

## 이차원 유체요소를 이용한 유체 저장구조물의 지진해석

### Seismic Analysis of Liquid Storage Structures Using 2-Dimensional Fluid Elements

김 영석\*      윤 정방\*\*      김 재민\*      김 진웅\*\*\*  
Kim, Young-Surck      Yun, Chung-Bang      Kim, Jae-Min      Kim, Jhin-Wung

#### ABSTRACT

Seismic analysis of liquid storage structures is carried out by utilizing 2-dimensional fluid elements of a general purpose structural analysis computer program(ADINA). The present analysis focuses on the effects of the wall flexibility and the sloshing of the free water surface. Due considerations are given to the facts that the fluid has no shear resistance and the free surface motion is subjected to the gravity effect. To validate the present method using 2-dimensional fluid elements, the results of several example cases are compared with those by the Housner's approach for rigid wall case, and with those by the Eulerian formulation for flexible wall case.

#### 1. 서론

내부유체와 저장구조물의 상호작용에 대한 연구는 유류저장탱크, 유조선 등을 중심으로 많이 연구되어 왔다. 초기의 유체 저장구조물의 지진에 대한 거동 해석은 벽면을 유연성이 없는 강체로 가정하고 유체의 동적거동을 구하였다. Housner는 직사각형과 원통형 유체 저장구조물에 대해서 지진에 의해 구조물에 가해지는 유체의 영향을 평가할 수 있는 방법을 제안했다. 이 방법에서는 유체를 저장구조물의 벽면과 함께 움직이는 충격(impulsive)성분과 자유표면의 유동에 관한 대류(convective)성분으로 나누어 해석하였는데, 각 성분을 등가질량으로 모형화하여 지진시 유체가 저장구조물 벽면의 하단에 미치는 전단력과 모멘트를 구하였다[1][2]. Housner의 결과를 보완하여 Epstein은 저장구조

물 벽면에 작용하는 유동압에 의한 전단력과 모멘트를 계산 할 수 있는 도표를 제안했다[3].

1964년 발생한 알래스카 지진에 의해서 벽면의 유연성을 무시하고 설계한 많은 유체 저장구조물이 큰 피해를 입었다는 분석이 나온 후, 벽면의 유연성을 고려한 유체-저장구조물의 상호작용에 대한 연구가 많이 수행되어왔다. 벽면의 유연성을 고려하기 위하여 Veletsos는 유체-저장구조물 상관계를 단자유도계로 가정하여 유동압을 계산하였다[4]. 저장구조물 내의 유체를 보다 자세히 모형화 하기 위하여 Balendra는 벽면과 유체를 유한요소로 모형화 하였는데, 자유표면의 유동을 무시한 관계로 내부유체가 부가질량으로만 처리되었다[5].

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 두가지 다른 접근 방법이 있다[6]. Lagrangian 기법에서는 고체나 유체의 운동을 어떤 특정한 입자의 변위를 중심으로 나타내며, Eulerian 기법에서는 유체장의 운동을 특정한

\* 한국과학기술원 박사과정  
\*\* 한국과학기술원 교수  
\*\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

시점과 특정한 공간좌표에서의 속도로 나타낸다. 본 연구에서는 Lagrangian 기법에 의한 구조해석용 유한요소법 전산코드인 ADINA<sup>[7]</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 다양한 실제 문제를 해결하는데 편리하게 적용될 수 있다.

일반적으로 유체가 저장구조물에 미치는 유동압은 크게 대류성분과 충격성분으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 Lagrangian 기법의 유체요소의 정확성을 확인하기 위하여, 벽면 유연성이 무시된 강체 벽면(rigid wall)의 유체 저장구조물에 작용하는 유동압의 대류성분과 충격성분을 Lagrangian 기법의 구조해석 전산코드인 ADINA를 사용하여 구한 후, 그 결과를 Housner 식에 의한 결과와 비교하였다. 또한 유연한 벽면(flexible wall)의 저장구조물에 대한 유동압도 Lagrangian 기법으로 계산하여 그 결과를 Eulerian 기법의 결과<sup>[8]</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 가정한 저장구조물은 콘크리트 구조물로서 길이 60m, 폭 30m, 높이 14m, 바닥 슬래브 두께 1.6m, 벽 두께 1.2m이며, 내부에 13m 높이까지 물로 채워져 있다. 내진해석을 위하여 평면변형 가정하에서 저장구조물은 이차원 4절점 고체요소로 모형화 하였으며 저장구조물 내의 물은 이차원 4절점 유체요소로 모형화하였다. 이러한 유한요

소 모형 가정하에서 아래 조건들을 고려하였다.

