2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 KALIMER 원자로용기 내부 유체의 슬로싱 특성 평가

Evaluation on the Sloshing Characteristics of Reactor Vessel Internal Fluid of KALIMER Liquid Metal Reactor

손재홍,우호길
충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

이재한,유봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 KALIMER 원자로용기 및 내부구조물의 구조건전성 평가에 있어서 지진발생 동안의 슬로싱 거동을 평가하기 위한 신뢰성 있는 해석기법을 확보하는 것은 중요한 사항이며 이를 위해서는 슬로싱 거동의 기본 동특성이 선행적으로 평가되어야 한다. 본 연구에서는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 슬로싱 해석기법을 정립하고, 단순모델의 해석 결과를 계산식 및 참고자료의 실험결과와 비교하여 해석 기법의 신뢰성을 검증하였다. 이를 이용하여 원자로 내부구조물의 설계변수의 변화에 따른 슬로싱 고유 진동수의 변화 특성을 분석하였고 KALIMER 원자로용기 내부 소듐유체의 슬로싱 현상을 평가하였다.

Abstract

It is important to establish a highly accurate technique of evaluating the sloshing behavior during earthquake for structural integrity of KALIMER reactor vessel and internals. The analysis procedure of sloshing modes is established by finite element computer program ANSYS, and the effectiveness of the sloshing analysis procedure used is confirmed by comparison with theoretical and experimental results. By using this method, the relation between the design variables of reactor internal components and the characteristics of sloshing modes is analyzed and the sloshing characteristics of sodium fluid inside KALIMER reactor vessel is evaluated.

1. 서 론

KALIMER 원자로용기 및 내부구조물의 구조건전성 평가에 있어서 지진발생 동안의 액체소듐의 슬로싱 거동을 평가하는 정확한 해석기법을 확보하는 것은 필수적으로 요구되며 이를 위해서는 슬로싱 운동의 기본적인 동특성이 선행적으로 평가되어야 한다. 유체 저장 구조물에 담겨진 유체의 슬로싱 영향을 평가하는 방법은 ASCE 4-86[1] 등의 설계지침에 기술되어 있으나 복잡한 내부 구조물을 포함하는 구조물에 대해서는 직접적인 적용이 이루어질 수 없는 상황이다. 수직방향으로 세워진 사각형의 유체저장 구조물에 대한 유체의 슬로싱 영향을 평가하기 위한 해석방법개발 및 연구가 국내에서도 수행된 바 있다[2,3]. 또한 본 연구에서 사용한 ANSYS 프로그램을 통한 선형범위 내에서의 슬로싱 모우드 해석 절차를 정립한 연구도 발표되었다[4].

본 연구에서는 첫째로 단순원통모델의 해석 결과를 계산식 및 참고자료의 실험결과와 비교 검증하여 해석 기법의 신뢰성을 검증하고 둘째로 단순 원통 모델의 내부 중심에 원통 실린더를 포함시킨 모델에 대해서는 주요 설계 파라미터의 변화 특성에 따른 슬로싱 고유진동수의 변화 특성을 분석하였다. 최종 모델에서는 원자로 노심을 제어하는 제어봉의 지지와 측정센서의 안내를 수행하는 상부내부구조물(UIS)과 각 4개씩 존재하는 IHX 및 EMP 구조물을 포함하는 실제 KALIMER 개념설계 모델을 작성하여 슬로싱 운동의 동특성을 평가하였다.

