

포화된 암반에서 발파가 인접공동에 미치는 영향

이 경 진¹⁾

Blasting Effect on the Neighbouring Cavern in Saturated Rock Mass

Kyung-Jin Lee

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 dynamic analysis method for saturated rock masses by blasting. This study presents a parameter study on the structural response of a circular tunnel subjected to finite cylindrical charge. Two calculations (one for dry medium and the other for saturated medium) are performed to show the potential damages of the existing tunnel associated with strength reduction in saturated rock mass. The following result is obtained from the MPDAP-3D calculations : Maximum motions (velocities and displacements) at springline in saturated rock are 31~63% higher than those in dry rock.

1. 서 론

원자력발전의 비중이 점차 증가함에 따라 현재 국내에는 원자력발전의 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 여러 분야의 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 개념설정 단계에서 이미 적절한 구조적 안정성 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.^{1,2)} 장기간의 강우로 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.³⁾ 따라서 암반의 전단강도는 대체로 유효압축응력에 비례하여 미소한 값을 갖게 되므로 암반은 전단파괴될 가능성이 커진다.^{1,3)}

본 연구에서는 지하수에 의해 포화된 암반체의 3차원 거동해석기법의 개발과 이 기법에 근거하여 전

* 1994년 11월 20일 접수

1) 성회원, 한국원자력연구소 구조공학실

산코드 MPDAP-3D(3-Dimensional Multi-Phase Dynamic Analysis Program)를 개발하였다. 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

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

2.1 Field Equation

2.1.1 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.

2.1.2 고체입자의 구성방정식

다공성 매체의 변형은 고체입자에 작용하는 유효응력과 공극수압과 관련이 있다. 응력-변형을 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-변형을 관계를 나타내는 탄소성행렬이고, ε 는 변형율이며, K_g 는 고체입자 압축성의 역수를 의미한다.

2.1.3 공극수 흐름의 연속방정식

공극수 흐름에 대한 연속방정식은 질량보존관계로부터 유도할 수 있다. 다공성매체의 체적변형을 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 체적변형을 변화를 각각 의미한다.

2.1.4 Bulk Mixture에 대한 운동방정식

임의의 시간에서 포화된 매체의 미소입자에 작용하는 진응력 Gradient σ_{ij} 는 다음과 같다.

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

여기서, ρ 는 포화된 매체의 밀도, ρ_f 는 공극수의 밀도, \ddot{u}_i 와 \ddot{U}_i 는 각각 Skeleton과 공극수의 가속도를 의미한다.

2.1.5 공극수의 흐름방정식

공극수의 흐름은 간극수압의 Gradient($\pi_{,i}$)에 의하며 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, \dot{w}_i 는 공극수의 Skeleton에 대한 상대속도를 의미한다.

2.2 증분형태의 유한요소수식화

각 요소에 대해 Field 변수를 절점값으로 나타내면 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{aligned} \{\Delta u\} &= [N] \{\Delta u\}_e \\ \{\Delta \varepsilon\} &= [B] \{\Delta u\}_e \\ \{\Delta w\} &= [N] \{\Delta w\}_e \\ \Delta w_{ii} &= \{1\}^T [B] \{\Delta w\}_e \end{aligned} \quad (6)$$

시간 n 단계에서의 응력벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma_n\} = \{\sigma_{n-1}\} + \{\Delta \sigma'\} + \{1\} \Delta \pi \quad (7)$$

앞에서 제시된 수식들을 이용하면 응력증분은 Skeleton의 변위증분과 공극수의 상대변위증분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Delta \sigma\} = ([D^{ep}] [B] + \bar{m}_1 \{1\} \{1\}^T [B]) \{\Delta u\} + \bar{m}_2 \{1\} \{1\}^T [B] \{\Delta w\} \quad (8)$$