- 1) 저장구조물 내의 유체는 전단력에 대한 저항이 없으며, 압축성은 체적탄성계수(bulk modulus)로 표현할 수 있는데, 유체요소는 이러한 유체의 강성을 잘 나타낼 수 있어야 한다.
- 2) 유체와 구조물의 경계면에서 유체는 경계면의 접선방향으로 미끄러질 수 있다. 즉 경계면에 직각방향으로의 변위는 유체와 구조물이 같지만, 경계면에 접선방향으로의 변위는 유체와 구조물에서 서로 다를 수 있다.
- 3) 유체의 자유표면에는 중력의 영향에 의한 복원력이 작용한다. 자유표면에서의 이러한 복원력에 의한 수직방향의 경계조건을 고려할 수 있어야 한다.

전단계수가 영이고 적절한 체적탄성계수에 근거하여 등매개변수 고체요소로 부터 개발된 ADINA의 유체요소는 비절성 요소이다. 이러한 4절점 유체요소에 대하여 통상적인 (2x2)적분을 하면 유체요소의 강성이 과다산정되기 때문에, 정적하중이나 동적하중에 대한 유체 저장구조물의 거동 해석시 (1x1)의 감차적분이 요구된다<sup>[9]</sup>. 이러한 (1x1) 감차적분에 의하면 유체요소는 체적의 변화가 없는 변위형상에 대하여 강성이 없으며, 요소내의 압력은 일정하게 된다. 그러나 (1x1)의 감차적분은 모우드 해석시 주파수가 영(0)인 불합리한 변위형상(spurious zero energy mode)을 나타내는 경우가 있다. 이러한 문제는 ADINA의 유체요소에 대한 비회전성 조건을 적용하거나, 계산된 자유진동 모우드 형상을 검토하여 이 불합리한 변위형상을 해석으로부터 분리함으로써 극복할 수 있다.

유체와 구조물의 경계면에서는 경계면 접선방향으로 상대적인 미끄러짐이 일어날 수 있는데, ADINA의 변위에 대한 구속조건(constraint equation)을 적용하면 유체와 구조물의 상대적인 미끄러짐을 고려할 수 있다. 경계면은 여러 쌍들의 절점, 즉 물에 대한 유체요소의 절점들과 구조물에 대한 고체요소의 절점들로 표현되며, 경계면에 직각방향의 자유도는 유체요소와 고체

요소의 절점이 동일한 변위를 가지나 경계면 접선방향의 자유도는 유체요소와 고체요소의 절점이 서로 다른 변위를 가질 수 있다.

자유표면의 증력에 의한 복원력의 영향은 자유표면에 수직방향의 등가스프링요소를 사용하여 나타낼 수 있다(그림 1.). 유체의 자유표면에서 수직방향의 변위가 발생했을 때, 압력변화로 인한 복원력과 이와 동등한 등가스프링 요소의 강성은 다음과 같다.

$$f = -\rho g \xi \Delta A$$

$$k = f/\xi = -\rho g \Delta A$$

여기서,

$f$  : 자유표면에 작용하는 복원력

$\rho$  : 유체의 밀도

$g$  : 중력가속도

$\xi$  : 자유표면의 변위

$\Delta A$  : 자유표면의 미소면적

$k$  : 등가스프링 요소의 강성

저장구조물에 대한 경계조건으로는 바다 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. 그림 1.에 rigid wall과 flexible wall 경우에 대한 해석모형 및 경계조건을 도식적으로 나타내었다.

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

고체 탄성계수	: $E = 2.0 \times 10^6 \text{ ton/m}^2$
포아손비	: $\nu = 0.2$
밀도	: $\rho_s = 0.245 \text{ ton sec}^2/\text{m}^4$
유체 체적탄성계수	: $K = 3.0 \times 10^6 \text{ ton/m}^2$
밀도	: $\rho = 0.102 \text{ ton sec}^2/\text{m}^4$

모우드 해석에서는 subspace iteration 방법을 이용 35개의 자유진동모우드를 구하였다. 이 때 질량은 consistent mass로 처리하였고, trial vector의 갯수와 주파수의 허용오차는 결과의 정확성과 컴퓨터 주기억장치의 용량을 고려

하여 각각 50개  $1.0 \times 10^{-10}$  으로 하였다.

