

굴착으로 인한 방사성폐기물 지하처분공동의 거동변화
A Study on Excavation Responses of Underground Openings
for Radioactive Waste Disposal

김 선 훈(*) 김 대 홍(*) 최 규 섭(*) 김 진 웅(**)
Kim, Sun-Hoon Kim, Dae-Hong Choi, Kyu-Sup Kim, Jhinwung

ABSTRACT

In this paper a discussion is presented about excavation responses of underground openings for radioactive waste disposal. The effects of excavation methods, stress redistribution, thermal change, and backfill materials are reviewed. Comparisons of computational models for discontinuous rock masses and discussions on numerical simulation techniques for the excavation of underground openings are also described. Finally, the application of the CAD system to the planning, design and construction of underground openings for radioactive waste disposal is introduced.

1. 서 론

우리나라는 현재 9기의 원자력발전소를 가동하고 있으며, 이들로 부터 생산되는 발전량은 약 563억 KWh로 우리나라 전체 발전량의 47.5%를 차지하고 있다. 또한 7기의 원자력발전소가 2000년까지 준공을 목표로 건설 또는 착공단계에 있어 향후 원자력발전의 비중은 더욱 증가할 전망이다 [1].

원자력발전소의 가동으로 인하여 우리나라에는 현재 연간 4,400드럼 정도의 중·저준위방사성폐기물(Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes)과 240톤 정도의 사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel)가 발생하고 있으며, 이는 앞으로 더욱 늘어날 것이다. 우리나라에서는 중·저준위방사성폐기물과 사용후핵연료를 현재 가동중에 있는 각 발전소의 임시저장시설에서 보관하고 있으나, 이들 시설이 멀지않아 포화될 것으로 예상되고 있다. 따라서 정부에서는 이들을 종합적으로 집중관리할 수 있는 시설(중·저준위방사성폐기물의 경우 영구처분시설, 사용후핵연료의 경우 중간저장시설)의 건설을 계획하고 있다[2]. 이중 중·저준위방사성폐기물의 영구처분방식은 여러 종류의 방식이 제안되어 있으나, 세계 여러나라의 경험에 미루어 지하에 공동을 굴착하여 처분하는 등굴처분방식이 안전성 확보면에서 가장 유리한 것으로 평가되고 있다.

* 정회원, 한국원자력연구소 구조설계실 선임연구원

** 한국원자력연구소 구조부장

우리나라에서도 중·저준위방사성폐기물의 처분은 동굴처분방식을 채택할 것이 유력하다. 그리고 사용후핵연료의 경우 중간저장을 한 후 궁극적으로는 세계 여러나라의 계획과 비슷하게 심층동굴처분할 것으로 예상된다. 따라서 방사성폐기물의 영구처분을 위한 지하공동시설의 건설 및 운영과정에서의 안전성을 확보하기 위해서는 관련분야의 많은 연구가 시급히 요구되고 있다.

본고에서는 세계 여러나라의 처분시설 및 지하시험시설의 현황과 공동주변암반체의 거동변화에 대한 연구현황을 소개하였으며, 우리나라의 중·저준위방사성폐기물 처분공동의 규모에 대하여 소개하였다. 그리고 방사성폐기물 지하처분공동의 개념설정과정에서의 컴퓨터활용방안과 지하공동구조물의 구조거동을 평가하기 위해 필요한 수치해석방법에 대하여 검토하였다.

2. 방사성폐기물의 지하처분시설

(1) 외국의 처분시설과 지하시험시설

방사성폐기물 처분시설로 지하동굴을 이용하고 있는 나라는 현재 독일과 스웨덴이다. 독일에서는 1967년 이후 폐광된 Asse암염광산을 중·저준위방사성폐기물처분장으로 활용하고 있다. 암염광산은 오랜기간동안 지하수 유입이 없었던 것으로 추정되므로 방사성핵종유동의 위험성이 매우 적어 방사성폐기물처분장으로 이용하기에 적합하다[3]. 스웨덴에서는 Baltic해 연안인 Forsmark에 해저밑으로 지하동굴을 굴착하여 건설한 SFR(Swedish Final Repository)을 중·저준위방사성폐기물처분장으로 1988년부터 운영하고 있다[4,5].

