

포화된 다공성 지반의 모델링을 위한 동적해석 프로그램(MPDAP)의 이론 및 이의 검증에 관한 연구

A Study on the Theory and Its Verification of Dynamic Analysis Program
(MPDAP) for Modelling of Saturated Multi-Phase Porous Media

김 광 진* ¹	배 규 진* ²
Kim, Kwang-Jin	Bae, Gyu-Jin
문 홍 득* ³	김 창 용* ⁴
Moon, Hong-Deug	Kim, Chang-Yong

Abstract

In order to make reliable ground shock predictions in saturated geological media, it is necessary to use multi-phase material models and numerical codes.

This paper presents the results of theoretical study of the fundamental behavior of multi-phase porous media subjected to high dynamic loadings, and deals with the development of numerical code MPDAP with JWL(Jones-Wilkins-Lee) model, which is capable of considering the kinds and characters of explosives.

To check the global equilibrium equations of the numerical code, we carried out some verifications. In the cases of the elastic spherical wave propagation in a single phase medium, one-dimensional linear consolidation, and one-dimensional wave propagation in saturated linear elastic soils and rocks, the results calculated by MPDAP show close agreement with closed-form solutions or numerical solutions generated with two phase code.

요 지

일반적으로 포화지반의 동적거동을 정확히 예견하기 위해서는 다공성(multi-phase) 재료모델과 그 모델을 이용하는 수치해석 프로그램의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 높은 동하중을 받는 다공질 재료의 이론적인 거동해석 연구결과와 함께 기존 MPDAP(multi-phase dynamic analysis program)에 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 모델을 삽입시켜 개발한 MPDAP에 대해 다루었다. JWL모델은 기존 모델과는 달리 폭약의 종류 및 특성 등을 고려할 수 있는 모델이다.

*¹ 정회원, CTR사 사장

*² 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 실장

*³ 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

*⁴ 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

또한 본 논문에서는 개발된 프로그램의 적합성을 조사하기 위하여 몇몇 예제에 대한 검증해석을 수행하였다. 검증결과, 단일매체(single-phase medium)에서의 탄성구형파의 전파특성해석의 경우 해석결과와 이론해는 거의 일치하는 결과를 나타내었고, 일차원 선형 압밀해석의 경우 과잉 간극수압은 Terzaghi의 이론해와 해석된 결과가 비교적 일치하는 경향성을 보여 주었다. 또한 포화지반에서의 평면 압축과 해석의 경우도 해석결과와 이미 검증된 프로그램 또는 완전해의 해석결과는 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Modelling, MPDAP, Blast, JWL model, Explosives, Wave propagation, Dynamic loading, Multi-phase porous media

1. 서론

일반적으로 발파작업이 이루어지는 현장에서는 발파진동이 기존 구조물이나 지반에 영향을 미치고 건물이 밀집된 도심지에서는 인간에게 정신적인 피해를 입히는 등의 사례가 종종 발생하고 있다. 이러한 피해의 원인으로 는 발파진동, 발파풍으로 인한 소음 또는 폭풍 압과 파쇄된 암석 혹은 파쇄 대상체의 비산 등을 들 수 있다. 물론 발파진동의 특성은 전파매질에 따라 달라지고, 구조물의 반응특성에 따라 위치적으로 큰 차이를 보이게 된다. 또한 이러한 발파에 의한 피해의 정도는 전파매질의 입자속도, 가속도 및 탁월 진동주파수 등으로 나타낸다. 또한 발파현장 주변의 피해 가능성을 평가하기 위해서는 발파로 인해 발생하는 지반진동을 예측할 필요가 있는데, 이 때 수치해석적 방법이 적용될 수 있다. 이를 위해 최근에 개발되고 있는 수치해석적 방법들은 발파진동 해석시 이러한 지반특성, 주변구조물, 발파원 등을 비교적 현장상황에 근접하게 시뮬레이션 할 수 있다. 그러나 해석시 가장 중요한 발파원을 모델링할 때 단순히 가정한 발파하중-시간 사이의 관계만을 입력치로써 이용하고 있으므로 폭약의 종류에 따른 정확한 발파특성을 고려하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 발파 해석시 보다 정확한 해를 얻기 위해 제반조건들을 고려할 수 있도록 미국 COMTEC R.사와 공동개발한 프로그램인 MPDAP(multi-phase dynamic analysis

program)에 대한 이론적 고찰, 유한요소구성, 모델검증에 대한 내용을 다루었다. 특히, 본 연구의 근간으로 제시되고 있는 MPDAP의 이론은 미국 AFOSR(air force office of scientific research) 지원하에 이루어진 기초연구를 통해서 개발되었다.

포화된 지반의 동적거동 해석방법으로는 Biot의 Two-Phase 이론에 근거한 매질내의 유체의 흐름방정식을 이용하는 해석기법을 들 수 있다. 그러나 이러한 해석기법은 지반속의 유체의 흐름이 층류(laminar)인 경우에 대한 해석기법으로서 폭발하중 등에 의해 지반속의 흐름상태가 난류상태(turbulent flow)로 바뀔 경우에 대한 수치 해석결과는 실제 실험결과와는 상당한 차이가 있음을 밝혀졌다. MPDAP은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 발파실험에 의한 결과와 수정된 이론식을 이용하여 포화된 지반에서 뿐만 아니라 부분포화된 토사지반이나 암반에서의 거동특성을 규명할 수 있도록 multi-phase 동적 해석법을 개발, 적용하고 있는 프로그램이다. MPDAP은 1988년 기존 TPDAP-II 프로그램을 기본으로 하여 수정 및 보완을 거쳐 완성되었다.

특히, 기존의 프로그램들은 진동원을 모델링하는데 있어서, 임의로 가정한 발파하중-시간 사이의 관계만을 입력변수로 이용하기 때문에 폭약의 특성을 고려한 해석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 실험실에서의 발파실험 결과를 토대로 경험적으로 구한 상태 방정식인 JWL(Jones-Wil-

kins-Lee)모형을 본 MPDAP 프로그램에 삽입하여 정밀발파해석이 가능한 발파해석용 프로그램으로 개발하였다.(Atlas Powder company, 1987)

본 연구에서는 발파해석용 프로그램 개발에 이용된 multi-phase 모델의 이론 및 JWL 모델에 대한 기본적인 사항들을 기술하였고, 이들을 토대로 MPDAP 프로그램의 유한요소 방정식 및 프로그램의 구성 등을 제시하였다. 또한 본 프로그램의 검증은 위해서 첫번째로 단일매질에서의 탄성 구형파의 전파특성을 정확히 이론해(closed-form solution)와 비교하였다. 두번째로 일차원 선형 압밀 예제를 해석하여 Terzaghi의 이론해와 비교하였고, 세번째로 포화된 지반에서 일차원 평면 압축과의 전파특성을 이미 적용성이 입증된 TPDAP-II 프로그램 결과와 비교하여 본 프로그램의 적용가능성을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 다공성 지반 모델의 이론