여기서, $m_1 = \left[1 - \frac{K_s^{ep}}{K_g} \right]^2 \bar{m}$,

$$\bar{m}_2 = \left[1 - \frac{K_s^{ep}}{K_g} \right] \bar{m},$$

$$\bar{m} = \frac{1}{\left[\frac{1}{K_m} - \frac{K_s^{ep}}{K_g} \right]}$$

K_g 는 입자의 체적팽창계수, K_m 은 Mixture 계수로
서 $K_m = \frac{K_g K_w}{[K_w + n(K_g - K_w)]}$ 로 나타내고, K_w 는 물의
체적팽창계수이다. K_s^{ep} 은 다공성매체의 탄소성체적계
수이며, 공극수압의 증분은 다음과 같이 나타낼 수
있다.

$$\Delta \pi = \bar{m}_2 \Delta u_{i,i} + \bar{m} \Delta w_{i,i} \quad (9)$$

2.3 전체 평형방정식

시간 n 단계에서의 전체 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_m & M_c \\ M_c^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_n \\ \ddot{w}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_n \\ \ddot{w}_n \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$+ \begin{bmatrix} K_t + EE & C \\ C^T & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta w_n \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} F_n \\ G_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_{n-1}^s + R_{n-1}^f \\ R_{n-1}^f \end{Bmatrix}$$

$$\text{여기서, } M_m = \sum \int_v [N]^T \rho [N] dv$$

$$M_c = \sum \int_v [N]^T \rho_f [N] dv$$

$$M_f = \sum \int_v [N]^T \frac{1}{n} \rho_f [N] dv$$

$$H = \sum \int_v K' [N]^T [N] dv$$

$$K_t = \sum \int_v [B]^T [D^{ep}] [B] dv$$

$$EE = \sum \int_v \bar{m}_1 [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$C = \sum \int_v \bar{m}_2 [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$E = \sum \int_v \bar{m} [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$F_n = \sum \int_v [N]^T \{T\} ds$$

$$G_n = \sum \int_s [N]^T \hat{\pi}_n ds$$

$$R_{n-1}^s = \sum \int_v [B]^T \{\sigma_{n-1}^s\} dv$$

$$R_{n-1}^f = \sum \int_v [B]^T \{1\} \pi_{n-1} dv$$

식 (10)을 간단하게 나타내면 다음과 같이 표현할
수 있다.

$$[M] \{\ddot{d}_n\} + [D] \{\dot{d}_n\} + [K] \{\Delta d_n\} \quad (11)$$

$$= \{P_n\} - \{R_{n-1}\}$$

2.4 선형화된 전체 평형방정식

앞에서 제시한 전체 평형방정식을 실제로 수치적
분방법에 의해 해결하기 위하여 Newmark- β 방법과
Wilson- θ 방법⁴⁾을 도입하면 일반화된 가속도벡터는
다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{\ddot{d}_n\} = C_1 \{\Delta d_n\} + C_2 \{\dot{d}_{n-1}\} + C_3 \{\ddot{d}_{n-1}\} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } C_1 = \frac{1}{\beta \theta^3 \Delta t^2}$$

$$C_2 = -\frac{1}{\beta \theta^2 \Delta t}$$

$$C_3 = 1 - \frac{1}{2\beta \theta}$$

또한 일반화된 속도벡터는 다음과 같다.

$$\{\dot{d}_n\} = B_1 \{\Delta d_n\} + B_2 \{\dot{d}_{n-1}\} + B_3 \{\ddot{d}_{n-1}\} \quad (13)$$

$$\text{여기서, } B_1 = \frac{\gamma}{\beta \theta^3 \Delta t},$$

$$B_2 = 1 - \frac{\gamma}{\beta \theta^2},$$

$$B_3 = 1 - \frac{\gamma}{2\beta \theta} \Delta t$$

위의 관계식으로부터 종합적으로 정리하면 다음과
같은 선형화된 전체 평형방정식을 얻을 수 있으며,
각 시간 간격마다 이를 계산할 수 있다.

$$[\tilde{K}] \{\Delta d_n\} = \{\tilde{P}_n\} \quad (14)$$

여기서, 일반화된 강성도행렬은 다음과 같다.

$$[\tilde{K}] = C_1 [M] + B_1 [D] + [K] \quad (15)$$

또한 일반화된 힘벡터는 다음과 같다.

