

수중 원통형 셸 구조물의 고주파 진동 전달특성에 대한 실험적 연구

정현기* · 민천홍** · 박한일***

*국방과학연구소

**한국해양대학교 대학원

***한국해양대학교 해양공학과

Experimental Study on High Frequency Vibration Transfer Characteristic of Underwater Cylindrical Shell

Hyung-Gi Jung*, Cheon-Hong Min** and Han-Il Park***

*Agency for Defence Development, Jinhae, Korea

**Graduate School of Korea Maritime University, Busan, Korea

***Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Cylindrical shell 원통형 구조물, High frequency vibration 고주파 진동, Excitation 가진, Noise 소음, Underwater vehicle 수중운동체

ABSTRACT: Underwater vehicles such as UUVs (Unmanned Underwater Vehicles) and ROVs (Remotely Operated Vehicles) use sonar to detect their underwater environment or other underwater vehicles. The underwater vehicles designed recently have an electrical power system with high rotational speed. This system can generate high frequency vibrations above 10 kHz, and these vibrations can cause bad (negative) effects on the performance of the sonar. In many previous investigations, numerical analyses have been used for high frequency vibration problems. In this study, an experimental analysis was carried out, and a circular cylindrical shell was considered as the hull structure of an underwater vehicle. Frequency transfer functions for the circular cylindrical shell were identified using an experimental vibration analysis in the air and in a fully-submerged condition. We compare the frequency transfer functions in the air and water to obtain hydro-elastic effects. It is found that the dynamic characteristics of the circular cylindrical shell are changed by varying the response position.

1. 서 론

최근 해양에 대한 연구가 활발해지면서 해저 지형에 대한 탐사나 구조활동, 해저 지진, 해저 케이블 시공 및 수중 군사활동 등에 필요한 수중운동체에 대한 개발이 활발하게 진행되고 있다. 수중운동체의 선체는 주로 복수 개의 원통형 셸 구조로 구성 및 제작되며, 항해를 위해 주로 전기 추진방식을 채택하고, 해저 지형 등의 탐색을 위해 고주파(High frequency)의 소나(Sonar)나 하이드로폰(Hydrophone), 핑어(Pinger) 등을 탑재한다. 전기 추진방식은 고회력의 전동기와 감속기 및 프로펠러를 이용하므로 고주파의 진동이나 캐비테이션 등이 발생하여 고주파 대역을 주로 사용하는 소나에 소음원(Noise source)으로 작용함으로써 목표물의 탐색에 장애가 되거나 고장의 원인이 된다. 따라서 수중운동체 자체에 설치된 장비에 의해 발생하는 구조물의 고주파 진동 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다.

구조물의 진동 특성은 고유진동수(Natural frequency), 감쇠비(Damping ratio), 모드형상(Mode shape) 등과 같은 시스템

파라미터(System parameter)로 표현되며, 이러한 특성들은 구조물의 재질이나 형상 및 환경조건에 의해 결정된다. 특히, 구조물이 몰수상태(완전 접수상태)가 되면 이러한 진동특성이 달라진다. 그러므로 몰수상태에서 원통형 셸 구조물의 전달함수 변화를 알아보는 것은 구조물의 진동 해석을 위해 중요한 의미를 가진다.

이와 같이 구조물의 진동 특성을 규명하는 일반적인 방법은 유한요소해석(Finite element method)을 이용하는 방법으로 구조물의 접수효과를 모델링하기 위해서 부가질량법(Added mass method), 반 해석적 방법(Semi-analytical method), 전달행렬법(Transfer matrix method) 및 경계요소법(Boundary element method) 등을 사용한다(신창주 등, 2009). 특히 유체와 완전히 접촉하는 얇은 원통형 셸 구조물의 진동응답은 유한요소법과 경계요소법을 이용하여 연구되었다(Ugurlu et al., 2008). 그러나 이러한 해석기법을 이용하여 구조물의 진동특성을 정확히 추정하는 것은 매우 어려우므로 실험을 통해 결과의 정확성을 검증하여야 한다. 그런데 10kHz 이상의 고주파 범위에서는 기존의