2. 해석 절차

해석 프로그램으로는 범용유한요소 프로그램인 ANSYS[5]를 사용하였으며 유체의 압축성을 나타내는 체적 탄성계수를 물성치로 갖는 3차원 유체요소(FLUID80)를 통하여 유체를 모델링 하였다. 8개의 절점으로 구성된 FLUID80 유체요소는 단면 유동률이 배제된 저장용기의 유체를 모델링하기 위한 요소로서 절대좌표 z=0 보다 아래에 존재하고 중력가속도는 z=0 좌표상에 존재하도록 하여 자유액면에 중력스프링을 위치시키는 효과를 주어 자유액면이 중력에 의한 복원력 특성을 갖도록 한다. 유체를 제외한 모든 구조물은 쉘 요소로 나타내었고 유체와 구조물이 만나는 부분들에 대해서는 두 요소 절점들이 같은 좌표점을 갖도록 하고, 두 절점에 대해 벽면의 법선 방향으로 자유도를 상호연계 시켜주었다. 특히 해석 모델링에서 IHX 구조물과 유체가 만나는 부분에서는 각각의 IHX 중심위치가 국부원통좌표의 원점에 위치하도록 좌표계의 변환이 요구된다. 해석기법으로는 유체의 자유 액면에 위치한 절점들을 주절점으로 갖는 축소자유도 기법을 이용하여 해석을 수행하였다.

3. 슬로싱 해석

해석 내용은 단순 원통형 구조에 대하여 단순모델 I 을 설정하고 이에 대한 슬로싱 고유진동수 해석을 통해서 해석의 신뢰성을 확보하였으며, 내부 실린더를 포함하는 구조물에

대해서는 직경 비의 변화에 따른 슬로싱 고유진동수 값의 변화 특성을 분석하였다. 그리고 최종 모델에서는 UIS와 IHX 및 EMP를 포함하는 경우에 대하여 두 종류의 대칭모델을 설정하고, 슬로싱 해석을 수행하였다.

3.1 단순모델 I

계산식 및 실험결과 값이 확보된 그림 1 과 같은 단순 원통형 모델의 해석을 통하여 해석 기법의 신뢰성을 검증하였다. 단순모델의 원통모델 직경은 2.23m, 유체 자유액면 높이는 0.7m로 참고문헌상의 모델과 제원을 일치시켰고 Housner 계산식은 다음과 같다[6].

$$Ws = \frac{1}{2p}\left(\frac{3.67}{D}g\cdot\tanh\left(\frac{3.67}{D/H}\right)\right)^{1/2}$$

D : 원통의 직경, H : 유체높이

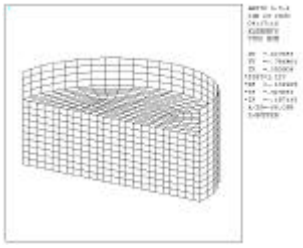


그림 1. 단순모델 I

표 1. 단순모델 I에 대한 슬로싱 해석 결과

슬로싱 모드 (Hz)	이론	실험	ANSYS	
			고유진동수	참여율
1	0.58	0.58	0.576	1.00
2	1.09	1.09	1.058	0.29
3	1.38	1.38	1.309	0.15

단순모델 I에 대한 ANSYS 프로그램으로 구한 슬로싱 고유진동수 해석 결과와 비교를 위한 이론 해 및 일본 중앙전력연구소에서 수행한 실험결과를 표 1에 나타냈다. 해석결과의 모우드 참여계수에서 1차 모우드가 전체 슬로싱 운동을 지배하고 있음을 알 수 있고 모우드 형태는 그림 2에 나타냈다.