$$\{\tilde{P}_n\} = \{P_n\} - \{R_{n-1}\} \quad (16)$$

$$- [M] (C_2 \{\dot{d}_{n-1}\} + C_3 \{\ddot{d}_{n-1}\})$$

$$- [D] (B_2 \{\dot{d}_{n-1}\} + B_3 \{\ddot{d}_{n-1}\})$$

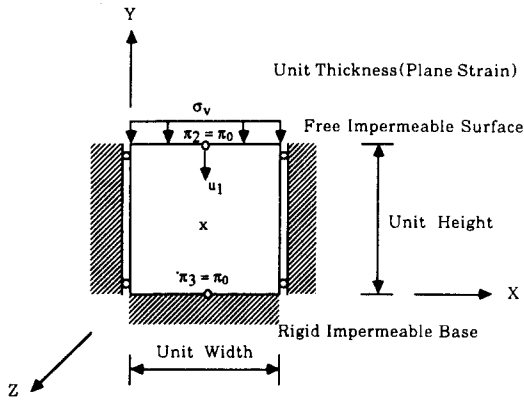


Fig. 1. A cubic element subjected to undrained uniaxial strain loading.

Table 1. Material Properties.

	Value
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

3. 검증문제

3.1 검증문제 I

검증문제는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 포화된 다공성 선형탄성체의 완전 연계 비배수 일축변형율(Fully Coupled Undrained Uniaxial Strain)에 관한 문제로서 정확해는 Kim과 Blouin⁵⁾에 의해 다음과 같이 제시되었다.

$$\pi_0 = \sigma_v \frac{1}{1 + \beta_m},$$

$$\beta_m = \frac{K_g^2 M_s + K_m K_s^2 - M_s K_m K_s - K_g K_m K_s}{K_m K_g (K_g - K_s)}$$

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 공극율이다.

MPDAP-3D를 이용한 본 문제의 수치해석에는 Ta-

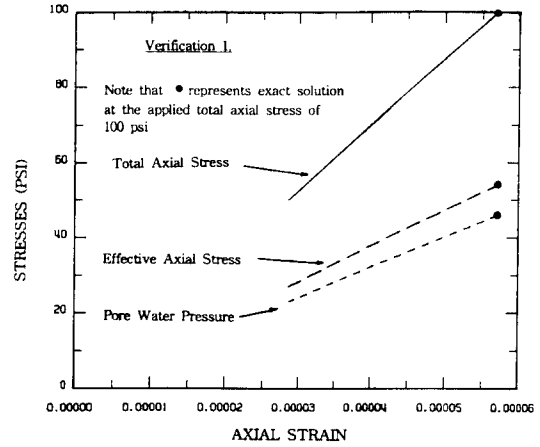


Fig. 2. Computed undrained stress response compared with exact solution.

ble 1에 나타난 재료특성치가 사용되었다.

공극수압(π_0)과 작용하는 총 수직응력(σ_v)의 비는 위의 두 식으로부터 구해 보면 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 Fig. 2에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전산프로그램 MPDAP-3D에 의해 계산된 해석결과는 정확해와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 검증문제 II

두번째 문제는 초기에 삼각형분포의 과잉공극수압이 작용하고 있는 Terzaghi의 선형압밀문제이다. 이 문제에서 과잉공극수압(π_e)에 대한 정확해는 다음과 같다.⁶⁾

$$\pi_e = \sum_{m=1.3}^{\infty} \left(\frac{8\gamma'H}{m^2 \pi^2} \right) \left(\sin \frac{m\pi}{2} \right) \left(\sin \frac{m\pi}{2H} y \right) e^{-\frac{m^2 \pi^2 \tau}{4}}$$

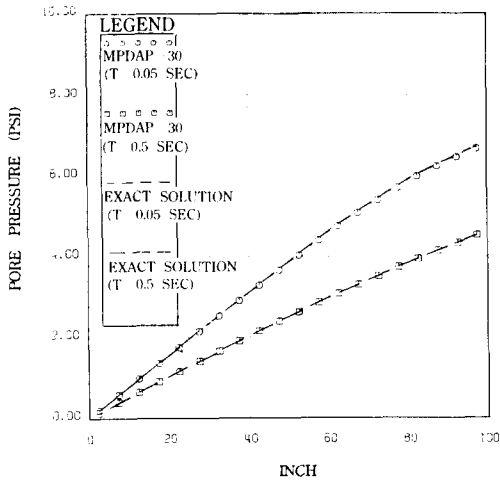


Fig. 3. Pore water pressure profiles at 0.05 and 0.5 seconds.

