

## 불연속면의 영향을 고려한 암반동굴의 구조거동연구

### A Study on Structural Behavior of Underground Openings in Discontinuous Rock Masses

○ 김 선 훈\*      최 규 섭\*      이 경 진\*\*      김 진 용\*\*\*  
KIM, SUN-HOON      CHOI, KYU-SUP      LEE, KYUNG-JIN      KIM, JHINWUNG

#### ABSTRACT

In order to predict properly the effects of ground motion associated with earthquakes on underground radioactive waste disposal facilities, understanding of the structural behavior of an underground opening in discontinuous rock masses subjected to dynamic loadings is essential. Therefore, this paper includes literature review on computational models for discontinuous rock masses and on mathematical models for the structural analysis of underground openings. Then, structural analyses of underground openings using the distinct element computer program written for the static and dynamic analysis of discontinuous rock masses have been performed.

#### 1. 서 론

방사성폐기물의 영구처분시설을 비롯하여 지하원자력발전소, 지하비축시설 등과 같이 안전성이 중시되는 지하구조물은 양호한 암반 지역에 건설하여야 하며 어떠한 하중에 대해서도 구조물에 피해가 발생하지 않도록 설계하여야 한다. 그러나 암반의 거동형태는 암반 자체의 이방성, 불연속면의 비선형성, 불연속면으로 인한 암석간의 비연속성 등과 같은 불확실한 요인들로 인하여 매우 복잡한 양상을 보여주고 있다. 또한 암반내에 존재하는 불연속면은 생성과정, 방향, 틈간격, 불연속면 내부의 충전물 특성, 불연속면의 분포 등 여러 복합적인 특성에 따라 역학적 특성을 달리하고 있다. 따라서 지하구조물의 구조거동을 보다 합리적으로 해석하기 위해서는 암반내에 존재하는 불연속면의 영향을 반드시 고려하여야 할 것이다[1].

방사성폐기물을 지하암반내에 처분하는 경우 지진이 발생하게 되면 지반의 흔들림과 지진으로 인한 지반의 파괴에 의해 방사성폐기

물 처분시설의 구조거동은 큰 영향을 받을 것으로 예상되고 있다. 따라서 방사성폐기물 영구처분시설의 부지선정을 위해서는 지진의 안전성에 대해서도 충분한 검토가 필요하다. 그러나 아직까지 우리나라는 물론 선진외국에서도 방사성폐기물 처분시설과 같은 지하구조물의 지진에 대한 연구는 극히 부진한 상태이다. 미국의 경우 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)는 아직까지 방사성폐기물 처분시설에 대한 설계기준을 정립하지 못한 상태이나, 대체적으로 원자력발전소의 주요구조물에 대한 설계기준을 근본으로 하여 처분장의 설계기준을 작성할 것으로 예상되고 있다[2].

방사성폐기물 처분시설의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 크게 두 단계의 검토가 필요하다[2]. 첫째는 운영단계(Operational Phase)에서 사람과 장비의 안전성 확보 문제이다. 이 경우는 특히 처분장 진입동굴의 구조적 안전성확보가 중요한 검토사항이다. 둘째는 폐쇄단계(Decommissioned Phase)에서 지진의 발생으로 인하여 외부 지하수의 침투 가능성과 폐기물의 핵증출 가능성에 대한 검토이다.

구조공학적인 측면에서 보면 특히 운영단계에서의 처분동굴의 지진에 대한 안전성 확보 문제가 시급한 과제이다. 이를 위해서는 암반내에 존재하는 세부균열이나 절리와 같은 불연속면의 영향을 고려할 수 있는 수치해석모델에 대한 연구와 지진하중과 같은 동적하중에

\* 정회원, 한국원자력연구소 구조설계실  
선임연구원  
\*\* 정회원, 한국원자력연구소 구조설계실  
연구원  
\*\*\* 한국원자력연구소 구조부 책임연구원

암반동굴의 구조거동을 정확하게 표현할 수 있는 구조해석방법에 대한 연구가 종합적으로 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 방사성 폐기물의 처분을 위한 암반동굴의 구조거동을 파악하기 위하여 암반내에 존재하는 불연속면의 영향을 고려하여 지진하중에 대한 암반동굴의 구조거동을 검토하고자 한다. 이를 위하여 불연속암반체의 수치해석모델에 대한 비교분석을 수행하였다. 또한 지하암반동굴의 합리적인 구조해석방법으로서 동굴주위는 강체블럭모델을 사용하여 불연속면의 영향을 고려하고, 동굴에서 일정한 거리가 떨어진 지역밖의 영역은 특수경계처리방법을 사용하여 먼거리(Far Field)의 영향을 고려하는 방법을 제시하였다. 그리고 이 방법을 사용하여 가상의 암반동굴에 대한 동적구조해석을 수행하였다.

