

유한요소-경계요소 조합에 의한
3차원 유체저장 구조물의 주파수 응답 해석
Three Dimesional Analysis of Liquid Storage Tanks
Using FE-BE Coupling Method in Frequency Domain

김문겸* 임윤목** 조성용*** 조경환****
Kim, Moon Kyum Lim, Yun Mook Cho, Sung Yong Cho, Kyoung Hwaan

Abstract

To predict the dynamic behavior of the cylindrical liquid storage tank subjected to seismic ground motion, three dimensional analysis with liquid-structure interaction must be performed. In this study, a three dimensional dynamic analysis method over the frequency domain using FE-BE coupling technique, which combines the efficiency of the boundary elements for liquid with the versatility of the finite shell elements for tank.

The liquid region is modeled using boundary elements which can counter the sloshing effect at free surface, and the structure region, the tank itself, is modeled using the degenerated finite shell elements. At the beginning of the procedure, the equivalent mass matrix of the liquid is generated by boundary elements procedure. Then this equivalent mass matrix is combined with the mass matrix of the structure to produce the global mass matrix in the equation of the motion of fluid-structure interaction problem.

In order to demonstrate the accuracy and validity of the developed method, the numerical results are compared with the previous studies. Finally, the effects of the fluid-structure interaction on the natural frequency and dynamic response of the system are analyzed

1. 서 론

최근 한반도에서 지진이 빈번하게 발생함에 따라 국내에서도 구조물의 내진해석에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 지진에 의해 석유, 액화가스 등을 저장하는 탱크에 발생한 손상은 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 환경파괴, 인명피해와 같은 재해를 야기시킨다. 따라서 지진과 같이 방향성이 있는 하중에 대한 유체저장 구조물의 거동을 정확하게 파악할 수 있는 3차원 해석기법의 개발 필요성이 요구되고있다.

본 연구에서는 유체영역은 자유수면 슬러싱 (sloshing) 의 영향을 고려한 3차원 경계요소로, 구조물영역은 유한요소로 모형화하였고 유체와 구조물이 접하고 있는 경계면의 적합조건과 평형조건을 만족시킴으로서 유한요소와 경계요소를 조합하였다. 이를 통해 원통형 유체저장 구조물

* 연세대학교 교수, 정회원
** 연세대학교 조교수
*** 연세대학교 박사과정
**** 연세대학교 석사과정

의 동적 거동을 주파수 영역에서 3차원 해석할 수 있는 기법을 개발하였다.

개발된 해석기법을 통해 유체-구조물 상호작용에 의한 동적 응답 특성 변화를 살펴보고 유체 저장 구조물의 주요인자들에 대한 민감도 분석을 통해 유체저장 구조물의 동적특성을 고찰하였다. 또한 El Centro 지진기록을 지반가속도로 이용하여 지진해석을 실시하여 지진하중의 적용성을 살펴보았다.

2. 유체-구조물 상호작용의 모형화

지반에 강결된 유체저장 구조물을 유체 영역과 구조물 영역으로 분리한 후 구조물 내부의 유체는 이상유체로 가정하여 3차원 경계요소로 모형화하고 구조물은 등방, 균질, 탄성거동을 하는 것으로 가정하여 3차원 쉘 유한요소로 모형화한다. 개발된 경계요소와 유한요소를 유체 영역과 구조물 영역의 접합면 경계 조건식을 이용하여 조합하므로써 유체저장 구조물의 지반운동에 대한 응답특성을 주파수영역에서 해석한다.

2.1 경계요소를 이용한 이상유체의 모형화

구조물 내의 유체를 비점성, 비압축성, 비회전 운동을 하는 이상유체로 가정하였으므로 속도 포텐셜 함수 ($\Phi(x,t)$) 를 도입하여 다음과 같은 Laplace 방정식의 형태로 유체의 운동을 표현할 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi(x,t) = 0 \quad (1)$$

여기서 $x = (x,y,z)$ 는 위치벡터이다.

이와 같이 정의되는 유체의 운동을 경계요소법으로 모형화하기 위해 유체영역에서의 경계조건을 유도한다. 그림 2.1 과 같은 형태의 원통형 유체저장 구조물에서 자유수면과 구조물과 접하는 면에서의 경계조건은 다음과 같다.