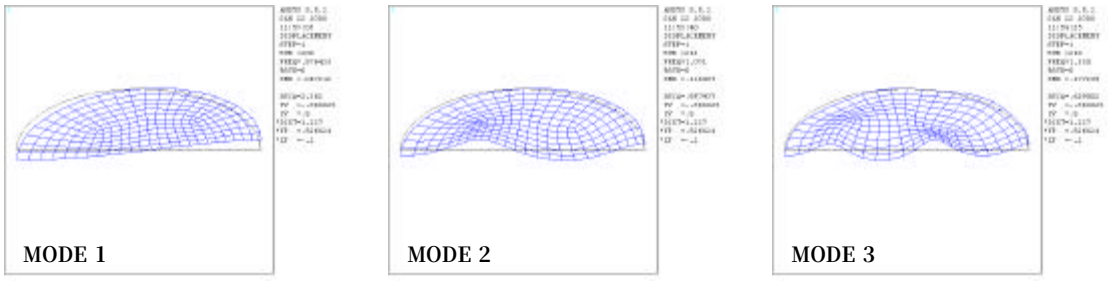


그림 2. 단순모델 I의 슬로싱 모우드

3.2 단순모델 II

상부내부구조물(UIS)은 원자로 노심을 제어하는 제어봉의 지지와 측성 센서의 안내를 제공하는 구조물로서 원자로 헤드에 부착되어 원자로 용기의 중앙에 위치하고 있고 내부 유체에 약 9m 정도 잠겨있다. 이러한 상부내부구조물에 대한 슬로싱 운동의 동특성 영향을 해석에 고려하기 위하여 그림 3과 같은 단순모델 II를 제시하였다. 해석결과 표 2에 나타난 바와 같이 내부 실린더를 포함한 구조물에서는 단순모델 I 과는 달리 2차 모우드가 슬로싱 운동을 지배함을 알 수 있었고 고유진동수 값도 0.58 Hz 에서 0.52 Hz 로 낮아진 결과를 확인할 수 있었다. 단순모델 II 의 슬로싱 모우드 형상은 그림 4에 보이는 바와 같이 단순모델 I 에서의 모우드 형상과 큰 차이는 보이지 않았다. 내외부 원통의 직경 비에 따른 슬로싱 고유진동수의 변화특성을 비교하기 위하여 외부 원통의 직경은 고정된 상태에서 내부 원통 실린더 직경을 변화시켜가며 슬로싱 고유진동수 해석을 수행하였고 이의 결과를 그림 5에 나타냈다. 요소 크기의 변화에 따른 해석결과의 오차를 발생시키지 않기 위해 각각의 유한요소모델의 요소크기는 일정하게 유지되도록 입력 프로그램을 작성하였다. 그림 5에서 확인되듯이 내부 실린더의 직경이 증가함에 따라 1차 모우드의 고유진동수는 증가하는 반면 2차 고유 진동수는 감소하는 경향을 나타내었다.

표 2. 단순모델 II 의 슬로싱 해석 결과

슬로싱 모드 (Hz)	ANSYS	
	고유진동수	참여율
1	0.525	0.79
2	1.024	1.00
3	1.298	0.34

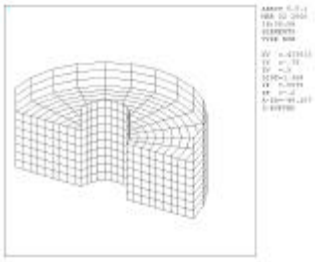


그림 3. 단순모델 II (D/d=4)

