

포화된 암반체에 위치한 공동의 발파충격해석 The Impulsive Analysis of the Cavern in Saturated Rock Mass

김 대 흥*, 이 경 진**, 황 신 일***, 김 진 응****

ABSTRACT

To secure long-term structural safety of underground openings for radioactive waste disposal, the proper structural safety analyses are required. Especially, the structural analysis for underground openings should consider the effects of groundwater pressure. The objective of this study is to develop the structural analysis method for saturated rock masses.

In this study, the interaction between groundwater distribution and structural behavior of rock masses are carried out to develop the structural analysis method of saturated rock masses. Then, a 3-Dimensional Multi-Phase Dynamic Analysis Program (MPDAP-3D) has been developed by modifying the existing MPDAP which is based on the concept of 2-dimensional two-phase media.

1. 서 론

원자력발전의 비중이 점차 증가함에 따라 현재 국내에는 원자력발전에 의하여 발생하는 부산물인 방사성폐기물의 양이 매년 증가하고 있다. 이에 따라 많은 과학자와 기술자들은 앞으로 건설될 방사성폐기물 처분장의 안전성 증대를 위해 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 장기적 안전성을 보장할 수 있는 설계개념의 확보를 위해 이에 관련된 여러분야의 연구를 수행중에 있다.

현재 국내에서 추진중에 있는 방사성폐기물의 처분개념은 지하암반을 굴착하여 건설하는 공동에 방사성폐기물을 처분하는 동굴처분방식이다. 따라서 동굴처분장의 건설 및 운영기간 동안 잠재적인 위험성을 극소화시키기 위해서는 개념설정단계에서 이미 적절한 구조적안정성 해석방법이 확보되어야 한다.

토사와 암반이 하나의 토목구조물로서 사용될 수 있는 주된 특성은 전단저항이라 할 수 있다. 그러나 이와 같이 토사나 암반이 주축이 된 구조물이 물에 포화되면, 전단저항은 급속히 감소하며, 구조물은 불안정한 상태에 도달할 위험성이 있다[1]. 장기간의 경우로 토사댐(Earth Dam)이나 옹벽(Retaining Wall)이 붕괴되는 경우나 터널공사중 지하수압에 의해 터널이 붕괴되는 경우는 구조물 설계시 지하수압을 고려하지 않은 대표적인 예라 할 수 있다. 더욱이 포화된 암반이나 토사가 외부로부터 동적하중(Dynamic Load)을 받을 때에 전달되는 총압축력은 대부분이 수압으로 작용하고 유효압축응력은 수압에 비하여 미소한 값을 갖는다. 따라서 암반의 전단강도는 대체로 유효압축응력에 비례하여 미소한 값을 갖게 되므로 암반은 전단파괴할 가능성이 커진다.

* 한국원자력연구소 구조공학실 선임연구원, ** 한국원자력연구소 구조공학실 연구원
*** 한국원자력연구소 구조공학실장, **** 한국원자력연구소 사업기술부장, 공박

본 연구에서는 지하수에 의해 포화된 암반체의 3차원 거동해석기법의 개발과 이 기법에 근거하여 개발한 전산코드 MPDAP-3D(3-Dimensional Multi-Phase Dynamic Analysis Program)에 대하여 논하고자 한다. 해석기법과 전산코드의 개발을 위해 이단계매체 해석개념을 3차원으로 확장하였으며, 이에 적절한 구성관계식을 도입하였다. 본 연구에서 개발한 전산코드의 적합성을 검토하기 위하여 이론해가 존재하는 문제에 대한 검증작업을 수행하여 그 결과를 제시하였으며, 발파로 지하암반체에 공동을 굴착한 경우 공동주변 암반체의 포화도에 따른 거동변화에 대해 검토하였다.

2. 비선형 이단계매체의 유한요소 수식화

본절에서는 포화된 다공성매체(Saturated Porous Media)의 거동해석을 위해 개발한 전산코드 MPDAP-3D의 기본 수식화과정을 다루고자 한다.

2.1 Field Equation

가. 유효응력법칙

포화된 토사나 암반체에 대해 Terzaghi가 제안한 유효응력법칙을 적용하였다. 총응력은 유효응력과 공극수압의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \pi \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 와 σ'_{ij} 는 각각 총응력과 유효응력이고, δ_{ij} 는 Kronecker Delta이며, π 는 공극수압을 의미한다.

