

CRP 재질 및 SNORE 링 부착에 따른 다층 곡면 구조물의 진동 차단 특성 연구

이종길* · 조치영**

<국문초록>

수중 운동체가 기동할 때 돛 앞쪽에 설치된 센서에 유기되는 진동과 소음은 구조를 통해 전달된다. 구조를 통해 전달되는 소음과 진동이 음향 센서의 성능을 저하시키는 요인이 되지 않도록 구조물로 타고 들어오는 진동파를 효과적으로 차단하기 위하여 본 연구에서는 CRP(Carbon Reinforced Plastic)와 SNORE 링(Self-NOise REduction Ring)을 설치하고 주파수에 따른 변위와 응력의 변화를 관찰하였다. 곡면 구조물의 재질은 알루미늄이며 최대 외경 530mm, 길이 215mm 정도이다. 곡면 구조물의 전면부는 직경이 270mm이며 평면형상으로 되어 있다. 주파수에 따른 CRP와 SNORE 링 부착 전후에서의 응력 감소율을 시뮬레이션 하였으며 12kHz와 15kHz 주변에서는 95% 이상의 감소율을 보였다. 음향 센서의 부착 위치에 따른 응력의 변화를 계산하였으며 중심부에서 가장 높게 나타났고 20mm, 40mm 떨어진 곳으로 이동할수록 응력의 크기가 낮게 나타났다. 본 연구의 결과는 음향센서의 감도를 높이는데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

주요어: 다층 곡면 구조물, CRP, SNORE 링, 진동 차단 특성

* 교신저자: 이종길(jlee@andong.ac.kr), 안동대학교 기계교육과 교수, 010-4512-0013

** 국방과학연구소 제6기술연구본부

I. 서론

1. 연구의 필요성

수중 운동체에 사용되는 음향 센서(underwater acoustic sensor)는 그 특성과 신호 처리 능력이 아무리 뛰어나다 하더라도 음향 센서에 미치는 S/N(신호 대 잡음)비가 작다면 그 시스템은 원하는 성능을 발휘하기가 어렵게 된다(홍진숙, 신구균, 1994). 따라서 다층 곡면 구조물을 통하여 센서에 전달되는 자체소음과 진동을 최소화하는 노력이 필요하다. 즉 프로펠러나 내부 장치들에 의하여 발생하는 소음과 진동이 몸체를 통하여 두부(nose)의 음향센서에 전달되어 표적 탐지 성능을 저하시킨다. 이에 따라 곡면 구조물로 전달되는 소음과 진동을 최소화하는 차단제가 필요하며 따라서 본 연구의 필요성이 대두된다.

2. 연구의 목적

수중 운동체가 고속으로 진행할 경우 추진으로 인한 소음, 진동이 발생하고 다층 곡면 구조물에서 발생하는 진동은 결국 전면부의 배열 센서의 감도에 영향을 미치게 된다. 수중 운동체가 기동할 때 돛 앞쪽에 설치된 센서에 유기되는 소음은 모타, 추진기 및 유동에 의해 생성된 소음이 주위의 유체를 통해 전달되거나 구조를 통해 전달된다. 따라서 구조를 통해 전달되는 소음이 음향 센서의 성능을 저하시키는 요인이 되지 않도록 음향 센서 주위에 음향 차단재를 설치하면 그 효과가 클 것으로 판단된다. 이러한 구조는 소음 차단링(SNORE Ring, Self-NOise REduction Ring)이라 알려져 있다(하태현, 이종길, 김원호, 2010). 이러한 내부 진동의 전파를 감소시키기 위하여 구조물로 타고 들어오는 진동과를 효과적으로 차단하기 위하여 CRP(Carbon Reinforced Plastic)를 설치하고 주파수에 따른 변위와 응력의 변화를 관찰하는 것이 본 연구의 목적이다.

3. 선행 연구 조사

원통형 셀 구조에서 내압(p_x, p_y, p_z)을 받는 구조물의 변형은 다음 식 (1)~(3)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 (3)은 각각 x, y, z 방향으로의 변위 지배 방정식(governing equation)이다. 여기서 u, v, w 는 변위, a 는 원통 셀의 반경, ν 는 푸아송 비, E 는 탄성 계수, t 는 두께이다(Ugural, 1981). 식 (1)~(3)을 이용하면 원통 셀 구조에서의 외압에

의한 변위를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2a^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} - \frac{\nu}{a} \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{p_x(1-\nu^2)}{Et} \quad (1)$$

