

조류발전용 수직축 터빈의 공진 회피 설계를 위한 프로그램 개발 Development of Vibration Analysis Program for Anti-resonance Design of Vertical-axis Tidal Current Turbine

배재한* · 성혜민** · 조대승† · 김재호***

Jae-Han Bae, Hye-Min Seong, Dae-Seung Cho, Jae-Ho Kim

Key Words: Vertical-axis tidal current turbine(수직축 조류발전용 터빈), Anti-resonance design(공진 회피 설계), Free vibration analysis(고유진동해석), Finite element method(유한요소법)

ABSTRACT

The vertical-axis tidal current turbine (VAT) consisting of blades, struts to support blades, shaft, generator and so forth requires anti-resonance design against fluid fluctuation forces generated on blades to ensure its stable operation. In this study, a free vibration analysis program based on the finite element method is developed for efficient anti-resonance design of VAT in the preliminary design stage. In the finite element modeling, the VAT structure components are regarded as beam elements. Added masses due to the fluid and structure interaction of VAT evaluated by empirical formulas are considered as lumped mass elements. In addition, input parameters required for the analysis can be automatically prepared from the principal dimensions of VAT to make anti-resonance design more convenient. The validity of applied methods is verified by the comparison of the numerical results obtained from MSC/Nastran and the developed program for two VAT models.

1. 서 론

최근 고갈되는 화석연료에 대한 대안으로 대체 에너지 활용에 관한 연구⁽¹⁾가 활발히 수행되고 있다. 유력한 신재생 에너지원 중의 하나인 조류를 이용한 발전 시스템은 유속이 빠른 지역에 터빈을 설치해 전기를 생산한다. 이러한 조류발전용 터빈은 로터의 설치 방법에 따라 수평축 터빈(HAT: Horizontal Axis Tidal Turbine)과 수직축 터빈(VAT: Vertical Axis Tidal Turbine)으로 분류된다.

이들 중 VAT는 수직 회전축, 회전력을 발생시키는 블레이드, 회전축과 블레이드를 연결하는 스트럿 구조 등으로 구성되며, 블레이드에서 발생하는 불균

일한 유체력 등으로 인한 기진력에 의해 진동할 수 있다. 따라서, VAT의 안정적인 발전 성능을 확보하기 위해서는 터빈 구조의 공진회피 설계가 요구된다.

날개를 이용하여 유동 유체로부터 전기를 생산하는 장치에 대한 진동해석은 풍력 터빈⁽²⁾ 및 수차발전기의 축계 시스템⁽³⁾ 등에 대해 수행된 바 있으나 VAT의 초기 사양 설계를 위한 진동해석 연구사례는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 표준형 구조를 갖는 VAT의 초기 설계 단계에서 효율적 공진회피 설계를 도모하고자 유한요소법에 기반한 고유진동해석 프로그램인 VAT_VIB (Vertical-Axis Turbine VIBration analysis program)를 개발하였다. 개발된 프로그램은 VAT의 주요 구조를 3차원 보 요소, 접수효과로 인한 부가 질량은 집중 질량으로 고려한다. 또한, 표준 구조를 갖는 VAT의 주요 제원 입력 시, 고유진동해석을 위한 유한요소 모델과 이의 물성치를 효율

† 교신저자; 정회원, 부산대학교
E-mail : daecho@pusan.ac.kr
Tel : 051-510-2752

* (주) STX 종합기술원
** 부산대학교 조선해양공학과
*** 국방과학연구소

적으로 생성하는 기능을 가지고 있다. 개발된 프로그램의 해석 정확도와 실용성 검토는 지지 방식이 다른 2개의 표준형 VAT 모델을 대상으로 MSC/Nastran의 Solid 및 Shell 요소를 이용한 정밀 유한요소 해석 결과와 비교하여 수행하였다.