영국과 스위스 등에서도 향후에 중·저준위방사성폐기물처분을 위해 지하에 인공적인 처분동굴시설을 건설할 것으로 계획하고 있다. 또한 고준위방사성폐기물의 처분을 위해서는 세계 여러나라에서 지하 500-1000m 정도 깊이의 공동시설 건설을 계획하고 있다(그림 2 참조)[6]. 이와 함께 세계 여러나라에서는 고준위방사성폐기물처분장의 건설에 대비하고자 지하처분시험시설을 건설하여 많은 연구와 실증실험을 수행하고 있다. 대표적인 지하시험시설로는 캐나다의 AECL에서 운영하고 있는 URL(Underground Research Laboratory) (그림 3 참조)[7], 스웨덴의 Stripa SCV시험시설과 Äspö Hard Rock Laboratory, 스위스의 Grimsel NACRA 시험시설, 미국의 CSM/OWTD시험시설 등이 있다.

(2) 처분공동주변 암반체의 거동변화

방사성폐기물 영구처분을 위한 지하공동의 장기간 안전성의 확보를 위해서 세계 여러나라에서는 이론적 연구와 함께 지하시험시설을 이용한 실증연구를 병행하고 있다. 수행되고 있는 여러 분야의 연구들 중에서 처분공동주변 암반체에서 발생하는 거동변화에 대한 연구항목과 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 굴착으로 인하여 공동주변의 암반에는 열극(Fracture)이 발생하거나 기존에 존재하던 열극이 더욱 커지게 된다. 따라서 굴착으로 인한 공동주변암반의 손상을 줄이기 위하여 굴착공법의 영향에 대한 연구가 활발하다[8]. 스웨덴, 미국, 캐나다 등에서는 제어발파설계기법(Controlled Drill and Blast Design Technique)에 대한 연구, 굴착단면형태와 발파공 및 장약량의 상관관계에 대한 실험연구가 수행중에 있다. 또한 스위스에서는 TBM(Tunnel Boring Machine)굴착공법과 제어발파굴착공법에 대한 비교실험연구가 수행되고 있다.
- 2) 삼축압축응력상태에 있던 암반에 공동을 굴착하면 공동주변암반에서는 평형상태를 유지하기 위하여 응력의 재분배가 일어나며, 이에 따라 암반은 물론 열극에서 변위가 발생하게 된다. 응력재분배로 인하여 공동주변암반에서 교란되는 영역의 크기는 공동의 형태와 크기외에 기존 열극대에서의 열극간격과 방향 및 특성치, 암반의 특성치, 초기응력의 크기 및 방향에 좌우되는 것으로 알려지고 있다[9].
- 3) 처분공동에 고준위방사성폐기물을 처분하면 상당한 열이 발생하여 공동주변 암반체에 영향을 줄 것으로 예상된다. 미국에서 수행된 실험연구결과에 의하면 공동주변암반체의 교란을 일으키는 주요인자는 굴착으로 인한 손상과 응력재분배로 인한 손상, 그리고 열에 의한 손상이며, 3개의 영향정도가 거의 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 열에 의한 암반체의 반응은 주로 암반에서 나타나는데 비하여 나머지 2개 인자에 의한 반응은 주로 열극과 같은 불연속면

에서 발생하였다. 따라서 열에 의한 반응보다는 굴착과 응력재분배에 의한 암반체의 반응을 예측하는 것이 더욱 어려움을 알 수 있었다[8].

