

◎ 論 文

# 유체요소를 이용한 직사각형 유체 저장구조물의 지진해석

金 永 皙\* 金 裁 民\* 田 英 善\*\* 尹 楨 邦\*\*\*

(1992년 3월 9일 접수)

## Seismic Analysis of Rectangular Liquid Storage Structures Using Fluid Elements

Young-Surck Kim\* Jae-Min Kim\* Young-Sun Choun\*\* Chung-Bang Yun\*\*\*

**Key Words :** Liquid Storage Structure(유체 저장구조물), Fluid-Structure Interaction(유체-구조물 상호작용), Response Spectrum Analysis(응답스펙트럼해석), Fluid Element(유체요소), Reduced Integration(감차적분)

### Abstract

In this paper, behavior of rectangular storage structures under earthquake loadings are investigated. Linear sloshing is assumed in this study. The effect of the wall flexibility is considered. Eulerian and Lagrangian approaches are presented. The Eulerian approach is carried out by solving the boundary value problem for the fluid motion. In the Lagrangian approach, the fluid as well as the storage structure is modelled by the finite element method. The fluid region is discretized by using fluid elements. The (1×1)-reduced integration is carried out for constructing the stiffness matrices of the fluid elements. Seismic analysis of the coupled system is carried out by the response spectra method. The numerical results show that the fluid forces on the wall obtained by two approaches are in good agreements. By including the effect of the wall flexibility, the forces due to fluid motion can be increased very significantly.

### 1. 서 론

내부유체와 저장구조물의 상호작용에 관한 연구는 유류저장탱크, 유조선 등을 중심으로 많이 연

구되어 왔다. 초기의 유체 저장구조물의 지진에 대한 거동 해석은 벽면을 유연성이 없는 강체로 가정하고 유체의 동적거동을 구하였다.<sup>1-3)</sup> Housner는 직사각형과 원통형 유체 저장구조물에 대하여 지진에 의해 구조물에 가해지는 유체의 영향

\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\* 한국원자력연구소 구조부 선임연구원

\*\*\* 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

을 평가할 수 있는 방법을 제안했다. 이 방법에서는 유체를 자유표면의 유동에 관한 대류(convective) 성분과 저장구조물의 벽면과 함께 움직이는 충격(impulsive) 성분으로 나누어 해석하였는데, 각 성분을 등가질량으로 모형화하여 지진시 유체가 저장구조물 벽면의 하단에 미치는 전단력과 모멘트를 구하였다.<sup>1,2)</sup> Housner의 결과를 보완하여 Epstein은 저장구조물 벽면에 작용하는 유동압에 의한 전단력과 모멘트를 계산할 수 있는 토표를 제안했다.<sup>4)</sup>

1964년 발생한 알라스카 지진에 의해서 벽면의 유연성을 무시하고 설계한 많은 유체 저장 구조물이 큰 피해를 입었다는 분석이 나온 후, 벽면의 유연성을 고려한 유체-저장구조물의 상호작용에 관한 연구가 많이 수행되어 왔다.<sup>5-8)</sup> 벽면의 유연성을 고려하기 위하여 Veletsos는 유체-저장구조물 상관계를 단자유도계로 가정하여 유동압을 계산하였다.<sup>5)</sup> 원통형 유체 저장구조물의 상호작용을 보다 자세히 고려하기 위하여 Balendra는 벽면과 유체를 유한 요소로 모형화 하였는데, 여기에 사용된 유체요소는 속도포텐셜에 근거한 압력을 절점변수로 갖는다.<sup>6)</sup>

본 논문에서는 직사각형 형태의 유체 저장구조물에 대하여, 벽면의 유연성과 유동의 대류성분까지 고려한, 유체-저장구조물 상관계의 지진에 대한 거동을 다루었다. 저장구조물 내의 유동해석을 위하여는 Lagrangian 기법과 Eulerian 기법의 두 가지 다른 접근 방법이 있다.<sup>9)</sup> Lagrangian 기법에서는 고체나 유체의 운동을 어떤 특정한 입자의 변위를 중심으로 나타내며, Eulerian 기법에서는 유체장의 운동을 특정한 시점과 특정한 공간좌표에서의 속도로 나타낸다. 본 연구에서는 Lagrangian 기법에 의한 구조해석용 유한요소법 전산코드인 ADINA<sup>10)</sup>의 이차원 유체요소를 이용하여, 내부유체를 전단강성이 없는 유체요소들로 모형화하였다. Lagrangian 기법의 유체요소를 사용하여 내부유체의 강성, 유체-저장구조물의 경계면 특성 및 유체의 자유표면을 적절히 모형화 함으로서, 유체-구조물 상호작용을 고려한 저장구조물의 지진에 대한 구조해석을 수행할 수 있으며, 이러한 방법은 구조물의 형상이 복잡한 실제 문제를 해결

하는데 용이하게 적용될 수 있다.