2. 유한요소법을 이용한 표준형 VAT의 고유 진동해석 방법

2.1 표준형 VAT 구조

일반적으로 VAT 구조는 Fig. 1에 예시한 바와 같이 수직 방향 회전축과 블레이드 및 이를 연결하는 스트럿 등으로 구성된다. 본 연구에서는 발전 효율과 구조 안정성 등을 고려하여 블레이드는 3 또는 4개이고, 각 블레이드는 회전축과 연결된 2개의 수평 스트럿으로 지지되는 구조를 표준형 VAT 구조로 선정하였다. 또한, VAT는 회전 축 상부만 베어링으로 지지하는 경우와 회전 축 상하부를 모두 베어링으로 지지하는 경우로 선정하였다. 아울러, 초기 설계단계에서 각 부분 구조는 균일 단면을 가지되 회전축은 중공 또는 중실 원형단면, 스트럿은 타원 단면, 블레이드는 NACA65-0013 형상의 단면을 갖는 것으로 설정하였다.

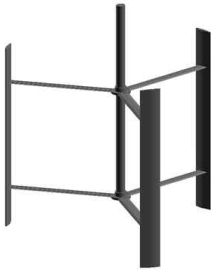


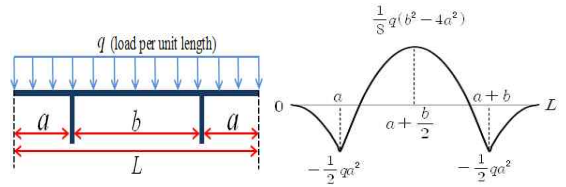
Fig. 1 Vertical-axis tidal turbine (3 blade model)

한편, 표준형 VAT의 블레이드를 지지하는 스트럿의 부착 위치는 블레이드에 균일 횡 하중이 작용할 때, 스트럿 부착 위치를 단순지지로 가정하면 블레이드 중앙부에 작용하는 최대굽힘모멘트와 스트럿 지지부에 작용하는 굽힘모멘트가 일치하는 위치로 하였다. 즉, Fig. 2에 예시한 바와 같이 스트럿의 부착 위치는

$$b = 2\sqrt{2}a \quad (1)$$

로 하였다⁽⁴⁾. 여기서, a 는 블레이드 끝단으로부터 인

접 스트럿 지지부까지의 거리, b 는 스트럿 지지부 사이의 거리이다.



(a) Blade dimension (b) Bending moment graph

Fig. 2 Blade bending moment in case of uniform loading

2.2 VAT 구조의 유한요소 모델링

표준형 VAT 구조에 대한 진동해석을 유한요소법으로 수행하기 위하여 회전축과 블레이드 및 이를 연결하는 스트럿 구조는 중, 비틀 및 굽힘 거동을 모두 고려하는 3차원 보 요소로 모델링하였다.

부분 구조별 유한요소 생성은 Fig. 3에 예시한 바와 같이 회전 축 지지 하부 베어링 유무에 따라 부분 구조별로 길이와 유한요소 분할 개수를 지정하면 유한요소 모델이 자동 생성하도록 하였다. Fig. 3에 나타난 부분 구조 별 길이에 대한 정의는 Table 1에 나타내었다. 한편, VAT 상부에 설치되는 발전기는 집중 관성으로 고려할 수 있도록 하였다.

2.3 VAT 접수 구조의 부가 질량 평가

물 속에서 구동하는 VAT의 고유진동해석을 위해서는 블레이드, 스트럿, 회전 축에 작용하는 부가 질량 평가가 필요하다. VAT 구조에 대한 정밀한 3차원 접수효과는 유한요소법과 경계요소법의 연성 해석 방법 등으로 평가할 수 있다. 그러나, VAT 구조부의 주요 제원을 결정하는 초기 설계 단계의 공진 회피 설계 효율성을 제고하기 위해서는 시간과 비용 측면에서 보다 효율적인 방법이 요구된다.

이에 본 연구에서는 블레이드, 스트럿 및 회전 축 단면의 2차원 부가 질량을 식 (2)에 나타난 타원 단면 형상에 대한 장축 및 단축 방향 별 단위 길이 당 부가 질량 m_{ax} 와 m_{ay} 를 이용하여 평가⁽⁵⁾하였다.

$$m_{ax} = \frac{\rho\pi a^2}{4}, \quad m_{ay} = \frac{\rho\pi b^2}{4} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체 밀도 (kg/m^3), a , b 는 각각 타원 단면의 장축과 단축 길이 (m)에 해당한다.

