

선박용 프로펠러의 종방향 강제운동에 대한 부가질량

김영중*, 이현엽^{†**}, 이창섭**

한국기계연구원*, 충남대학교**

The Added Mass and Damping for the Axial Rigid Body Motion
of a Marine Propeller Rotating in a Uniform Flow

Young-Joong Kim^{†*}, Hyun Yup Lee^{**} and Chang-Sup Lee^{**}

Korea Institute of Machinery and Materials*, Chungnam National University**

Abstract

An experimental method to estimate the added mass of a marine propeller has been developed for the axial rigid body motion in still water, and the experiments have been carried out. The experimental result has been compared to the theoretical result by PRODAS based on the unsteady lifting surface theory. The experimental method developed in this research and the theoretical method by PRODAS have been validated by confirming good agreements between the experimental results and the theoretical ones. Also the comparison to the results by empirical formula has been made and discussed.

※Keywords: Propeller(프로펠러), Added mass(부가질량), Axial vibration(종진동), Rigid body motion(강제운동), Vibration experiment in water(수중진동시험), Unsteady lifting surface theory(비정상 양력면이론)

1. 서론

최근 신형식의 프로펠러들이 선박에 적용되는 추세에 따라 설계 단계에서부터 프로펠러의 진동 특성에 관하여 보다 정도 높은 추정기법이 요구되고 있다.

최근 국내에서는 이에 대한 연구로 축계진동시 프로펠러의 부가질량 및 감쇠, 프로펠러 명음(singing), 프로펠러 날개의 탄성진동 등에 대한

연구가 활발히 수행되고 있다(Kim and Chung 1994, Kim 2005, Kim et al. 2005, Kim et al. 2005, Nho et al. 2004, Cho et al. 1994).

일반적으로 축계진동 해석에서는 관심주파수가 프로펠러 날개의 고유진동수보다 훨씬 낮기 때문에 프로펠러 날개의 탄성변형을 고려하지 않는 강체로 가정하여 해석하는 것이 타당하다.

프로펠러가 불균일 반류 중에서 회전하면서 강제운동을 하게 되면 그 운동에 의해 유체역학적인 반작용 힘과 모멘트를 받는다. 이러한 하중은 프로펠러 강제운동의 가속도 및 속도에 비례하는 성분으로 분해할 수 있으며, 이러한 비례상수를 프

접수일: 2008년 4월 29일, 승인일: 2008년 5월 22일

† 교신저자: hylee@cnu.ac.kr, 042-821-6626

로펠러의 유체역학적 계수라 한다.

Cho et al.(1994)은 Kerwin and Lee(1978)의 비정상 프로펠러 양력면 이론을 활용하여 개발된 코드인 PRODA를 이용하여 프러펠러의 강제운동에 대한 유체역학적 계수를 산정하는 기법을 개발하였다.

그러나, 이러한 유체역학적 계수를 실험적으로 추정하려는 연구는 모형시험에 의해 결정할 수 있는 계수가 제한적이고 또한 실험의 어려움 때문에 더 이상 발전하지 못하고 있었다.

따라서, 본 연구에서는 프로펠러의 종방향 강제운동에 대한 부가질량을 계측하기 위한 실험기법을 정립하고자, 우선 정수 중에서의 실험기법을 개발하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 Cho et al.(1994)의 방법으로 이론해석한 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인함으로써 실험기법과 이론해석기법을 상호 검증하였으며, 또한 경험식과의 비교 결과를 검토하였다.

본 연구에서 실험한 프로펠러를 Fig. 1에 나타내었으며, 주요제원은 Table 1과 같다.

2. 프로펠러 종방향 강제운동 실험

프로펠러의 종방향 강제운동 실험은 Fig. 2와 같이 정수 중에서 프로펠러의 허브 끝단에 임피던스 헤드를 부착하고 봉을 연결하여 가진기에 연결하였다.

임피던스 헤드에서 측정된 힘과 가속도로부터 가진점 전달함수(가속도/힘)를 공기 중에서도 수중에서도 계측하였다. 수중에서 실험 모습을 Fig. 3에 나타내었다.

