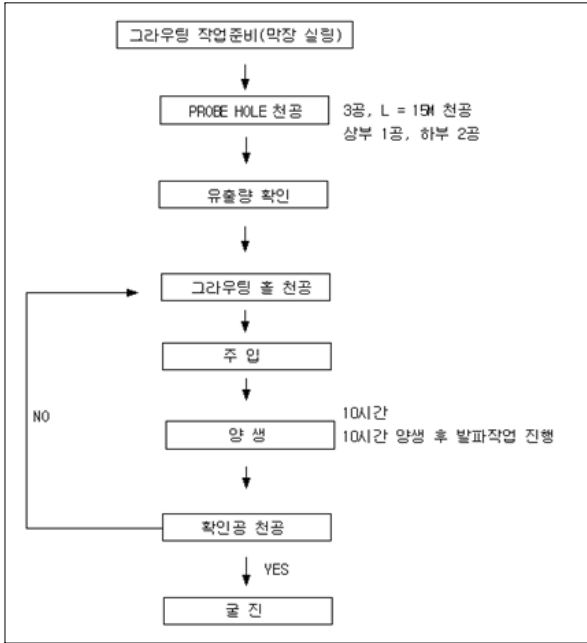


그림 7. 프리그라우팅 절차도

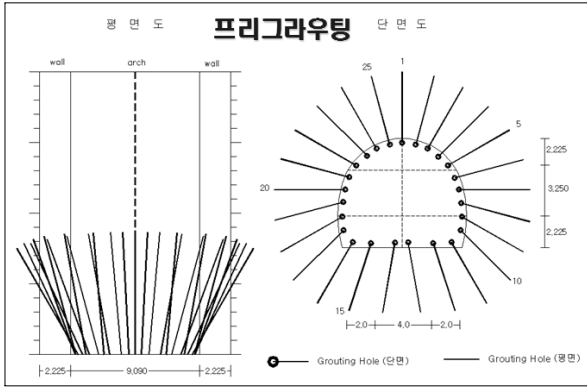


그림 8. 프리그라우팅 단면도

주입재는 보통포틀랜드 시멘트를 주로 사용한다. 이때 그라우팅 주입범위는 30도의 각도로 천공 및 주입하므로 터널 주변 약 5m까지 개량되는 것으로 가정할 수 있다. 그림 7에는 프리그라우팅 절차를 나타내었으며 그림 8에는 단면도를 나타내었다.

프리그라우팅 후에는 확인용 프로브홀을 천공하여 기



그림 9. HIT 그라우팅 공법의 현장적용

준값과 비교하여 재주입 등을 결정하게 된다.

시공시 압력이 불량하고 누수량이 많을수록 차수그라우팅에 소요되는 시간이 매우 증가하게 된다. 이러한 곳에서는 터널급속차수용 그라우팅 공법(HIT, High-quality Injection Technology)을 적용하였는데 본 공법은 시멘트광물계 고강도 그라우트재료를 주재료로 하여 개발되었으며, 주입성을 향상시킴과 동시에 물-시멘트비 150%에서 3시간에 2MPa이상의 강도발현을 통한 공기단축을 이룰 수 있는 장점이 있다. 당 현장에 적용한 결과 양생시간을 10시간에서 3시간으로 크게 단축할 수 있었다. 그림 9에는 시공전경을 나타내었다.

그림 10과 그림 11은 건설 및 운영동굴에서 시행한 프리그라우팅의 결과 예를 프로브홀 데이터를 근거로 나타내었다. 최대의 그라우팅 효과를 보인 곳은 운영동굴에서 probe hole 검사결과 그라우팅전 10.8 liter/min/m의 유출이 있었으나 그라우팅후 0 liter/min/m로 유출이 완전히 멈추었다. 그리고 최소의 그라우팅 효과를 보인 곳은 건설동굴에서 그라우팅전 5.4 liter/min/m의 유출이 있었으나 그라우팅후 2.1 liter/min/m로 50%이상 유출이 감소하였다. 이렇게 프리그라우팅에 의해 지하수 유출이 줄었더라도 굴착완료후 혹은 라이닝 콘크리트 타설전 구간별 유출량을 측정후 애프터그라우팅, 포스트그라우팅

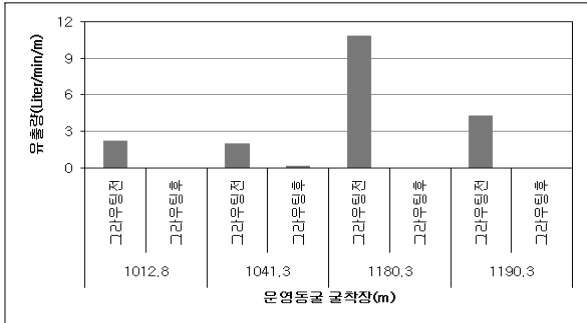


그림 10. 운영동굴 probe hole의 그라우팅 전후 유출량 비교

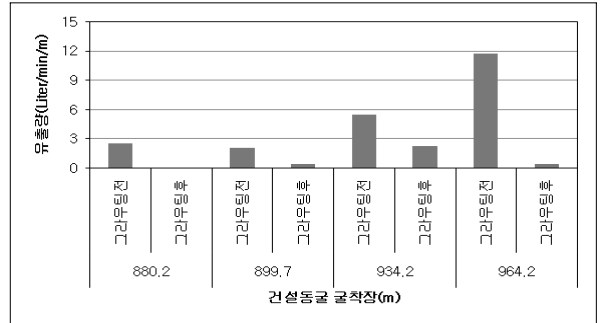


그림 11. 건설동굴 probe hole의 그라우팅 전후 유출량 비교

을 수행하였다.