교신저자 박한일: 부산광역시 영도구 동삼 2동, 051-410-4326, hipark@hhu.ac.kr

본 연구는 2001년 6월 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

곡선맞춤기법을 이용하여 진동 특성을 파악하기는 매우 힘들다 (민천홍 등, 2010). 더욱이 이러한 고주파 진동해석은 구조해석의 주요 관심대상이 아니며, 특수 목적으로 연구되는 추진 소음과 관련된 내용 등은 공개된 자료가 거의 전무한 상태이다. 실험을 통한 고주파 진동해석은 원통형 셸 구조물에 대하여 공기 중과 잠수 깊에 따라 가진점 주변에서의 진동 특성 규명을 위한 연구가 최근에 진행되었다(김병모 등, 2010; 민천홍 등, 2010; Min et al., 2010).

고주파 추진기에서 발생하는 고주파 진동은 구조물의 몸체를 타고 앞쪽으로 전달되어 소나에 영향을 준다. 소나를 고주파 진동으로부터 보호하기 위하여 구조물 설계시 고주파 진동의 전달특성을 고려할 필요가 있다. 그런데 기존의 연구(김병모 등, 2010; 민천홍 등, 2010; Min et al., 2010) 몰수 상태에 따른 고주파 진동의 변화특성을 주로 관찰하였고, 전달특성에 관한 연구는 미비한 편이다. 때문에 본 연구에서는 랜덤 가진(Excitation) 고주파 진동측정 실험을 통해 공기 중과 몰수상태에 대하여 복수개의 원통형 셸로 구성된 수중운동체 선체 구조물의 진동 전달 특성 변화를 규명하고자 한다.

2. 실험해석

2.1 실험내용

본 연구에서는 여러 개의 셸(Shell)로 구성된 원통형 수중운동체의 선체의 고주파 진동 전달특성을 규명하기 위하여 강제가진 진동 실험을 수행하였다. 접수된 구조물의 전달특성은 가진 방향에 따라 급격한 변화를 보인다(Min et al., 2011). 때문에 가진 방향에 따라 전달 특성을 파악할 필요가 있다. 가진 방향에 따른 고주파 진동 전달 특성을 관찰하기 위하여 가진기와 가속도 센서의 방향을 길이방향과 반경방향으로 각각 설치하였다. 또한 접수 상태에 따른 변화를 관찰하기 위하여 공기 중과 몰수상태에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 1은 몰수상태의 실험장치도를 보여주고 있다.

2.2 실험구성

본 연구에 이용된 구조물은 원통형 셸 4개로 구성되었으며, 총 길이 1.5m, 외경 0.3m, 두께 0.006m의 알루미늄 합금으로 제작되었다. 각 셸 사이에는 오링을 이용한 피스톤 형 수밀구조를 적용하여 방수 처리를 하였다. 셸 1에 가진기를 연결하기 위한 거치대를 설치하였다. 설치된 거치대는 길이방향과 반경방향으로 가진기를 연결할 수 있도록 도와준다. 가진기를 길이방향과 반경방향으로 설치하고 각종 수중센서에서 많이 사용하는 주파수 대역인 10k~25kHz까지 랜덤 가진을 하였으며, Fig. 2와 같이 가속도 센서는 전용 나사를 이용하여 셸 내부의 조립부 전후 각 섹션에 12개를 30도 등간격의 원주 둘레에 설치하였다. 몰수 실험에서 높이 1.5m, 폭 1m, 길이 25m의 2차원 조파수조가 이용되었으며, 이 때 수위는 1m로 설정하였다. 구조물의 크기에 비해 수조의 크기가 매우 크므로 수조 벽면에 의해 발생하는 반사파 등에 의한 유한 접수 효과를 무시 할 수 있다. 공기 중에서의 실험에서는 선체를 로프를 이용하여 구조물에 매달았으며, 수조에서는 무게추를 선체 외부의 양단에 설치하여 몰수상태가

되도록 하였다. 선체 내부에 설치된 가속도 센서 및 가진기, 힘 센서의 케이블은 방수 처리된 선체의 관통구를 통과하는 호스를 통하여 외부의 실험장비에 연결하였으며, 힘 센서는 가진기와 선체 사이에 설치하였다.