나. 고체입자의 구성방정식

다공성 매체의 변형은 고체입자에 작용하는 유효응력과 공극수압과 관련이 있다. 응력-변형도 관계식은 다음과 같다.

$$\{ d\sigma' \} = [D^{ep}] \left(\{ d\varepsilon \} - \frac{1}{3K_g} \{ 1 \} d\pi \right) \quad (2)$$

여기서, D^{ep} 는 응력-변형도 관계를 나타내는 탄소성행렬이고, ε 은 변형도이며, K_g 는 고체입자 압축성의 역수를 의미한다.

다. 공극수 흐름의 연속방정식

공극수 흐름에 대한 연속방정식은 질량보존관계로부터 유도할 수 있다. 다공성매체의 체적 변형도 변화는 다음과 같다.

$$d\varepsilon_v = \frac{dn}{1-n} - \frac{d\rho_g}{\rho_g} \quad (3)$$

여기서, n 은 공극율(Porosity), ρ_g 는 고체입자의 밀도, ε_v 는 다공성매체의 체적변형도 변화를 각각 의미한다.

라. Bulk Mixture에 대한 운동방정식

임의의 시간에서 포화된 매체의 미소입자에 작용하는 전응력 Gradient $\sigma_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{i,j} = (\rho - n \rho_f) \ddot{u}_i + n \rho_f \ddot{U}_i \quad (4)$$

여기서, ρ 는 Mixture의 체적계수, \ddot{u}_i 와 \ddot{U}_i 는 각각 Skeleton과 공극수의 가속도를 의미한다.

마. 공극수의 흐름방정식

공극수의 흐름은 간극수압의 Gradient(π_i)에 의하여 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\pi_i = -\frac{\mu}{\alpha} \dot{w}_i + \frac{\rho_f}{\beta} \dot{w}_i^2 + \rho_f \ddot{U}_i \quad (5)$$

여기서, μ 는 유체의 동적 점성(Dynamic Viscosity), α , β 는 다공성매체의 흐름특성계수, w_i 는 공극수의 Skeleton에 대한 상대속도를 의미한다.

2.2 증분형태의 유한요소수식화

응력증분은 Skeleton의 변위증분과 공극수의 상대변위증분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Delta \sigma\} = ([D^{ep}] [B] + \overline{m}_1 \{1\} \{1\}^T [B]) \{\Delta \underline{u}\} + \overline{m}_2 \{1\} \{1\}^T [B] \{\Delta \underline{w}\} \quad (6)$$

여기서, $\overline{m}_1 = [1 - \frac{K_s^{ep}}{K_g}]^2 \overline{m}$, $\overline{m}_2 = [1 - \frac{K_s^{ep}}{K_g}] \overline{m}$, $\overline{m} = \frac{1}{[\frac{1}{K_m} - \frac{K_s^{ep}}{K_g}]}$

2.3 전체 평형방정식

시간 n단계에서의 전체 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_m & M_e \\ M_c^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\underline{u}}_n \\ \ddot{\underline{w}}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\underline{u}}_n \\ \ddot{\underline{w}}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_t + EE & C \\ C^T & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \underline{u}_n \\ \Delta \underline{w}_n \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} F_n \\ G_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_{n-1}^s + R_{n-1}^f \\ R_{n-1}^f \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 선형화된 전체 평형방정식

앞에 제시된 전체 평형방정식을 실제로 수치적분방법에 의해 해결하기 위하여 Newmark- β 방법과 Wilson- θ 방법을 도입하면 일반화된 가속도벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{\ddot{\underline{d}}_n\} = C_1 \{\Delta \underline{d}_n\} + C_2 \{\dot{\underline{d}}_{n-1}\} + C_3 \{\ddot{\underline{d}}_{n-1}\} \quad (8)$$

또한 일반화된 속도벡터는 다음과 같다.

$$\{\dot{\underline{d}}_n\} = B_1 \{\Delta \underline{d}_n\} + B_2 \{\dot{\underline{d}}_{n-1}\} + B_3 \{\ddot{\underline{d}}_{n-1}\} \quad (9)$$

