

Experimental Study of Vibration Characteristics of OKPO 300

Arom Hwang*

*Department of Naval Architecture Ocean Engineering, Gyeongsangnamdo, Korea

OKPO 300 진동 특성에 대한 실험적 연구

황아롬*

*거제대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Modal test 모드 시험, Unmanned underwater vehicle 무인잠수정, Frequency response function 진동 응답 함수, Experimental analysis 실험 결과 분석, Vibration transfer function 진동 전달 함수

ABSTRACT: This paper presents experimental results for the vibration characteristics of the small unmanned underwater vehicle (UUV) OKPO 300, which was designed and manufactured by Daewoo ship and Marine Engineering Ltd. The autonomy of UUVs has led to an increase in their use in scientific, military, and commercial areas because their autonomy makes it possible for UUVs to be utilized instead of humans in hazardous missions such as mine countermeasure missions (MCM). Since it is impossible to use devices based on electromagnetic waves to gather information in an underwater environment, only sonar systems, which use sound waves, can be used in underwater environments, and their performance can strongly affect the autonomy of a UUV. Since a thruster system, which combines a motor and propeller in a single structure, is widely used as the propulsion system of a UUV and is mounted on the outside of a UUV's stern, it can generate vibration, which can be transferred throughout the shell of the UUV from its stern to its bow. The transferred vibration can affect the performance of various sonar systems such as side-scan sonar or forward-looking sonar. Therefore, it is necessary to estimate the effect of the transferred vibration of the UUV on the sonar systems. Even if various numerical methods were used to analyze the vibration problem of a UUV, it would be hard to predict the vibration phenomena of a UUV at the initial design stage. In this work, an experimental study using OKPO 300 and an impact hammer was carried out to analyze the vibration feature of a small real UUV in the air. The frequency response function of the vibration based on the experimental results is presented.

1. 서 론

무인 잠수정은 운영자의 개입을 최소화할 수 있는 자율 운항이 가능하기 때문에 해군, 해양탐사 분야 등에서 사용이 증가하고 있다. 수준 높은 자율 운항 성능을 획득하기 위해서는 운용자의 개입이 최소화되어야 하는데 이를 위해서는 사전 정보가 없거나 부족한 운영 환경에서도 운용 환경 정보를 취득하여 이에 대한 정보를 이용하는 것이 필수적이다. 지상 또는 공중 로봇은 외부 환경 정보를 주로 비전 센서 등과 같이 전자기파를 이용하는 장비를 주로 사용하는 반면 무인잠수정이 운영되는 동안 외부 환경 정보를 획득하기 위하여 주로 사용하고 있는 장비가 음파를 이용한 소나(Sonar)이다. 이는 수중 환경에서 공중과 달리 전자기파의 도달 거리가 매우 짧기 때문에 10 미터 이내의 단 거리를 제외하고는 사용이 불가능하기 때문이다. 소나는 음파를 사용하기 때문에 무인잠수정에서 발생할 수 있

는 소음에 영향을 받게 된다. 소나의 성능은 무인잠수정 자율 운항 성능에 많은 영향을 주게 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. 또한 제작이 완료된 이후에 소음 저감을 위한 대책을 적용하는 것은 시간과 비용을 많이 요구하기 때문에 설계 단계에서 자체 방사 소음 발생 및 경로에 대한 분석 작업을 수행하고 이를 설계에 반영하는 것이 필요하다. 특히 자체 소음 발생에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 엔진 등과 같은 추진 장치에서 발생하는 진동에 대한 연구는 필수적이라고 할 수 있다.

그러나 현재 자체 방사 소음원인 엔진 등에서 발생하는 진동에 대한 연구는 대부분 잠수함, 수상함 또는 일반 상선에 집중되어 있으며, 무인 잠수정의 추진기 진동 및 진동 전달 현상에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 선박의 경우 진동 발생원인

Received 1 August 2016, revised 26 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Arom Hwang: +82-55-680-1579, aromhwang@koje.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on spring proceedings of KUUV 2016 in Pusan.