일반적으로 유체가 저장구조물에 미치는 유동압은 크게 대류성분과 충격성분으로 구분할 수 있다. 대류성분은 유체표면의 유동(표면파)에 관련된 유동압으로서 저주파수 성분이며, 충격성분은 저장구조물 벽면의 운동에 관련된 유동압으로서 고주파수 성분이다. 본 연구에서는 Lagrangian 기법의 유체요소의 정확성을 확인하기 위하여, 벽면 유연성이 무시된 강체 벽면(rigid wall)의 유체 저장구조물에 작용하는 유동압의 대류성분과 충격성분을 Lagrangian 기법으로 구한 후, 그 결과를 Housner식에 의한 결과와 비교하였다. 또한 유연한 벽면(flexible wall)의 저장구조물에 대한 유동압도 Lagrangian 기법으로 계산하여 그 결과를 Eulerian 기법의 결과<sup>11)</sup>와 비교 분석하였다.

수치해석결과의 비교로 부터, Lagrangian 기법의 유체요소를 적절히 사용함으로써 벽면의 유연성과 자유표면의 유동의 영향을 고려한 유체 저장구조물의 지진해석을 적절히 수행할 수 있음을 알았다. 벽면의 유연성이 벽면에 작용되는 유동압에 큰 영향을 미치므로 이를 반드시 고려하여야 하며, 길이가 큰 저장구조물의 경우에 있어서는 자유표면의 유동에 의한 영향도 무시할 수 없음을 알았다.

## 2. 구조물 및 유체의 모형화

본 연구에서 예제 해석을 위하여 채택한 저장구조물은 콘크리트 구조물로서 높이 14m, 바닥 슬래브 두께 1.6m, 벽 두께 1.2m이며, 내부에 13m 높 이까지 물로 채워져 있다. 실제 구조물은 길이 60m 폭 30m이나, 저장구조물의 크기 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 양쪽 벽면간의 폭이 12m, 30m 및 60m인 세 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 내진해석을 위하여 평면변형 가정하에서 저장구조물은 이차원 4절점 고체요소로 모형화 하였으며, 저장구조물 내의 물은 이차원 4절점 유체요소로 모형화하였다. 이러한 유한요소 모형 가정하에서 아래 조건들을 고려하였다.

1) 저장구조물 내의 유체는 전단력에 대한 저항이 없으며(비점성), 압축성은 체적탄성계수(압력

과 체적변형률과의 관계)로 표현할 수 있는데, 유체요소는 이러한 유체의 강성을 잘 나타낼 수 있어야 한다.

2) 유체와 구조물의 경계면에서 유체는 경계면의 접선방향으로 미끄러질(비점성 가정하의 slip condition)수 있다. 즉 경계면에 직각 방향으로의 변위는 유체와 구조물이 같지만, 경계면에 접선방향으로의 변위는 유체와 구조물에서 서로 다를 수 있다.

3) 유체의 자유표면에는 중력의 영향에 의한 복원력이 작용한다. 자유표면의 이러한 복원력에 의한 수직방향의 경계조건을 고려할 수 있어야 한다.<sup>12)</sup>

전단계수(G)가 영이고 적절한 체적탄성계수(B)에 근거하여 등매개변수 고체요소로 부터 개발된 ADINA의 유체요소는 비점성(invscid) 요소로서 그 강성은 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
[K] &= [B]^T [E] [B] dV \\
&= G [B]^T [E_G] [B] dV + B [B]^T [E_B] [B] dV \\
&= B [B]^T [E_B] [B] dV \dots\dots\dots (1)
\end{aligned}$$

