

정지 유체 내에 있는 회전시료조사대의 진동해석 및 지지부의 응력해석

김성균 · 이동규* · 이근우* · 정운수* · 박진호*

한국원자력연구소, *한국원자력연구소

Vibration Analysis of Rotary Specimen Rack (RSR) in a Still Fluid and Stress Analysis of Clamp Part of RSR

Kim Sung-Kyun, Lee Dong-Kyu*, Lee Kune-Woo*, Jung Un-Soo* and Park Jin-Ho*

Korea Atomic Energy Research Institute, *Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

본 논문에서는 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 회전시료조사대의 진동특성을 공기중 및 수중에서 평가하였다. 수중에서 진동해석에서 사용된 추가질량은 Blevins가 제시한 수식을 이용하여 계산하였다. 본 논문에서 제시한 결과의 타당성을 확인하기 위하여 구해진 결과는 이론적인 식을 사용해 구한 결과와 비교하였다. 유체의 추가질량 효과 때문에 회전시료조사대의 고유진동수는 공기중에서 보다 수중에서 낮아짐을 확인할 수 있었다. 그리고 회전시료조사대의 고정에 필요한 클램프를 설계하기 위하여 클램프의 압력에 대한 회전시료조사대의 등가응력 및 변위를 계산하였다.

Abstract — In this paper, in-air and in-water vibration characteristics of Rotary Specimen Rack (RSR) are estimated through 3D finite element modeling by using ANSYS software. Added mass is calculated by using Blevins' equation. To confirm the reasonability of the results presented in this study, obtained results are compared to those of using a theoretical equation. It is confirmed that in-water natural frequencies of the RSR are lower than in-air ones due to the added mass effect of the fluid. Also, to design clamp which needs to fix RSR, Von-Mises stress and displacement of RSR to clamp pressure are calculated.

1. 서 론

국내 최초의 연구용 원자로 1, 2호기(KRR-1, 2)는 각각 1962년과 1972년에 가동을 시작하여 국내 원자력 발전에 많은 기여를 하였다. 그러나 하나로의 정상가동으로 효율가치를 상실하고 시설의 노후화로 인해 1995년 두기 모두 가동을 중지하고 1996년 폐로하기로 결정하였다. 현재 원자로 2호기의 주변시설부터 해체작업이 진행되고 있다.

연구로를 해체할 경우 많은 양의 방사성고체폐기물들이 발생하게 되는데 그 중에서 연구로 1, 2호기에 있는 3개의 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack)는 내부의 스테인레스스틸 부품 등이 중성자 조사에 의한 방사화로 준위가 높은 것으로 평가되었으며, 폐기물 분류기준(IAEA Safty Series ST-1)¹⁾에 의거 중·저준위인 것으로 나타났다. 그러나 평가 오차 및 보수성 등을 고려하

여 회전시료조사대 내부의 스테인레스스틸 부품을 중준위 고체폐기물로 분류하게 되었다. 그림 1은 회전시료조사대의 모습을 보여주고 있다.

현재 회전시료조사대는 총 3개가 있으며, 이중 2개는 연구로 1호기에서 사용된 것으로서 원자로 수조로부터 제거되어 실험수조 내에 보관되어 있고, 연구로 2호기의 회전시료조사대 1개는 2호기 원자로 수조 내에 있다. 연구로 2호기 회전시료조사대는 수중에서 노심으로부터 원격으로 분리한 후 차폐용기에 담아 연구로 1호기 실험수조로 이송하고 여기서 그림 2와 같은 수중분해장비를 설계하여 수중에서 분해, 절단작업을 할 계획이다. 이때 회전시료조사대의 스테인레스스틸 부품은 분리·수거하여 중준위 폐기물로 처리하고, 나머지 알루미늄부품은 저준위폐기물로 처리할 계획이다. 분리된 스테인레스스틸 부품은 연구로 운영시 사용하였던 사용 후 핵연료 이송용기(TIF Cask)에 담아 저장·관리하게 된다.