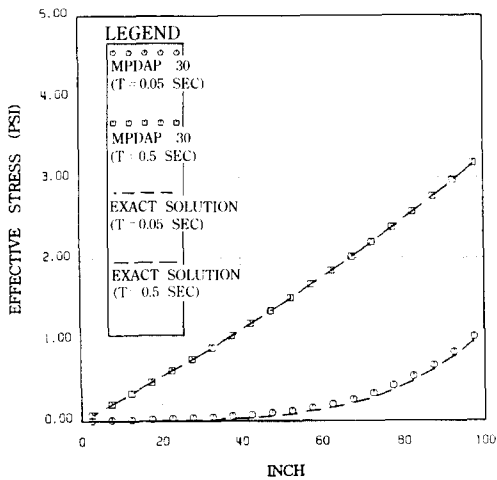


Fig. 4. Effective vertical stress profiles at 0.05 and 0.5 seconds.

여기서, H는 토사층의 두께(상부는 자유면이고 바닥은 강체의 불투수층임). y는 자유면으로부터의 거리, γ' 는 $\gamma - \gamma_w$ 이며 γ 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.

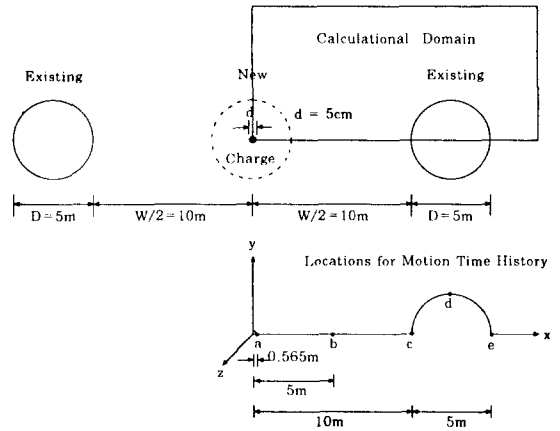


Fig. 5. Geometrical configuration of existing tunnels and an explosive charge.

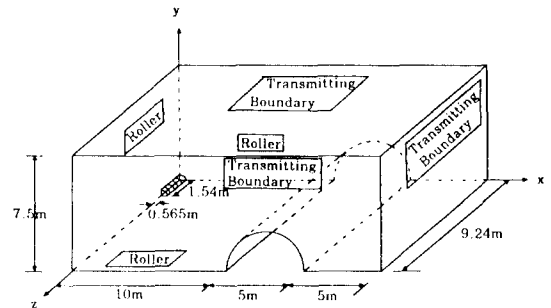


Fig. 6. Schematic view of calculational domain and boundary conditions used for 3-D dynamic analysis.

$n=0.3$ (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 Fig.3과 4에 나타내었다. 그림에서 MPDAP-3D의 결과는 정확해와 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 공동의 발파충격해석

해석하는 공동은 Fig.5에 나타난 바와 같이 포화된 암반에 위치한 두개의 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

Table 2. Material Properties.

	Value
• Density	2755.1(kg/m ³)
• Initial Wave Velocity	7078(m/s)
• Initial Poisson's Ratio	0.2
• Density of Pore Water	1002.8(kg/m ³)
• Permeability	5.33 × 10 ⁻⁷ (m/sec)

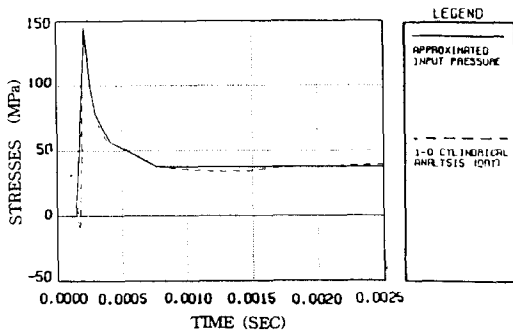


Fig. 7. Radial stress time history at r=0.56 m in dry rock.