위의 4절점 유체요소에 대하여 통상적인 (2×2) 적분을 하면 유체요소의 강성이 과다산정되기 때문에, 정적하중이나 동적하중에 대한 유체 저장구조물의 거동 해석시 (1×1)의 감차적분이 요구된다.<sup>13)</sup> 이러한 (1×1) 감차적분에 의하면 유체요소는 강체운동, 전단변형 및 순수압축변형 등의 체적변화가 없는 변위형상에 대해 강성이 없으며, 단지 체적 변화가 수반되는 변위형상에 대해서만 강성을 갖게 되어 실제 유체의 거동을 잘 나타낼 수 있게 된다. 또한 한개의 적분점을 사용한 감차적분에서는 요소강성 행렬에 대한 적분점에서 요소내의 압력을 산정하게 되므로 일정압력요소(constant pressure element)가 된다. 그러나 (1×1)의 감차적분은 모두드 해석시 주파수가 영(0)인 불합리한 변위형상(spurious zero energy mode)을 나타내는 경우가 있다. 이러한 문제는 유체요소에 대한 비회전성 조건(irrotational flow condition)을 적용하거나, 계산된 자유진동모우드 형상을 검토하여 이 불합리한 변위형상을 해석으로부터 분리함으로써 극복할 수 있는데, 본연구에서는 비회전

성 조건을 적용하였다. 유체요소의 질량행렬을 계산할 때, 밀도는 일정하다고 보았다.

자유표면에 대한 동적 경계조건(dynamic free surface boundary condition)은 Bernoulli 방정식에  $p(\xi)=0$ 을 대입하고 미소항인 속도에 대한 제곱항을 무시하면(linearization) 다음과 같이 표현된다.

$$\left[ -\frac{\partial \phi}{\partial t} + gz \right]_{z=\xi} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

자유표면의 변위( $\xi$ )가 미지항이므로 식 (2)를  $z=0$ 에 관해 전개하고 밀도  $\rho$ 를 곱하면, 초기의 평형상태인 정지표면의 위치에 작용하는 유동압은 자유표면 변위의 함수로 주어진다.

$$\left[ \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0} = \rho g \xi \dots\dots\dots (3)$$

이러한 유동압에 의해 단위 자유표면적에 작용하는 복원력의 영향은 자유표면에 수직방향의 등가스프링 요소를 사용하여 나타낼 수 있다.(Fig. 1) 유체의 정지표면에서 수직방향의 변위가 발생했을 때, 압력변화로 인한 복원력(F)과 이와 동등한 등가스프링 요소의 강성(K)은 다음과 같다.

$$F = \rho g \xi dS \dots\dots\dots (4)$$

$$K = F/\xi = \rho g dS \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

- F : 자유표면에 작용하는 복원력
- $\rho$  : 유체의 밀도
- g : 중력가속도
- $\xi$  : 자유표면의 변위
- dS : 자유표면의 미소면적
- K : 등가스프링 요소의 강성

저장구조물에 대한 경계조건으로는 바닥 슬래브가 기초지반에 고정되어 있다고 보았다. 벽면의 유연성을 고려하지 않은 경우(rigid wall)와 고려한 경우(flexible wall)를 해석하였으며, 유연성을 고려하지 않은 경우에는 저장구조물의 벽체가 고정되어 있다고 보았다. Fig. 1에 rigid wall과 flexible wall 경우에 대한 해석모형 및 경계조건을 도식적으로 나타내었다.

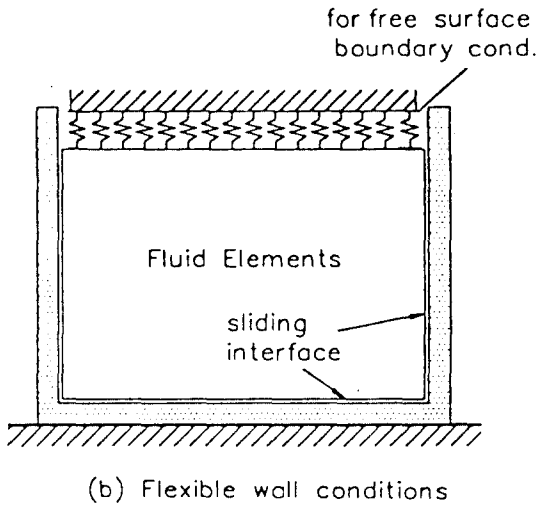
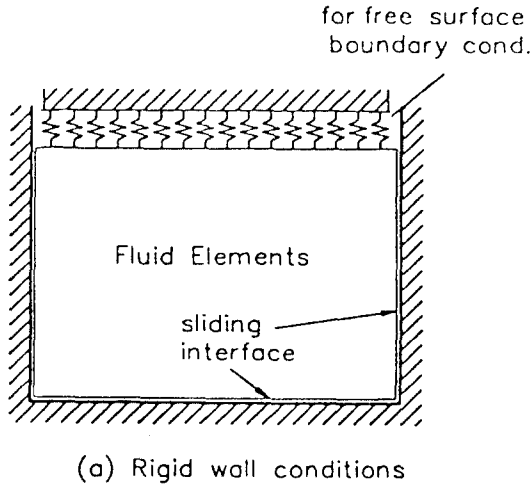