위의 관계식으로 부터 종합적으로 정리하면 다음과 같은 선형화된 전체 평형방정식을 얻을 수 있으며, 각 시간간격마다 이를 계산할 수 있다.

$$[\widetilde{K}] \{\Delta \underline{d}_n\} = \{\widetilde{P}_n\} \quad (10)$$

여기서, 일반화된 강성도행렬은 다음과 같다.

$$[\widetilde{K}] = C_1 [M] + B_1 [D] + [K] \quad (11)$$

또한 일반화된 힘벡터는 다음과 같다.

$$\{\widetilde{P}_n\} = \{P_n\} - \{R_{n-1}\} - [M](C_2 \{\dot{\underline{d}}_{n-1}\} + C_3 \{\ddot{\underline{d}}_{n-1}\}) - [D](B_2 \{\dot{\underline{d}}_{n-1}\} + B_3 \{\ddot{\underline{d}}_{n-1}\}) \quad (12)$$

3. 검증문제

3.1 검증문제 I

검증문제는 그림 1에 나타난 바와 같이 포화된 다공성 선형탄성체의 완전 연계 비배수 일축 변형도(Fully Coupled Undrained Uniaxial Strain)에 관한 문제로서 정확해는 Blouin과 Kim[2]에 의해 다음과 같이 제시되었다.

$$\pi_0 = \sigma_v \frac{1}{1 + \beta_m}, \quad \beta_m = \frac{K_g^2 M_s + K_m K_s^2 - M_s K_m K_s - K_g K_m K_s}{K_m K_g (K_g - K_s)}$$

여기서, σ_v 는 작용하는 총 수직응력, π_0 는 공극수압, K_s 는 Skeleton의 체적팽창계수, G_s 는 Skeleton의 전단계수, M_s 는 Skeleton의 제한계수 ($M_s = K_s + \frac{4}{3} G_s$), n 는 공극율, K_g 는 입자의 체적팽창계수, K_w 는 물의 체적팽창계수, K_m 은 Mixture의 계수로서 $K_m = K_g K_w / [K_w + n(K_g - K_w)]$ 로 나타낸다.

MPDAP-3D를 이용한 본 문제의 수치해석에는 표 1에 나타난 재료특성치가 사용되었다.

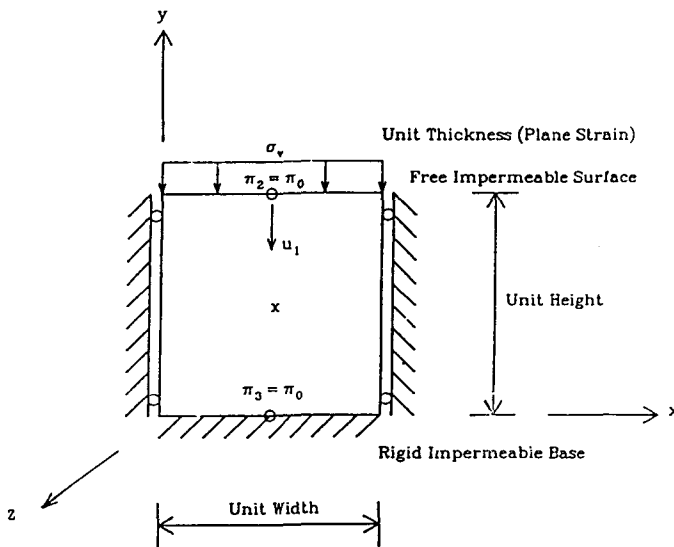


표 1. 재료특성치

	특성치
K_s	0.3333×10^6 psi
G_s	0.5×10^6 psi
n	0.3
K_g	5.0×10^6 psi
K_w	0.29×10^6 psi

그림 1. 비배수 일축변형하중을 받는 입방체요소

공극수압(π_0)과 작용하는 총 수직응력(σ_v)의 비는 위의 두식으로 부터 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{\pi_0}{\sigma_v} = 0.4592$$

그리고 유효수직응력(σ'_v)과 작용하는 총 수직응력(σ_v)의 비는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma_v} = 0.5408$$

수치해석결과와 정확해를 그림 2에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전산프로그램 MPDAP-3D에 의해 계산된 해석결과는 정확해와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