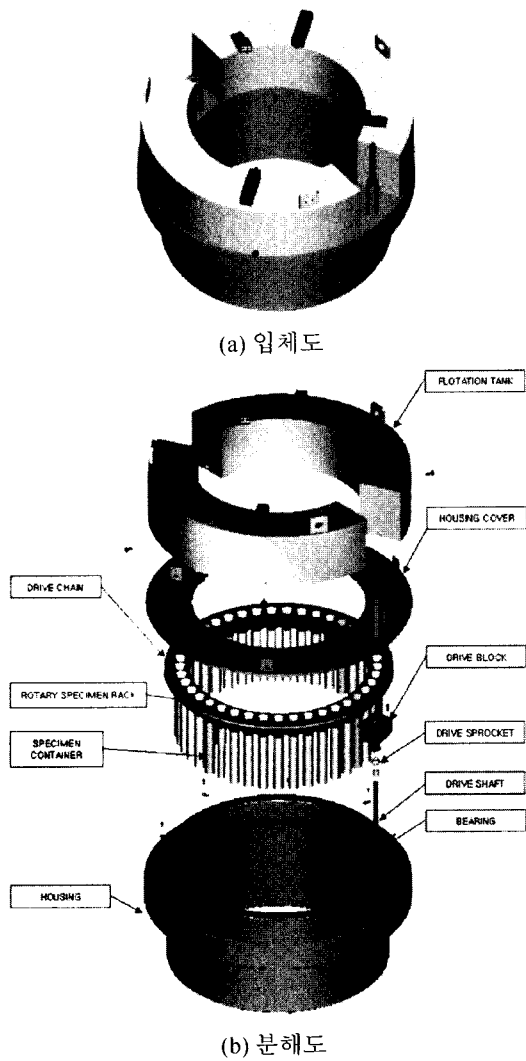


그림 1. 회전시료조사대의 3차원 모델링.

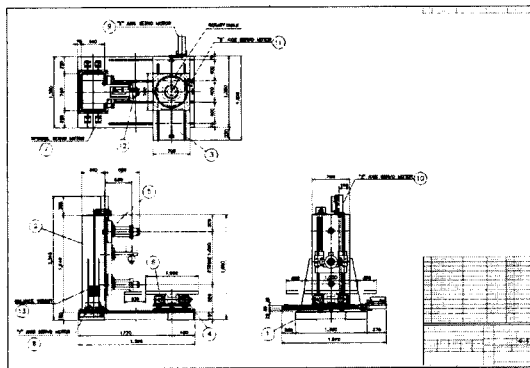


그림 2. 수중 절삭 장비의 설계도면.

수중분해장비를 통하여 회전시료조사대의 스테인레스 스틸 부품을 분리 할 때, 수중분해장비의 공구에 의해서 회전시료조사대를 가진하게 되는데 만약 수중분해장비 공구의 가진 주파수가 회전시료조사대의 고유진동수와 일치하게 된다면 공진이 발생하게 되어 절삭 대상물이 심하게 진동하게 된다. 특히 이러한 진동에 의해 정밀한 작업이 요하는 부분에서 방사능 준위가 높은 스테인레스스틸 부품이 절삭되면 칩과 부유물 등이 수중분해장비 뿐만 아니라 주변환경을 오염시키는 심각한 문제가 야기될 수 있다. 따라서 이러한 공진이 발생하는지 확인하기 위해서는 회전시료조사대의 고유진동수를 확인하는 작업이 선행되어야 한다.

정지유체 내에 있는 구조물의 진동해석은 일반적으로 유체와 구조가 연성 되어있다. 다행이 만약 유체의 밀도가 구조물의 평균밀도 보다 훨씬 작다면, 유체에 대한 연성효과는 소형 구조물에 대해서 고유진동수와 모드형태에 대해 일반적으로 영향을 주지 못한다. 따라서 공기상태($\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$)에서는 대부분의 금속 구조물의 고유진동수 및 모드형상에는 영향을 끼치지 못한다. 그러나 수중($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$)에서는 유체와 구조물의 밀도 차이가 크지 않기 때문에 유체에 대한 연성효과는 선박 및 파이프라인과 같은 해양 구조물의 자유진동에 중요한 역할을 한다.

