

## 유체저장 원통용기의 슬로싱 현상 및 지진응답해석 Analyses of Sloshing and Seismic Responses for Cylindrical Vessel Containing Fluid

이재한\*, 유 봉\*, 구경희\*, 양경택\*\*, 최형진\*\*\*  
(Lee, Jae-Han Yoo, Bong Koo, Gyeong-Hoi Yang, Kyung-Taek Choi, Hyung Jin)

---

### ABSTRACT

Analyses of linear sloshing modes and seismic responses for cylindrical vessel containing fluid are performed by general finite element computer program, ANSYS. In order to examine the effectiveness of the sloshing analysis procedure, the calculated results are compared with experimental ones in the literature. Liquid sloshing effects in cylindrical LNG vessel are analyzed and the fluid-structure interaction effects are evaluated under the seismic loads. The sloshing frequencies calculated agree well with experimental results. The forces and moments for fixed and isolated LNG vessel are also calculated to evaluate the sloshing effects.

---

### 1. 서론

유체저장구조물에 담겨진 유체의 슬로싱영향을 평가하는 방법은 ASCE 4-86[1] 등의 설계지침서에 기술되어 있으나 복잡한 저장용기나 구조물의 유연성을 고려하지 못한다. 수직방향으로 세워진 사각형의 유체저장구조물에 대한 유체의 슬로싱영향을 평가하기 위한 해석방법개발 및 연구가 국내에서도 수행된 바 있다[2,3]. 본 연구에서는 유류저장탱크나 내부구조물이 존재하는 액체금속 원자로의 원자로용기와 같은 원통형 용기에 채워진 액체의 슬로싱 현상을 규명하기 위하여 ANSYS 범용구조해석 프로그램[4]으로 선형범위내에서 슬로싱 모우드를 해석하는 절차를 정립하고자한다. 이를 위해 ANSYS를 사용한 해석결과에 대하여 문헌에 나와 있는 실험결과와 비교를 통하여 해석방법의 신뢰성을 확인하였다. 아울러 유체 수위가 바뀔에 따른 LNG 원통용기에 담겨진 유체의 슬로싱 고유진동수에 대한 해석과 용기자체의 고유진동수 변화특성을 분석하였다. 이러한 해석결과를 토대로 비면진구조를 갖는 LNG 용기에 대한 설계지진의 가속도스펙트럼 가진시의 응답을 얻고, 면진될 경우에 대해서도 슬로싱 및 유체구조물 상호작용영향에 의한 구조물에 미치는 영향을 비교평가하였다.

---

\* 한국원자력연구소

\*\* 대림전문대

\*\*\* 대림산업기술연구소

## 2. 슬로싱 해석 절차

슬로싱 현상은 가진 등에 의해 중력장을 받는 자유액면이 진동하는 현상으로, 이의 해석을 위해 ANSYS에서 지원하는 3차원 유체요소(STIF80)를 사용하였다. 이는 전단계수가 없는 대신에 유체의 압축성을 나타내는 체적탄성계수를 물성치로 갖는다. ANSYS 모델링에서 자유액면은 중력가속도가 작용하는 방향인 z축의 z=0 좌표 상에 존재하도록 해야 한다. 이는 유체요소의 자유액면에 중력스프링을 위치시키는 효과를 주어 자유액면이 중력에 의한 복원력 특성을 갖도록 하기 위함이다. 그리고 유체요소들은 모두 절대좌표 z=0 보다 아래에 존재하도록 한다. 또한 구조물과 유체사이의 접촉면에서 유체의 미끄러짐이 발생될 수 있도록 벽면의 고체요소(shell element, STIF63)와 내부 유체요소가 접하는 절점들을 같은 좌표 상에 중첩하여 위치시키고, 두 절점은 벽면에 수직방향인 자유도를 상호 연계(coupling)시켜주는 것이 요구된다. 이 때 절점들의 상호 연계시 주절점(master node)과 부절점(slave node)을 결정해 준다.

