석유비축을 위한 지하저장공동의 탄·점소성 동적해석

Elasto-viscoplastic Dynamic Analysis of Subterranean Storage Cavern for Petroleum Reserve

陳 致 燮*
Jin, Chi Sub
金 修 石**
Kim, Soo Seuk

요 약

최근에 원유와 석유제품을 저장하기 위한 지하공동의 필요성이 급증하고 있다.

지하저장공동의 동적응답을 구하기 위하여 재료비선형(탄·점소성)과 기하학적 비선형 효과를 모두 고려한 프로그램 VISDYN을 작성하여그 유효성을 확인하였다. 프로그램 VISDIN을 이용하여 지하저장 공동의 탄·점소성 동적해석을 수행한 결과 공동을 굴착한 후 지반이 안정상태에 도달한 때의 변위와 굴착 직후의 변위는, 동적인 변위 응답에서는 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

Abstract

In recent times, the subterranean caverns for storing crude oils and oil products are increasingly needed.

The elasto-VIScoplastic DYNamic finite element analysis program (VISDYN) has been developed in order to investigate dynamic responses of the storage cavity. And validity of the program is studied through a numerical example. Mohr-Coulomb yield criterion is adopted and associated flow rule is assumed. Geometrically nonlinear behaviour is taken into account using a total Lagrangian formulation.

In dynamic deformation responses, the difference between the steady state displacements and the unsteady state ones by the static analysis can be neglected.

* 정회원, 부산대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
** 경남전문대학 토목과 부교수, 공학박사

□ 이 논문에 대한 토론을 1989년 9월30일까지 본학회에 보내주시면 1990년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

1960년대 이래, 노르웨이를 비롯한 스칸디나반도 3국에서는 지하에 공동을 굴착한 후 그 표면에 라이닝을 하지 않은 채 원유와 석유제품을 저장하여 왔다. 이 방법은 비용이 가장 저렴하고 또 가장 안전한 저장방법으로 인정되어, 상업적인 저장시설이나 전략적인 저장시설의 대부분이 이 방법을 채택하여 현재 100개가 넘는 저장 플랜트가 완성되어 그 용량이 1억 6000만 배럴을 상회하고 있는 실정이다. 1973년 석유파동이 일어났을 때, 각국에서 진행 중이던 석유비축 프로그램들의 대부분이 원유가격의 급등으로 거의 취소되었다. 이는 각 나라들이 고가의 원유를 살 능력도 없었고 각국이 보유하고 있던 정유능력의 반 정도만 가동시켜 난국을 극복하려 하였다. 그러나 스웨덴에서는 오히려 이 석유파동을 새로운 전략적 저장시설건설의 촉진제로 삼아 1985년도까지의 장기 프로그램을 수립해 놓았었다.[1]

우리나라는 전 국토의 70% 이상이 지질구조적으로 안정상태에 있는 화강암류와 편마암류가 발달되어 있어서, 석유비축이나 방사성 폐기물의 안전처리를 위한 지하저장공동을 굴착하는 데 유리한 조건을 구비하고 있다. 그러나 지하공간의 활용으로 인한 에너지 절감효과, 국토이용의 증대, 전략적 방호능력, 환경보존 및 유지관리면 등의 경제적효과들의 인식과 더불어 이론 및 시공상의 기술개발이 선행되어야 비로소 이러한 지하공간의 활용이 본격화 되리라 생각된다.[2] [3] [4]

본 연구는 지하에 공동을 굴착하였을 때, 공동 주위의 응력과 변형상태의 동력학적 거동을 조사하여 합리적인 설계가 되도록 반영함이 목적이다. 물론 지하공동이 충분한 사용성과 안전율을 갖도록 재료의 역학적 관계를 명확히 정의해야 한다. 이들 재료의 역학적 거동은 재료의 구조적형성, 밀도, 배수조건, 포화도, 재하율, 응력이력 및 현재의 응력상태 등 여러 인자들에 의하여 영향을 받기 때문에 매우 복잡하여 명확하게 실제 상태로 이상화하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이들의 거동을 선형탄성모델, 비선형탄성모델, 탄소성모델 및 탄점소성모델 등과 같은 수학적 모델로 이상화시켜서 해결하고 있다. 이 중에서 탄성 및 탄소성모델은 시간종속적인 변형을 나타낼 수 없어서 탄점소성모델의 적용이 가장 합리적이라 생각된다.[5]

점소성의 개념은 Bingham[6]과 Perzyna[7] 에 의하여 제시되었고 Zienkiewicz and Cormeau[8] 가 탄점소성모델에 관한 유한요소 정식화를 시도하였다. 또 具 등[9]은 Mohr-Coulomb 항복기준을 이용하여 터널과 지하공동에 관한 정적해석을 수행하였다.

