

정지 유체 내에 있는 회전시료 조사대의 고유진동수 및 모드 해석

김성균[†] · 이동규^{*} · 이근우^{*} · 박진호^{*}
(2002년 9월 27일 접수, 2003년 6월 11일 심사완료)

Natural Frequencies and Modes of Rotary Specimen Rack(RSR) in a Still Fluid

Sung-Kyun Kim, Dong-Kyu Lee, Kune-Woo Lee and Jin-Ho Park

Key Words: Natural Frequency and Mode(고유진동수와 모드), Rotary Specimen Rack(회전시료조사대), Still Fluid(정지유체), Added Mass(부가질량)

Abstract

In this paper, In-air and in-water vibration characteristics of Rotary Specimen Rack(RSR) are estimated through 3D finite element analysis by using ANSYS software. Added mass is calculated by using Blevins' equation. To confirm the accuracy 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, good agreement is founded between natural frequency ratios obtained by a theoretical equation and those of using ANSYS.

1. 서론

정지유체 내에 있는 구조물의 진동해석은 일반적으로 유체와 구조가 연성되어 있다. 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 구조물과의 밀도차가 크지 않기 때문에 유체에 대한 연성효

과는 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 물 속에 잠겨있는 구조물의 질량을 증가시킨다.

부가질량에 관한 현상은 Dubuat(1776)⁽¹⁾에 의해 실험적으로 처음 발견되었고 그후 Stokes, Lamb, Birkoff, Patton⁽²⁾ 등에 의해 이론적으로 고찰되었다. 그리고 Kim⁽³⁾ 등은 실린더 튜브 내에 있는 유체에 대한 부가질량을 이론적으로 계산하고 이를 실험을 통해 비교 평가하였다. 최근에는 유체로 채워진 원통셀의 동적거동해석⁽⁴⁾ 및 U자형 관의 자유진동해석⁽⁵⁾을 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 유체를 고려하여 구조물을 해석하는 방법은 여러 가지가 있는데 첫 번째는 구조물 주위의 유체가 구조물에 가하는 부가질량을 제안된

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소

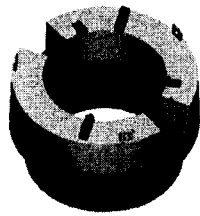
E-mail : sungkyun@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2235 FAX : (042)868-2499

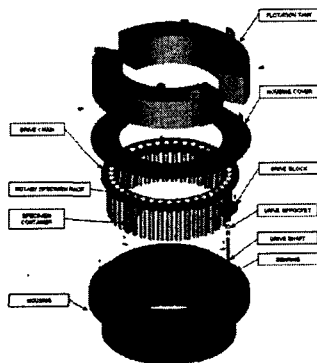
^{*} 한국원자력연구소

조건아래 이론적으로 구하여 유한요소 각 요소에 부여하여 해석하는 방법으로 이는 구조물과 유체와의 완전한 연성효과는 고려되지 않지만 해석시간이 짧아 결과를 빨리 확인할 수 있다. 둘째로 유체를 연속체로 간주하여 유체와 구조물의 질량-연성을 완전히 기술하여 해석하는 방법으로 유체와 구조물의 상호관계를 정확하게 해석할 수 있다. 그러나 다른 어느 방법보다 많은 시간과 경비의 소모를 요구하는 방법이다.

본 논문에서는 수중분해장비를 통하여 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack)의 스테인레스스틸 부품을 분리 할 때 수중분해장비 공구의 가진 주파수가 회전시료조사대의 고유진동수와 일치하여 공진이 발생하는지 확인하기 위하여 회전시료조사대의 고유진동수 확인하는 작업을 선행하였다. 진동해석은 위에서 언급한 부가질량 방법 중 첫 번째 방법으로 Blevins⁽⁶⁾가 제시한 방법에 의해서 유체에 대한 부가질량을 이론적으로 구하여 구조물의 질량행렬에 적용하여 진동해석을 수행하였다.