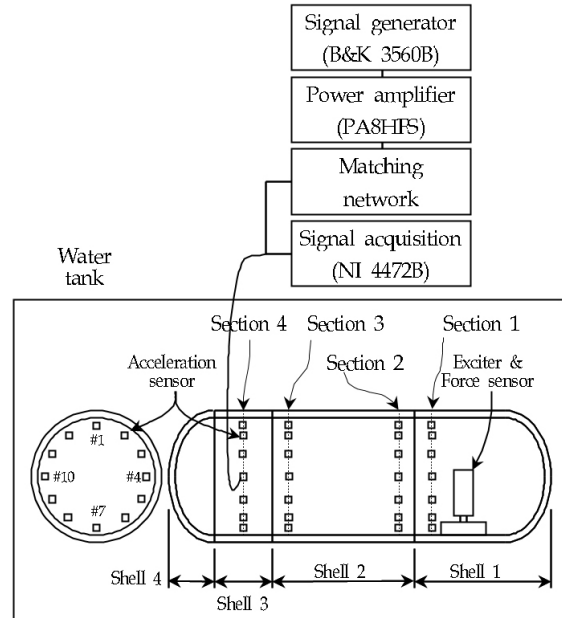


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

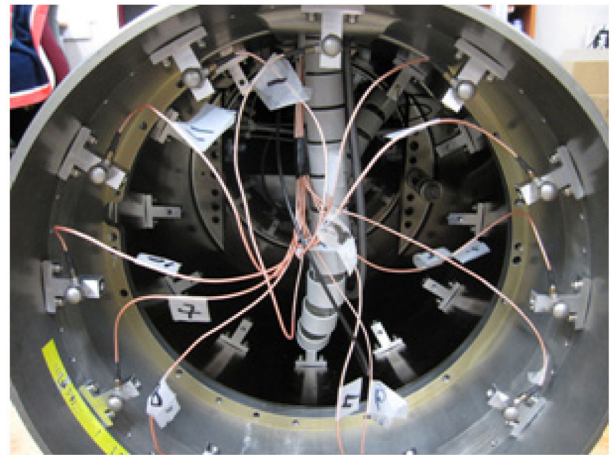


Fig. 2 Acceleration sensors mounted longitudinally inside the circular cylindrical shell

구성된 장비를 이용하여 공기 중과 몰수상태에서 길이방향과 반경방향에 대하여 가진기로 가진하여 원통형 셸 구조물의 주파수 전달함수를 구하고 이를 100번 반복하여 최종 전달함수를 획득하였다. 실험을 위하여 가진기는 80kHz까지 고주파수 진동 발생이 가능한 Wilcoxon F7-1, 가속도 센서는 90kHz까지 측정이 가능한 Endevco 7259B, 힘 센서는 Endevco 2312, 신호획득장비는 고주파 신호용 24비트 8채널의 NI 4472B, 신호발생기는 B&K 2 채널 3560B 등을 이용하였다.

3. 진동실험 결과 및 분석

3.1 길이방향 전달특성

Fig. 3~4는 공기 중과 몰수상태에서 길이방향으로 가진한 경우에 Fig. 1에서 보여주는 4번 점에서의 측정된 전달함수를 보여준다. 이러한 고주파실험에서는 측정범위 내에 수 십개가 넘는 모드가 포함되어 있으므로, 곡선맞춤법을 이용한 기존의 실험 진동 해석 방법으로 구조물의 진동특성을 얻는 것은 매우 힘들다. 더욱이 가진점과 응답점의 거리에 따른 전달함수의 변화를 특정한 상수로 표현하는 것도 매우 어렵다. 때문에 본 연구에서는 전달함수의 변화를 전달함수의 면적을 통해 비교하였다. Table 1~2는 공기 중과 몰수상태에서 길이방향으로 가진한 경우에 대한 전달함수의 면적(Area of frequency transfer function)이며, 이것은 셀 1에서 측정된 전달함수에 대하여 식 (1)과 같이 Normalizing 된 것이다.