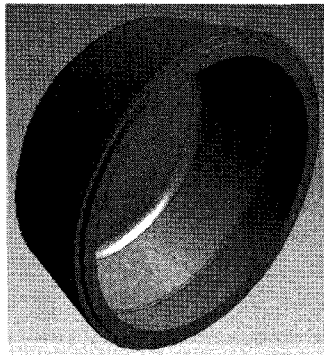
$$\frac{1+\nu}{2a} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} = -\frac{p_y(1-\nu^2)}{Et} \quad (2)$$

$$\frac{\nu}{a} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{a^2} - \frac{t^2}{12} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2}{a^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{a^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right) = -\frac{p_r(1-\nu^2)}{Et} \quad (3)$$

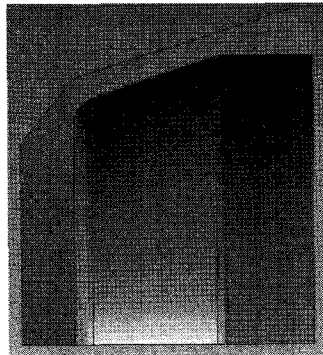
두 개의 원형 실린더 사이에서 발생하는 유체 유기 진동을 실험적으로 조사한 연구가 있으며(Assi et al., 2006) 에서는 원형 실린더에 장애물이 있을 때와 없을 때의 유체 유기 진동을 측정한 연구 결과도 있다(Kumar & Gowda, 2006). 최근의 연구(Lam et al., 2006)에서는 표면 와류법(vorticity method)을 이용하여 실린더 배열의 횡 유체 유기 진동을 시뮬레이션 하였다. 다른 연구에서는 무한이 긴 다층 구조의 배플과 돔에 점 하이드로폰(point hydrophone)이 받는 응답을 이론과 실험으로 통하여 분석한 결과도 있다(Ebenezer & Abraham, 1996). 또 다른 연구자(Ko & Sherman, 1979)는 다른 연구(Ebenezer & Abraham, 1996)의 모델과 유사한 배플에 설치된 하이드로폰이 받는 압력을 계산하였다.

II. 곡면 구조물의 모델링 형상 및 가진 해석

수중음향 센서가 부착되어 수중에서 음향을 감지할 때 효과적인 구조는 [그림 1]과 같은 다층 곡면 형상 구조이다. 수중에서 고속으로 이동하기에 적합한 구조이며 유체의 흐름을 효과적으로 이용하여 외부 유입 유체 소음을 최소화 하는 기술이 필요하다. [그림 1]의 (a)는 다층 곡면 구조물의 형상이며 (b)에는 시뮬레이션을 위한 모델링 형상을 보였다.



(a) 곡면 구조물 형상

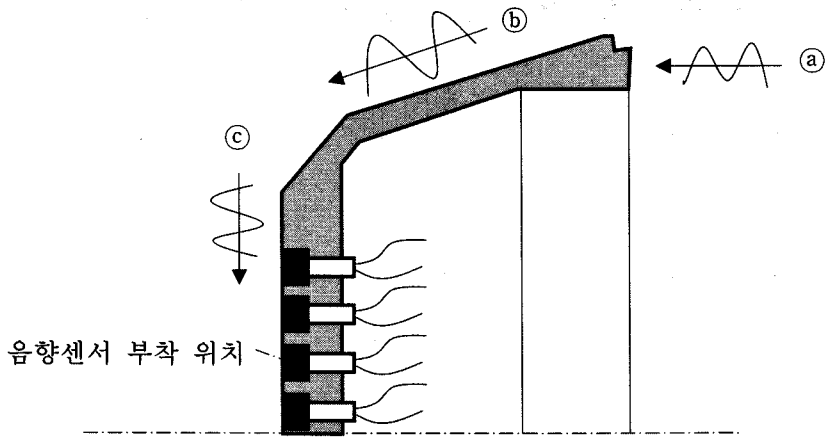


(b) 곡면 구조물의 단면 형상

[그림 1] 다층 곡면 구조물의 모델링 형상

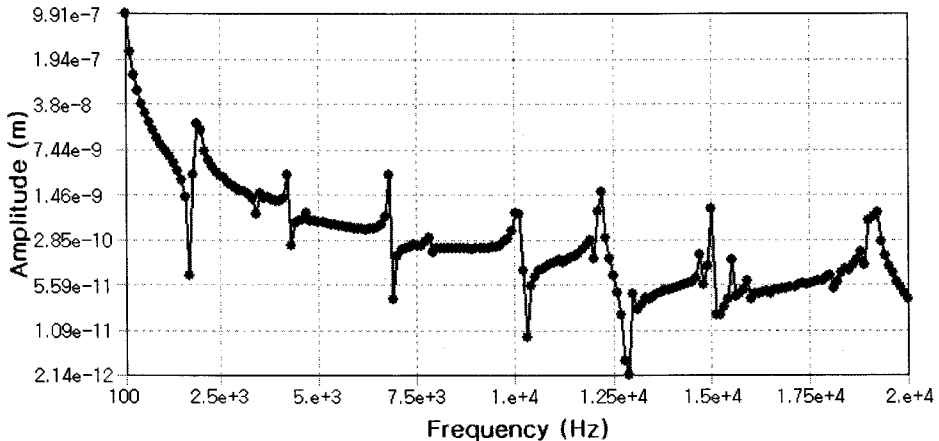
[그림 1]의 재질은 알루미늄(Al 6061-밀도: $2,700\text{kg/m}^3$, 탄성 계수: 71GPa , 푸아송 비: 0.33)이며 최대 외경의 크기는 530mm , 길이는 215mm 정도이다. 곡면 구조물의 전면부는 직경이 270mm 이며 평면형상으로 되어 있다. [그림 1]의 (b)에서 왼쪽 부위는 운동체가 고속으로 수중에서 움직일 때 유체의 압력을 직접 받는 부위이다.

