Check for updates

JFMSE, 34(3), pp. 427~434, 2022.
수산해양교육연구, 제34권 제3호, 통권117호, 2022.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.6.34.3.427

주파수 응답 함수를 적용한 소형 무인 잠수정 진동 특성에 관한 연구

황 아 롬†
†거제대학교(교수)

A Study on Vibration Characteristics of Small Unmanned Underwater Vehicle Applying Frequency Response Function

Arom HWANG†
†Koje University(professor)

Abstract

This paper presents the study about the frequency response function of small unmanned underwater vehicle (UUV) based on the experiment in air condition. As the UUV has been widely used in scientific, military, and commercial areas, it is also important to gather the information in an underwater environment for autonomous operation. Only sonar systems that use sound waves can be used in underwater environments due to the strong attenuation of electromagnetic waves in them. Since the vibration of UUV is usually transferred through the inner space of UUV body, the transferred vibration can affect the performance of various sonar systems that equip the UUV such as side-scan sonar or forward-looking sonar. Therefore, it necessary to predict the effect of the transferred vibration of the UUV for high level autonomous operation. In this paper, an experimental study was carried out to analyze a vibration feature of a small real UUV in the air condition using frequency response function and the experimental results are presented.

Key words : Unmanned underwater vehicle, Frequency response function, Experimental Study, Vibration Sransfer Function

Ⅰ. 서 론

해양 플랜트 설치 예상 해역 등에 대한 지질 조사에 널리 활용되고 있는 무인 잠수정은 운영자의 개입을 최소화할 수 있는 자율 운항이 가능하기 때문에 외부에서 운용자에 의해서 조정되는 다른 수중 로봇과 다르게 긴 시간 동안 넓은 해역에서 운용하는 것이 가능하다. 무인 잠수정이 가지고 있는 가장 큰 장점인 자율 운항 성능을 확보하기 위해서는 무인 잠수정이 자신의 위치를 파악하는 것이 가장 기본적 성능이라고 할 수 있다. 지상 또는 공중 환경에서 사용되는 로봇은 자율 운항을 위해서 필요한 위치 정보 및 외부 환경 정보를 주로 카메라, GPS(Global position system) 등과 같이 전자기파 기반 장비를 사용하고 있지만 수중 환경에서는 강한 감쇠로 전자기파 기반 장비 사용이 거의 불가능하다. 이러한 이유에서 무인 잠수정이 외부 환경 정보를 획득하기 위해서 사용하는 주요 장비는 전자기파를 사용하는 장비 대신 음파를 이용하는 소나

† Corresponding Author: 055-680-1579, aromhwang@koje.ac.kr

(SONAR: SOund Navigation And Ranging)라고 할 수 있다. 소나는 수중 환경에서 수십 m에서 수 km까지의 도달거리를 가지고 있는 음파를 사용함으로써 전자기파를 사용하는 장비와 다르게 넓은 영역에서 필요한 정보 획득이 가능하다. 그러나 음파를 사용하는 소나는 수중 환경에서 존재하는 각종 소음에 영향을 받게 되며, 특히 무인잠수정에서 발생하는 자체 소음은 외부 환경에 존재하는 소음보다 소나에 큰 영향을 줄 수 있게 된다. 이처럼 자율 운항 성능에 큰 영향을 주는 소나가 최적 성능을 가지도록 설계하기 위하여 무인잠수정에서 발생하는 자체 방사 소음 발생 및 전달 경로 등을 규명하기 위한 연구가 필요하다.

