

수중 동축원통셸 구조물의 경계조건 변화에 따른 동특성 시험

An Experimental Study on Dynamic Characteristics of Submerged Co-axial Cylindrical Shells

°박진호*, 류정수**, 김태룡***, 심우건****

Jinho Park, Jeong-Soo Ryu, Tae-Ryong Kim, Woo-Gun Sim

ABSTRACT

An experimental study was performed for two types of co-axial cylindrical shell structures in order to establish the relationship between in-air dynamic characteristics and in-water ones and to observe hydrodynamic mass effects on their mode shapes when submerged. The outer cylinders are prepared with two kinds to get more insights on the fluid-structure interaction phenomena: one is flexible, which means that the outer cylinder has almost same stiffness as the inner one, and the other is a rigid one whose stiffness is more than ten times of the inner one's(it might be regarded as the scaled-down model of the reactor internals). The finite element analyses were also implemented to support the experimental results. The results show that the natural frequencies of a co-axial cylindrical shell structure in water are remarkably lower than those in air due to the fluid mass effects. In case of the flexible-to-flexible cylinders, there exist in-phase and out-of-phase mode shapes and they are affected by the annular gap between the co-axial cylinders. For the in-phase mode the in-water natural frequency decreases exponentially as the gap increases, while it slightly increases in case of the out-of-phase mode due to the squeezing effect of the gap fluid. In the flexible-to-rigid case, the normalized natural frequency(in-water frequency/in-air one) of the inner cylinder(core barrel model) ranges between in-phase and out-of-phase mode frequencies of the flexible-to-flexible co-axial cylindrical structure having identical dimensions. Also the normalized natural frequency of the inner cylinder of the flexible-to-rigid one moves from near of the in-phase mode frequency into the out-of-phase mode value of the flexible-to-flexible case as circumferential mode number(n) increases.

1. 서론

수중 동축원통셸 구조물은 가압 경수로형 및 액체금속로형 원자로내부구조물의 동특성을 추정하기 위한 단순화 모델로 많이 이용되어 왔다.¹⁾⁻⁵⁾ 수중 동축원통셸 구조물은 내부 실린더와 외부 실린더로 구성되어 있으며, 내부 실린더의 동특성 파라미터는 외부실린더의 강성, 두 실린더 사이의 간격 및 그 지지조건에 큰 영향을 받는다. 그것은 외부실린더의 경계면과 간격사이의 내부유체가 내부

실린더에 부가질량으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 부가질량 효과에 대한 이론적 고찰은 일찌기 Fritz⁶⁾에 의하여 수행되었으며, 이 결과는 공학적 계산에 많이 적용되고 있다. 그러나 이론적으로 구한 부가질량효과는 대체로 기본 고유진동 모우드의 경우에는 실제와 잘 일치하지만 고차 모우드로 갈수록 그 차이가 많이 나므로 수중 구조물의 동특성을 정확하게 구하기 위해서는 유체-구조물 상호작용을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 수중 동축원통셸의 부가질량효과를 상세하게 분석하기 위하여, 두 가지 시험 모델을 제작하였으며, 이에 대한 공기중 및 수중에서의 동특성 변화를 실험적 및 유한요소 해석을 통하여 관찰하였다.

