

폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 공적 유한요소해석

Three-Dimensional Dynamic Analysis of Underground Openings Subjected to Explosive Loadings

김 선 훈* 김 진 웅** 김 광 진***
Kim, Sun-Hoon Kim, Jhin-wung Kim, Kwang-Jin

요 약

본 연구에서는 발파로 인한 폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 동적유한요소해석을 수행하였다. 해석과정은 1차원 근원해석과정과 3차원터널해석과정의 2단계로 나누어 수행하였다. 1차원 근원해석에서는 장약공과 그 주변의 자유장을 포함하는 해석으로서 3차원 터널해석을 위한 입력하중의 계산작업을 수행한다. 본 연구에서 수행한 해석방법의 기능은 3차원 동적해석프로그램 MPDAP-3D에 추가되었으며, 향후 발파공법에 의한 지하공동구조체의 건설시 구조체의 안전성을 평가하는데 활용가능할 것으로 예상된다.

Abstract

Three-dimensional dynamic analyses of underground openings subjected to explosive loadings are carried out. Dynamic analyses consist of two steps; one-dimensional source calculation and three-dimensional tunnel analysis. One-dimensional source calculation includes explosive charge and the free field surrounding rock. The input pressure time history for three-dimensional tunnel analysis is obtained from the companion one-dimensional source calculation. The computer program MPDAP-3D incorporated this analysis capability. It is shown that the computer program is a useful tool for the analysis of the structural safety evaluation of underground openings during construction by drill and blasting method.

Keywords : explosive loading, underground opening, source calculation, tunnel analysis, pressure time history

1. 서 론

1996년 가을 영광원자력발전소 3, 4호기의 준공으로 우리나라에는 현재 11기의 원자력발전소가 가동중에 있으며, 이들로 부터 해마다 상당량의 중저준위방사성폐기물이 발생되고 있다.

이에 따라 정부에서는 중저준위방사성폐기물을 중앙집중식으로 종합관리하기 위하여 수해전부터 관리시설의 부지선정과 건설을 추진중에 있다.

방사성폐기물 영구처분방법으로는 지하수의 유동이 적고 지하수면 보다 높은 곳에 위치한 양호한 암반층에 공동을 건설하여 매립하는 것이

* 정회원·영동공과대학교 건설공학부 토목공학과 조교수
** 한국원자력연구소 후행핵연료주기연구그룹, 책임연구원
*** Principal Engineer, COMTEC RESEARCH, USA

· 이 논문에 대한 토론을 1997년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

가장 이상적이다. 그러나 실제적으로 이러한 이상적인 부지를 선정하는 것은 거의 불가능하다.

따라서 보다 처분장의 안전성을 최대한 확보하기 위해서는 여러 측면에서 공학적인 안전성을 평가하고 이를 설계 및 건설에 적극적으로 반영하여야 한다. 구조공학측면에서도 지하동굴처분장의 건설 및 운영기간 동안 안전성을 보장하기 위해서는 개념설계단계에서 적절한 구조적안정성해석방법을 확보하여야 한다¹⁾. 특히 지하동굴처분장의 건설과정에서 발파공법의 적용으로 공동굴착 주변 암반체의 균열대의 발생, 인접시설이나 지하공동구조체에 미치는 영향 등에 대한 연구의 필요성이 시급하게 요구되고 있다.

본 연구에서는 발파로 지하암반체를 굴착하여 공동을 건설하는 경우 공동주변 암반체의 거동변화를 수치적으로 검토해 보았다. 이를 위해 폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 유한요소해석을 효과적으로 수행하는 방법을 제안하였으며, 이 방법에 근거한 암반체의 3차원 동적유한요소해석프로그램을 개발하였다.

2. 이단계매체 동적해석프로그램

본절에서는 포화된 다공성매체(Saturated Porous Media)의 3차원 동적거동해석을 위해 개발한 전산코드 MPDAP-3D²⁾에 대해 간단하게 소개하고자 한다. 전산코드 MPDAP-3D는 이단계매체개념^{3), 4)}을 이용한 다공성매체의 2차원 해석프로그램^{5)~7)}을 3차원으로 확장시킨 것이다.