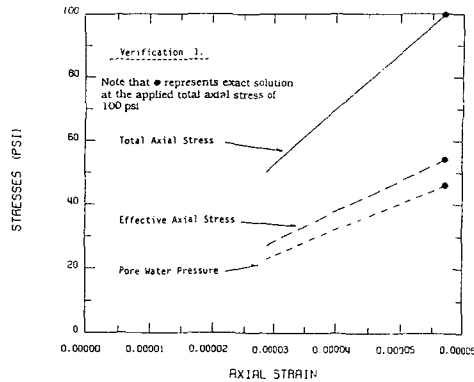


그림 2. 계산된 비배수응력과 정확해와의 비교

3.2 검증문제 II

두번째 문제는 초기에 삼각형분포의 과잉공극수압이 작용하고 있는 Terzaghi의 선형압밀문제이다. 이 문제에서 과잉공극수압(π_e)에 대한 정확해는 다음과 같다.

$$\pi_e = \sum_{m=1,3}^{\infty} \left(\frac{8 \gamma' H}{m^2 \pi^2} \right) \left(\sin \frac{m \pi}{2} \right) \left(\sin \frac{m \pi}{2 H} y \right) e^{-\frac{m^2 \pi^2}{4} T}$$

여기서, H는 토사층의 두께(상부는 자유면이고 바닥은 강체의 불투수층임), y는 자유면으로부터의 거리, γ_{sub} 는 $\gamma_{sat} - \gamma_w$ 이며 γ_{sat} 는 전체 단위중량이고 γ_w 는 공극수의 단위중량이다. 그리고 시간계수 T는 다음과 같다.

$$T = \frac{\gamma_w H^2 t}{k M}$$

여기서, t는 시간, k는 투수계수, M은 제한계수이다.

본 검증문제의 수치해석을 위해서 다음의 재료특성치가 사용되었다.

- n = 0.3 (Porosity)
- $G_s = 2.7$ (Specific Gravity of Grain)
- $\gamma_w = 0.0361 \text{ lb/in}^3$

해석결과중 0.05초와 0.5초에서의 공극수압과 유효수직응력의 변화를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림에서 MPDAP-3D의 결과는 정확해와 거의 일치함을 알 수 있다.

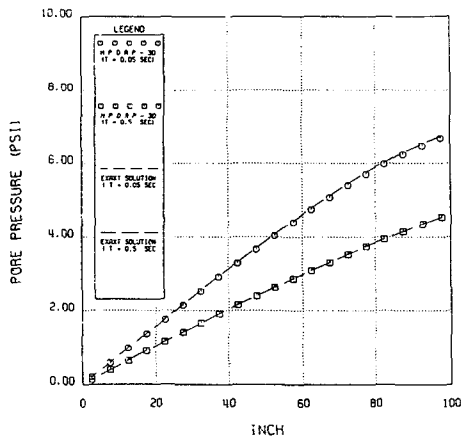


그림 3. 0.5초와 0.05초에서의 공극수압

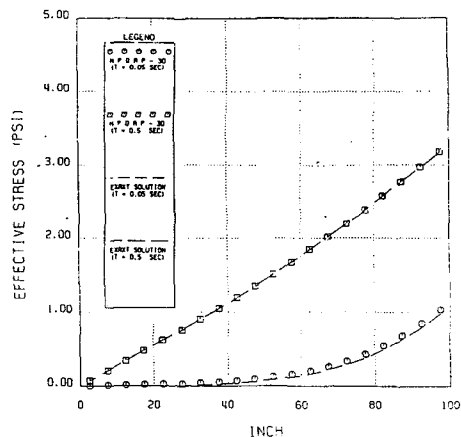


그림 4. 0.5초와 0.05초에서의 유효수직응력

4. 공동의 발파충격해석

해석하는 공동은 그림 5에 나타난 바와 같이 포화된 암반에 위치한 두 개의 연속된 원형공동이다. 원형공동의 지름은 $D=5\text{m}$ 이고, 두 원형공동 사이의 거리는 $W=20\text{m}$ 이다. 두 개의 원형공동 중앙부에 지름 $d=5\text{cm}$, 길이 $l=2\text{m}$ 의 장약공을 설치하여 발파방법에 의하여 새로운 원형공동을 굴착하고자 할 경우 기존의 공동에 미치는 발파충격을 해석하고자 한다. 해석의 편의를 위하여 해석 영역은 1/4단 모델링하였고, 해석범위와 경계조건은 그림 6에 나타난 바와 같다.