먼저 내·외부 원통셸이 모두 flexible한 경

* 한국원자력연구소 KALIMER 기술개발팀

** 한국원자력연구소 하나로운영팀

*** 전력연구원

**** 한남대학교 기계공학과

우(flexible-to-flexible), 동축원통셀의 간격변화에 따른 동특성 변화를 실험적 및 유한요소 해석을 통하여 분석함으로써, 각 진동모우드 별로 부가질량효과에 대한 상관관계를 도출하였다. 아울러, 외부 원통의 강성을 10 배 이상 강화(rigid)시키고, 내·외부 원통 사이의 간격 및 형상비가 국내 가압경수형 표준원자로의 경우와 유사한 동축 원통 구조물(flexible-to-rigid)을 제작하여, 진동 모우드별 부가질량 효과를 실험적 및 유한요소기법을 이용하여 정량화하고 처음의 경우와 비교·분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 flexible-to-flexible 수중 동축원통셀 모델에 대한 실험장치 개략도이다. 플랜지 부분을 포함한 전체 시스템은 고정용 바닥판을 제외하고는 모두 아크릴로 제작하였다. 내·외부 원통셀 사이의 간격에 의한 영향을 상세히 관찰하기 위하여 4 가지의 서로 다른 외부 원통을 준비하였다(간격종류: 7.5, 25, 47.5, 및 110 mm). 내·외부 원통의 아래부분은 모두 바닥판에 rigid하게 볼트로 체결되었으며, 내부 원통의 두께 및 반경은 한국표준형 원자로의 노심지지원통의 것을 기준으로 하여 약 1/20로 축소된 크기로 하였다. 내·외부 원통이 모두 flexible 하므로 내·외부 원통의 간격유체와의 상호작용에 의한 진동모우드를 상세히 구하기 위하여 내·외부 원통 모두에 대하여 가속도 신호를 측정하였다. 측정점은 내·외부 원통 모두에 대하여 원주방향으로 0° 및 180° 위치에서 각각 축방향으로 12 점씩, 그리고 축방향 상부 약 9/10 지점에서 원주방향으로 각각 15° 간격으로 24 점씩 총 48 곳이다. 공기중의 경우에는 간격유체에 의한 상호작용을 무시할 수 있으므로 내부 원통 셀에 대해서만 동특성 시험을 수행하였으며, 수중의 경우에는 내·외부 원통셀 모두에 대해서 시험을 수행하였다. 전체 가속도 측정점은 총 96 곳이다.

그림 2는 flexible-to-rigid 동축원통 모델이다. 이 모델은 실제 원자로의 노심지지원통(CSB) 및 원자로 압력용기 사이의 구조강성의 차이 및 지지조건을 고려한 원자로내부구조물 축소모델이다(약 1/20)⁴¹. 본 축소모델은 노심지지원통 모델(내부원통), 원자로 압력용기모델(외부 강화원통), 아래평판 및 상부헤드 등으로 구성되어 있

다. 노심지지원통 모델 및 원자로 압력용기모델은 영광3/4호기 원자로 내부구조물을 기준으로 하여 노심지지원통의 기하학적 형상비를 동일하게 유지하면서 약 1/20의 크기로 축소된 축대칭 동축원통구조물이다. 이 모델의 재질은 실제 원자로와 거의 동일한 SUS 304 스테인레스 스틸을 사용하였다. 노심지지원통 모델(내부원통)은 축방향으로 원주상의 0° 및 180° 지점에서 각각 10곳, 그리고 원주 방향으로는 원통의 축을 따라 상부로부터 약 3/5위치에 등간격으로 16곳을 선정하여 가속도계를 설치할 수 있도록 하였다. 노심지지원통 모델 상부에는 원자로 압력용기모델과의 볼트체결을 위하여 플랜지를 설계하였다. 원자로 압력용기모델(외부원통)은 노심지지원통 모델에 비해 충분히 rigid한 강성(약 10 배이상)을 가질수 있도록 하기 위하여 바깥쪽의 원주 방향으로 동일 재질로 된 보강재를 설치(용접)하였다. 그리고 원자로 압력용기모델의 상부플랜지는 원주방향 등간격으로 16개의 볼트를 사용하여 노심지지원통 모델을 rigid하게 체결하였으며, 하부플랜지에도 역시 아래평판과의 고정용을 위하여 원주방향으로 16개의 볼트를 체결하였다.