한편, 유한장 타원단면 주상체의 부가 질량은 진

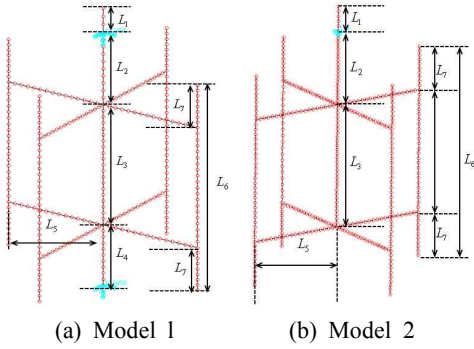


Fig. 3 Part sections to define dimension of VAT

Table 1 Lengths to define overall geometry of VAT

Symbol	Description
L_1	Length from generator to upper bearing
L_2	Length from upper bearing to upper strut
L_3	Length from upper strut to lower strut
L_4	Length from lower strut to lower bearing
L_5	Length of strut from shaft center to blade
L_6	Length of blade
L_7	Length from blade end to adjacent strut

동 형상에 따라 달라진다. 이에 3차원 효과를 고려한 부분 구조의 단위 길이당 부가질량은 식 (2)로 평가된 2차원 부가질량에 타원단면 주상체의 2절 굽힘진동에 대한 3차원 수정계수⁽⁶⁾를 곱하여 산정하였다. 상기와 같이 평가된 단면 방향 별 3차원 부가질량은 보 요소로 평가한 구조 관성 행렬에 부가하여 고려하였다.

2.3 유한 요소 해석

표준형 VAT의 고유진동해석을 위한 계 전체의 관성 및 강성 행렬은 전술한 방법으로 구성한 각 부분 구조 별 유한요소체에 대한 강성행렬과 부가질량을 고려한 관성행렬을 이용하여 생성하였다. 또한, 회전축의 베어링 지지부에 대한 경계조건을 부여한 후 일반적 고유치 해석 기법을 적용하여 표준형 VAT의 고유진동수와 고유진동형을 산정하였다.

2.4 접수효과 평가를 위한 부가질량증분계수

표준형 VAT 구조의 진동 특성에 영향을 미치는 접수 효과는 구조질량 m 에 대한 부가질량 Δm 의 비로 정의되는 부가질량증분계수 (AMIF: Added

Mass Incremental Factor)를 이용하여 평가하였다. AMIF는 동일 진동형을 갖는 VAT의 비접수 고유진동수 ω_a 와 접수 고유진동수 ω_f 를 이용하여 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$AMIF = \frac{\Delta m}{m} = \left(\frac{\omega_a}{\omega_f} \right)^2 - 1 \quad (3)$$

3. VAT_VIB 프로그램 개요

표준형 VAT의 초기 설계 단계에서 공진회피 설계를 도모하기 위해 Matlab으로 개발된 VAT_VIB는 설계 발전 용량을 발생할 수 있는 블레이드의 단면 크기, 날개 수 및 길이와 블레이드의 회전 반경을 선정하는 유체 성능 데이터베이스와 연동해서 사용된다. VAT_VIB 프로그램은 유체 성능에 의해 결정된 제원을 토대로 회전 축, 스트럿의 단면 치수와 재료 물성치 및 베어링 지지 조건 등을 사용자가 정의하고, Fig. 3에 도시한 각 부분 구조의 길이 및 유한요소 분할개수를 지정하면 2장에 기술한 방법으로 고유진동해석을 실행할 수 있다. 이때, 각 유한요소의 물성치는 상기 입력된 자료를 토대로 프로그램 내부에서 자동으로 평가한다.

한편, 표준형 VAT의 공진회피 설계 평가기준은 주요 진동형의 고유진동수 f_i 가 회전 축 속도 V (rps), 블레이드 날개 수 N 에 의해 결정되는 기본 블레이드 차수 기진주파수 $N \cdot V$ 및 이의 조화성분 기진주파수의 $\pm 25\%$ 범위 밖에 있어야 하는 것으로 설정하였다.

초기 설계한 표준형 VAT의 고유진동 해석 결과가 공진회피 기준을 만족하지 못한다면 이의 재설계가 요구된다. VAT_VIB 프로그램은 표준형 VAT의 구조 설계 변경 시 수분 내의 시간으로 재해석이 가능하므로 초기 설계 단계의 VAT 공진회피 설계를 효과적으로 수행할 수 있다.