MPDAP의 근간이 되는 이단계매체개념의 유한요소 수식화를 위해서는 유효응력원리, 고체입자의 구성관계, 공극수의 흐름방정식, 혼합체(Bulk Mixture)의 운동방정식, 공극수의 운동방정식 등이 사용되었다²⁾.

이단계매체의 기본 방정식을 연립하면, 구하고자 하는 포화된 암반의 구성방정식을 도출할 수 있다. 그리고 다공성매체의 구성관계식으로는 일반화된 Hoek-Brown Model⁸⁾을 3차원으로 확장시켜 사용하였다. 이를 위해 일반화된 Hoek-Brown Model의 응력-변형도 관계, Failure Sur-

face, Flow Consistency방정식, 탄소성 구성법칙 등이 고려되었다.

도출된 포화암반의 구성방정식은 유한요소법을 사용하여 3차원요소의 절점에서의 힘-변위 관계로 나타내지며, 기존 2차원 수치해석용 프로그램을 수정 및 확장하여 3차원 동적거동해석 프로그램을 개발하였다⁹⁾.

발파충격에 대한 지하공동체의 동적해석과 관련하여 개발한 프로그램의 적용성을 검증하기 위해서 평면압축과의 전과해석문제와 무지보 원형터널의 해석문제에 대해 검토한 바 있다²⁾.

평면압축과의 전과해석문제는 수직방향으로 전과하는 평면압축과가 이상적으로 포화된 토사층을 관통하는 내용의 문제이었으며, 무지보 원형터널의 해석문제는 축대칭하중을 받고 있는 터널의 평면변형도 반응을 비교검토하는 문제이었다.

두 문제를 해석해 본 결과는 비교해와 잘 일치함을 보여주었으며, 따라서 본 프로그램의 적용성을 확인할 수 있었다²⁾.

3. 발파충격해석방법

발파로 인한 폭발충격하중에 대한 지하공동구조체의 유한요소해석시 발파공의 체적은 지반 전체체적에 비해 매우 미소한 부분에 해당된다.

따라서 이러한 미소부분을 고려하여 유한요소망을 생성시키면 정밀한 해석을 위해서는 엄청난 숫자의 요소를 필요로 하게 된다. 또한 해석의 목적이 발파로 인한 충격해석이므로 발파공 주변 영역의 모형화에 세심한 주의가 필요하다¹⁰⁾.

이러한 문제들을 종합적으로 검토한 결과, 발파공과 전체 구조체의 요소망을 동시에 해석할 경우 계산시간과 비용면에서 현실적인 어려움이 발생하는 바 효율적인 해석수행을 위해 본 연구에서는 다음과 같이 1차원 근원해석과 3차원 터널해석의 2단계로 나누어 수행하였다.

3.1 1차원 근원해석과 폭약원의 모형화

1차원 근원해석에서는 폭약원과 인접주변 자유장을 포함하는 영역에 대하여 정밀해석을 수행함

으로서 3차원 터널해석의 입력하중을 계산하는데 그 목적이 있다. 1차원 근원해석과정은 폭약원을 중심으로 축대칭의 문제이므로 축대칭유한요소를 사용하여 해석을 수행하는 것이 가능하다.

폭약원의 모형화에는 폭발의 단열팽창을 예측하고자 압력-체적-에너지관계를 간단하게 나타내고 있는 JWL식¹¹⁾을 다음과 같이 사용하였다.

$$\bar{P} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

여기서 \bar{P} 는 압력을 나타내며, V 는 상대체적값으로서 밀도의 비를 의미한다. 또한 E 는 내부에너지밀도이고, A, B, R_1, R_2, ω 는 각각 재료특성치들이다.

폭발의 화학반응과정을 모사하기 위해서는 Burn Fraction(BF)이 다음과 같이 사용되었다.

$$BF = \frac{(t - t_b) C_d}{B_s l} \quad (2)$$

여기서 t 와 t_b 는 각각 현재시간과 폭발시간을 의미한다. 또한 C_d 는 폭발속도, l 은 요소특성길이를 나타내며, B_s 는 2.5를 사용한다.