유체 내에 있는 구조물의 고유진동수는 유체와 구조물 사이의 연성 때문에 대기 중에 있는 구조물의 진동수 보다 낮아지게 된다. 이러한 연성은 구조물의 강성은 변화시키지 않지만 물속에 잠겨있는 구조물의 질량을 증가시킨다.

일반적으로 구조물이 유체 내에서 진동할 때 고유진동수 모드를 구하는 방법에는 lumped mass technique^[2]과 added mass method^[3,5] 등이 사용되고 있다. 또한 finite element와 같이 유체를 연속체로 간주하여 구하는 방법^[6,7]이 제안되었다. lumped mass technique은 구조물의 각 절점에 단순히 유체의 질량을 부가하여 유체의 관성효과를 고려하기 때문에 쉽게 적용할 수 있다. added mass 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫째, 유체와 구조물의 연성 효과를 질량행렬로 간주한다. 이 질량행렬은 제안된 조건아래 이론적으로 구하며 구조물과 유체의 연성효과 때문에 질량행렬은 대각선 이외의 요소를 갖는다. 둘째, 유한요소 방법을 도입하여 유체와 구조물의 질량-연성을 완전히 기술하여 부가질량행렬을 구하는 방법이다. 이 방법은 유체와 구조물의 상호관계를 가장 정확하게 해석할 수 있다. 그러나 다른 어느 방법보다 많은 시간과 경비의 소모를 요구하는 방법이다.

본 연구는 위에서 언급한 added mass 방법 중 첫 번째 방법으로 Blevins^[8]가 제시한 방법에 의해서 유체에

대한 added mass를 이론적으로 구하여 구조물의 질량 행렬에 적용하여 진동해석을 수행하였다.

또한, 수중분해장비 설계시 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프를 설계하였다. 여기서 유압 클램프는 회전시료조사대의 수중절삭작업을 수행하는데 있어서 확실한 지지력을 제공해야 한다. 그러나 너무 무리한 힘을 가하면 회전시료조사대가 부서지거나 파손되어 고방사선 부위가 떨어져 나가 주변을 오염시키는 문제가 발생할 수 있다. 또한 고방사선 부분에 대한 정밀 절삭이 요하는 부분에서는 유압 클램프의 압력에 의한 변형이 작아야만 정밀절삭작업을 수행 할 수 있다. 따라서 유압클램프의 적정 지지력을 구하기 위하여 다음과 같은 조건을 주어 지지력을 계산하였다. 유압 클램프가 가하는 힘에 대한 지지부의 최대 등기응력(Von-Mises Stress)값이 지지부의 재질인 알루미늄의 최대탄성영역을 벗어나지 않아야 하며 탄성영역 내에서 가해질 수 있는 최대의 힘을 회전시료조사대를 고정하기 위한 지지력으로 설정하여 계산하였다. 그리고 해석에서 절삭공구에 의한 절삭력은 고려하지 않았다. 왜냐하면 회전시료조사대의 절삭 작업은 일반공작기계와 같이 많은 양을 절삭하는 작업이 아니라 아주 작은 양을 절삭 깊이도 하여 반복적인 작업을 통해 절삭이 이루어질 계획이므로 절삭공구의 절삭력은 해석에 포함시키지 않았다.

본 논문은 서론에 이어서 2장에는 수중에서의 회전시료조사대 진동해석을 수행하였고 3장에서는 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프의 지지력을 계산하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 수록하였다.

2. 진동해석

2-1. 부가질량 계산

회전시료조사대의 부가질량은 Blevins^[8]가 제시한 원형원통의 부가질량식을 이용하였다.

$$A_p = \alpha \rho \pi a^2 b \tag{1}$$

여기서 A_p 는 회전시료조사대의 부가질량을 나타내고 α 는 실험계수, ρ 는 물의 밀도, a 는 회전시료조사대의 반경, b 는 회전시료조사대의 높이를 나타내고 있다. 위 식을 이용하여 구한 회전시료조사대의 부가질량 값은 182 kg으로 계산되었다.

2-2. 공기중에서의 고유진동수

먼저 회전시료조사대의 공기중에서의 고유진동수와 수중에서의 고유진동수를 비교하기 위하여 상용구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 공기중에서의 가장 낮

표 1. 공기 및 수중에서 ANSYS 및 Eq. (2)를 이용하여 회전시료조사대의 가장 낮은 고유진동수 비교.

