

프로펠러 날개의 진동특성에 대한 실험적 연구

김영중*, 이현엽^{†**}, 노인식**, 이창섭**

한국기계연구원 구조연구부*
충남대학교 선박해양공학과**

Experimental Method for the Identification of the Propeller Blade Vibration Characteristics

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

Dept. of Structural Engineering, Korea Institute of Machinery and Materials*
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University**

Abstract

An experiment method has been developed to analyse the vibration characteristics of marine propeller blades, and vibration tests have been carried out on the model scale propeller in air and in water. The driving point transfer function(acceleration/excitation force) has been measured and modified by compensating the attachment effect of the impedance head. The measured natural frequencies in air have been compared with the theoretical results by an in-house FEM code PROSTEC. The added masses have been derived by comparing the measured natural frequencies in air and in water, and the results have been compared to the results using existing formula based on experience.

※Keywords : Propeller Blade Vibration(추진기 날개 진동), Driving Point Transfer Function(가진점 전달함수), Vibration Test(진동실험), Added Mass(부가질량), Impedance Head(임피던스 헤드)

1. 서 론

최근 신형식의 프로펠러들이 선박에 적용되는

추세에 따라 프로펠러 날개의 진동특성을 보다 정확히 산정할 필요성이 증대되고 있다.

선박용 프로펠러는 수중에서 회전하며 작동하기 때문에 실제적인 진동특성의 추정이 매우 어렵다. 최근 국내에서는 이에 대한 연구의 일환으로 유체의 효과를 고려한 이론적, 실험적 연구가 활발히 수행되고 있다(조중호 등 1994, 김동해와 정균양

접수일: 2004년 11월 9일, 승인일: 2005년 2월 3일

† 주저자, E-mail: hylee@cnu.ac.kr

Tel: 042-821-6626

1994, 노인식 등 2004, 김재홍 등 2004, 박형식 등 2004). 최근에 노인식 등(2004)은 프로펠러 날개의 구조/진동해석 전용 코드인 PROSTEC을 개발하였다.

본 연구에서는 프로펠러 날개의 진동특성을 파악하기 위하여 실험실에서 적용할 수 있는 실험 기법을 정립하고 모형 프로펠러에 대해 공기 중과 수중에서 실험을 수행하였다. 공기 중의 진동특성은 PROSTEC으로 해석한 결과 및 기존의 경험식과 비교하여 검토하였다. 또한, 수중에서의 실험을 병행함으로써 날개진동에 대한 부가질량 특성을 파악하고, 기존의 경험식과 비교하였다.

2. 프로펠러 날개의 진동실험

Fig. 1은 수중에서의 프로펠러 날개의 진동 실험 구성도를 보여주고 있는데, 프로펠러 날개의 공기 중 뿐 아니라 수중에서의 진동특성을 파악하기 위하여 프레임 구조의 실험틀 안에 수조를 설치하였다. 진동실험을 위한 가진은 Electro magnetic Exciter를 사용하였으며 진동실험을 위한 개념도를 Fig. 2에 도시하였다.

실험대상 프로펠러는 Fig. 3과 같으며 그 재원은 다음과 같다.

형식 : FPP	날개수 : 5
직경 : 250 mm	단면형태 : NACA66
스큐 : 21.150 deg	허브비 : 0.170
전개면적비 : 0.595	재질 : ALBC3
탄성계수 : 73 GPa	밀도 : 2.8 g/cm ³

3. 가진실험에 대한 진동해석

본 실험에서는 Fig. 2에서 보다시피, 임피던스 헤드로 가속도와 기진력을 계측하였다. 따라서 계측된 전달함수(가속도/기진력)는 계측점(프로펠러 허브) 하부의 시스템에 대한 전달함수이다. 이 전달함수의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같이 허브 시스템을 하나의 강제질량(αm)으로 모델링하고 각 날개는 허브에 고정된 등가보로 모델링하였다.

