

# 폭발하중으로 부터 지반의 완충적 효과에 대한 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Ground Shock Attenuation from Explosive Loading

朴 鍾 寬\*  
Park, Jong-Kwan

## Abstract

An under-ground explosion creates shock waves, which propagate to a buried structure through the ground. Due to the explosion, very high stresses and large deformation occur in the ground so that the shock waves decay gradually. In this study the numerical simulation of the ground shock attenuation has been performed. One dimensional wave equation is presented and the finite difference method is applied. A Cap model is adopted to describe the stress-strain behavior of the ground. The results are expressed by the attenuation of the peak stress and the particle velocity by the time and the distance.

## 요 지

지중 폭발에 의하여 발생하는 충격파 하중은 지반을 통하여 지하 구조물에 전달된다. 이때 대단히 큰 응력과 변형이 지반내에 발생한다. 이로 인하여 충격파 하중은 감쇠되고 소멸되어 간다. 이와 같은 현상을 수치해석적 기법으로 연구하였다. 이 연구는 1차원적 파동 방정식을 풀기 위하여 유한차분법을 이용하였고, 지반의 응력변형 상태를 나타내기 위하여 탄소성모델로써 캡 모델이 적용되었다. 결과적으로 충격파 하중의 전달은 지반내에서 발생하는 응력과 입자속도의 감쇠하는 현상을 시간과 거리에 따라 나타냈다.

## 1. 서 론

이미 오래 전에 폭발로 생기는 충격으로 부터 인명과 구조물을 보호하기 위하여 모래 주머니를 쌓아 놓았다. 현대에 들어오면서 발전소나 탄약고와 같이 폭발의 위험이 있는 구조물을 지하에 구축하여 외부의 폭격으로 부터 보호하고, 단일의 경우 내부에서 폭발한다 할지라도 지상에 있는 인명을 보호할 수 있기 때문이다. 그밖에도 반공 대피소 지하철 산업 공장들이 각기의

목적에 따라 지하에 건설되고 있다. 이에 따라 지하구조물과 관련된 지반의 충격파 하중 전달에 대하여 연구가 필요하게 되었다.

폭발에 대한 실험적 연구는 세계 제 2차 대전 을 통하여 본격화 되었다. 미국의 국방성과 관련된 연구기관에서는 실제로 전쟁을 통하여 파괴된 지하 구조물에 대한 자료를 분석하고, 실제로 많은 크고 작은 실험을 통하여 미육군의 설계 기준서인 TM5-855-1 "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons" 을 만들었다." 그 밖에도 소규모의 발파 실험에

\*정회원, 서울산업대학 토목공학과, 조교수

대한 연구가 건설 및 광산분야와 관련하여 행하여졌다.<sup>2,3)</sup> 1970 년도에 들어서면서 대형 컴퓨터의 등장으로 수치 해석적 연구가 활발하여졌다. 특히 충격파에 대한 실험적 연구는 그 자체의 특수성과 막대한 시설 및 비용 때문에 어려움이 많았고, 따라서 수치 해석적 연구는 충격파의 현상을 이해하는데 중요한 연구가 되었다.<sup>4,5)</sup>

실제로 지중에서 폭발의 현상은 대단히 복잡하게 나타난다. 폭발점과 가까운 지점의 지반은 대단히 큰 응력을 받고 변형한다. 변형의 특성은 지반의 종류에 따라 다르게 나타나는데 암반의 경우에는 암반이 파괴(fracture) 또는 균열(crack)이 발생하고 사질토의 경우는 대단히 크게 변형한다. 폭발점과 비교적 먼지점에서는 충격파는 진동파(tale-seismic wave)로 바뀌어져서 소멸된다. 이러한 모든 현상을 한번에 수치 해석적으로 다루기는 불가능하다. 그래서 본 연구가 다루려 하는 것은 폭발점과 비교적 가까운 지점에 있는 지하구조물에 충격파가 어떻게 전달되는가를 지반의 응력 및 입자속도(particle velocity)의 변화로 나타내려고 한다. 이론적 방법은 이러한 지반을 하나의 연속체로 가정하고 연속체이론(theory of continuum mechanics)에 의하여 정립된 운동 방정식 또는 파동 방정식으로 해석할 수 있다. 위 방정식을 수치 해석적 방법으로 풀기 위하여 본 연구에서는 유한 차분법(finite difference method)을 이용하였다.

## 2. 구형좌표(Spherical Coordinate)를 이용한 1 차원의 운동방정식

지중 폭발에 의한 충격파 전달문제의 해석은 운동방정식(equation of motion)으로부터 시작할 수 있다. 운동방정식은 힘의 평형조건(conservation of linear momentum)으로부터 아래 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{ij}$  은 응력,  $g_i$  은 body force,  $\rho$  은 density,  $v$  은 particle velocity 을 의미한다. 단위와 관련하여 본 연구에서는 압축(compression)을 양(+)으로 인장(tension)을 음(-)으로 정

의 하고자 한다.