## 3. 해석검증

사용된 프로그램의 정확성을 확인하기 위하여 문헌에 나타난[5] 단순 원통형 모델의 모형 시험 자료를 이용하고자 한다. 이의 제원은 다음과 같다.

원통모델 직경	: 2.230 m
유체 자유액면 높이	: 0.7 m
원통모델 두께	: 0.006 m
원통모델 높이	: 1.0 m

위의 실험모델에 대한 ANSYS 프로그램으로 구한 슬로싱 고유진동수 결과는 표 1과 같으며, 이의 비교를 위해 이론해와 일본 중앙전력연구소에서 행한 실험결과를 표 1에 같이 나타냈다. 표 1에서 보는 바와 같이 슬로싱 3차 모드까지 모두 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 해석결과와 모우드 참여계수에서 알 수 있는 것처럼 1차 모우드가 전체 슬로싱 운동을 지배하고 있음을 알 수 있다.

## 4. LNG 원통용기의 자유진동모우드 해석

LNG 원통용기 내의 유체 슬로싱 특성을 알아보기 위해 슬로싱 모우드 계산을 ANSYS로 수행하였다. 원통용기의 제원은 외부직경(D)이 68 m, 용기 높이 31.2m, 두께는 상부 1.0 cm에서 하부 2.2 cm 까지 변한다. ANSYS 해석에서는 그림 1과 같이 X,Y 대칭구조인 용기의 절반만 모델링하고 수평방향 한쪽과 수직방향의 모우드만 고려하였다. 사용한 유한요소의 종류로, 내부유체는 FLUID 80 유체요소이며 한요소당 8절점을 가지고, 용기는 STIF 63 셸요소로 한요소당 4절점을 갖는다. 용기와 유체의 물성치와 질량은 다음과 같으며, 실제 용기구조물은 0.5Hz로 면진설계된다.

	용기구조물	유체	*면진베어링 수평강성 = 270 x 10 <sup>6</sup> N/m
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	8002	480	
탄성계수(Pa)	210X10 <sup>9</sup> (Young's Modulus)	1.0X10 <sup>9</sup> (Bulk Modulus)	
포아송비	0.3	-	
점성계수(Ns/m <sup>2</sup> )	-	1.131X10 <sup>-3</sup>	
모델질량 (10 <sup>4</sup> kg)	15,666	25,331 (29.25m 기준)	

모우드해석에서는 용기내에 채워진 유체의 높이를 13.65 m에서 29.25 m로 변화시키면서 유체 및 용기의 모우드 특성을 비교하였다. 고유치 해석방법으로는 축소자유도(reduced degree) 기법을 이용했으며, 접촉면에서 유체절점을 주절점(master)으로 하였다.

#### 4.1. 슬로싱모우드

표 2에서는 유체의 채워진 정도에 따라 비면진(fixed base)구조와 면진(seismic isolation)구조에 대하여 ANSYS로 계산한 슬로싱 모우드 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서는 유체가 29.25m 채워진 경우의 슬로싱모우드 형태를 나타낸 것으로, 용기의 움직임이 전혀 없는 용기가 강체처럼 작용하고 있다. 비면진구조에서 유체가 29.25m 채워진 경우의 해석결과에서 1차 슬로싱 모우드의 고유주기는 0.110 Hz로 모우드참여계수가 1.0으로 용기의 슬로싱 모우드를 지배하는 것으로 나타났으며, 2차와 3차 모우드는 모우드참여계수가 각각 1차의 17%와 7% 정도로 낮게 나타났다. 그리고 유체의 높이(H)가 낮아짐에 따라 1차 슬로싱모우드의 고유진동수( $W_s$ )는 작게 되는데, 이는 다음의 Housner의 계산식[5]에서 확인할 수 있다.

$$W_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.67}{D} g \cdot \tanh\left(\frac{3.67}{D/H}\right)}, D=68m, H=29.25\sim 13.65m$$

그러나 유체의 높이 변화에 따른 2차와 3차 슬로싱모우드의 고유진동수는 거의 바뀌지 않은 것으로 나타났다. 그리고 1, 2, 3차 슬로싱모우드의 모우드 참여계수(modal participation factor)의 비율도 크게 바뀌지 않았다. 면진구조에서의 슬로싱모우드의 경향은 비면진경우와 비교시 슬로싱진동수는 거의 동일하나, 모우드참여계수는 작게 나타났다.