(1) 자유수면의 동역학적 경계조건

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} + g\eta(x,y,t) = 0 \quad \text{on } S_1 \quad (2)$$

(2) 자유수면의 운동학적 경계조건

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial z} = \frac{\partial \eta(x,y,t)}{\partial t} \quad \text{on } S_1 \quad (3)$$

(3) 유체와 구조물 바닥이 접하는 면에서의 경계조건

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_3 \quad (4)$$

(4) 유체와 구조물 벽체가 접하는 면에서의 경계조건

$$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial n} = v_n(t) \quad \text{on } S_2 \quad (5)$$

(5) 구조물의 벽면에 작용하는 유체동압력

$$P(x,t) = -\rho \frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} \quad \text{on } S_2 \quad (6)$$

여기서 $\eta(x,y,t)$ 는 자유수면의 평형 상태로부터의 높이이고, $v_n(t)$ 는 구조물 벽체의 법선방향 절대속도성분이다.

유체의 운동을 모형화하기 위해 경계요소 해석기법을 이용하여 식 (2) 의 Laplace 방정식을 풀면 식 (7) 과 같은 이산화된 경계적분 방정식을 얻을 수가 있다.

$$[H]\{\phi\} = [G]\{q\} \quad (7)$$

여기서 $[H]$, $[G]$ 는 각각 포텐셜 벡터와 유동률 벡터에 대한 경계요소 계수행렬이며 $\{q\}$ 는 유동률 벡터이다.

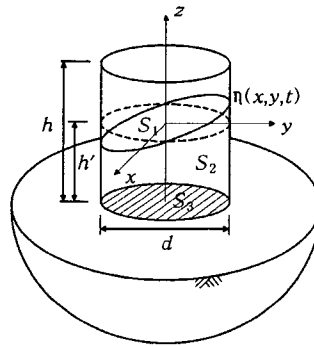


그림 1 유체와 구조물 접촉면에서의 경계조건

2.2 원통형 구조물의 유한요소 정식화

D'Alembert 의 원리에 의한 가상일의 법칙을 통해 유도된 물체의 운동방정식을 감쇠점 셀 요소로 이산화하면 다음과 같은 식 (8) 의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (8)$$

이 때 물체의 관성력에 관계된 질량행렬 $[M]$ 은 조화질량을 이용하여 모형화하고 구조물의 감쇠현상에 관계된 감쇠행렬 $[C]$ 는 Rayleigh 감쇠를 이용해 근사적으로 나타낸다.

주파수 영역에서의 해석을 위해서 식 (8) 을 시간변수에 대해 Fourier 변환을 수행하면 시간의 함수인 하중벡터, $\{f\}$ 및 변위벡터, $\{u\}$ 는 식 (9) 와 같이 표현된다.

$$\{u(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{u}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (9.a)$$

$$\{f(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{\bar{f}(t)\} \exp\{-i\omega t\} dt \quad (9.b)$$

그러므로 식 (8) 은 식 (10) 와 같이 주파수영역에서의 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[S(\omega)]\{u(\omega)\} = \{f(\omega)\} \quad (10)$$

여기서 $[S(\omega)]$ 는 임피던스행렬로서 식 (11) 과 같이 표현되는 동적강성행렬을 나타낸다.

$$[S(\omega)] = [K] + i\omega[C] - \omega^2[M] \quad (11)$$

여기서 $[K]$ 는 정적 강성행렬을 나타낸다.

일반화된 하중 행렬 $\{f(\omega)\}$ 는 유체-구조물의 상호작용계에 적용될 경우, 식 (12) 과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\{f(\omega)\} = \{f(\omega)_e\} + \{f(\omega)_p\} \quad (12)$$

여기서 $\{f(\omega)_e\}$ 는 외부에서 작용하는 절점하중을 나타내며 $\{f(\omega)_p\}$ 는 유체의 슬러싱을 통해 발생한 유체동압력에 의한 절점하중이다.