- 4) 지하공동에 방사성폐기물을 처분하고난 후 Bentonite와 같은 재료를 공동의 뒷채움재(Back Fill Material)로 사용한다. 그러나 Bentonite는 지하수에 의해 포화되면 부피가 팽창되는 Swelling현상이 일어나 공동의 벽체에 압력을 작용시켜 교란되어 있는 공동주변암반에 추가적인 교란을 발생시킬 수 있다.
- 5) 공동주변암반체에 교란이 발생하면 주변 지하수위의 재분배가 생성되며, 특히 공동주변의 지하수가 공동으로 유입될 가능성이 매우 높다. 이에 대한 대책의 하나로 공동주변암반체의 열극대에 공기나 가스를 주입하면 지하수흐름에 대한 저항이 증가하고 매우 작은 크기의 버력(Debris)조각을 열극대로 주입시키는 부수적인 효과를 가져와 공동에 지하수의 유입을 방지할 수 있다.

(3) 우리나라의 지하처분공동의 규모

우리나라에서 가동중인 9기의 원자력발전소에서 발생하는 중.저준위방사성 폐기물은 내용물의 특성에 따라 잡고체, 농축폐액 고화체, 폐수지 고화체, 폐필터 등 크게 4가지로 나눌 수 있다. 잡고체폐기물은 대부분 준위가 낮은 저준위이고, 농축폐액 고화체폐기물은 준위가 낮은 것부터 높은 것까지 다양하며, 폐수지 및 폐필터는 다른 폐기물보다 준위가 높다.

현재 우리나라에서 계획하고 있는 이들 중.저준위방사성폐기물 처분시설은 1차 250,000드럼의 용량을 처분할 수 있는 규모의 지하공동시설이다[10]. 처분용량 250,000드럼의 부피는 약 50,000m³ 이나, 처분동굴 및 진입동굴 등을 종합적으로 고려해보면 처분용량의 8-10배 정도의 지하공간이 필요하다.

1990년 스웨덴의 SKB와 공동연구를 통하여 수행된 처분시설의 개념설정에 의하면 지하시설은 처분장의 진입, 운영, 건설 및 연결을 위한 터널부분과 방사성폐기물의 처분을 위한 공동부분으로 나눌 수 있다. 이 가운데 처분공동의 경우 처분방식에 따라 약간의 차이는 있으나 대체로 잡고체폐기물용 공동 (폭: 15m, 높이: 13m, 길이: 175m) 5개, 농축폐액용 공동 (폭: 20m, 높이: 13m, 길이: 175m) 4개, 폐필터 및 폐수지용 공동 (폭: 20m, 높이: 17m, 길이: 175m) 1개가 필요하다.

3. 지하처분공동시설에 대한 컴퓨터의 활용과 구조해석

방사성폐기물의 영구처분을 위한 지하공동시설의 개념설정과 설계, 건설, 운영 및 폐쇄과정에서의 컴퓨터의 활용방안과 구조해석과정에서 고려해야 할 주요사항을 요약하면 다음과 같다.

(1) 처분공동시설에 대한 컴퓨터의 활용

스웨덴에서는 SFR시설의 건설을 위해 세계에서 최초로 지하시설의 개념설정에 CAD(Computer-Aided Design)시스템을 사용하였다[11]. 즉 대상부지에 대한 지질조사결과를 Database화하고 이를 CAD시스템과 연결하여 처분장 Layout의 최적화를 시도하였다. 공동의 크기, 방향, 깊이, 배치상태 등은 암반의 종류와 특성, 불연속면의 분포상태, 지하수조건, 초기응력 등은 물론 굴착방법과 경제성, 그리고 그이외의 여러요인 등에 따라 좌우된다. 따라서 장기간의 안전성을 보장하여야 하는 지하처분공동의 건설을 위해서는 계획단계는 물론 설계와 건설 단계에 CAD시스템의 활용이 필요할 것으로 예상된다.