VAT_VIB를 이용한 진동해석 및 공진회피 설계 흐름도는 Fig. 4에 나타내었다.

4. 수치해석 예

4.1 수치해석 모델 및 해석 조건

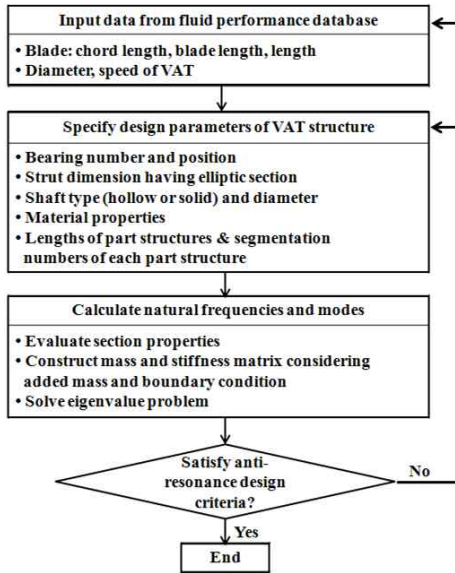


Fig. 4 Flow chart of VAT_VIB

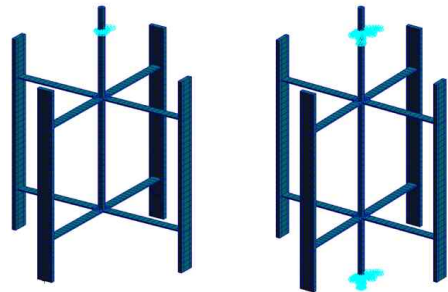
본 연구에서는 상부 베어링만으로 지지된 표준형 VAT (Model 1)과 상부 및 하부 베어링으로 지지된 표준형 VAT (Model 2)의 모델 구조에 대하여 VAT_VIB 프로그램을 이용한 비접수 및 접수 고유진동해석을 수행하였다. 해석 대상 구조의 재질은 강으로 하였으며, 주요 치수와 유한요소 분할 개수는 Table 2에 나타내었다. 또한, 프로그램의 정확도와 효율성을 검토하고자 solid 및 shell 요소로 모델링하여 유한요소법과 경계요소법을 적용한 진동해석을 범용 유한요소 해석프로그램인 MSC/Nastran을 이용하여 수행하였다. 한편, 수치해석에 있어서 블레이드 및 스트럿은 직사각형 단면으로 하였다. 이는 MSC/Nastran을 이용한 접수 진동해석 시 블레이드 날개와 스트럿 타원 단면 형상 구현에 따른 요소 및 자유도 수가 과도하게 요구되어 비교검증의 편의성을 도모하기 위함이다. 수치 해석 대상 표준형 VAT 구조의 MSC/Nastran 기반 유한 요소 모델 형상은 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 상부 지지 VAT 구조 (Model 1)

상부지지 VAT 구조 (Model 1)의 비접수 조건에 대해 VAT_VIB를 이용하여 구한 고유진동수 및 고유진동형 해석 결과는 Table 3과 Fig. 6에 MSC/Nastran을 이용한 진동해석 결과와 함께 나타내었다. 이로부터 비접수 구조에 대한 VAT_VIB와

Table 2 Particulars of VAT models

	Model 1	Model 2	Section type & dimension (mm)
	Length (mm)	Length (mm)	
L_1	100	100	Circular Diameter: 30
L_2	300	300	
L_3	498	498	
L_4	0	250	
L_5	400	400	Rectangular 70×18
L_6	850	850	Rectangular 40×16
L_7	176	176	
No. of FE elements	VAT_VIB: 297 Nastran: 2,888	VAT_VIB: 307 Nastran: 2,928	-



(a) Model 1

(b) Model 2

Fig. 5 MSC/Nastran solid model of VAT

MSC/Nastran을 이용한 고유진동수 해석 결과는 8.0% 이내 임을 확인할 수 있다. 이는 구조 단면 특성을 기하학적으로 반영한 solid 모델과 단면 특성치로만 반영한 보 모델의 차이로 인해 발생한 것이라고 사료한다.