2.3 유체-구조물 상호작용의 해석

유한요소와 경계요소는 기본변수의 형식이 일치하지 않으므로 경계요소의 계방정식을 유한요소의 계방정식 형태로 변환할 필요가 있다. 먼저 식 (7) 과 같은 경계요소의 계방정식을 식 (13) 와 같은 주파수영역 계방정식으로 변환한다.

$$[H]\{P_k\} = \omega^2\rho[G]\{u_k\} \quad (13)$$

여기서 $\{P_k\}$ 는 절점에서의 법선방향 압력성분을 나타내며 u_k 는 절점에서의 변위를 나타낸다

식 (13) 의 경계요소 계방정식에 유체영역의 경계조건을 적용하기 위해서는 유체의 절점을 자유수면상의 절점과 구조물과 접하고 있는 절점으로 분리해야 한다. 또한 구조물과 접하고 있는 유체의 절점은 벽체의 절점과 바닥면의 절점으로 분리해야 한다. 이렇게 분리된 절점에 대해 주파수 영역의 계방정식 식 (13) 을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_{TT} & H_{TF} & H_{TS} \\ H_{FT} & H_{FF} & H_{FB} \\ H_{BT} & H_{BF} & H_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_T \\ P_F \\ P_B \end{Bmatrix} = \omega^2\rho \begin{bmatrix} G_{TT} & G_{TF} & G_{TS} \\ G_{FT} & G_{FF} & G_{FB} \\ G_{BT} & G_{BF} & G_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_T \\ u_F \\ u_B \end{Bmatrix} \quad (14)$$

여기서 아래첨자 T 는 구조물 벽면과 유체가 접하고 있는 절점을 의미하고 F 는 자유수면상의 절점을 의미한다. 그리고 B 는 구조물 바닥과 유체가 접하고 있는 절점을 의미한다.

식 (14) 에 식 (2) 에서 식 (6) 의 유체영역 경계조건을 적용하고 구조물 벽체에 대한 유체동압력 항인 $\{P_T\}$ 에 대해서 정리하면 식 (15) 를 얻을 수 있다.

$$\{P_T\} = \omega^2\rho [B_I]^{-1}[B_{II}]\{u_T\} \quad (15)$$

여기서 $[B_I]$ 과 $[B_{II}]$ 는 다음과 같다.

$$[B_I] = [\hat{H}_{TT}] + \omega^2 [\hat{G}_{TF}][D]^{-1}[\hat{H}_{FT}] - g[\hat{H}_{TF}][D]^{-1}[\hat{H}_{FT}] \quad (16)$$

$$[B_{II}] = [\hat{G}_{TT}] + \omega^2 [\hat{G}_{TF}][D]^{-1}[\hat{G}_{FT}] - g[\hat{H}_{TF}][D]^{-1}[\hat{G}_{FT}] \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \hat{H}_{TT} &= H_{TT} - H_{TB}H_{BB}^{-1}H_{BT} & \hat{H}_{TF} &= H_{TB} - H_{TB}H_{BB}^{-1}H_{BF} \\ \hat{H}_{FT} &= H_{FT} - H_{FB}H_{BB}^{-1}H_{BT} & \hat{H}_{FF} &= H_{FF} - H_{FB}H_{BB}^{-1}H_{BF} \\ \hat{G}_{TT} &= G_{TT} - H_{TB}H_{BB}^{-1}G_{BT} & \hat{G}_{TF} &= G_{TF} - H_{TB}H_{BB}^{-1}G_{BF} \\ \hat{G}_{FT} &= G_{FT} - H_{FB}H_{BB}^{-1}G_{BT} & \hat{G}_{FF} &= G_{FF} - H_{FB}H_{BB}^{-1}G_{BF} \end{aligned} \quad (18)$$

$$[D] = g[\hat{H}_{TT}] - \omega^2[\hat{G}_{FF}] \quad (19)$$

식 (15)의 압력성분을 식 (12)에서 볼 수 있는 유한요소 절점하중의 형태로 변형시키기 위해 유한요소의 이산화에 사용된 형상함수, $[N]$ 을 도입하고 정리하면 식 (20)과 같은 유한요소 형태의 계방정식으로 얻을 수 있다.