가진은 실험장치의 특성상 50Hz 부터 1.5kHz 사이에서 균일한 에너지를 갖는 랜덤 신호를 이용하였으며, 임피던스 헤드로 측정되는 힘과 가속도에 대해 FFT를 수행하여 전달함수를 산정하여(샘플링 속도:8 KHz, 주기: 1.024초, 애버리징:60), 그 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 관성력에 비해 감쇠력이 너무 작아 위상차를 신뢰할 수준으로 산정할 수 없었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 프로펠러가 강제로 작용하는 저주파수 영역에서는 일정한 크기의 값

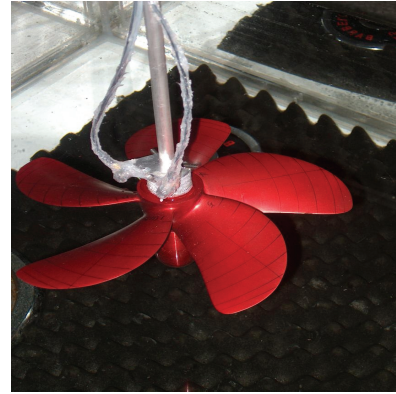


Fig. 1 Test propeller

Table 1 Principal properties of the propeller

Property	Value
Type	FPP
No. of Blades, Z	5
Section Type	NACA66
Skew	21.150 deg
Hub Ratio, H/D	0.170
Pitch Ratio, P/D	0.671
Expanded Area Ratio, A_E/A_0	0.595
Advance Ratio, J	0.4489
Diameter, D (m)	0.25
Material	ALBC3
Young's Modulus, E (GPa)	73
Shear Modulus, G (GPa)	28
Material Density, ρ_p (kg/m^3)	2,800
Water Density, ρ_w (kg/m^3)	1,000
Revolution Speed, n (rpm)	487.4

으로 수렴하는 형태가 되며 이 값은 프로펠러 질량의 역수에 해당한다.

Table 2에 공기중과 수중에서 가진점의 전달함수로부터 분석된 질량과 이들의 차이로부터 산정한 부가질량을 구하여 정리하였다. 공기중 질량(0.646 kg)은 계기로 측정된 0.634 kg에 비해 1.9% 정도의 측정 오차를 보이고 있다.

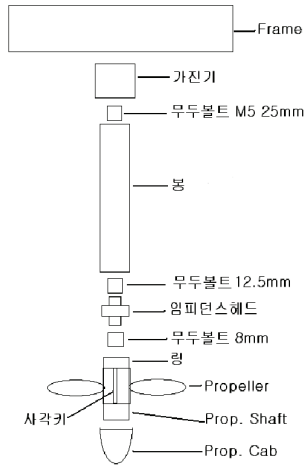


Fig. 2 Schematic diagram for the test



Fig. 3 Experimental setup in still water

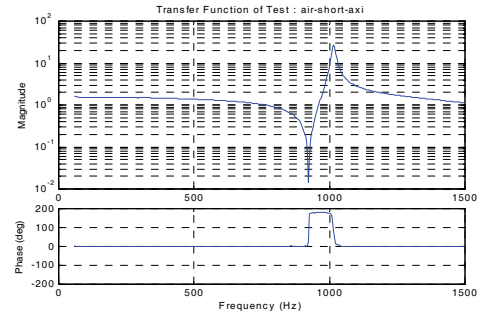
Table 2 Measured mass in air and in water for axial rigid body motion of the propeller

A. Mass in Air	0.646 Kg
B. Mass in Water	1.332 Kg
C. Added Mass(=B-A)	0.686 Kg

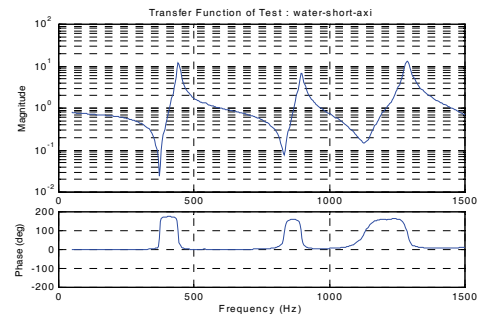
3. 비정상 양력면 이론에 의한 프로펠러 종방향 강제운동 해석

3.1 기본이론

PRODAS를 이용한 부가질량 해석은 Cho et al.



(a) in Air



(b) in Water

Fig. 4 Transfer function (Acceleration/Force) for axial rigid body motion of the propeller [Kg]

(1994)이 기술한 바와 같이 다음과 같은 절차를 따라 수행하였다.

프로펠러를 강체로 가정하고, 유체는 비점성, 비압축성이며 프로펠러의 양력면 및 그 후류를 제외하고는 비회전성으로 가정한다. 유체장의 범위는 무한하며, 주위 선체 또는 자유수면의 영향은 무시한다.

2장에서의 실험과 같이 프로펠러가 정수 중에서 종진동하는 경우의 부가질량 해석을 위해, 프로펠러는 균일 유동 내에서 회전하고 있고, 프로펠러에 유입되는 유체장의 속도가 변하는 것으로 가정한다. 이 속도 변화에 따른 유체역학적인 힘을 가속도와 속도에 비례하는 성분으로 분해하여

각각을 부가질량과 감쇠에 해당하는 결과로 변환할 수 있다.