Modes	Frequencies in the air (use ANSYS) [Hz]	Frequencies in a sill fluid (use Eq.(2)) [Hz]	Frequencies in a sill fluid (use ANSYS) [Hz]
1st	237.1	144.7	156.9
2nd	242.4	147.9	165.6
3rd	248.4	151.6	169.1
4th	261.5	159.6	175.0
5th	304.2	185.7	196.3
6th	310.8	189.7	201.1
7th	335.7	204.9	206.6
8th	346.8	211.7	225.7
9th	377.7	230.5	230.7
10th	378.5	231.0	250.5

은 고유진동수 10개를 구하였다. 회전시료조사대의 재질은 대부분 6061-T6 알루미늄이며 회전시료조사대는 낮은 중성자 속에서 운전하였기 때문에 방사능에 의한 알루미늄 재질의 변화는 거의 없는 것으로 간주하였다. 알루미늄 6061-T6의 물성치는 다음과 같다.

- 탄성계수(Young's Modulus) $E=71000$ MPa
- 프와송비(Poisson's Ratio) $\nu=0.33$
- 밀도(density) $\rho=2.77 \times 10^3$ kg/m³

위의 물성치를 입력하여 구해진 고유진동수는 표 1과 같다.

2-3. 이론식을 이용한 수중에서의 고유진동수

식 (1)을 이용하여 구해진 부가질량을 참고문헌^[8]에서 제시된 식에 대입하여 수중에서의 고유진동수를 계산하였다. 참고문헌^[8]에서 제시한 식은 다음과 같다.

$$\frac{f_{fluid}}{f_{air}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{A_p}{M_p}\right)^{1/2}} \tag{2}$$

여기서 A_p 는 추가질량, M_p 는 구조물의 질량, f_{fluid} 와 f_{air} 는 각각 유체와 공기중의 고유진동수를 나타낸다.

식 (2)를 통해 구해진 계산한 결과는 표 1에 가장 낮은 고유진동수에 대해 공기중에서의 결과와 이론식에 의해 구해진 결과를 각각 비교하였다. 식 (2)를 통해 유체 속에서의 고유진동수와 공기중의 고유진동수 비율은 0.610으로 계산되었고 이는 수중에서의 고유진동수가 공기중에서 계산된 고유진동수 보다 39% 만큼 감소하였음을 나타낸다.

2-4. ANSYS를 이용한 수중에서의 고유진동수

ANSYS를 이용하여 회전시료조사대에 대한 수중에서

의 고유진동수를 구하였다. ANSYS에서 회전시료조사대 모델링에 사용한 요소는 회전시료조사대 외부의 경우, 4절점 shell 요소(SHELL63)를 사용하였고, 나머지는 8절점 요소(SOLID45)로 모델링 하였다. 그리고 모델에 사용된 총 노드의 수는 28963개이다.

해석 방법은 ANSYS 모델링의 각 노드에 대해 식 (1)에 구해진 추가질량을 전체의 노드에 나누어 적용하여 가장 낮은 고유진동수와 모드형상을 조사하였다. 표 1은 공기중에서의 고유진동수와 ANSYS를 이용한 수중에서의 고유진동수를 비교하여 나타내고 있다. 이론식으로 구해진 고유진동수와 마찬가지로 공기중에서 구해진 고유진동수 보다 많이 감소한 결과를 나타내고 있다. 그림 3은 앞의 두 표결과를 그림으로 나타내었다. 식 (2)를 이용한 결과와 ANSYS를 이용한 결과가 비슷한 경향을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

표 2는 표 1에서 구해진 공기중에서의 고유진동수와 유체를 고려하여 ANSYS를 이용하여 구해진 고유진동수의 비율을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 각

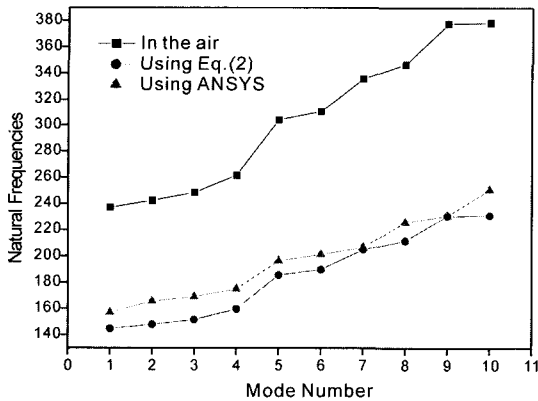


그림 3. 모드수 증가에 따른 고유진동수 비교.