1) 유효응력의 원리

Terzaghi의 유효응력 방정식은 fully coupled model의 기본이론으로 다음과 같이 전응력, 간극수압, 유효응력의 항으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, σ_{ij} : 전응력

σ'_{ij} : 유효응력

δ_{ij} : Kronecker 델타($i \neq j$ 이면 $\delta_{ij} = 0$, $i = j$ 이면 $\delta_{ij} = 1$)

π : 간극수압

2) 토립자의 변형 및 간극유체흐름의 연속방정식

토립자의 응력, 변형관계는 토체에 작용하는 유효응력과 간극수에 작용하는 간극수압 사이에 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\{d\sigma\} = \{D^e\}(\{d\epsilon\} - \frac{C_k}{3}\{1\}d\pi) \quad (2)$$

여기서,

$\{D^e\}$: 탄소성 강성행렬

$\{d\epsilon\}$: 토립자 미소변형률

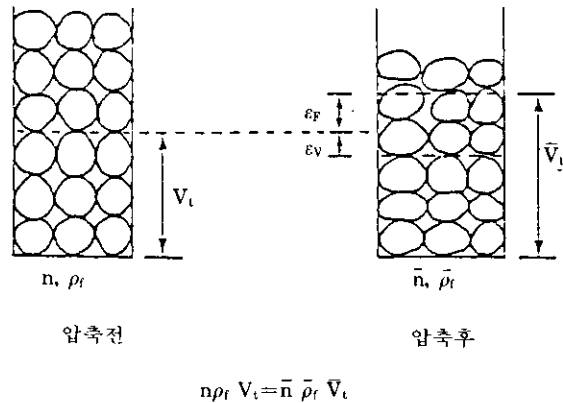
$\{1\}$: 단위벡터 $\{1\}^T = \langle 111000 \rangle$,

C_k : 토체의 압축성

우측의 첫번째 항은 전응력에 의한 변형률 성분이고, 두번째 항은 간극수압에 의해 토체 입자의 압축이 발생하여 생긴 변형을 나타낸다.

간극유체 흐름에 대한 연속방정식은 질량보존의 법칙으로부터 유도된다. 포화된 매질의 정해진 초기 체적내에서 간극유체에 대한 질량보존의 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$n\rho_f V_i = \bar{n} \bar{\rho}_f \bar{V}_i \quad (3)$$



V_i = 압축전의 겉보기 유체 체적

$\bar{V}_i = (1 + \epsilon_f)V_i$ = 압축후의 겉보기 유체체적

ϵ_v = 토립자의 체적 변형률

ϵ_f = 간극유체의 체적 확산

Fig 1. 포화된 재료내 간극유체의 질량보존의 관계도

포화된 매질속의 간극유체에 대한 질량보존의 관계로는 Fig. 1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 식 (3)의 좌변은 초기상태의 유체의 질량을, 우변은 압축후의 똑같은 유체의 질량을 나타낸다. 또한 식 (3)은 다음과 같은 미소증분의 형태로 표현할 수 있다.

$$n\rho_f V_i = (n + dn)(\rho_f + d\rho_f)(1 + d\epsilon_f)V_i \quad (4)$$

여기서, ϵ_f : 간극유체의 체적확산도

식 (4)를 $d\epsilon_f$ 에 대해 풀어 둘째항을 제거하면,

$$d\epsilon_f = -\frac{dn}{n} - \frac{d\rho_f}{\rho_f} \quad (5)$$

$$(1-n)d\epsilon_v + nd\epsilon_f + (1-n)\frac{d\rho_s}{\rho_s} + n\frac{d\rho_f}{\rho_f} = 0 \quad (6)$$

식 (5)는 다음식을 얻기 위해 dn 의 항을 제거함으로써 토립자의 체적변형을 증분과 간극유체의 체적변형률 ϵ_f 와 토체의 체적변형률 ϵ_v 에 관한 식을 (6)식과 결합하면,

$$n(d\epsilon_f - d\epsilon_v) + d\epsilon_v - \frac{1}{K_m}d\pi - C_s dp' = 0 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } K_m = \frac{1}{nC_f + (1-n)C_s} \quad (8)$$

dp' = 유효평균 압력증분

C_s = 간극유체의 압축성

흙/유체 혼합매질의 체적탄성계수 평균 유효압력변화는 다음과 같다.

$$dp' = K_s(d\epsilon_v - C_s d\pi) \quad (9)$$

식 (9)을 식 (7)에 대입하면 다음식과 같은 토립자의 변형 및 간극 유체 흐름의 연속방정식을 얻을 수 있다.

$$n(d\epsilon_f - d\epsilon_v) + (1 - C_s K_s)d\epsilon_v + (C_s^2 K_s - \frac{1}{K_m})d\pi = 0 \quad (10)$$

3) 매질에 대한 운동방정식

위와 같은 매체를 지배하는 운동 미분방정식은 관성저항(inertial resistance)과 응력구배(stress gradient)를 같게 놓으므로써 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{ij,j} = (1-n)\rho_s \ddot{u}_i + n\rho_f \ddot{u}_i \quad (11)$$

여기서,

$\sigma_{ij,j}$: 포화매질의 미소요소에 작용된 전응력 구배(total stress gradient)

n : 간극률

ρ_s : 토립자밀도

u_i : i 방향의 토립자 변위

\ddot{u}_i : i 방향의 토립자 가속도

ρ_f : 간극수 밀도

\ddot{u}_i : i 방향에서의 간극유체의 절대치 가속도

토립자와 상대적인 i 방향에서의 유체의 겉보기 변위로서 W_i 라는 항을 도입하면,

$$W_i = n(U_i - u_i) \quad (12)$$

침투문제에서 W_i 는 유량의 변위로 간주된다. 즉 이것은 단위면적의 토피를 통과하는 유체의 유량을 나타낸다. 따라서 i 는 토립자와 간극수 사이의 상대적인 겉보기 가속도이며 다음식과 같다.

$$\ddot{W}_i = n(\ddot{U}_i - \ddot{u}_i) \quad (13)$$

식 (11)을 간단히 상대적인 겉보기 유체가속도의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,j} = \rho_s \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{W}_i \quad (14)$$

4) 간극유체에 대한 운동방정식

지난 수년동안에 걸쳐 토립자와 상대적인 간극유체의 운동을 나타내는 방정식에 대해 수정이 되어 왔다. Kim & Blouin(1984)에 의해 최초로 개발된 이 방정식은 다음과 같이 Biot의 유체의 마찰에 관한 방정식과 유사하게 사용되었다.

$$\pi_{i,j} = \rho_f \ddot{u}_i + \frac{\rho_f}{n} \ddot{W}_i + \frac{\gamma_f}{k} \dot{W}_i + \frac{\rho_f}{n} r \ddot{W}_i \quad (15)$$

여기서,

$\pi_{i,j}$ = 간극수압 경사

\ddot{u}_i = 절대치의 토립자 가속도

\dot{W}_i = 토립자에 대한 상대겉보기 유체속도

\ddot{W}_i = 토립자에 대한 상대겉보기 가속도

ρ_f = 간극유체의 밀도

γ_f = 간극유체의 단위중량

n = 간극률

k = Darcy의 투수계수

r = 질량증분계수

관성성분인 식(15) 오른쪽의 처음 두 항은 간극유체의 가속도나 가속도의 결과로 나타난 압력구배 부분을 나타낸다. 그리고 마지막 두

항은 간극유체와 토립자 사이의 상대적인 운동과 관계있는 유체의 마찰에 의한 간극수압 구배의 부분을 나타낸다.