우선 유입 유체의 변화 속도를 다음과 같이 정의한다.

$$v_x = V_x \cos \omega t \quad (1)$$

여기서 v_x 는 프로펠러 날개의 모든 위치에서 동일하며, 유입 유체는 균일 유입속도에 추가하여 식(1)과 같이 ω 로 진동하는 성분을 갖는다.

프로펠러에 작용하는 유체역학적인 힘의 축방향 성분 중 ω 성분을 f_x 라 하면, 다음과 같이 강제운동의 종방향 가속도에 비례하는 항과 종방향 속도에 비례하는 항으로 분해할 수 있으며, 이 비례계수들을 부가질량과 감쇠계수로 정의한다.

$$\begin{aligned} f_x &= F_x \sin(\omega t + \phi) \\ &= F_x \cos \phi \sin \omega t + F_x \sin \phi \cos \omega t \quad (2) \\ &= m_a (\omega V_x \sin \omega t) + c (V_x \cos \omega t) \end{aligned}$$

F_x 는 비정상 축방향의 힘의 변동 진폭을 의미하며, ϕ 는 강제운동 변위와의 위상이다. 프로펠러의 종진동 부가질량(m_a)과 감쇠계수(c)는 다음과 같이 구해진다.

$$m_a = \frac{F_x \cos \phi}{\omega V_x} \quad (3)$$

$$c = \frac{F_x \sin \phi}{V_x} \quad (4)$$

해석에서는 무차원화 된 추력계수로 결과가 산정되며 균일 유입 유동에 의한 평균 추력을 제외하면 다음과 같은 관계로부터 식 (2)의 유체역학적인 힘을 구할 수 있다.

$$K_{TE} = f_x / \rho n^2 D^4 \quad (5)$$

여기서 K_{TE} 는 추력계수의 가진주파수 성분을 의미한다.

3.2 해석방법 및 결과

해석은 무차원화 된 프로펠러의 제원에 대해 수행하였으며, 종방향 강제운동의 진폭은 프로펠러 전진속도의 1%로 하고, 주파수는 프로펠러의 회전 주파수 및 날개 주파수의 고차 조화 성분에 해

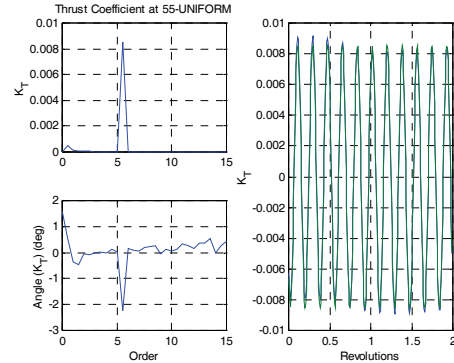


Fig. 5 Harmonic analysis of the thrust coefficient for axial rigid body motion of the propeller in the uniform flow (by PRODAS)

Table 3 The added mass and damping coefficients for axial rigid body motion of the propeller (by PRODAS)

Added Mass	0.669 Kg
Damping Coefficient	151.4 N/(m/s)

당되지 않도록 회전수의 5.5배의 값을 적용하였다.

균일 유동 내에서 추력 변동량을 프로펠러 1회전 당 120개의 등간격 시간으로 구하였으며, Fourier 급수 분석 결과와 함께 Fig. 5에 나타내었으며 부가질량과 감쇠계수를 Table 3에 정리하였다.

PRODAS의 해석결과는 허브에 의한 영향을 무시한 결과인데, Table 1의 자료로부터 구한 허브 면적은 날개면적에 비해 4.8%이므로, 본 연구에서는 이를 무시하였다.

4. 경험식을 이용한 해석

프로펠러의 강제운동시의 부가질량과 감쇠계수를 구하는 경험식은 Korean Register(1997)에 자세히 기술되어 있으며, Shuster와 Schwanecke의 식으로 산정하고 Thomsen의 수정계수로 보정하는 방법이 이용된다.

Table 4 The added mass and damping coefficients for axial rigid body motion of the propeller (by empirical formulas)

	Empirical Formula	Result
Added Mass [kg]	Shuster	0.966
	Schwanecke	0.824
Damping Coefficient [N/(m/s)]	Shuster	211.9
	Schwanecke	224.9

Table 5 The added mass for axial rigid body motion of the propeller

Estimation Method	Added Mass [kg]	Diff. [%]
Experiment	0.686	0
PRODAS	0.669	-2.5%
Empirical Formula	(Shuster)	0.966 +40.8%
	(Schwanecke)	0.824 +20.1%

Table 6 The damping coefficients for axial rigid body motion of the propeller

Estimation Method	Damping Coefficient [N/(m/s)]	Diff. [%]
PRODAS	151.4	-
Empirical Formula	(Shuster)	211.9 +40.0
	(Schwanecke)	224.9 +48.5

Table 1의 프로펠러 제원을 기준으로 경험식을 이용하여 구한 프로펠러의 강체 운동 시의 부가질량 및 감쇠 특성을 Table 4에 정리하였다.

