

# 방사성폐기물 처분을 위한 암반동굴의 구조해석

김 선 훈\* 김 진 응\*\*

## 1. 머릿말

원자력발전의 부산물인 방사성폐기물의 처분이 시급한 과제로 부각됨에 따라 지하구조물에 대한 많은 연구의 필요성이 인식되고 있다[1~3]. 방사성폐기물의 영구처분시설을 비롯하여 지하원자력발전소 등과 같이 높은 안전성이 요구되는 지하구조물은 양호한 암반지역에 건설되어야 하며, 지진과 같은 천재지변이 발생하는 경우에도 구조물에 피해가 발생하지 않도록 설계되어야 한다[4]. 따라서 지진파나 폭발충격하중 등과 같이 불시에 발생하는 외부하중에 대하여 암반동굴 구조물의 거동을 보다 정확하게 해석할 수 있는 구조해석방법에 대한 많은 연구가 요구되고 있다[5].

암반과 다른 공학재료들의 가장 큰 차이점은 불연속면(Discontinuity Plane)의 존재라 말할 수 있다. 따라서 지하암반동굴의 정확한 구조해석을 위해서 불연속면의 영향을 고려한 암반의 수치모델을 개발하는 것은 매우 중요하다.

암반동굴의 거동을 파악하기 위해서는 암반의 상태에 따라 다음과 같은 해석방법을 사용할 수 있다. 가장 간단한 방법으로는 암반내에 존재하는 불연속면을 무시하고, 암반을 연속체로 가정하여 해석하는 방법이다. 이러한 방법은 암반내에 불연속면이 거의 존재하지 않는 경우에 사용한다. 그리고 암반내에 불연속면이 많이 존재하는 경우에

도 해석의 첫단계 과정에서 암반동굴 구조물의 개략적인 거동과 및 해석경계조건의 영역결정을 위해서 암반을 연속체로 가정하여 해석한다. 암반을 이와같이 연속체로 가정하는 경우에는 연속체 탄성 및 소성이론을 바로 적용할 수 있으므로 기존의 수치해석방법을 그대로 사용할 수 있다[6].

반면에 불연속면의 영향을 고려하여 암반구조물을 해석하는 경우에는 불연속면에서의 미끄러짐에 의해 강제거동(Rigid Block Behavior)이 발생하는 것으로 가정하는 제한평형방법(Limiting Equilibrium Method)이 가장 널리 사용되어지고 있다[7]. 이 방법의 기본 개념은 불연속면에서의 변위장은 연속일 필요가 없으며, 각각의 블록들은 미끄러짐 면을 따라서 자유롭게 회전 또는 이동할 수 있으며, 블록면에서는 서로 분리될 수 있다는 것이다. 이와같이 불연속면의 영향을 고려하여 암반구조물을 해석하기 위해서는 기존의 수치 모델들을 불연속면의 특성이 표현될 수 있도록 수정 또는 변환하여야 한다.

본 고에서는 암반구조물의 해석에 사용가능한 대표적인 수치해석 모델들의 특성과 장단점을 비교분석하여 지하암반구조물의 해석에 적합한 해석 모델과 해석방법을 제시해 보고자 한다. 이를 위하여 지하구조물의 해석에 사용가능한 전산 구조해석방법과 암반내에 존재하는 불연속면의 수치모델 그리고 암반동굴의 전산해석모델 등에 대하여 검토하였다.

\* 정희원, 한국원자력연구소 구조설계실 선임연구원, 공학박사

\*\* 한국원자력연구소 구조부 책임연구원, 공학박사

## 2. 지하구조물의 전산해석방법

일반적으로 경계치문제(Boundary Value Problem)를 해결하는 수치방법은 문제의 전영역에 걸쳐 수식을 세워서 해를 구하는 미분방법(Differential Method)과 단지 문제영역의 경계에서만 수식을 세워서 푸는 적분방법(Integral Method)으로 크게 나누어진다. 고체 및 구조역학문제의 대부분은 문제의 영역이 경계로 둘러싸여 있는 내부영역의 문제(Interior Problem)이기 때문에 그 영역이 한정되어 있으며, 따라서 유한요소법(Finite Element Method)이나 유한차분법(Finite Difference Method)과 같은 미분방법의 적용이 비교적 용이하다. 그러나 지하암반동굴의 구조해석문제나 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction)과 같은 문제는 그림1과 같이 문제의 영역이 관심이 되는 경계의 외부에 존재하며, 더우기 무한 또는 반무한영역까지 고려해야 하는 외부영역의 문제(Exterior Problem)가 된다. 따라서 이러한 문제들의 해석에는 미분방법보다 경계요소법(Boundary Element Method)과 같은 적분방법의 적용이 더욱 유리한 것으로 알려져 있다[7].