$$[S^{BE}]\{u_T^{BE}\} = \{f(\omega)_p\} \quad (20)$$

여기서

$$[S^{BE}] = \omega^2 \rho [N][B_I]^{-1}[B_{II}] \quad (21)$$

$$\{f(\omega)_p\} = [N]\{P_k\} \quad (22)$$

이 때, 경계요소 해석의 경우 이산화과정과 병치과정, 그리고 기본해를 사용하는 과정으로 인해 식 (21)에 나타난 강성도행렬이 대칭이 되지 않는다. 따라서 대칭인 강성도행렬을 가지고 있는 유한요소와의 조합을 위해서 에너지 접근방법을 이용하여 비대칭 행렬로 나타나는 $[S^{BE}]$ 를 대칭화 시킨 후 경계요소와 유한요소의 접합면에서 변위와 표면력이 연속적이라는 조건을 이용하여 유한요소와 경계요소를 조합한다

3. 유체저장 구조물의 수치해석

본 장에서는 개발된 해석 기법을 이용하여 여러 가지 형태의 원통형 유체저장 구조물의 거동을 해석한다. 적용에 앞서 3차원 유한요소-경계요소 조합해석 기법의 타당성을 검증하기 위해 Haroun 과 Housner^{[1][2]}의 축대칭 요소를 이용한 고유치 해석결과와 비교·검토한다. 검증된 해석 기법을 이용하여 주요인자들의 변화에 따른 구조물의 거동 변화를 고유진동수를 통해 고찰한다. 또한 El Centro 지진 기록을 이용하여 지진 하중에 대한 원통형 구조물의 응답을 고찰한다.

3.1 기존 해석결과와의 비교

개발된 해석기법의 타당성을 검증하기 위해 Haroun 과 Housner의 축대칭 요소를 이용한 해석결과와 비교하였다. 이를 위해 유체저장 구조물의 제원과 물성치는 Haroun 과 Housner가 제시한 것과 동일한 것을 사용하였다. 이 때, 축대칭 요소로 비축대칭 거동을 해석하기 위해서는 원통형 구조물의 원주방향 변형은 $\cos n\theta$ 와 같은 삼각함수의 형태로 가정하고 축방향 변형은 캔틸레버 보의 형태로 가정해야 하므로 3차원 해석결과와는 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 축대칭 해석결과중 6개의 원주방향 변형 형태에 대한 축방향 1차모드의 고유진동수와 3차원 해석결과중 모드 형상이 이와 일치하는 모드의 고유진동수를 비교하였다.

(1) 넓은 탱크 (broad tank) 에 대한 해석결과

해석에 사용된 넓은 탱크의 제원은 다음과 같다. 탱크 반경 r 은 18.30m 이고 탱크의 높이 h 는 12.20m 이며 탱크 두께 t 는 0.0254m 이다 그리고 탱크 내부에 저장된 유체의 높이는 12.20m 로 하였다. 탱크 벽체의 물성치는 다음과 같다. 탄성계수 E 는 206.80 GPa; 포아송 비 ν 는 0.30; 구조물의 밀도 ρ_s 는 7840.00 kg/m^3 ; 유체의 밀도 ρ_w 는 1005.00 kg/m^3 이다. 해석대상은 원주방향으로 32개 축방향으로 3개의 유한요소와 경계요소를 사용하여 모형화되었다.

표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 개발된 3차원 해석결과와 기존의 축대칭 해석결과가 최대오

차가 1.80% 정도로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 2 에서는 원주방향 변형 형태는 $\cos \theta$ 이고 축방향 모드는 1차인 축대칭 기본 모드에서의 유체동압력의 분포와 이에 상응하는 3차원 유체동압력의 분포가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

(2) 높은 탱크 (tall tank) 에 대한 해석결과

높은 탱크의 경우 해석에 사용된 물성치는 넓은 탱크의 경우와 동일하며 제원은 다음과 같다. 탱크 벽체의 반경 r 은 7.32m 이고 탱크의 높이 h 는 21.96m 이며 탱크 두께 t 는 0.0109m 이고 탱크 내부의 유체높이는 21.96m 이다. 해석대상의 모형화에는 원주방향으로 16개의 요소, 축방향으로 6개의 요소가 사용되었다. 해석 결과, 그림 3 과 표 2 에 제시한 것과 같이 3차원 해석결과와 축대칭 해석결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