무인잠수정과 같은 수중 몰수체 진동 전달 및 특성 현상에 대한 연구는 대부분 잠수함에 관련된 연구로 해석 기법에 대해서 수행되어져왔다. Askari and Daneshmand(2009)는 Galerkin기법을 이용한 부분 몰수체의 연성 진동에 대한 유한요소법을 제안하였다. Sigrist and Garreau(2007)은 연성된 유체-구조 동역학적 해석을 위하여 주파수 영역에서 유한요소법을 적용하였으며, Ugurlu and Ergin(2008)은 원통형 구조물의 접수 조건에서의 효과를 확인하기 위하여 유한요소법과 경계요소법을 적용하고 그 결과를 비교하였다. 또한 Kim, et al., (2011a)은 PFA을 기반으로 하는 에너지 전달 기법을 적용하여 실린더형태 수중 몰수체 진동 전달 특성에 대한 해석을 수행하였다. Kim, et al., (2011b)는 길이 1 미터 정도 실린더 형태 물체에 대해서 공기 중 환경에서 진동 발생기를 이용하여 진동 가속도 감소 특성을 파악하는 연구를 수행하였다. Min et al., (2011) 역시 진동 발생기를 설치한 원통형 실린더를 이용한 수중 몰수체에 대한 유체 탄성학적인 특성 파악하기 위한 실험을 수행하여 동일 원통형 실린더의 가진 주파수를 수중과 공기 중을 비교하였을 때, 수중에서 더 큰 가진 주파수를 가지고 있음을 확인하였다.

전술한 수치 해석 방법을 기반으로 하는 추정 기법들은 해석 환경에 변화가 발생하게 되면 이를 반영하여 다시 해석을 수행할 때 많은 계산 시간을 요구하는 단점을 가지고 있다고 할 수 있다. 또한 실험 기반 해석 기법은 무인잠수정 추진 전동기를 모사하는 가진기를 실험 대상 내부에 설치하여 실험을 수행하여 추진 전동기가 외부에 설치되는 실제 무인잠수정 환경을 구현하기에 제약이 있었다고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 추진 전동기가 외부에 장치되는 무인잠수정 특성을 반영한 진동 전달 특성을 파악하기 위하여 주파수 응답 함수를 활용하고자 하였다. 이를 위해서 이미 개발된 완료된 길이 1.8 미터의 소형 무인 잠수정에 임팩트 해머를 이용한 실험을 수행하였고, 실험 결과로부터 실제 무인 잠수정의 주파수 응답 함수를 산출하여 무인 잠수정이 가지고 있는 진동 응답 특성을 파악하고 파악된 진동 특성 결과를 제시하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 수식화

주파수 응답함수는 진동 전달 함수 중 하나로서 동적 시스템의 고유진동수 및 감쇠 등과 같은 동특성 분석에 매우 유용하게 활용되고 있다. 진동에서 전달 함수는 진동계 계의 입력과 출력 사이의 수학적 관계를 나타내고 있으며 일반적으로 시불변 시스템에서 진동원과 진동 발생 결과 사이 수학적 관계식으로 정의되고 있다(Jefferys, et al., 1984; Halevi and Wagner-Nachshoni, 2006). 가진 진동 시스템에서는 가진력과 가진력으로 발생하는 진동 가속도에 대한 관계식으로 두 물리량 사이 상관성을 파악할 수 있다.

본 연구에서 수행한 임팩트 해머를 이용한 실험에 적용하기 위한 주파수 응답 함수를 구하기 위한 실험에 적용되는 진동 시스템은 식 (1)과

같은 시간 영역에서의 시스템으로 표시할 수 있다.

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=y(t) \quad \cdots\cdots (1)$$

식 (1)에서 x(t)는 시간 영역에서 시스템진동 출력이며, y(t)는 시간 영역에서 임팩트 해머에 의해서 가진되는 가진력이다. 또한 식 (1)에서 M은 시스템에 적용되는 질량이며, C는 감쇠 계수, K는 스프링 계수를 의미한다. 식 (1)에 대해서 라플라스 변환을 적용하면 식 (2)와 같은 주파수 영역에 대한 관계식으로 변환이 가능하다.

$$\{Ms^2+Cs+K\}X(s)=Y(s) \quad \cdots\cdots (2)$$

식 (2)에서 X(s)는 시스템진동 출력에 대한 라플라스 변환 값이며, Y(S)는 임팩트 해머 가진력에 대한 라플라스 변환 값을 의미한다.