동적해석으로는 주로 일반 구조물에 관한 연구들이 많고 특히 재료비선형의 경우 탄소성문제에만 국한시켜 왔다.[10] [11] [12]

지하저장공동에 관한 연구로는, Kuriyagawa et al[13]이 저온액화개스 저장을 위한 암반거동을 조사하였고, Komada et al[14]은 석유저장용 공동주변의 침투류모델을 연구하였다. 鄭 등[15]은 전기상사모형을 이용하여 공동의 수밀성에 관한 연구를 수행하였다. Damjanic and Owen[16]은 Mohr-Coulomb 항복기준을 받는 탄점소성체의 시간적분기법 연구에서 지하공동을 수치예로 사용하였다. 또 Coyette and Guisset[17]은 공동의 굴착단계별 탄소성 유한요소 해석을 하였고 Howells[18]는 대형공동의 동적 거동을 연구하였다.

일반적으로 지하저장공동은 정적하중 뿐만 아니라 폭발, 충격 및 지진하중과 같은 시간에 따라 변화하는 동하중을 받게 된다. 이와 같은 동하중이 굴착단계나 굴착 후의 공동에 작용하여 공동주변의 응력이 탄성범위를 넘어서면 기하학적 형상이 크게 변화되어 공동을 해석하려면 재료비선형은 물론 기하학적 비선형효과도 반드시 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 항복기준과 결합유동법칙에 의한 탄점소성모델에 기하학적 비선형효과를 포함시켜 지하저장공동의 동적해석에 관한 유한요소 프로그램 VISDYN을 작성하여 그 유효성을 제시하였다.

2. 비선형 해석

2.1 재료비선형(탄점소성모델)

탄점소성 연속체의 해석에서 전체 변형률속도는 탄성성분과 점소성성분의 합으로 표시된다.

$$\tilde{\dot{\varepsilon}} = \tilde{\dot{\varepsilon}}_e + \tilde{\dot{\varepsilon}}_{VP} \qquad (2-1)$$

탄성변형률속도성분은 다음과 같은 응력속도와 관련 지을 수 있다.

$$\tilde{\dot{\sigma}} = \tilde{D}\tilde{\dot{\varepsilon}}_e \qquad (2-2)$$

여기서 $\tilde{D}$는 탄성행렬이다.

점소성 유동은 다음과 같은 스칼라 항복함수의 양의 값에서 일어난다.

$$\bar{F} = F(\tilde{\sigma}, \tilde{\varepsilon}_{vp}) - F_o \qquad (2-3)$$

여기서 F_o는 일축항복응력 또는 유효항복응력이다.

결합유동법칙을 적용하고, 점소성 변형률 속도를 현재의 응력상태의 함수로 놓으면

$$\tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp} = \gamma\langle\phi(\bar{F})\rangle \frac{\partial F}{\partial \tilde{\sigma}} \qquad (2-4)$$

여기서 γ는 점성계수의 역수로서 유동계수이다.

함수 $\phi(\bar{F})$는 $\bar{F}>0$에 대한 양의 단조증가함수로서 기호 $\langle\ \rangle$은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \langle\phi(\bar{F})\rangle &= \phi(\bar{F}), \quad \bar{F}>0 \\ \langle\phi(\bar{F})\rangle &= 0, \quad \bar{F}\leqq 0 \end{aligned} \qquad (2-5)$$

함수 ϕ에 대한 통상적인 선택방법은 Zienkiewicz et al[19]의 연구결과에 발표되었다.

$$\phi(\bar{F}) = e^{M\left(\frac{\bar{F}}{F_o}\right)} - 1 \qquad (2-6)$$

$$\phi(\bar{F}) = \left(\frac{\bar{F}}{F_o}\right)^N \qquad (2-7)$$

여기서 M과 N은 상수이고 본 연구에서는 식(2-7)을 이용하였다.

시간간격 $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$에서의 점소성 변형률 증분은 다음과 같이 정의된다.[20]

$$\Delta\tilde{\varepsilon}_{vp}^n = \Delta t_n[(1-\beta)\tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^n + \beta\tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^{n+1}] \qquad (2-8)$$

여기서 β는 $0 \leqq \beta \leqq 1$의 값을 가지며 β의 값에 따라 여러 가지 시간적분법이 결정된다. 식(2-8)의 $\tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^{n+1}$을 Taylor급수로 전개하여 2차항 이상을 무시한 후 식(2-8)에 대입하면

$$\Delta\tilde{\varepsilon}_{vp}^n = \tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^n \Delta t_n + \tilde{C}^n \Delta\tilde{\sigma}^n \qquad (2-9)$$

여기서

$$\tilde{C}^n = \beta\Delta t_n \tilde{H}^n = \beta\Delta t_n \left(\frac{\partial\tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}}{\partial\tilde{\sigma}}\right)^n \qquad (2-10)$$

점소성 변형률 도함수행렬 $\tilde{H}^n$은 $\beta>0$인 경우에 필요하며 Mohr-Coulomb 항복기준 에서는 쉽게 구해진다.[9][16] 본 연구에서는 $\beta = \frac{1}{2}$ 또는 1을 택하여 $\tilde{H}^n$을 고려하였다.