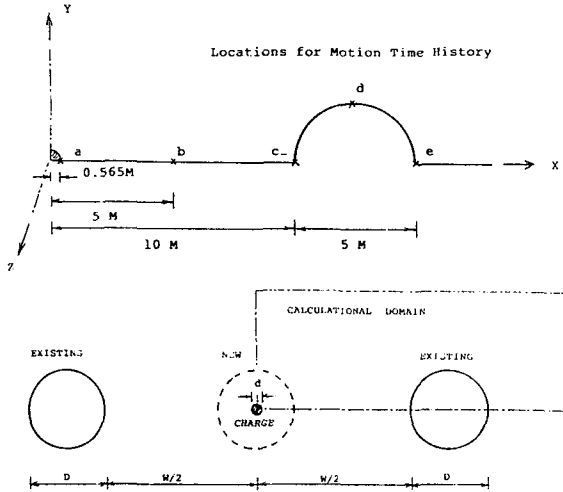


그림 5. 해석하는 공동과 장약공의 위치

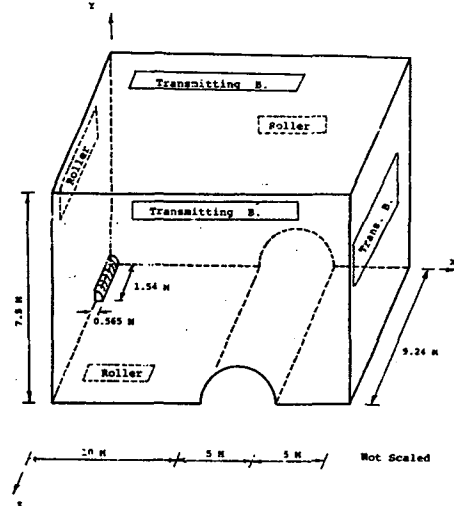


그림 6. 해석영역의 범위와 경계조건

공동이 위치한 포화된 암반의 물성치는 표 2에 나타나 있고, 발파에 의한 하중-시간이력은 그림 7에 나타나 있다.

표 2. 암반의 물성치

물 성	물성치
• 밀 도	2755.1 (kg/m^3)
• 파동전파속도(Initial Wave Velocity)	7078 (m/s)
• 포아송비(Initial Poisson's Ratio)	0.2
• 공극수의 밀도	1002.8 (kg/m^3)
• 투수계수	5.33×10^{-7} (m/sec)

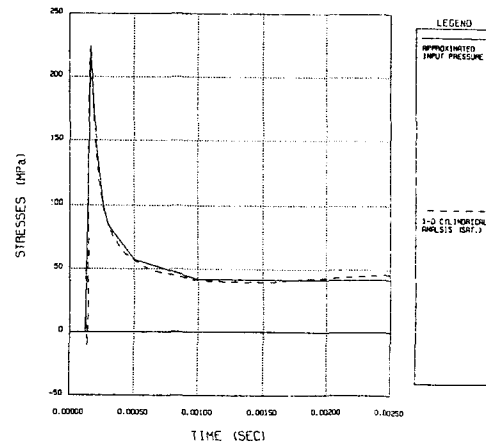


그림 7. 발파에 의한 하중-시간이력

표 2의 물성치와 그림 7의 하중-시간이력을 입력으로 하여 공동주위 암반이 건조한 경우와 포화된 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석수행한 결과 공동주위의 점 b, c, d, e에서의 최대수평방향속도와 최대변위를 표 3, 4에 각각 정리하였다.