수중에서 고속으로 운동하기 위하여 자체 추진을 하게 되는데 추진기에서 발생하는 캐비테이션과 구조 전달 진동 등은 [그림 2]에서와 같이 ①~③의 방향으로 전파되어 음향 센서에 영향을 미치게 된다. [그림 2]에서 ①과 ②를 통하여 전파되는 구조전달 진동은 매질의 중간에 적절한 진동 차단제를 설치하고 진동을 차단할 수 있다. 이러한 차단제로 널리 알려진 것이 CRP(Carbon Reinforced Plastic, 밀도: $1,600\text{kg/m}^3$, 탄성 계수: 125GPa , 푸아송 비: 0.35)이다. 따라서 본 논문에서는 CRP 재질을 적절한 위치에 삽입하였을 때 이의 진동 차단 성능을 보고자 하였다. 이러한 설계 방법은 수중 운동체의 진동 차단 해석에 귀중한 자료로 활용되며 효과적인 음향 탐지에 필수요소로 생각된다.



[그림 2] 다층 곡면 구조물에 부착된 센서 및 외부 가진원의 종류

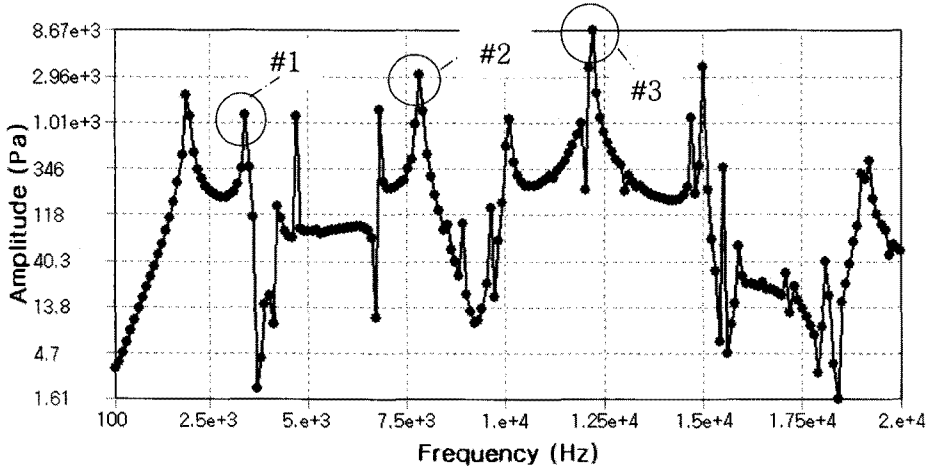
[그림 3]에는 ③의 위치에서 주파수 가진(하모닉)을 주었을 때 각 주파수별 음향센서 부착위치에서의 진동 변위를 보인 것이다. [그림 3]은 주파수 스펙트럼을 20kHz 까지만 본 것이다. [그림 3]에서 2kHz, 4kHz, 7kHz, 10kHz, 12kHz, 15kHz, 19kHz 등의 주파수에서 진동 변위가 감지되었다. 2kHz 인근에서 진동 변위가 가장 높음을 알 수 있다.



[그림 3] 가진 주파수에 따른 진동 변위

[그림 4]는 같은 방법으로 가진한 것으로서 센서 부착위치에서 응력을 주파수별로 나타낸 것이다. [그림 3]과 비교하여 3kHz(#1 위치), 8kHz(#2 위치) 근방의 주파수가 추가로 감지되었다. [그림 4]에서 최고 수직 응력은 12kHz(#3 위치)의 주파수에서 나

타났으며 최대 응력이 걸리는 지점의 센서는 변형을 일으켜 음압 탐지에 악 영향을 미치게 된다. 이러한 센서에 미치는 응력의 크기를 줄이기 위하여 가진 주파수에 따라 응력의 크기를 최소화하는 CRP 재질을 삽입할 필요가 있다.