위와 같은 간극유체의 운동방정식에 난류흐름상태 동안의 마찰에너지 손실을 고려한 것이 Fig.2로서 층류와 난류상태의 이론적인 속도분포를 나타내고 있다. 층류 흐름은 Reynolds수가 2,000이하일 때 일어나며 정상상태의 층류흐름일 때 속도분포는 관의 중심에 대해 포물선이다. 비정상 상태의 흐름에 대해서는 Biot

의 이론해석이 Fig. 2와 같이 유속분포의 변화를 나타낸다. 만약 Reynolds수가 2,000이상일 때는 난류흐름을 이루게 되며 관벽에 인접한 부분은 매우 예리한 속도구배를 가진다. 난류영역에서의 유선은 더이상 평행하지 않고 흐름방향의 직각인 임의의 입자운동이 일어난다. 따라서 이와 같은 조건들에 대해 다음과 같이 일반화된 난류흐름 관계식을 실험적으로 증명하였다.

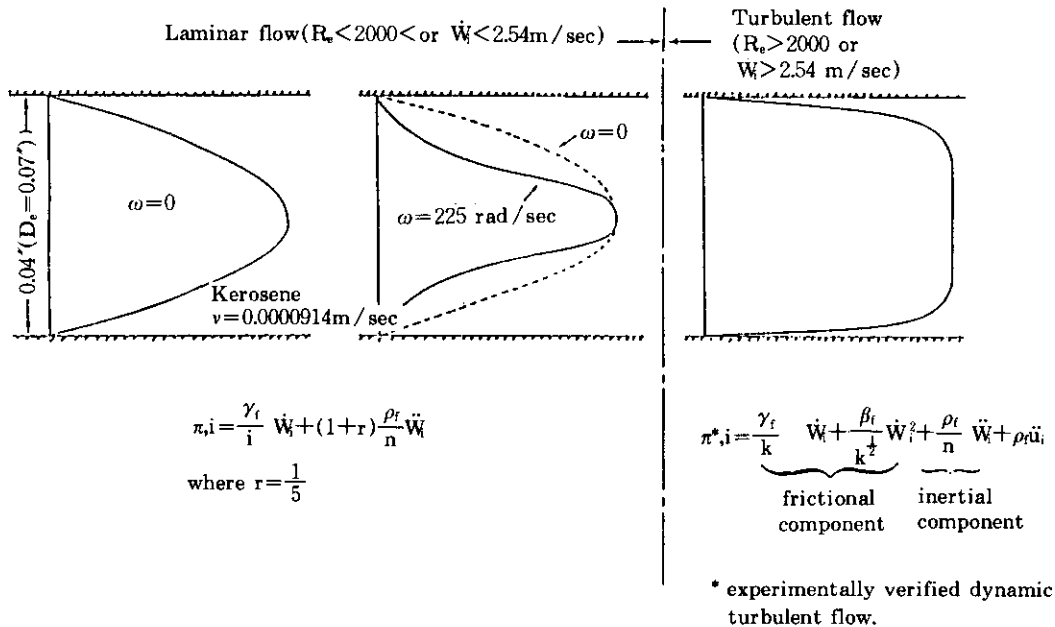


Fig 2. 평행한 관에서의 유속분포

$$\pi_{,i} = a\dot{W}_i + b\dot{W}_i^2 + c\ddot{W}_i + \rho_f \ddot{u}_i \quad (16)$$

윗식은 (15)식과 동일하며 층류흐름영역과 난류흐름영역에서 상수 a, b, c는 표 1과 같이 변한다. 실제 포화된 토사에서의 간극수의 흐름은 대략적으로 Reynolds 수가 10정도로 나타나며 10이상에서 난류상태가 나타난다.

Kim, Blouin 과 Timian(1986, 1987)의 실험결과에 의하면 토목공학에 있어서 주로 관심의 대상이 되는 응력수준에서 포화된 토사 및

표 1. Flow parameter a, b, c

	층류흐름영역	난류흐름영역
a	γ_f / k	γ_f / k
b	0	$\beta_f / k^{1/2}$
c	$(1+\gamma) \rho_f / n$	ρ_f / n

여기서 β_f : ward의 난류흐름 상수

암반에서의 폭발하중에 있어서는 난류의 간극유체 흐름영역이 유체의 마찰거동을 지배한다

는 것을 알았다. 난류흐름은 인접한 폭발로부터의 동적응력파의 도착과 거의 동시에 일어나며, 층류흐름은 동적응력파가 지나간 후 늦은 시간에만 관련이 있다. 실험적, 이론적 결과에 의하면 천이흐름 영역을 나타내기 위해 사용된 Biot의 이론적 연구들은 난류상태의 흐름영역에서는 적용할 수 없다는 것이 밝혀졌다 (Kim, Blouin, Chitty, Merkle, 1988).

5) 부분포화상태의 거동

Rischbieter 등 (1977)은 다공성 매질에서 지반속에 들어있는 불과 몇 %의 공기양도 매체의 체적압축-변형 관계에 크게 영향을 미친다는 연구결과를 발표하였다. 따라서 다공성 지반을 완전히 이해하기 위해서는 3상(Three-phase) 매질에서의 응력과 전달과 간극수압 거동을 먼저 알아야 한다.

Kim(1982)은 부분포화된 매질에서 공기-물의 혼합물의 압축성에 대한 하나의 방정식을 제시하였다. 이 방정식은 실험데이터에 대한 검증과 준정적(quasi-static) 문제에 광범위하게 적용되어 왔다.

부분포화된 매질에서의 공기-물 혼합물의 압축성, C_{aw} 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{aw} = (1 - S_o + H_c S_o) \frac{\pi_{so}}{(\pi + T)^2} \quad (17)$$

여기서 S_o : 초기포화도

H_c : 용해성 계수(Henry의 상수)

π_{so} : 현재의 간극수압(절대값)

π : 현재의 간극수압(절대값)

T : 표면장력에 의한 공기와 간극수 사이의 압력차이

윗식에서 나타낸 바와 같이 공기-물의 혼합물의 압축성은 현재의 간극수압에 대해 비선형이다. 이러한 관계는 간극의 포화도가 약 85% 이상될 때 적용할 수 있는 것으로 나타났으며 공기-물의 혼합물은 간극유체내에 작은 공기방울처럼 포함된 공기로 흡수된 상태로 존재한다고 생각한다 (Kim, Blouin, Chitty, Merkle, 1988).