식(2)로부터 Burn Fraction값은 다음과 같이 제한하여 사용할 수 있다.

$$BF = 0 \quad (t < t_b)$$

$$BF = 1 \quad (t) t_b + B_s l / C_d) \quad (3)$$

따라서 요소내에서 발생하는 실제 압력은 JWL식에서 얻어지는 압력값과 Burn Fraction값의 곱으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = BF \bar{P} \quad (4)$$

폭약이 폭발하게 되면 폭약원 주변 암반체영역 중 인접한 영역에는 소성영역이 발생하게 된다.

따라서 1차원 근원해석의 영역을 결정하기 위

해서 먼저 폭약원에서 부터 일정한 거리만큼 떨어진 영역까지를 축대칭유한요소로 모형화하고, 식(4)에서 얻어진 폭발하중값을 입력하중으로 해석을 수행하여 대상영역의 동적거동 및 응력분포를 개략적으로 파악한다. 이 결과를 토대로 하여 유한요소망을 재구성한 후, 해석대상지역의 엄밀해석을 수행하여 3차원 터널해석을 위한 입력하중을 계산한다.

3. 2 3차원 터널해석

3차원 터널해석은 1차원 근원해석을 통하여 얻어진 압력이력값을 입력하중으로 하여 지하공동구조물과 주변 암반체 전체를 대상으로 하여 3차원 동적해석을 수행하는 과정이다. 1차원 근원해석을 통하여 인접 자유장에서 폭약원으로부터 소성영역을 벗어나 탄성영역이 발생하는 지점의 경계지점에서 발생하는 압력이력(pressure time history)을 입력하중으로 하여 3차원 터널해석을 수행한다.

본 연구에서 3차원 터널해석과정에서는 8절점 고체유한요소를 사용하여 해석을 수행하였다.

지하구조체는 무한영역의 문제이므로 대상구조물의 해석영역을 적절하게 선정하는 것이 매우 중요하다. 유한요소법을 사용하여 지하공동체의 동적해석해석시에는 해석영역의 경계에서 파의 반사를 방지하기 위하여 특수경계조건을 사용하거나, 경계요소법 또는 무한요소와 혼합하여 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 3차원 터널해석을 위해 해석영역의 경계에 특수경계조건중에서 전달경계조건(transmitting boundary condition)을 사용하였다.

4. 지하공동구조체의 3차원 발파충격해석

본 연구에서는 MPDAP-3D에 발파충격에 대한 지하구조체의 해석기능을 추가하여 지하공동구조체의 굴착시 발파충격에 대한 3차원 동적해석을 수행하여 인접한 지하공동과 주변 암반체에 미치는 영향을 검토하였다.

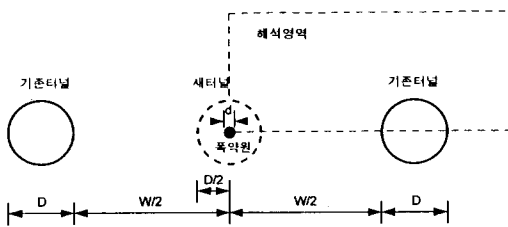
4.1 해석문제의 개요

본 해석에서는 기존에 존재하고 있는 직경이 5m인 2개의 공동체 중앙에 직경이 5m의 새로운 공동을 굴착하기 위하여 발파를 하였을 때, 발파 충격으로 인한 기존공동 주변암반체의 동적거동 변화를 검토하였다(그림 1 참조). 해석의 간편성을 위해 중력의 영향은 무시하여 전체 구조물의 1/8 만을 모형화하였다. 주변암반은 완전히 건조한 석회암으로 가정하였으며, 이 석회암의 재료 특성은 applied research associate에 의한 실험결과⁷⁾를 사용하였다. 암반체의 고체입자 재료특성은 표 1에 나타난 바와 같다.

또한 폭약원 모형화에 필요한 JWL식의 계수값과 Burn Fraction값의 계산에는 대표적인 ANFO의 특성값을 사용하였다(표 2 참조)¹¹⁾.