## 2. 불연속암반체의 수치해석모델

### (1) 절리요소 해석모델

절리요소(Joint Element)는 불연속면의 모형을 위해 개발된 유한요소모델로서 암반내의 불연속면으로 인한 불연속성이나 인접암석 간의 상호거동 등을 비교적 잘 나타낼 수 있다[3,4]. 절리요소 해석모델을 사용하여 불연속암반의 2차원 구조해석을 수행하는 경우 순수한 암석은 연속체로 생각하여 평면유한요소로 모형화하고, 암반내에 존재하는 불연속면은 절리요소를 사용하여 모형화한다. 이 요소의 강성도행렬 계산과정은 일반적인 평면유한요소에 대한 방법과 동일하며, 다만 요소의 응력과 변형도의 관계를 맺어주는 재료특성행렬의 성분들이 불연속면의 여러 특성치(마찰각, Dilation, 두께 등)로부터 구해지는 수직강성과 전단강성들로 이루어진다는 점이 다르다. 절리요소에서 표현가능한 변형형태는 불연속면의 닫힘(Closure), 열림(Opening), 회전(Rotation), 미끄러짐(Sliding) 등이 있다.

절리요소 해석모델을 사용하여 암반체에 대한 강성도행렬이 구해지면 주어진 하중에 대하여 절점에서의 변위와 요소에서의 응력을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 변위와 응력을 이용하여 가정된 불연속면의 하중-변위 관계식에 적합하도록 수정된 강성도 혹은 수정된 하중을 반복계산함으로써 보다 실제에 가까운 불연속면의 비선형성을 고려할 수 있다[5].

불연속면이 존재하는 암반체를 유한요소법으로 구조해석하는 경우 절리요소를 사용한다면 비교적 손쉽게 불연속면의 영향을 고려할 수 있으나 최근에 들어 절리요소에 대한 몇가지 문제점이 제시되고 있다. 첫째로 절리요소의 수치해석상의 문제점이다. 특히 절리요소의 가로-세로 길이비(Aspect Ratio)가 많은 차이를 보일때 수치해석결과에 많은 문제점을 보여주었다[6]. 또한 불연속면의 모형화에 사용되는 절리요소의 질량과 인접암석의 모형화에 사용되는 평면유한요소의 질량이 많은 차

이를 보이기 때문에 암반체의 고유치해석(Eigenvalue Analysis)결과 기묘한 흔들림(Spurious Oscillation)현상을 보여주었다[7]. 둘째로 암반체의 동적해석시 외부에서 가해지는 하중의 파장(Wave Length)이 절리요소와 평면유한요소의 길이에 비하여 크게 되는 경우 절리요소해석모델을 이용한 해석결과는 많은 오차를 보여주었다[8]. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 해석영역의 전지역을 많은 절리요소 해석모델로 사용하여 모형화하여야 한다. 따라서 해석에서 관심의 대상 이외의 지역에도 많은 자유도가 존재하여 수치해석상에 많은 계산량이 필요하게 되므로 이 방법은 매우 비효율적임이 발표된 바 있다[9].

### (2) 개별요소모델

암반내에 존재하는 불연속면의 역학적특성은 암반체의 구조거동을 좌우하는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 일반적으로 불연속면의 강성은 주변암석의 강성에 비하여 매우 작기 때문에 암석내부에 발생하는 미소변형을 무시한다면 순수한 암석의 거동은 강체거동으로 가정할 수 있다. 개별요소모델(Distinct Element Model)은 불연속암반을 모델의 모서리와 모서리 또는 모서리와 변사이의 접촉을 통해서만 상호거동을 표현할 수 있는 불력으로 모형화하기 때문에 암석의 강체거동을 나타내는데 편리하다[10]. 개별요소모델에는 불력이 나타낼 수 있는 변형형태에 따라 강체블럭모델(Rigid Block Model)과 변형가능블럭모델(Deformable Block Model)로 분류할 수 있다[11].