식(2-2)의 증분형을 이용하면 다음과 같다.

$$\Delta\tilde{\sigma}^n = \tilde{D}\Delta\tilde{\varepsilon}_e^n = \tilde{D}(\Delta\tilde{\varepsilon}^n - \Delta\tilde{\varepsilon}_{vp}^n) \qquad (2-11)$$

또 전체 변형률증분을 변위증분으로 나타내면

$$\Delta\tilde{\varepsilon}^n = \tilde{B}^n \Delta\tilde{d}^n \qquad (2-12)$$

식(2-9)를 식(2-11)에 대입하고 식(2-12)를 이용하면

$$\Delta\tilde{\sigma}^n = \tilde{\bar{D}}^n(\tilde{B}^n\Delta\tilde{d}^n - \tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^n\Delta t_n) \qquad (2-13)$$

여기서 $$\tilde{\bar{D}}^n = (\tilde{D}^{-1} + \tilde{C}^n)^{-1} \qquad (2-14)$$

식(2-12)와 식(2-13)에서 $\tilde{B}^n$는 기하학적 비선형을 고려할 때에는 2.2절에서와 같이 비선형 항을 포함하게 된다.

식(2-13)을 평형방정식의 증분형에 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta\tilde{d}^n = [\tilde{K}_T^n]^{-1}\Delta\tilde{V}^n \qquad (2-15)$$

여기서

$$[\tilde{K}_T^n] = \int_\Omega [\tilde{B}^n]^T \tilde{\bar{D}}^n \tilde{B}^n d\Omega \qquad (2-16)$$

$$\Delta\tilde{V}^n = \int_\Omega [\tilde{B}^n]^T \tilde{\bar{D}}^n \tilde{\dot{\varepsilon}}_{vp}^n \Delta t_n d\Omega + \Delta\tilde{f}^n \qquad (2-17)$$

이하 비선형 방정식의 해법과 수렴조건에 관한 사항들은 일반 비선형 유한요소기법에 의하여 자동적으로 수행된다.[5][9]

2.2 기하학적 비선형

기하학적 비선형 거동을 고려하려면 전체 또는 수정된 라그랑지안 좌표계를 이용하는 것이 편리한 데, 본 연구에서는 전체 라그랑지안 좌표계를 사용하였다.[5) 21)] 따라서 변형률-변위행렬 $\tilde{B}^n$을 수정하고, 변형률을 계산할 때 변형자코비안 $\tilde{J}_0^n$을 고려하였다.

변형률은 다음과 같이 표시된다.

$$\tilde{\varepsilon}^n=\tilde{\varepsilon}_L^n+\tilde{\varepsilon}_{NL}^n \qquad (2-18)$$

여기서 $\tilde{\varepsilon}_L^n=\sum_{i=1}^{m}\tilde{B}_{Li}^n\tilde{d}_i^n$ (2-19)

$$\tilde{\varepsilon}_{NL}^n=\frac{1}{2}\tilde{A}_\theta^n\tilde{\theta}^n \qquad (2-20)$$

$\tilde{A}_\theta^n$과 $\tilde{\theta}^n$는 〈표 2-1〉과 같다. 〉

식(2-20)의 $\tilde{\theta}^n$은 다음과 같이 절점변위와 관련지을 수 있다.

$$\tilde{\theta}^n=\sum_{i=1}^{m}\tilde{G}_i\tilde{d}_i^n \qquad (2-21)$$

여기서 $\tilde{G}_i$는 변위함수의 미분항으로 표시된다.

따라서 변형률은 다음과 같이 된다.

$$\tilde{\varepsilon}_n=\sum_{i=1}^{m}[\tilde{B}_{Li}^n+\frac{1}{2}\tilde{B}_{NLi}^n]\tilde{d}_i^n \qquad (2-22)$$

여기서 $\tilde{B}_{NLi}^n=\tilde{A}_\theta^n\tilde{G}_i$ (2-23)

가상변위에 대한 가상변형률은 다음과 같이 된다.

$$\delta\tilde{\varepsilon}^n=\delta\tilde{\varepsilon}_L^n+\tilde{A}_\theta^n\delta\tilde{\theta}^n=\sum_{i=1}^{m}\tilde{B}_i^n\delta\tilde{d}_i \qquad (2-24)$$

여기서 $\tilde{B}_i^n=\tilde{B}_{Li}+\tilde{B}_{NLi}^n$ (2-45)

3. 동적해석

동하중을 받는 구조물의 임의시각 t_n에서의 운동평형방정식은 다음과 같다.

$$\tilde{M}\ddot{\tilde{d}}^n+\tilde{C}\dot{\tilde{d}}^n+\tilde{P}^n=\tilde{f}^n \qquad (3-1)$$

질량행렬은 집중질량행렬을 사용하고 감쇠행렬은 질량행렬과 강성도행렬에 비례한다고 가정하는 레일레이(Rayleigh) 감쇠를 사용하였다.[10)]