문제를 간단히 하기 위하여 그림 1에서 나타난 것과 같이 1 차원적 문제로 생각할 수 있다. 위의 운동방정식에서 body force 을 무시하고 1 차원 운동방정식(one dimensional equation of motion)으로 바꾸면 식(2)로 쓸 수 있다.<sup>4)</sup>

$$\rho \dot{v} = -\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} - (d-1) \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{\partial q}{\partial r} \quad (2)$$

여기서  $d=1$  이면 평면문제(plane problem),  $d=2$  이면 원통문제(cylindrical problem),  $d=3$  이면 구형문제(spherical problem)이다. 그리고 이에 따른 변형률(strain rate tensor)은 속도(particle velocity)와 관련하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = -\frac{\partial v}{\partial r} \quad \dot{\epsilon} = -\frac{v}{r} \quad (3)$$

또한 응력을 나타내는 응력 증가율(stress rate)은 식(4)로 나타내며

$$\{\dot{\sigma}\} = [C] \{\dot{\epsilon}\} \quad (4)$$

여기서  $[C]$ 는 탄 소성 구성 모델에 의하여 구할 수 있다. 또한 위 운동방정식을 유한 차분법으로 해석하는데 있어서 일반적으로 나타나는 불규칙적인 값의 진동(oscillation)을 방지하기 위하여 임의의 점성식(artificial viscosity)를 삽입하고 있으며 이는 아래 식(5)로 나타낸다.

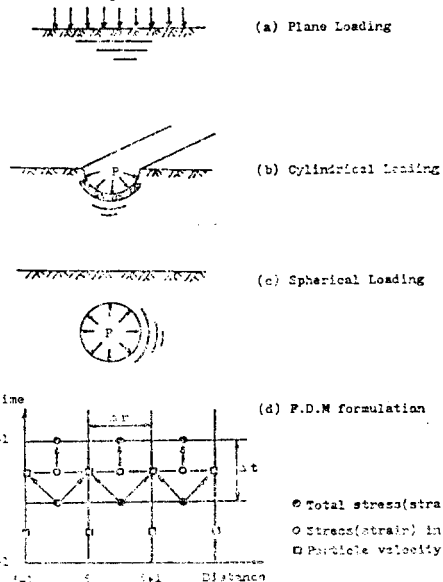


Fig. 1. One dimensional problems of a ground explosion

$$q = C_1 a \rho \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| \left| \Delta r + C_2 \rho \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| \right|^2 \quad (5)$$

여기  $C_1, C_2$ 는 점성계수(viscosity constants),  $a$ 는 전파속도(wave propagation velocity), 그리고  $r$ 과  $\theta$ 는 각각의 방향을 표시한다. 위 운동방정식을 straight-forward centered difference scheme을 이용하여 유한 차분법으로 해석하였다.

### 3. 지반의 응력-변형을 나타내는 구성 방정식(Constitutive Equation)

충격과 하중의 전달을 해석 하는데 있어서 중요한 과제는 지반의 응력과 변형을 나타내는 거동모델(constitutive model)의 연구이다. 큰 하중을 받는 지반의 응력-변형에 대한 거동(behavior)을 식으로 나타내기 위하여 일반적으로 소성이론(theory of plasticity)이 적용된다. 특히 충격과 하중은 순식간에 지반에 작용하고 지반은 갑자기 대단히 큰 응력을 받으며 이 응력은 매우 짧은 시간에 퍼져나가서 소멸된다. 그래서 높은 응력과 낮은 응력을 동시에 적용할 수 있는 구성모델이 필요하다. 일반적으로 작은 하중을 받는 지반의 응력-변형의 거동에 대하여 많은 구성 모델(model)들이 개발되었다. 그중에서도 가장 많이 알려져 있는 모델은 캡 모델(Cap Model)이다. 캡 모델은 이미 정역학적인 하중뿐만 아니라 동역학적인 하중에 적용된 바가 있다. 여기서는 Chen과 Baladi 등에 의하여 개발된 cap model을 충격과 하중에 적용하고자 한다.<sup>8,9)</sup>

Cap model은 탄소성 구성방정식 모델로서 토질이 계속해서 항복(yielding)한다는 개념에 기초를 두고 있다. Cap model은 associated flow rule을 사용하고 있으며 두개의 항복면(yield surface)을 가지고 있다. 하나는 고정되어 있으며 파괴 포락선을 의미한다. 또 하나는 cap 모양을 가지고 있으며 소성변형이 증가함에 따라 움직인다. 이 두개의 항복면(yield surface)을 DiMaggio와 Sandler는 각각 식(6)과 (7)로 표시하였다.