$$A_{normal,i,j} = \frac{A_{total,i,j}}{A_{total,1,j}} \quad (1)$$

여기서, i 는 섹션의 위치를 나타내며 범위는 1~4, j 는 측정 위치를 나타내며 범위는 1~12이다.

다시 말하면, $A_{normal,i,j}$ 는 가진기가 설치된 섹션 1 위치에서 측정된 전달함수의 면적($A_{total,1,j}$)에 대한 i 번째 섹션에서의 전달함수 면적의 비이다. 이 비를 통하여 전달함수의 변화를 측정할 수 있다.

Table 1~2를 통해 전달함수의 응답 크기는 공기 중과 몰수상태 모두 가진기에서 멀어질수록 작아짐을 알 수 있다. 감소비율은 가진점과 가장 멀리 떨어진 4번 섹션의 경우에 공기 중에서 최대 0.065이며, 수중에서는 0.096이다. Table 2에서 5번과 9번의 'Error' 표시는 실험결과에 잡음이 많이 섞여있어 해석을 못한 경우이다.

Table 1 Normalized area of frequency transfer functions at each point in the air by longitudinal excitation

Point	Section #1	Section #2	Section #3	Section #4
#1	1	0.456	0.262	0.168
#2	1	0.274	0.392	0.115
#3	1	0.796	0.373	0.196
#4	1	0.306	0.231	0.129
#5	1	0.346	0.308	0.065
#6	1	0.496	0.356	0.158
#7	1	0.394	0.322	0.112
#8	1	0.835	0.491	0.242
#9	1	0.443	0.354	0.208
#10	1	0.609	0.284	0.216
#11	1	0.416	0.275	0.190
#12	1	0.537	0.367	0.247

Table 3은 가진기가 부착된 1번 섹션에서 측정된 공기 중과 몰수상태의 전달함수 크기를 비교한 것이다. Table 3을 통해 공기

중에서의 전달함수의 크기가 몰수상태에서의 전달함수 크기보다 큼을 알 수 있다. 이것은 같은 가진력이 작용할 경우 수중에서는 공기 중에서 보다 작은 응답이 발생됨을 의미하며, 이 때의 최대 감소비는 0.188이다.

Table 2 Normalized area of frequency transfer functions at each point in the fully-submerged condition by longitudinal excitation

Point	Section #1	Section #2	Section #3	Section #4
#1	1	0.408	0.252	0.102
#2	1	0.412	0.308	0.107
#3	1	0.768	0.393	0.165
#4	1	0.353	0.267	0.087
#5	Error	-	-	-
#6	1	0.591	0.206	0.096
#7	1	0.472	0.206	0.106
#8	1	0.806	0.217	0.135
#9	Error	-	-	-
#10	1	0.733	0.302	0.258
#11	1	0.537	0.197	0.131
#12	1	0.821	0.423	0.263

Table 3 Comparison of the area of frequency transfer functions at the first section in the air and fully-submerged condition by longitudinal excitation

Point	Section #1 in air (1)	Section #1 in fully-submerged (2)	(2)/(1)
#1	38886.24	9771.72	0.25129
#2	47256.16	8923.52	0.188833
#3	32462.72	8773.78	0.270272
#4	55899.36	14703.67	0.263038
#5	63097.2	error	-
#6	58533.63	19124.02	0.326719
#7	48917.41	16067.09	0.328453
#8	35210.41	14038.69	0.398708
#9	34145.41	error	-
#10	41280.14	10081.45	0.24422
#11	47525.8	14121.23	0.297128
#12	30021.37	7429.94	0.247488