#### 4.2. 유체를 포함하는 LNG 용기의 고유진동수

LNG 용기의 고유진동수 계산을, 유체와 용기의 접촉면의 구속조건(coupling condition)에서 주절점(master node)을 유체절점으로하여 수행한 해석결과를 표 3에 나타냈다. 표 3에서 보는 바와 같이 유체가 채워진 정도에 따라 유체가 29.25m인 경우 용기의 1차 굽힘 고유진동수는 2.28 Hz로 나타났고, 유체가 13.65 m 만 채워진 다섯 번째의 경우는 1차 고유진동수 4.15 Hz로 나타났다. 이러한 변화는 유체가 많을수록 유체의 부가질량이 증가되어 용기의 질량증가효과를 발생시킴으로, 유체가 많아지면 고유진동수가 감소하는 예측된 경향을 보이고 있다.

비면진구조에서 용기의 1차 굽힘고유진동수의 참여율의 크기는 슬로싱 1차 모우드보다도 작게 나타났다. 면진구조에서의 용기 1차 굽힘모우드는 3.02Hz로 비면진경우보다 증가되며 모우드참여계수가 매우낮고, 또 면진진동수는 유체높이가 낮아질수록 커져서 29.25m의 경우 0.49Hz에서 13.65m의 경우 0.59Hz로 되며, 모우드참여율은 모두 동일한 큰 값으로 된다. 용기의 1차 고유진동수는 LNG 용기의 설계 면진진동수인 0.5 Hz 보다 높은 곳에 존재하며, 또한 유체의 1차 슬로싱진동수 0.110 Hz와 멀리 떨어져 있기 때문에 슬로싱과의 상호작용 문제가 발생되지 않을 것으로 예측할 수 있다.

### 5. LNG 용기의 지진응답 해석

유체가 29.25m 채워진 LNG 용기에 대하여 지진하중으로 그림 3과 같은 설계응답 가속도스펙트럼을 가했으며, 이 경우의 용기 바닥에 발생하는 반력과 모멘트를 비면진구조와 면진구조에 대하여 각각 계산하였다. 비면진구조의 해석에서는 150개의 모우드를 사용하였는데, 이는 유체 슬로싱 모우드의 대부분과 용기의 1차 모우드를 고려하게 된다. 그리고 면진구조에 대하여는 용기의 1차 모우드가 3.02Hz에서 발생되었으며, 모우드참여율이 면진모우드에 비하여 매우 낮아 큰 영향을 주지 못하였다.

모우드해석에서는 용기내에 채워진 유체의 높이를 13.65 m에서 29.25 m로 변화시키면서 유체 및 용기의 모우드 특성을 비교하였다. 고유치 해석방법으로는 축소자유도(reduced degree) 기법을 이용했으며, 접촉면에서 유체절점을 주절점(master)으로 하였다.

#### 4.1. 슬로싱모우드

표 2에서는 유체의 채워진 정도에 따라 비면진(fixed base)구조와 면진(seismic isolation)구조에 대하여 ANSYS로 계산한 슬로싱 모우드 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서는 유체가 29.25m 채워진 경우의 슬로싱모우드 형태를 나타낸 것으로, 용기의 움직임이 전혀 없는 용기가 강체처럼 작용하고 있다. 비면진구조에서 유체가 29.25m 채워진 경우의 해석결과에서 1차 슬로싱 모우드의 고유주기는 0.110 Hz로 모우드참여계수가 1.0으로 용기의 슬로싱 모우드를 지배하는 것으로 나타났으며, 2차와 3차 모우드는 모우드참여계수가 각각 1차의 17%와 7% 정도로 낮게 나타났다. 그리고 유체의 높이(H)가 낮아짐에 따라 1차 슬로싱모우드의 고유진동수( $W_s$ )는 작게 되는데, 이는 다음의 Housner의 계산식[5]에서 확인할 수 있다.