미분방법중에서 유한차분법의 사용은 구조물의 모형화에 많은 제약이 발생하기 때문에 복잡한 형상을 갖거나 여러 종류의 재료가 혼합된 구조물의 해석이 곤란하며, 해석경계조건의 처리가 까다로운 결점을 가지고 있다. 유한요소법은 복잡한 형상이나 재료를 갖는 구조물의 모형화를 비교적 손쉽게 처리할 수 있으며, 이론과 응용에서 상당한 연구가 진전되어 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 지하암반 동굴구조물과 같은 무한외부영역의 문제를 유한요소법에 의해서 해석하는 경우 Far-Field 영향을 충분히 고려할 수 있는 해석영역의 결정과 경계조건의 선택 등에 많은 어려움이 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제점의 해결을 위해서 유한요소를 변형시켜서 만든 무한요소(Infinite Element)를 이용하거나 해석영역내에서의 에너지를 발산시킬 수 있는 특수한 경계조건을 사용하고 있다. 그림2는 특수경계조건을 사용한 암반동굴의 해석모형을 나타낸 것이다.

경계요소법은 문제의 경계에서만 수식을 세우기 때문에 외부영역의 문제, 특히 무한영역을 갖는 문제에 대해서는 가장 적합한 방법이라고 말할 수 있다. 즉, 무한영역을 갖는 문제나 경계면에 비해서 내부영역이 큰 문제의 선형해석에서는 경계

