

전 선체 진동에 영향을 미치는 프로펠러 변동압력의 평가

이기문[†]*, 양성봉*, 김문수*

(주)한진중공업 기술연구소*

The Assessment of Propeller Induced Fluctuating Pressure Influencing Hull Girder Vibration Analysis

Ki Moon Lee[†]*, Sung Boong Yang* and Moon Su Kim*

Hanjin Heavy Industries & Construction Co., Ltd.*

Abstract

The propeller induced forces acting on a hull are surface forces and bearing forces. The bearing forces are the forces acting directly on the propeller which are transferred to the hull through the propeller bearings. The surface forces are those which act by fluid pressure directly on the various hull surfaces. Because the surface force is main source to oscillate stern constructions and deckhouse, the estimation of surface force is very important to predict response of forced vibration of that. The estimation methods were statistical analysis method, theoretical analysis method and method through model test.

※Keywords: Surface force(표면 전달력), Hull vibration(선체 진동), Propeller(프로펠러), Fluctuating pressure(변동압력), Exciting force(기진력), Model test(모형시험)

1. 서론

선박의 주요 기진원으로 주기관과 프로펠러를 들 수 있다. 선미 구조물과 거주구의 진동을 일으키는 가장 중요한 것은 프로펠러에 의한 기진력이다. 프로펠러에 의한 기진력은 전달경로에 따라 프로펠러 축 베어링을 통해 선체로 직접 전달되는 축전달력과 프로펠러 주위 유체를 통해서 변동압력의 형태로 선체 및 타 표면에 전달되는 표면 전달력으로 나눌 수 있다. 특히 선박의 고속 대형화

에 따라 프로펠러에 작용하는 하중이 증대되어 캐비테이션 현상을 피할 수 없을 뿐만 아니라, 최근 건조되는 대형 컨테이너선에서 저회전 대직경의 프로펠러를 주로 장착하게 되어 프로펠러와 선체 간 간격이 좁아지고 있다. 이로 인해 선체 표면 전달력은 더욱 커지게 되었다. 물론 프로펠러와 선체간격이 커지면 작아질 수 있지만, 추진효율을 고려하여 프로펠러를 설계하므로 변동 압력만을 고려하여 프로펠러 직경을 줄일 수도 없다. 따라서 변동압력을 줄이면서 추진효율을 높이는 방법을 찾아야 한다. 이를 위해 최근 건조되는 컨테이너선들은 고스쿠 대직경의 프로펠러를 장착하고

†교신저자: kmlee@hanjinsc.com, 010-5599-5560

있다. 또한 설계단계에서 선체 진동을 예측하고 저감하기 위해서는 선체 표면 전달력의 정확한 추정이 요구되며, 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 실선에서 변동압력을 계측하기 위해서는 선주의 허락 하에 선체에 구멍을 뚫고 센서를 설치해야 하므로, 계측을 통한 추정치의 정도를 비교하기가 어렵다. 그러나 보다 정도 높은 진동해석을 위해서는 기진력의 정확한 추정이 요구된다. 따라서 실선 계측을 통해서 추정치의 정도를 점검할 필요가 있다.

선미부의 과도진동 발생의 원인을 추정하고자 당사에서 건조한 두 척의 컨테이너선에 대해 실제 운항 조건에서 변동압력을 계측하였고, 이를 추정치와 비교 검토하였다.

2. 표면 전달 기진력 추정법

프로펠러로 인해 유기되는 선체 표면 전달력을 추정하기 위한 방법은 통계적 해석방법, 이론 계산에 의한 방법과 실험에 의한 방법이 있다.

2.1. 통계적 해석방법

통계자료에 의한 변동압력의 추정은 초기설계 단계에서 선체표면에 전달되는 기진력을 추정하기 위한 방법으로 Holden 등이 70 척 이상의 실선 시운전시 선미부에서 계측한 결과를 통계 처리한 것을 근거로 한 DnV(DnV, 1985)의 방법을 사용한다. DnV의 통계적 해석방법에 의한 변동압력은 다음과 같다.