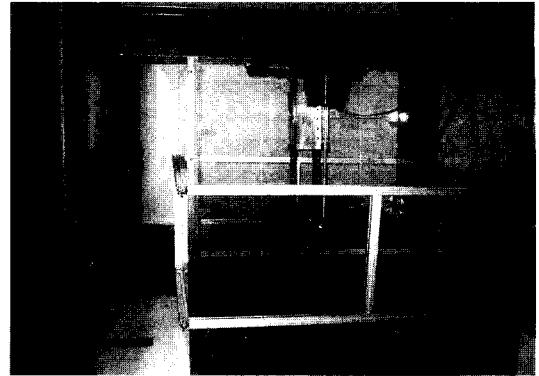


Fig. 1 Experimental setup for propeller blade vibration

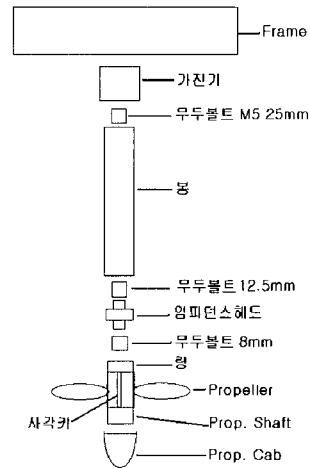


Fig. 2 Schematic diagram of vibration test for propeller blades



Fig. 3 Test propeller

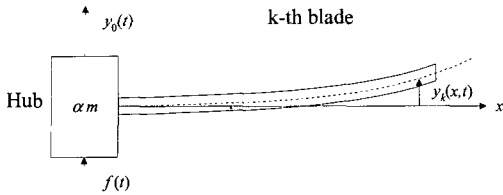


Fig. 4 Free body diagram for exciter test

본 시험에서는 허브를 상하방향으로 가진시키므로, 허브의 상하방향 변위를 $y_0(t)$ 라 하고 각 날개의 허브에 대한 상하방향 상대변위를 $y_k(x,t)$ 라 하면 각 날개의 총 변위는 $y_0(t) + y_k(x,t)$ 가 된다. 따라서 질량이 αm 인 허브에 N 개의 날개가 부착된 프로펠러의 총 운동에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_0^{\ell_k} \rho_k A_k(x) (\dot{y}_k + \dot{y}_0)^2 dx + \frac{1}{2} \alpha m \dot{y}_0^2 \quad (1)$$

여기서, ρ_k 와 ℓ_k 및 $A_k(x)$ 는 k 번째 날개의 밀도와 길이 및 단면적을 나타낸다. 또한 날개에 발생하는 총 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_0^{\ell_k} E_k I_k(x) (\ddot{y}_k)^2 dx \quad (2)$$

여기서, E_k 와 $I_k(x)$ 는 k 번째 날개의 영률 및 단면관성모멘트이다. 한편 허브에 작용하는 외력에 의한 가상일은 허브의 가상변위 δy_0 를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta W = f(t) \delta y_0 \quad (3)$$

이제 k 번째 날개의 고유진동형 $u_{ik}(i = 1, \dots)$ 들과 일반화 좌표계 q_{ik} 를 이용하여 날개의 변위를 전개하면

$$y_k = \sum_i q_{ik}(t) u_{ik}(x) \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있으므로 총 운동에너지와 총 포텐셜에너지는 다음과 같이 정리된다.

$$T = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_i M_{ik} \dot{q}_{ik}^2 + \dot{y}_0 \sum_{k=1}^N \sum_i \Gamma_{ik} \dot{q}_{ik} + \frac{1}{2} (N + \alpha) m \dot{y}_0^2 \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \sum_i K_{ik} q_{ik}^2 \quad (6)$$

여기서 M_{ik} , Γ_{ik} , K_{ik} 는 고유진동형 u_{ik} 들의 직교성을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$M_{ik} = \int_0^{\ell_k} \rho_k A_k(x) u_{ik}^2 dx$$

$$\Gamma_{ik} = \int_0^{\ell_k} \rho_k A_k(x) u_{ik} dx \quad (7)$$

$$K_{ik} = \int_0^{\ell_k} E_k I_k(x) (u_{ik}'')^2 dx$$

그리고 날개들의 질량이 모두 같다고 가정하여 날개의 질량을 다음과 같이 정의하였다.

$$m = m_k = \int_0^{\ell_k} \rho_k A_k(x) dx \quad (8)$$

이제 (9)식과 같은 일반좌표계를 도입하여 Lagrange 방정식을 적용하면 (10)과 (11)식의 운동방정식이 구해진다.