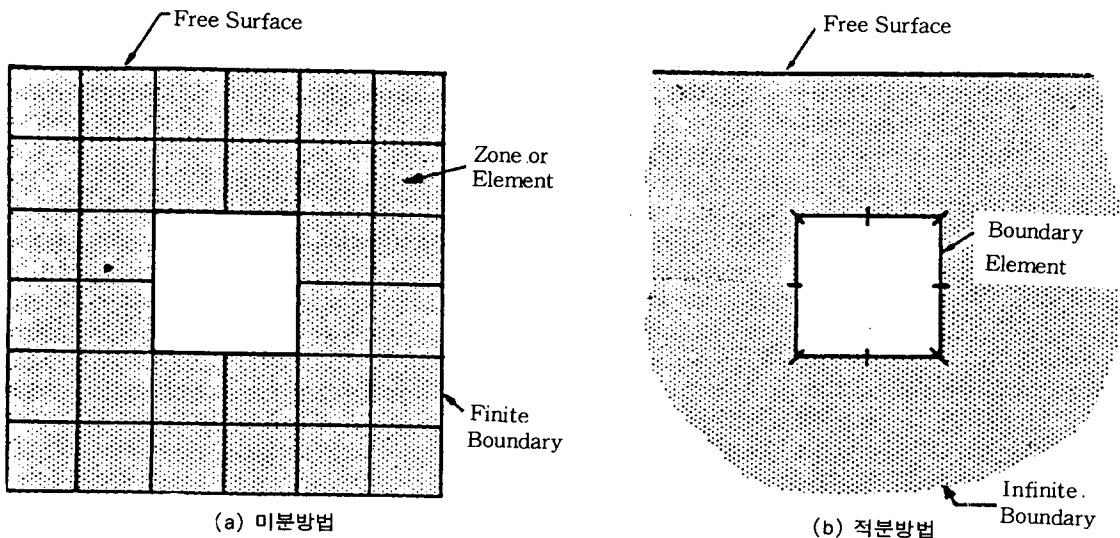


그림1. 외부영역문제의 모형화

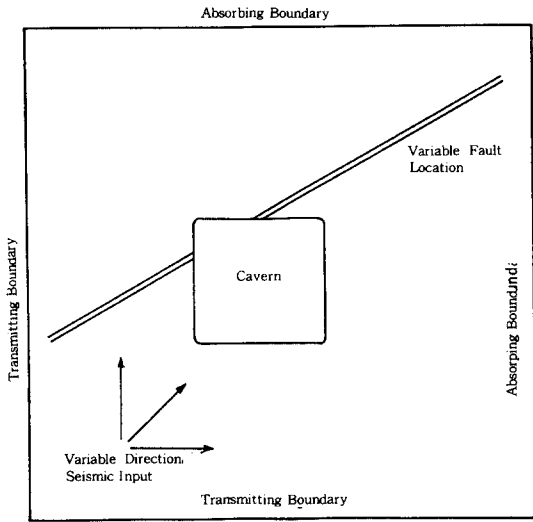


그림2. 특수경계조건을 사용한 지하암반동굴의 해석모델

요소법이 유한요소법과 같은 미분방법에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 경계요소법은 기본해를 구할 수 없는 경우 적용이 곤란하며, 수치해석상 많은 어려움이 따르기 때문에 결코 유리하다고 판정할 수 없다.

이와같이 지하암반 동굴구조물처럼 복잡한 재료특성을 갖는 무한영역문제의 해석에 어느 특정한 해석방법도 적합하지 않다. 따라서 각 해석방법들의 장점을 효과적으로 살려서 두가지 방법의 상을 서로 혼합하여 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

### 3. 불연속암반의 모형화

암반의 가장 중요한 특성은 다른 공학재료들과 달리 불연속면이 존재하고 있다는 점이다. 최근까지 가장 널리 사용되어지고 있는 암반해석을 위한 수치모델의 기본개념은 다음과 같이 크게 두가지로 분류할 수 있다.

#### (1) 절리요소를 이용하는 방법

이 방법은 암반을 연속체로 가정하여 유한요소로 모형화하고, 암반내에 존재하는 불연속면은 유한요소가 서로 만나는 접선을 절리요소(Joint Element)로 모형화하는 방법이다[8]. 이 방법에서

는 암반내에 존재하는 불연속면의 모형화에 열림(Opening), 닫힘(Closure), 그리고 전단에 의한 미끄러짐(Sliding) 등을 표현할 수 있는 절리요소를 사용한다. 암반의 비탄성거동은 반복적인 계산 과정을 탄성절리요소에 적용하면 적절하게 표현할 수 있다. 암반내에 존재하는 불연속면을 모형화하는데 사용되는 4절점 절리요소는 그림3과 같다.

암반구조물을 유한요소법으로 해석하는 경우 절리요소를 사용한다면 비교적 손쉽게 불연속면의 영향을 고려할 수 있다. 그러나 암반구조물에 가해지는 지진과 같은 동적하중의 파장이 절리요소 사이의 간격보다 크게 되면 이 방법에 의한 해석은 매우 비효율적인 방법이 된다. 또한 해석에

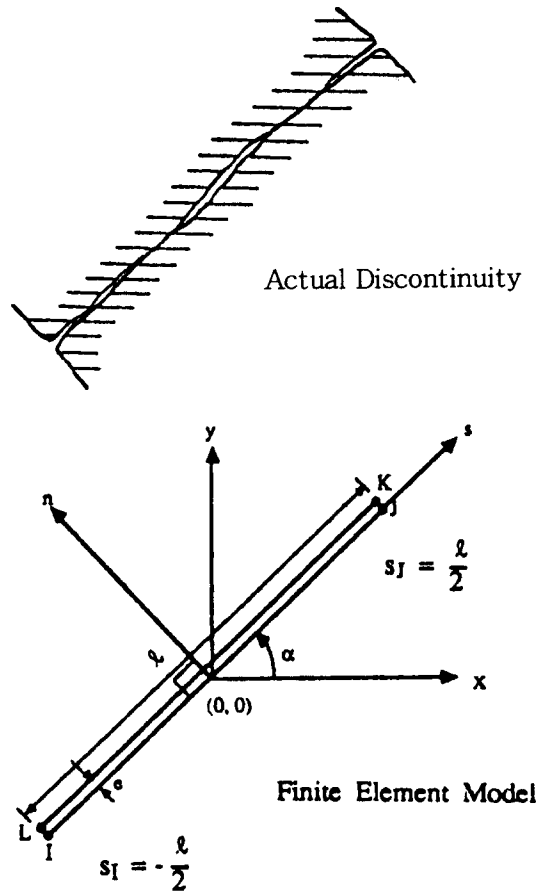


그림3. 절리요소를 이용한 불연속면의 모형화

서 변화가 예상되는 지역 이외에도 자유도가 존재하게 되므로 수치작업시 과도한 계산량이 필요하게 된다.