또는 전달 경로를 설계 단계에서 추정하기 위한 연구가 많이 수행되어 왔는데, 실험적 제약으로 대부분의 관련 연구는 유한요소기법(Finite element method, FEM), 경계요소기법(Boundary element method, BEM) 등과 같은 수치 해석 방법을 기반으로 하여 수행되어 왔다. Chen et al.(2003)은 계류 상태 박스형 부유체에 대해서 비선형 유체 탄성학 방정식을 이용한 유한요소법을 적용하여 유체 탄성학적 해석을 수행하였다. Ohkusu and Namba(2004)는 부유식 공항에 대한 굽힘 모멘트 해석을 유한요소 해석법을 기반으로 수행하였다. Askari and Daneshmand(2009)는 Galerkin기법을 이용한 부분 침수 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 침수 조건에서의 효과를 확인하기 위하여 유한요소법과 경계요소법을 적용하고 그 결과를 비교하였다.

전술한 수치 해석 기법을 기반으로 하는 추정 기법들은 대부분 선형 변화 또는 추진기 변화 등과 같은 해석 환경에서 변화가 발생하면 이를 다시 해석하기 위해서는 많은 계산 시간을 요구하는 단점을 가지고 있다. 또한 무인잠수정은 수중에서 운용되기 때문에 진동 전달 특성 및 현상이 해수와 공기 중에서 운용되는 수상선과 상이할 수밖에 없기 때문에 수상선에서 사용된 수치 해석기법을 직접 적용하기에는 많은 어려움이 존재하게 된다. 이러한 이유에서 무인잠수정과 같은 수중 몰수체에 있어서는 진동 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하는 경우가 많다. 원통형 실린더를 이용한 수중 몰수체에 대한 유체 탄성학적인 특성 파악하기 위한 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 동일 원통형 실린더의 가진 주파수를 수중과 공기 중을 비교하였을 때, 수중에서 더 큰 가진 주파수를 가지고 있음을 확인하였다(Min et al., 2011).

이처럼 수치 해석 기법과 실험적 해석 기법 모두 수상선 또는 수중 몰수체에 대하여 수행되어져 왔으나, 무인잠수정 자체 진동 전달 특성에 대한 연구는 매우 드문 현실이다. 무인잠수정에 대한 연구는 대부분 제어 기법 및 항법 시스템에 집중되어 있어 실제 자율 운항 성능에 큰 영향을 줄 수 있는 소나에 대한 진동 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 본 논문에서는 이미 개발 완료된 소형 무인잠수정인 OKPO 300의 진동 전달 특성을 파악하기 위하여 임팩트 해머를 이용한 실험을 수행하였으며, 이에 대한 실험 결과를 제시하였다. 또한 실험 결과를 이용하여 OKPO 300의 고유 진동 주파수를 산출하였으며 이를 제시하였다.

2. 진동 주파수 응답 함수

진동 전달 함수는 통상 진동원과 시불변 시스템의 진동 발생 결과 사이 수학적 관계식으로 정의되고 있다(Jefferys, et al., 1984; Halevi and Wagner-Nachshoni, 2006). 주파수 응답 함수는 진동전달 함수 중 하나로서 진동원과 진동 결과 사이 관계식을 주파수 영역을 기준으로 표시하는 함수이다. 임팩트해머를 이용한 실험을 수행하는 경우 대부분 진동 전달 함수는 임팩트 해머에 장치되어 있는 힘 센서(Force gauge)와 시스템 관

심 부분에 장치되어 있는 가속도 센서(Accelerometer) 사이의 주파수 응답 함수로 표시된다. 임팩트 해머를 이용한 진동 전달 함수를 구하기 위한 실험은 식 (1)과 같은 시간 영역에서의 시스템으로 표시할 수 있다.

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

식 (1)에서 $x(t)$ 는 시간 영역에서 시스템진동 출력이며, $y(t)$ 는 시간 영역에서 임팩트 해머에 의해서 가진되는 가진력이다.

식 (1)에 대해서 라플라스 변환을 적용하면 식 (2)와 같은 주파수 영역에 대한 관계식으로 변환이 가능하다.