Model 1의 접수 조건에 대해 양자의 방법으로 구한 고유진동수 해석 결과는 Table 4에 나타내었는데 6.4% 이내의 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 구조 모델링 및 부가질량 산정 방법의 차이로 인한 것이다. 한편, 접수 진동해석으로부터 구한 고유진동형은 비접수 해석의 경우와 유사하였다.

상기 비접수 및 접수 고유진동수를 이용하여 평가한 AMIF는 Table 5에 나타내었다. 이로부터 부가질량 증분 효과는 모드 형상에 따라 구조 중량의 4%에서 19%까지 변화함을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 적용한 부가질량 계산 방법은 MSC/Nastran의 경계요소법으로 계산한 방법 대비 AMIF가 0.1 이상인 경우에는 부합성이 좋으나 0.1 이하

Table 3 Natural frequencies of Model 1 in vacuum

Natural freq. (Hz)	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	5.78	7.97	12.44
Nastran	5.90	8.09	13.53
Difference(%)	2.0	1.5	8.0

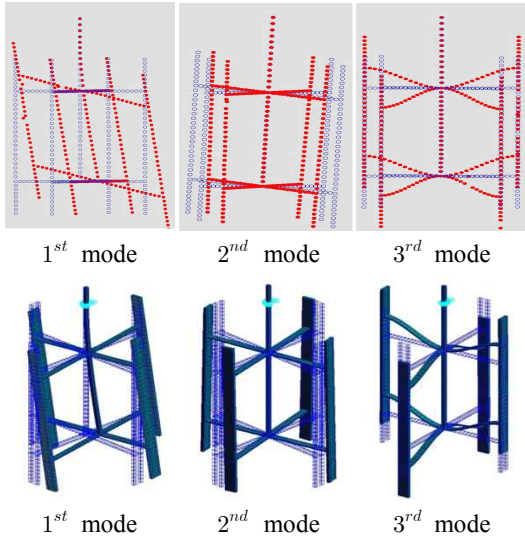


Fig. 6 Mode shapes obtained by VAT_VIB and MSC /Nastran: Model 1 in vacuum

Table 4 Natural frequencies of Model 1 in water

Natural freq. (Hz)	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	5.30	7.84	12.19
Nastran	5.40	7.86	13.03
Difference(%)	1.8	0.3	6.4

Table 5 Added mass incremental factor: Model 1

AMIF	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	0.19	0.04	0.04
Nastran	0.19	0.06	0.08
Difference(%)	2.5	40.2	46.4

인 경우에는 부합성이 낮음을 확인할 수 있다. 그러나, AMIF가 작은 경우에는 접수효과가 고유진동해석 결과에 미치는 영향이 적으므로 VAT_VIB를 이용한 VAT의 접수 고유진동해석 정확도에 미치는 영향은 적다고 사료한다.

4.3 상하부 지지 VAT 구조 (Model 2)

VAT 회전축의 상하부가 모두 베어링으로 지지된 경우인 Model 2에 대한 비접수 고유진동수 계산 결과는 Table 6에 나타내었다. 또한, 접수 상태의 고유진동수와 고유진동형 계산결과는 Fig. 7과 Table 7에 나타내었으며, 이들 결과로부터 평가한 AMIF 산정 결과는 Table 8에 나타내었다. 이로부터 VAT_VIB와 MSC/Nastran을 이용한 고유진동수 해석 및 AMIF 평가 결과의 차이는 상부만 지지된 Model 1의 경우와 유사함을 확인할 수 있다.

Table 6 Natural frequencies of Model 2 in vacuum

Natural freq. (Hz)	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	12.24	12.34	12.45
Nastran	12.38	13.63	13.81
Difference(%)	1.1	9.4	9.8

Table 7 Natural frequencies of Model 2 in water

Natural freq. (Hz)	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	12.03	12.09	12.19
Nastran	12.03	13.12	13.29
Difference(%)	0.1	7.9	8.3