(a) Isotropic view



(b) Expansion view

Fig. 1 Full 3D modeling of Rotary Specimen Rack

2. 부가질량 계산

정지유체로 둘러싸여 있는 회전시료조사대의 부가질량은 회전시료조사대의 형상에 의존하게 된다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 회전시료조사대는 원형원통으로 상부와 하부로 나누어져 있다. 두 부분에 대한 부가질량은 Blevins⁽⁶⁾가 제시한 원형원통의 부가질량식 (1)을 이용하여 각각 계산하였다. 또 참고문헌⁽⁶⁾에는 Fig. 1과 같은 구멍이 뚫린 구조물에 대한 부가질량식이 제시되어 있지 않아 원통 내부와 외부의 유체에 대한 부가질량을 각각 구하여 전체 회전시료조사대의 부가질량을 계산하였다.

$$A_p = \alpha \rho \pi a^2 b \quad (1)$$

여기서 A_p 는 회전시료조사대의 부가질량을 나타내고 α 는 실험계수, ρ 는 물의 밀도, a 는 회전시료조사대의 반경, b 는 회전시료조사대의 높이를 나타내고 있다. 여기서 실험계수는 원통의 길이대 직경비에 따른 수정계수를 실험을 통해 구한 값이다. 본 논문에서는 참고문헌⁽⁶⁾에서 제시된 실험계수 Table을 본 대상물의 길이대 직경비에 맞게 보간법을 이용하여 실험계수를 산출하여 대입하였다.

또한, Blevins⁽⁶⁾는 공기중과 수중에서의 고유진동수 비를 식 (2)와 같이 제시하였다. 이는 대상물에 대해서 수치해석이나 유한요소해석을 통해 공기중의 고유진동수를 알 때, 유체 내에서의 고유진동수도 역시 계산할 수 있다.

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

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

3. 유한요소해석

3.1 모달해석 이론

구조물의 고유진동수 해석은 구조물의 동적거동을 고유모드의 중첩을 통하여 표현하는 것을 목적으로 한다. 즉, 모드해석을 통해 구조물의 동적거동을 고유진동수, 감쇠율, 고유모드형상 등의 모달 매개변수들로 나타낼 수 있다.

구조물의 거동을 모달 매개변수로 나타냄으로써 구조물 설계나 외부가진에 대한 공진진단 등에 필요한 정보를 제공할 수 있다. 모드해석은 이론적 방법과 실험적 방법으로 구해질 수 있으며, 이론적 방법은 구조물의 운동방정식으로부터 모달 매개변수를 구하는 방법이고 실험적 방법은 구조물이 복잡하고 운동방정식의 유도가 용이하지 못한 경우에 구조물에 대한 가진 실험을 통해 수집된 자료로부터 모달 매개변수를 추정하는 방법이다.

구조물의 운동방정식은 다음과 같은 N자유도 (degree of freedom)를 갖는 행렬 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (3)$$

위식을 고유치를 위한 방정식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$(\lambda^2[M] + \lambda[C] + [K])\{u\}e^{\lambda t} = \{0\} \quad (4)$$

이때의 λ_i 를 고유치(eigen value) 그리고 각 λ_i 에 대해 만족하는 $\{u\}_i$ 를 고유벡터(eigen vector)라 한다. λ_i 와 $\{u\}_i$ 는 일반적으로 식 (5)와 같은 복소모드해석법(complex modal analysis)을 이용하여 고유치, 고유벡터, 감쇠계수 등을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [1] & [0] \end{bmatrix} \{\phi\} = \lambda \{\phi\} \quad (5)$$

3.2 유한요소해석 과정

본 논문에서는 상용구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 회전시료조사대에 대한 수중

에서의 고유진동수를 구하였다. ANSYS에서 회전시료조사대 모델링에 사용한 요소는 회전시료조사대 외부의 경우, 4절점 shell요소(SHELL63)를 사용하였고, 나머지는 8절점 요소(SOLID45)로 모델링 하였다. 회전시료조사대는 하단부가 고정되어 있다고 가정하여 모든 방향의 변위를 구속하였다. 모델에 사용된 총 노드의 수는 28963개가 사용되었다. 회전시료조사대의 재질은 대부분 6061-T6 알루미늄이고 이재질의 물성치는 다음과 같다.