주파수 응답 함수는 외부에서 가해지는 가진력과 시스템에서 출력인 진동 측정 결과에 대한 관계식으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$H(s)=\frac{Y(s)}{X(s)} \quad \cdots\cdots (3)$$

주파수 응답 함수는 크게 H1(s), H2(s) 2종류로 분류할 수 있다. H1(s) 주파수 응답 함수는 시스템에서 발생하는 결과 값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용하며, H2(s) 주파수 응답 함수는 시스템에 대한 입력 값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용한다. 본 논문에서 수행하고자 하는 실험은 임팩트 해머를 이용하기에 입력 값보다는 출력 값에 잡음이 발생할 가능성이 높기에 H1(s) 주파수 응답함수를 적용하였다. 식 (4)은 H1(s) 주파수 응답함수를 나타내고 있다.

$$H1(s)=\frac{S_{xy}(s)}{S_{xx}(s)} \quad \cdots\cdots (4)$$

식 (4)에서 $S_{xy}(s)$는 주파수 영역에서 x(t), y(t)에 대한 상호 스펙트럼밀도 함수(cross spectrum density function) 이며, $S_{xx}(s)$는 x(t)의 자가 스펙트럼 밀도 함수(auto spectrum density function)이다.

기여도 함수 (coherence function)는 두 신호 사이의 선형성 정도를 나타내는 지표로서 각 주파수의 함수로 표현되는데 진동소음분야에서는 소음 대비 측정된 신호의 강인성(robustness)을 보여준다. 기여도 함수는 두 신호의 자기 스펙트럼(auto spectrum)과 상호 스펙트럼 (cross spectrum)으로 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma^2=\frac{S_{xy}(s)^2}{S_{xx}(s)S_{yy}(s)} \quad \cdots\cdots (5)$$

식 (5)에서 $S_{yy}(s)$는 y(t)의 자가 스펙트럼 밀도 함수이다. 일반적으로 기여도 함수 γ 는 0 ~ 1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 두 신호 사이의 선형 종속 정도가 강하다고 볼 수 있기 때문에 고유 주파수 근처에서 1에 가까운 값을 보이게 된다. 이는 고유 주파수 근처에서 생성된 신호는 다른 주파수 대역 신호 보다 강한 크기를 가지고 있고 또한 잡음에 보다 강인할 수 있기 때문이다. 기여도 함수가 작은 경우에는 신호 무결성(signal integrity)에 문제가 있다고 볼 수 있고 통상적으로 기여도 함수 값이 0.7 보다 큰 경우에 신호가 잡음에 강인하다고 판단할 수 있다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 실험조건

본 논문에서는 개발 및 제작이 완료된 소형 무인잠수정(OKPO 300)을 이용하여 실제 소형 무인잠수정의 주파수 응답 함수를 파악하기 위한임팩트 해머 활용 실험을 수행하였다. [Fig. 1]은 실험에 사용된 무인잠수정을 보여주고 있으며, <Table 1>에 실험에 사용된 소형 무인 잠수정(OKPO 300)의 제원이 정리되어 제시 되어 있다. 실험은 지지대로 인하여 발생하는 진동 전달 현상 왜곡

을 최소화하기 위하여 [Fig. 1]에 제시되어 있는 바와 같이 공중에 올려놓은 상태에서 수행하였다.

[Fig. 1] Overview of OKPO 300 & excitation points.