강체블럭모델은 불연속암반의 수치해석모델인 개별요소모델 중에서 가장 기본이 되는 모델로서 블럭내부에 미소변형은 발생하지 않는 것으로 가정하고 있으며, 모델의 거동은 단지 불력의 모서리와 모서리 또는 모서리와 변사이에서만 가능하다[12]. 인접한 두 개의 블럭사이에서 발생하는 상호작용은 그림 1에 나타난 바와 같다. 접촉점에서의 힘-변위 관계는 연속적인 선형적 증분으로 표시하여 비선형을 고려할 수 있다.

블럭의 모서리와 변사이의 접촉(Corner to Edge Contact)으로 인하여 발생하는 수직력증분  $\Delta F_N$ 과 전단력증분  $\Delta F_S$ 는 각각 선형 힘-변위 관계식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta F_N &= K_N \Delta u_N \\ \Delta F_S &= K_S \Delta u_S \end{aligned} \quad \text{-----(1)}$$

여기서,  $\Delta u_N$ 과  $\Delta u_S$ 는 각각 접촉점에서의 상대적인 수직 및 전단 변위증분을 의미하고,  $K_N$ 과  $K_S$ 는 각각 수직 및 전단에 대한 접촉강성도를 의미한다. 블럭의 접촉면에서 실제 발생하는 수직력  $F_N$ 과 전단력  $F_S$ 는 식 (1)에서 구해지는 두 힘의 증분치를 모두 합함으로써 구할 수 있다.

Mohr-Coulomb모델을 사용하면 불연속면에서

의 수직응력과 수직변위의 관계는 선형거동으로 가정하고, 전단응력과 전단변위의 관계는 탄소성거동으로 가정하여 수직응력( $\sigma_n$ )과 전단응력( $\sigma_s$ )을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_n^0 + k_n \Delta u_n \\ \sigma_s &= \sigma_s^0 + k_s \Delta u_s \end{aligned} \quad \text{-----}(2)$$

여기서,  $\sigma_n$ 와  $\sigma_s$ 는 각각 전단계에서 계산된 수직응력과 전단응력이며,  $k_n$ 과  $k_s$ 는 각각 절리의 수직 및 전단강성을 의미한다. 또한  $\Delta u_n$ 과  $\Delta u_s$ 는 각각 수직변위의 증분과 전단변위의 증분을 의미한다.

식 (2)에서 계산된 수직응력과 전단응력은 매단계마다 다음의 관계식에 의해 검토되어야 한다

$$\begin{aligned} \sigma_n &\leq 0 \\ |\sigma_s| &\leq c - \sigma_n \tan \phi \end{aligned} \quad \text{-----}(3)$$

여기서,  $c$ 와  $\phi$ 는 불연속면에서의 점착력과 마찰각을 의미한다.

강체블럭모델을 사용하여 암반체를 모형화 하면 블럭내부에 발생하는 미소변형은 무시되고 블럭의 거동은 단지 블럭과 블럭간의 접촉점에서만 발생 가능하다. 따라서 이 경우에는 외부하중이 암반체에 작용하여도 강체블럭모델의 기하학적 형상은 변화하지 않는다. 그러나 실제로 불연속암반의 구조거동은 불연속면의 역학적 특성에 따른 거동변화와 순수한 암석내부에 발생하는 미소변형에 의해 좌우된다. 이러한 문제점 때문에 강체블럭모델을 사용하여 불연속암반체를 구조해석하였을 경우 그 결과는 실제와 상당히 다른 양상을 보여 주었다.

변형가능블럭모델은 강체블럭모델의 문제점을 개선시킨 모델로서 다음과 같은 두가지 형태의 모델이 제안되었다[11]. 첫번째 모델은 단순변형가능 블럭모델(Simply Deformable Block Model)로 이 모델은 블럭내부의 미소변형을 3개의 자유도로 표현하고 있다. 두번째 모델은 완전변형가능 블럭모델(Fully Deformable Block Model)로 이 모델에서는 블럭내부를 유한차분영역(Finite Difference Zone)으로 이산화(Discretization)하여 블럭내부에서 발생가능한 임의의 변형형태를 표현할 수 있다.