표 1 넓은 탱크의 3차원 해석과 축대칭 해석결과의 비교

3차원 모드번호	3차원 해석 결과(rps)	축대칭 해석 결과(rps)	원주방향 변형 형태	오차(%)
9	14.13	13.88	$\cos 6\theta$	-1.80
11	17.05	16.90	$\cos 5\theta$	-0.89
14	20.93	20.79	$\cos 4\theta$	-0.67
16	26.08	26.01	$\cos 3\theta$	-0.27
25	32.59	32.61	$\cos 2\theta$	0.06
31	38.72	38.83	$\cos \theta$	0.28

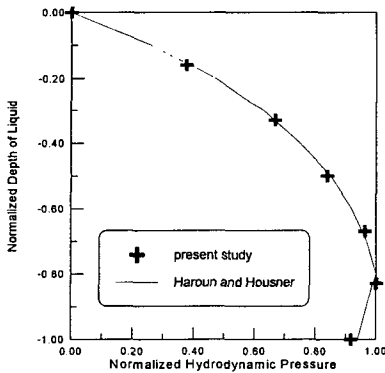


그림 2 넓은 탱크에 작용하는 유체동압력

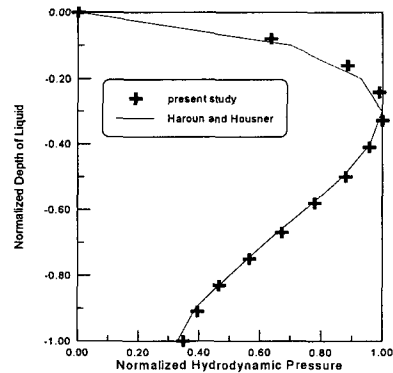


그림 3 높은 탱크에 작용하는 유체동압력

표 2 높은 탱크의 3차원 해석과 축대칭 해석결과의 비교

3차원 모드번호	3차원 해석 결과(rps)	축대칭 해석 결과(rps)	원주방향 변형 형태	오차(%)
1	3.51	3.46	$\cos 5\theta$	-1.65
2	4.02	3.77	$\cos 6\theta$	-6.63
3	4.06	4.08	$\cos 4\theta$	0.42
5	5.92	5.96	$\cos 3\theta$	0.76
7	10.30	10.37	$\cos 2\theta$	0.77
20	22.25	22.35	$\cos \theta$	-0.449

3.2 주요인자 변화를 통한 유체저장 구조물의 거동 특성 파악

(1) 구조물 벽체 두께에 따른 유체저장 구조물의 거동

탱크 벽체의 두께가 유체저장 구조물의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 평택 LNG 인수기지내의 LNG 탱크의 제원을 사용하여 고유치 해석을 수행하였다. 탱크 반경 r 은 29.18m 이고 탱크의 높이 h 는 52.91m 이며 유체의 높이는 31.74m 이다. 탱크의 벽체 두께는 0.0292m, 0.15m, 0.90m, 2.0m, 2.92m 로 변화시키며 해석하였다. 해석에 사용된 물성치는 탄성계수 E 는 39.20 GPa; 포아송 비 ν 는 0.18; 구조물의 밀도 ρ_s 는 2500.00 kg/m^3 ; 유체의 밀도 ρ_w 는 1005.00 kg/m^3 이다. 본 해석대상은 원주방향으로 16개 축방향으로 5개의 요소를 사용하여 모형화하였다.

그림 4 에서 벽체의 두께가 증가할수록 고유진동수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 벽체 두께가 증가함에 따라 전체구조계의 강성이 증가하므로 질량 행렬로 표현되는 유체동압력에 의한 상호작용의 영향이 상대적으로 줄어들기 때문인 것으로 사료된다.

(2) 유체 수심에 따른 유체저장 구조물의 거동

탱크내부에 저장된 유체의 높이가 구조물의 거동에 미치는 영향을 높은 탱크에 대한 고유치 해석을 통해 살펴보았다. 탱크 반경 r 은 7.32m 이고 탱크의 높이 h 는 21.96m 이며 벽체의 두께는 0.0254m 이다. 유체의 수심을 0.00m, 3.66m, 7.32m, 10.98m, 14.64m, 18.30m, 21.96m 등 6 가지 경우로 변화시키며 응답 변화를 해석하였다. 탱크 벽체의 물성치는 높은 탱크의 해석에 사용된 것과 동일하다. 해석대상의 모형화에는 원주방향으로 16개 축방향으로 6개의 요소가 사용되었다.