그림 4. 단순모델 II 에 대한 슬로싱 모우드

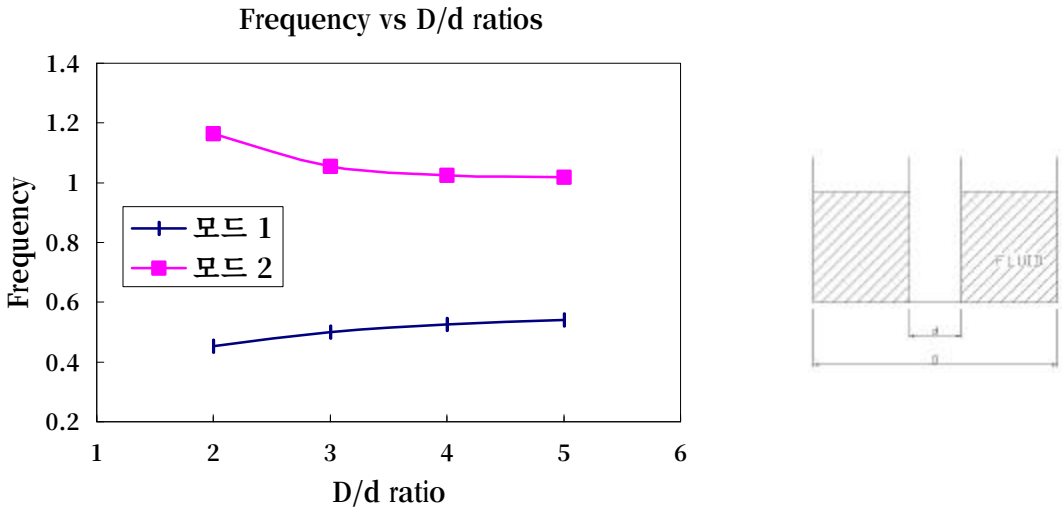


그림 5. 실린더 직경 비의 변화에 따른 슬로싱 고유 진동수 값의 변화

3.3 내부 구조물을 포함한 구조물의 슬로싱 해석

슬로싱 모우드 해석을 수행하기 위한 최종 모델은 그림 6에 나타난 바와 같이 상부내부 구조물과 IHX 및 EMP 구조물들을 포함하며 본 연구에서는 두 종류의 대칭구조 모델에 대하여 해석을 수행하였다. 유체와 구조물이 만나는 부분에 대해서는 서로 공유하는 절점의 자유도를 벽면의 수직방향으로 상호연계(coupling)를 시켜주었으며 이때 국부원통좌표계의 원점이 각 실린더의 중심에 위치해야 한다.

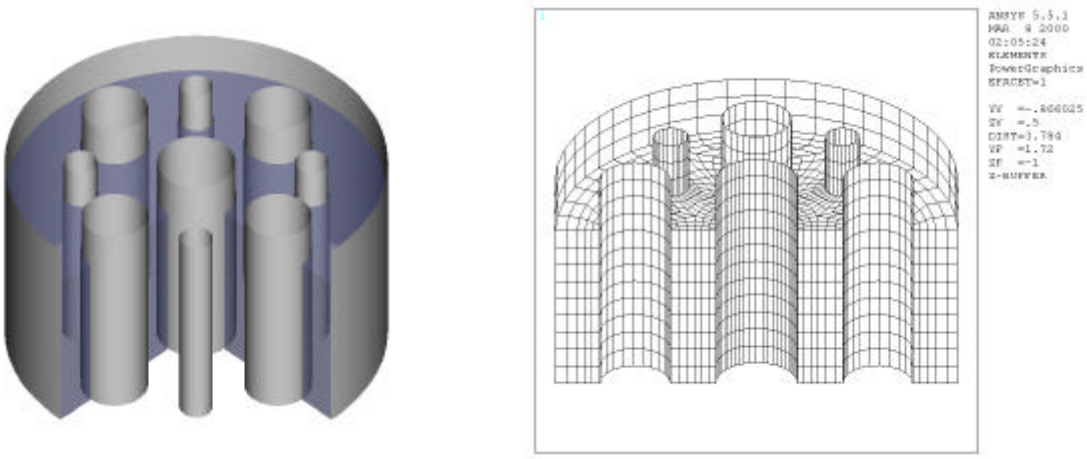
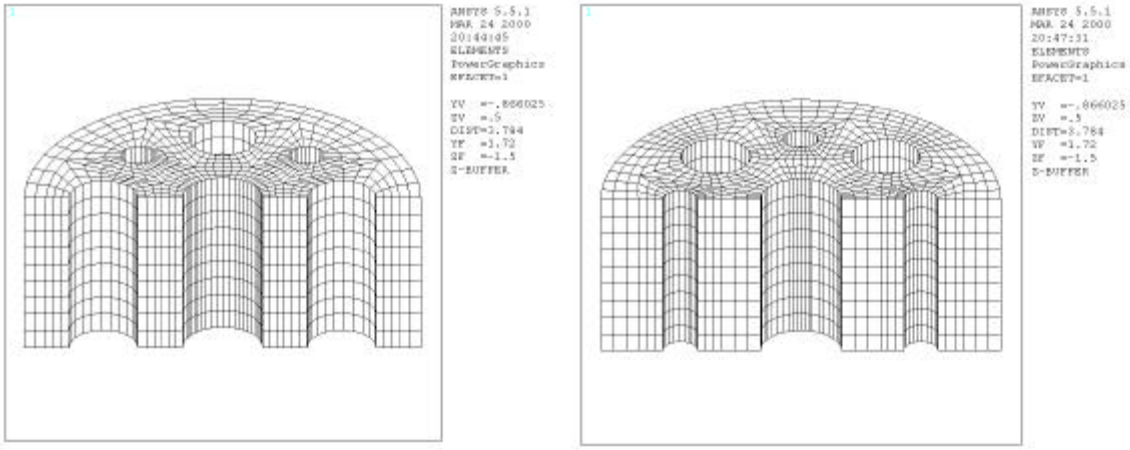