$$h(J_1, \sqrt{J_2'}) = \sqrt{J_2'} - (A - C \exp(-BJ_1)) = 0 \quad (6)$$

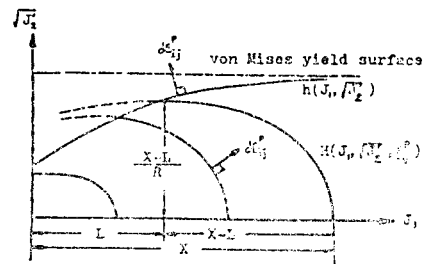
$$H(J_1, \sqrt{J_2'}, k) = \sqrt{J_2'} - \frac{1}{R} [(X(k) - L(k))^2 - (J_1 - L(k))^2]^{\frac{1}{2}} - L(k) \quad (7)$$

위 두개의 항복면(yield surface)은 그림 2로 나타낸다. 여기서  $h(J_1, \sqrt{J_2'})$ 은 Drucker-Prager 모델에 기초를 두고 있다.  $A, B$ , 그리고  $C$ 는 토질에 따른 상수이고  $J_1$ 가 커짐에 따라  $h(J_1, \sqrt{J_2'})$ 는 von Mises yield surface에 접근하고 있다.  $H(J_1, \sqrt{J_2'}, k)$  함수는 중심을  $(L(k), 0)$ 에 두고 있고,  $J_1$ 이  $L(k)$ 와 같은 점에서  $h(J_1, \sqrt{J_2'})$ 를 만나는 타원형 함수(elliptical function)이다. 이 타원의 반경은  $(X(k) - L(k))$ ,  $(X(k) - L(k))/R$ 로 표시된다. 함수  $h(J_1, \sqrt{J_2'})$ 는 하나의 고정된 면(surface)을 나타내지만 함수  $H(J_1, \sqrt{J_2'}, k)$ 는  $k$ 가 증가함에 따라 팽창하는 면(surface)로 나타낸다. 여기서  $k$ 는 hardening parameter로 소성 체적변형량(plastic volumetric strain)으로 정의하고 이에 따라  $X(k)$ 을 다음과 같이 나타낸다.

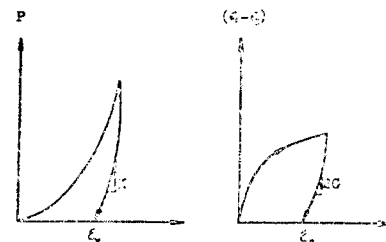
$$k = \epsilon_p^{kk} = W(1 - \exp(-DX(k))) \quad (8)$$

또는

$$X(k) = -\frac{1}{D} \ln \left( 1 - \frac{\epsilon_p^{kk}}{W} \right)$$



(a) Cap model



(b) Pressure-volumetric strain (c) Shear stress-axial strain

Fig. 2. The yield surfaces and the elastic moduli of the cap model

여기서  $W$ 와  $D$ 는 material parameter 이다.

일반적으로 탄소성 모델식의 형성과정은 Cap model을 포함하여 다음과 같은 방법을 따른다. 우선식의 전개에 필요한 기본의 소성식을 적어 보기로 한다.

Yield function

$$f(J_1, \sqrt{J_2'}, k) = 0 \quad (9)$$

Decomposition of strain increment

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (10)$$

Associated flow rule

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (11)$$

Increment of stress component

$$dp = K d\varepsilon_{kk}^e \quad (12)$$

$$dS_{ij} = 2G d\varepsilon_{ij}^e \quad (13)$$

소성식을 구성하기 위하여 어떤 지점에서 응력상태가 소성범위에 놓여 있다고 가정한다. 만일 이 지점에서 응력이 증가되면 그 증가된 응력은 항복함수(yield function)를 만족하여야 한다. 즉 다시 말해서 증가된 항복함수(yield function)  $df=0$ 라 할 수 있다. 이로부터 응력의 증가량  $d\sigma_{ij}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\sigma_{ij} = \left\{ D_{ijkl} - (1-r) \frac{D_{ijuv} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{uv}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{mnkl}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} D_{mnrq} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rq}} \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \varepsilon_{nn}^e} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}} \right\} d\varepsilon_{kl} \quad (17)$$

또는

$$\{d\sigma\} = \left[ \{D\} - (1-r) \frac{\{D\}\{A\}\{A\}^T\{D\}}{\{A\}^T\{D\}\{A\} - V\{B\}^T\{A\}} \right] \{d\varepsilon\} \quad (18)$$

여기서

$$\{d\sigma\} = \begin{pmatrix} d\sigma_{11} \\ d\sigma_{12} \\ d\sigma_{13} \\ d\sigma_{22} \\ d\sigma_{23} \\ d\sigma_{33} \end{pmatrix} \quad \{D\} = \begin{pmatrix} \text{Cauchy} \\ \text{elastic} \\ \text{stress-strain} \\ \text{matrix} \end{pmatrix} \quad \{A\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{12}} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{13}} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{23}} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \end{pmatrix} \quad \{d\varepsilon\} = \begin{pmatrix} d\varepsilon_{11} \\ d\varepsilon_{12} \\ d\varepsilon_{13} \\ d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{23} \\ d\varepsilon_{33} \end{pmatrix}$$