Table 2. 1 Matrices used in a total Lagranglan formulation

Variables	Plane stress/strain	Axisymmetric
$\tilde{J}_D^n$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial x_n}{\partial x} & \frac{\partial x_n}{\partial y}\\ \frac{\partial y_n}{\partial x} & \frac{\partial y_n}{\partial y}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial r_n}{\partial r} & \frac{\partial r_n}{\partial z}\\ \frac{\partial z_n}{\partial r} & \frac{\partial z_n}{\partial z}\end{bmatrix}$
$\tilde{A}_\theta^n$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial u_n}{\partial x} & \frac{\partial u_n}{\partial x} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial u_n}{\partial y} & \frac{\partial u_n}{\partial y}\\ \frac{\partial u_n}{\partial y} & \frac{\partial u_n}{\partial y} & \frac{\partial u_n}{\partial x} & \frac{\partial v_n}{\partial x}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial u_n}{\partial r} & \frac{\partial w_n}{\partial r} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial u_n}{\partial z} & \frac{\partial w_n}{\partial z} & 0\\ \frac{\partial u_n}{\partial z} & \frac{\partial w_n}{\partial z} & \frac{\partial u_n}{\partial r} & \frac{\partial w_n}{\partial r} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{u_n}{r}\end{bmatrix}$
$\tilde{\theta}^n$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial u_n}{\partial x} & 0 & \frac{\partial u_n}{\partial x}\\ \frac{\partial v_n}{\partial x} & 0 & \frac{\partial v_n}{\partial x}\\ 0 & \frac{\partial u_n}{\partial y} & \frac{\partial u_n}{\partial y}\\ 0 & \frac{\partial v_n}{\partial y} & \frac{\partial v_n}{\partial y}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}\frac{\partial u_n}{\partial r} & 0 & \frac{\partial u_n}{\partial r} & 0\\ \frac{\partial w_n}{\partial r} & 0 & \frac{\partial w_n}{\partial r} & 0\\ 0 & \frac{\partial u_n}{\partial z} & \frac{\partial w_n}{\partial z} & 0\\ 0 & \frac{\partial w_n}{\partial z} & \frac{\partial w_n}{\partial z} & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_n}{r}\end{bmatrix}$

시각 t_n에서의 가속도와 속도는 중심차분법을 이용하면 다음과 같이 된다.

$$\ddot{\tilde{d}}^n \doteqdot \tilde{a}^n = \frac{1}{(\Delta t)^2}\{\tilde{d}^{n+1} - 2\tilde{d}^n + \tilde{d}^{n-1}\} \quad (3-2)$$

$$\dot{\tilde{d}}^n \doteqdot \tilde{v}^n = \frac{1}{2\Delta t}\{\tilde{d}^{n+1} - \tilde{d}^{n-1}\} \quad (3-3)$$

식(3-2)와 식(3-3)을, 식(3-1)에 대입하여 정리하면 변위는 다음과 같이 된다.

$$\tilde{d}^{n+1} = [\tilde{M} + \frac{\Delta t}{2}\tilde{C}]^{-1}\{(\Delta t)^2\{-\tilde{P}^n + \tilde{f}^n\} + 2\tilde{M}\tilde{d}^n - [\tilde{M} - \frac{\Delta t}{2}\tilde{C}]\tilde{d}^{n-1} \quad (3-4)$$

시간적분을 수행하기 전에 초기조건 $\tilde{d}(0-\Delta t)$를 설정하고, 첫 단계의 절점변위는 다음과 같이 된다.

$$\tilde{d}^1 = \frac{(\Delta t)^2}{2m}\{-\tilde{P}^0 + \tilde{f}^0\} + \tilde{d}^0 + (1 - \frac{C}{2m})\Delta t\,\dot{\tilde{d}}^0 \quad (3-5)$$

한계시간간격문제에 있어서는 Hughes et al[22]이 중심차분법에서 다음 식을 제안하였다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max}} \quad (3-6)$$

여기서 w_{max}는 계의 최대 진동수이다.

그러나 요소수가 대단히 많을 경우에 각 유한요소의 최대진동수를 구하는 것은 매우 복잡하므로 일반적으로는 다음과 같은 근사식을 이용한다.

$$\Delta t \leq \mu L\left[\frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-7)$$

여기서 μ는 사용하는 요소에 따른 계수이고, L은 절점사이의 최소 거리이다.[12]

4. 프로그램 검증

본 연구에서 작성한 VISDYN 프로그램의 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 4.1과 같은 등분포 단계하중을 받는 축대칭 구형 쉘[5) 11)]의 동적응답을 조사하였다. 이 쉘은 프로그램의 검증이 목적이므로 Bathe et. al[11]의 모델을 그대로 사용하였으며 재료특성과 하중도 동일하게 취급하였다. 요소도 Fig. 4.2와 같이 8절점 등매개변수 요소 10개로 분할하였다.

Fig. 4.3은 쉘의 크라운부 A점의 수직처짐을 나타낸 것으로 탄성해석 결과는 Bathe et. al[11]의 결과와 잘 일치하였다. 탄점소성 미소변위는 Owen et. al[5]의 결과와 일치하였다. 또 탄점소성 동적해석에 기하학적 비선형을 포함시킨 결과는 다른 문헌에서 찾아볼 수 없으나 VISDYN으로 처리한 결과, 주기와 점소성 영구변형의 발생을 고려할 때 올바른 응답이라 판단된다.