$$W_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.67}{D} g \cdot \tanh\left(\frac{3.67}{D/H}\right)}, D=68m, H=29.25\sim 13.65m$$

그러나 유체의 높이 변화에 따른 2차와 3차 슬로싱모우드의 고유진동수는 거의 바뀌지 않은 것으로 나타났다. 그리고 1, 2, 3차 슬로싱모우드의 모우드 참여계수(modal participation factor)의 비율도 크게 바뀌지 않았다. 면진구조에서의 슬로싱모우드의 경향은 비면진경우와 비교시 슬로싱진동수는 거의 동일하나, 모우드참여계수는 작게 나타났다.

#### 4.2. 유체를 포함하는 LNG 용기의 고유진동수

LNG 용기의 고유진동수 계산을, 유체와 용기의 접촉면의 구속조건(coupling condition)에서 주절점(master node)을 유체절점으로하여 수행한 해석결과를 표 3에 나타냈다. 표 3에서 보는 바와 같이 유체가 채워진 정도에 따라 유체가 29.25m인 경우 용기의 1차 굽힘 고유진동수는 2.28 Hz로 나타났고, 유체가 13.65 m 만 채워진 다섯 번째의 경우는 1차 고유진동수 4.15 Hz로 나타났다. 이러한 변화는 유체가 많을수록 유체의 부가질량이 증가되어 용기의 질량증가효과를 발생시킴으로, 유체가 많아지면 고유진동수가 감소하는 예측된 경향을 보이고 있다.

비면진구조에서 용기의 1차 굽힘고유진동수의 참여율의 크기는 슬로싱 1차 모우드보다도 작게 나타났다. 면진구조에서의 용기 1차 굽힘모우드는 3.02Hz로 비면진경우보다 증가되며 모우드참여계수가 매우낮고, 또 면진진동수는 유체높이가 낮아질수록 커져서 29.25m의 경우 0.49Hz에서 13.65m의 경우 0.59Hz로 되며, 모우드참여율은 모두 동일한 큰 값으로 된다. 용기의 1차 고유진동수는 LNG 용기의 설계 면진진동수인 0.5 Hz 보다 높은 곳에 존재하며, 또한 유체의 1차 슬로싱진동수 0.110 Hz와 멀리 떨어져 있기 때문에 슬로싱과의 상호작용 문제가 발생되지 않을 것으로 예측할 수 있다.

### 5. LNG 용기의 지진응답 해석

유체가 29.25m 채워진 LNG 용기에 대하여 지진하중으로 그림 3과 같은 설계응답 가속도스펙트럼을 가했으며, 이 경우의 용기 바닥에 발생되는 반력과 모멘트를 비면진구조와 면진구조에 대하여 각각 계산하였다. 이들결과를 용기모우드에 대하여는 표 4와 표 5에, 슬로싱모우드에 대하여는 표 6과 표 7에 나타냈다. 비면진구조의 해석에서는 150개의 모우드를 사용하였는데, 이는 슬로싱모우드의 대부분과 용기의 1차 모우드를 고려하게 된다. 그리고 면진구조에 대하여는 용기의 1차 모우드가 3.02Hz에서 발생되었으며, 모우드참여율이 면진모우드에 비하여 매우 낮아 큰 영향을 주

지 못하였다.