Fig. 1. Schematics of boundary conditions

본 연구에서는 240개의 4절점 유체요소와 50개의 4절점 고체요소를 사용하였으며, 총 절점수는 410개이다. 고체와 유체요소에 사용한 물성치는 다음과 같다.

- 고체 탄 성 계 수 :  $E=19.6\text{GPa}$
- 고체 포 이 슨 비 :  $\nu=0.2$
- 고체 밀 도 :  $\rho_s=2400\text{kg/m}^3$
- 유체 체적탄성계수 :  $B=2.0\text{GPa}$
- 유체 밀 도 :  $\rho=1000\text{kg/m}^3$

모우드 해석에는 subspace iteration 방법을 이용

35개의 자유진동모우드를 구하였다. 이 때 질량은 consistent mass로 처리하였고, trial vector의 갯수와 주파수의 허용오차는 결과의 정확성과 컴퓨터 주기억장치의 용량을 고려하여 각각 50개  $1.0 \times 10^{-10}$ 으로 하였다.

내진해석 기법으로 응답스펙트럼해석을 수행하였으며, 사용한 지진은 US NRC Regulatory Guide 1.60<sup>(4)</sup>에서 제시한 실제응답스펙트럼으로 Fig. 2에 나타내었으며, 수평방향의 최대지반가속도 0.2g와 감쇠비 0.5%에 대하여 고려하였다. 내부유체의 질량이 전체 질량의 대부분을 차지하고 또한 큰 변형이 유체에서 일어남을 감안하여, 내부유체의 감쇠비를 구조물-유체상관계의 감쇠비로 채택하였다. 상관계의 적절한 감쇠비를 추정하기 위해서는 해석결과를 실험결과와 비교하는 등의 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

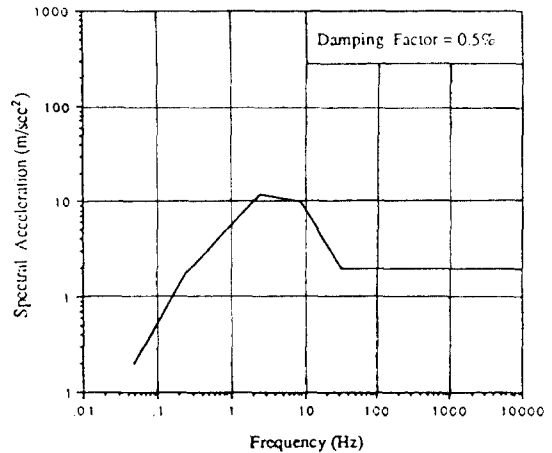


Fig. 2. Design response spectrum

### 3. 해석결과의 분석

#### 3.1. 자유진동모우드 해석결과

유체요소에 대하여 (1×1) 감차적분과 비회전성 조건을 적용했을 때, 유체 저장구조물의 모우드 해석결과인 자유진동주파수를 Table 1에 나타내었다. 자유표면의 유동에 관한 제 1 주파수는 구조물의 폭이 12m, 30m, 60m인 경우에 대하여 각각 0.

26, 0.15, 0.09Hz로 계산되었는데, 이는 Housner 식으로 구한 0.25, 0.15, 0.08Hz와 매우 근사하다. 참고로, 유체요소에 대하여 (2×2) 적분을 사용했을 경우, 유동의 강성을 너무 크게 산정하여, 유동의 자유진동주파수가 실제보다 10배 이상으로 커지는 불합리한 결과가 산출됨을 경험하였다. 벽면의 유연성을 무시한 강체 벽면(rigid wall)의 경우 유체의 압축성에 관련된 최저주파수는 3개의 구조물에 대하여 공히 32Hz이다. 반면 유연한 벽면(flexible wall)의 경우 내부유체의 영향을 포함한 벽면의 제 1 주파수는 저장구조물의 폭이 12m, 30m, 60m일 때 각각 2.80, 2.99, 3.00Hz로 계산되었다. 내부유체가 없는 벽면 구조물만의 제 1주파수는 4.2Hz이다.