지하처분공동의 설계 및 건설을 위해서는 공동시설을 포함한 공동주변 암반체에서의 기동과약을 위한 구조해석이 필요하다. 구조해석과정은 공동의 설계작업중 하나의 과정으로 필요하나, 건설과정에서 지속적인 계측작업을 통하여 얻어지는 자료를 이용하여 재해석(Back Analysis)을 하는 과정에서도 수행하여야 한다. 처분공동시설에 대한 구조해석은 암반체의 특성이 매우 복잡하고 다양하므로 컴퓨터를 이용한 수치해석방법을 반드시 사용하여야 한다.

이외에도 지하공동의 굴착과정(발파굴착공법 및 TBM공법)에 대한 수치모형화와 지하수흐름의 영향해석, 그리고 운영 및 폐쇄과정에서의 계측결과를 이용한 안전성평가작업을 위해서 컴퓨터의 활용이 예상된다.

(2) 지하공동의 구조해석

수치해석방법을 사용하여 지하공동구조물의 구조해석을 수행하는데 있어 고려해야할 주요사항은 다음과 같다.

- 1) 지하공동의 구조거동은 공동주변암반의 상태에 크게 좌우될 것이다. 예상할 수 있는 공동주변암반의 상태는 그림 4에 나타난 바와 같이 불연속면의 상태에 따라 크게 4가지로 분류할 수 있다. 따라서 암반체의 상태에 따라 지하공동의 구조해석을 수행하기 위해서는 이에 적합한 수치해석방법이 적용이 필요하다(표 1 참조)[11,12].
- 2) 수치해석방법을 사용하여 지하공동과 같은 무한영역의 문제를 해석할 때 해석모델의 영역크기와 사용하는 경계조건은 해석결과에 많은 영향을 준다. 따라서, 무한영역의 영향을 고려하기 위하여 그림 5에 나타난 바와 같이 공동에서 가까운 지역에는 암반체의 상태에 적합한 해석방법을 적용하고 그 이외의 지역에는 경계요소법(Boundary Element Method), 무한요소법(Infinite Element Method), 또는 특수경계조건을 사용한다[12,13].
- 3) 지하공동의 구조거동은 공동굴착의 순서와 건설방법에 따라 크게 달라진다. 수치해석방법을 사용하여 지하공동의 굴착과정을 해석하는데 있어서 가장 널리 사용되고 있는 방법은 그림 6과 같이 초기응력이 가해진 굴착전 상태에서 굴착단면상에 발생하는 힘을 계산한 후(그림에서 (a)), 이 힘을 굴착 후 굴착단면상에 반대로 작용시켜(그림에서 (b)) 해석을 수행하는 방법이다[12].
- 4) 암반체가 지하수로 포화되어 있는 경우 공동주변암반체에 대한 보다 엄밀한 수치해석이 필요하다. 특히 동적하중에 대한 지하공동의 구조해석시에는 암반체와 지하수를 별도로 모형화하는 Two-Phase Medium방법을 사용하여야 할 것이다[14].

4. 맺음말

방사성폐기물의 지하처분공동에 관련하여 세계 여러나라에서 이론적연구와 실험적연구를 통하여 많은 관심을 기울이고 있는 분야인 공동주변 암반체에서의 거동변화에 영향을 주는 중요한 요인에 대해서 검토해 보았다. 또한 지하처분공동의 계획, 설계, 건설과정에서의 컴퓨터활용방안과 수치해석방법을 사용하여 구조거동해석과정에서 고려해야하는 주요 사항을 제시하였다.