표 2. 공기중과 수중에서의 고유진동수 비.

Modes	f_{fluid}/f_{air}
1st	0.662
2nd	0.683
3rd	0.681
4th	0.670
5th	0.645
6th	0.647
7th	0.615
8th	0.651
9th	0.611
10th	0.662

각의 모드에 따라 비율값이 조금씩 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (2)를 통해 구해진 비율값인 0.610 과 표 2에서 구해진 값이 약간의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 식 (2)에 대입되는 부가질량값을 산출함에 있어 대상물의 기하학적 형상이 복잡하기 때문에 약간의 오차가 발생한 것으로 예측된다.

그림 4는 ANSYS를 이용하여 구해진 가장 낮은 10개의 모드형상을 나타내고 있다. 구조물의 하부보다 상부에 많은 변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

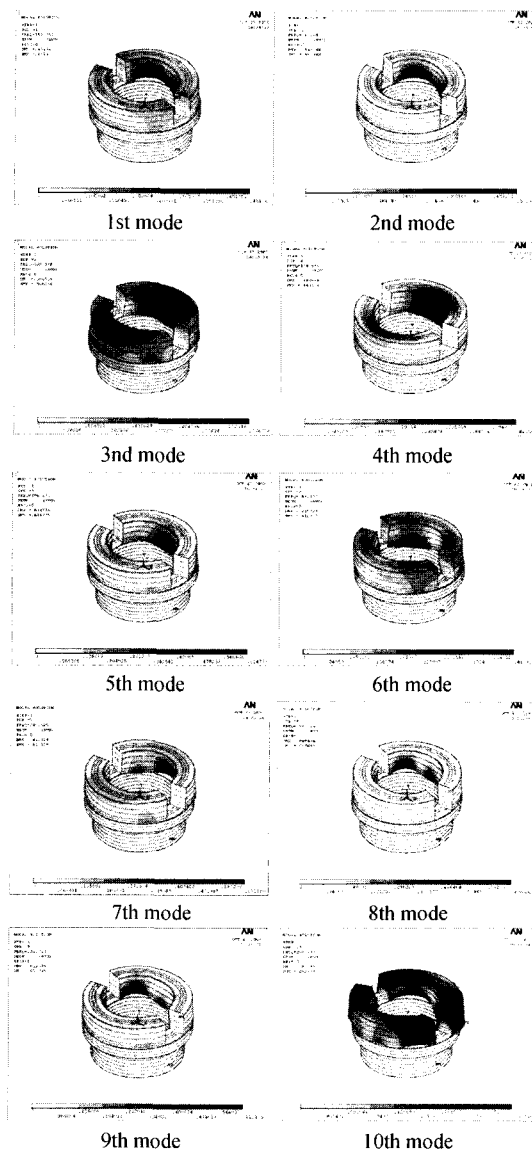


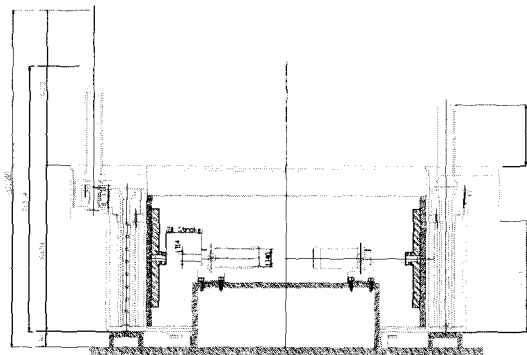
그림 4. 정지 유체내에 있는 회전시료조사대의 가장 낮은 모드형태.