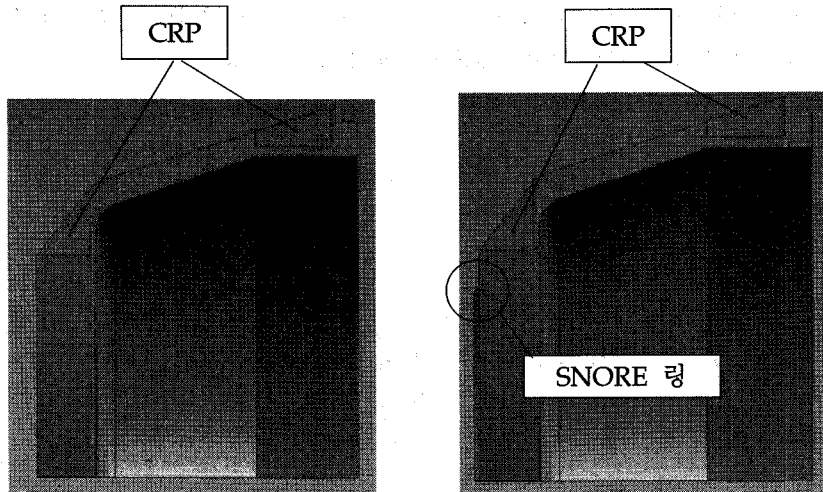


[그림 4] 가진 주파수에 따른 응력의 변화

III. CRP 재질의 진동차단 특성 시뮬레이션 결과 및 분석

[그림 3] 및 [그림 4]의 결과에서 보듯이 음향 센서의 음압 탐지 성능을 향상시키기 위하여 각 주파수별 진동 변위와 응력의 크기를 줄이는 재질이 필요함을 알 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 CRP 재질을 [그림 5]의 (a)와 같이 두 곳에 설치하고 진동 차단 특성을 상용 S/W를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 또한 [그림 5]의 (b)와 같이 구조를 통해 전달되는 진동이나 소음이 음향 센서 성능을 저하시키는 요인이 되지 않도록 음향 센서 주위(혹은 음향 센서 부착 위치)에 음파 전달을 막는 장애물을 설치하면 효과가 크다. 이를 SNORE(Self-NOise REDuction) 링이라 한다. [그림 5]의 (b)에는 SNORE 링이 설치되어 있는 모습을 보였다. 본 시뮬레이션에 사용된 링의 크기는 폭이 2mm, 높이가 5mm인 사각 형태이며 내부에는 공기가 채워져 있다. [그림 2]의 ©에서와 같이 구조물을 타고 들어오는 음파는 SNORE 링의 역할로 인하여 음파 에너지가 음향 센서에 충분히 도달하지 못한다. SNORE 링을 보호하기 위하여 일반적으로 폴리우레탄(PU) 재질로 전면부를 몰딩(molding)하는 경우가 있으나 본 연구에서는 그 영향을 고려하지 않았고 [그림 1]과 [그림

5]의 비교에서 꺾임 부위의 곡면형상 차이는 미미하여 무시하였다.