수평방향 1축 가진만 고려할 때, 비면진구조에서 용기의 1차 굽힘모우드에서의 유체자유표면의 최대변위가 82mm로 계산되었고, 하단에 작용하는 전단력과 모멘트는 1차 모우드에서 각각 88205 KN과 191.0 KNm로 나타났다. 그리고 유체 슬로싱모우드에서의 유체 자유표면의 최대변위는 630mm로 계산되었고, 하단에 작용하는 전단력은 1차 모우드에서 2561 KN로 나타났다.

면진구조에서 용기의 1차 굽힘모우드에서의 유체자유표면의 최대변위가 1.46mm로 계산되었고, 하단에 작용하는 전단력과 모멘트는 1차 모우드에서 각각 2444 KN과 3.56 KNm로 나타났다. 그리고 슬로싱모우드에서의 유체 자유표면의 최대변위는 면진진동수에서 704mm로 계산되었고, 하단에 작용하는 전단력은 슬로싱 1차 모우드와 면진구조에서 각각 137.8 KN과 30,344KN으로 나타났다. 이러한 결과는 단순 슬로싱현상의 영향이 크게 작용하지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 모멘트는 면진구조물에서는 거의 발생되지 않았다.

## 6. 결 론

수직방향으로 원통형 용기에 채워진 액체의 슬로싱 현상을 규명하기 위하여 ANSYS 범용구조 해석 프로그램으로 선형범위에서 슬로싱 모우드를 해석하는 절차를 정립하였다. 이를 위해 단순형 원통용기에 대해 ANSYS를 사용한 해석결과와 문헌에 나와 있는 이론 및 실험결과와 비교를 통하여 해석방법의 신뢰성을 확인하였다.

LNG 원통용기에 대해서는 유체 높이가 낮아짐에 따라 유체의 슬로싱 고유진동수는 Housner의 이론해와같이 고유진동수가 작아졌으며, 면진된 구조에서도 슬로싱고유진동수의 특성에는 변화가 거의 없었다. 용기의 1차 고유진동수는 유체높이에 따라 유체의 부가질량이 바뀌므로 유체의 높이가 낮아질수록 커짐을 알 수 있었다.

비면진구조를 갖는 LNG 용기에 대한 설계지진의 가속도스펙트럼 가진시의 바닥면에 발생하는 전단력과 모멘트를 계산한 결과, 1차 용기모우드가 전단력 및 모멘트에 대부분의 영향을 미치며 유체구조물 상호작용영향으로 구조물에 미치는 영향은 슬로싱진동수와 용기의 고유진동수가 근접하지 않았기 때문에 이들의 상호작용이 크지 않았다. 또한 0.5 Hz로 면진시킬 경우에도 슬로싱 진동수가 면진진동수보다 낮은 0.11Hz에 존재하기 때문에 슬로싱의 영향이 크지 않으며 또한 1차용기 모우드 3.0Hz도 면진모우드 0.49Hz에서 떨어져 큰 영향이 없어 비면진구조보다 전단력 및 모멘트가 매우 감소된다. 그러나 슬로싱에 의한 변위는 비면진 및 면진에 상관없이 슬로싱 1차모우드가 가장 큰 영향을 미치며 면진시 유체변위가 더 크게 된다.

면진구조물은 장주기 지진하중을 받게 될 경우에 슬로싱 현상이 더 커질 것으로 예상되며 이에 대한 지속적인 연구와 내부구조물을 갖는 용기의 슬로싱영향에 대한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. ASCE 4-86, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, September 1986.
2. 윤정방 등, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures," 전산구조공학 제 5권 제 4호, 1992.
3. Lee, D.-G, et al, "Seismic analysis of base isolated spent fuel storage structures," Transactions of the 13th International Conference on SMiRT, August 13-18, 1995.
4. ANSYS User's Manual for Revision 5.1, Swanson Analysis Systems, Inc., 1994.
5. Y. Hagiwara, Y. Masuko and C. Kurihara, "Development of a 3-D Vibration Analysis Code for Fluid-Structure Coupled Systems and Seismic Sloshing Analyses of Pool-Type FBR,"