방정식(17)에서의 압력차이, T 는 포화도를 미리 아는 부분포화된 시료에 대해 비배수 정수압시험으로부터 실험적으로 결정한다(Kim, 1982).

부분포화된 지반에 대한 해석도 앞에서 기술한 현장의 흐름방정식과 동일한 방정식을 이용할 수 있다. 다만 간극유체의 압축성인 C 는 식(17)에 주어진 식을 이용한다. 즉 토립자는 공기-물의 혼합물과 같은 압축성을 갖는 등가의 유체로 채워져 있다고 가정하여 해석을 한다.

2.2 JWL 모델(Dobratz, 1981, Nicholls, Johnson Duvall, 1971)

기존의 발파진동 해석에서는 진동원으로 폭약의 폭발력을 이용하는데 시간 경과에 따른 폭압의 변화를 경험에 근거를 둔 함수식으로 나타내어 프로그램에 이용하여 왔으며, 본절에서는 단지 폭약의 종류에 따른 폭압-시간의 함수 뿐 아니라 폭발 메카니즘 등을 종합적으로 고려할 수 있는 경험적인 상태 방정식인 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 모델의 구성 및 특징을 기술코자 한다. JWL 모델은 1968년 Jones, Wilkins and Lee에 의해 개발되어 1981년 일부 수정, 보완된 것으로서 폭약의 폭발에 의한 팽창정도를 예측하기 위해 개발된 압력(P), 부피(V), 그리고 에너지(E) 사이의 상대적인 상태방정식이다. 이러한 JWL 모델은 실험실에서의 실험데이터와 동일한 수치해석모델 실험결과를 상호 비교하여 구한 경험방정식이다.

본 연구에서는 기존의 폭파해석용 프로그램인 MPDAP에 진동의 근원이 되는 폭원을 JWL모델로 나타내어 삽입하므로써 발파에 의한 진동해석이 가능하게 프로그램을 수정하였다. 즉 JWL Model은 폭약이 폭발하였을 때의 관계를 나타내는 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_r}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_r}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_v}{V_r} \quad (18)$$

여기서, A, B, R_1, R_2, ω : 폭약이 갖고 있는

표 2. JWL(상태방정식) 모델에 사용할 수 있는 각 폭약별 변수 (Dobratz, 1981)

Explosive	Equation-of-state parameters					
	A	B	R ₁	R ₂	w	Ref.
	[Nbar (100 GP _a)]					
BTF ^a	8.407	0.14960	4.60	1.20	0.30	58
Comp A-3 ^a	6.113	0.1065	4.4	1.2	0.32	59
Comp B, Grade A	5.242	0.07678	4.20	1.10	0.34	58
Comp C-4	6.0977	0.1295	4.5	1.4	0.25	60
Cyclotol 77./23	6.034	1.09924	4.30	1.10	0.35	58
DIPAM ^a	4.254	0.08007	4.70	1.30	0.39	58
EL-506A ^a	3.738	0.03647	4.20	1.10	0.30	58
EL-506C ^a	3.490	0.04524	4.10	1.20	0.30	58
Explosive D ^a	3.007	0.0394	4.3	1.2	0.35	59
FEFO ^a	3.824	0.06635	4.10	1.20	0.38	45
H-6 ^b	7.5807	0.08513	4.9	1.1	0.20	70
HMX	7.783	0.07071	4.20	1.00	0.30	58
HNS	1.627	0.1082	5.4	1.8	0.25	46
HNS	3.665	0.06750	4.8	1.40	0.32	46
HNS	4.631	0.08873	4.55	1.35	0.35	46
LX-01 ^a	3.110	0.04761	4.50	1.00	0.35	58
LX-04-1	8.364	0.1298	4.62	1.25	0.42	62
LX-07	8.481	0.1710	4.58	1.25	0.40	62
LX-09-1	8.481	0.1710	4.58	1.25	0.40	62
LX-10-1	8.807	0.1836	4.62	1.32	0.38	62
LX-11	7.791	0.10668	4.50	1.25	0.30	61
LX-13(See XTX-8003)						
LX-14-0	8.261	0.1724	4.55	1.32	0.38	62
LX-17-0	4.46	0.13390	3.85	1.03	0.46	92
NM	2.092	0.05689	4.40	1.20	0.30	58
Octol 78/22	7.486	0.13380	4.50	1.20	0.38	58
PBX-9010	5.814	0.06801	4.10	1.00	0.35	58
PBX-9011	6.347	0.07998	4.20	1.00	0.30	58
PBX-9404-3	8.524	0.1802	4.55	1.30	0.38	62
PBX-9407	5.73187	0.146390	4.60	1.40	0.32	58
Pentolite 50/50	5.4094	0.093726	4.5	1.1	0.35	22
PETN ^a	3.486	0.11288	7.00	2.00	0.24	58
PETN	5.731	0.20160	6.00	1.80	0.28	58
	6.253	0.23290	5.25	1.60	0.28	58
	6.170	0.16926	4.40	1.20	0.25	58
Tetryl	5.868	0.10671	4.40	1.20	0.28	58
TNT	3.712	0.03231	4.15	0.95	0.30	58

a Cylinder data are not available.

b This is a composite HE with non-ideal behavior.

물성치

E_v : 단위부피당 internal energy

V_r : 상대체적(relative volume)

$$V_r = \frac{V}{V_0} \quad (19)$$

여기서, V_r : 현재의 부피

V_0 : 초기의 부피

그리고 폭약이 폭발하였을 때의 화학반응의 진행을 나타내기 위하여 Burn Fraction(BF)이 다음식으로 주어진다.

$$BF = \frac{(t - t_b) \cdot C_d}{B_s \cdot l} \quad (20)$$

여기서, t : 현재시간

t_b : 폭발시간

C_d : 폭속

B_s : 폭발 전면 확산에 사용된 상수 (약 2.5)

l : Element 특성길이($l = \sqrt{A}$, A : Element Area)

Burn Fraction 값의 범위는 다음과 같다.

$$t \leq t_b, \quad BF = 0 \quad (21)$$

$$t \geq t_b + \frac{B_s \cdot l}{C_d}, \quad BF = 1 \quad (22)$$

따라서 실제로 폭약이 폭발할 때에 주변 압반에 가해지는 압력은 식(18)과 (20)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$P = BF \cdot [A(1 - \frac{\omega}{R_1 V_r})e^{-R_1 t} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V_r})e^{-R_2 t} + \frac{\omega E_v}{V_r}] \quad (23)$$

JWL 상태방정식의 parameter 및 기타 물성치는 많은 실험연구를 통해 기제시 되어 있고, 앞으로도 계속 실험되어야 할 필요성이 있다. 표 2는 식(18)에 사용될 수 있는 각 폭약별 변수에 대한 Lawrence Livermore National Laboratory에서의 실험결과를 보여주고 있는 표이다.