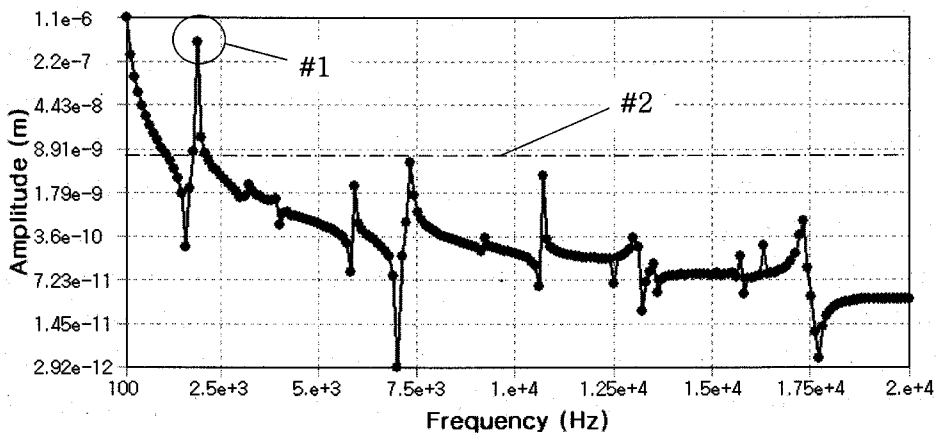


(a) CRP 재질 부착

(b) CRP와 SNORE 링 부착

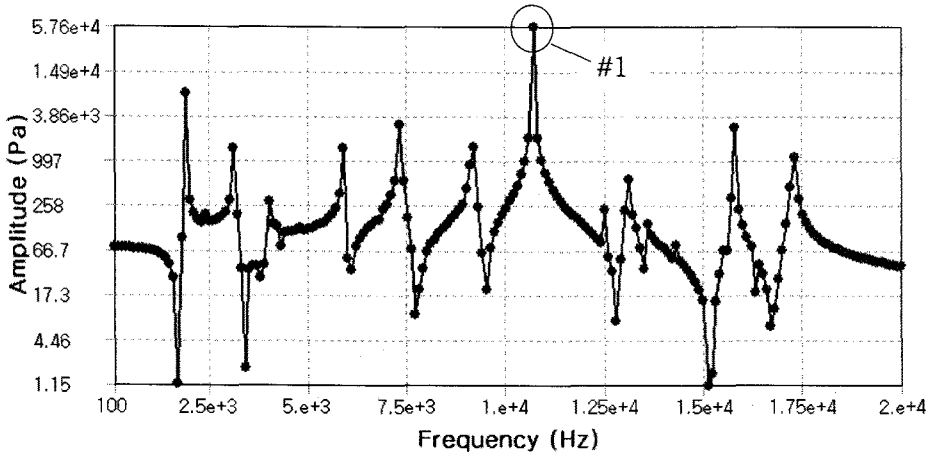
[그림 5] CRP 재질을 삽입한 것과 SNORE 링을 부착한 형상 모델링

CRP가 [그림 5]와 같이 부착된 상태에서 [그림 2]의 ㉠ 부분에서 가진 하였을 때 주파수별 응답 특성을 [그림 6]에 보였다. CRP가 없을 때의 [그림 3]과 비교하여 보면 먼저 #1의 주파수(2kHz 대역)에서 오히려 진동 변위는 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 CRP 재질의 특성에서 오는 것으로 판단되며 2kHz 대역의 진동 가진 주파수가 주로 발생하는 구조물에서는 CRP의 효과를 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 그러나 대부분의 수중 운동체의 구조 진동은 고주파 영역에서 발생하므로 큰 영향은 없으리라 사료된다. #2 선은 [그림 3]의 변위와 같은 값의 상한치로서 #1을 제외한 타 주파수 대역은 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

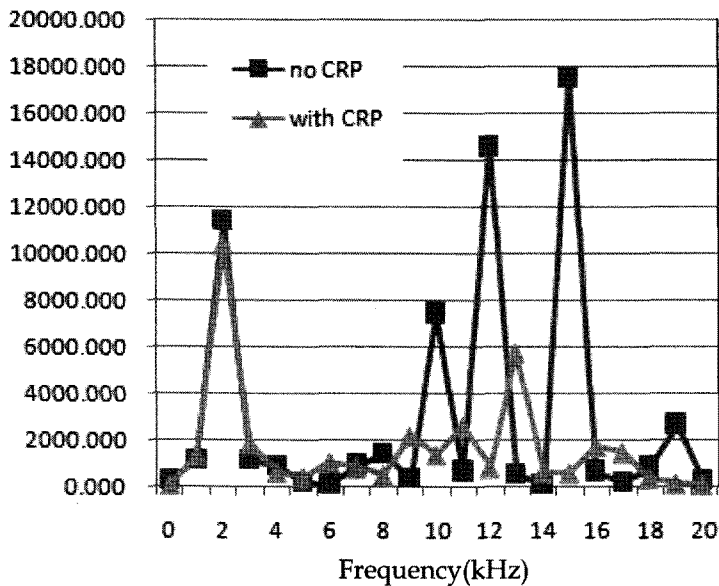


[그림 6] CRP가 부착된 형상에서 가진 주파수에 따른 진동 변위

CRP가 [그림 5]와 같이 부착된 상태에서 [그림 2]의 ㉠ 부분에서 가진 하였을 때 주파수별 응력의 변화를 [그림 7]에 보였다. CRP가 없을 때의 [그림 4]와 비교하여 보면 먼저 #1의 주파수(10.5kHz 대역)에서 오히려 응력이 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 [그림 8]은 [그림 2]의 전면부(센서 부착 위치)에서 CRP 부착 전과 후에서의 응력의 변화를 비교한 것인데 2kHz 주변에서는 차이가 없으나 타 주파수 영역에서는 CRP의 부착으로 응력이 많이 감소함을 알 수 있다.