내진해석 기법으로 응답스펙트럼해석을 수행하였으며, 사용한 지진은 US NRC Regulatory Guide 1.60<sup>[10]</sup>에서 제시한 설계응답스펙트럼으로 수평방향의 최대 지반가속도 0.2g와 감쇠비 0.5%에 대하여 고려하였다. 저장구조물의 형상에 의한 영향을 알아보기 위하여 양쪽 벽면간의 거리가 60m, 30m 및 12m인 3가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

### 3. 해석결과와 분석

#### 3.1. 자유진동모우드 해석결과

유체요소에 대하여 (1x1) 감차적분과 비회전성 조건을 적용했을 때, 유체 저장구조물의 모우드 해석결과인 자유진동주파수를 표 1.에 나타내었다. 자유표면의 유동에 관한 제 1 주파수는 구조물의 길이가 60m, 30m, 12m인 경우에 대하여 각각 0.09, 0.15, 0.26Hz로 계산되었는데, 이는 Housner 식으로 구한 0.08, 0.15, 0.25Hz와 매우 근사하다. 벽면의 유연성을 무시한 강체 벽면(rigid wall)의 경우 유체의 충격성분에 관련된 최저주파수는 3개의 구조물에 대하여 공히 32Hz이다. 반면 유연한 벽면(flexible wall)의 경우 내부유체의 영향을 포함한 벽면의 제 1 주파수는 저장구조물의 길이가 60m, 30m, 12m일 때 각각 3.00, 2.99, 2.80Hz로 계산되었는데, 이는 벽면 구조물만의 제 1 주파수인 4.2Hz 보다 작다. 이는 내부유체의 일부가 벽면과 같이 거동하는 부가질량으로 작용하기 때문이다.

참고로, 유체요소에 대하여 (2x2)적분을 사용했을 경우, 유동의 강성을 너무 크게 산정하여, 유동의 자유진동주파수가 실제보다 10배 이상으로 커지는 불합리한 결과가 산출됨을 경험하였다. 아울러 자유표면에 증력의 영향에 대한 등가스프링요소를 사용하지 않고 (1x1) 감차적분을 사용하면, 전체계의 강성이 음수(-)가 되는 불합리한 결과가 됨을 경험하였다. 따라서 본 연구와 같이 자유표면을 가지는 유동의 해석을 위하여는, 유체요소에 의한 모형화 과정에서 주의할 하여야 함을 알 수 있었다.

길이 60m 저장구조물에 대한 자유진동모우드를 그림 2.과 그림 3.에 나타냈다. 초기 모

우드들은 자유표면의 유동에 의한 대류(convective)성분의 모드이다. 30번째 모드부터는 벽면의 유연성을 무시한 강체 벽면의 경우에는 유체요소의 체적변화에 의한 충격(impulsive)성분의 모드가 나타나고, 벽면의 유연성을 고려한 경우에는 내부유체의 영향이 포함된 벽면의 유연성에 의한 모드가 나타난다. 여기서 30번째 모드부터 유체요소의 체적변화에 의한 모드 또는 벽면의 유연성에 의한 모드가 나타나는 이유는 유체의 자유표면을 31개의 절점으로 모형화 했기 때문으로 생각된다. 벽면의 유연성을 무시한 경우와 고려한 경우에 있어 대류성분 모드의 자유진동주파수와 모드형상이 비슷한데, 이는 유체의 대류성분에 관련된 모드의 주파수가 벽면의 변형과 관련된 자유진동주파수에 비해서 너무 작아 서로의 상관관계의 영향이 작기 때문이다.