- 탄성계수 (Young's Modulus) E= 71000 MPa
- 프와송비 (Poisson's Ratio) ν = 0.33
- 밀도 (density) ρ = 2.77×10^3 kg/m³

3.3 유한요소해석 과정

본 논문에서는 상용구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 회전시료조사대에 대한 수중에서의 고유진동수를 구하였다. ANSYS에서 회전시료조사대 모델링에 사용한 요소는 회전시료조사대 외부의 경우, 4절점 shell요소(SHELL63)를 사용하였고, 나머지는 8절점 요소(SOLID45)로 모델링 하였다. 회전시료조사대는 하단부가 고정되어 있다고 가정하여 모든 방향의 변위를 구속하였다. 모델에 사용된 총 노드의 수는 28963개가 사용되었다. 회전시료조사대의 재질은 대부분 6061-T6 알루미늄이고 이재질의 물성치는 다음과 같다.

- 탄성계수 (Young's Modulus) E= 71000 MPa
- 프와송비 (Poisson's Ratio) ν = 0.33
- 밀도 (density) ρ = 2.77×10^3 kg/m³

4. 해석결과

Table 1은 회전시료조사대에 대한 가장 낮은 고유진동수를 공기중과 유체내로 각각 분류하여 구하였다. 공기중에서의 고유진동수는 ANSYS를 이용하였으며, 유체내의 고유진동수는 회전시료조사대에 작용하는 부가질량을 전체의 노드에 나누어 적용하여 가장 낮은 고유진동수와 모드형상

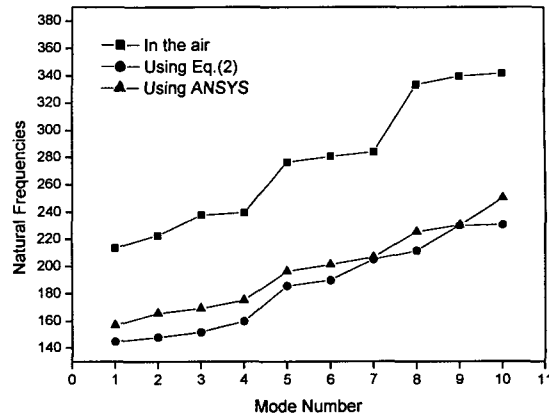
Table 1 Comparison of the natural frequencies between in the air and in a still fluid

Modes	Frequencies in the air (use ANSYS) [Hz]	Frequencies in a still fluid (use Eq.(2)) [Hz]	Frequencies in a still fluid (use ANSYS) [Hz]
1st	213.6	144.7	156.9
2nd	222.4	147.9	165.6
3rd	237.8	151.6	169.1
4th	239.4	159.6	175.0
5th	276.4	185.7	196.3
6th	280.9	189.7	201.1
7th	284.1	204.9	206.6
8th	333.6	211.7	225.7
9th	339.8	230.5	230.7
10th	342.0	231.0	250.5

을 조사하였다. 또한 공기중에 ANSYS를 이용하여 구해진 고유진동수를 식 (2)에 대입하여 이론적으로 유체에 대한 고유진동수를 산출하였다. 직관적으로도 알 수 있듯이 공기중의 고유진동수가 유체내의 고유진동수 보다 높았다. 즉, 식 (2)를 통해 유체속에서의 고유진동수와 공기중의 고유진동수 비율은 0.710으로 계산되었고 이는 수중에서의 고유진동수가 공기중에서 계산된 고유진동수 보다 29%만큼 감소하였음을 나타낸다. 이는 공기중에서 철삭시 공진이 발생하지 않았지만 수중에서는 고유진동수의 변화로 인해 공진이 야기될 수 있음을 의미한다. 따라서 향후 회전시료조사대의 해체장비 설계시 철삭에 필요한 최적의 공구회전수를 산출함에 있어 철삭공구의 가진 주파수가 수중에서의 회전시료조사대의 고유진동수에 같아지지 않는지 염두해 두고 설계해야한다.