Fig. 4.4는 B점의 수직변위와 수평변위를 나타낸 것이고 Fig. 4.5는 해석시간 동안 쉘의 변

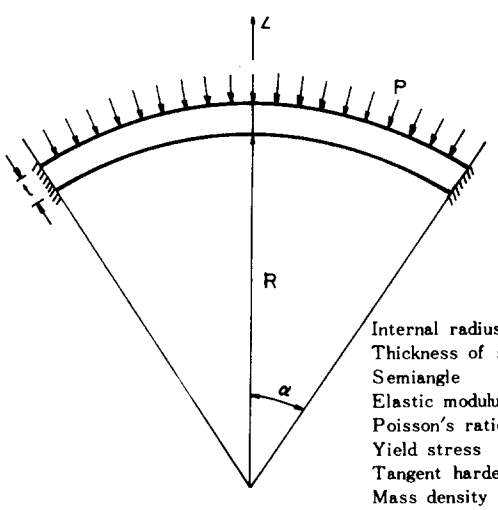
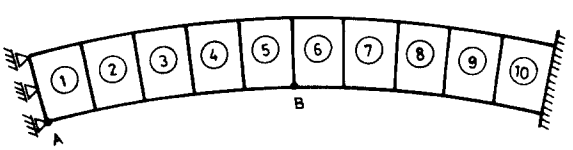
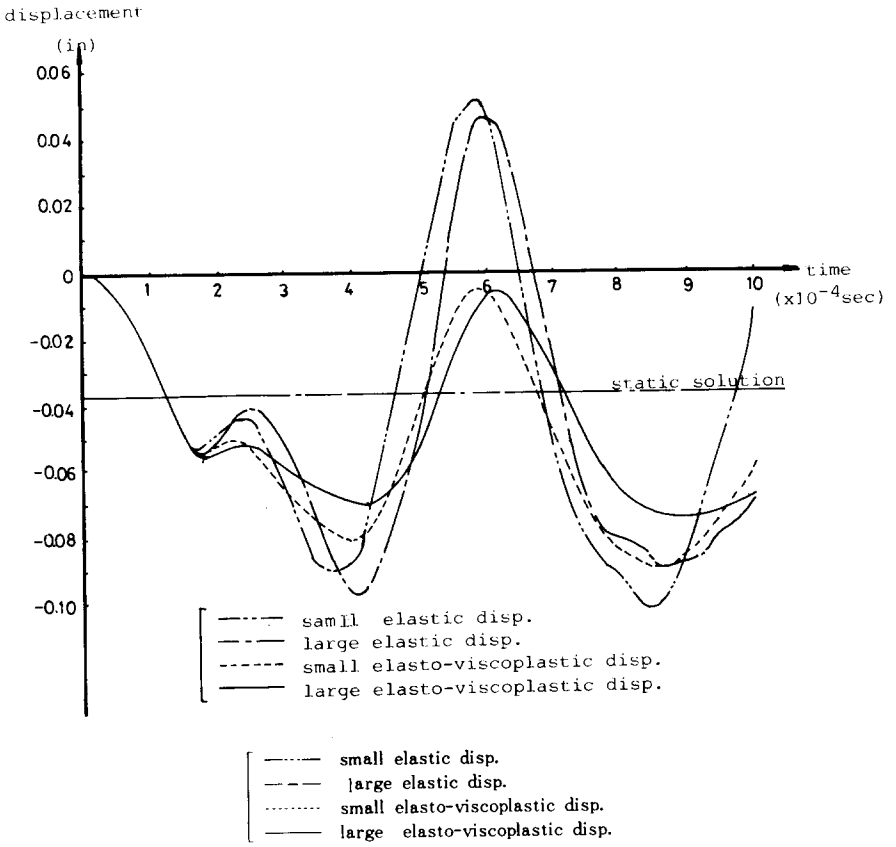