4.2 1차원 근원해석모형화 및 결과

1차원 근원해석을 위해 폭약원의 원점으로 부



- 터널의 크기 (D = 5 m, W = 20 m)
- 원통형 폭약의 크기 (d = 5 cm, L = 2 m)

그림 1 지하공동구조체와 폭약원의 기하학적 형상

표 1 고체입자의 재료특성값

Specific gravity (G _s)	Initial wave velocity (C ₀)	Initial Poisson's ratio(ν)	Constant relating wave velocity to particle velocity(S)	Threshold Pressure beyond which material tends to behave like a fluid
2.7	7078 m/sec	0.2	1.5	5Kb

표 2 대표적인 ANFO의 특성값

내부 에너지 밀도 (E)	폭발속도 (C _d)	초기밀도 (ρ ₀)	JWL식의 재료특성상 상수				
			A	B	R ₁	R ₂	W
7.08 GPa	3048m/sec	830 Kg/m ³	20 GPa	0.2 GPa	3.7	0.9	0.2

터 5m까지 200개의 균등길이(0.025m)를 갖는 4 질점 축대칭유한요소로 모형화하였다. 대상암반은 건조한 석회암으로 가정하여 해석을 수행하였다. 본 해석은 3차원 터널해석을 위한 입력하중의 계산을 위한 해석과정으로서 앞에서 언급한 폭약이 폭발하는 경우 1/sec의 시간간격으로 수행하였으며, Newmark의 γ-damping(γ=0.7)을 사용하였다.

해석결과 폭약원에서 근접한 영역(폭약원 원점에서 0.56m이내)에서는 소성영역이 나타났으며, 이에 따라 탄성영역에서 최근접지역인 0.56m 떨어진 지점을 3차원 터널해석의 입력지점으로 정하였다. 그림 2는 1차원 근원해석결과로서 장약공으로부터 0.56m 떨어진 지점에서의 원주방향 응력이력을 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 표시된 해석결과를 보면 충격파에 의한 응력값의 변화양상은 최고응력점에 도달한 이후 급격하게 감소하여 정역학적인 응력값에 도달함을 알 수 있다. 즉, 이 지점에서는 폭약이 발파된 후 145MPa의 최고응력값에 도달하였다가 그 이후에 급격히 감소하여 37MPa의 일정한 응력값을 나타내었다.

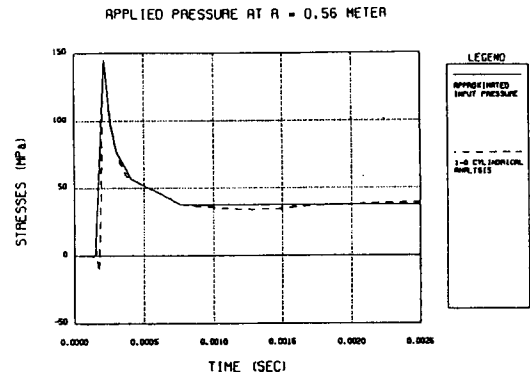


그림 2 1차원 근원해석결과 r=0.56m에서의 원주응력이력

4.3 3차원 터널해석모형화 및 결과

그림 3은 3차원 터널해석을 위한 해석대상문제의 영역과 경계조건을 나타낸 것이다. 대칭면에 해당되는 절점의 경계조건은 롤러조건을 사용하였고, 해석모델의 외부면은 충격파가 해석영역 외곽으로 전파되는 것을 고려하기 위하여 전달경계조건을 사용하였다.

그림 4는 X-Y평면상의 유한요소망을 나타낸 그림으로서 요소수는 261개이며, Z-축으로는 6개의 동일크기요소로 모형화함으로써 사용된 8절점 고체유한요소의 총숫자는 1566개이다.

1차원 근원해석을 통해서 얻어진 그림 2의 응력이력곡선(그림에서 점선표시선)은 효율적인 3차원 터널해석을 위해서 선형화작업을 통하여 근사화시켰다(그림에서 실선표시선). 따라서 폭약원으로 부터 0.56m 떨어진 원형면을 따라서 Z 방향으로 1.54m 길이 만큼 근사화시킨 응력이력을 작용시켜 40 μ sec의 시간간격으로 3차원 터널해석을 수행하였다.