Table 1. Natural frequencies(Hz)

Mode No	Width=12m	Width=30m	Width=60m
1	0.26( 0.26)	0.15( 0.15)	0.09( 0.09)
2	0.29( 0.29)	0.23( 0.23)	0.15( 0.15)
3	0.36( 0.36)	0.24( 0.24)	0.20( 0.20)
4	0.37( 0.37)	0.29( 0.29)	0.24( 0.24)
30	2.8 ( 32.1 )	3.0 ( 32.4 )	3.0 ( 32.4 )
31	3.2 ( 75.6 )	3.0 ( 42.6 )	3.0 ( 35.2 )
32	18.3 ( 97.8 )	16.5 ( 64.3 )	16.7 ( 42.7 )
33	18.4 ( 117.9 )	17.0 ( 89.7 )	16.7 ( 53.0 )

Note : The values in the parentheses are obtained from rigid wall cases, the others from flexible wall cases.

체적탄성계수의 충격성분 자유진동모우드에 대한 영향을 알아보기 위하여, 체적탄성계수를 본 연구에서 기준치로 사용한 2.0GPa 이외에 이를 0.2 GPa, 20.0GPa등으로 변화시켜 가면서 폭 60m 구조물에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 벽면의 유연성에 관한 제 1주파수가 공히 3.0Hz로 산출되었다. 반면 유체의 압축성이 지배적인 모우드의 자유진동주파수는 체적탄성계수가 0.2GPa, 2.0 GPa, 20.0GPa로 증가함에 따라서 8.7Hz, 28.6Hz, 81.8Hz등으로 증가함을 알 수 있었다. 설계응답스펙트럼의 증폭부분이 3Hz~9Hz임을 감안할 때, 지진에 의한 유동이나 벽면에 작용하는 유동압의

해석에서는, 벽면의 유연성에 관련된 진동모우드의 영향이 유체의 압축성에 의한 영향보다 훨씬 클 것으로 판단된다. 이에 대하여는 나중에 제 3.3절과 Table 6에서 토의한다.

Fig. 3와 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 초기의 자유진동모우드들은 자유표면의 유동에 의한 대류(convective)성분의 모우드이다. 벽면의 유연성을 고려한 경우, 30번째 모우드 부터 내부유체의 영향이 포함된 벽면의 유연성에 의한 모우드가 나타난다.

Table 2는 해석 방법에 따른 대략적인 모우드 질량의 비교를 나타낸다. 대부분의 대류성분 유체 질량은 첫번째 모우드에 집중되어 있으므로, 자유표면 유동의 제 1 자유진동모우드에 대한 모우드참여계수의 제곱을 대류성분의 질량으로 보았다. 또