(6×1)                      (6×6)                      (6×1)                      (6×1)

$$\{A\}^T = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{12}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{13}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{23}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \right\} (1 \times 6), \quad V = \frac{\partial f}{\partial k}$$

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= dp\delta_{ij} + dS_{ij} \\ &= K d\varepsilon_{kk}^e + 2G d\varepsilon_{ij}^e \\ &\quad - d\lambda \left( 3K \frac{\partial f}{\partial J_1} \delta_{ij} + \frac{G}{\sqrt{J_2'}} \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2'}} S_{ij} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $d\lambda$ 는 양의 scalar 값으로 식(15)로 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} d\lambda &= \frac{3K \frac{\partial f}{\partial J_1} d\varepsilon_{kk} + \frac{G}{\sqrt{J_2'}} \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2'}} (S_{ij} d\varepsilon_{ij})}{9K \left( \frac{\partial f}{\partial J_1} \right)^2 + G \left( \frac{\partial f}{\partial \sqrt{J_2'}} \right)^2 - 3 \frac{\partial f}{\partial J_1} \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \varepsilon_{kk}^e}} \end{aligned} \quad (15)$$

만일 응력의 상태가 탄성범위 안에 있으면  $d\lambda = 0$ 이고, 응력의 상태가 파괴 포락선 위에 있으면 hardening parameter  $k=0$ 가 된다. 그리고 응력이 두 항복면(yield surface)의 교차점에 있으면  $dh + dH = 0$ 을 만족한다고 가정한다. 즉

$$d\varepsilon_{ij}^e = d\lambda_1 \frac{\partial h}{\partial \sigma_{ij}} + d\lambda_2 \frac{\partial H}{\partial \sigma_{ij}} \quad (16)$$

위의 식(14)를 matrix form으로 나타내면 응력의 증가량  $d\sigma_{ij}$ 은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\{B\}^T = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{11}} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{12}} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{13}} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{22}} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{23}} \right. \\ \left. \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{33}} \right\} (1 \times 6).$$

단일 증가되기전 상태의 응력이 탄성범위 안에 있으면  $r=1$  및 소성변형은 0이고 소성범위 안에 있으면  $r=0$ , 증가전과 증가후의 응력 상태가 바뀌는 경계에서는  $0 < r < 1$ 가 된다.

위에서 보는 바와 같이 탄 소성 구성 모델식은 대단히 복잡하다. 그래서 본 연구에서는 Chen과 Baladi 등에 의하여 개발된 프로그램을 사용하였다.

#### 4. 지반의 특성을 나타내는 Parameter의 결정

지반은 임의의 세 종류의 모델로 가정한다. 그에 따른 지반의 초기 간극비를 표 1에 나타냈다. 이 가정은 Vesic<sup>10)</sup>과 Zoback<sup>11)</sup>의 실험 결과를 이용하기 위하여 세워졌다. Vesic은 두 종류의 밀도(density)를 가진 모래를 약 57Mpa까지 압축하여 삼축압축실험을 실시하였다. 그 결과로 높은 압력 하에서 모래의 삼축 압축의 시험 결과는 모래의 초기밀도(initial density)와 거의 관계없이 나타났다. 이러한 현상은 삼축 압축에서 뿐만 아니라 등방압축실험(isotropic compression test)에서도 나타난다. 그림 3은 각각 다른 초기밀도를 가진 모래를 간극비(void ratio)로 표시하고 압력(pressure)에 따른 간극비의 증가를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 밀도와 관계없이 일정하게 나타난 것을 알 수 있다. Zeback으로부터 높은 압력을 받는 Ottawa sand에 대한 실험적 자료를 얻을 수가 있다. 위의 실험적 결과를 기준으로 하여 Cap model에 필요한 material parameter를 구하였다. 아래 식(19)부터 식(25)은 material parameter와 관련된 식이며 그 값은 표 2에 나타났다.

Bulk modulus

$$K = \frac{K_0}{1 - K_1} (1 - K_1 \exp(-K_2 J_1)) \quad (19)$$

Shear modulus

$$G = G_1 K \quad (20)$$

Plastic volumetric strain

$$\varepsilon_{kk}^p = W(1 - \exp(-DX(k))) \quad (21)$$

$$X(k) = -\frac{1}{D} \ln\left(1 - \frac{\varepsilon_{kk}^p}{W}\right) \quad (22)$$

Yield function

$$h(J_1, \sqrt{J_2}') = \sqrt{J_2}' - (A - C \exp(-BJ_1)) = 0 \quad (23)$$

$$H(J_1, \sqrt{J_2}', k) = \sqrt{J_2}' - \frac{1}{R} [(X(k) - L(k))^2 - (J_1 - L(k))^2]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$R = \frac{R_0}{1 - R_1} (1 - R_1 \exp(-R_2 L(k))) \quad (25)$$