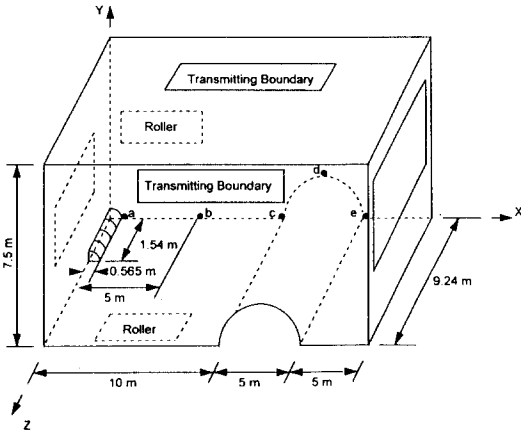


그림 3 3차원 터널해석을 위한 해석영역과 경계조건

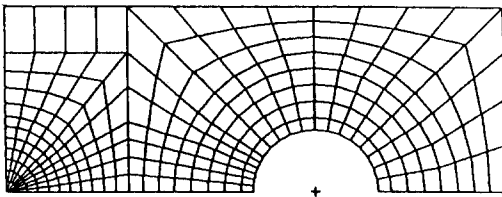


그림 4 X-Y평면상의 유한요소망

해석결과는 그림 3에 나타난 공동주변 암반체의 주요지점에서 응력이력, 속도이력, 변위이력 등으로서 그림 5에서 그림 14까지 나타내었다.

그림 5는 하중입력지점(장약공에서 0.56m 떨어진 지점) 가운데 X-Y평면상(Z=0)에 위치하고 있는 a지점에서의 원주방향 속도이력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 지점에서의 최대속도값은 응력이력에서 최대응력 145MPa이 작용할 때 발생하였으며, 그 값은 22m/sec로 나타났다.

그림 6은 X-Y평면상(Z=0) 공동주변 암반체의 주요 지점(그림 5에서 b, c, d, e)에서의 수평속도이력을 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 공동의 좌측 springline지점(그림 3에서 c)에서의 수평속도값은 공동의 존재로 인하여 우측방향으로 자유면이 존재하기 때문에 d와 e에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 수평운동의 경우 c에서의 최대속도값은 d에서의 최대속도값보다 4배 이상 크게 나타남을 알 수 있었다.

그림 7에서 그림 10까지는 3차원해석의 효과를 검토해 보고자 공동주변암반체의 주요지점(그림 3에서 b, c, d, e)에서 터널축방향(Z축방향)을 따라 각각 6개 지점에서의 수평방향 변위이력을 나타내 보았다. 그림에서 볼 수 있듯이 일반적으로 최대수평변위는 발파원으로 부터 거