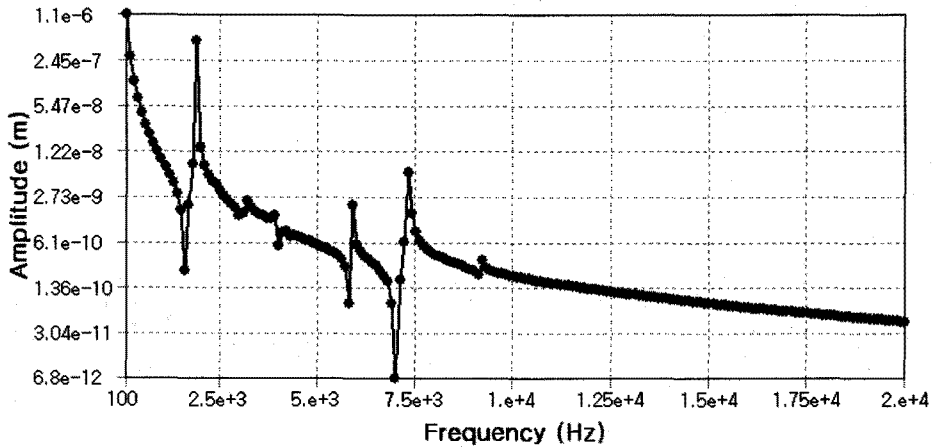


[그림 7] CRP가 부착된 형상에서 가진 주파수에 따른 센서 부위의 응력의 변화

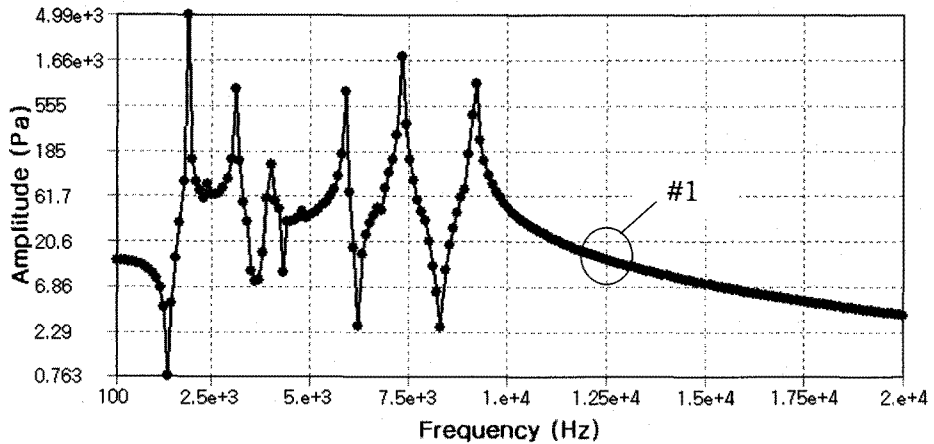


[그림 8] CRP 부착 전과 후의 응력의 변화(수직축의 단위: Pa)

[그림 9]와 [그림 10]에는 각각 SNORE 링과 CRP가 부착된 형상에서 가진 주파수에 따른 진동 변위와 응력의 변화를 보인 것이다. [그림 3]과 [그림 4]를 이와 비교하면 10kHz 이상의 대역에서 응력이나 진동 변위가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 즉 [그림 10]의 #1 부위에서 보듯이 응력의 크기는 현저히 줄어들음을 알 수 있다.