표 3. 공동주위의 점에서 최대수평방향속도

	최대속도 (cm/sec)		증가율(%) ($\frac{B-A}{A} \times 100$)
	건조한 암반(A)	포화된 암반(B)	
점 b	77.0	96.0	25.0
점 c	58.0	70.0	21.0
점 d	-16.0	-23.0	63.0
점 e	2.6	5.2	100.0

표 4. 공동주위의 점에서 최대변위

	방향	최대변위 (mm)		증가율(%) ($\frac{B-A}{A} \times 100$)
		건조한 암반(A)	포화된 암반(B)	
점 b	수평방향	0.220	0.270	23.0
점 c	수평방향	0.190	0.230	21.0
점 d	수평방향	0.058	0.076	31.0
	수직방향	0.028	0.039	39.0
점 e	수평방향	0.016	0.020	25.0

그림 8은 건조한 암반인 경우 공동주위에서의 수평방향속도-시간이력이고, 그림 9는 공동주위에서의 수평변위-시간이력이다. 그림 10은 공동상부정점 d에서의 Z축방향에 따른 수평변위-시간이력이고, 그림 11은 공동상부정점 d에서의 Z축방향에 따른 수직변위-시간이력이다.

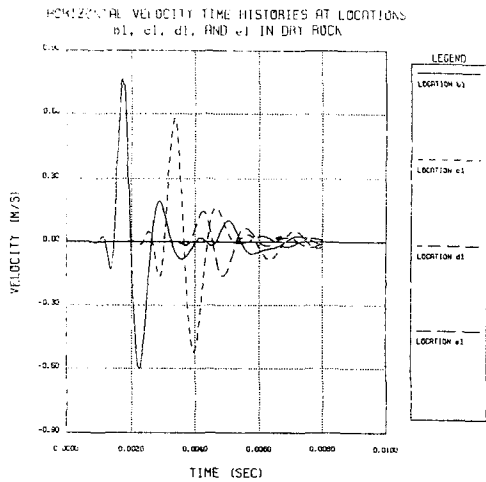


그림 8. 수평방향속도-시간이력 (건조한 암반의 경우)

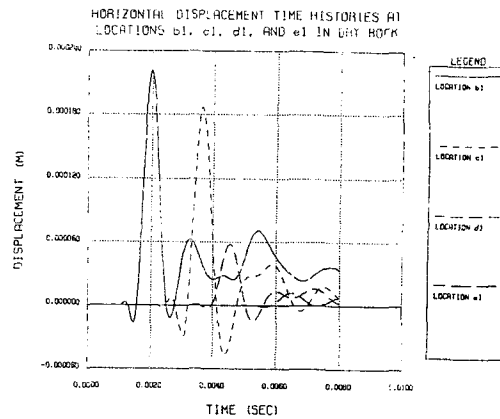


그림 9. 수평변위-시간이력 (건조한 암반의 경우)

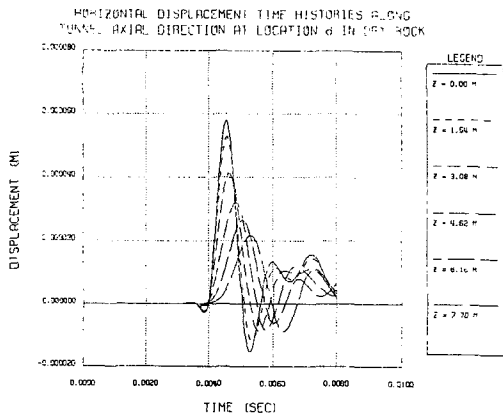


그림 10. 공동정점에서의 수평변위-시간이력 (건조한 암반의 경우)

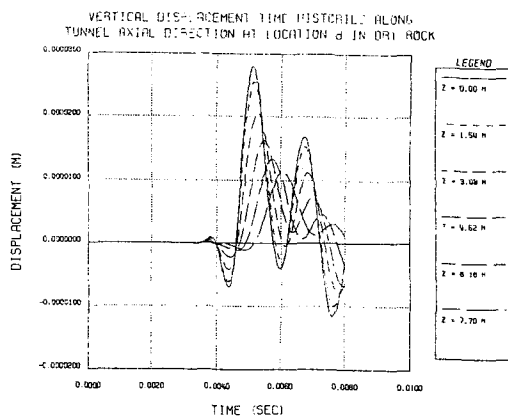


그림 11. 공동정점에서의 수직변위-시간이력 (건조한 암반의 경우)

그림 12는 포화된 암반인 경우 공동주위에서의 수평방향속도-시간이력이고, 그림 13은 공동 주위에서의 수평방향변위-시간이력이다. 그림 14는 공동상부정점 d에서의 Z축방향에 따른 수평변위-시간이력이고, 그림 15는 공동상부정점 d에서의 Z축방향에 따른 수직변위-시간이력이다.