Table 1. The initial void ratio of the ground

Ground	void ratio ( $e$ )
Loose sand(L)	0.99
Medium dense sand(M)	0.72
Dense sand(D)	0.45

Table 2. The material parameters of the cap model

Ground parameter	loose sand	medium dense sand	dense sand
$K_0$	670Mpa	670Mpa	670Mpa
$K_1$	0.85	0.85	0.85
$K_2$	0.018	0.018	0.018
$G_1$	0.55	0.55	0.55
$W$	0.338	0.255	0.150
$D$	0.02	0.01	0.008
$A$	297	297	297
$B$	0.001	0.001	0.001
$C$	275	275	275
$R_0$	2.0	2.0	2.0
$R_1$	0.4	0.4	0.4
$R_2$	0.05	0.05	0.05

위의 값을 기준으로 하여 등방압축 및 삼축압축에 대한 계산결과가 그림 4 및 그림 5로 나타났다. 비교적 높은 압력에서 시험결과에 접근하도록 parameter를 결정하였다. 그림 6은 파괴 포락선을 나타낸 것으로 서로 다른 초기밀도를 가진 모래의 삼축압축 시험결과를 기준으로 하나의 공통된 파괴선을 구하였다.

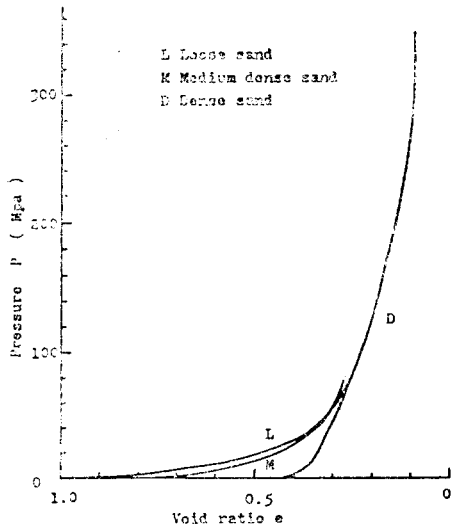


Fig. 3. Experimental results of the sands under high pressure

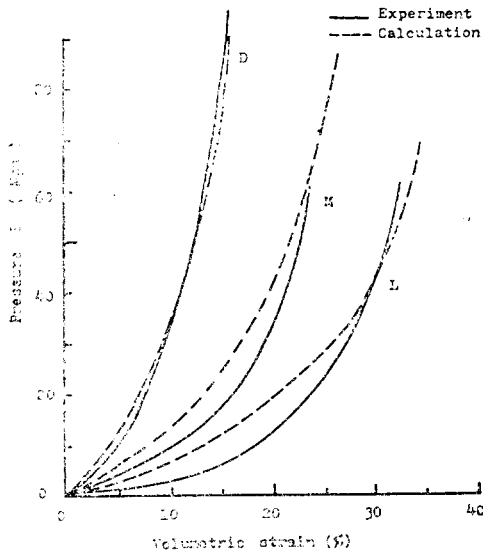


Fig. 4. Model calculation of the pressure

### 5. 지중폭발에 대한 1차원 FDM 해석

지중 폭발에 대한 문제로서 그림 7을 생각해 볼 수 있다. 먼저 지중에 반경  $a$ 의 동공(cavity) 내에서 폭발현상이 발생한다고 가정해 보자. 폭발은 대단히 큰 압력으로 바뀌어서 동공 내부에 작용하게 된다. 이때 내부에 작용하는 초기압력(initial pressure)  $P_0$ 은 폭발후 시간이 흐름에 따라 감쇠하여 소멸된다. Chadwick<sup>12)</sup>은 이러한