3. 회전시료조사대의 고정하기 위한 클램프 지지압력 해석

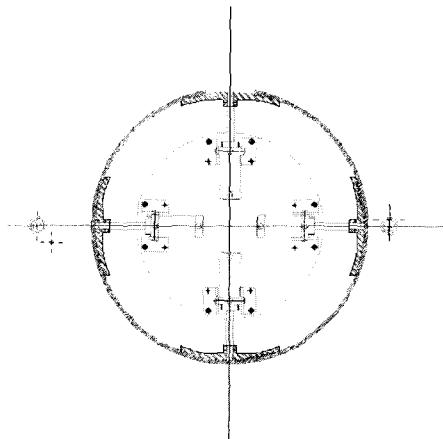
3-1. ANSYS를 이용한 등가응력해석

회전시료조사대를 고정하기 위한 적정 지지력을 계산하기 위하여 본 논문에서는 ANSYS를 사용하여 클램프가 가하는 지지력에 대해서 회전시료조사대에 분포되는 등가응력을 계산하였다. 그림 5는 회전시료조사대를 고정하기 위해 설계된 유압 클램프의 모습을 나타내고 있다. 4개의 유압 실린더가 90도 간격으로 배치되었으며 실린더형 클램프가 회전시료조사대의 홀 안쪽에서 바깥쪽으로 팽창시켜 고정하게 된다.

그림 6은 클램프의 적정 지지력을 구하기 위한 응력해석 절차를 나타내고 있다. 먼저 해석에 필요한 초기 데이터를 입력하고 ANSYS를 이용하여 Von-Mises Stress를 구한다. 여기서 최대 Von-Mises Stress가 재료의 항복강도와 크거나 같으면 해석을 종료하고 그렇지 않으면



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 5. 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프.

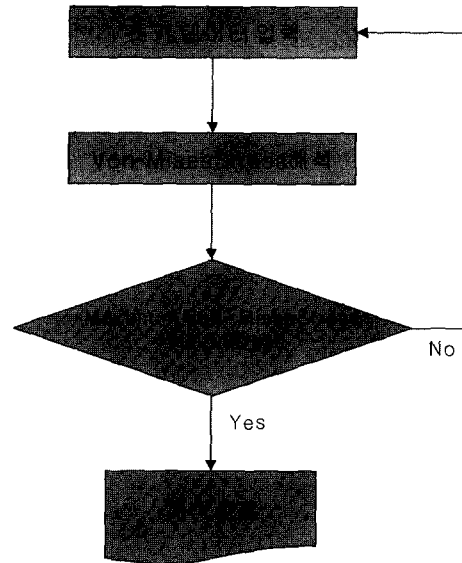


그림 6. 응력해석을 위한 Flow Chart.

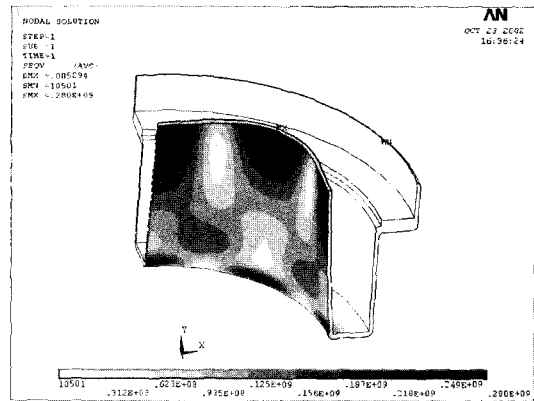


그림 7. 회전시료조사대의 최대 Von-Mises 응력분포.

면 유압에 의해 가해지는 압력을 증가시켜 해석을 다시 수행한다.

위와 같은 해석 절차를 이용하여 알루미늄의 항복강도인 280 MPa과 최대 Von-Mises Stress와 같아질 때 조 (Jaw)가 가할 수 있는 최대압력은 1086000 Pa로 계산되었다. 그림 7은 항복강도인 280 MPa에 도달하였을 때의 응력분포를 나타내고 있으며, 그림은 상하 좌우 대칭이므로 1/4만 해석을 수행하였다.

그림 8은 최대항복강도인 280 MPa로 가해질 때 최대 변위량을 나타내고 있으며 최대변위량은 약 6 mm 정도로 계산되었다.