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

전달함수는 시스템에 대한 가진력과 출력인 진동 측정 결과에 대한 관계식으로 식 (3)과 같이 정의된다.

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

주파수 응답 함수는 크게 $H_1(s)$, $H_2(s)$ 2종류로 분류할 수 있다. $H_1(s)$ 주파수 응답 함수는 시스템에서 발생하는 결과 값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용하며, $H_2(s)$ 주파수 응답 함수는 시스템에 대한 입력값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용한다. 본 논문에서 수행하고자 하는 실험은 임팩트 해머를 이용하기에 입력값보다는 출력값에 잡음이 발생할 가능성이 높기에 $H_1(s)$ 주파수 응답함수를 적용하였다. 식 (4)은 $H_1(s)$ 주파수 응답함수를 나타내고 있다.

$$H_1(s) = \frac{S_{xy}(s)}{S_{xx}(s)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $S_{xy}(s)$ 는 주파수 영역에서 $x(t)$, $y(t)$ 에 대한 상호 스펙트럼밀도 함수이며, $S_{xx}(s)$ 는 $x(t)$ 의 자가 스펙트럼 밀도 함수이다.

3. 진동 특성 파악 실험

3.1 실험 조건

무인 잠수정 진동 특성을 파악하기 위한 실험은 개발 및 제작이 완료된 소형 무인잠수정(OKPO 300)에 대해서 임팩트 해머를 이용하여 수행되었다. Fig. 1은 실험에 사용된 무인잠수정을 보여주고 있으며, 표 1에는 OKPO 300의 제원이 정리되어 제시되어 있다. 실험은 지지대로 발생하는 진동 전달 현상 왜곡을 피하기 위하여 Fig. 1에 제시되어 있는 바와 같이 공중에 올려놓은 상태에서 수행하였다.

무인잠수정은 일반적으로 몸체 외부에 연결되는 스러스터 시스템을 주 추진 장치로 사용하고 있기 때문에 OKPO 300을 이



Fig. 1 Overview of OKPO 300

Table 1 Specification of OKPO 300

Items	Value
Body size (L×W×H)	1.80 m × 0.26 m × 0.26 m
Hull material	Acrylic
Weight	55.00 kg
Maximum depth	300.00 m

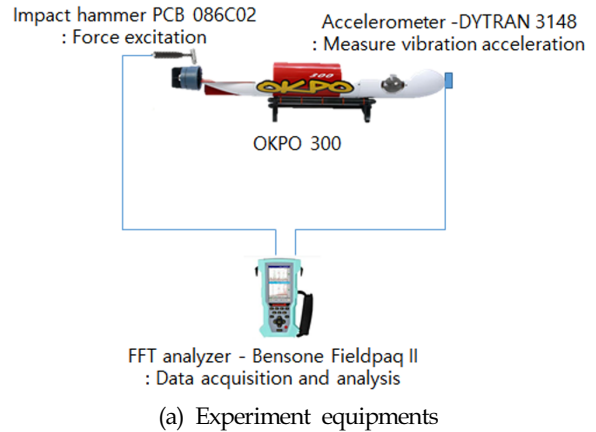
용한 진동 특성 파악 실험에서 임팩트 해머에 의한 가진점은 선미 스티스터와 몸체와 연결되어 있는 부분으로 결정하였다. 가진 위치는 스티스터와 몸체 연결 부위 중 4 군데를 90도 간격으로 회전하여 위치하도록 하였다.

OKPO 300 선수 노즈 부분에서 진동 가속도를 측정하도록 하였으며 또한 가진력에 의해서 전달되는 진동에 대한 측정점은 선수 중앙으로 결정하였는데, 이는 무인잠수정에서 장애물 회피용으로 사용하는 소나 장비가 대부분 선수 노즈 주위에 설치되기 때문이다.

가속도 센서로는 DYTRAN 3148을 사용하였으며, 가진력 발생 장치인 임팩트 해머는 PCB 086C02를 사용하였다. 실험 자료 획득 장치로는 Bensone fieldpaq II을 사용하였다. 실험 장비에 대한 구성은 Fig. 2에 정리되어 제시되어 있다.