그림 6. 유체 및 내부 구조물을 고려한 원자로의 단순 모델 및 유한요소모델



대칭모델1 대칭모델2

그림 7. 두 종류의 대칭모델에 대한 유한요소모델

IHX 및 EMP 구조물을 배제한 모델에서의 1차 고유진동수 해석 결과가 0.4 Hz가 나타냈다. 그러나 이를 포함한 모델에서는 표 3에 나와있는 결과에서 보듯이 1차 고유진동수 값은 0.3 Hz이고, 두 종류의 대칭모델에서의 고유진동수 값은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 또한 내부 실린더를 포함한 단순모델 II에서 2차 모우드가 슬로싱 운동을 지배하고 있는 반면 최종모델에서는 단순모델 I과 같이 1차 모드가 전체의 슬로싱 운동을 지배하고 있음을 표 3의 참여계수 값에서 확인할 수 있다.

표 3. 최종모델에 대한 슬로싱 해석 결과

MODEL	MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
대칭모델1	1	0.304730	3.2816	-75.514	1.000000	5702.42
	2	0.506135	1.9758	4.8011	0.063579	23.0506
	3	0.536354	1.8644	5.7548	0.076207	33.1172
	4	0.632131	1.5820	2.1942	0.029056	4.81433
대칭모델2	1	0.306638	3.2612	-74.941	1.000000	5616.16
	2	0.502118	1.9916	3.6078	0.048142	13.0160
	3	0.545851	1.8320	-4.3568	0.058136	18.9814
	4	0.629007	1.5898	-2.5961	0.034641	6.73957

4. 결 론

KALIMER 구조물 내부유체의 슬로싱 영향을 평가하기 위하여 ANSYS 범용구조해석 프로그램을 사용하여 슬로싱 모우드를 해석하였다. 이를 위해 단순형 원통용기 모델에 대한 ANSYS 해석결과와 Housner 계산식 및 일본 중앙전력연구소 실험결과와의 비교를 통하여 해석방법의 신뢰성을 확인하였다. 단순모델 II에서는 수직 방향의 내부 실린더를 원통의 중앙에 위치시켜 직경 비에 따른 슬로싱 모우드의 변화 특성을 분석하였다. 해석결과 내부 실린더의 유무에 따라 전체의 슬로싱의 지배모우드가 동일하지 않음을 확인할 수 있었다.

최종모델에서는 상부내부구조물과 IHX 및 EMP를 고려하여 해석을 수행하였으며 1차 고유진동수가 UIS만 고려한 경우의 0.4 Hz 보다 낮은 0.3 Hz에서 거동함을 알 수 있었고 1차 모우드가 슬로싱 운동을 지배함을 확인할 수 있었다. 그리고 액체금속로 KALIMER 원자로 용기 내부에 더 많은 원통이 존재하는 경우 1차 고유진동수가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이러한 슬로싱 고유진동수 변화특성의 해석결과를 토대로 차후 지진응답해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. ASCE 4-86, “Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Structures”, September 1986.
2. 윤정방 등, “Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures”, 전산 구조공학회 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. 이재한 등, “Analysis of Sloshing and Seismic Response for Cylindrical Vessel Containing Fluid”, 전산 구조공학회 학술발표논문집, 1996.
5. ANSYS User’s Manual for Revision 5.1, Swanson Analysis Systems, Inc., 1994.
6. Y. Hagiwara, Y. Masuko and Kurihara, “Development of a 3-D Vibration Analysis Code for Fluid-Structure Coupled Systems and Seismic Sloshing Analyses of Pool-Type FBR”,CRIEPI, Report No. U90009, 1990.