해석 결과를 종합해 보면 최대항복강도인 280 MPa에

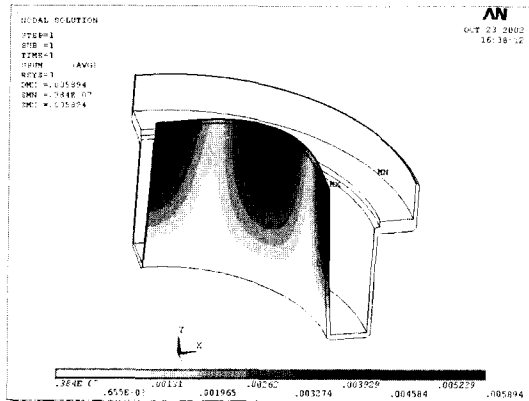


그림 8. 항복응력에서의 회전시료조사대 최대변위 분포.

도달하기까지 가할 수 있는 최대 압력은 1086000 Pa이고 이때의 최대변위량은 6 mm로 비교적 변위량이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 유압 클램프 설계시 유압 클램프가 가할 수 있는 최대 압력을 약 1000000 Pa로 정하는 것이 변위가 크게 일어나지 않으면서 회전시료조사대를 가장 견고히 고정할 수 있는 최대 압력임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 연구용 원자로 KRR-1&2의 해체대상 물중 물속에 있는 회전시료조사대를 수중분해장비로 분해하기에 앞서 절삭에 의한 가진으로 공진이 발생하는지를 파악하기 위해서 수중상태에 있는 회전시료조사대의 고유진동수와 모드형상을 조사하였다. 한편, Blevins^[8]가 제시한 방법에 의해 회전시료조사대에 적용되는 유체의 추가질량을 계산하였으며 이를 이용하여 식 (2)과 ANSYS를 이용하여 유체를 고려한 고유진동수를 예측할 수 있었다. 그리고 직관적으로 예측할 수 있듯이 구조물에 유체에 의한 추가질량이 적용됨에 따라 공기중에서의 고유진동수 보다 유체에서의 고유진동수 값이 낮은 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프를 설계하기 위하여, 유압 클

램프가 가하는 힘에 대한 지지부의 최대 등가응력(Von-Mises Stress)값이 지지부의 재질인 알루미늄의 최대탄성영역을 벗어나지 않고, 탄성영역 내에서 가해질 수 있는 최대의 힘을 회전시료조사대를 고정하기 위한 지지력으로 설정하여 지지력을 계산하였다. 본 연구결과는 선박이나 잠수함과 같은 수중구조물의 설계나 수중에서 구조물을 절삭시 유용한 정보를 제공할 수 있다는 점에서 의미를 지닌다고 할 수 있다.

후 기

이 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996, Safety Standard Series ST-1, IAEA.
2. Hattori, S., Sakurai, A., *et al.*: "Structure Analysis of Aseismic Resistant Pool Reactor Concept", 1983, Paper K 5/9, 7th SMIRT.
3. Young, C.C. and Kraus, S.: "Seismic Analysis of Reactor Assembly of a 1000 Mwe-LMFBR Pool Reactor K 12/4", 1979, 5th SMIRT.
4. Brabant, F., Gantenbein, F. and Gibert, R.J.: "3D Seismic Analysis of Pool Type LMFBR Vessel and Internals", 1983, Paper E 6/4, 7th SMIRT.
5. Hattori, S. *et al.*: "Fluid-Structure Coupled Vibration and Aseismic Analysis of the Reactor of Pool Type LMFBR", 1983, Paper E 6/5, 7th SMIRT.
6. Liu, W.K. and Ma, D.C.: "Coupling Effect Between Liquid Sloshing and Flexible Fluid-Filled System", Nuclear Engineering and Design, 72, 345-357 (1982).
7. Ma, D.C., Gvildys, J. and Chang, Y.W.: "Dynamic Analysis of Large Suspended LMFBR Reactor Vessel", 1983, Paper E 6/3, 7th SMIRT.
8. Blevins, R.D.: "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", Krieger Publications (1979).