표 2.는 해석 방법에 따른 모드 질량의 비교를 나타낸다. ADINA 해석에서 대부분의 대류성분 유체 질량은 첫번째 모드에 집중되어 있으므로, 자유표면 유동의 제 1 자유진동모드에 대한 모드참여계수의 제곱을 대류성분의 질량으로 보았다. 또한 2번째에서 35번째까지의 모드에 대한 모드참여계수의 제곱의 합을 충격성분 유체 질량으로 보았다. 표 2.에서 보이는 바와 같이 ADINA 해석에 의한 대류성분 유체 질량과 Housner 식에 의한 대류성분 유체 질량이 잘 맞는다. ADINA 해석결과중 유연한 벽면에 대한 충격성분 모드 질량에는 저장구조물 벽면의 질량(8.2 ton sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)도 일부 포함된 것이다. 응답스펙트럼해석에서 모드를 35개 사용하는 경우 유체 총질량의 90 퍼센트 가량을 고려하게 되어 실제에 가까운 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

### 3.2. 유체 자유표면의 최대변위

표 3.은 유체 자유표면의 최대변위를 나타낸다. 최대변위는 주로 제 1 모드의 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다. 벽면의 유연성을 무시한 경우와 고려한 경우에 있어 자유표면의 최대변위가 같게 산출되었는데, 이는 전술한 바와 같이 저장구조물 벽면의 유연성이 자유표면의 유동에 매우 작은 영향을 미치기 때문이다. ADINA에 의해서 계산된 자유표면의 최대

변위가 Housner 식에 의한 최대변위와 유사함을 알 수 있다.

### 3.3. 벽면 하단에 작용하는 전단력과 모멘트

응답스펙트럼해석에서 구한, 유체요소의 절점력을 벽면에 작용시키면 벽면 하단에서의 전단력과 모멘트를 계산할 수 있다. 표 4.는 벽면에 작용하는 최대전단력의 비교이다. 첫번째 모드가 자유표면의 유동을 대부분 나타내므로, ADINA 해석에서 모드 1개를 사용한 경우의 전단력이 대류성분을 나타낸다고 볼 수 있으며, 모드를 35개 사용한 경우는 대류성분과 충격성분의 전단력이 SRSS(square root of sum of squares)방법으로 합성된 결과이다. 표 4.에서 보는 바와 같이 대류성분에 의한 최대전단력은 ADINA 해석결과와 Housner 식에 의한 값이 잘 일치한다. 다만 벽면의 유연성을 무시한 경우의 대류성분과 충격성분을 고려한 최대전단력이 Housner 식에 의한 결과보다 다소 작게 산출되었다. 유연한 벽면 경우의 대류성분과 충격성분을 고려한 최대전단력은 강체 벽면의 경우보다 3.4배 가량 크게 산출되었는데, 그 이유는 벽면 유연성에 의한 자유진동모드의 주파수가 설계응답스펙트럼의 증폭부분에 위치하기 때문이다.

표 5.는 벽면에 작용하는 최대모멘트의 비교이다. 최대전단력의 비교에서와 마찬가지로 대류성분에 의한 최대모멘트는 Housner 식과 ADINA 해석결과가 서로 잘 일치한다. 대류성분과 충격성분을 고려할 때 강체 벽면에 대한 ADINA 해석결과는 Housner 식에 비해 최대모멘트를 역시 작게 산출하고 있다. 유연한 벽면 경우의 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.

## 4. Eulerian 기법과의 비교

여기서는 Lagrangian 기법의 하나인 ADINA의 유체요소를 이용한 유체 저장구조물의 지진해석결과를 Eulerian 기법의 결과<sup>[8]</sup>와 비교 분석하였다. Eulerian 기법에서는 벽면을 구조요

소로 모형화하는 반면 내부유체의 유동은 속도 포텐셜로 수식화한 Laplace 방정식으로 나타낸다. 이 유체-구조물의 상관관계는 벽면의 변위를 경계조건으로 가지는 Laplace 방정식의 해를 구하여 해석한다. 두가지 해석기법에 따른 자유표면의 변위, 최대전단력 및 최대모멘트는 다음과 같다.

#### 4.1. 자유표면의 변위

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

#### 4.2. 벽면 하단의 최대전단력 및 최대모멘트

표 4.과 표 5.에 여러 구조물의 경우에 대하여, 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. 결론

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 증력에 의한 복원력을 고려하였다. 개발된 해석기법을 검증하기 위하여, 본 연구에서 얻은 강체 벽면에 대한 해석결과를 Housner 식에 의한 결과와 비교하였으며, 유연한 벽면에 대한 해석결과는 Eulerian 기법에 의한 결과와 비교하였다. 수치해석결과 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 과다한

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 벽면의 유연성의 영향은 매우 중요하며, 벽면을 강체로 가정한 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 전영선, 최인길 연구원에게 감사드립니다.