3.2 실험 결과 분석

무인잠수정의 진동 전달 특성을 파악하기 위하여 각 가진점에 대해서 10 차례 임팩트 해머를 이용한 가진 실험을 수행하였다. 각 가진 실험에서 임팩트 해머에서 측정된 가진력과 선수 노즈에 설치한 가속도 센서에서 측정된 가속도에 대하여 주파수 응답 특성을 계산하였으며 동일 가진 지점에서 계산한 진동 전달 주파수 응답 특성에 대해서 평균을 구하였다. 전술한 방법으로 계산한 각 가진 지점에서의 진동 전달 주파수 응답함수를 각각 Figs. 3-6에 제시하였다. Figs. 3-6에 제시되어 있는 주파수 응답 함수에 대한 계산 결과들을 살펴보면, 4개 가진 지점에 대한 실험 모두에서 200Hz 부근에서 큰 주파수 응답이 발생한 것이 관측되었으며, 또한 첫 번째, 두 번째 가진 지점에 대한 실험



(a) Experiment equipments



(b) Excitation points

Fig. 2 Experiment equipment setup & excitation points

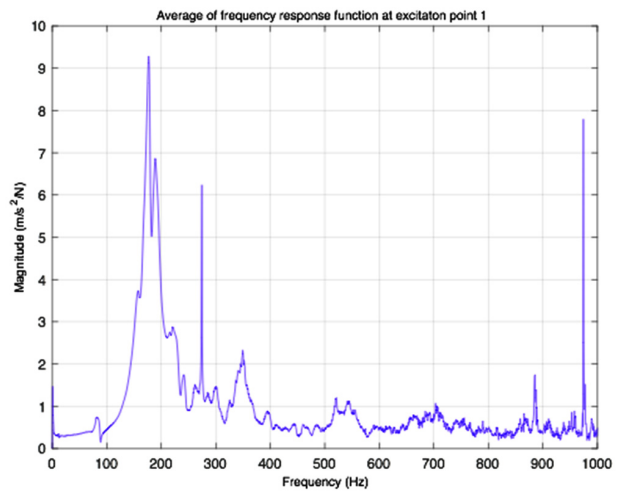


Fig. 3 FRF of excitation point 1

결과에서는 850~900Hz 부근에서 큰 주파수 응답이 발생한 것이 관측되었다. 동일 실험에서 발생한 2개의 큰 주파수 응답 특성에서 OKPO 300의 가진 주파수를 확인하기 위해 첫 번째 가진 지점 실험 결과에 대하여 추가 분석을 수행하였다.

첫 번째 가진 지점에서 수행한 10회의 임팩트 해머 가진 실험 중에서 일부 실험 결과를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7을 살펴보면, 4회 실험 모두 200Hz 부근에서 높은 주파수 응답을 보이고 있으나 850~900Hz 부근 주파수 응답은 4회 중 2회에서만 관측되던 그 중 1회는 유난히 큰 값을 보이고 있어 전체적 평균 계