(2) 강체블록모델을 사용하는 방법

이 방법은 암반내의 불연속체들을 접합부에서만 변형될 수 있는 강체블록(Rigid Block)으로 모형화하는 방법이다[9]. 일반적으로 불연속면의 강성은 암반의 강성에 비하여 매우 작으므로 암반의 거동을 강체거동으로 가정할 수 있다. 이 방법에서는 강체블록의 접합주위에서 한정된 강성을 갖고, 또한 이 접합부위에서만 변형이 가능하다. 인접한 두개의 블록사이에서 발생하는 상호작용은 그림4와 같이 표시된다.

강체블록을 이용한 해석방법은 암반을 접합부위에서만 변형가능한 강체블록모델의 조합으로 가정하였기 때문에 계산상 많은 효율성을 얻을 수 있으며, 접합부위에서의 대변위영향도 고려할 수 있다. 그러나 이 방법도 실제 적용시 몇가지 문제점을 가지고 있다. 첫째로 강체블록모델의 거동은 블록들의 모서리와 면사이 상호작용에 전적으로 좌우된다. 따라서 접촉력은 모서리를 전달될 수 있기 때문에 강체블록변위는 접촉력의 위치에 따라서 급격한 변화를 일으킨다. 둘째로 절리강성도는 접촉길이에 무관하며 모든 블록에 대해서 일정하다. 그러므로 이 방법에 의해 계산된 암반내의 응력상태는 실제와는 다른 분포를 나타내며, 이러한 불합리성은 암반동굴구조물에서 가장 중요한 부분인 동굴주위에서 특히 문제가 된다. 셋째로 암반구조물에 반복하중이 가해지는 경우 인장강도가 전혀 없는 스프링으로 강체블록을 연결하는 것은 동굴주위에 응력파가 전달되는 것을 어

렵게 만들며, 강체블록에서 응력파의 전파는 이론에 해당하지 못하다. 이러한 몇가지 문제점들을 해결하기 위해서는 강체블록방법과 다른 수치해석방법을 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

4. 암반동굴의 수치모형화

방사성폐기물의 영구처분을 위한 암반동굴 구조물은 지진과 같은 동적하중이 작용하는 경우 동굴주위의 구조거동과 그 안전성이 가장 중요한 관심사가 된다. 따라서 실제로 암반동굴의 구조해석시 비교적 정확하면서도 효율적인 수치계산을 위해서는 암반동굴구조물의 거동에 영향을 준다고 판단되는 불연속면들만을 고려하는 것이다. 이러한 가정사항을 생각한다면 암반동굴 구조물의 수치모형화를 위해서 고려해야 할 수치영역은 다음과 같이 크게 3부분으로 분류할 수 있다.

- 1) 동굴내의 라이너
- 2) 동굴거동에 영향을 주는 불연속면들을 포함한 암반영역
- 3) 위의 두 영역을 제외한 나머지 영역

동굴의 형상을 둘러싸고 있는 라이너의 모형화에는 일반적으로 이차원 보 유한요소를 사용한다. 따라서 암반동굴구조물의 수치모형화에는 다음과 같은 2가지 수치모델이 이용가능하다.

첫번째 수치모델은 보 유한요소, 강체블록모델, 그리고 경계요소를 혼합 사용한 모델이다. 이 수치모델을 사용하여 암반동굴을 모형화하는 경우에는 그림5와 같이 라이너를 보 유한요소, 불연속