Fig. 4. 1 Spherical shell



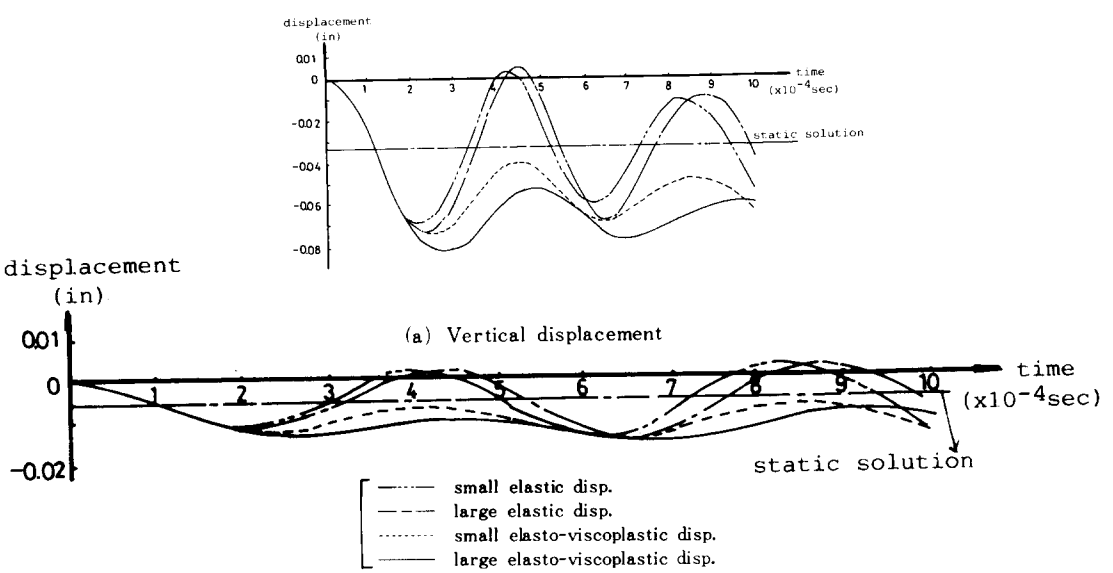
Internal radius	R = 22.27in
Thickness of shell	t = 0.41in
Semiangle	α = 26.67°
Elastic modulus	E = 10.5×10⁶ psi
Poisson's ratio	ν = 0.3
Yield stress	σ_Y = 0.024×10⁶ psi
Tangent hardening modulus	E_T = 0.21×10⁶ psi
Mass density	ρ = 2.45×10⁻⁴ lb-sec²/in⁴

Fig. 4. 2 Finite element mesh



small elastic disp.
large elastic disp.
small elasto-viscoplastic disp.
large elasto-viscoplastic disp.

Fig. 4. 3 Vertical displacement at A



(b) Horizontal displacement

Fig. 4. 4 Displacement at B

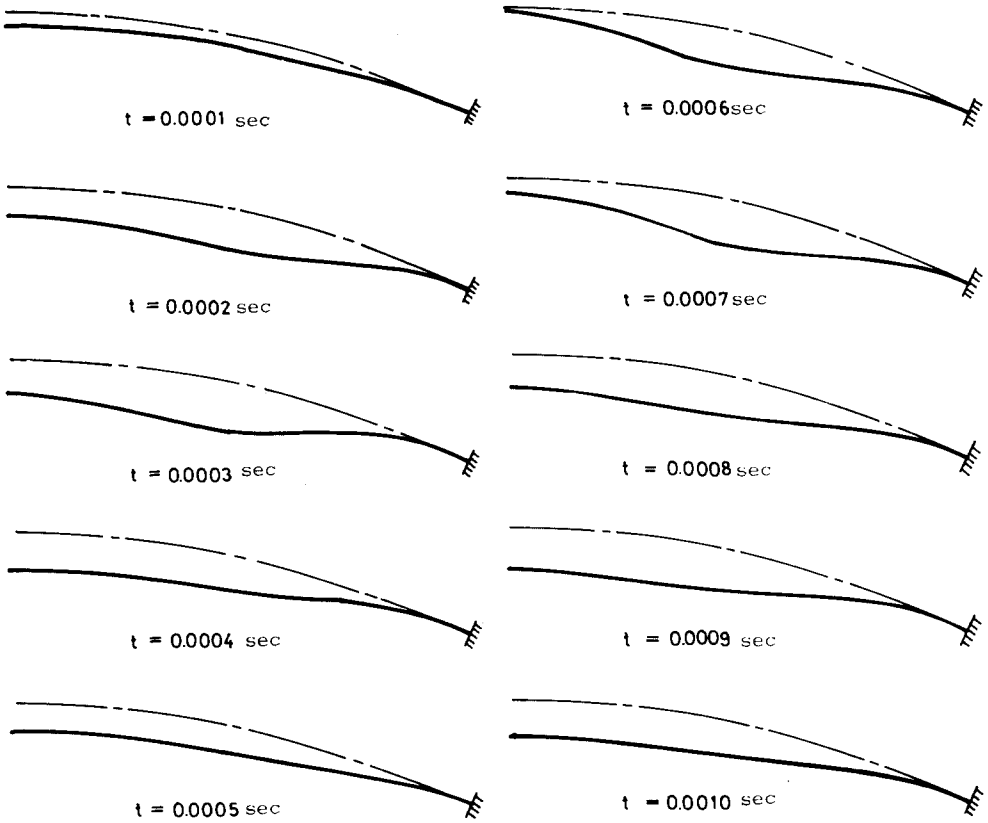


Fig. 4.5 Deformation of spherical shell

형 형상을 각 시간 단계별로 도시한 것이다.

이상과 같이 본 연구에서 개발한 프로그램 VISDYN은 일반 탄점소성체의 기하학적 비선형성을 고려한 동적해석에 적절한 프로그램임을 확인할 수 있었다.

5. 지하저장공동의 수치 예

수치예로서 Damjanic et, al.[16] 의 지하저장공동 모델을 이용하였다.