본 실험은 공기중 실험과 수중 실험의 두가지의 경우로 나누어 수행되었으며, 공기중 실험에서는 충격가진 방법, 수중 실험의 경우에는 충격시험 또는 가진기를 이용한 base 가진 방법을 선택적으로 사용하였다. 이때 base 가진 부분은 linear motion bearing을 사용하였으며 가진기로부터의 힘전달을 위하여 push rod를 설계 및 제작하였다.

공기중 실험의 경우에는 내부 원통 셀 모델에 대해서만 가진입력 및 진동가속도 응답을 동시에 측정하였다. 가진방법으로서는 impact hammer를 이용하여 가진점을 직접이동 시켜가며 가진하였으며, 진동응답은 서로 대칭인 지점의 2 곳의 가속도응답을 동시에 측정하여 한 측정당 2 개의 주파수응답함수를 구하였다.

수중 실험의 경우에는 공기중의 경우와는 달리, flexible-to-flexible 모델에 대해서는 내·외부 원통 셀 모두에 대하여 동특성 시험을 수행하였으며, 가진방법 및 응답측정 방법은 공기중의 경우와 동일하다. flexible-to-rigid 모델의 경우에는 base 가진방법을 적용하였다. 이 경우 내부원통 셀을 직접 가진하지 않기 때문에, push rod상의 힘 변환기의 위치를 reference 절점으로

추가하였다. 두 가지 서로 다른 모델에 대한 진동 측정 시스템의 개략도가 그림 1 및 그림 3에 나와있다. 가진점의 경우에는 B&K 8200 힘변환기를 가속도계와 함께 사용하여 가진입력을 동시에 측정하였으며, 가속도계를 이동시켜가며 진동 응답을 동시에 측정하여 주파수 응답 함수를 구하였다.

충격가진 및 electro-mechanical 가진을 통하여 측정된 시간영역 가진 및 응답 신호는 I-DEAS TDAS⁷⁾ 소프트웨어를 사용하여 HP 3565S 시스템의 front end input 모듈(HP35652A)로 입력된다. 입력된 신호들은 동시에 A/D (Analog-to-Digital) 변환된 후 signal processor 모듈(HP35651A)을 통하여 FFT 변환 및 평균화되어 주파수 응답 함수로 계산되어진다.

공기중의 경우 충격가진을 통한 평균화 횟수는 5회로 하였으며, 수중의 경우에는 base 가진을 위한 입력신호로써 순수 random 신호를 사용하였으며 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 평균화 횟수를 100회로 하였다. 그리고 공기중 및 수중 실험 모두의 경우에 대해 샘플링 시간간격은 1/8192초로 하였다. 그리고 주파수 응답 함수를 구하기 위하여 필요한 FFT의 데이터 갯수는 8192개로 하였다.

진동 특성 파라미터는 전체 측정점에 대한 주파수 응답 함수를 이용하여, MIF (Mode Indicator Function) 함수 및 polyreference time domain 알고리즘을 적용하여 구하였으며, 필요한 경우 harmonic excitation 방법을 추가하여 진동 모드 형상을 검증하였다.

4. 유한요소해석

수중 동축원통 셸 모델에 대한 진동 시험만으로는 모든 진동모드에 대한 자료를 확보할 수가 없다. 따라서 각 모델들에 대한 유한요소 해석을 병행함으로써 부족한 시험결과를 보완할 수 있다. 다만 이 경우 해석적 모델에 대한 검증을 거쳐야 한다. 따라서 먼저 앞에서 수행한 동특성 시험결과를 이용하여 해석모델을 검증한 후, 이 모델을 다시 이용하여 실험적으로 구하지 못한 진동 특성치들을 보완하였다. 따라서 각 모델들에 대하여 유한요소법을 이용한 자유진동 해석을 수행하였다. 해석 프로그램으로는 범용구조 해석 프로그램인 「ANSYS」를 사용하였다⁸⁾.

먼저 flexible-to-flexible 모델의 경우에 내·외부 원통 셸 모두 2 절점 축대칭 shell 요소(STIF61)를 사용하였으며, 간격유체에 대해서는 4 절점 축대칭 유체요소(STIF81)을 모델링에 사용하였다.