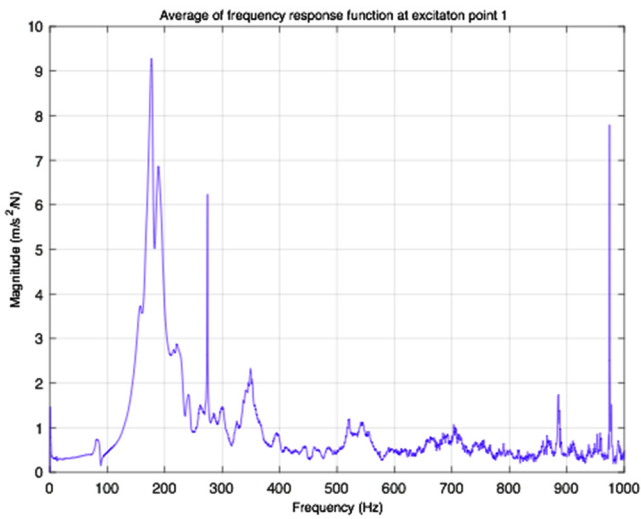


Fig. 4 FRF of excitation point 2

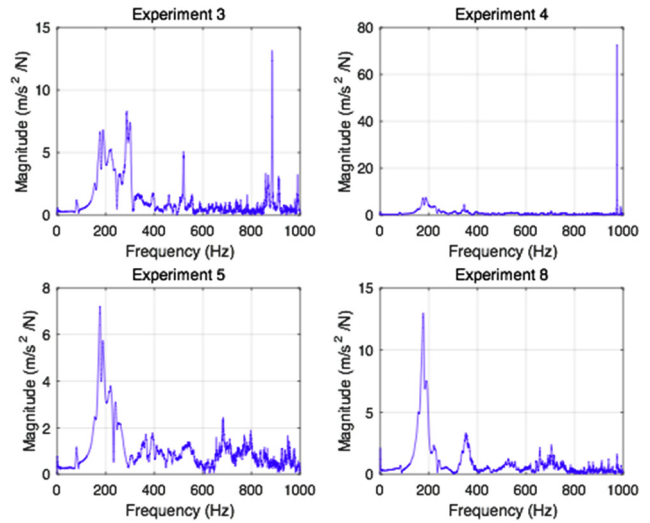


Fig. 7 4 FRF cases about experiment for excitation point 1

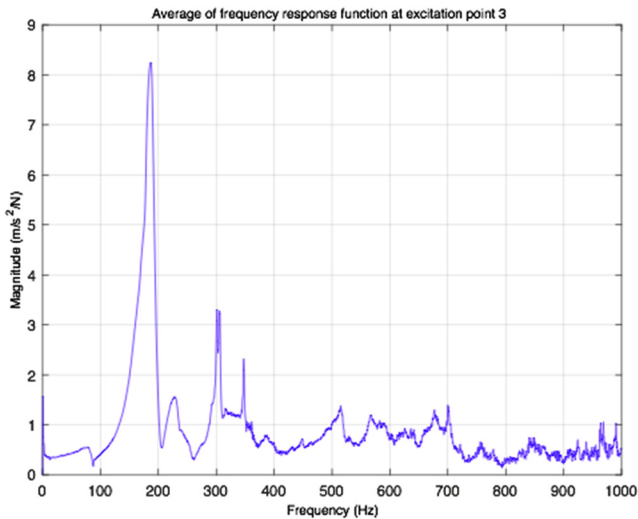


Fig. 5 FRF of excitation point 3

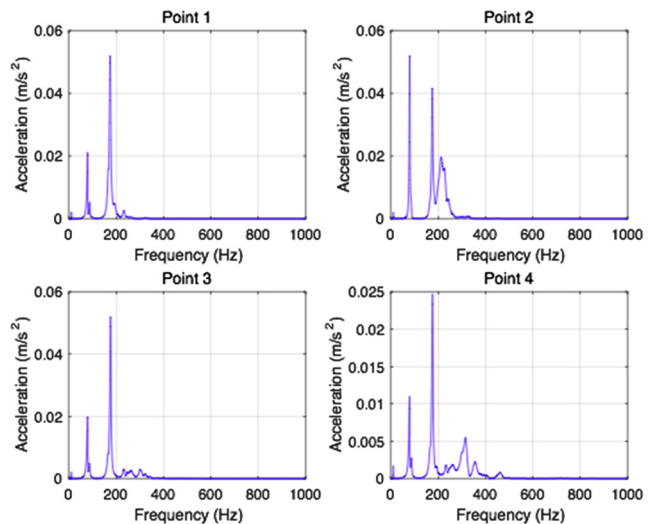


Fig. 8 Average of vibration acceleration measure near at each point

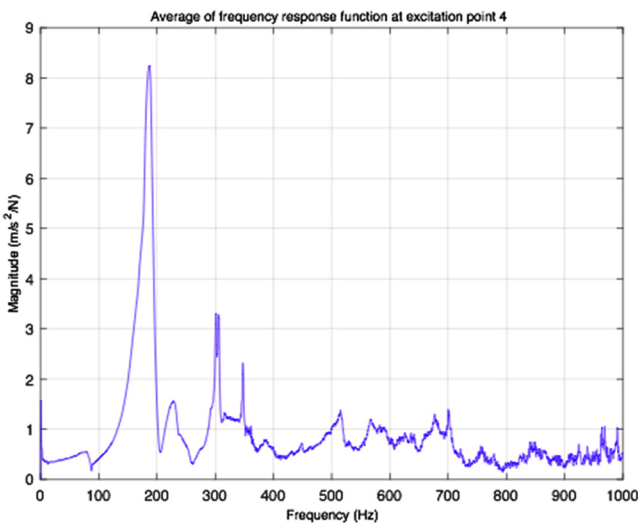


Fig. 6 FRF of excitation point 4

산에 영향을 준 것으로 해석된다. 보다 정확한 분석을 위해서 4 군데 가진 위치에 따라서 무인잠수정 선수 노즈에 장치한 가속도 센서 측정값이 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8에 제시되어 있는 가속도 측정값은 모두 200Hz 부근에서 높은 측정값을 보이고 있으며, 850~900Hz 부근에서도 다른 주파수 대역과 비슷한 주파수 응답을 보여주고 있다 Fig. 7과 Fig. 8에 제시되어 있는 결과를 살펴 볼 때 OKPO 300의 고유 주파수는 200Hz 부근으로 확인할 수 있으며, 850~900Hz 부근에서 발생한 큰 주파수 응답 특성은 임팩트 해머 내장센서 등에서 발생한 잡음으로 발생한 것으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

무인잠수정을 효율적으로 운영하기 위해서는 자율 운항 성능

이 매우 중요하며, 자율 운항 성능에 큰 영향을 주는 것이 운용 환경에 대한 정보를 획득하기 위한 소나 장비이다. 소나 장비는 소음과 진동에 의하여 성능에 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 설계 초기부터 무인잠수정 자체 발생 진동과 소음을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 무인잠수정에서 발생하는 자체 소음의 주된 원인인 추진 장치에 대한 진동이 무인잠수정 전체에 대하여 끼치는 영향을 파악하기 위하여 개발 완료된 무인잠수정 OKPO 300에 대해서 임팩트 해머를 이용한 공기 중 진동 특성 파악 실험을 수행하였고 그 실험 결과를 제시하였다.