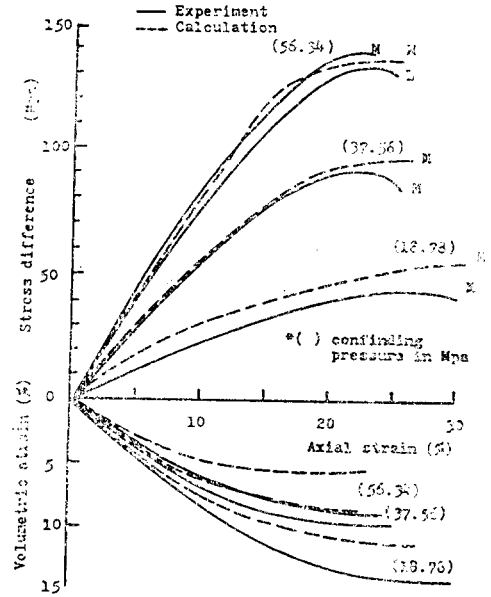


Fig. 5. Model calculation of the triaxial compression test

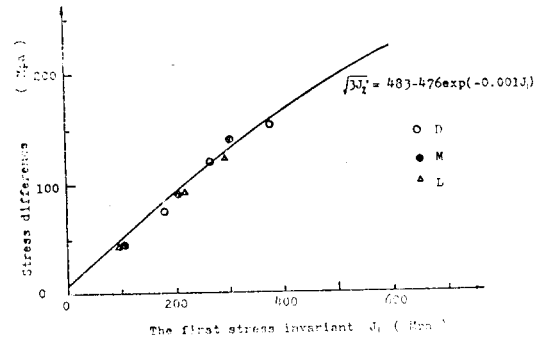


Fig. 6. Determination of yield surface based on the triaxial compression test

폭발에 의하여 발생하는 압력을 가스(gas) 압력으로 간주했다. 그래서 폭발에 의하여 지반이 변형하면 동공의 체적이 팽창하게 되고 이에 따라 초기내부압력  $P_0$ 은 감쇠(decay)하게 된다. 이를 식(26)로 나타내었다.

$$P_b = P_0 \left( \frac{a}{a_0} \right)^{-3r} \quad (26)$$

여기서  $P_b$ 은 동공내부에 작용하는 압력이고  $a$ 은 팽창하는 반경을 나타내며  $r$ 은 상수로써 폭발물의 밀도(density)에 따라 결정할 수 있다.

충격파의 전달은 지반의 종류에 따라 그 전달 속도가 다르게 나타난다. 지반을 탄성체로 가정하면 충격파(wave)가 퍼져 나가는 속도 즉 전

Initial internal pressure  $P_0=1000\text{Mpa}$   
 Initial radius of cavity  $a_0=1\text{m}$   
 Parameter  $r=2$

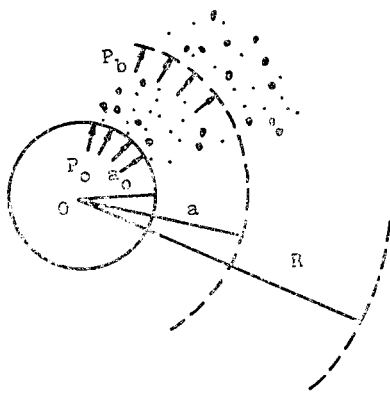


Fig. 7. The initial boundary condition of the ground explosion

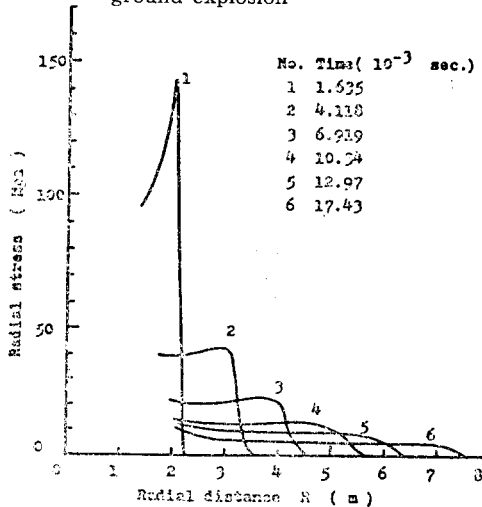


Fig. 8. Radial stress profile of medium dense sand

파속도(wave propagation velocity)는 1 차원의 경우에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (27)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수이다. 그러나 지반을 소성체로 생각하면 충격파가 전달되는 속도와 모양이 다르게 나타난다. 그림 8은 어떤 시간에 모래지반의 응력상태를 나타내는 radial stress profile이다. 폭발 직후에는 지반에 큰 radial stress가 발생하지만 시간이 지나면 큰 폭으로 떨어지고 시간이 지남에 따라 떨어지는 폭은 감소된다. 전파 속도 역시 처음에 비해 시간이 지

남에 따라 감소되고 있다. 이는 폭발점에 가까운 지점에서 지반이 대단히 압축되어서 큰 값의 탄성계수를 가져서 전파속도  $V_p$ 가 크게 나타나기 때문이다. 그림 9는 폭발점과  $R$ 만큼 떨어진 지점에서 응력이 발생하여 시간에 따라 증가되고 감쇠하는 현상을 나타낸 radial stress history이다. 어떤 지점에서 응력이 처음 발생하는 시간을 도착시간(arrival time)이라 하면 이는