$$Y = \{y_0, q_{ik} (k = 1, \dots, N; i = 1, \dots)\}^T \quad (9)$$

$$(N + \alpha) m \ddot{y}_0 + \sum_{k=1}^N \sum_i \Gamma_{ik} \ddot{q}_{ik} = f(t) \quad (10)$$

$$\Gamma_{ik} \ddot{y}_0 + M_{ik} \ddot{q}_{ik} + K_{ik} q_{ik} = 0 \quad (11)$$

이 식에서 i 와 k 의 범위는 (9)식의 정의와 같다. 이제 Fourier 변환을 통해 운동방정식을 정리하면 (12), (13)식과 같이 구해진다.

$$-w^2 (N + \alpha) m Y_0(w) - w^2 \sum_{k=1}^N \sum_i \Gamma_{ik} Q_{ik}(w) = F(w) \quad (12)$$

$$-w^2 \Gamma_{ik} Y_0(w) / M_{ik} - w^2 Q_{ik}(w) + w_{ik}^2 Q_{ik}(w) = 0 \quad (13)$$

여기서 $Y_0(w)$, $Q_{ik}(w)$, $F(w)$ 는 각각 $y_0(t)$, $q_{ik}(t)$, $f(t)$ 의 Fourier 변환함수를 의미한다. 한편 w_{ik} 는 k 번째 프로펠러 날개의 i 번째 모드에 대한 고유진동수로서 다음과 같이 정의된다.

$$w_{ik}^2 = K_{ik} / M_{ik} \quad (14)$$

(12), (13)식에서 Q_{ik} 를 소거하면 (15)식과 같이 허브에서 측정되는 가진점의 전달함수를 구할 수 있다.

$$H(w) = \frac{A(w)}{F(w)} = \frac{-w^2 Y_0(w)}{F(w)} = \frac{1}{(N + \alpha) m + \sum_{k=1}^N \sum_i \frac{\Gamma_{ik}^2 w^2}{M_{ik} (w_{ik}^2 - w^2)}} \quad (15)$$

(15)식으로부터 가진점의 전달함수 특성을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 가진주파수가 0 부근일 때, 전달함수는 허브와 날개를 포함한 프로펠러 전체 질량의 역수가 된다.

$$\text{즉, } w \rightarrow 0 \text{ 일 때, } H(w) \cong 1/(N + \alpha)m \quad (16)$$

2) 가진주파수가 날개의 어느 하나의 고유진동수 부근일 때, 전달함수의 크기가 0으로 접근한다. 즉 전달함수의 크기가 0으로 접근하는 주파수(제로 주파수)는 허브에 고정된 프로펠러만의 고유진동수에 해당한다.

$$w \rightarrow w_{ik} \text{ 일 때, } H(w) \cong (w_{ik}^2 - w^2)M_{ik}/T_{ik}^2 w^2 \rightarrow 0 \quad (17)$$

3) 한편 전달함수의 극대값에 해당하는 주파수(피크 주파수)들은 (15)식의 분모를 0으로 하는 주파수들로서 프로펠러 전체 시스템의 경계조건이 모두 자유인 경우에 대한 고유진동수에 해당한다.

4. 실험결과 및 검토

공기중과 수중에서 계측된 전달함수를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이 전달함수는 랜덤가진시 임피던스 헤드로 계측된 힘과 가속도를 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 가속도/힘을 주파수 대역에서 구한 것으로 100회의 평균값이다. Coherence는 제로 주파수와 피크 주파수 부근을 제외한 곳에서는 아주 좋은 결과를 주고 있으며, 또한 위상을 보면 4차 제로 주파수까지는 제로 주파수와 피크 주파수에서 급격한 변화를 볼 수 있다. 이론적으로 제로 주파수와 피크주파수에서는 감쇠가 없다면 180도의 위상변화를 갖는다. 따라서, 4차 제로 주파수까지는 정확하게 계측되었다고 할 수 있다.

수정전(before correction)은 계측된 전달함수를 그대로 그린 것이고, 수정후(after correction)는 임피던스 헤드의 질량 및 강성의 영향을 보정하여 수정한 것이다(이현엽과 박재영 1995). 그림에서 보는 바와 같이 수정 전후의 제로주파수에 차이가 나타남을 알 수 있다.