3. 다공성 지반 모델의 동적 유한요소 구성

전술한 다공성 지반 모델 이론에 근거하여 포화 또는 부분 포화된 흙, 암반 또는 다공성 재료의 정적 및 동적 문제를 해석하고 특히 지중발파에 의한 진동영향을 분석할 목적으로 진동의 근원이 되는 폭원을 JWL모델을 이용하여 프로그램을 구성하였다. 앞절에서는 포화 또는 부분 포화된 지반에서의 미소요소의 거동에 대한 기본적인 지배방정식을 제시하였다. 특정한 경계조건에 대한 전체 평형방정식은 가상일의 원리를 적용함으로써 유도할 수 있다. 먼저 매체에 대한 전체 평형방정식을 구하는 과정으로서 Fig.3은 미소요소 경계에서의 전응력과 가상변위를 나타낸다. 전 응력은 작용된 경계의 인력과 평형을 이룬다. 토립자의 거동을 가상변위 δu_i 로 나타낼 경우 계내의 내적인 가상일(internal virtual work)과 외적인 가상일은 동일해야 한다.

$$\delta W_i = \delta W_e \quad (24)$$

윗식으로부터 매체의 전체 평형방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$[M_i]\{\ddot{u}\}_n + [K_i]\{\Delta \bar{u}\}_n + [C]\{\Delta \bar{\pi}\}_n = \{P_u\}_n \quad (25)$$

여기서,

$$\{P_u\}_n = \{F\}_n - \int_V [B]^T \{\sigma_{n-1}\} dv - \{R_n\}_{n-1}$$

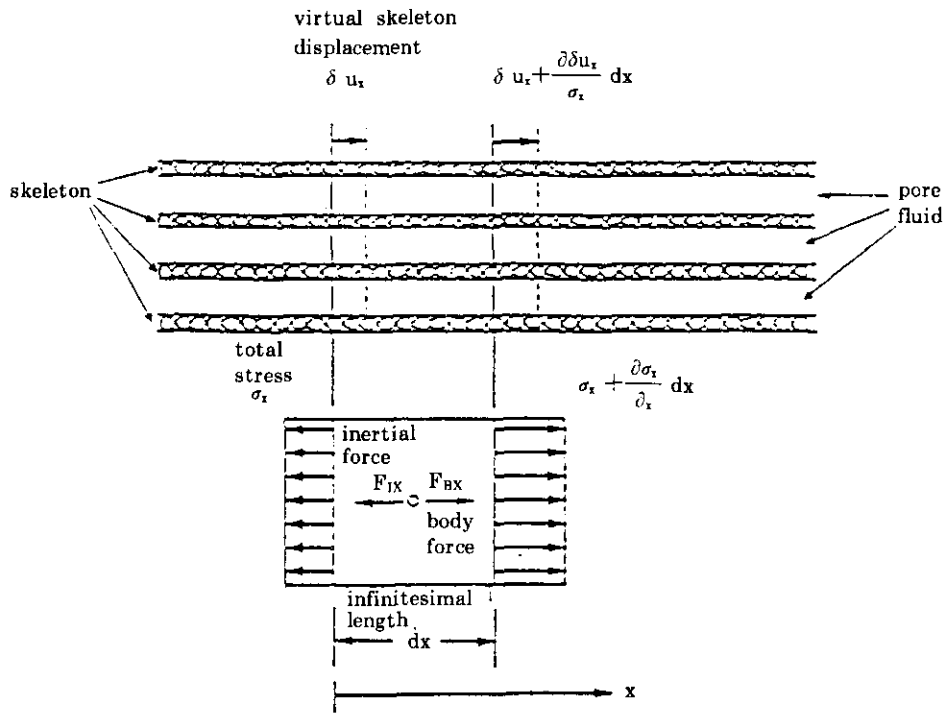
$$[M_i] = \int_V [N]^T (\rho - n\rho) [N] dv$$

$$[K_i] = \int_V [B]^T [D^*] [B] dv \quad (26)$$

$$[C] = \int_V [B]^T \{1\} - \frac{C_g}{3} [D^*] \{1\} \langle G \rangle dv$$

$$\{F\}_n = \int_S [N]^T \{T\}_n ds$$

다음으로 간극유체에 대한 전체 평형 방정식을 구하는 과정으로서 역시 임의 시간 t 에서 간극수압장(pore pressure field)으로써 보충의 가상응력을 취하면 시간 t_{n-1} 과 t_n 사이에서 이루어지는 내적 및 외적인 보충의 가상일은 동일해야 한다. 즉,



$$F_{BX} = (\rho dV)b,$$

$$F_{IX} = (\rho - n \rho_f) dV \ddot{u}_x + n \rho_f dV \ddot{u}_x$$

Fig 3. X방향에서의 전응력과 가상변위

$$\delta W^*_1 = \delta W^*_E \quad (27)$$

윗식을 기본으로 간극유체의 전체 평형방정식을 구하면 아래와 같다.

$$[C]^T \{\Delta \bar{u}\}_n + \left(-[E] - \frac{\Delta t}{2}[H]\right) \{\Delta \bar{\pi}\}_n = \{\bar{P}\}_n \quad (28)$$

여기서,

$$\{\bar{P}\}_n = \Delta t [H] \cdot \{\bar{\pi}\}_{n-1} - \{\mathbf{R}_{f2}\}_{n-1.5} - \frac{\Delta t}{2} (\{Q\}_{n-1} + \{Q\}_n) \quad (29)$$

$$\{\mathbf{R}_{f2}\}_{n-1.5} = \Sigma \int [A]^T K \Delta t \cdot (a_4 \{\bar{U}\}_{n-2} + a_5 (\{\pi, i\}_{n-2} + \{\pi, i\}_{n-1} + a_6 \{\Delta u\}_{n-1})) dv \quad (30)$$

위의 두 평형 방정식을 매트릭스 형태로 합성하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\bar{d}}\}_n + [K]\{\Delta \bar{d}\}_n = \{\bar{P}\}_n \quad (31)$$

윗식을 Newmark의 \$\beta\$법과 Wilson의 \$\theta\$법에 적용하여 시간적분 방법을 도입하여 가속도 벡터 \$\{\ddot{\bar{d}}\}_n\$과 속도벡터 \$\{\dot{\bar{d}}\}_n\$를 변형 및 정리하면 다음과 같은 선형화된 전체 평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$[\bar{K}] = C_1[M] + [K] \quad (32)$$

일반화된 힘의 벡터 \$\{\bar{P}\}\$는 다음과 같이 표현된다.

$$\{\bar{P}\} = \{\bar{P}\}_n - [M](C_2 \{\dot{\bar{d}}\}_{n-1} + C_3 \{\bar{d}\}_{n-1}) \quad (33)$$

본 이론이 적용된 프로그램의 전체적인 구성은 크게 8개의 주요 서브루틴으로 구성되며 그 흐름도는 Fig.4와 같다.