실험 결과로부터 OKPO 300의 고유 주파수가 200Hz 부근에서 발생한다는 사실을 확인할 수 있었으며, OKPO 300 고유주파수 대역이 무인잠수정에서 많이 사용하고 있는 수동 소나의 저주파 대역과 근접하고 있다는 사실로부터 초기 설계 단계에서 진동 소음에 대한 고려가 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

향후 과제로는 공기 중 실험을 통하여 확인한 무인잠수정 OKPO 300의 진동 특성에 대한 실제 운영 환경에서의 적용성을 확인하기 위하여 수조 환경에서 실제 추진기를 활용한 실험을 수행하고 수중 환경에서의 진동 특성을 파악 및 분석이 필요하다.

References

- Askari, E., Daneshmand, F., 2009. Coupled Vibration of a Fluid Filled Cylindrical Container with a Cylindrical Internal Body. *Journal of Fluids and Structures*, 25, 389-405.
- Chen, X., Wu, Y., Cui, W., Tang, X., 2003. Nonlinear Hydroelastic Analysis of a Moored Floating Body. *Ocean Engineering*, 30, 965-1003.
- Halevi, Y., Wagner-Nachshoni, C., 2006. Transfer Function Modeling of Multi-link Flexible Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 296, 73-90.
- Jefferys, E.R., Broome, D.R., Patel, M.H., 1984. A Transfer Function Method of Modeling Systems with Frequency Dependent Coefficients. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 7(4), 490-495.
- Min, C.H., Park, H.I., Jung, H.G., Yoo, J.H., 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, Hawaii, USA*, 322-326.
- Ohkusu, M., Namba, Y., 2004. Hydroelastic Analysis of a Large Floating Structure. *Journal of Fluids and Structures*, 19, 543-555.
- Sigrist, J.F., 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, 287-300.
- Ugurlu, B., 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.