표 1. 단순 원통형용기 내의 자유액면 슬로싱 모우드

슬로싱 모우드	Housner 이론	CRIEPI 실험	ANSYS 결과	
			고유진동수	참여율
1 (Hz)	0.58	0.58	0.572	1.0
2 (Hz)	1.09	1.09	1.086	0.178
3 (Hz)	1.38	1.38	1.384	0.074

표 2. LNG 용기내 유체높이에 따른 비면진 및 면진구조에서의 슬로싱 진동수 비교  
(비면진구조)

유체높이 (m)	29.25	25.35	21.45	17.55	13.65
	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)
모우드번호					
1	0.110 (1.0)	0.108 (1.0)	0.104 (1.0)	0.098 (1.0)	0.0896 (1.0)
2	0.197 (0.170)	0.197 (0.176)	0.197 (0.183)	0.197 (0.192)	0.194 (0.209)
3	0.253 (0.073)	0.253 (0.076)	0.253 (0.079)	0.253 (0.082)	0.252 (0.091)

(면진구조)

유체높이 (m)	29.25	25.35	21.45	17.55	13.65
	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)
모우드번호					
1	0.110 (0.722)	0.106 (0.746)	0.103 (0.754)	0.098 (0.744)	0.089 (0.655)
2	0.197 (0.136)	0.197 (0.143)	0.197 (0.148)	0.196 (0.153)	0.194 (0.147)
3	0.253 (0.067)	0.253 (0.068)	0.253 (0.070)	0.253 (0.071)	0.262 (0.069)
면진모우드	0.49 (1.0)	0.52 (1.0)	0.55 (1.0)	0.581 (1.0)	0.590 (1.0)

표 3. 유체높이에 따른 비면진 및 면진구조에서의 LNG 용기의 1차 고유진동수

유체높이(m)	29.25	25.35	21.45	17.55	13.65
	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)	고유치(Hz) (참여율)
비면진구조	2.279 (0.988)	2.557 (0.888)	2.964 (0.787)	3.480 (0.690)	4.154 (0.582)
면진구조	3.02 (0.024)	4.172 (0.0023)	()	()	4.476 (0.007)

표 4. 비면진시 용기모우드에 대한 지진가속도응답 해석결과

용기 모우드	고유진동수 (Hz)	모우드 계수	하단전단력 1000 N (Fx)	하단모멘트 1000 N.m (My)	최대변위 mm	
					유체	용기
1	2.279	-127	88,205	191.0	81.64	24.10
2	3.933	-6.264	1790	23.03	3.853	1.21
3	4.545	0.490	19.7	0.152	0.08	0.229
SRSS (Sloshing Mode 제외)			88,223	37.0	71.88	24.15

표 5. 면진시 용기모우드에 대한 지진가속도응답 해석결과

용기 모우드	고유진동수 (Hz)	모우드 계수	전단력(절점) 1000 N Fx	최대모멘트(절점) 1000 N.m My	최대변위(절점) mm	
					유체	용기
1	3.02	-2.737	2444	3.56	1.46	0.34
2	4.00	0.283	131.9	-1.1	0.18	0.04
3	4.894	0.05	15.91	0.14	0.022	0.01
면진모우드	0.49	1089	30,344	57.9	704.0	

표 6. 비면진시 슬로싱 모우드에 대한 지진가속도응답 해석결과

슬로싱 모우드	고유진동수 (Hz)	모우드 계수	하단전단력 1000 N	하단모멘트 1000 N.m	유체최대변위 mm
1	0.111	1536	-2561.0	3.8	629.76
2	0.1974	270.6	-253.3	0.152	275.2
3	0.2527	116.2	-77.5	-0.04	184.5

표 7. 면진시 슬로싱모우드에 대한 지진가속도응답 해석결과

슬로싱 모우드	고유진동수 (Hz)	모우드 계수	하단전단력 1000 N	하단모멘트 1000 N.m	유체최대변위 mm
1	0.110	1650	137.8	4.0	649.5
2	0.1974	315.9	32.3	0.22	321.6
3	0.2525	154.6	20.47	0.086	240.0