3.2 발파-라이닝 병행시공

당 현장에서는 공기단축을 위하여 발파-라이닝 병행시공을 하고 있는데 당 현장의 양생중 콘크리트에 대한 허

용진동기준은 원전구조물의 기준을 적용하고 있어 일반 터널에 비해 상당히 엄격히 규제하고 있다. 양생시간별 허용 진동에 관한 기준은 표 2와 같다.

본 현장에서는 막장발파에 따른 라이닝 설치위치를 산정하기 위해 그림 12와 같이 막장내 진동속도 측정 및 라이닝 콘크리트 강도실험을 수행하였으며 허용진동속도

표 2. 양생중인 콘크리트의 허용진동 기준

타설 후 경과시간	허용최대 진동속도
0~12 시간	0.254cm/sec 이내
12~24 시간	1.27cm/sec 이내
1~5 일	1.27~2.54cm/sec 이내
5일 이상	2.54cm/sec 이내

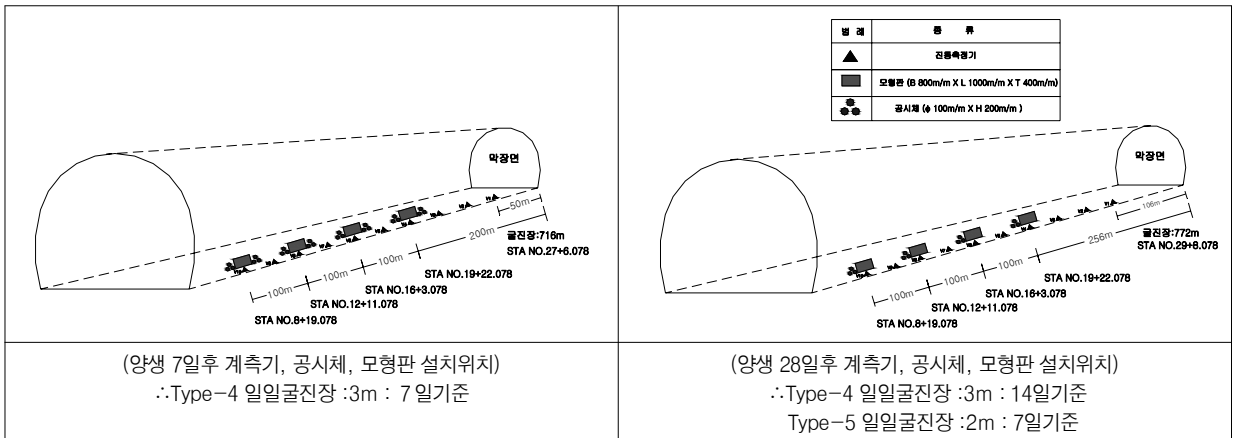


그림 12. 허용진동 산정을 위한 현장실험 개요



그림 13. 건설동굴 라이닝콘크리트 타설 전경

0.254cm/sec을 만족하는 이격거리는 183m로 분석되어 충분한 이격거리를 두고 라이닝 콘크리트를 타설하였다 (그림 13참조). 이때 작업차량의 이동은 건설동굴과 운영 동굴을 연결하는 4개의 횡갱을 통하여 차량의 운행계획을 수립하였다.

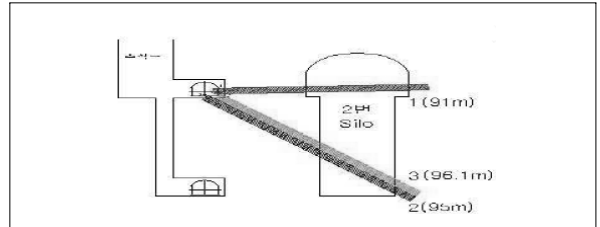


그림 14. 2번 사일로 선진시추 조사

4. 사일로 시공

4.1 사전지반조사

운영동굴에서 각 사일로 지점까지 도달한 후에는 사일로 돔부의 정확한 지반상태 파악과 차수그라우팅, 강관보 강그라우팅, 케이블볼트 길이 산정 등을 위해 각 사일로의 돔부 및 바디를 향해 선진시추를 하여 결과분석을 하였다(그림 14~그림 16 참조).