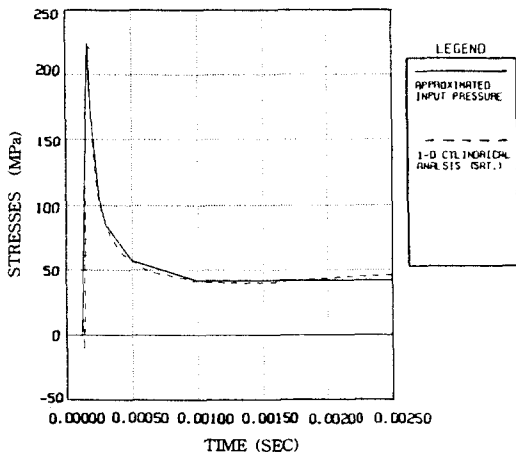


Fig. 8. Radial stress time history at r=0.56 m in saturated rock.

의하여 새로운 원형공동을 굴착하고자 할 경우 기존의 공동에 미치는 발파충격을 해석하고자 한다. 해석모델의 대칭성을 고려해서 해석영역은 전체영역의 1/4만 모델링하였고, 해석범위와 경계조건은 Fig. 6에 나타난 바와 같다. Fig. 6에서 경계조건은 발파로 인한 충격파가 해석영역외곽으로 전파되는 것을 고려하기

Table 3. Comparison of peak horizontal velocities at selected locations.

	Peak Velocity (cm/sec)		Increase (%) $\left(\frac{B-A}{A} \times 100 \right)$
	Dry Rock(A)	Saturated Rock(B)	
b	77.0	96.0	25.0
c	58.0	70.0	21.0
d	-16.0	-23.0	63.0
e	2.6	5.2	100.0

Table 4. Comparison of peak displacements at selected locations.

Direction	Peak Displacement (mm)		Increase(%) $\left(\frac{B-A}{A} \times 100 \right)$	
	Dry Rock (A)	Saturated Rock (B)		
b	Horizontal	0.220	0.270	23.0
c	Horizontal	0.190	0.230	21.0
d	Horizontal	0.058	0.076	31.0
	Vertical	0.028	0.039	39.0
e	Horizontal	0.016	0.020	25.0

위하여 전달경계(Transmitting Boundary) 조건과 Roller를 사용하였다.

공동이 위치한 포화된 암반의 물성치는 Table 2에 나타나 있다. Fig. 7, 8의 하중-시간이력은 화약의 발파에너지 E=7.08 GPa, 충격파의 전파속도 3048 m/sec인 경우 Fig. 6에 나타난 발파공으로부터 0.565 m 떨어진 요소에서의 하중-시간응답을 1차원 해석을 하여 요소내부가 진조한 경우와 포화된 경우에 대하여 각각 구한 것이다. 1차원 해석시 유한요소망은 발파공으로부터 반경 5 m, 요소 하나의 길이가 0.025 m, 요소수는 총 200개로 모델링하였고, 해석시 시간간격은 10⁻⁶ sec, Newmark γ -Damping은 0.7로 하였다. 해석시 발파공 주위의 암반은 파괴면을 따라 탄소성 거동을 하는 것으로 가정하였다.

Table 2의 물성치와 Fig. 7, 8의 하중-시간이력을 입력으로 하여 공동주위 암반이 진조한 경우와 포화된 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석수행한 결과 공동주위의 점 b, c, d, e에서의 최대수평방향속도와

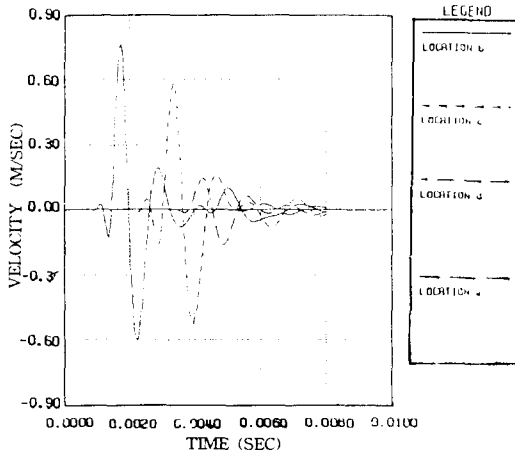


Fig. 9. Horizontal velocity time histories at locations b, c, d, and e in dry rock.