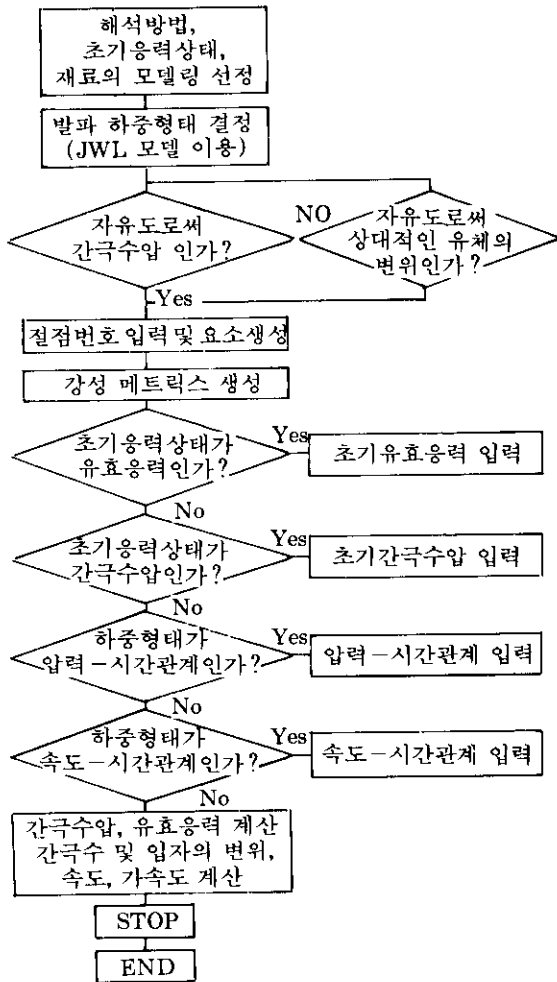


Fig 4. MPDAP의 흐름도

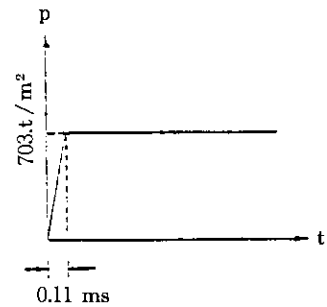
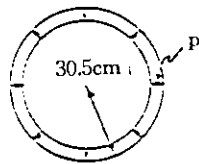
4. 다공성 지반 모델에 대한 검증

본 절에서는 MPDAP의 검증을 위하여 여러 가지 예제에 대한 정확한 이론해와 MPDAP를 이용한 수치적인 해석결과를 하나의 그래프상에 함께 도시하여 프로그램의 정확성을 판단하였다. 또한 Two-Phase Medium에 적용가능하도록 만든 COMTEC R.사의 TPDAP II 프로그램 해석결과와 상호 비교하여 본 프로그램의 검증을 실시하였다.

4.1 단일 매체에서의 탄성 구형파의 전파 특성 예

본 검증문제는 간극수가 존재하지 않을 때 일차원 구형파표면에 있어서 매질에 대한 전체적인 평형방정식을 확인하고자 한 것이다.

Fig.5는 반경 31cm의 공동에 142t/m²의 내부 순간 재하하중이 가해질 때 주변의 무한 탄성지반에 미치는 압력을 반경방향에 따라 계산하고자 한 것이다. 계산에 이용된 재료의 성질 중 하중은 Fig. 5에 제시한 바와 같다.



Time Step	$\Delta t = 0.022 \text{ msec}$
Young's Modulus	$E = 8.753 \text{ t/m}^2$
Poisson's Ratio	$\nu = 0.25$
Mass Density	$\rho = 0.202 \text{ ton-sec}^2/\text{m}^4$

Fig 5. 탄성구성형파의 전파특성 예

Fig. 6은 해석결과를 도시한 것으로 요소를 조밀하게 구성한 경우(fine mesh, 길이방향 200개 유한요소)와 그렇지 않은 경우(coarse mesh, 길이방향 50개 유한요소)에 대해 폭약이 폭발한 후 5.5 msec 지난후의 반경방향에서 계산된 응력과 반경방향의 거리와의 관계로 표시하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 충격파 전방에서의 응력의 간섭효과를 제외하면 MPDAP 계산치와 이론적인 해가 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다.

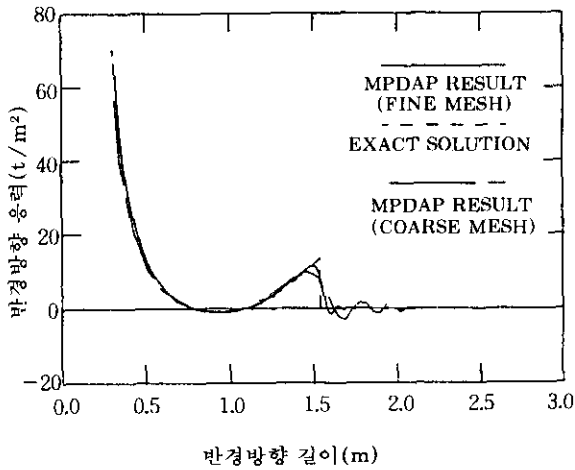


Fig 6. 5.5msce에서의 수평방향 응력 분포

검증 예의 결과를 보면 반경방향에 따로 압축응력의 분포는 정확한 이론해(closed-form solution)와 MPDAP 해석결과가 반경방향 거리 약 1.53m까지는 요소를 세밀하게 구성한 경우가 이론해와 일치하였고, 요소를 세밀하게 구성하지 않은 경우는 비교적 경향성은 비슷하지만, 동일거리에서 이론해와 비교해 볼 때 인장응력이 발생하는 지점에서 최소가 되고 거리가 원점에서 가까울수록 응력차이가 크게 나타나서 거리가 0.45m 일 때 약 12%, 0.35m 일 때 약 15% 정도로 나타났다. 그러나, 약 1.53m를 전후해서 요소를 세밀하게 구성한 경우는 이론해와 유사한 응력 곡선을 보여 주는 반면, 세밀하게 구성하지 않은 경우는 이론해와 상당한 차이를 보여주었다. 이는 충격과 전방에서의 응력 간섭효과를 요소의 크기를 조절하므로써 충분히 조절할 수 있는 가능성을 보여준 결과이다.