Flexible-to-rigid 모델의 경우에는 먼저 공기중의 경우, 내부원통 셸을 shell 요소(STIF63)로 유한요소 모델링하였으며, 수중에서는 노심지지 원통(내부원통) 모델과 원자로 압력용기 모델(외부원통)은 4 절점 shell 요소로, 두 원통 사이에 채워져 있는 물은 8절점 유체요소(STIF80)로 모델하였다. 그리고 내부원통 셸의 내부유체는 내부원통벽의 분포된 부가질량으로 처리하였다. 이때 shell 요소 및 유체요소에 대해 사용된 물성치는 모두 실험모델(SUS 304)의 것과 동일하다.

4. 결과 및 고찰

Flexible-to-flexible 모델의 공기중 및 수중에서의 간격크기별 동특성 결과가 표 1에 나와 있다. 여기서 부가질량효과로 인하여 수중에서의 고유진동수가 공기중에 비하여 현저히 낮아짐을 확인할 수 있으며, 시험 및 유한요소해석 결과 서로 잘 일치하고 있다(최대오차는 1 차 shell 모드드의 경우에 약 11.8 %임). 특히 수중의 경우, 내·외부 원통 사이의 간격유체의 영향으로 인하여 in-phase 및 out-of-phase 진동 모드가 존재하며, 그림 4 및 그림 5는 각각 in-phase 및 out-of-phase 진동 모드드의 예를 보여준다(m: 축방향 모드 수, n: 반경방향 모드 수). In-phase 모드드의 경우 그림 6에서 보는 바와 같이 간격이 증가함에 따라서, 무차원 고유진동 주파수(수중 고유진동주파수, 공기중 고유진동주파수)의 대수치가 비례감소함을 보여주며, out-of-phase의 경우에는 간격이 증가함에 따라 오히려 무차원 고유진동수가 증가한다(그림 7). 이것은 in-phase 모드드의 경우에는 간격유체가 내·외부 실린더의 변위와 동일한 phase로 움직이므로 실린더 구조물에 부가질량으로 작용하기 때문이며 간격이 증가할수록 부가질량이 더 커지기 때문이다. Out-of-phase 모드드의 경우에는 내·외부 실린더가 서로 반대방향으로 운동하므로 간격유체가 squeezing 되어 유체의 체적탄성의 작용으로 인한 부가질량 효과가 훨씬

더 증폭되어 나타나며, 간격이 증가하면 이 영향이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 위 결과를 근거로 하여 무차원 간격(간격/내부원통 셀의 반경)에 대한 무차원 고유진동주파수와 상관계수를 다음과 같이 표현하였다:

$$\frac{f_{water}}{f_{air}} \approx A \cdot (g/R_i)^b,$$

여기서, f_{air} , f_{water} : 공기중 및 수중 고유진동수
 R_i , g : 내부원통 셀의 반경 및 간격
 A , b : 무차원 계수.

이때 in-phase 및 out-of-phase 진동모우드별 무차원 계수는 표 2와 같다. 여기서 보는 바와 같이 in-phase 모우드의 경우에는 무차원 계수들이 진동모우드와 상관없이 거의 동일하나, out-of-phase의 경우에는 진동모우드 별로 차이가 크다. 따라서 수중 동축원통 셀의 경우 셀 사이의 간격변화에 따른 부가질량효과는 in-phase 모우드의 경우에는 진동모우드와는 상관없이 대수비례하며, out-of-phase의 경우에는 진동모우드 별로 부가질량효과가 매우 차이가 나며 유체의 강성효과가 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