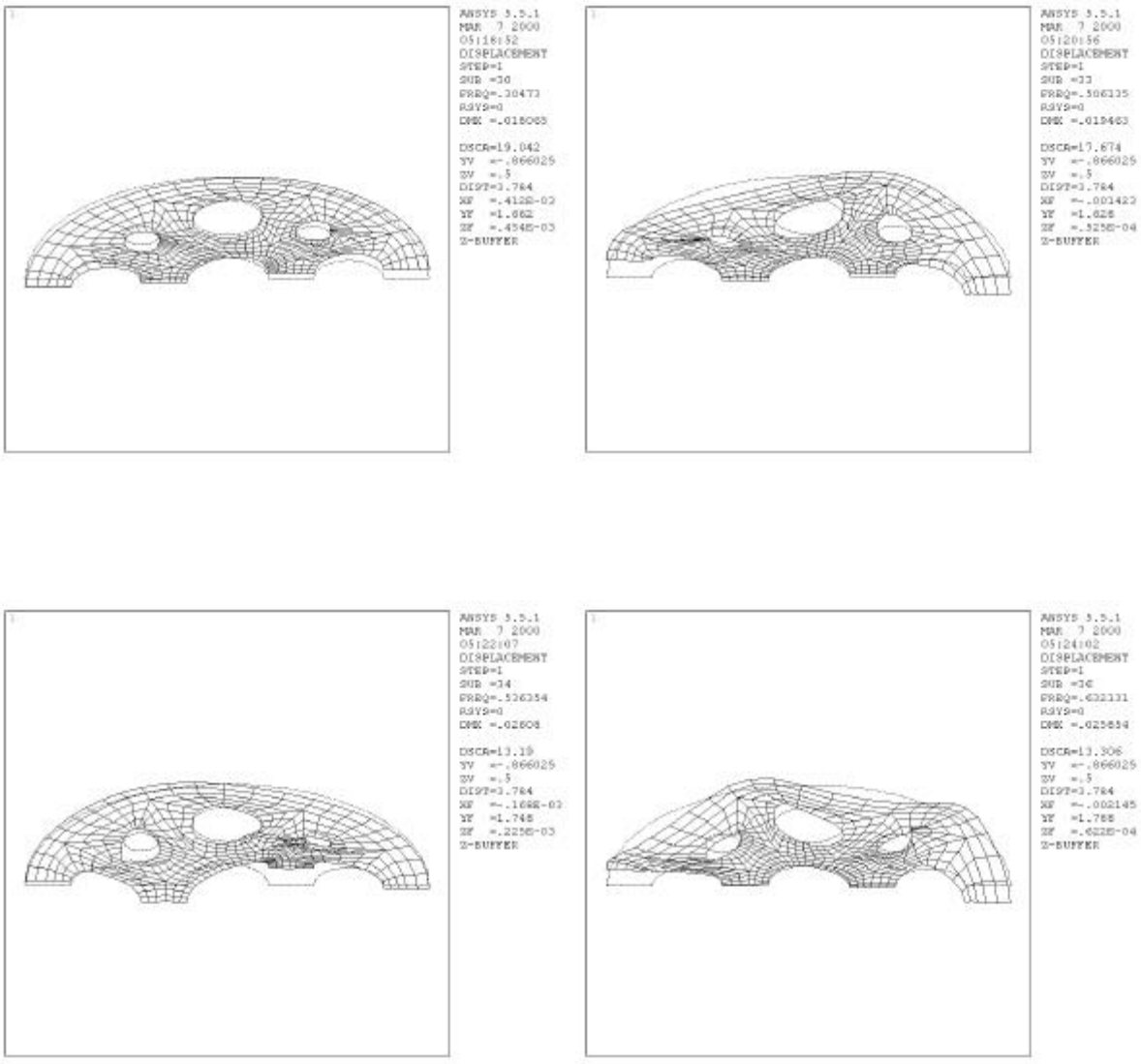


그림 8. 대칭모델 1에 대한 슬로싱 모우드