$$T_a = R/V_p \quad (28)$$

이라고 쓸 수 있다. 그리고 가장 크게 나타난 응력을 peak stress라 하고 파가 도착한 시간으

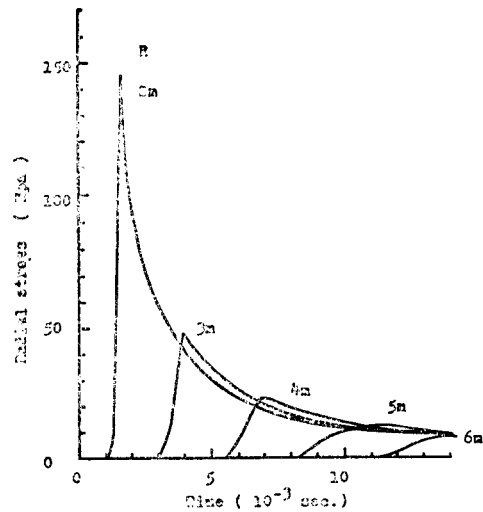


Fig. 9. Radial stress history of medium dense sand

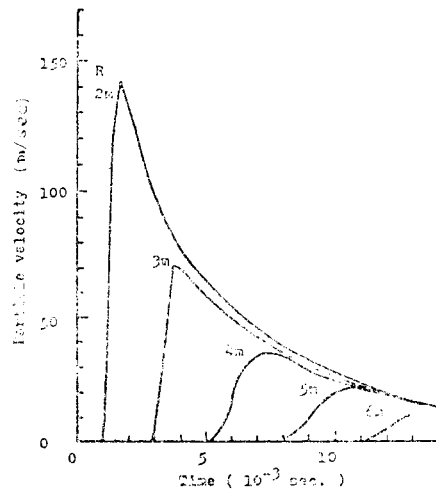


Fig. 10. Particle velocity history of medium dense sand

로부터 peak stress가 발생할 때까지의 시간을 rising time  $T_r$ 이라 하면 거리가 멀수록  $T_r$ 이 길어짐을 알 수 있다. 그림 8에 의하면  $T_r$ 은  $T_a$ 의 0.2에서 0.3배로 나타났다. 그리고 어떤 지점에서 peak stress의 감쇠를 살펴보면 가까운 지점에서는 응력이 갑자기 큰 폭으로 감소하나 시간이 지남에 따라 감소폭이 완만해진다. Drake와 Little은 실험 결과 응력의 감쇠를 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\sigma_r = \sigma_k \exp(-\alpha t / T_a) \quad (29)$$

여기서  $t$ 는 peak stress  $\sigma_k$  발생 후의 시간을 말하며  $\alpha$ 는 토질에 따른 상수로써 수치해석 결과 0.5에서 1 값을 가지며 지반의 밀도(density)가 클수록 큰 값을 갖는다.

그림 10은 어떤  $R$ 만큼 떨어진 지점에서의 입자 속도(particle velocity)를 나타낸 particle velocity history이다. 입자속도는 전파속도와는 다르며 응력과 직접적인 관계가 있다. 그래서 radial stress history와 비슷한 모양을 가지고 있다. 그림 8, 9, 10은 medium dense sand 지반의 해석 결과이지만 loose sand 및 dense sand 지반에 대하여서도 비슷한 결과를 얻었다.

Radial stress history로부터 거리에 따른 peak stress만 다시 정리해 보면 그림 11과 같이 log scale에서 직선으로 나타났다. 이는 지반의 종류에 따라 다르게 나타났다. 지반의 밀도가 클수록 응력이 멀리 퍼진다. 이미 많은 실험을 통해서 peak stress의 감쇠는 log scale에서 거리에 직선적인 관계로 표현되었다.<sup>1,3)</sup> 이 직선의 기울기를 감쇠율(attenuation rate)이라 하고, 이 감쇠율  $C_a$

$$C_a = \log \sigma_k / \log R \quad (30)$$

로 표시할 수 있다. 그림 12는 각 지점에서 peak particle velocity를 나타낸 그림이다. 응력과는 달리 감쇠율(attenuation rate)은 지반의 밀도에 따라 다르게 나타났다.

실제로 충격파 하중에 대한 지반의 반응은 대단히 복잡한 현상으로 나타나기 때문에, 간단한 수식으로 표현하기는 불가능하다. 그래서 본 연구에서는 지반을 하나의 연속체로 가정하여 소성이론을 적용하였다. 그리고 폭발 자체의 특성에 대한 연구보다는 충격파가 지반을 통하여 전