Flexible-to-rigid 모델의 경우, 공기중 및 수중에서의 노심지지원통 모델(내부 원통 셀)에 대한 고유진동 주파수 결과가 표 3에 나와 있으며, 수중에서의 대표적인 진동 모우드 형상이 그림 8 및 그림 9에 나와 있다. 여기서는 외부원통의 강성이 매우 크므로 앞의 경우에서처럼 내부 및 외부 원통 사이의 phase 관계는 없으며, 간격유체는 단지 내부 원통에 대한 부가질량으로 작용한다. 이 모델에 대한 부가질량 효과를 평가하기 위하여 [간격/내부원통의반경] 비가 동일한 flexible-to-flexible 모델과 진동 모우드 형상별 고유진동주파수를 비교하였다. 그 결과 그림 10~그림 12에서 보는 것처럼, 외부원통 셀이 rigid한 모델의 경우, 무차원 고유진동주파수는 외부원통이 flexible 한 동축원통구조물의 in-phase 모우드 주파수 보다는 크며, out-of-phase 모우드 주파수 보다는 작음을 알 수 있다. 즉, 부가질량 효과가 in-phase 모우드 보다는 크며 out-of-phase 모우드 보다는 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 내부원통 셀의 무차원 고유진동수가 원주 모우드 수(n)가 증가함에 따라 증가하며, flexible-to-flexible 동축원통

구조물의 out-of-phase 모우드 주파수 쪽에서 in-phase 모우드 주파수 쪽으로 근접하고 있음을 볼 수 있다. 이는 고차 원주 모우드 주파수로 갈수록 유체의 체적 탄성효과는 적어지고 순수한 부가질량효과가 지배적으로 나타남을 암시한다.

5. 결론

- (1) 수중 동축원통 셀 구조물의 고유진동 주파수는 공기중의 경우에 비하여 유체의 부가질량 효과로 인하여 현저히 감소한다.
- (2) 외부원통이 flexible 한 수중 동축원통 셀의 경우 내·외부 원통은 간격유체와의 상호작용으로 인하여 in-phase 및 out-of-phase 진동 모우드 형상으로 분리되어 나타나며, 간격이 증가함에 따라 in-phase 무차원 고유진동수는 대수적으로 감소하며, out-of-phase 무차원 고유진동수는 대수적으로 증가한다. 이것은 유체의 체적탄성 및 부가질량 효과의 상호작용에 기인한다.
- (3) 외부원통이 rigid한 경우, 노심지지원통 모델(내부원통 셀)의 수중에서의 무차원 고유진동수는 외부원통이 flexible한 동축원통 구조물의 in-phase 모우드 수와 out-of-phase 모우드 수 사이에 존재하며, 원주 모우드 수가 증가할수록 in-phase 모우드 수에 근접한다. 이로부터 원주 모우드 수가 증가하면, 부가질량 효과가 flexible 외부원통의 in-phase 모우드의 경우와 유사함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] L. Levin and D. Milan, "Coupled breathing vibrations of two thin cylindrical co-axial shells, in fluid", International Symposium on Vibration Problems in Industry, England, April 10-12, 1973
- [3] M. Chu, S. J. Brown and J. F. Lestingi, "An experimental vibration study of in-air and fluid coupled co-axial cylinders", 5th SMiRT, 1979
- [2] T. Chiba and N. Kobayashi, "A comparison of experimental and theoretical vibration results for fluid-coupled, co-axial cylinder", 7th SMiRT, 1983
- [4] T. R. Kim, *et al.*, "A study on the change

in dynamic characteristics of reactor internals", KAERI Report, KAERI/RR-1163/92, 1992

[5] J.H. Park et. al., "A study on the change in dynamic characteristics of a submerged co-axial cylindrical structure", International Conference on Vibration Engineering '94, Beijing, 1994

[6] Fritz, R., 1972, "The Effects of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids", ASME *Journal of enineering for Industry*, Vol94, pp. 167~173.