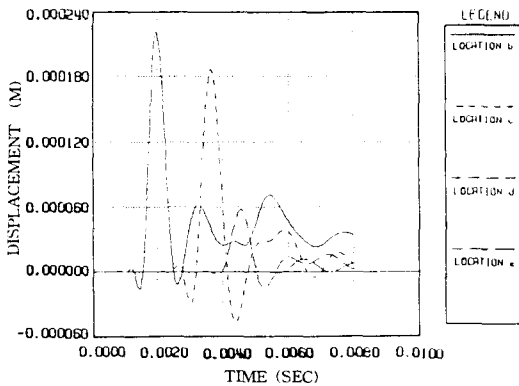


Fig. 10. Horizontal displacement time histories at locations b, c, d, and e in dry rock.

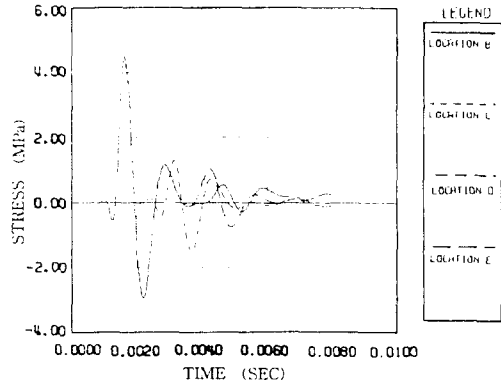


Fig. 11. Horizontal stress time histories at locations b, c, d, and e in dry rock.

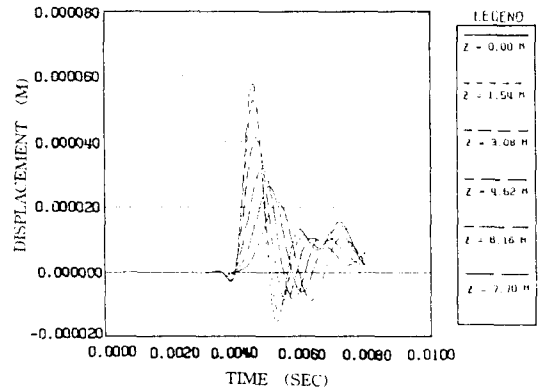


Fig. 12. Horizontal displacement time histories along tunnel axial direction at location d in dry rock.

최대변위를 Table 3, 4에 각각 정리하였다.

Fig. 9는 건조한 암반인 경우 공동주위에서의 수평방향속도-시간이력이고, Fig. 10은 공동주위에서의 수평방향변위-시간이력이다.

Fig. 11은 공동주위에서의 수평응력-시간이력이며, Fig. 12는 공동상부정점 d에서의 Z축 방향에 따른 수평변위-시간이력이고, Fig. 13은 공동상부정점 d에서의 Z축 방향에 따른 수직변위-시간이력이다.

건조한 암반의 경우 Fig. 9에 나타난 시간에 따른 수평방향속도는 장약공에서 가장 가까운 점인 b에서의 최대값이 77 cm/sec로 가장 크고 최대값에 도달하는 시간도 가장 빨리 도달하고 있다. Fig. 10, 11의 수평변위와 수평응력의 경우에도 장약공에서 가장

가까운 점에서의 변위와 응력의 최대값이 가장 크고 장약공에서 멀리 떨어진 수록 그 값이 적어짐을 알 수 있다.