### 3. 개별요소법과 해석경계 처리방법

#### (1) 블럭모델의 운동방정식

강체블럭의 운동은 각 블럭에 가해지는 힘 성분과 모멘트의 합력이 작용하는 방향과 크기에 의해 좌우된다. 그리고 외부하중에 의해 발생하는 강체블럭의 이동변위와 회전변위는 블럭의 도심에서 구할 수 있다. 따라서 강체블럭에 대한 운동방정식은 블럭도심에서 구해지는 변위값과 외부에서 작용하는 힘과의 관계로부터 유도할 수 있다. 만일 블럭의 감쇠

를 무시한다면 강체블럭의 속도방정식은 다음과 같다 (그림 2 참조).

$$\begin{aligned} \dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left( \frac{\sum F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \\ \dot{\theta}^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{\theta}^{(t-\Delta t/2)} + \frac{\sum M^{(t)}}{I} \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\dot{u}_i$ 는 블럭도심에서의  $i$ 방향 이동변위 속도성분을 의미하고,  $\dot{\theta}$ 는 블럭도심에서의 회전변위속도를 의미하며,  $I$ 는 블럭의 관성모멘트를 의미한다. 또한  $\sum F_i$ 와  $g_i$ 는 각각의 부에서  $i$ 방향으로 작용하는 힘의 합력과 중력 가속도를 의미하고,  $\sum M$ 은 모멘트의 합력을 의미한다.

식 (4)에서 구해진 속도성분으로부터 새로운 블럭의 위치를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i^{(t+\Delta t/2)} &= x_i^{(t)} + \dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \\ \theta^{(t+\Delta t/2)} &= \theta^{(t)} + \dot{\theta}^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \end{aligned} \quad \text{-----}(5)$$

여기서,  $x_i$ 는 블럭도심의 좌표값을 의미하고,  $\theta$ 는 블럭의 도심에 대한 회전각을 의미한다. 완전변형가능블럭모델을 사용하는 경우 블럭내부를 유한차분영역으로 이산화하여 생성된 격자점(Grid Point)에서의 운동방정식은 강체블럭의 도심에 대한 운동방정식과 동일하다. 다만 격자점에서의 운동방정식의 구성식에는 회전에 대한 항을 무시하고 있다[11].

#### (2) Explicit해법

불연속암반체의 구조해석시 암반체의 거동은 암반자체의 비선형성과 암반내에 존재하는 불연속면의 비선형성 등의 영향으로 인하여 심한 비선형성을 나타내고 있다. 따라서 개별요소모델을 이용하여 불연속암반체를 동적 해석하는 경우에는 미분방정식의 수치적분법으로 직접적분법만이 적용가능하며, 효율적 측면에서 Implicit방법 보다는 Explicit방법을 사용하는 것이 유리하다. 그러나 Explicit방법은 시간증분의 크기에 따라 해석결과가 크게 달라지는 결과를 보여 줄 수 있다. 따라서 해석결과의 수치적안정성 확보를 위해 시간증분의 크기를 적절하게 사용하여야 한다.

#### (3) 해석영역의 경계처리방법

수치해석기법을 사용하여 암반동굴과 같은 무한영역을 갖는 문제를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 해석영역경계에서의 경계조건을 적절하게 처리하여야 한다. 특히 지진과 같은 동적하중에 대한 해석시에는 외곽경계면에서 외부로의 에너지발산이 허용되지 않으며 고주파의 영향이 걸러지는 여과현상(Filtering Effect) 등의 문제점이 발생하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 경계조건에서 발산을 허용하도록 개발된 특수경계(Transmitting Boundary, Absorbing Boundary 등)를 사용하여 모형화합이 바람직하다.

#### 4. 암반동굴의 구조해석에

본 연구에서는 개별요소모델을 사용하여 불연속면이 주위에 산재한 가상의 지하암반동굴에 대하여 구조해석을 수행하였다.

해석에 고려된 암반동굴의 구조는 그림 3과 같이 저변이 20m, 벽면의 높이가 10m, 벽면상부로부터 동굴정점까지의 높이가 4.14m이며, 동굴주변의 절리군은 미국 Ontario주의 Fraser광산주변의 불연속면분포[11]를 참조하여 그림과 같이 동굴주변에 10m간격으로 11°와 50°의 분포로 산재한 것으로 가정하였다.