그림 5 에 나타난 것과 같이 유체의 수심이 깊어질수록 고유진동수가 감소하는 양상을 보이는 것을 알 수가 있다. 예를 들어 10번 모드에 대해서 살펴보면, 빈 탱크일 때 ($h'/h = 0.00$)에는 고유진동수가 61.73 rps 이고 $h'/h = 1.00$ 일 때에는 26.26 rps 로 고유진동수가 57% 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 유체의 높이가 증가할수록 유체의 질량이 증가하므로 질량 행렬의 형태로 고려되는 유체동압력과 유체-구조물 상호작용의 영향이 증가하기 때문이다. 또한, 유체의 높이가 구조물의 높이에 대해 30% 이하가 될 경우 유체의 구조물에 대한 영향이 미소한 것을 볼 수 있다. 따라서 지진시 유체의 높이가 일정수준을 유지하지 않을 경우 유체와 구조물의 상호작용이 구조물의 응답에 큰 영향을 주지 않을 것으로 사료된다.

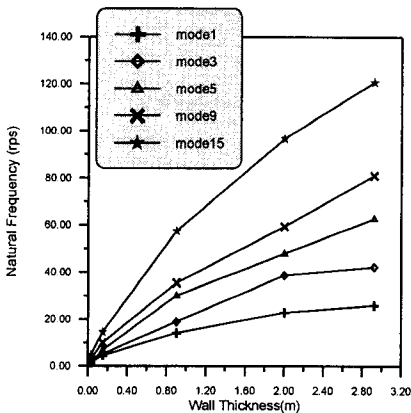


그림 4 벽체 두께에 따른 고유진동수의 변화

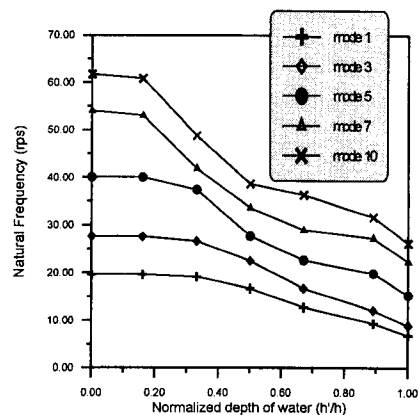


그림 5 유체의 수심에 따른 응답변화

3.3 지진하중에 대한 응답해석

개발된 해석 기법의 지진하중에 대한 적용성을 알아보기 위해서 실제의 지진파 측정 자료를 이용한 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 측정 자료는 1940 년에 측정된 El Centro 지진파의 수평 가속도 (N-S 성분) 를 이용하였고 전체 자료중 그림 6 에 제시한 0 - 12 초까지의 가속도 성분에 대한 구조물의 응답을 해석하였다. 해석시 유체 저장 구조물계의 감쇠율은 2% 로 가정하였다. 해석대상은 3.1 절의 해석에 사용된 넓은 탱크를 이용하였으며 동일한 물성치를 사용하였다.

그림 7 은 x 축에 평행하게 진행되는 지진파에 의한 탱크 최상단부의 $y=0$, $x = 18.30m$ 인 절점에서의 주파수 영역 응답을 역 FFT 과정을 통해 시간이력으로 나타낸 것이다. 이 절점에서의 최대 변위는 2.76 cm 로 해석되었다.