[7] I-DEAS software for reversion VI-i, SDRC corp., 1989

[8] ANSYS user's manual for revision 4.4, Swanson Analysis System Inc., 1989

표 2 곡선접합 계수

Case		in-phase		out-of-phase	
Mode no		A	b	A	b
1	2	0.47	-0.22	0.25	0.16
	3	0.43	-0.22	0.18	0.19
2	2	0.52	-0.21	0.36	0.23
	3	0.46	-0.21	0.33	0.24
3	2	0.49	-0.23	0.37	0.22
	3	0.49	-0.21	0.43	0.26

표 1 Flexible-to-flexible 동축원통셀의 공기중 및 수중 고유진동수

CASE MODE NO.	in WATER															
	GAP 1 (7.5 mm)				GAP 2 (25 mm)				GAP 3 (47.5 mm)				GAP 4 (110 mm)			
	IN*		OUT*		IN		OUT		IN		OUT		IN		OUT	
	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM	EXPER	FEM
1	190	184	6	164	15	148	21	111	111	109	195	152	32	37	39	
2	140	118	104	96	86	82	68	29	24	66	63	63	66	63	37	39
3	332	340	287	206	214	62	70	173	62	150	150	200	150	44	44	
4	627	651	498	387	144	332	134	307	134	307	78	128	78	78		
5	1009	798	817	628	274	554	242	470	242	365	169	169	132			
1	639	606	47	535	84	470	111	111	109	195	152	302	302			
2	376	342	75	287	310	85	251	116	120	121	121	272	272			
3	418	422	349	277	288	100	110	236	171	171	171	378	378			
4	681	547	551	428	446	172	194	366	227	227	227	324	324			
5	1057	1093	840	662	690	299	623	273	266	266	266	429	429			
1	1197	1088	122	960	210	757	266	266	239	239	239	362	362			
2	770	693	770	572	197	482	266	266	266	266	266	272	272			
3	642	681	584	451	187	201	362	227	227	227	227	324	324			
4	812	839	681	531	241	266	458	269	269	269	269	429	429			
5	1158	1198	934	736	360	594	346	346	346	346	346	253	253			

*: in-phase mode, **:out-of-phase mode

표 3 Flexible-to-rigid 동축원통 구조물의 공기중 및 수중 고유진동수

모우드 형상 변호		고유진동수(Hz)			
축방향 모우드 수 (m)	원주 모우드 수 (n)	공기중		수중	
		실험	유한 요소 해석	실험	유한 요소 해석
1	1	77	94	259	456
1	2	-	120	324	324
1	3	425	398	826	780
2	2	-	397	938	996
2	3	554	508	1022	1009
2	4	877	878	1669	1605
3	1	-	-	-	-
3	2	1096	977	2205	2263
3	3	-	849	-	-
3	4	1211	1218	1967	1982
4	1	-	-	-	-
4	2	-	1621	-	-