#### 참고 문헌

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. H.I. Epstein, "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol.102, 1976, pp.1659-1673.
4. A.S. Veletsos, "Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks", *Proc. Int. Assoc. for Earthquake Engineering, Rome, Italy*, Vol.1, 1974, pp.630-639.
5. 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.
6. 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.
  7. ADINA User Manual, ADINA Engineering AB, Sweden.
  8. 윤 정방,이 동근,김 영석,김 재민, "사용후 핵연료 저장구조물의 지진시 유체-구조물 상호작용 해석방법의 개발", 연구보고서, 한국과학기술원 토목공학과, 1991
  9. 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.
  10. U.S. NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectrum for Nuclear Power Plants*, 1973.

표 1. 유체 저장구조물의 자유진동주파수 ( 단위 : Hz )

Mode No	구조물 길이 60m		구조물 길이 30m		구조물 길이 12m		비 고
	Rigid Wall	Flex. Wall	Rigid Wall	Flex. Wall	Rigid Wall	Flex. Wall	
1	0.09	0.09	0.15	0.15	0.26	0.26	대류성분
2	0.15	0.15	0.23	0.23	0.29	0.29	
3	0.20	0.20	0.24	0.24	0.36	0.36	
4	0.24	0.24	0.29	0.29	0.37	0.37	
30	32.42	3.00	32.35	2.99	32.14	2.80	충격성분
31	35.23	3.01	42.55	3.03	75.63	3.17	
32	42.74	16.66	64.33	16.50	97.76	18.28	
33	53.00	16.68	89.66	16.98	117.92	18.40	

표 2. 모우드 질량의 비교 ( 단위 : ton sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup> )

구조물 길이	유 체 총질량	Housner 식		A D I N A 해석결과			
				Rigid Wall		Flex Wall	
		대류성분	충격성분	대류성분	충격성분	대류성분	충격성분
60m	79.6	57.6	19.9	55.2	19.5	55.3	29.9
30m	39.8	21.3	19.2	20.3	16.1	20.4	26.0
12m	15.9	3.9	13.2	3.6	9.9	3.6	18.4

\* : Flexible Wall의 경우 충격성분에 벽면의 질량 포함

표 3. 유체 자유표면의 최대변위 ( 단위 : m )

구조물 길이	Housner 식	A D I N A 해석 결과				Eulerian 해석기법
		Rigid Wall		Flexible Wall		
		모우드 1개	모우드 35개	모우드 1개	모우드 35개	
60m	1.04	1.04	1.12	1.04	1.12	1.13
30m	1.29	1.10	1.13	1.10	1.14	1.14
12m	1.27	0.94	0.96	0.94	0.97	0.91

표 4. 벽면 하단에 작용하는 최대전단력 ( 단위 : ton )

구조물 길이	Housner 식			A D I N A 해석결과				Eulerian 해석기법		
				Rigid Wall		Flexible Wall		Flexible Wall		
	대류성분	충격성분	합계*	모우드1개	모우드35개	모우드1개	모우드35개	대류성분	충격성분	합계*
60m	11.1	19.9	22.8	11.9	16.1	11.9	54.2	12.2	55.7	57.0
30m	9.2	19.1	21.2	9.1	15.9	9.2	54.6	9.2	55.4	56.2
12m	3.4	13.0	13.4	3.2	10.6	3.2	36.2	3.4	36.6	36.8

\* : 대류성분과 충격성분을 SRSS 방법으로 조합

표 5. 벽면 하단에 작용하는 최대모멘트 ( 단위 : ton-m )

구조물 길이	Housner 식			A D I N A 해석결과				Eulerian 해석기법		
				Rigid Wall		Flexible Wall		Flexible Wall		
	대류성분	충격성분	합계*	모우드1개	모우드35개	모우드1개	모우드35개	대류성분	충격성분	합계*
60m	80.0	98.1	126.6	79.7	99.5	79.9	333.0	82.7	340.2	350.1
30m	70.8	94.4	118.0	66.8	95.1	67.0	345.8	68.2	349.5	356.1
12m	33.5	64.4	72.6	30.3	61.3	30.4	256.6	31.8	257.3	259.3