Fig. 12의 공동상부정점 d에서의 Z축 방향에 따른 수평변위는 장약공에 가까운 점에서 최대수평변위 0.058 mm가 발생하였고 장약공에서 Z축 방향으로 멀어질수록 최대값은 적어지는 경향을 나타내었다. Fig. 13의 Z축 방향에 따른 수직변위의 경우도 경향은 비슷하여 장약공에 가장 가까운 점에서 최대변위 0.028 mm가 발생하였다.

Fig. 14는 포화된 암반인 경우 공동주위에서의 수평방향속도-시간이력이고, Fig. 15는 공동주위에서의 수평방향변위-시간이력이다. Fig. 16은 공동주위에서의 수평응력-시간이력이고, Fig. 17은 공동상부정점

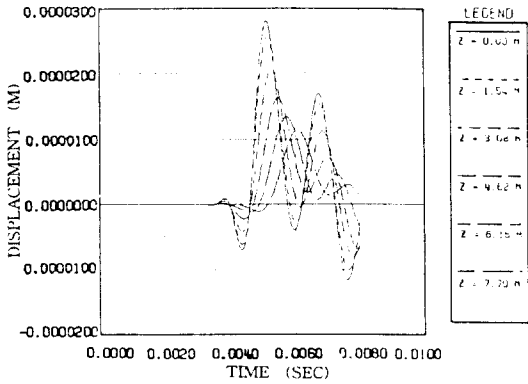


Fig. 13. Vertical displacement time histories along tunnel axial direction at location d in dry rock.

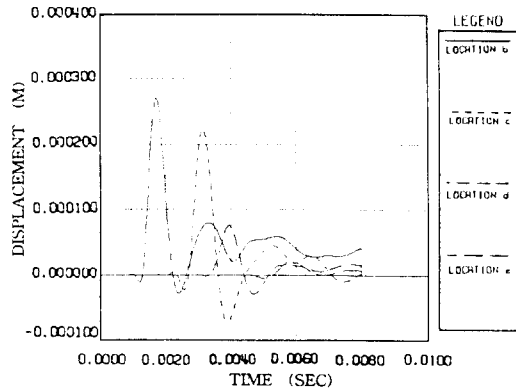


Fig. 15. Horizontal displacement time histories at locations b, c, d, and e in saturated rock.

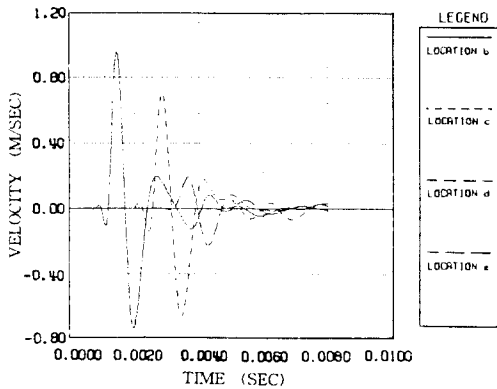


Fig. 14. Horizontal velocity time histories at locations b, c, d, and e in saturated rock.

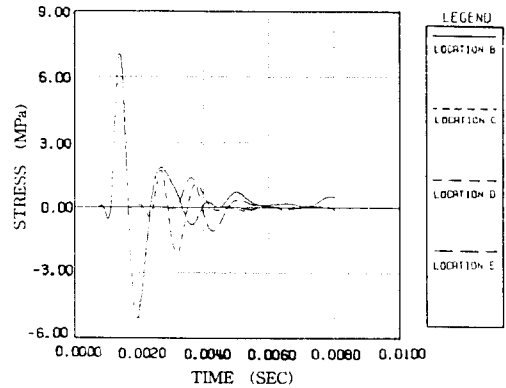


Fig. 16. Horizontal stress time histories at locations b, c, d, and e in saturated rock.

d에서의 Z축 방향에 따른 수평변위-시간이력이며, Fig. 18은 공동상부정점 d에서의 Z축 방향에 따른 수직변위-시간이력이다.