3.2 반경방향 전달특성

Fig. 5~6은 공기 중과 몰수상태에서 반경방향으로 가진한 경우에 대하여 4번 점에서 측정된 전달함수를 보여준다. Table 4~5는 공기 중과 몰수상태에서 반경방향으로 가진한 경우에 대한 전달함수의 면적이다. Table 4~5를 통해 전달함수의 응답 크기는 공기 중과 몰수상태 모두 가진기에서 멀어질수록 작아짐을 알 수 있다. 감소비율은 가진점과 가장 멀리 떨어진 4번 섹션의 경우에 공기 중에서 최대 0.06이며, 수중에서는 0.00005이다. Table 5에서

8번의 'Error' 표시는 실험결과에 잡음이 많이 섞여있어 해석을 못한 경우이다.

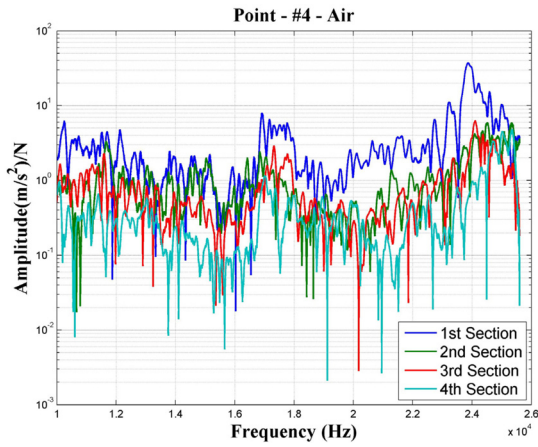


Fig. 3 Frequency transfer functions at the fourth point on the each section in the air via longitudinal excitation

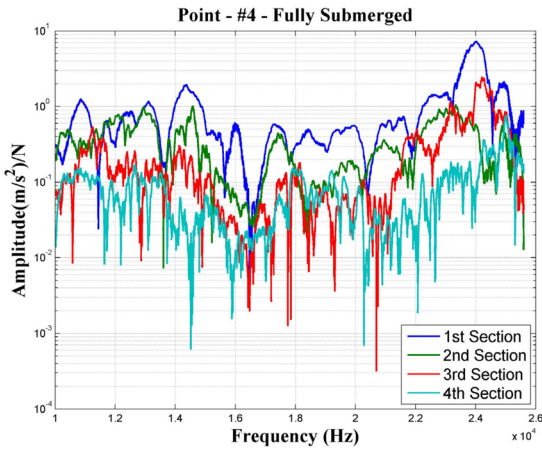


Fig. 4 Frequency transfer functions at the fourth point on the each section in the fully-submerged condition via longitudinal excitation

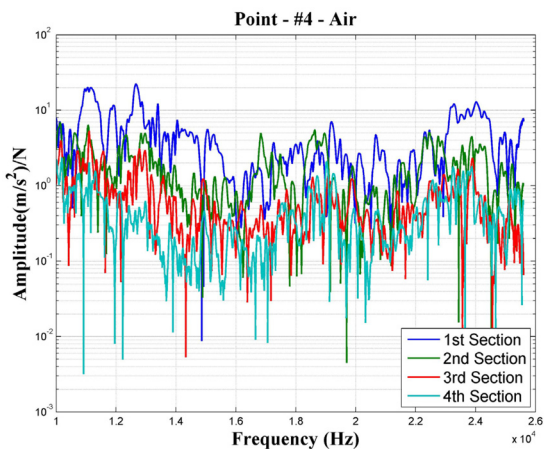


Fig. 5 Frequency transfer functions at the fourth point on the each section in the air via radial excitation