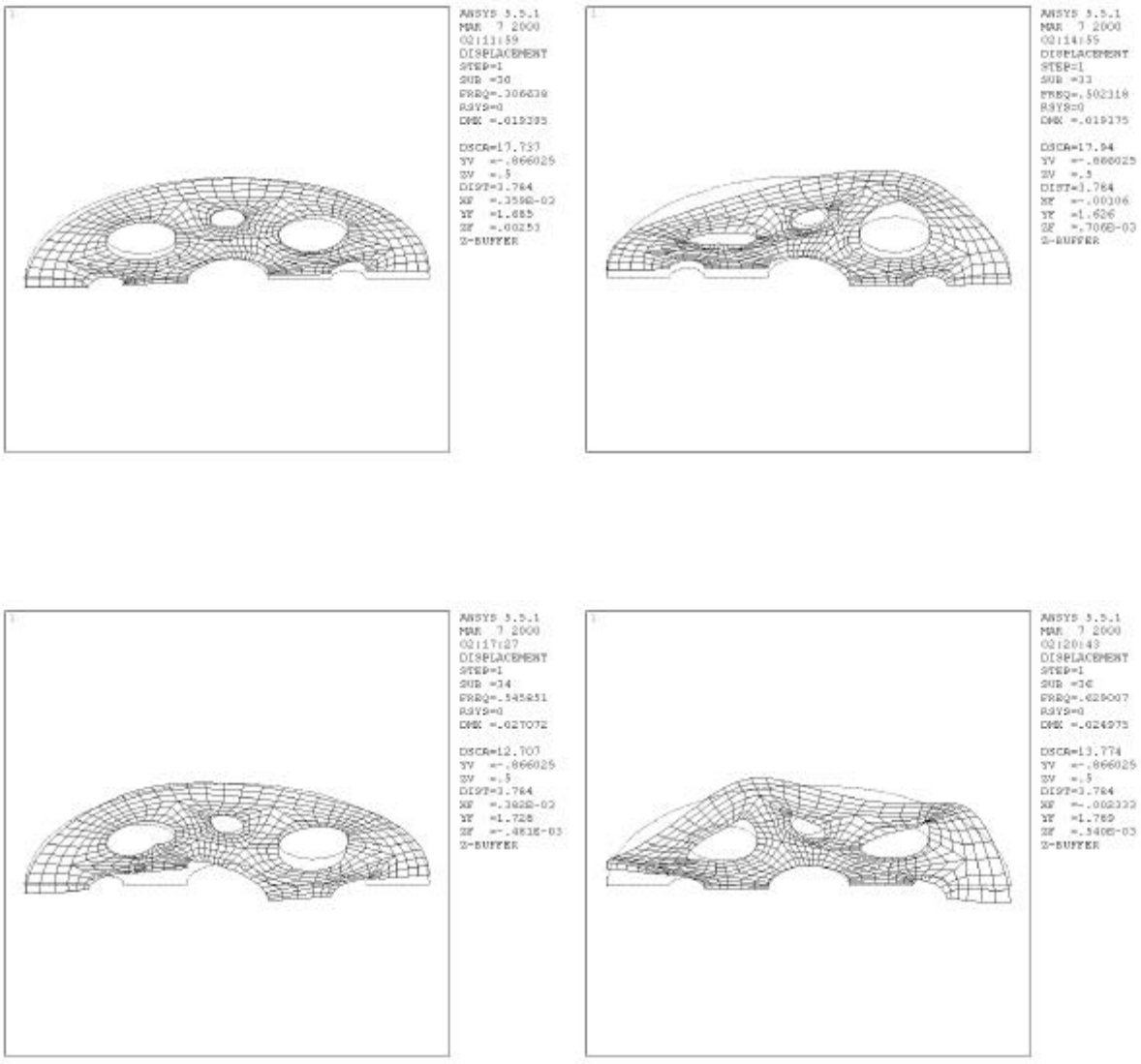


그림 9. 대칭모델 2에 대한 슬로싱 모우드