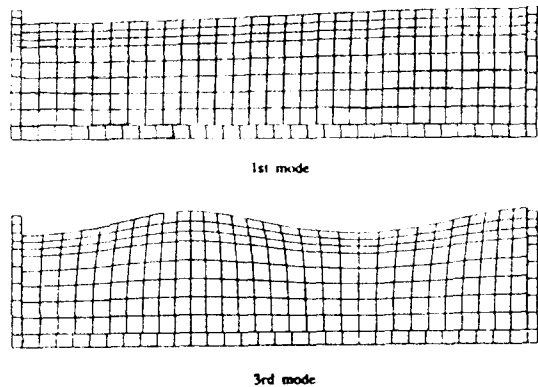


Fig. 3. Anti-symmetric sloshing mode shapes

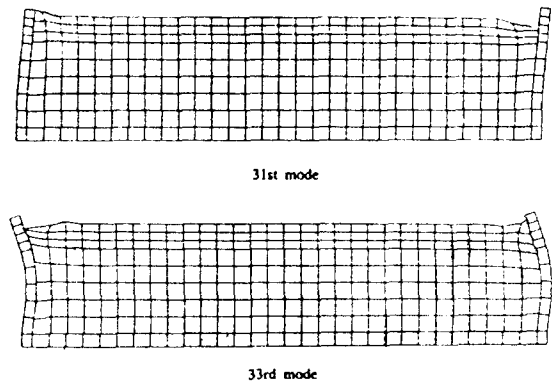


Fig. 4. Anti-symmetric structural mode shapes

한 2번째에서 35번째까지의 모우드에 대한 모우드 참여계수의 제곱의 합을 충격성분 유체 질량으로 보았다. Table 2에서 보이는 바와 같이 ADINA 해석에 의한 대류성분 유체 질량과 Housner식에 의한 대류성분 유체 질량이 잘 맞는다. ADINA 해석 결과중 유연한 벽면에 대한 충격성분 모우드 질량에는 저장구조물 벽면의 질량( $80 \times 10^3 \text{ Kg/m}$ )로 일부 포함된 것이다. 응답스펙트럼해석에서 모우드를 35개 사용하는 경우 유체 총질량의 90퍼센트가량을 고려하게 되어 실제에 가까운 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

Table 2. Comparison of modal mass( $\times 10^3 \text{ kg/m}$ )

Width	Total Mass	ADINA Convec. Impul.		Housner Convec. Impul.	
12m	156	35( 35)	180( 97)	-( 38)	-(129)
30m	390	200(199)	255(158)	-(209)	-(188)
60m	780	542(541)	293(191)	-(564)	-(195)

Note : The values in the parentheses are obtained from rigid wall cases, the others from flexible wall cases.

### 3. 2. 유체 자유표면의 최대변위

Table 3은 유체 자유표면의 최대변위를 나타낸다. 최대변위는 주로 제 1모우드의 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다. 벽면의 유연성을 무시한 경우와 고려한 경우에 있어 자유표면의 최대변위가 같게 산출되었는데, 이는 저장구조물 벽면의 유연성이 자유표면의 유동에 매우 작은 영향을 미치기 때문이다. ADINA에 의해서 계산된 자유표면의 최대변위가 Housner식에 의한 최대변위와 유사함을 알 수 있다.

Table 3. Maximum free surface elevation(m)

Width	Eulerian	Lagrangian	Housner
12m	0.91(0.91)	1.12(1.12)	-(1.27)
30m	1.14(1.13)	1.14(1.13)	-(1.29)
60m	1.13(1.13)	0.97(0.96)	-(1.27)

Note : The values in the parentheses are obtained from rigid wall cases, the others from flexible wall cases.

### 3. 3. 벽면 하단에 작용하는 전단력과 모멘트

응답스펙트럼해석에서 구한, 유체요소의 절점력을 벽면에 작용시키면 벽면 하단에서의 전단력과 모멘트를 계산할 수 있다. Table 4는 벽면에 작용하는 최대전단력의 비교이다. 첫번째 모우드가 자유표면의 유동을 대부분 나타내므로, ADINA 해석에서 모우드 1개를 사용한 경우의 전단력이 대류성분을 나타낸다고 볼 수 있으며, 모우드를 35개 사용한 경우는 대류성분과 충격성분의 전단력이 SRSS(square root of sum of squares)방법으로 합성된 결과이다. Table 4에서 보는 바와 같이 대류성분에 의한 최대전단력은 ADINA 해석결과와 Housner식에 의한 값이 잘 일치한다. 다만 벽면의 유연성을 무시한 경우의 대류성분과 충격성분을 고려한 최대전단력이 Housner식에 의한 결과보다 다소 작게 산출되었다. 유연한 벽면 경우의 대류성분과 충격성분을 고려한 최대전단력은 강체벽면의 경우보다 3.4배 가량 크게 산출되었는데, 그 이유는 벽면 유연성에 의한 자유진동모우드의 주파수(약 3Hz)가 설계응답스펙트럼의 증폭부분(3~9 Hz)에 위치하기 때문이다. 이를 고찰하면, 벽면을 강체로 가정할 경우 유동의 충격성분에 관련된 질량은 입력 응답스펙트럼에서 무한대의 주파수에 해당되는 0.2g의 가속도로 가진을 받게 된다. 반면, 벽면의 유연성을 고려할 경우에는 최대 가진 가속도 수준이 입력 응답스펙트럼의 3Hz 부근에 해당되는 1.0g로 증폭되어 충격성분에 의한 유동압의 크기가 증가된다.