##### (1) 해석영역의 결정

그림 3의 동굴구조는 무한영역내에 존재하므로 보다 정확하고 합리적인 해석결과를 구하기 위해서는 적절한 해석영역크기의 선정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 3의 동굴에 대한 적절한 해석영역의 크기선정을 위하여 전체해석모델의 크기를 40m×40m에서 200m×200m까지 해석모델좌우면과 상하면을 동시에 20m씩 증가시키에 따라 해석영역이 해석결과에 미치는 영향을 파악하였다. 각 경우의 해석영역내에서 하중은 외부경계부분에 수평과 수직방향으로 동일한 크기의 초기응력 ( $R_x = R_y = 240.0 \text{ kg/cm}^2$ )을 작용시켰고, 해석모델의 외부경계를 구성하는 4모서리에서의 수직과 수평변위를 구속하였다. 해석시 암석과 불연속면의 거동은 Mohr-Coulomb의 항복조건을 만족하며, 암석은 완전변형가능률력으로 모형화하였고, 불연속면의 거동은 불력간의 상호작용으로 가정하였다.

해석영역증가에 따라 구한 동굴주변의 대표적인 몇개 점에서의 변위변화는 그림 4에 나타낸 바와 같다. 그림에 나타낸 바와 같이 해석영역크기의 증가에 따라 동굴주변에서 구한 변위는 해석영역의 크기가 140m×140m이상 일 때 안정된 결과를 보여주었다.

##### (2) 암반동굴의 동적해석

다음은 처음단계에서 결정한 해석영역(140m×140m)내에서 해석모델상부에 수직방향의 동적하중이 작용하였을 경우 불연속암반동굴에 대한 동적해석을 수행하였다. 해석모델내에서 암석과 불연속면의 모형화에 사용한 불력형태, 불력수, 재료특성, 구성관계 등은 해석영역 결정시와 동일한 모델을 사용하였고, 경계부분은 모든 형태의 체적파를 흡수할 수 있도록 점성경계를 사용하였다(그림 5참조). 해석모델상부에 작용시킨 응력파는 Sinusoidal형태인  $12.5 \cos(2\pi 100t)$ 이다.

그림 5의 모델에 대한 동적해석결과 구한 해석모델의 중심축상에서의 연직깊이에 따른 속도변화는 그림 6과 같다. 그림의 결과로부터 연직깊이에 따른 속도성분은 동굴의 영향으로 인하여 동굴저변중앙점에서 증폭량, 증폭범위, 최대증폭속도 등이 다른 점에 비하여 더 크게 발생함을 알 수 있다.

또한 동굴주변 6개절점에서 구한 시간에 따른 변위변화는 그림 7과 8에 나타내었다. 그

림에서 동굴주변에서의 변위변화는 동굴주변에 분포한 불연속면의 영향 등으로 인하여 변위의 증폭, 최대변위, 증폭이 발생한 시간 등이 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다. 본 예제의 경우 최대수평변위는 동굴상부면과 동굴우측벽면이 만나는 점에서 발생하였고, 최대수직변위는 동굴저변중앙점에서 발생하였다. 이때 변위의 증폭은 대체적으로 0.06초이내에서 급격한 변화를 나타내고 그 이후에는 일정한 값을 보여줌을 알 수 있다.

그림 5와 동일한 모델에 대하여 수직방향의 응력파와 같은 크기를 갖는 수평방향의 응력파를 해석모델의 좌단에 작용시켰을 경우 연직축깊이에 따른 속도성분변화를 검토한 결과 그림 6과 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다[13]. 이 경우 동굴저변중앙점에서 발생한 최대증폭속도는 수직방향의 응력파를 모델상단에 작용시켰을 경우보다 약 1.3배 정도 크게 발생하였다. 또한 수평방향의 응력파를 해석모델좌단에서 작용시켰을 경우에 구한 동굴주변에서의 최대수평변위는 동굴좌측벽면과 동굴상부가 만나는 점에서 발생하였고, 최대수직변위는 동굴저변중앙점에서 발생하였다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 방사성폐기물 처분동굴의 지진시 구조적안전성 확보를 위하여 불연속암반체의 동적구조거동연구를 수행하였다. 이를 위하여 불연속암반체의 수치해석모델에 대한 비교분석과 불력모델의 운동방정식 구성에 대하여 검토하였다. 또한 개별요소모델을 사용하여 가상의 지하암반동굴에 대한 동적구조해석을 수행하기 위하여 해석영역의 선정 작업과 경계처리방법 등에 대해서 검토하였으며, 선정된 해석모델에 대한 동적구조해석을 수행하였다.