<Table 1> Specification of OKPO 300

	Description
Vehicle Dimensions (L ×D)	1.8 ×0.26 m
Hull Material	Acrylic
Weight (in air)	55 kg
Maximum Operating Depth	300 m

무인잠수정은 일반적으로 몸체 외부에 연결되는 스러스터(thruster) 시스템을 주 추진 장치로 사용하고 있기 때문에 스러스터 시스템을 주요 진동원으로 볼 수 있다. 이러한 이유에서 소형 무인 잠수정을 이용한 진동 특성 파악 실험에서 임팩트 해머에 의한 가진 지점 (excitation point)은 추진기와 몸체와 연결되어 있는 부분으로 결정하였다. 가진 지점의 위치는 전반적인 진동 전달 특성 패턴을 파악하기 위하여 스러스터와 몸체 연결 부위 중 4 군데를 90도 간격으로 회전하여 위치하도록 하였다. 무인 잠수정 선수 부분에서 진동 가속도를 측정하도록 하였으며 또한 가진력에 의해서 전달되는 진동에 대한 측정 지점은 선수 중앙으로 결정하였는데, 이는 무인잠수정에서 장애물 회피용으로 사용하는 소나 장비가 대부분 선수 주위에 설치되기 때문이다. 임팩트 해머를 이용한 실험은 실험자가 사람이기에 자세 및 임팩트 해머 타격 위치가 정확하지 않을 가능성이 존재한다. 이처럼 사람으로 인해서 발생할 수 있는 오류를 최소화하고 무인잠수정 주파수 응답 함수를 정확하게 파악하기 위하여 각 가진 지점에 대해서 매회 10 차례 임팩트 해머를 이용한 가진 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 장비에 대한 정보는 <Table 2>에 정리되어 있다.

<Table 2> Measurement instruments

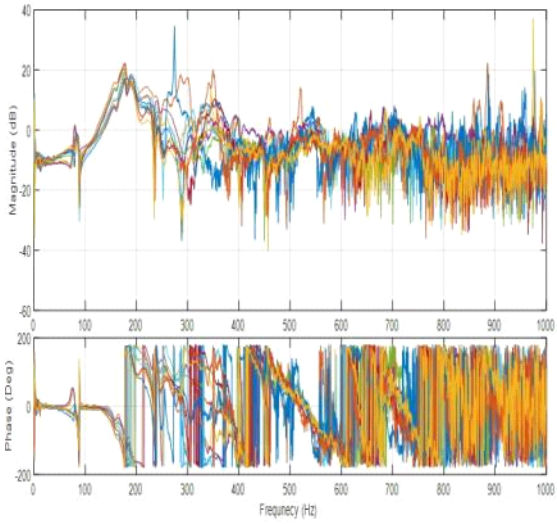
Type	Description
Impulse hammer	PCB 086C02
Accelerometer	DYTRAN 3148
Data acquisition hardware	Bensone Fieldpaq II
Software	Benstone Novian

2. 실험 결과 고찰

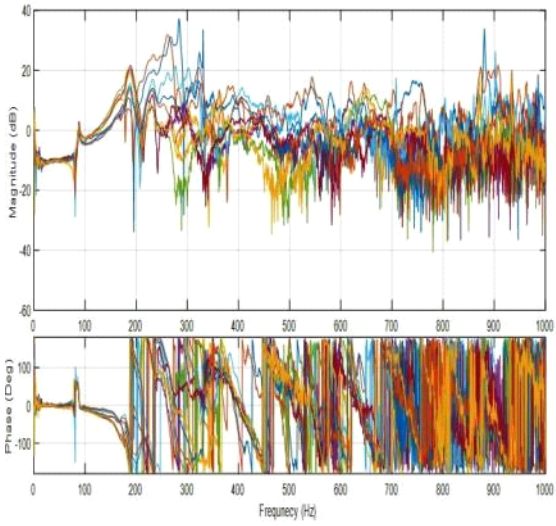
전술한 실험을 통하여 각 가진 지점별로 가진 위치에서 임팩트 해머 힘 센서(Force Sensor)로 측정한 가진력과 선수부 중앙에 설치한 가속도 센서 (accelerometer)로 측정한 가속도 사이 소나 설치 위치 사이 주파수 응답 함수를 10회 산출하였다. [Fig. 2, 3, 4와 5]는 각 가진 지점에 대해서 구한 10개의 주파수 응답 함수 크기와 위상을 보여주고 있다. [Fig. 2 ~ 5]에서 주파수 변화에 따른 주파수 응답 함수의 크기를 상부에 보여주