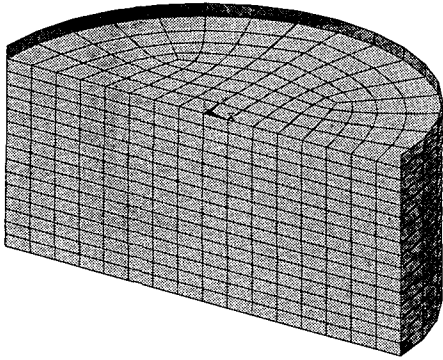


그림 1. 슬로싱해석을 위한 유한요소모델

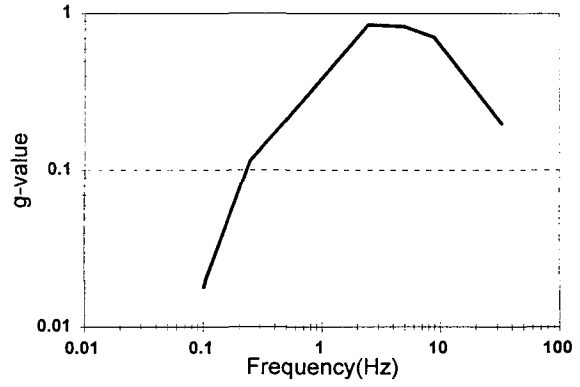


그림 3. 지진입력 가속도스펙트럼 (2%감쇠)

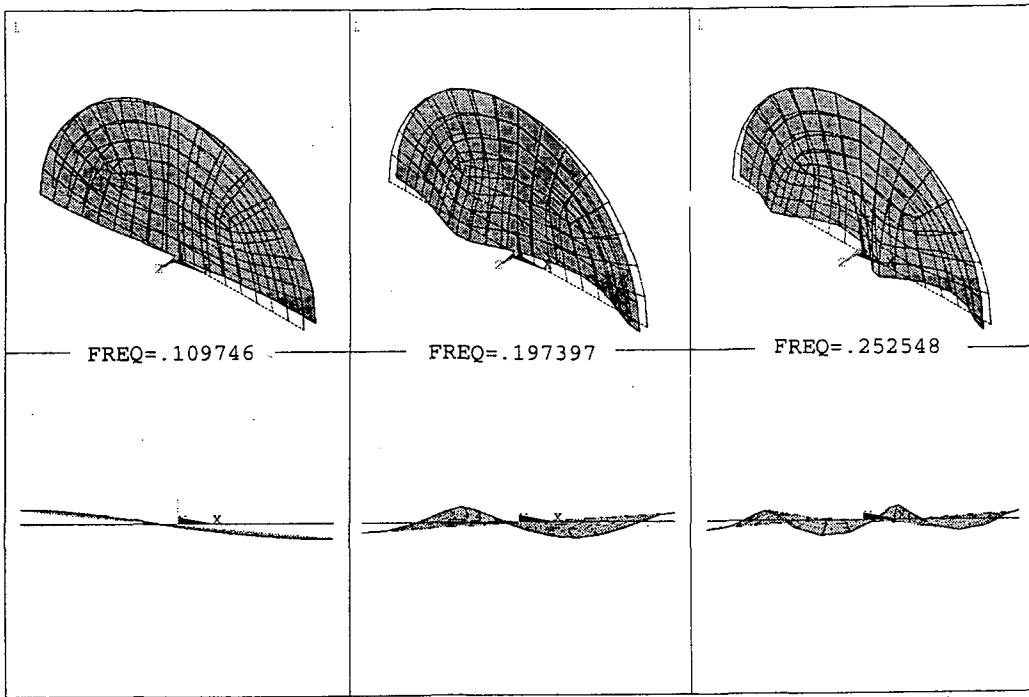


그림 2. 슬로싱 1, 2, 3차 모우드(유체높이 29.25m)