\* : 대류성분과 충격성분을 SRSS 방법으로 조합

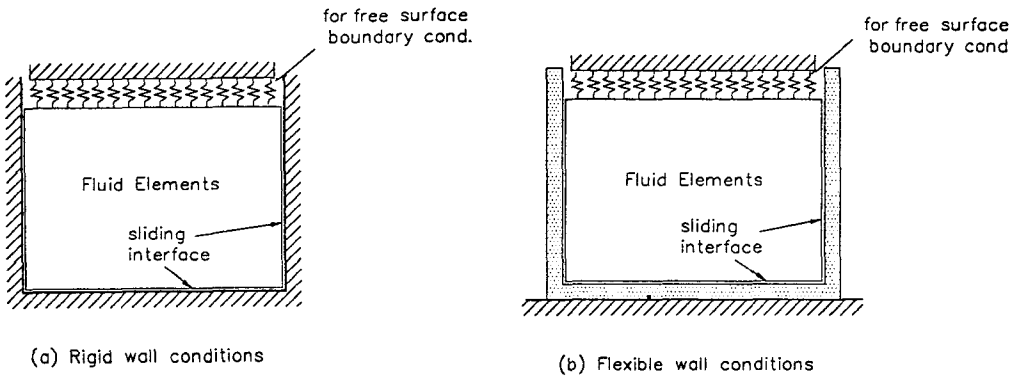


그림 1. Rigid Wall과 Flexible Wall에 대한 경계조건

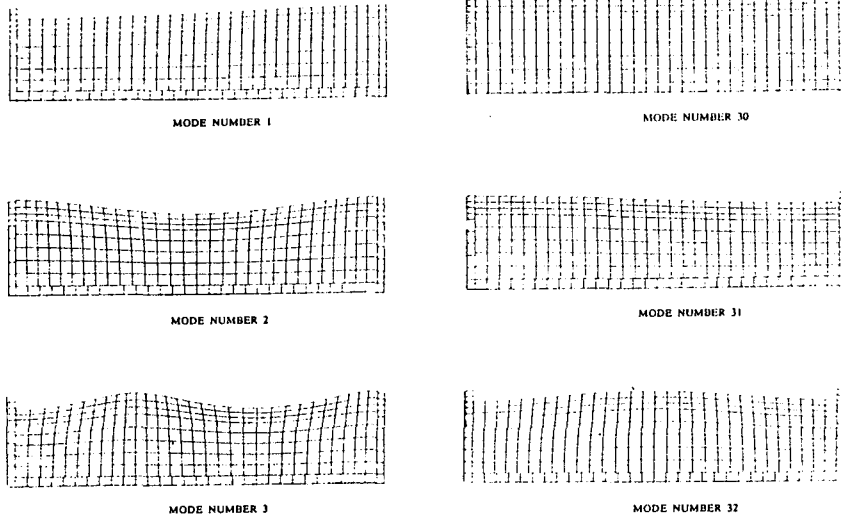


그림 2. Rigid Wall에 대한 모우드형상

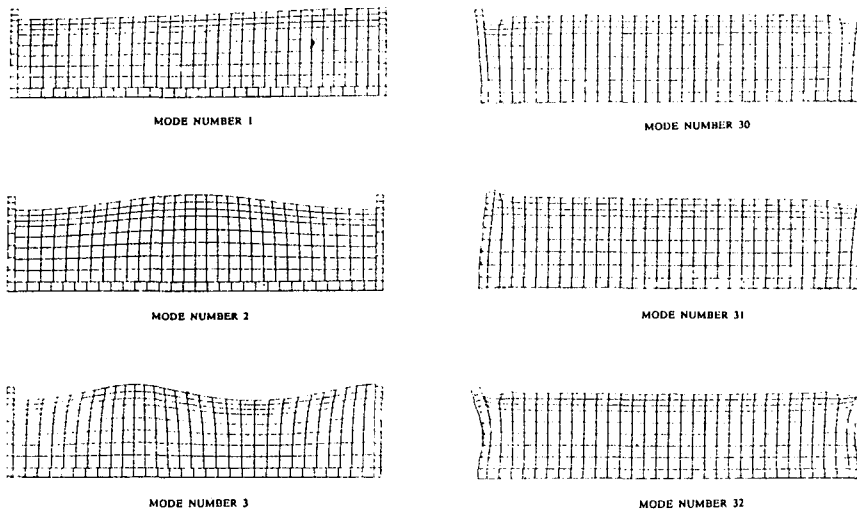


그림 3. Flexible Wall에 대한 모우드형상