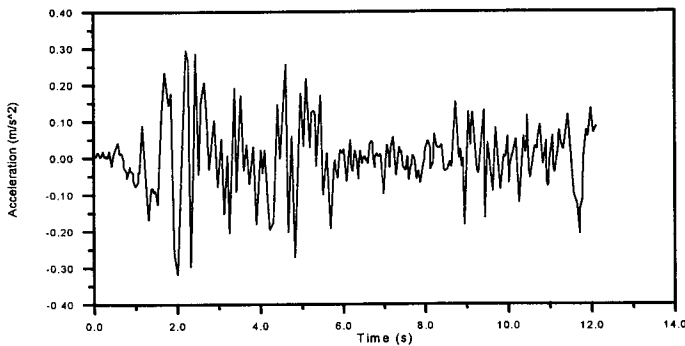


그림 6 El Centro 지진파의 가속도 성분

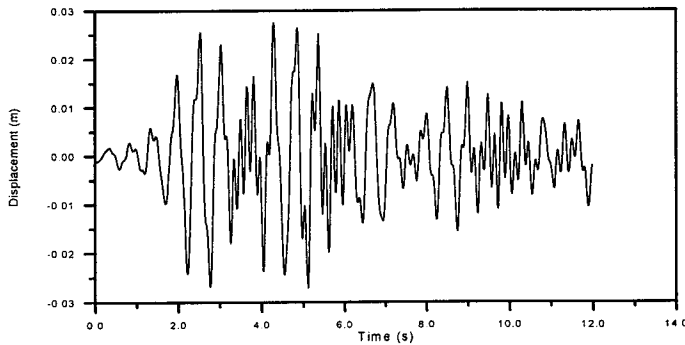


그림 7 El Centro 지진파에 대한 구조물 상단에서의 응답

4. 결론

본 연구에서는 구조물은 유한요소로 모형화하고 유체는 경계요소로 모형화한 후 조합 해석 방법을 이용하여 유체-구조물 상호작용의 영향을 고려하였다. 이를 통하여 원통형 유체저장 구조물의 동적 거동 특성을 파악한 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 개발된 유한요소-경계요소 조합을 이용한 해석기법을 적용하여 유체영역의 내부는 이산화하지 않고 경계만을 이산화하므로서 유체영역의 절점수를 크게 줄여 유체저장 구조물을 효과적으로 해석할 수 있었다.
2. 넓은 탱크와 높은 탱크에 대한 기존의 해석결과와 본 연구에 의한 해석결과를 비교한 결과 최대오차가 각각 1.80% 와 6.63% 정도로 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며 이를 통해 본 연구방법의 타당성을 확인할 수 있었다.
3. 유체저장 구조물의 벽체 두께가 증가하게 되면 구조계의 강성이 증가하게 되고 이로 인해 유체동압력의 구조물에 대한 영향이 상대적으로 감소하게 되므로 질량 행렬의 형태로 유체-구조물 상호작용계의 운동방정식에 추가되는 유체의 영향이 감소하여 고유진동수가 증가하게 됨을 알 수 있었다.
4. 구조물에 저장된 유체의 높이가 증가하게 되면 고유진동수는 감소하게 되는데 이러한 현상은 유체의 질량 증가로 유체동압력이 증가하여 유체와 구조물의 상호작용 효과가 증가하기 때문이며 이러한 상호작용의 효과는 유체가 일정수심 이상일 때 발생한다는 것을 알 수 있었다.
4. 실제 지진파 측정 자료인 El Centro 지진파에 대해 넓은 탱크를 대상으로 해석을 실시한 결과 탱크 최상단부에서의 변위는 2.76 cm 로 산정됨을 알 수 있었다. 또한 개발된 해석 기법을 이용하여 효과적으로 지진 하중에 대한 유체-구조물 상호작용의 해석이 가능할 것으로 사료된다.

5. 참고 문헌

1. Haroun, M.A. and Housner, G.W., "Seismic Design of Liquid Storage Tanks," *Proceedings of the Journal of Technical Councils*, ASCE, Apr., 1981, pp. 191-207.
2. Haroun, M.A. and Housner, G.W., "Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks," *Proceedings of ASCE*, Vol.108, 1982, pp.783-799.
3. Maheri, M. R. and Severn, R. T., "Hydrodynamic Consideration for Seismic Design of Cylindrical Structures," *Civil Engineering Dynamics*, 1991, pp.297-313.
4. Lay, K.S., "Seismic Coupled Modeling of Axisymmetric Tanks Containing Liquid", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.119, 1993, pp.1747-1761.
5. Brebbia, C.A., Telles, J.C.F. and Wrobel, L.C., *Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering*, Springer-Verlag, 1984.