고 있으며 진동 전달 함수에 대한 주파수 응답 함수에서 구한 위상 차이를 주파수 별로 구한 결과를 하부에 보여주고 있다. [Fig. 2, 3, 4와 5]에 제시되어 있는 결과를 살펴보면 4개 가진 지점에 대한 실험 모두에서 180 Hz 부근에서 큰 주파수 응답이 발생한 것이 관측되었으며 위상의 변화 역시 270도에 가까운 결과를 보여주고 있다.

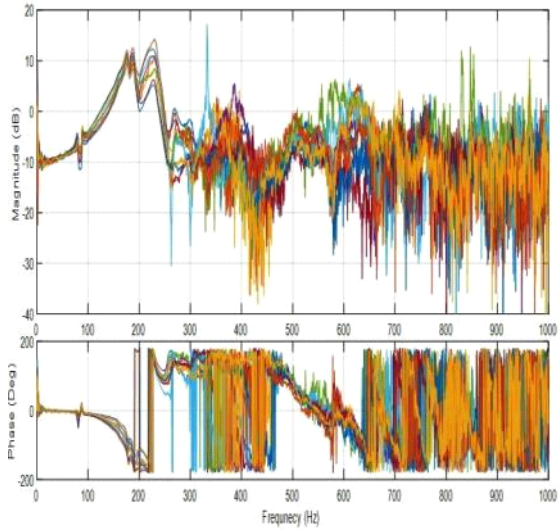
이론적으로 구조물의 고유 주파수에서 주파수 응답 함수의 크기가 최댓값을 보이게 되고 주파수 응답 함수의 위상이 90 도 또는 - 90도에 가지게 된다는 사실에서 [Fig. 2, 3, 4와 5]에 제시되어 있는 결과를 살펴보면 OKPO 300의 고유 주파수가 180 Hz 근처라고 판단할 수 있다.



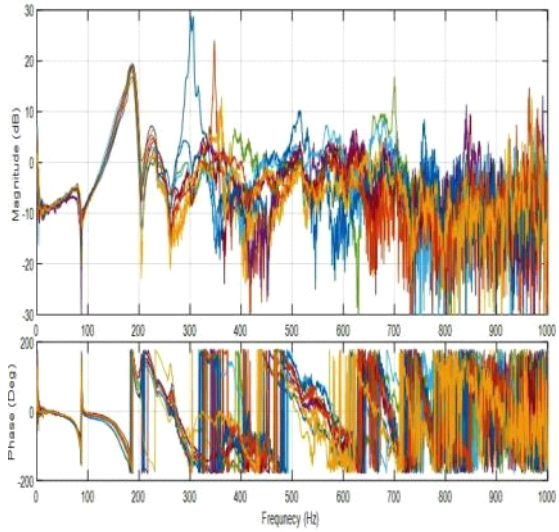
[Fig. 2] Magnitude and phase of excitation point 1.



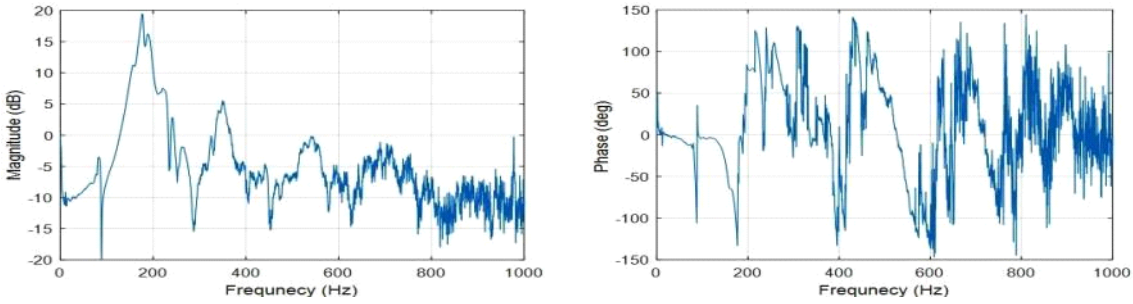
[Fig. 3] Magnitude and phase of excitation point 2.