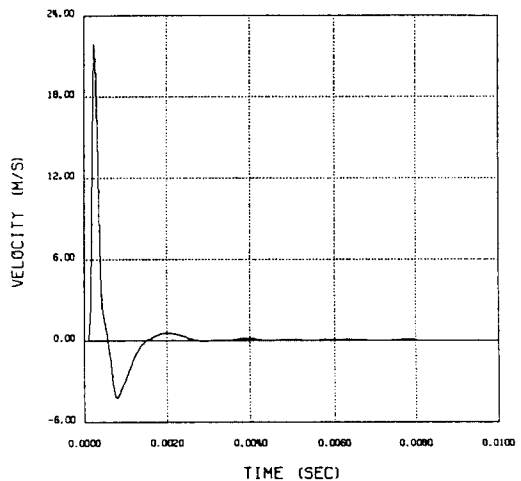


그림 5 a지점에서 원주방향의 속도이력

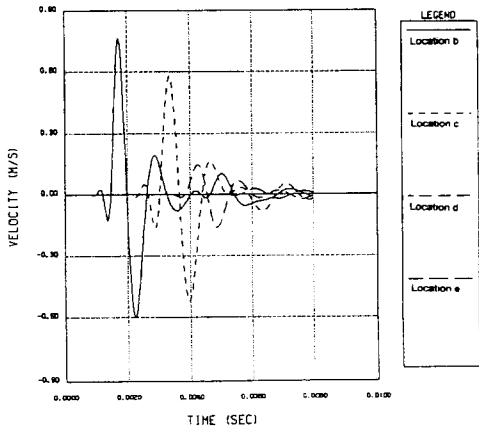


그림 6 공동주변 주요지점에서의 수평속도이력

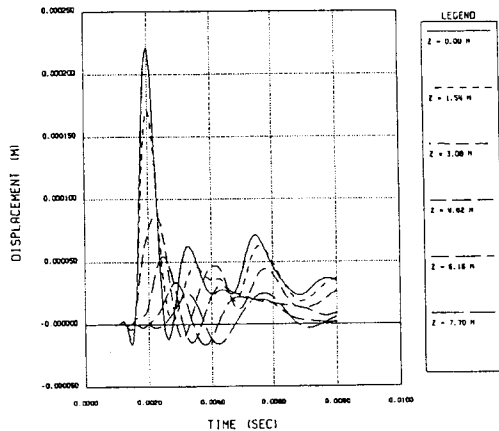


그림 7 b지점에서 터널축방향에 따른 수평변위이력

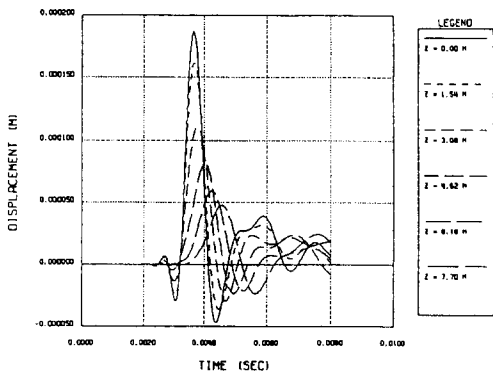


그림 8 c지점에서 터널축방향에 따른 수평변위이력

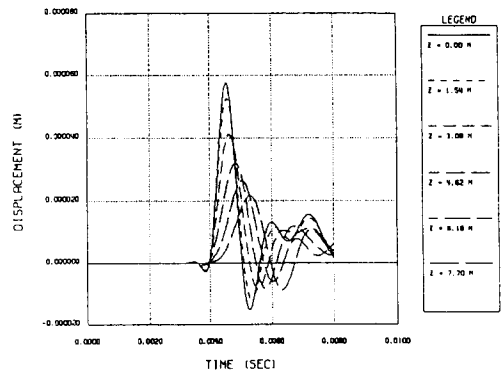


그림 9 d지점에서 터널축방향에 따른 수평변위이력

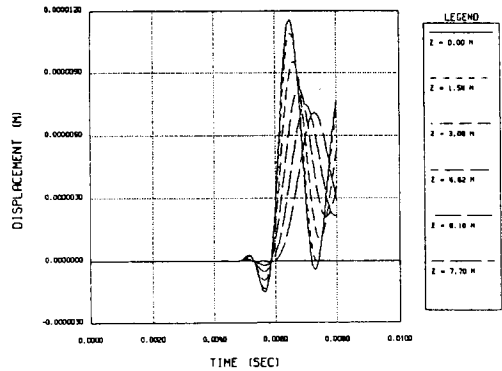


그림 10 e지점에서 터널축방향에 따른 수평변위이력

리가 멀어짐(그림에서 Z값이 증가함)에 따라 급속히 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 b, c, d, e 이외의 지점(Z=0이 아닌 지점)에서는 원주방향의 파전달방향이 수평방향과 일치하지 않기 때문에 최대수평변위가 maximum변위를 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 d점에서 터널축방향을 따라 수직변위이력을 나타낸 그림이다. 그림 9의 d점에서 수평변위와 비교해 보면 최대수직변위값은 최대수평변위값과 동일한 비율로 감소하는 결과를 보여주고 있다.

그림 12는 3.64msec에서 터널축방향을 따라 3개 지점에서의 터널변형형상을 나타낸 그림이다. 최대변위값은 X-Y평면상에서 공동의 좌측 Springline지점인 c에서 0.19mm발생하였다.

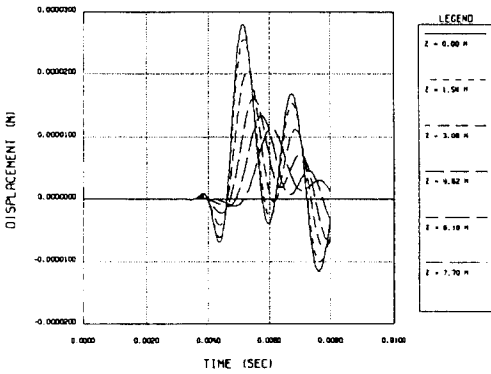


그림 11 d지점에서 터널축방향에 따른 수직변위이력

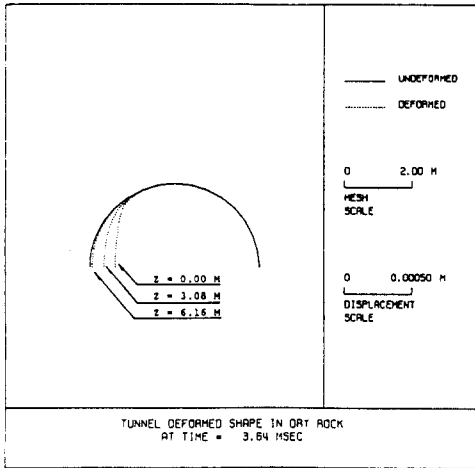


그림 12 터널변형형상(t=3.64msec)