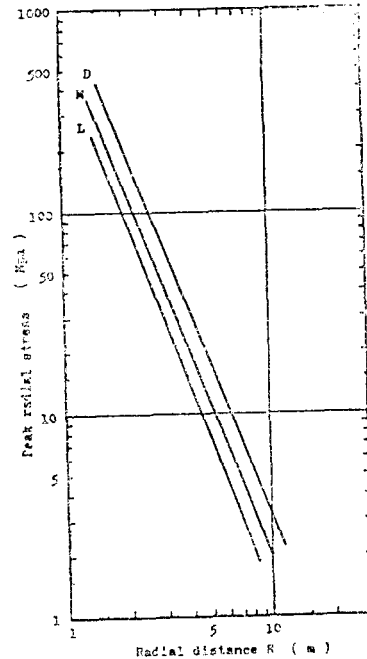


Fig. 11. Attenuations of the peak radial stresses on the different sands

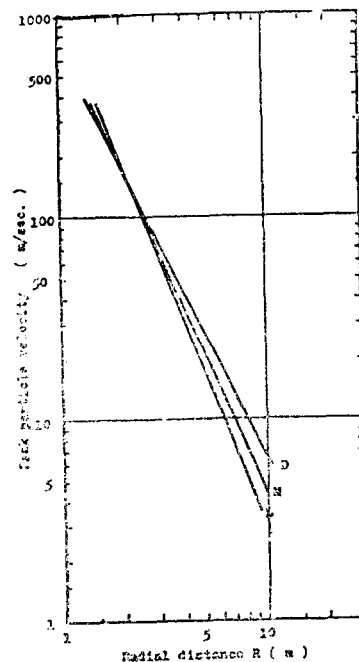


Fig. 12. Attenuations of the peak particle velocity on the different sands



달되는 현상을 규명하였다. 지반의 경우에도 간단히 모래지반으로 가정하였다.

## 6. 결 론

본 수치해석적 연구는 폭발로부터 지반내에 발생하는 응력 및 입자속도를 연속적으로 처리하여 시간의 경과에 따른 전달과정 및 감쇠되는 현상을 나타내었다. 비교적 먼 거리에서 측정된 실험 결과와는 달리 폭발점으로부터 가까운곳의 반응을 운동방정식과 소성이론을 적용하여 해석하였다. 그결과 peak stress와 peak particle velocity의 감쇠를 거리에 따라서 log scale 좌표에서 직선으로 나타내었고 또한 지반의 종류에 따라 위 값들의 변화를 비교하였다. 본 연구는 지하구조물의 설계시 충격하중의 영향을 연구하는데 있어서 기본이 된다고 생각되지만 아직도 이 분야는 연구되어야 할 과제가 많이 남아 있다. 첫째로 폭발 자체의 특성이 연구되어야 하며, 둘째는 시간이 지남에 따라 발생하는 진동현상의 문제이며, 셋째는 여러가지 지반에 따른 소성 모델의 개발, 즉 물로 포화된 지반과 관련된 연구이다. 특히 포화된 지반은 액화현상(liquefaction)같은 전혀 다른 문제가 발생하고 충격과 역시 흙과 물이 섞여 있는 복합체에 전달됨으로 이에 따른 운동방정식이 세워져야 한다. 그 밖에도 구조물과 접촉되는 부분에서 충격파의 반사 및 전달에 대한 연구등이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행된 것으로 한국과학재단의 지원에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Drake, J.L., and C.D. Little, "Ground Shock from Penetrating Conventional Weapons," Proc. of Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munition with Structures, U.S. Air Force Academy Colorado, May 10-13, 1983 at the University of Florida Graduate Engineering Center, Eglin AFB, FL, 1983.
2. Larson, D.B., "Explosion Energy Coupling in Geologic Material," Int. J. of Rock Mechanics Min. Sic & Geomech. Abstr. Vol.19, 1982.
3. Dowding, C.H., Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall Inc., 1985.
4. Nelson, J., "Numerical Solution of Problems Involving Explosive Loading," Proc. of DMSR 77, Vol.2 Karlsruhe, pp.239~296, 1977.
5. Park, J.K., and Y. Horie, "Constitutive Equaion for Geological Materials under High Dynamic Loading," Proc. of Second Symposium on the Interation of Non-Nuclear Munitions with Structures, Florida, pp.278~283, 1985.
6. Asszonyi, C., and R. Richter, The Continuum Theory of Rock Mechanics, Trans., Tech Publications, 1979.
7. Wilkins, M., "Calculation of Elastic-Plastic Flow," in the Methods of Computational Physics, Vol.3, Alder, editor, Academic Press, New York, 1964.
8. Chen, W.F., and G. Y. Baladi, "Soil Plasticity, Elsevier, 1985.
9. Desai, C., and H.J. Siriwadane, Constitutive Laws for Engineering Meterials, Prentice-Hall, Inc., 1984.
10. Visic, A.S., and G.W. Clough, "Behavior of Granular Materials under High Stresses," J. of the Soil Mech. and Found. Division, ASCE, May, 1968.
11. Zoback, M.D., and J.D. Byerlee, "Effect of High-Pressure Deformation on Permeability of Ottawa Sand," the Ameri. Associ. of Petroleum Geologists Bull. Vol.60 No.9, 1976.
12. Chadwick, P., A.D. Cox and H.G. Hopkins, "Mechanics of Deep Underground Explosions," Philosophical Transactions of Royal Society of London, Series A, No.1070, Vol.256, 1964.
13. Higgin, C.J., "Some Consideration in the Analysis and Prediction of Ground Shock from Buried Conventional Weapons," In the preceedings cited in Reference 1.

(접수일자 1988. 10. 3)