방사성폐기물의 영구처분을 위한 지하공동시설은 다른 용도의 지하공동시설과는 달리 장기적인 구조적안전성에 대한 검토가 필요하고, 또한 방사성폐기물의 핵종이동에 대한 안전성검토가 필요하다. 이를 위해서는 지하처분시설의 건설이 예상되는 부지에 대한 철저한 지질조사와 함께 세계 여러나라에서 수행중에 있는 연구현황과 결과를 참고하여 장기적인 안전성의 보장과 향상에 이바지할 수 있는 기술을 확보하여야 하며, 관련분야에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국전력공사, "원자력발전백서," 동력자원부, 1992.
2. 동력자원부 전력국, "중.저준위방사성폐기물 관리대책(안)", 1986.
3. Bennett, W.O., et al., "Alternative Methods for Disposal of Low-Level Radioactive Wastes," NUREC/CR-3774, Vol.1, 1984.
4. Hedman, T., "An Underground Repository for Radioactive Waste in Sweden," Proc. Waste Management '88, Tucson, Arizona, 1988.
5. Carlsson, A. and Hedman, T., "Tunnelling of the Swedish Undersea Repository for Low and Intermediate Reactor Waste," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.1, No.3/4, p.243-250, 1986.
6. 大成建設株式會社, "處分場の設計.建設.操業.計測," 第7回 放射性廢棄物夏期 Seminar - 綜合討論資料, 日本, 平成 3年.
7. Simmons, G.R., "Operating Phase Experiments Planned for AECL's Underground Research Laboratory," URL, Atomic Energy of Canada Limited, 1989.
8. Winberg, A., "The Role of the Disturbed Rock Zone in Radioactive Waste Repository Safety and Performance Assessment. A Topical Discussion and

- International Overview," SKB Technical Report 91-25, 1991.
9. Simmons, G.R., "Accounting for Excavation Responses in Developing an Underground Repository in Hard Crystalline Rock," Proc. OECD/NEA Workshop on Excavation Response in Geological Repositories for Radioactive Waste, p.47-66, 1989.
 10. 한국원자력연구소, "중.저준위 방사성폐기물 영구처분시설개념설정," KAERI II/PR-4/90, 과학기술처, 1990.
 11. Bell, F.C., Engineering in Rock Masses, Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
 12. Brown, E.T., Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, Allen & Unwin, 1987.
 13. Chugh, A.K., "On the Boundary Conditions in Analysis of Underground Openings," Computers and Structures, Vol.10, p.637-645, 1979.
 14. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T., "Dynamic Behaviour of Saturated Porous Media ; The Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution," Int'l. J. Num. Meth. Eng., Vol.8, p.71-96, 1984.

표 1. 암반체의 수치해석방법

암반체의 상태	암반체의 재료특성		대표적인 전산코드
	탄성체	탄소성체	
(a) Massive Rock	경계요소법	유한요소법 유한차분법	BEFE, ADINA FLAC
(b) Sparsely Jointed Rock	경계요소법 유한요소법	유한요소법 유한차분법	BEFE, MR.SOIL STEALTH
(c) Closely Jointed Rock	개별요소법	개별요소법	UDEC, 3DEC 3DNURBM
(d) Heavily Jointed Rock	—	유한요소법 유한차분법	MISES 3 STEALTH