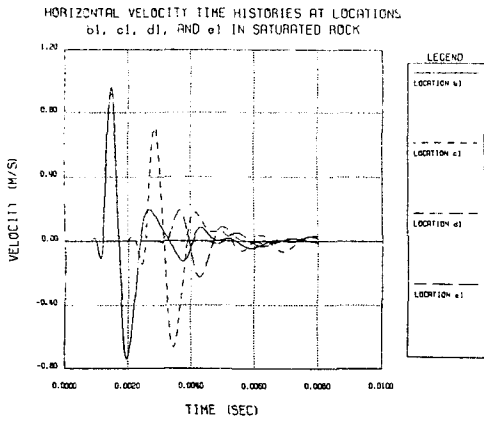


그림 12. 수평방향속도-시간이력 (포화된 암반의 경우)

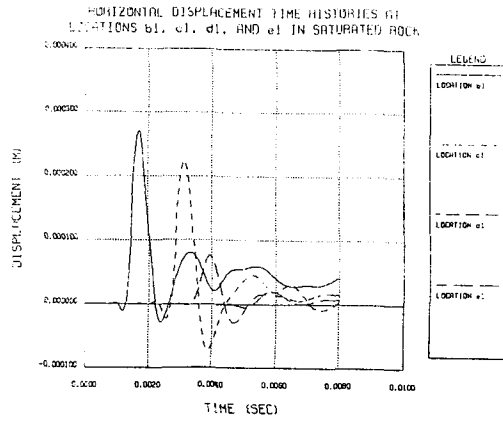


그림 13. 수평변위-시간이력 (포화된 암반의 경우)

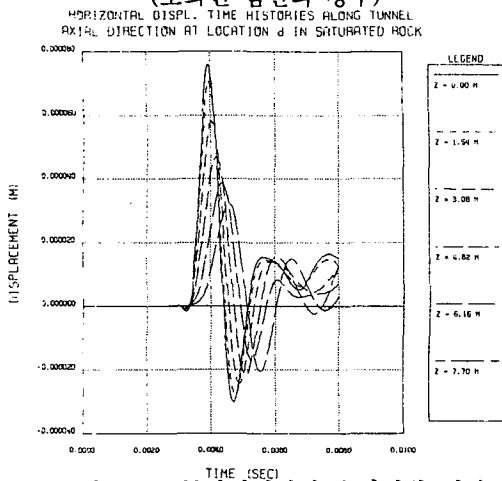


그림 14. 공동정점에서의 수평변위-시간이력 (포화된 암반의 경우)

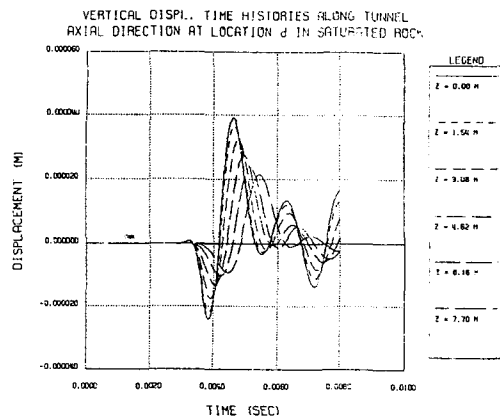


그림 15. 공동정점에서의 수직변위-시간이력 (포화된 암반의 경우)

5. 결 론

MPDAP-3D를 이용하여 건조한 암반과 포화된 암반에 위치한 공동의 발파충격해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공동정점에서 최대수평속도는 건조한 암반에 비하여 포화된 암반의 경우가 약 63%정도 더욱 큰 응답을 나타내었다.
- 2) 공동정점에서 최대변위는 건조한 암반에 비하여 포화된 암반의 경우가 약 39%정도 더욱 큰 응답을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. O.C. Zienkiewicz, K.G. Stagg, E. Hinton, etc., "Finite Elements in the Solution of Problems in Rock Mechanics," Proc. Int. Symp. Underground Engineering, India, 1988.
2. K.J. Kim and S.E. Blouin, "Response of Saturated Porous Nonlinear Materials to Dynamic Loadings," Report to Air Force Office of Scientific Research, Washington, DC, No.F49620-81-C-0014, 1984.