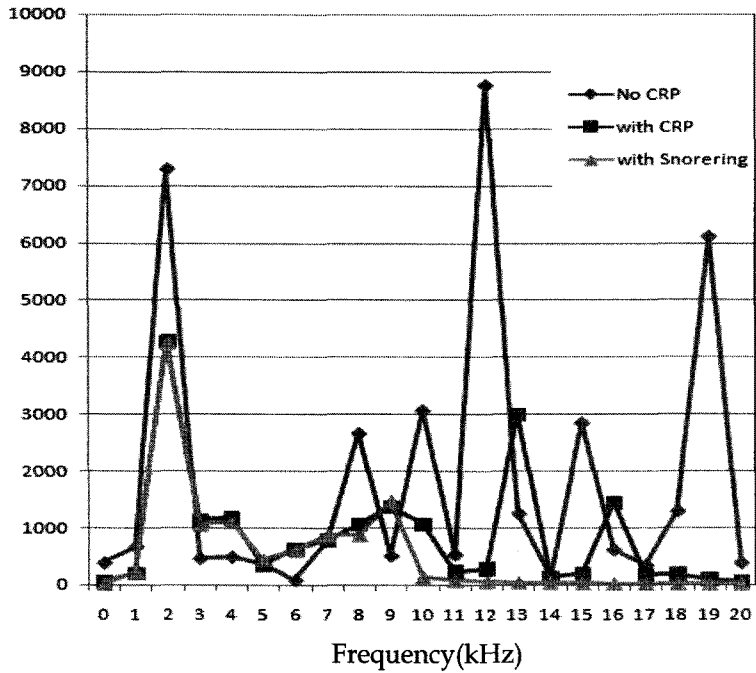


[그림 9] SNORE 링과 CRP가 부착된 형상에서 가진 주파수에 따른 진동 변위

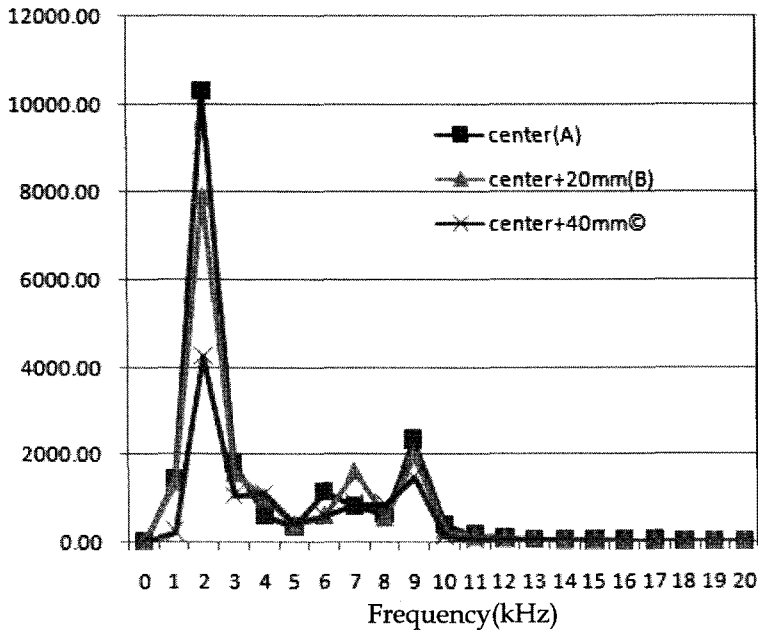


[그림 10] SNORE 링과 CRP가 부착된 형상에서 가진 주파수에 따른 센서 부위의 응력의 변화

[그림 11]은 SNORE 링과 CRP가 부착되기 전과 후의 센서 부위의 응력의 변화를 보인 것인데 SNORE 링과 CRP를 부착한 경우 센서 위치에서의 응력의 크기는 차단 재질이 없는 경우와 비교하여 현저히 감소함을 알 수 있다.



[그림 11] SNORE 링과 CRP가 부착되기 전과 후의 센서 부위의 응력의 변화(수직축의 단위: Pa)



[그림 12] 센서 부착위치에 따른 SNORE 링과 CRP가 부착되기 전과 후의 응력의 변화(수직축의 단위: Pa)

[그림 12]는 센서 부착위치에 따른 SNORE 링과 CRP가 부착되기 전과 후의 응력의 변화를 비교한 것이다. [그림 2]에서와 같이 음향 센서의 부착 위치가 가운데 이면(중심선 부위) 'center(A)'에 해당한다. 여기서부터 20mm, 40mm 떨어진 곳에서의 응력의 크기를 [그림 12]에 비교한 것이다. 곡면 구조물의 전면부는 평면 형상이며 외부 가진이 이루어졌을 때 중심선 부위에 가장 많은 응력이 작용함을 알 수 있다.

<표 1> 주파수에 따른 CRP와 SNORE 링의 부착 전후에서의 응력(Pa) 감소율

Frequency (kHz)	no CRP	with CRP	SNORE ring +CRP	reduction(%), CRP	reduction(%), SNORE ring
0	263.7	90.5	17.7	34.3	6.7
1	1173.5	1341.0	1427.9	114.3	121.7
2	11458.0	10392.0	10309.0	90.7	90.0
3	1131.2	1874.7	1799.8	165.7	159.1
4	871.9	623.0	622.7	71.5	71.4
5	208.7	413.7	347.1	198.2	166.3
6	127.3	1058.2	1158.4	831.5	910.2
7	952.3	848.4	810.7	89.1	85.1
8	1393.8	514.8	664.6	36.9	47.7
9	361.0	2183.9	2344.0	605.0	649.3
10	7474.9	1375.9	395.6	18.4	5.3
11	677.5	2601.1	159.7	383.9	23.6
12	14634.0	840.2	95.9	5.7	0.7
13	566.4	5757.4	66.6	1016.4	11.8
14	141.7	614.6	50.1	433.9	35.4
15	17530.0	606.9	39.7	3.5	0.2
16	668.1	1742.0	32.5	260.7	4.9
17	196.5	1473.3	27.2	749.7	13.9
18	849.3	379.4	23.3	44.7	2.7
19	2693.9	153.0	20.2	5.7	0.7
20	261.5	89.3	17.7	34.2	6.8

<표 1>에는 주파수에 따른 CRP와 SNORE 링 부착 전후에서의 응력 감소율을 표로 정리하여 나타낸 것이다. <표 1>에서와 같이 12kHz와 15kHz 주변에서는 95% 이상의 감소율을 보이고 있다. 다른 주파수에서 감소율이 100% 이상으로 계산된 것은 [그림 11]과 [그림 12]에서 보는 바와 같이 그 크기가 미미함을 알 수 있다.