포화된 암반에서는 건조한 암반에 비해 Fig. 14에 나타난 수평속도와 Fig. 15의 수평변위가 최대값에 도달하는 시간이 빠르며 그 값도 포화된 경우가 건조한 경우에 비해 점 d에서 수평속도는 63%, 수평변위는 31% 정도 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 Fig. 16의 수평응력의 경우에도 나타나고 있어 포화된 암반에 위치한 공동이 발파충격을 받을 경우 설계 및 시공에 보다 많은 고려가 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지하수에 의해 포화된 암반체의 3차원 거동해석기법의 개발과 이 기법에 근거하여 전산코드 MPDAP-3D를 개발하였다. 개발한 MPDAP-3D를 이용하여 건조한 암반과 포화된 암반에 위치한 공동의 발파충격을 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 건조한 암반에 위치한 공동의 경우 공동의 좌측 c점에서의 최대수평속도는 0.58 m/sec, 공동상부정점 d점에서의 최대수평속도는 0.148 m/sec로서 c점에서 d점에 비하여 4배 정도 크게 나타났다.

2) 포화된 암반에 위치한 공동의 경우 공동좌측 c점에서의 최대수평속도는 0.72 m/sec, d점에서는 0.22 m/sec로 나타났고, 변위, 응력도 c점에서 d점에 비하여 큰 응답을 나타냈다.

3) 공동상부정점에서 최대수평속도는 건조한 암반

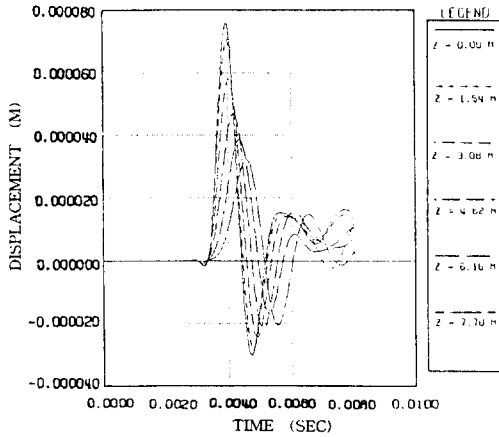


Fig. 17. Horizontal displacement time histories along tunnel axial direction at location d in saturated rock.

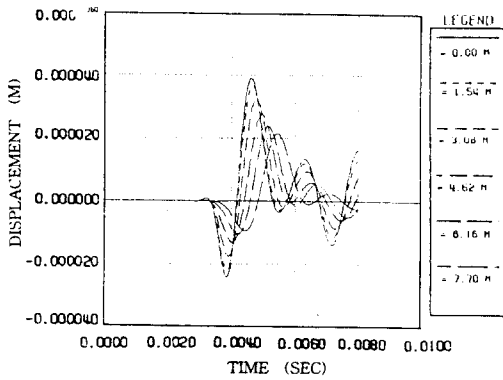


Fig. 18. Vertical displacement time histories along tunnel axial direction at location d in saturated rock.

에 비하여 포화된 암반의 경우가 약 63% 정도 더욱 큰 응답을 나타내었다. 최대수평변위는 건조한 암반에 비하여 포화된 암반의 경우가 약 31%, 수직변위의 경우 포화된 암반이 39% 정도 더욱 큰 응답을 나타

내었다.

4) 포화된 암반에서는 건조한 암반에 비해 속도, 변위, 응력 등이 최대값에 도달하는 시간이 빠르게 나타났다. 수직변위의 경우 건조한 암반에서는 0.0052 초에, 포화된 암반에서는 0.0046초에 최대값에 도달하였다.

해석결과 포화된 암반에 발파공법을 이용하여 공동을 굴착할 경우에는 건조한 경우에 비하여 구조응답이 크게 발생하므로 설계 및 시공에 보다 많은 고려가 필요하다고 사료된다.

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) O.C. Zienkiewicz, "Some Nonlinear Problems of Soil Statics and Dynamics," Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics, pp. 259-273, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- 3) J.H. Prevost, "Effective Stress Analysis of Seismic Site Response," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, pp. 653-665, 1986.
- 4) K.J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, New York, 1982.
- 5) 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.
- 6) K.J. Kim, S.E. Blouin, D.E. Chitty, and D.H. Merkle, "Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads," Report to Air Force Office of Scientific Research, Washington, DC, No. F49620-85-C-0102, 1988.