Fig. 5.1은 공동을 포함한 지반을 축대칭문제로 가정하여 (a)는 상반부 굴착의 경우, (b)는 전체 굴착 후의 요소분할과 재료성질을 나타낸 것이다.

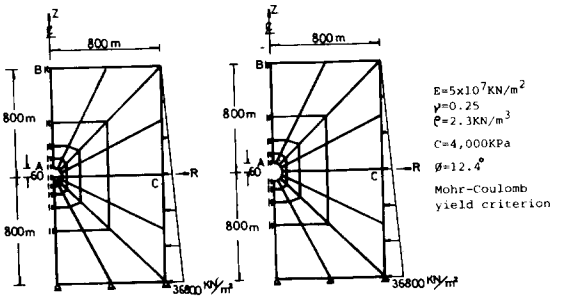
기하학적 비선형을 포함한 탄점소성 정적 해석 결과의 변위와 응력을 동하중이 작용하기 전의 초기치로 입력하였다.

동하중은 최대 0.33g의 El Centro 지진가속도를 연직방향으로 가하였다.

Fig. 5.2는 공동의 상반부만 굴착했을 경우 점A와 점B의 수직변위를 나타낸 것으로 정적해석시의 안정상태 여부는 동적해석에서는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.3은 공동을 완전히 굴착한 후의 경우로 Fig. 5.2와 별 차이가 없었다. 또 공동에 원유를 저장한 경우도 비어 있을 때와 변위의 차이가 없음을 알 수 있다. 여기서 주목할 것은, 탄·점소성 정적해석에서 안정상태에 도달했을 때 점A의 수직변위는 20cm, 점B의 수직변위는 25cm이나 동하중이 작용할 경우 변위에 대한 진폭을 고려해야 한다는 것이다.

Fig. 5.4는 점C의 수평방향 변위를 나타낸 것으로 정적해석의 값은 실제거동을 제어할 수 없음을 알 수 있다.

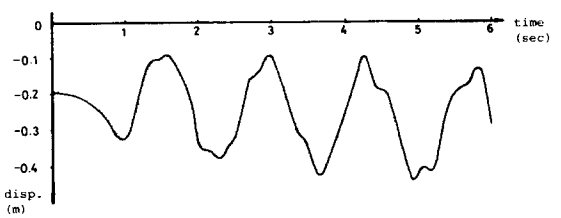


(a) Excavation of the upper portion

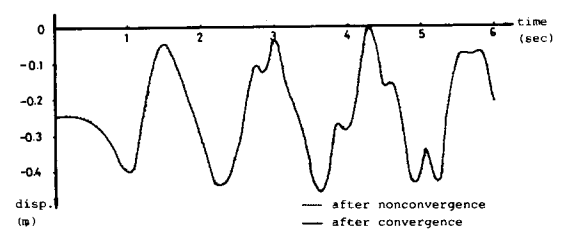
(b) Excavation of the full portion

$E = 5 \times 10^7 KN/m^2$
$\nu = 0.25$
$\rho = 2.3 KN/m^3$
$C = 4.000 KPa$
$\phi = 12.4°$
Mohr-Coulomb yield criterion

Fig. 5.1 Finite Element Idealization

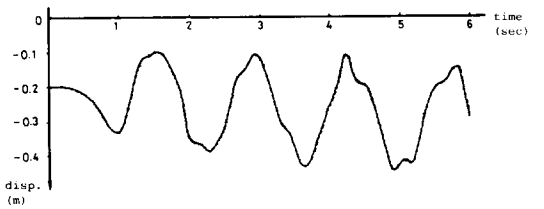


(a) At point A

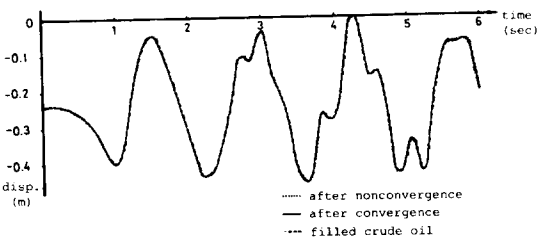


(b) At point B

Fig. 5.2 Vertical displacement (upper portion excavation)



(a) At point A



(b) At point B

Fig. 5.3 Vertical displacement (full excavation)

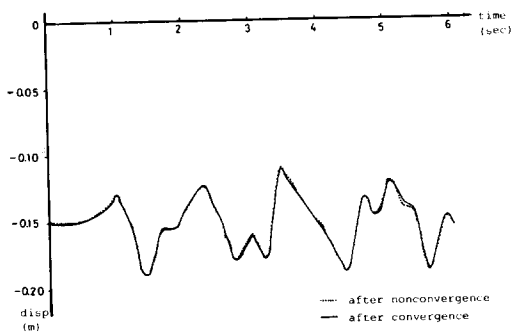


Fig. 5.4 Radial displacement at point C

6. 결 론

석유비축을 위한 지하저장공동의 동적인 변위응답을 구하기 위하여 프로그램 VISDYN 을 개발하여 그 유효성을 확인하였다. 지반을 Mohr-Coulomb 항복기준과 결합유동법칙에 지배되는 탄·점소성체로 가정하였고 기하학적 비선형 효과도 고려하였다. 공동을 굴착한 후 지반이 안정상태에 도달한 후의 변위와 굴착 직후의 변위는 동적인 변위응답에서는 차이가 거의

없음을 알 수 있었다.