Fig. 2는 3개의 경우에 대해서 그림으로 나타내 보았다. 식 (2)를 이용하여 산출한 경우와 ANSYS를 이용한 경우가 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table 2는 공기중에서의 고유진동수와 ANSYS를 이용하여 구해진 유체를 고려한 고유진동수의 비율을 나타내고 있다. Table 2에서 보는 바와 같

**Fig. 2** Mode number vs. natural frequencies**Table 2** Ratio of the natural frequencies in the air and in a still fluid

Modes	f_{fluid} / f_{air}
1st	0.735
2nd	0.745
3rd	0.711
4th	0.731
5th	0.710
6th	0.716
7th	0.727
8th	0.677
9th	0.679
10th	0.732

이 각각의 모드에 따라 비율값이 조금씩 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (2)를 통해 구해진 비율값인 0.710과 Table 2에서 구해진 값이 약간의 차이가 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 식 (2)에 대입되는 부가질량값을 산출함에 있어 대상물의 기하학적 형상에 대한 약간의 오차가 발생한 것으로 예측된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 유체내에서의와 공기중에서 회전시료조사대 고유모드 형상을 ANSYS를 이용하여 구하였다. 특이할 점은 공기중의 2번째 모드가 유체내의 3번째 모드와 유사하며, 공기중의 3번째 모드가 유체내의 4번째 모드, 공기중의