표3은 본 연구의 3차원 터널해석을 수행하여 얻어진 수치결과 가운데 공동주변 암반체 주요 지점에서 발생한 최대속도값과 최대변위값을 요약한 것이다.

5. 결론 및 기대효과

본 연구에서는 발파로 지하암반체를 굴착하여 공동을 건설하는 경우 공동주변 암반체의 거동변화를 수치적으로 검토하고자 폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 유한요소해석을 효과적으로 수행하는 방법으로 1차원 근원해석과 3차원 터널해석의 2단계로 나누어 수행하는 방법을 제

표 3 공동주변 암반체 주요 지점에서의 최대수평속도값과 최대변위값

위 치	최대수평속도값 (cm/sec)	최대변위	
		방 향	변위값(mm)
b	77.0	수 평	0.22
c	58.0	수 평	0.19
d	-16.0	수 평	0.058
		수 직	0.028
e	2.6	수 평	0.016

시하였다. 1차원 근원해석에서는 장약공과 그 주변의 자유장을 포함하는 해석으로서 3차원 터널 해석을 위한 입력하중의 계산을 위해 수행한다.

이 방법에 근거한 해석기능은 이단계대체개념에 근거하여 개발한 암반체의 3차원 동적유한요소해석프로그램인 MPDAP-3D에 추가시켰다.

그리고 이 프로그램을 사용하여 기존에 존재하고 있는 2개의 터널구조물의 중앙에 새로운 공동을 굴착하기 위하여 발파를 하였을 때, 발파충격으로 인한 기존공동 주변 암반체의 동적거동변화를 검토하였다.

본 연구에서 제안한 해석방법과 해석프로그램을 활용하면 암반체에서의 발파로 인한 충격파가 인접공동에 미치는 안전성을 평가 할 수 있으며, 따라서 시공중의 발파 계획에 있어서 인접 공동이 안전할 수 있는 발파 Pattern, 굴진길이, 최소 화약량 등의 설계에 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 방사성폐기물관리기금으로 수행된 연구내용의 일부를 요약정리한 것임을 밝히며, 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김진웅, 서정문, 김재관, 김선훈, "방사성폐기물의 영구처분을 위한 지하공동시설", 1992년도 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 경북대학교, 1992, pp. 339-342.

2. Kim, S.H., Kim, J., and Kim, K.J., "Development of Three-dimensional Dynamic Analysis Program for Saturated Porous Media", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Mexico, 1996, Paper No. 392.
 3. Prevost, J.H., "Effective Stress Analysis of Seismic Site Response", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, Vol.10, pp. 653-665.
 4. Zienkiewicz, O.C., and Shiomi, T., "Dynamic Behavior of Saturated Porous Media; the Generalized Biot Formulation and its Numerical Solution", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 1984, Vol. 8, pp. 71-96.
 5. Blouin, S.E., et al., "Dynamic Response of Multiphase Porous Media", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1990.
 6. Kim, K.J., and Blouin, S.E., "Response of Saturated Porous Nonlinear Materials to Dynamic Loadings", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1984.
 7. Kim, K.J., et al., "Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1988.
 8. Hoek, E., and Brown, E.T., Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982.
 9. 한국원자력연구소, "처분구조물의 구조적 안전성 연구", KAERI-NEMAC/RR-83/93, 과학기술처, 1993.
 10. 이찬우, "TBM터널을 이용한 이방향 천공발파공법의 3차원 동적해석", 한국전산구조공학회지, 1995, 제8권 제1호, pp 30-38.
 12. Lee, E.L., Hornig, H.C., and Kury, J.K., "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products", UCRL-50422, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1968.
- (접수일자 : 1996. 12. 9)