4.2 일차원 선형압밀 예

본 예제는 Terzaghi의 압밀이론해와 MPDAP의 준정적 흐름 예를 비교하기 위한 것이다. 완전히 포화된 토사체는 자유배수 경계조건

(free-draining boundary)이 가정되는 지표면에서 순간 재하하중을 받게 된다. 초기의 과도 간극수압 분포가 토사체내에서는 일정하게 유지된다. 이 문제를 해석하기 위해서 20개의 동일한 간격을 갖는 4 절점요소가 사용되었고, 시간증분 $\Delta T=0.005$ 이다. Fig. 7은 시각 $T=0.5$ 에서 과잉 간극수압의 분포이다. 물론, 시각 0.5에서 정확한 이론해와 MPDAP 해석결과를 비교해 본 결과 심도가 깊어질수록 이론해와 해석결과 차이가 커지고 있으나, 정규심도(normalized depth)가 1일 경우 정규화된 과잉 간극수압(normalized excess pore water pressure)은 이론해와 비교해 볼 때 최대 1% 정도만의 차이를 보이고 있다. 이는 MPDAP의 결과가 이론해와 거의 같다는 것을 보여주는 예이다.

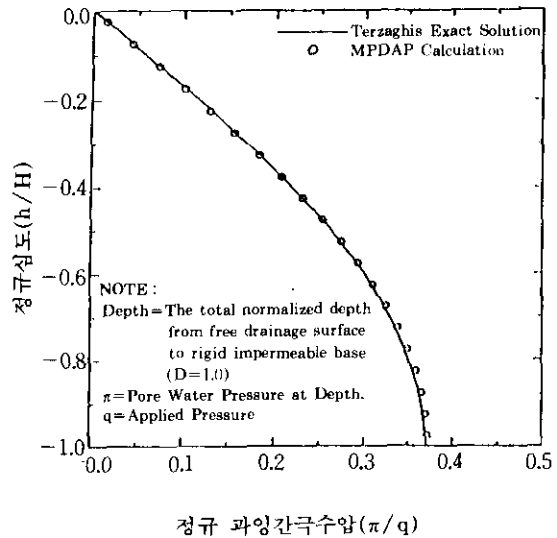


Fig 7. Time factor $T=0.5$ 에서 과잉 공극수압 분포

4.3 포화된 선형탄성 지반에서의 평면 압축파의 전파특성 예

본 예제에서는 이상화시킨 포화된 압반에서

의 수직으로 전파되는 압축파의 전파특성을 MPDAP를 사용하여 일차원적으로 계산하였다. Fig. 8에는 프로그램의 입력치로 사용된 하중-시간사이의 관계를 도시하였다.

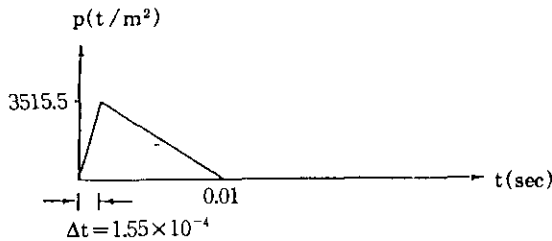


Fig 8. 포화된 지반에 작용한 하중-시간의 관계

그림에서와 같이 입력하중은 폭파후 짧은 시간내에 최대 응력 7112t/m²에 도달하며 하중 지속시간이 10 msec인 삼각파 형태의 pulse를 갖는 하중을 나타낸다. 또한 해석에 이용된 포화된 지반의 물성치는 다음과 같다.

(가) 간극수의 체적탄성계수=2039t/m²

(나) 토립자(soild grains)

체적탄성계수=35155t/m²
비중=2.67

(다) 배수상태의 지반

체적탄성계수=4394 t/m²

구속탄성계수=8789 t/m²

포아손비(ν)=0.20

간극율(n)=0.35

(라) 투수계수

투수계수는 0.0025, 0.25, 2.5 cm/sec의 3가지 경우로 가정하였다.

따라서 본 예제에서는 이와 같은 하중파가 전술한 재료의 특성을 갖는 이상화된 포화 암반지반에 수직으로 작용할 때 암반의 길이, 폭파후의 지속시간 및 암반이 가지는 투수계수 값의 변화에 따른 암반내에서의 유효수직응력 및 간극수압의 분포를 MPDAP와 TPDAP-II를 사용하여 계산하였다. 특히, 본 예제에서는 포화된 지반에서의 압축파의 전파에 대한 이론해가 없기 때문에 이론적으로 검증작업이 이루

어진 TDAP-II를 비교대상으로 하였다. TDAP-II는 이미 적용성이 입증된 Ghaboussi와 Wilson의 공식을 사용하고 있으며 간극수의 상대변위(x,y 방향)를 자유도로 정하고 있다. 하지만 MPDAP는 TPDAP-II와는 달리 간극수압을 자유도로 하고 있기 때문에 1개의 절점에 대해서 2차원의 경우 TPDAP-II dp 비해 1개 적은 자유도를 갖고 3차원의 경우 2개 적은 자유도를 갖고 있어 계산시간과 컴퓨터 용량이 적게 소요된다. 따라서 여기서는 MPDAP와 TPDAP-II와의 결과를 상호 비교해 보았다.

Fig. 9~11에서는 해석결과를 나타내었는데 투수계수 0.0025, 0.25, 2.5 cm/sec, 폭파후 경과시간 20 msec 각각에 대한 간극수압 및 유효수직응력의 분포를 나타내었다.