(16)식에 의하면 저주파수에서의 전달함수는 전

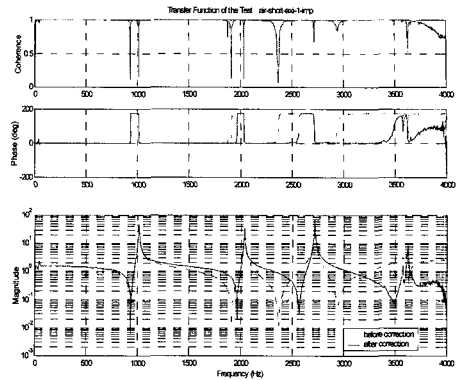


Fig. 5 Axial transfer functions(Acc./Force) at driving point in air

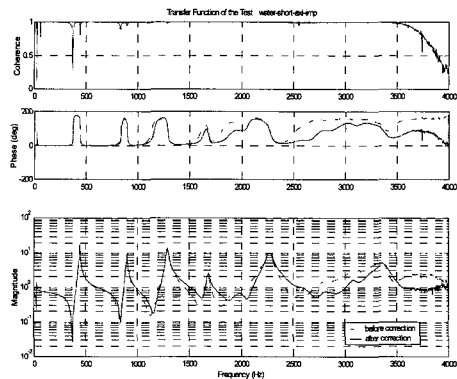


Fig. 6 Axial transfer functions(Acc./Force) at driving point in water

체질량의 역수이고, (17)식에 의하면 제로 주파수는 허브에 고정된 날개만의 고유진동수이다. 가진점 전달함수의 극대값은 가진점이 자유일 때의 고유진동수이고, 극소값은 가진점이 고정일 때의 고유진동수이다. Table 1에는 공기중의 고유진동수와 수중에서의 고유진동수(수정후 제로 주파수)를 4차까지 정리하였으며, 프로펠러 날개 전용 구조 해석 코드인 PROSTEC(노인식 등 2004)으로 해석한 결과 및 Kumai의 경험식(한국선급 1997)과 비교하였으며, Fig. 7에서 Fig. 10에 진동모드를 도시하였다. 또한 공기중과 수중의 고유진동수로부터 진동모드별 부가질량비(부가질량/공기중질량)

를 구하였으며, 실험과 경형식의 결과를 비교하였다.

Table 1 Natural frequencies and added mass ratio of the propeller blade (해석 : PROSTEC)

차수	고유진동수 (Hz)				부가질량비 (β)		
	공기중			수중			
	실험	해석	오차(%)	경형식	실험	실험	경형식
1	934	908	-2.7	661	374	5.23	3.87
2	1965	1982	0.9	-	840	4.47	-
3	2568	2584	0.6	-	1156	3.93	-
4	3490	3692	5.8	-	1620	3.64	-

본 연구에서 개발된 PROSTEC의 해석결과와 실험결과는 3차까지는 3% 미만의 오차로 잘 일치하나, 4차는 6%의 오차로 고차로 갈수록 오차는 더욱 커질 것으로 판단된다.

프로펠러 날개에 대해서 유일하게 제시하고 있는 Kumai의 경형식에 의한 고유진동수는 661 Hz로 상당한 차이를 보이며 부가질량비 또한 실험결과와는 상당한 차이를 보인다. 이는 Kumai의 경형식은 비교적 스쿠가 작은 경우에 대해 개발된 것이 때문에 대상프로펠러와 같이 21.15도의 스쿠각을 갖는 프로펠러 날개에 대해서는 잘 맞지 않으리라 판단된다.