[Fig. 4] Magnitude and phase of excitation point 3.

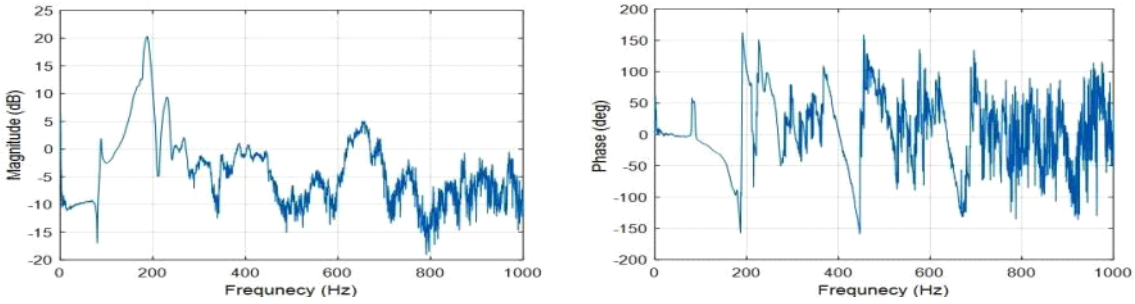


[Fig. 5] Magnitude and phase of excitation point 4.



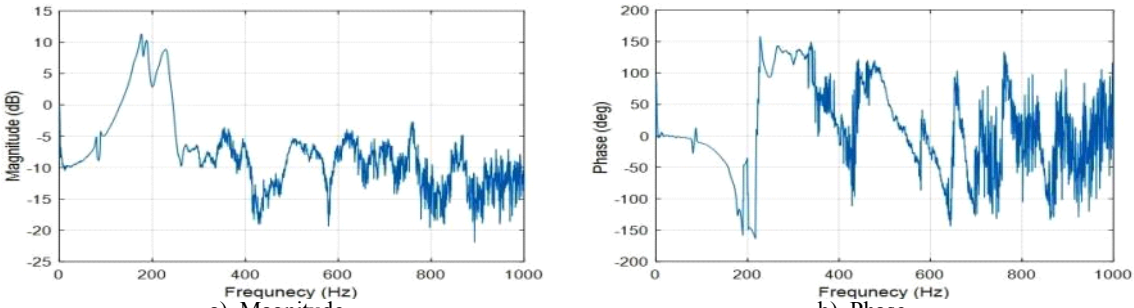
a) Magnitude b) Phase

[Fig. 6] Average of magnitude and phase of frequency response function under excitation point 1.



a) Magnitude b) Phase

[Fig. 7] Average of magnitude and phase of frequency response function under excitation point 2.