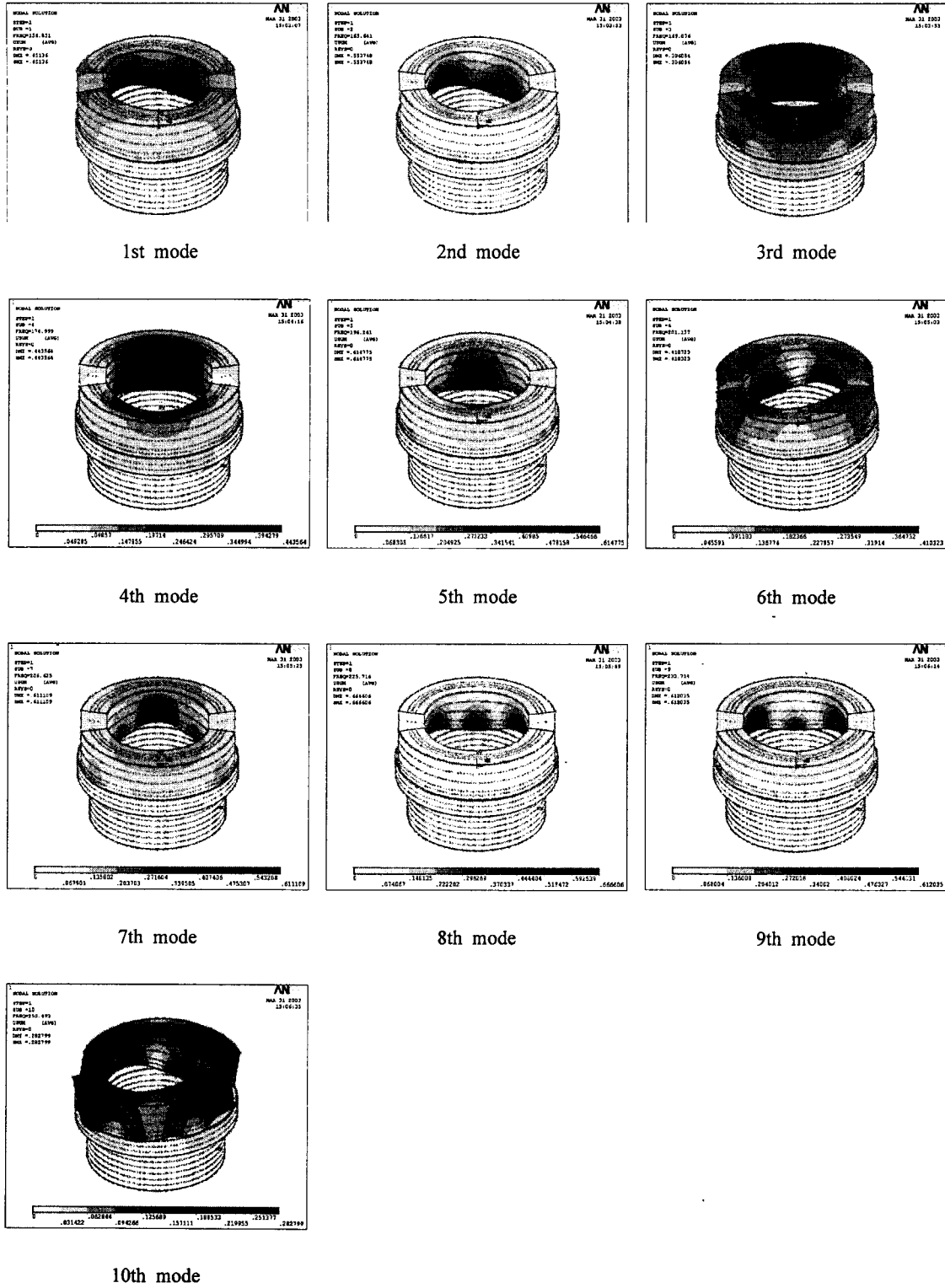


Fig. 3 Lowest 10th mode shapes for RSR in a still fluid

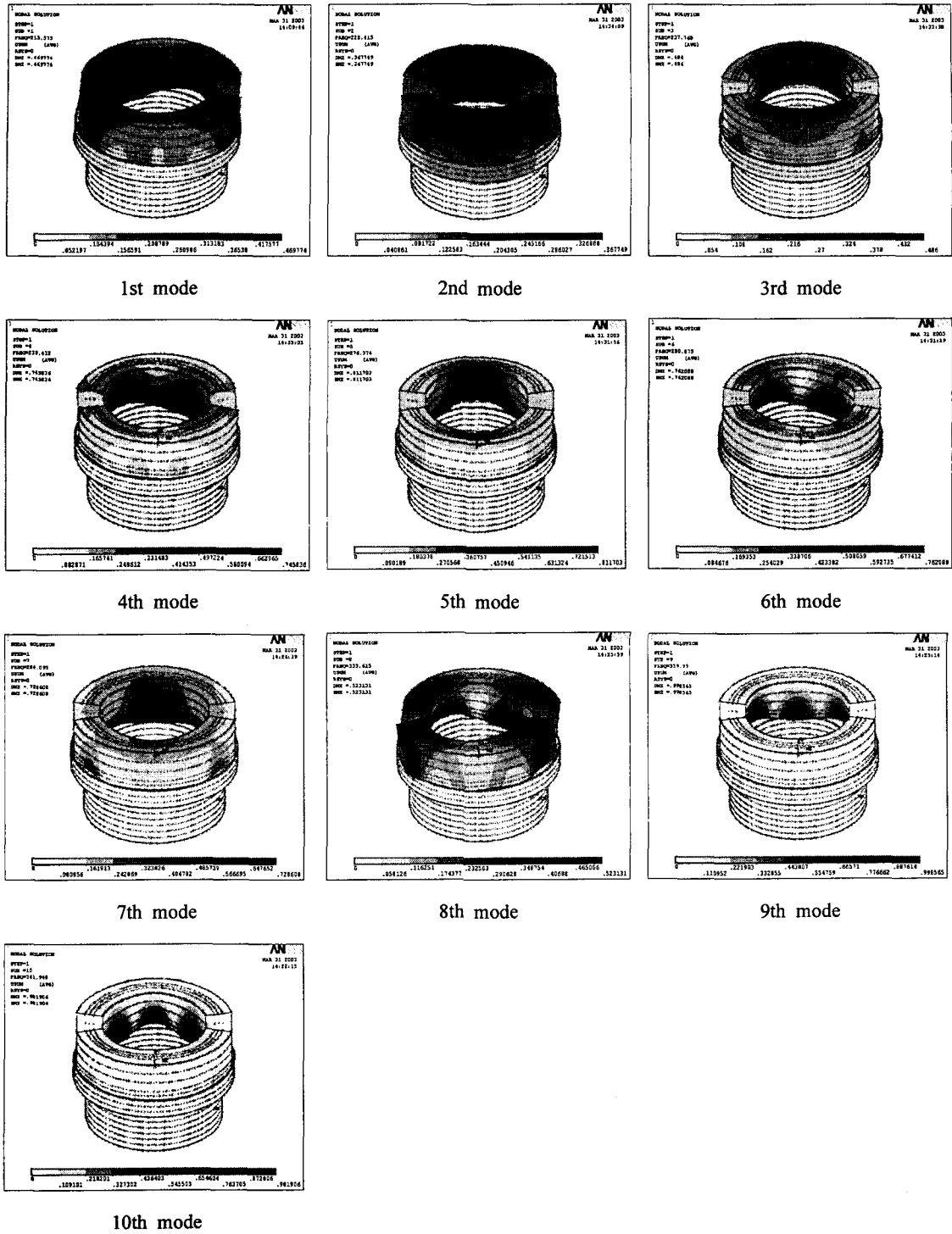


Fig. 4 Lowest 10th mode shapes for RSR in an air

8번째 모드가 유체내의 10번째 모드와 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 즉, 공기중의 모드들이 유체내에서 고차모드로 이동함을 의미한다. 그리고 구조물의 하부보다 상부에 변형이 많이 발생되었으며 짧은 주파수 간격으로 다양한 모드형상이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 연구용 원자로 KRR-1&2의 해체대상물중 방사능 준위가 높아 수중에서 보관 중인 회전시료조사대를 수중해체장비로 분해하기에 앞서 절삭에 의한 가진으로 공진이 발생하는가를 파악하기 앞서 수중상태에 있는 회전시료조사대의 고유진동수와 모드형상을 조사하였다. 한편, Blevins⁽⁶⁾가 제시한 방법에 의해 회전시료조사대에 적용되는 유체의 부가질량을 계산하였으며 이를 이용하여 식 (2)와 ANSYS를 이용하여 유체를 고려한 고유진동수를 예측할 수 있었다. 그리고 직관적으로 예측할 수 있듯이 구조물에 유체에 의한 부가질량이 적용됨에 따라 공기중에서의 고유진동수 보다 유체에서의 고유진동수 값이 낮은 것을 확인 할 수 있었다. 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) Birkoff, G., 1960, "Hydrodynamics," Princeton University Press.
- (2) Fritz, R. J., 1972, "The Effects of Liquid on the Dynamic Motions of Immersed Solids," *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol. 94, pp. 167~173.
- (3) Kim, M. H., Kim, M. U. and Cho, H. S., 1985, "Added Mass of Regular Polygonal Cylinders with Fluid Gap," *Trans. of KSME*, Vol. 9, No. 1, pp. 56~63.
- (4) Youm, K. U., Yoon, K. H., Lee, Y. S. etc., 1996, "Dynamic Behavior Analysis of Stiffened Cylindrical Shell Filled with Fluid," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 20, No. 9, pp. 2875~2886.
- (5) Kim, W. S., Jo, J. C. and Shin, W. K., 1993, "Free Vibration Analysis of Steam Generator U-Tubes," *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 4, pp. 873~889.
- (6) Blevins, D., 1979, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Krieger Publications.
- (7) Conca, C., Osses, A. and Planchard, J., 1997, "Added mass and Damping in Fluid-Structure Interaction," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 146, pp. 387~405.
- (8) Amabili, M., 1997, "Free Vibration Analysis of Cylindrical Tanks Partially Filled with Liquid," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 207, No. 5, pp. 768~769.
- (9) Kwak, M. K. and Han, S. B., 2000, "Effect of Fluid Depth on the Hydroelastic Vibration of Free-Edge Circular Plate," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230, No. 1, pp. 171~185.
- (10) Liang, C. C., Liao, C. C., Tai, Y. S. and etc., 2001, "The Free Vibration Analysis of Submerged Cantilever Plates," *Ocean Engineering*, Vol. 28, pp. 1225~1245.