4.2 시공순서

현재 6기의 사일로는 모두 돔부만 굴착된 상태이며 바디부 굴착을 위한 선행작업중에 있다. 아래에는 사일로 굴착순서를 기술하였는데 6기의 사일로는 모두 지반조건

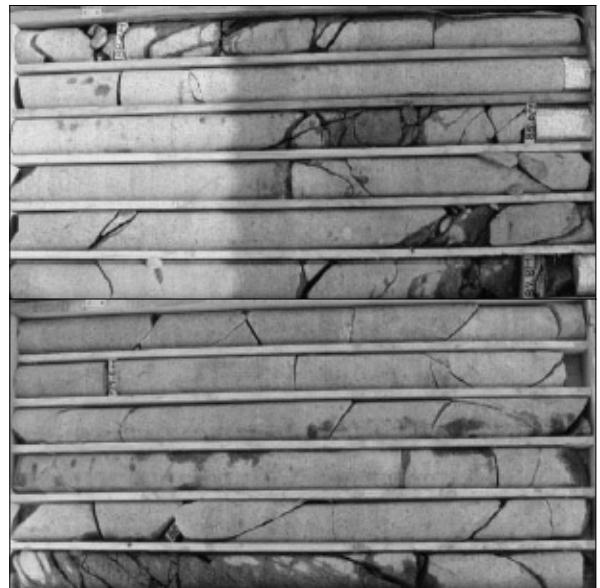


그림 15. 2번 사일로 돔부 선진시추 코어

이 상이하므로 조건별 약간의 차이는 있다.

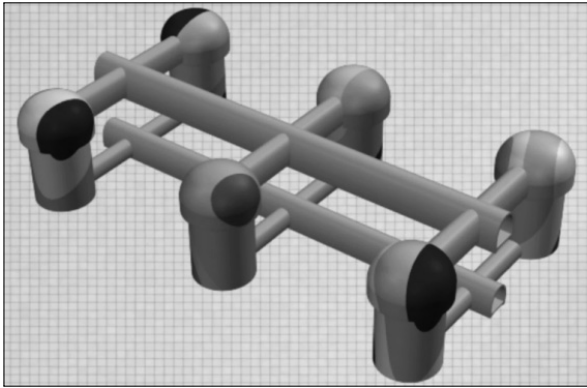


그림 16. 매핑 및 선지시추 조사결과를 반영한 사일로 지반 구조

① 먼저 사일로 돔부 진입부인 하역동굴의 상부를 굴착하여 사일로 상단에 도달한다. 이때 하역동굴을 지반조건에 관계없이 상하반 분할굴착을 한 이유는 돔1단부를 위한 작업차량의 이동경사를 고려하였기 때문이다.

② 사일로 돔부는 3단으로 구성되며 1단부를 돔의 2/3 지점까지 굴착하고 케이블볼트 등의 지보재 설치, 프리그라우팅을 실시한다. 프리그라우팅은 동굴부와 유사하게 프로브홀을 천공하여 유입량을 확인하고 그라우팅후 확인공을 천공하여 주입효과 등을 분석한다.

③ 돔1단부의 중앙 굴착이 완료되면 하역동굴 끝단에서 돔1단부의 좌, 우를 번갈아 가며 원형으로 굴착하여 1단부 굴착을 완료한다.

④ 돔1단부 굴착이 완료되면 돔2단부를 하역동굴 끝단부터 좌, 우 번갈아 굴착한다.

⑤ 돔2단부 굴착이 완료되면 하역동굴 하반을 굴착한다.

⑥ 하역동굴 하반 굴착이 완료되면 돔1,2단부와 마찬가지로

지 방식으로 돔3단부를 좌, 우 번갈아 굴착한다. 이때 돔 1,2,3단부 굴착시 측벽부는 프로브홀 검사를 통하여 지하수 유출을 확인하고 프리그라우팅을 시공하였다.

⑦ 돔굴착이 완료되면 바디굴착을 수행하는데 바디부의 버력처리를 위해 건설동굴의 지선을 바디 하부의 중앙부까지 굴착한다.

⑧ 바디부는 먼저 바디 중앙부에 RBM으로 직경 3m의 소형수직구를 굴착하고 바디부의 버력을 이곳을 통해 낙하시키고 하부의 건설동굴을 통해 버력을 운반하게 된다. 당초에는 RBM 장비를 이용하여 버력처리 통로를 굴착하려 하였으나 공기단축을 위하여 발파로 버력처리 통로를 굴착하는 것으로 설계 변경하였으며 현재 2개 사일로 바디의 통로굴착이 성공적으로 이루어졌다.

5. 맺음말

본고에서는 국내 최초의 방사성폐기물 지중처분장 건설의 설계와 시공에 대해 간략히 언급하였다. 본 시설의 시공은 국내 최초의 방폐장으로서 요구되는 차폐성능, 원형돔의 시공 등 단순한 지하공동 이상의 기술적 의미를 가진다고 할 수 있다.

본 시설의 핵심이라 할 수 있는 사일로가 시공중인 상태라 면밀하게 보고할 수 없는 점이 있으나 본 시설물의 설계와 시공기록의 철저한 관리를 통해 후후의 중저준위 방폐장, 사용후 핵연료 중간저장시설 등 고난이도의 지하공동 설계와 시공의 귀중한 자료가 되었으면 한다.