Table 5는 벽면에 작용하는 최대모멘트의 비교이다. 최대전단력의 비교에서와 마찬가지로 대류성분에 의한 최대모멘트는 Housner식과 ADINA 해석결과가 서로 잘 일치한다. 대류성분과 충격성분을 고려할 때 강체 벽면에 대한 ADINA 해석결과는 Housner식에 비해 최대모멘트를 역시 작게 산출하고 있다. 유연한 벽면경우의 최대모멘트도 앞의 최대전단력과 같이 강체 벽면의 경우에 비해서 크게 증폭되어 산정됨을 알 수 있다. 따라서 저장구조물의 지진해석시 벽면의 유연성을 필히 고려하여야 합리적인 결과를 얻을 수 있겠다.

Table 4. Maximum base shear forces(KN)

Width	Eulerian approach			Lagrangian approach			Housner method			
	Convec.	Impul.	SRSS	Convec.	Impul.	SRSS	Convec.	Impul.	SRSS	ABS
12m	33	359	361	31	354	355	—	—	—	—
	( 33)	(112)	(117)	( 31)	( 99)	(104)	( 33)	(127)	(131)	(161)
30m	90	543	551	90	527	535	—	—	—	—
	( 90)	(164)	(187)	( 89)	(127)	(156)	( 90)	(187)	(208)	(277)
60m	120	546	559	117	518	531	—	—	—	—
	(120)	(165)	(204)	(117)	(106)	(158)	(109)	(195)	(223)	(304)

Note : The values in the parentheses are for the rigid wall cases, the others are for the flexible wall cases.

Table 5. Maximum base moments(KN-m)

Width	Eulerian approach			Lagrangian approach			Housner method			
	Convec.	Impul.	SRSS	Convec.	Impul.	SRSS	Convec.	Impul.	SRSS	ABS
12m	312	2522	2541	298	2497	2515	—	—	—	—
	(310)	(609)	( 683)	(297)	(522)	(601)	(328)	(631)	( 711)	( 959)
30m	668	3425	3490	657	3324	3389	—	—	—	—
	(666)	(848)	(1078)	(655)	(663)	(932)	(694)	(925)	(1156)	(1619)
60m	810	3334	3431	783	3168	3263	—	—	—	—
	(810)	(844)	(1174)	(781)	(584)	(975)	(784)	(961)	(1241)	(1745)

Note : The values in the parentheses are for the rigid wall cases, the others are for the flexible wall cases.

체적탄성계수 값의 선택이 벽면에 작용하는 유동압에 미치는 영향은, Table 6에서 보인 바와 같이 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서 유체요소를 사용한 해석결과는 비압축성 유체의 가정에 근거한 Eulerian 기법의 결과와 동등하게 비교할 수 있다고 생각된다.

Table 6. Maximum base shear forces and base moments

Bulk Modulus	Base Shear(KN)	Base Moment(KN-m)
0.2GPa	584	3487
2.0GPa	531	3263
20.0GPa	529	3265

#### 4. Eulerian 기법과의 비교

여기서는 Lagrangian 기법의 하나인 ADINA의 유체요소를 이용한 유체 저장구조물의 지진 해석

결과를 Eulerian 기법의 결과<sup>11)</sup>와 비교 분석하였다. Eulerian 기법에서는 벽면을 구조요소로 모형화하는 반면 내부유체의 유동은 속도 포텐셜로 수식화한 Laplace 방정식으로 나타낸다. 이 유체-구조물의 상관계는 벽면의 변위를 경계조건으로 가지는 Laplace 방정식의 해를 구하여 해석한다. 두 가지 해석기법에 따른 자유표면의 변위, 최대전단력 및 최대모멘트는 다음과 같다.

##### 4. 1. 자유표면의 변위

해석기법에 따른 유연한 벽면 경우의 자유표면 최대변위를 Table 3에 나타내었다. ADINA의 유체요소를 사용한 해석결과와 Eulerian 기법에 의한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