본 프로그램은 굴착단계별 응답을 구하는 데에도 유효하게 이용될 수 있을 것이다.

감사의 말

본 연구는 1986년도 문교부 자유과제 학술연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Jansson, G. and Soderberg, L. ; "Obstacles to subsurface storage of oil experience of problems and obstacles to subsurface storage encountered in various countries" Proceedings of the International Symposium (Rockstore '80) Vol. 1, Pergamon Press, pp. 59-62 (1 9 8 0).
2. 이광범, 안영기 "지하공간과 인간" 지하공간 제 1 호 pp 6-22 (1987).
3. 奥村敏恵外："地下貯油施設技術指針(案)," 日本土木学会 pp. 1-99 (1980).
4. 奥村敏恵外："岩盤タンクの安全確保に関する調査報告書" 日本土木学会, 危険物保安技術協会, pp 1-201 (1986).
5. Owen, D. R. J. and Hinton, E. ; "Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice," Pineridge Press Limited, pp. 215-463, (1980).
6. Bingham, E. C. ; "Fluidity and Plasticity" McGraw-Hill. pp. 215-218 (1922).
7. Perzyna, P. ; "Fundamental problems in viscoplasticity", Advan, Appl. Mech., 9 pp. 243-377 (1966).
8. Zienkiewicz, O. C. and Cormeau, I. C. ; "Visco-plasticity-plasticity and creep in elastic solids -a unified numerical solution approach," Int. J. Num. Meth. Engng. 8, pp 821-845 (1974).
9. 구자욱, 진치섭, 김수석, "유한요소법에 의한 터널의 2차원 탄·점소성해석" 부산대학교 공과대학 연구보고 제30집 pp. 141-152, (1985).
10. Nagarajan, S. and Popov, E. P. "Elastic-Plastic dynamic Analysis of axisymmetric solid," Computers and Structures, Vol. 4. pp. 1117-1134 (1974).
11. Bathe, K. J. and Ozdemir, H. ; "Elasto-Plastic large deformation static and dynamic Analysis," Computers and Structures, Vol. 6, pp. 81-92 (1976).
12. Bicanic, N. ; "Nonlinear Finite Element transient response of concrete structures," Ph. D. Thesis, University College of Swansea (1978)
13. Kuriyagawa, M., Matsunaga, I., Kinoshita, N., and Hibi, K. ; "Rock Behavior of underground cavern with the storage of Cryogenic liquified-gas", Proceedings of the International Symposium (Rockstore '80) Vol. 2. Pergamon Press pp. 665-671 (1980).
14. Komada, H., Nakagawa, K., Kitahara, Y. and Hayashi, M. ; "Study on seepage flow through rock mass Surrounding Caverns for Petroleum Storage", Proceedings of the International Symposium (Rockstore '80) Vol. 1, Pergamon Press pp. 303-310 (1980).
15. 정형식, 선 용, 김운영, "지하유류비축 공동의 수밀성에 관한 연구" 대한토목학회 논문집 제 2 권 제 4 호 pp. 33-38 (1982).
16. Damjanic, F. and Owen D. R. J. ; "Implicit time integration of Elastoviscoplastic Solids subject to the Mohr-Coulomb Yield Criterion" Int. J. Num. Meth. Engng. 18, pp. 1873-1881 (1982).
17. Coyette, J. P. and Guisset, P. ; "Elasto-Plastic Analysis of Underground Excavation Process by the Finite Element Method," Large Rock Caverns (edited by Saari, K.) Pergamon Press, pp. 1223-1234 (1986).
18. Howells, D. A. "Dynamics of Large Caverns," Large Rock Caverns (edited by Saari, K.) Pergamon Press pp. 1275-1279 (1986).
19. Zienkiewicz, O. C., Owen, D. R. J. and Cormeau, I. C. ; "Analysis of viscoplastic effects in pressure vessels by the finite element method," Nuclear Eng. and Design, 28, pp. 278-288 (1874).
20. Kanchi, M. B., Zienkiewicz, O. C. and Owen, D. R. J., ; "The viscoplastic approach to problems of elasticity and creep involving geometric nonlinear effects," Int. J. Num. Meth. Engng., 12, 169-181 (1978).

21. Gurtin, M. E.; "The Linear Theory of Elasticity", in Mechanics of Solid Vol Ⅱ, Springer-Verlag, pp. 1-295 (1972).
22. Hughes, T. J. R. and Liu, W. K., "Implicit/explicit Finite Elements in Transient Analysis ; Stability Theory", J. Appl. Mech., 45, 371-374 (1978).

(접수일자. 1989. 3. 14)