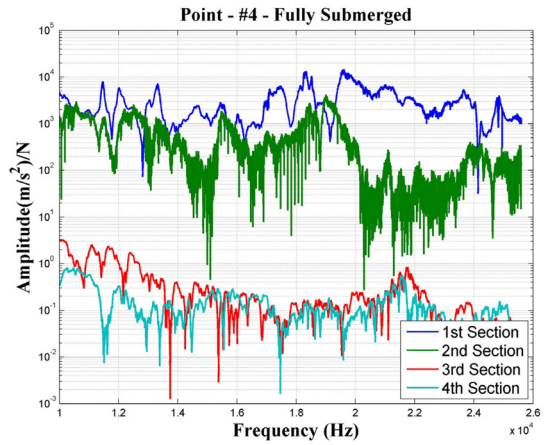


Fig. 6 Frequency transfer functions at the fourth point on the each section in the fully-submerged condition via radial excitation

Table 4 Normalized area of frequency transfer functions at each point in the air by radial excitation

Point	Section #1	Section #2	Section #3	Section #4
#1	1	0.399	0.181	0.147
#2	1	0.389	0.254	0.095
#3	1	0.455	0.239	0.105
#4	1	0.389	0.156	0.100
#5	1	0.327	0.170	0.088
#6	1	0.453	0.250	0.119
#7	1	0.390	0.200	0.060
#8	1	0.497	0.245	0.111
#9	1	0.300	0.155	0.063
#10	1	0.772	0.222	0.144
#11	1	0.327	0.160	0.085
#12	1	0.399	0.193	0.063

Table 5 Normalized area of frequency transfer functions at each point in the fully-submerged condition by radial excitation

Point	Section #1	Section #2	Section #3	Section #4
#1	1	0.34222	0.00041	0.00012
#2	1	0.14191	0.00012	0.00005
#3	1	0.24017	0.00022	0.00006
#4	1	0.19384	0.00014	0.00005
#5	1	0.24093	0.00014	0.00005
#6	1	0.21394	0.00014	0.00009
#7	1	1.04055	0.00039	0.00012
#8	Error	-	-	-
#9	1	0.25770	0.00022	0.00007
#10	1	0.00009	0.00027	0.00012
#11	1	0.40604	0.00022	0.00008
#12	1	0.52222	0.00024	0.00005

Table 6 Comparison of the area of frequency transfer functions at the first section in the air and fully-submerged condition by radial excitation

Point	Section #1 in air (1)	Section #1 in fully-submerged (2)	(2)/(1)
#1	66991.76	21402924.71	319.49
#2	68899.58	39114779.92	567.71
#3	59887.09	36844801.97	615.24
#4	69288.99	45677422.07	659.23
#5	89241.62	42383425.71	474.93
#6	71172.25	44085703.18	619.42
#7	89429.32	22300933.81	249.37
#8	66256.49	error	-
#9	94354.22	35950157.33	381.01
#10	52895.66	22463513.88	424.68
#11	94599.52	27915406.62	295.09
#12	76480.71	25107881.62	328.29

Table 6은 가진기가 부착된 1번 섹션에서 측정된 공기 중과 몰수상태의 전달함수 크기를 비교한 것이다. 실험결과, 가진점 근처에서의 반경방향에 대한 전달함수는 공기 중에서보다 몰수상태에서 응답이 아주 크게 나타났다. 이것은 원통형 구조물의 외부에 접촉된 액체(청수)가 경계조건으로 작용하여 전달함수의 감소가 작다는 것을 의미한다.

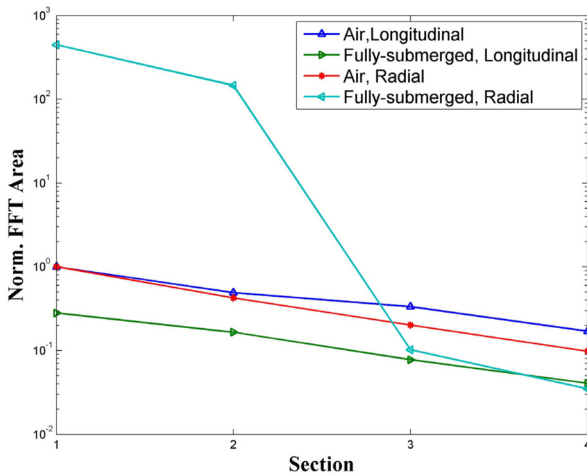


Fig. 7 Comparison of the area of frequency transfer functions at the each sections in the air and fully-submerged condition by longitudinal and radial excitation