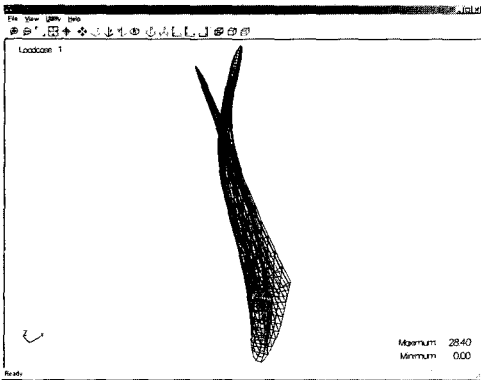


Fig. 7 1st mode of the propeller blade

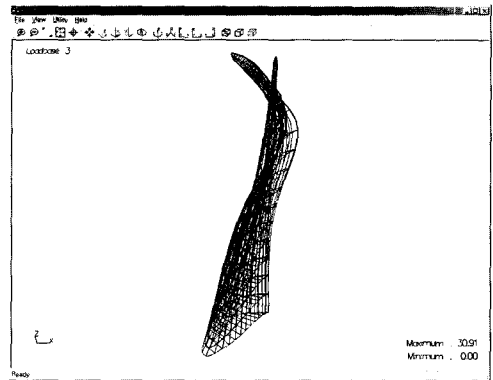


Fig. 9 3rd mode of the propeller blade

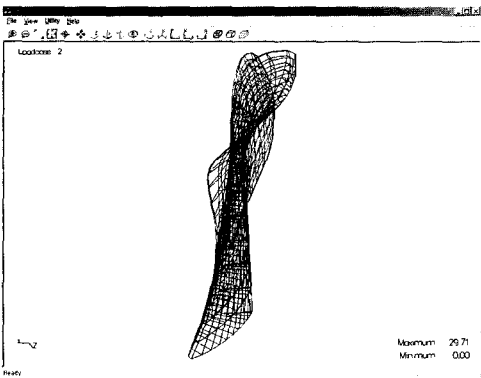


Fig. 8 2nd mode of the propeller blade

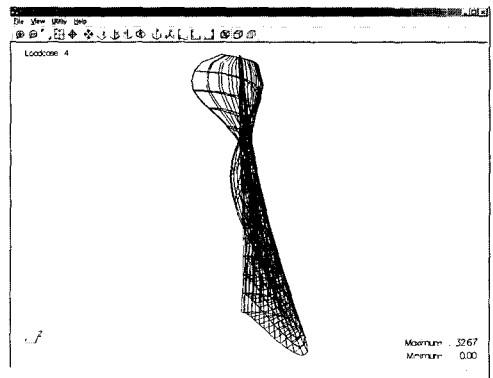


Fig. 10 4th mode of the propeller blade

5. 결론

본 연구에서는 프로펠러 날개의 진동특성을 실험적으로 산정할 수 있는 실험기법을 개발하고, 이를 모형 프로펠러에 적용하여 유용성을 검토하였다. 본 논문의 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 프로펠러의 종방향으로 랜덤가진시험에 의해 프로펠러 허브에서 측정된 가진점 전달함수를 이용하여 날개의 고유진동수와 부가질량을 산정하는 기법의 유용성을 검증하였다.

둘째, In-house 코드인 PROSTEC에 의한 공기중 프로펠러 날개의 고유진동수 해석 결과와 실험 결과의 부합성으로부터, 실험과 PROSTEC을 상호 검증하였다.

셋째, 부가질량의 산정에 경험식을 도입하는 것에는 상당한 오차를 수반하므로 보다 정도 높은 추정기법의 도입이 요구된다.

넷째, 임피던스 헤드를 사용하여 구한 가진점의 전달함수는 임피던스 헤드의 질량 및 강성 특성을 보상하여 분석해야 한다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행된 연구(과제번호: R11-2003-104-02003-0)의 일부이다.

참 고 문 헌

- 김동해, 정균양, 1994, “86,000톤 원유운반선 프로펠러 날개의 singing(명음) 발생위치 조사,” 대한조선학회 논문집, 제 31권, 제 3호, pp. 59-64.
- 김재홍, 조대승, 한성용, 2004, “대형선박의 추진기 진동 모드 특성,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 386-393.
- 노인식, 이정렬, 이현엽, 이창섭, 2004, “프로펠러 날개의 동적 구조해석 시스템 개발,” 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 2호, pp. 114-120.

- 박형식, 김노성, 최수현, 2004, “유한요소 해석법을 이용한 Propeller Singing 현상 규명에 관한 연구,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 957-962.
- 이현엽, 박재영, 1995, “임피던스헤드로 진동계측시 변환기의 부착영향을 보상하는 방법에 관한 연구,” 한국소음진동공학회지, 제 5권, 제 1호, pp. 153-159.
- 조중호, 김영기, 이창섭, 1994, “보오텍스 격자법에 의한 종진동 프로펠러의 부가질량 산정,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집 pp. 312-316.
- 한국선급, 1997, 선박 진동소음 제어지침, 한국선급



< 김 영 중 >



< 이 현 엽 >



< 노 인 식 >



< 이 창 섭 >