##### 4. 2. 벽면 하단의 최대전단력 및 최대모멘트

Table 4와 Table 5에 여러 구조물의 경우에 대

하여, Lagrangian 기법과 Eulerian 기법으로 구한 유동압에 의한 벽면 하단의 최대전단력과 최대모멘트를 비교하였다. 벽면의 유연성을 고려한 경우, Lagrangian 기법과 Eulerian 기법에 의한 결과의 차이가 5% 이내로 잘 일치됨을 보였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는, 지진 발생시 유체 저장구조물의 안전성 분석을 위하여, 벽면과 내부유체의 상호작용을 고려한 저장구조물의 지진 해석기법에 대하여 연구하였다. 유동해석을 위하여 Lagrangian 기법의 구조해석용 전산코드인 ADINA의 이차원 유체요소를 사용하여 내부유체를 모형화 하였으며, 비점성 유체의 강성과 유체-저장구조물 경계면에서의 상대적인 미끄러짐 특성 및 자유표면에 작용하는 중력에 의한 복원력을 고려하였다. 개발된 해석기법을 검증하기 위하여, 본 연구에서 얻은 강체 벽면에 대한 해석결과를 Housner식에 의한 결과와 비교하였으며, 유연한 벽면에 대한 해석결과는 Eulerian 기법에 의한 결과와 비교하였다. 수치 해석결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 강체 벽면의 유체 저장구조물에 대한 Lagrangian 기법의 해석결과는 Housner 식에 의한 결과에 비해서 약 10-30% 정도 작게 산출되었다. Housner 식이 보통 과도한 유동압을 산정하는 경향이 있으므로, 본 연구 결과가 대체로 타당하다고 판단된다.

2. 유연한 벽면의 유체 저장구조물에 대한 Lagrangian 기법의 지진해석결과와 Eulerian 기법의 결과는 5% 이내의 차이로 잘 일치함을 보이며, 두 방법의 타당성을 간접적으로 시사하고 있다. 그러나, 타 문헌의 유사한 해석결과들을 활용하여, 본 연구의 결과에 대한 추가적인 검증이 요망된다.

3. 예제 해석결과, 유체 저장구조물의 지진해석시 벽면 유연성의 영향은 매우 중요하며, 벽면을 강체로 가정할 경우에 비하여 벽면에 작용하는 유동압을 3배 이상 증폭시킴을 알았다. 따라서, 벽면의 유연성을 반드시 포함시켜서 해석해야 함을 알았다.

## 감사의 글

본 연구는 방사성폐기물 관련기금으로 수행한 연구보고서입니다. 연구가 진행되는 동안 적극적으로 지원해 주신 한국원자력연구소의 김진웅 부장과 최인길 연구원에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. George W. Housner, "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Container", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, No. 1, Jan., 1957, pp. 15-35.
2. George W. Housner, "The Dynamic Behavior of Water Tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, No. 1, Feb., 1963, pp. 381-387.
3. M.A.Haroun, "Stress Analysis of Rectangular Walls under Seismically Induced Hydrodynamic Loads", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 74, No. 3, Jun., 1984, pp. 1031-1041.
4. H.I. Epstein, "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 102, 1976, pp. 1659-1673.
5. A.S.Veletsos, "Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks", *Proc. Int. Assoc. for Earthquake Engineering*, Rome, Italy, Vol. 1, 1974, pp. 630-639.
6. T.Balendra, K.K.Ang, P.Paramasivam and S.L. Lee, "Seismic Design of Flexible Cylindrical Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 477-496.
7. 윤정방, 이창근, "벽면의 유연성을 고려한 액체 저장탱크의 동적해석", 대한토목학회 논문집, 제7권 제4호, 1987, pp. 21-29.
8. C.B.Yun, Y.S.Kim, J.M.Kim, J.W.Kim, J.M.Seo and Y.S.Choun, "Fluid-Structure Interaction Analysis for Spent Fuel Storage Structures", 10th World Conference on Earthquake Engi-



- neering, Madrid, Spain, 1992.
9. O.C.Zienkiewicz and P.Bettess, "Fluid-Structure Dynamic Interaction and Wave Forces. An Introduction to Numerical Treatment", *International Journal for Numerical methods in Engineering*, Vol. 13, 1978, pp. 1-16.
  10. *ADINA User Manual*, ADINA Engineering AB, Sweden.
  11. 윤정방, 이동근, 김영석, 김재민, "사용후 핵연료 저장구조물의 지진시 유체-구조물 상호작용 해석방법의 개발", 연구보고서, 한국과학기술원 토목공학과, 1991.
  12. R.D.Cook, D.S.Malkus and M.E.Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 3rd Ed., pp. 474-500, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
  13. J.Sundqvist, "An Application of ADINA to the Solution of Fluid-Structure Interaction Problems", *Computers & Structures*, Vol. 17, No. 5-6, 1983, pp. 793-807.
  14. U.S. NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectrum for Nuclear Power Plants*, 1973.