5. 결 론

본 논문에서는 고주파 진동이 발생하는 수중운동체의 진동 전달 특성을 규명하기 위하여 공기 중과 몰수상태에서 길이방향과 반경방향에 대하여 가진기를 설치하고 10k~25kHz까지 랜덤

가진을 하여 고주파 진동 실험을 수행하였다. Fig. 7은 각각의 조건에서 측정한 전달함수의 면적의 평균을 비교한 것이다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공기 중에서는 길이방향과 반경방향 가진의 진동응답이 유사하게 나왔으며, 가진점에서 멀어지면서 진동응답이 일정하게 감소하였다.
- (2) 몰수상태에서는 길이방향 가진의 진동응답이 반경방향 가진의 응답보다 작게 나타났다.
- (3) 가진점에서 멀어질수록 진동이 감소되며, 가진점에서 가장 먼 곳은 공기 중보다 몰수상태의 응답이 작다.
- (4) 반경방향 가진의 경우, 가진점 근처에서 진동응답은 공기 중에서보다 몰수상태에서 상당히 크게 나타났다.
- (5) 길이방향 가진의 경우, 전체 영역에서 공기 중에서보다 몰수상태에서 진동응답이 작게 나타났다.
- (6) 고출력의 추진장치에 의한 고주파 가진은 선체 내부에 설치된 고주파 대역을 사용하는 각종 센서에 영향을 줄 수 있다. 앞으로의 진행이 필요한 연구내용은 다음과 같다.
 - (1) 본 연구에서는 가속도 센서를 고정하기 위하여 사용된 탭과 가진기를 부착하기 위하여 설치된 거치대 등과 같은 부속물에 의한 고주파 진동 전달 특성의 변화를 고려하지 못하고 있다. 고주파에 영향을 줄 수 있는 이러한 부속물에 관한 연구가 추가되어야 할 것이다.
 - (2) 구조물의 구조적 특성과 연결한 고주파 해석방법에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.
 - (3) 위와 같은 결과를 바탕으로, 수중운동체에서 발생하는 고주파 진동의 전달특성 해석 프로그램을 개발하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 소관 지역MIT특성화사업의 연구비 지원 (해양산업고도화를 위한 핵심 해양장비 개발 - 전기모터 기반의 해중 매니플레이터 및 추진시스템 개발)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김병모, 민천홍, 박한일, 정현기 (2010). "원통 쉘의 접수 진동 해석", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 2327-2331.

민천홍, 정현기, 박한일 (2010). "원통형 구조물의 고주파 진동 해석을 위한 기초연구", 한국해양공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp 137-140.

신창주, 홍진숙, 정의봉, 서희선 (2009). "원통형 배열 구조물의 접수진동 해석", 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제1호, pp 175-182

Min, C.H., Park, H.I., Kim B.M. and Kim, S.P. (2010). "An Experimental Study on the Hydro-elastic Analysis of a Circular Cylindrical Shell", The Ninth (2010) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE,

Busan, Korea, pp 275-281.

Min, C.H., Park, H.I., Jung H.G. and Yoo, J.H. (2011). "An Experimental Study on High-Frequency Vibration Analysis of a Circular Cylindrical Shell in Contact with Water", The Twenty-first International Offshore(Ocean) and Polar Engineering Conference, ISOPE, Maui, Hawaii, USA, pp 322-326.

Ugurlu, B. and Ergin, A. (2008). "A Hydroelastic Investigation of

Circular Cylindrical Shells-containing Flowing Fluid with Different End Conditions", Journal of Sound and Vibration, Vol 318, pp 1291-1312.

2011년 7월 15일 원고 접수
2011년 10월 11일 심사 완료
2011년 10월 17일 게재 확정