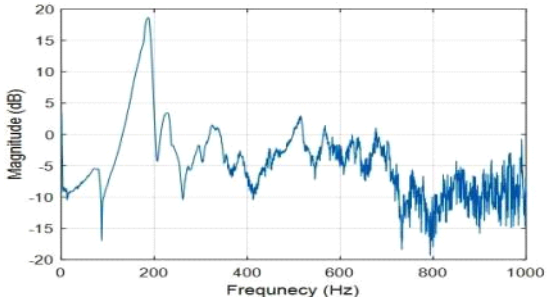


a) Magnitude b) Phase

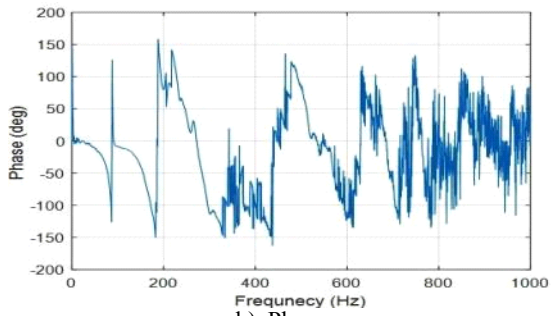
[Fig. 8] Average of magnitude and phase of frequency response function under excitation point 3.

[Fig. 2, 3, 4와 5]에 제시되어 있는 결과는 10회 수행한 실험 결과를 모두 제시하고 있기에 각 가진 지점에 대한 실험 결과 평균을 구하여 그 결과를 [Fig. 6, 7, 8과 9]에 제시하였다.

[Fig. 2, 3, 4와 5]에 제시되어 있는 결과는 10회 수행한 실험 결과를 모두 제시하고 있기에 각 가진 지점에 대한 실험 결과 평균을 구하여 그 결과를 [Fig. 6, 7, 8과 9]에 제시하였다. [Fig. 6 ~ 9]에 제시되어 있는 결과를 살펴보면 4개 가진 지점 실험 결과 평균에서 모두 180 Hz 부근에서 크기의 최대치를 보여주고 있으며 주파수 위상 값이 -90도 근처임을 확인할 수 있다. [Fig. 2 ~ 5]에 제시되어 있는 실험 결과의 잡음에 대한 강인성(robustness)을 확인하기 위하여 4개 가진



a) Magnitude

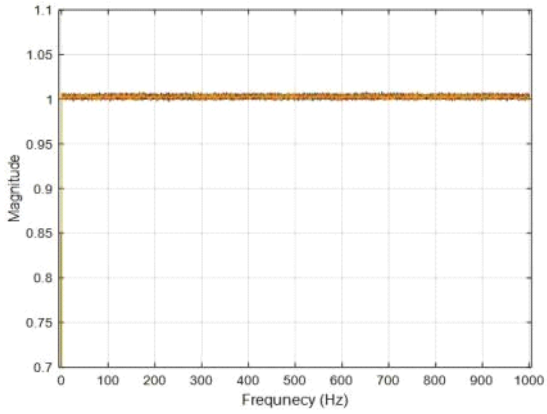


b) Phase

[Fig. 9] Average of magnitude and phase of frequency response function under excitation point 4.

포인트 실험결과에 대한 기여도 함수 결과를 계산하였다. [Fig. 10]은 4개 가진 포인트에서 수행한 모든 실험에 대한 기여도 함수 결과를 보여주고 있다. [Fig. 10]을 살펴보면 모든 경우에 대해서 기여도 함수가 1에 가까운 값을 보여 주고 있어 실험결과에 사용된 측정값들이 잡음에 대해서 강인하다고 할 수 있다.

전술한 두 가지 결과에서 OKPO 300의 진동 고유 주파수는 180 ~ 200 Hz주위에 존재하다고 판단할 수 있을 것이다. 또한 OKPO 300에 적용하기 위한 소나 장비를 선택 또는 설계할 때는 내부 진동원 영향을 최소화하기 위해서는 180 ~ 200 Hz 주파수 대역을 피할 수 있어야 한다고 할 수 있다.



[Fig. 10] Coherence function between force sensor and accelerometer for all cases.