IV. 결론

수중 운동체가 고속으로 진행할 경우 추진으로 인한 소음, 진동이 발생하고 다층 곡면 구조물에서 발생하는 진동은 결국 전면부의 배열 센서의 감도에 영향을 미치게 된다. 수중 운동체가 기동할 때 돔 앞쪽에 설치된 센서에 유기되는 소음은 모타, 추진기 및 유동에 의해 생성된 소음이 주위의 유체를 통해 전달되거나 구조를 통해 전달된다. 따라서 구조를 통해 전달되는 소음이 음향 센서의 성능을 저하시키는 요인이 되지 않도록 음향 센서 주위에 음향 차단제를 설치하면 그 효과가 클 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 내부 진동의 전파를 감소시키기 위하여 구조물로 타고 들어오는 진동파를 효과적으로 차단하기 위하여 CRP(Carbon Reinforced Plastic)와 SNORE 링(Self-NOise REDuction Ring)를 설치하고 주파수에 따른 변위와 응력의 변화를 관찰하였다.

곡면 구조물의 재질은 알루미늄이며 최대 외경 530mm, 길이 215mm 정도이다. 곡면 구조물의 전면부는 직경이 270mm이며 평면형상으로 되어 있다. 주파수에 따른 CRP와 SNORE 링 부착 전후에서의 응력 감소율을 시뮬레이션 하였으며 12kHz와 15kHz 주변에서는 95% 이상의 감소율을 보였다. CRP가 부착된 상태에서 곡면 구조물의 끝단 부분에서 가진 하였을 때 CRP가 없을 때와 비교하여 보면 센서에 미치는 응력의 크기가 대체로 감소하였음을 알 수 있었다. 음향 센서의 부착 위치에 따른 응력의 변화를 계산하였는데 중심부에서 가장 높게 나타났고 20mm, 40mm 떨어진 곳으로 이동할수록 응력의 크기가 낮게 나타났다. 본 연구의 결과는 음향센서의 감도를 높이는데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2009년 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.(계약번호 UD090008DD)

참 고 문 헌

- 하태현, 이종길, 김원호(2010). 돔 구조체 배플에 부착된 재료에 따른 제진 특성 연구. *대한공업교육학회지*, 35(1), 224~238.
- 홍진숙, 신구균(1994). 소음 차단링 성능 해석 연구. 국방과학연구소 Report, ATRC-519-941103.
- Assi, G. R. S., Meneghini, J. R., Aranha, J. A. P., Bearman, P. W., Casaprima, E.(2006). Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 22, 819~827.
- Ebenezer, D. D., Abraham, P.(1996). Effect of multilayer baffles and domes on hydrophone response. *Journal of Acoustical Society of America*, 99(4), 1883~1893.
- Ko, S.-H., Sherman, C. H.(1979). Flexural wave baffling. *Journal of Acoustical Society of America*, 66(2), 566~570.
- Kumar, R. A, Gowda, B. H. L.(2006). Flow-induced vibration of a square cylinder without and with interface. *Journal of Fluids and Structures*, 22, 345~369.
- Lam, K., Jiang, G. D., Liu, Y., So, R. M. C.(2006). Simulation of cross-flow-induced vibration of cylinder arrays by surface vorticity method. *Journal of Fluids and Structures*, 22, 1113~1131.
- Ugural, A. C.(1981). *Stresses in plates and shells*, McGraw-Hill, pp. 278~283.

<Abstract>

**Vibration Isolation Characteristics of CRP
Materials and SNORE Ring on the Multi-Curved
Structure**

Jong-kil Lee* · Chi-yong Jo**

When the underwater structure sails high speed, noise and vibration propagate to the sensor in the nose of the dome. In this paper, to avoid this kind of noise and vibration CRP(Carbon Reinforced Plastic) material and SNORE ring(Self-NOise REduction Ring) are attached at the curved structure and simulates its isolation characteristics using commercial software. Vibration displacement and stress are calculated at the planar sensor array. The material of the curved structure is aluminum and maximum outer diameter is 530mm, 215mm in length, 270mm in planar diameter, respectively. Based on the simulation results, reduction ratio of the received normal stress at the sensor is above 95% at the frequency of 12kHz and 15kHz. At the mid point of the planar sensor the normal stress is higher than 20mm and 40mm apart. This results can be used to increase the sensitivity of the acoustic sensor as a basic data.

**Key-words : Multi-curved structure, Carbon reinforced plastic,
Self-Noise reduction ring, Vibration isolation**

* Correspondence: Professor of Mechanical Engineering Education, College of Education, Andong
-National University, jlee@andong.ac.kr

** Agency for Defense Development, Research and Development