5. 고찰

Table 5와 Table 6에는 부가질량과 감쇠계수에 대해 실험결과와 PRODAS로 해석한 결과 그리고 경험식에 의한 결과를 비교하였다. 차이는 정수중에서 수행한 실험 결과를 기준으로 하였다.

Table 5에서 보면 균일 유동 내에서 PRODAS로 해석한 부가질량이 실험 결과와 2.5% 정도의 오차로 일치한다. 이는 PRODAS를 이용한 부가질량과 감쇠계수 산정기법의 유용성과 본 연구에서 제안된 부가질량 실험기법의 유용성이 검증되었다는 것을 의미한다.

Table 5에서 보면 경험식의 결과는 20%이상의 오차를 보인다. 이는 본 연구의 대상 프로펠러는 21.15도의 비교적 고스쿠 프로펠러인데, 사용된 경험식은 1960년대에 일반적인 프로펠러에 대해 개발된 식이므로 오차가 크게 발생한 것으로 판단된다.

PRODAS는 기본적으로는 이상 유체를 가정하지만 프로펠러의 회전에 의해 발생하는 보조토크를 해석하여 후류에서 유체의 회전에 의한 에너지 손실을 정량화 하므로, 감쇠계수를 추정할 수 있다. Table 6에서 보면, PRODAS 결과에 비해 경험식의 결과는 40% 이상 큰 결과를 보이고 있다.

2장에서 설명한 바와 같이 본 연구의 실험에서는 관성력에 비해 감쇠력이 너무 작아 감쇠계수를 신뢰할 수준으로 산정할 수 없었다.

6. 결론

본 연구에서는 선박용 프로펠러의 종방향 강체 운동에 대한 부가질량 및 감쇠의 산정 기법을 이론적 기법과 실험을 활용하여 검토하였다.

본 연구에 이용된 이론적 기법은 비정상 양력면 이론에 기초하여 프로펠러의 유체역학적인 성능을 해석하는 코드인 PRODAS를 활용하였고, 기존에 알려진 경험식들도 적용하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 프로펠러의 종방향 강체운동에 의한 부가질량에 대해 실험결과와 PRODAS를 사용한 해석 결과가 매우 유사함을 확인함으로써 아래의 사항을 검증되었다.

- 본 연구에서 제안된 실험기법의 유용성
- PRODAS를 사용한 해석기법의 유용성

2) 기존의 경험식은 최근의 프로펠러에 대해서는 오차가 크다.

후 기

본 논문의 내용은 김영중의 공학박사 학위논문 중 일부 내용과 한국과학재단 지원과제인 “선박프로펠러 방사소음의 소음원 정체확인 기술 연구”과제의 일부 지원으로 수행된 것을 함께 정리한 것으로, 한국과학재단의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Bishop, R.E.D. and Price, W.G., 1979, Hydroelasticity of Ships, Cambridge University Press, UK.
- Cho, C.H., Kim, Y.G. and Lee, C.S., 1994, “Prediction of Added Mass for a Propeller in Axial Shaft Vibration Using Vortex Lattice Method,” Proc. of 1994 Annual Spring Meeting of SNAK. pp. 312–316.
- Kim, D.H. and Chung, K.Y., 1994, “A Study on the Propeller Blade Singing Place of an 86,000 Ton Deadweight Crude Oil Tanker,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 3, pp. 59–64.
- Kim, Y.J., 2005, A Study on the Vibration Characteristics of the Marine Propeller, Ph.D Dissertation, Chungnam National University.
- Kim, Y.J. Lee, H.Y. and Kim, G.D., 2005, “The Added Mass and Damping for the Axial Rigid Body Motion of a Marine Propeller,” Proc. of 2005 Annual Conference of the Korean Association of Ocean Sciences and Technology Societies, pp. 1058–1064.
- Kim, Y.J., Lee, H.Y., Nho, I.S. and Lee, C.S., 2005, “Experimental Method for the Identification of the Propeller Blade Vibration Characteristics,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 136–141.
- Korean Register, 1997, Guide to Ship Vibration and Noise Control.
- Kerwin, J.E. and Lee, C.S. 1978, "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory," Trans. SNAME, Vol. 86, pp. 218–253.
- Nho, I.S., Lee, J.Y., Lee, H.Y. and Lee, C.S., 2004, “A Dynamic Structural Analysis System for Propeller Blades,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 114–120.



< 김 영 중 > < 이 현 엽 > < 이 창 섭 >