방사성폐기물 처분을 위한 암반동굴의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 불연속암반체의 수치해석모델과 해석방법의 정립이 필요하다. 따라서 이에 대한 많은 연구를 추후 계속적으로 수행하여야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Brown, E.T., Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, Allen and Unwin, 1987.
2. Carpenter, D. W. and Chung, D. H., "Effects of Earthquakes on Underground Facilities: Literature Review and Discussion," Lawrence National Laboratory, NUREC/CR-4609, 1986.
3. Goodman, R. E., et al., "A Model for the Mechanics of Jointed Rock," ASCE, Vol. 94, No. SM3, 637~659, 1968.
4. Chaboussi, J., et al., "Finite Element

for Rock Joints and Interfaces," ASCE, Vol. 99, No. SM10, 833~848, 1973.

5. Goodman, R.E., Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company, 1976.
6. Pande, G. N. and Sharma, K. G., "On Joint/Interface Elements and Associated Problems of Numerical Ill-Conditioning," Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 3, 293~300, 1979.
7. Hohberg, J.M., "A Note on Spurious Oscillations in FEM Joint Elements," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 773~779, 1990.
8. Dowding, C. H., et al., "A Coupled Finite Element-Rigid Block Method for Transient Analysis of Rock Caverns," Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 7, 117~127, 1983.
9. Yen, H. J., "Rigid Block Model for

Transient Analysis of Rock Structures," Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Northwestern Univ., 1982.

10. Cundall, P. A., "Distinct Element Models of Rock and Soil Structure," Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics, (Brown, E.T., ed.), 129~163, 1987.
11. Board, M., "UDEC (Universal Distinct Element Code) Version ICC 1.5," Itasca Consulting Group, Inc., NUREG/CR-5429, Vol.1, 1989.
12. Cundall, P.A., "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems," Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mech., 1971.
13. 김진용외, "구조거동 및 지질.수문특성연구 - 불연속면의 영향을 고려한 암반동굴의 동적구조거동," KAERI II/RR-5/90, 과학기술처, 1990.