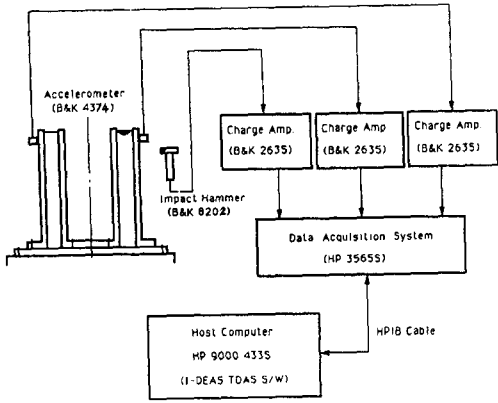


그림 1 Flexible-to-flexible 동축원통셀 및 시험장치 개략도

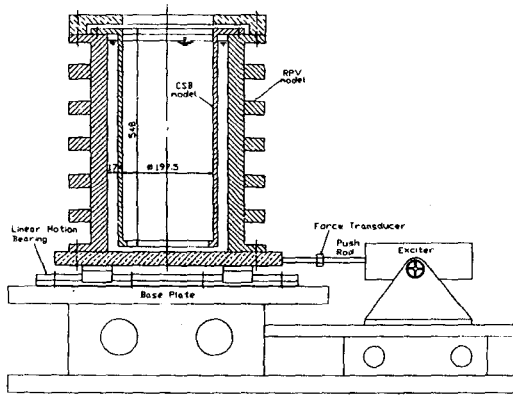


그림 2 Flexible-to-rigid 동축원통 구조물

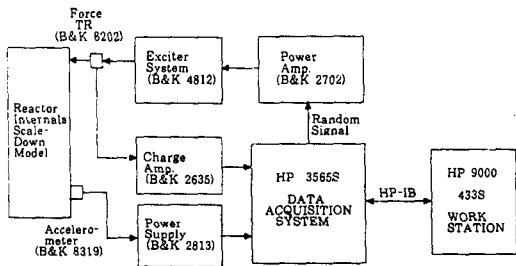


그림 3 Flexible-to-rigid 동축원통 구조물의 시험장치 개략도

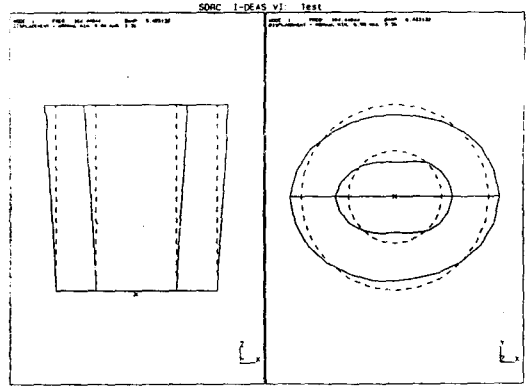


그림 4 In-phase 고유진동 모드($m=1, n=2$)

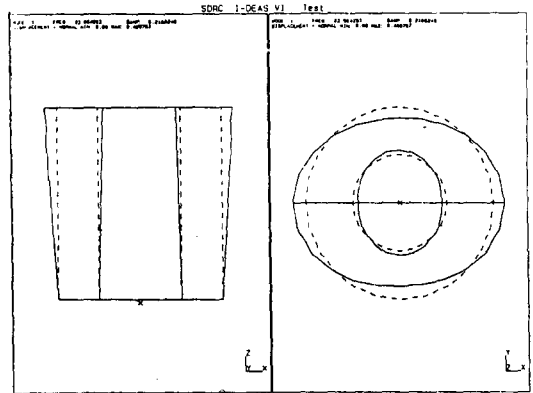


그림 5 Out-of-phase 고유진동 모드($m=1, n=2$)

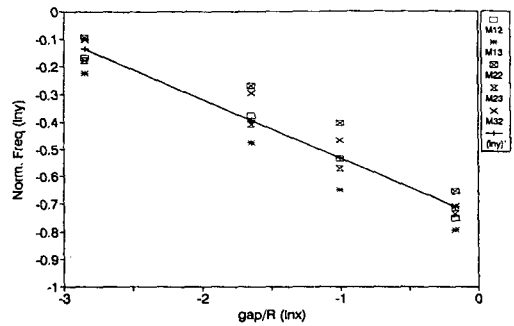


그림 6 간격의 변화에 따른 무차원 고유진동수(in-phase 모드)

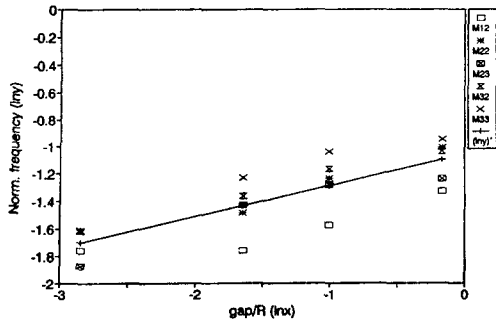


그림 7 간격의 변화에 따른 무차원 고유진동수(out-of-phase 모드)