Ⅳ. 결 론

자율 운항 성능이 무인잠수정 효율적 운영에 매우 큰 영향을 주기 때문에 전자기파 기반 위치 추적 장비를 적용하기 힘든 무인잠수정은 주변 환경 정보를 획득할 수 있는 소나 장비 성능이 매우 중요하다고 할 수 있다. 음파 신호를 사용하는 소나 장비는 소음과 진동에 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 무인잠수정에서 발생할 수 있는 진동과 소음의 크기와 전파 경로 등을 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 무인잠수정에서 발생하는 자체 소음과 진동 주요 발생 원인인 추진전동기가 야기한 진동이 무인잠수정 선수부에 위치한 소나 장비에 주는 영향을 파악하기 위하여 실제 제작된 무인잠수정 OKPO 300에 대해서 임팩트 해머를 이용한 공기 중 진동 전달 함수 산출 실험을 수행하였고 그 실험 결과를 제시하였다.

실험 결과로부터 주파수 응답 함수 최댓값이 4가지 경우 모두 200Hz 부근에서 발생한다는 사실을 확인할 수 있었으며, 주파수 응답 함수 위상 역시도 -90도 근처에서 급격하게 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 사실에 OKPO 300의 진동 고유주파수가 200 Hz 근처임을 추론할 수 있으며, 200 Hz 대역은 무인잠수정에서 많이 사용하고 있는 수동 소나의 저주파 대역과 근접하고 있다는 사실로부터 초기 설계 단계에서 진

동 소음에 대한 고려가 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

향후 과제로는 공기 중 실험을 통하여 확인한 무인잠수정 OKPO 300의 진동에 대한 주파수 응답 함수를 적용하여 실제 추진기에서 발생하는 가진력으로 발생할 수 있는 자체 진동에 예측 작업이 필요할 것이다. 또한 수중 환경에 대한 시뮬레이션을 통하여 공기 중에서 도출한 진동에 대한 주파수 응답 함수 적용 가능성을 확인해야 할 것이다.

References

Askari E and Daneshmand F(2009). Coupled Vibration of a Fluid Filled Cylindrical Container with a Cylindrical Internal Body. Journal of Fluids and Structures, 25(2), 389~405. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.07.003

Chen X, Wu Y, Cui W, and Tang X(2003). Nonlinear Hydroelastic Analysis of a Moored Floating Body. Ocean Engineering, 30(8), 965~1003. https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00078-1

Halevi Y, and Wagner-Nachshoni C(2006). Transfer Function Modeling of Multi-link Flexible Structures. Journal of Sound and Vibration, 296(2), 73~90. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.01.069

Jefferys E, Broome D and Patel M(1984). A Transfer Function Method of Modeling Systems with Frequency Dependent Coefficients. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 7(4), 490~495. https://doi.org/10.2514/3.19883

Kim JT, Kil HG, Kim JD, Lee JS, Hong SY, Song JH, Hwang AR, Kim DJ, Jung WJ, Jung HG and Kang MH(2011a). Experimental Analysis of a Transfer Function on a Submerged Cylindrical Structure Vibrating at high Frequencies. Proceeding of the Autumn Meeting, KSNVE.

Kim JT, Kil HG, Kim JD, Lee JS, Kim, DJ, Hong SY, Song JH, Hwang AR, Jung WJ, Jung HG and Kang MH(2011b). Application of SEA to Predict a Transfer Function on a Cylindrical Complex Structure Vibrating at High Frequencies. Proceeding of the Autumn Meeting, KSNVE.

Min CH, Park HI. Jung HG and Yoo JH(2011). An Experimental Study on High-Frequency Vibration Analysis of a circular Cylindrical Shell in Contact with Water. Proceedings of the Twenty-first ISOPE Conference, 322~326.

Ohkusu M and Namba Y(2004). Hydroelastic Analysis of a Large Floating Structure. Journal of Fluids and Structures, 19(40), 543~555. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.02.002

Sigrist J and Garreau S(2007). Dynamic Analysis of Fluid-Structure Interaction Problems with Modal Methods using Pressure-based Fluid Finite Elements. Finite Elements in Analysis and Design, 43(4), 287~300. https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.10.002

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. 318(4), 1291~1312. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.05.006

- Received : 04 April, 2022
- Revised : 06 May, 2022
- Accepted : 12 May, 2022