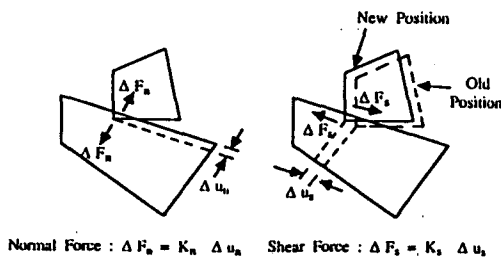


그림 1. 강체블럭모델의 상호작용

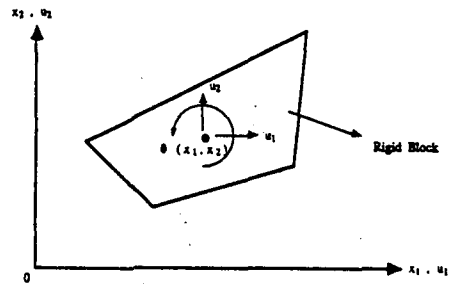


그림 2. 강체블럭모델의 변위성분

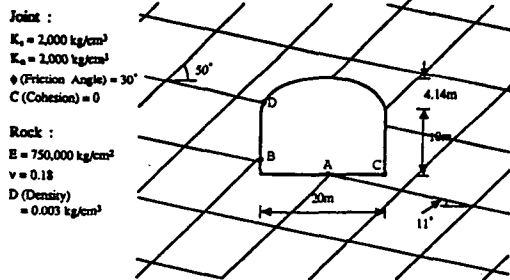


그림 3. 해석대상 암반동굴

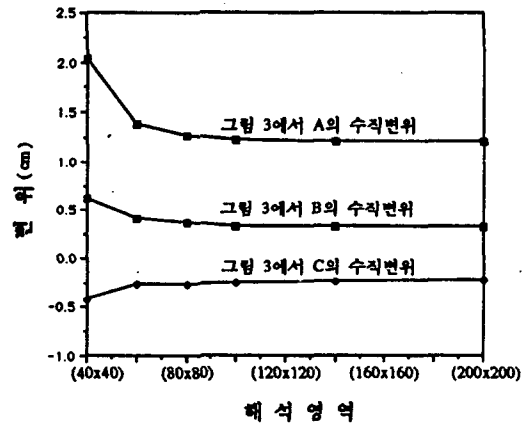


그림 4. 해석영역증가에 따른 수직변위의 변화

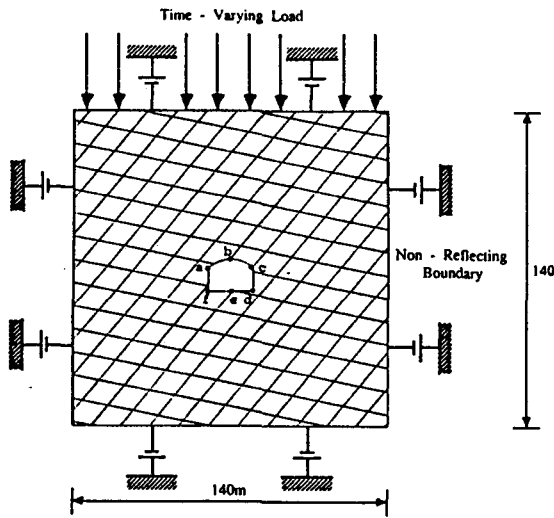


그림 5. 불연수압반동굴의 동적해석모델

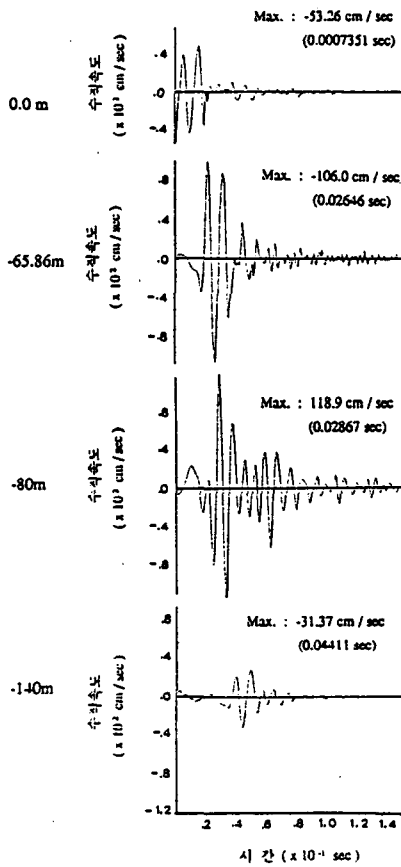


그림 6. 연직깊이에 따른 수직방향속도변화

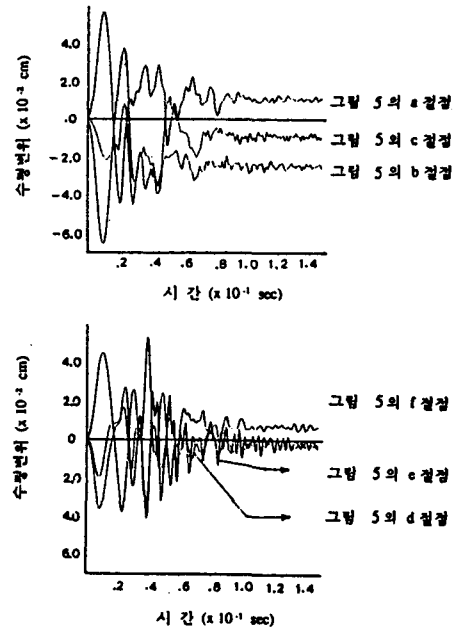


그림 7. 동굴주변결점에서의 수평변위변화

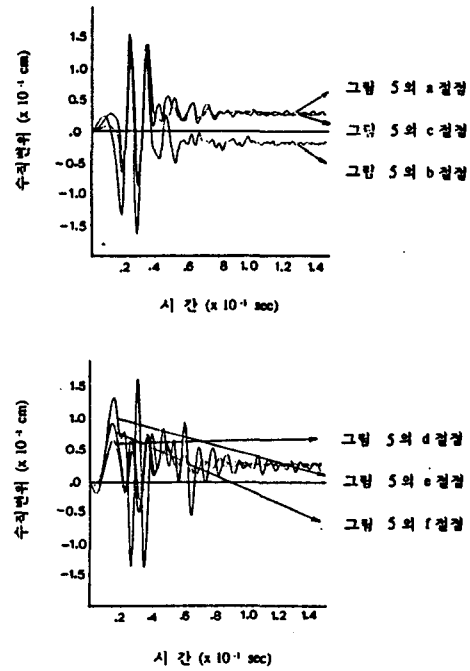


그림 8. 동굴주변결점에서의 수직변위변화