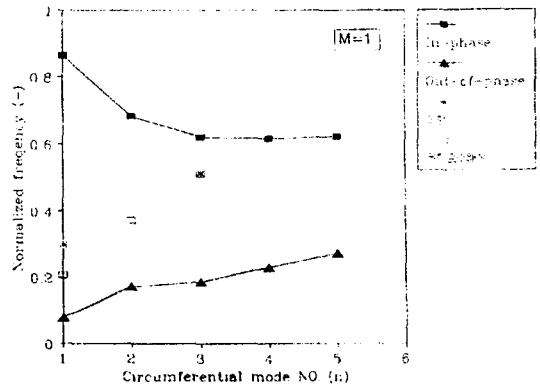


그림 10 원주 모드수(n)의 증가에 따른 무차원 고유진동수 비교(m=1)

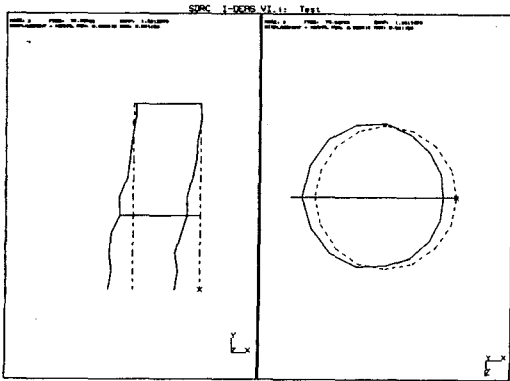


그림 8 Flexible-to-rigid 동축원통 구조물의 수중 고유진동모우드(m=1, n=1)

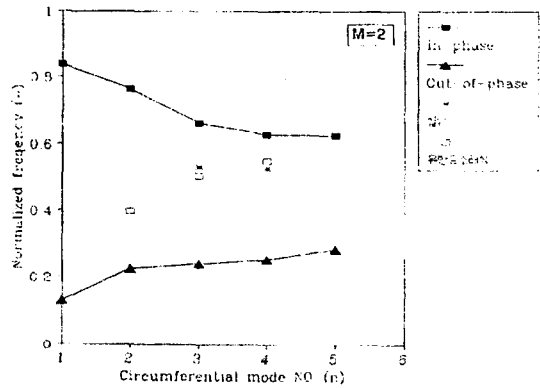


그림 11 원주 모드수(n)의 증가에 따른 무차원 고유진동수 비교(m=2)

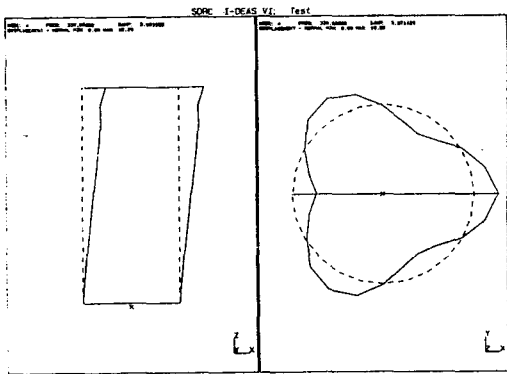


그림 9 Flexible-to-rigid 동축원통 구조물의 수중 고유진동모우드(m=1, n=3)

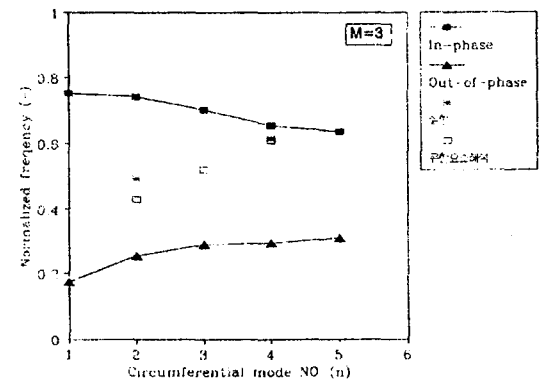


그림 12 원주 모드수(n)의 증가에 따른 무차원 고유진동수 비교(m=3)