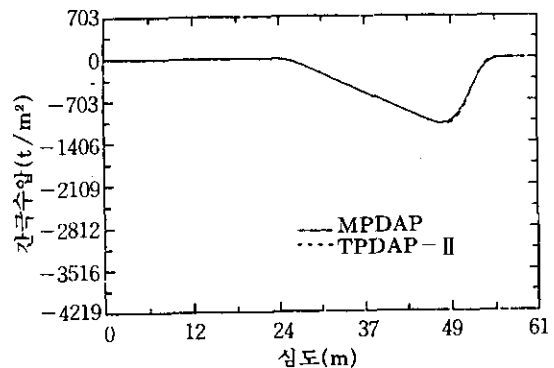


Fig 9. (a) 투수계수 0.0254 mm/sec인 지반의 20msec에서의 간극수압 분포

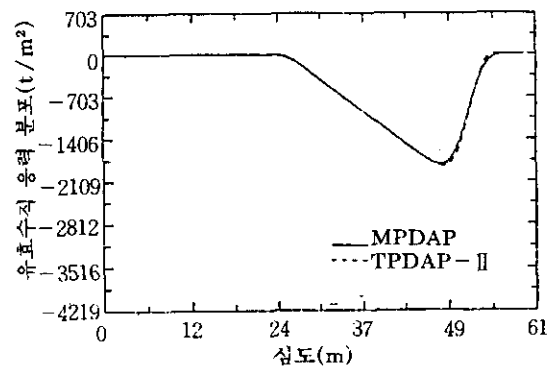


Fig 9. (b) 투수계수 0.0254 mm/sec인 지반의 20msec에서의 유효수직응력

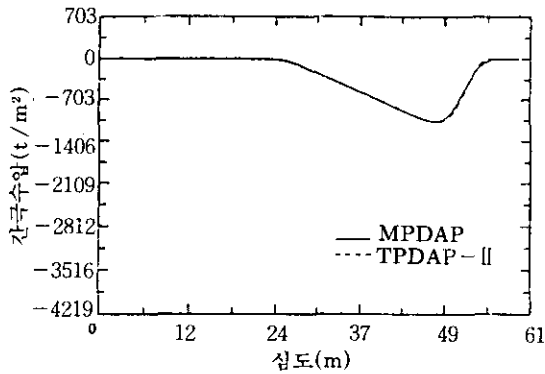


Fig 10. (a) 투수계수 2.54 mm/sec인 지반의 20msec에서의 간극수압 분포

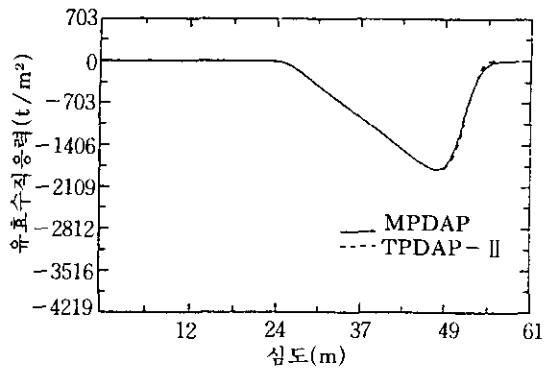


Fig 10. (b) 투수계수 2.54cm/sec인 지반의 20msec에서의 유효수직 응력 분포

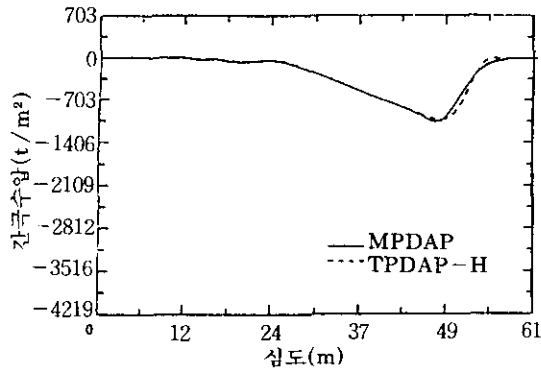


Fig 11. (a) 투수계수 2.54 mm/sec인 지반의 20msec에서의 간극수압 분포

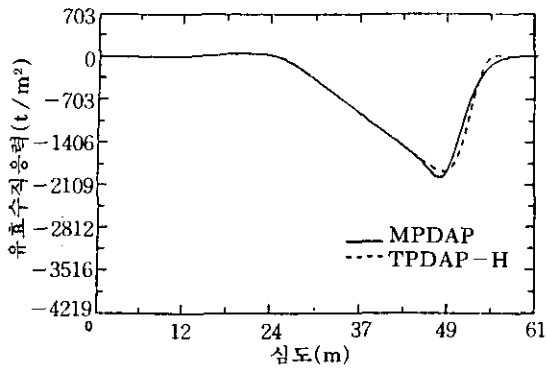


Fig 11. (b) 투수계수 2.54cm/sec인 지반의 20msec에서의 유효수직 응력 분포

해석결과를 전반적으로 살펴보면 TPDAP-II 및 MPDAP 해석결과는 투수계수의 변화 뿐 아니라 폭파 후 시간의 경과에 따른 간극수압 및 유효수직 응력분포는 거의 같은 결과를 나타내고 있다. 다만 투수계수가 커질수록 차이가 커지고 그 정도는 크게 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서 사용한 MPDAP 프로그램은 폭파에 의한 동적 하중이 지반에 작용하였을 때 충분히 정확한 해석결과를 도출할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 동적하중을 받는 다공질 재료

의 거동특성을 보다 정확히 해석하기 위해 개발된 MPDAP의 이론적인 내용과 이의 검증 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서는 포화지반에 대한 동적해석이 가능하고 발파현상을 보다 정확하게 해석할 수 있는 수정 MPDAP(Multi-Phase Dynamic Analysis Program)를 개발하였다.
- 2) 단일 매체에서의 탄성구형파 전파특성에 대한 이론해와 MPDAP 프로그램에 의한 해석결과를 상호 비교한 결과, 응력간섭 효과를 제외하고는 비교적 근사한 결과를 보여 주었으며, 요소를 세밀하게 구성할수록 이론해와 유사한 결과를 보여 주었

다. 또한 일차원 선형압밀상태에서 Terzaghi 압밀이론해와 비교해 볼 때, 계산된 과잉 간극수압은 1% 이내로 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 또한 포화된 선형탄성 지반에서의 평면 압축과 전파특성을 이미 이론적으로 검증된 TPDAP-II 프로그램과 비교해 보았을 때, 큰 차이가 없는 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

- 3) MPDAP는 폭약의 종류별 특성에 따른 폭발하중의 전파 메카니즘을 종합적으로 고려할 수 있는 JWL을 삽입시켜 프로그램화 한 것이며, 이 모델 사용에 따라 늘어나는 입력 변수와 프로그램과 관련한 기타 물성치에 대해서는 앞으로 지속적인 실험과 해석을 통해서 결정하여야 하며, 포화 혹은 불포화 지반에서 발파에 의한 진동이 지중 및 지상구조물 또는 주변 민가에 미치는 영향을 검토하는데 유용하게 사용되리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(1993), "지하생활공간 개발 요소기술 연구-지반굴착기술 분야(Ⅰ)", 정책연구보고서, 전기연 93-GE-161-1.
2. Atlas Powder Company(1987), Explosives and Rock Blasting.
3. Biot, M. A.(1956), "Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid Saturated Prous Solid, I, II", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 28, pp.168-191.
4. Dobratz, B. M.(1981), Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
5. Dowding, C. H.(1985), Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ07632, 297p.
6. Kim, K. J.(1982), Finite Element Analysis of Nonlinear Consolidation, PhD thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign.
7. Kim, K. J., Blouin, S. E., Chitty, D. E., and Merkle, D. H.(1988), Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads, Final Report to Air Force Office of Scientific Research, Washington, D. C., 242p.
8. Kim, K. J., Blouin, S. E. and Timian, D. A. (1984), Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads, Annual Report No. 1 to Air Force Office of Scientific Research, Washington, D. C., 300p.
9. Kim, K. J., Blouin, S. E., and Timian, D. A. (1986), Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads, Annual Report No. 1 to Air Force Office of Scientific Research, Washington, D. C., pp. 300-308.
10. Nicholls, H. R., Johnson, C. F., and Duvall, W. I.(1971), Blasting vibrations and their Effects on Structures, Bureau of Mines Bull. pp.656.
11. Rischbieter, F., et. al.(1977), "Studies of Soil Liquefaction by Shock Wave Loading", Fifth International Symposium on Military Applications of Blast Simulation, Vol. III Royal Swedish Fortifications Administration, Stockholm, Swden.
12. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., and Dowding, C. H.(1981), Structure Response & Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, USBM, RI85. 7.
13. Starfield, A. M., and Pugliese, J. M.(1986), "Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charge : A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 65-77.

(접수일자 1995. 9. 27)