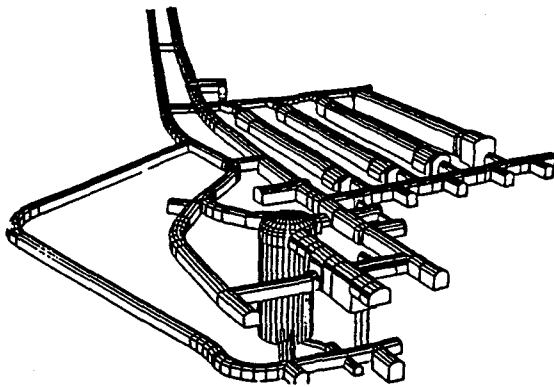


그림 1. 스웨덴의 SFR Layout

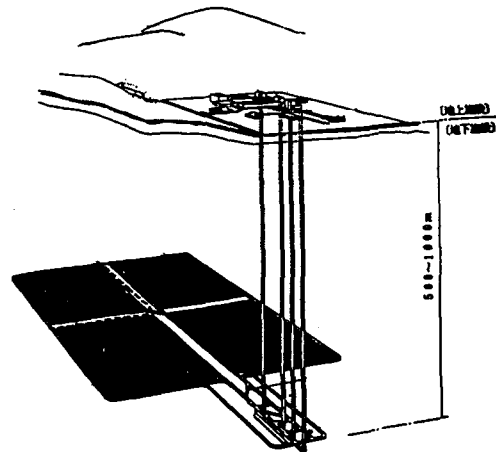


그림 2. 일본의 고준위 방사성폐기물 처분장 개념도

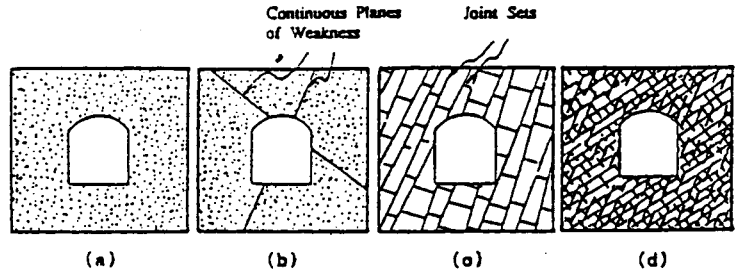
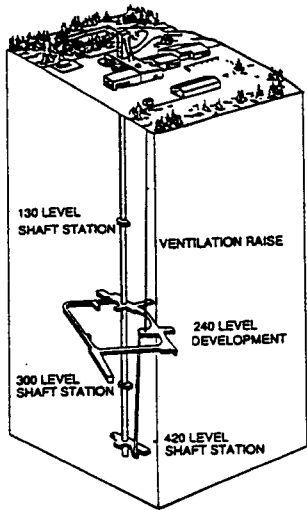


그림 4. 암반체의 개념적 분류

그림 3. 캐나다의 지하시험시설

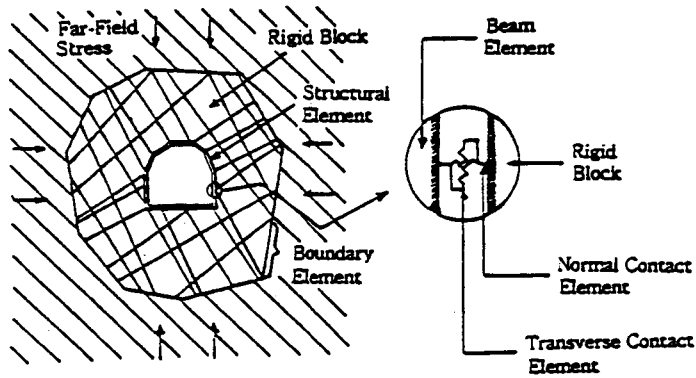


그림 5. 지하공동의 해석모델

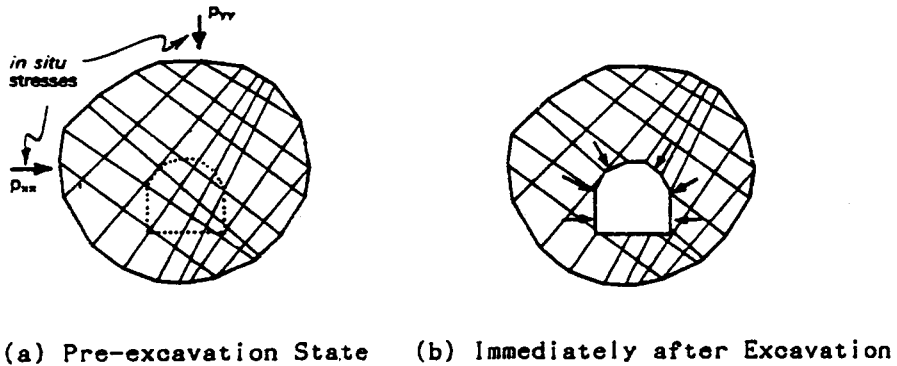


그림 6. 지하공동굴착의 수치모형화방법