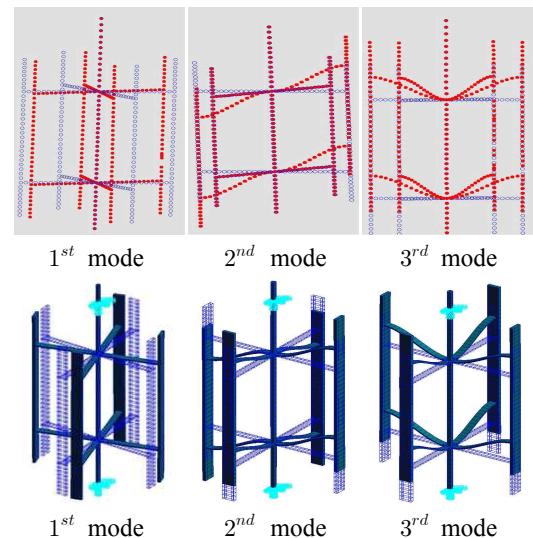


Fig. 7 Mode shapes obtained by VAT_VIB and MSC/Nastran: Model 2 in water

상기의 수치해석 결과로부터 표준형 VAT의 접수

Table 8 Added mass incremental factor: Model 2

AMIF	1st mode	2nd mode	3rd mode
VAT_VIB	0.04	0.04	0.04
Nastran	0.06	0.08	0.08
Difference(%)	40.1	45.8	46.4

고유진동해석을 구조부는 보 요소로 모델링하고 접수 효과는 타원단면에 대한 부가질량 산식을 적용하여 평가하는 VAT_VIB로 수행하면 MSC/Nastran의 solid 및 shell 요소를 이용하여 유한요소법과 경계요소법으로 정밀 수치해석한 결과와 비교하여 접수 고유진동수 기준으로 10% 이내의 차이를 나타낸다고 평가한다. 한편, 본 연구에서 적용한 부가질량 산정 방법은 정밀 수치해석 결과 대비 다소 적게 평가하므로 이의 정확도 향상을 위한 추가적 연구가 필요하다고 판단한다.

5. 결 론

본 연구에서는 표준형 VAT의 주요 제원을 결정하는 초기 설계단계에서의 공진회피 설계를 도모하고자 VAT_VIB 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 VAT 주요 구조를 중, 비틀 및 굽힘 거동을 고려한 보 요소로 유한요소 모델링하고, 접수 효과는 2차원 타원 단면에 대한 부가질량과 유한장 타원단면 주상체에 대한 3차원 수정계수를 이용하여 고려한다.

표준형 VAT 모델 구조에 대해 VAT_VIB를 이용하여 접수 고유진동수 해석 결과는 solid 및 shell 요소를 이용한 정밀 유한요소해석 결과와 비교하여 10% 이내의 차이를 나타내었다. 또한, VAT_VIB를 활용하면 VAT의 주요 제원 변경 시 수분 이내의 시간으로 접수 진동 재해석이 가능하다. 따라서, 본 연구에서 개발한 프로그램은 표준형 VAT의 초기 설계 단계에서 유체 성능과 공진회피를 동시에 고려한 주요 제원 결정에 유용하게 활용될 수 있다고 판단한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 재원 한국에너지기술평가원(KETEP) 지원 연구과제 (NO. 20093020070020)

와 2011년도 교육과학기술부 재원 한국연구재단의 지원 연구과제 (NO. 2011-0030669)로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Hahn, J. S., 2010, Performance Analysis and Design of Vertical Axis Tidal Turbine, MS thesis, Korea Maritime University.
- (2) Kong, C. D., Choi, S. H. and Park H. B., 2009, Study on a 500W Class Wind Turbine using a High Efficiency Composite Blades, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 37, No. 2, pp. 201-208.
- (3) Kim, Y. H., Son, B. G., Choi, B. G., Yang, B. S. and Ha, H. C., 1998, Vibration Analysis of Hydraulic Turbine - Generator Rotor, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 1998, No. 1, pp. 250-254.
- (4) Bae, J. H., 2012, A Study on Vibration Analysis for Anti-resonance Design of Vertical-axis Tidal Current Turbine, MS thesis, Pusan National University.
- (5) Lamb, H., 1932, Hydrodynamics, 6th ed., Cambridge University Press.
- (6) Kim, C. R., 1974, On the Three-dimensional Correction Factor for the Added Mass in the Vertical Vibration of the Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 11, No. 2, pp. 1-6.