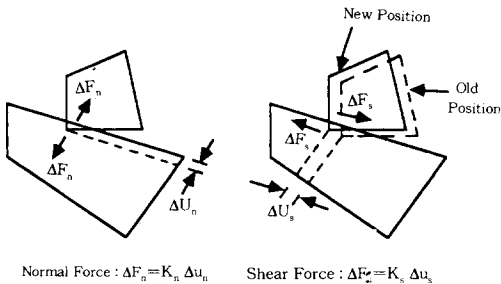


그림4. 강체블록모델의 상호작용

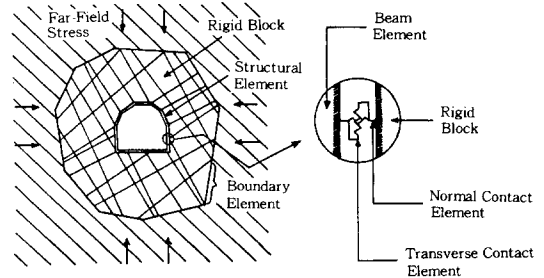


그림5. 보 유한요소, 강체블록모델, 경계요소 등을 이용한 암반동굴의 구조해석모델

면이 존재하는 동굴주위의 암반을 강체블록모델, 그리고 그 이외의 영역을 경계요소로 모형화한다. 이 수치모델을 사용하게 되면 무한영역의 영향을 고려할 수 있는 장점이 있으나, 아직까지 경계요소법에 대한 이론이 확실하게 정립되지 못하였고 이용상에는 많은 제약이 따르기 때문에 실제의 해석을 수행하는 데 어려움이 발생한다.

두번째 수치모델은 보 유한요소, 강체블록모델, 그리고 이차원 유한요소를 혼합사용한 모델이다. 이 수치모델에서는 첫번째 모델과 마찬가지로 라이너와 동굴주위의 암반을 보 유한요소와 강체블록모델로써 모형화하며, 그 이외의 영역모형화에는 그림6과 같이 이차원유한요소를 사용한다. 이 수치모델을 사용하게 되면 유한요소로 모형화되는 영역밖의 영향은 고려할 수 없기 때문에 이러한 문제점의 해결을 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 특수경계조건이나 무한요소 등을 추가적으로 모형화에 사용하는 것이 바람직하다.

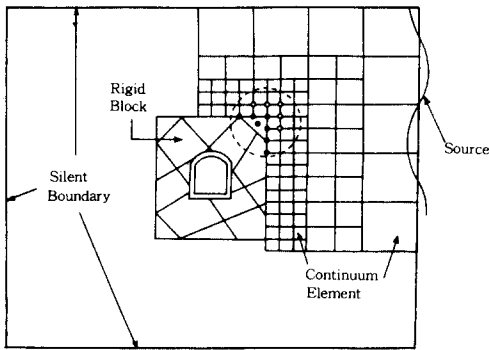


그림6. 보 유한요소, 강체블록모델, 이차원 유한요소 등을 이용한 암반동굴의 구조해석모델

## 5. 맺음말

방사성폐기물 처분을 위한 지하암반동굴의 구조물 안전성확보를 위해서는 암반동굴의 보다 정확한 구조해석이 수행되어야 한다. 그러나 현재까지 지하구조물의 구조해석방법에 대한 연구는 지상구조물에 비하여 낙후되어 있으며, 상당한 부분을 근사적인 경험에 의존하고 있는 실정이다. 특

히 암반구조물의 해석을 위한 수치모델에 대한 연구는 중요성에 비해 국내에서 극히 부진한 상태이다. 따라서 보다 정확하게 지하암반동굴의 구조해석을 수행하기 위해서는 암반내에 존재하는 불연속면의 수치모델과 지하구조물에 대한 효율적인 구조해석방법의 개발에 많은 관심을 기울여야 할 것이다.

## 필자주

본고는 방사성폐기물관리기금에 의해 수행된 1988년도 연구보고서 내용의 일부를 요약정리한 것이다.

## 참고문헌

1. 김진웅, 심재구, 김대홍, "방사성폐기물 처분방법에 따른 구조형태고찰", 대한토목학회지, (1988)
2. 김진웅, 서정문, 최규섭, "중·저준위 방사성폐기물 처분을 위한 암반공동의 해석 및 설계시 고려사항", 대한토목학회지, (1988)
3. 김문겸, 정연규, "사용후핵연료 폐기처분장 구조물의 설계개념", 대한토목학회지, (1987)
4. Shipp, B.D., "Technology and art of nuclear waste disposal," J. of Str. Engrg. ASCE, (1988).
5. Yamahara, H., Hisatomi, Y., and Morie, T., "A study on the earthquake safety of rock cavern," Proceedings of the Rockstore Conference, Stockholm, (1982).
6. Wilson, E.L., "A computer program for the dynamic stress analysis of underground structures," UC, Berkeley, (1968)
7. Brown, E.T., Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, Allen & Unwin(1987).
8. Goodman, R.E., Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company(1976).
9. Bray, B.H.G. and Brown, E.T., Rock Mechanics for Underground Mining, Allen & Unwin(1985).