-공동현상이 발생하는 경우

$$\Delta P_c = \frac{RPM^2 \cdot D^2}{160,000} \cdot \frac{V_s(W_{Tmax} - W_e)}{\sqrt{h_a + 10.4}} \left(\frac{1}{d/R} \right)^{\kappa_c}$$

-공동현상이 발생하지 않는 경우

$$\Delta P_o = \frac{(RPM \cdot D)^2}{70,000} \cdot \frac{1}{Z^{1.5}} \left(\frac{1}{d/R} \right)^{\kappa_o}$$

- 전 압력 진폭

$$\Delta P_z = \sqrt{\Delta P_c^2 + \Delta P_o^2}$$

전 선체 진동에 영향을 미치는 프로펠러 변동압력의 평가

여기서

RPM: 프로펠러 회전수

D: 프로펠러 직경

V_s : 선속(m/s)

h_a : 프로펠러 축의 침수 깊이(m)

r : 프로펠러 축 중심에서 날개단면까지의 반경(m)

d : r/R=0.9 위치에서 선체표면까지 간격

R : 프로펠러 반경(m)

κ_c : 1.7-0.7(d/R), d/R>1 이면 $\kappa_c=1$

W_{Tmax} : 최대반류

W_e : 유효반류

Z: 프로펠러 날개수

κ_o : 1.8+0.4(d/R) at d/R<2

2.6 at d/R>2

2.2. 선체-공동프로펠러 이론에 의한 해석법

선미반류 중에서 작동하고 있는 프로펠러가 날개 주위의 유동에 영향을 주고, 그 영향이 주위의 유체를 매개체로 하여 선체표면에 전달되면 선체표면에 변동유동을 일으키게 된다. 이 변동유동을 받아서 선체표면에서의 경계조건을 만족하도록 선체표면 경계치 문제를 해석하면 비정상 상태에서 선체표면에서의 유동현상, 변동압력 등을 알 수 있게 된다. 이로부터 선체에 전달된 기진력을 적분해 내는 방법이다. (이창섭 1992, 한재문 1996)

당사는 프로펠러 설계 프로그램인 PRODAS를 이용해 설계단계에 프로펠러 유기 선체 표면 변동압력을 추정하고 있다.

2.3. 모형시험

실험을 통한 변동압력 추정은 통상 캐비테이션 터널에서 반류 스크린을 이용해 재현된 반류 중에서 모형 프로펠러를 대상으로 평판에 작용하는 변동압력을 측정한다(이창섭 1985).

3. 변동압력 실선 계측

3.1. 대상선박의 주요 요약

대상 선박들에 대한 주요 요약은 Table 1 에 나타내고 있다.

Table 1 Particulars of test ship

General		
	Case 1	Case 2
L.O.A	Abt. 280 m	Abt. 300 m
Breadth	Abt. 40 m	Abt. 40 m
Draught(Design)	12.0 m	12.0 m
Main engine		
Type	Wartsila 10RTA96C	MAN B&W 12K98MCC
Power at NCR	49,410 kW at 96.5 rpm	68,520 kW at 100.0 rpm
Propeller		
Type	Fixed Pitch	Fixed Pitch
No. of blades	5	6
Diameter	-	-
Skew	-	-
Tip Clearance	0.260D	0.264D

3.2 계측 조건

인도 후 본 선의 실제 운항 중, AP Tank 가 비어있는 상태, 절반만 채운 상태 그리고 가득 채운 상태에서 축 회전수를 65 RPM 부터 MCR 까지 약 3~5 RPM 간격으로 변동압력 계측을 수행하였다.

3.3 계측 위치

변동압력을 계측하기 위해 AP Tank 의 우현쪽 외판에 구멍을 내고, 4 개의 압력센서들을 설치하였으며, 그 설치 위치와 외판의 두께는 Table 2 와 3 에서 나타낸 바와 같다.

Table 2 The positions of sensors to measure pressure (Case 1)

	Case 1		
Channel	Frame No.	Longi. No.	Plate Thickness
Ch01	7/8	L2/L3	30
Ch02	5/6	CL/L1	45
Ch03	3/4	L2/L3	30
Ch04	3	L4/L5	20

Table 3 The positions of sensors to measure pressure (Case 2)

	Case 2		
Channel	Frame No.	Longi. No.	Plate Thickness
Ch01	7/8	L2/L3	30
Ch02	5/6	CL/L1	45
Ch03	6/7	L2/L3	20
Ch04	3	L7/L8	20

3.4 계측 결과

계측된 변동압력은 프로펠러가 5 익인 Case 1 은 4 차 날개주파수 까지, 6 익인 Case 2 는 3 차 날개주파수 까지 각 주파수 별로 분석하였으며, 그 결과는 Fig.1~7 에 나타내었다.

계측된 모든 차수의 압력 크기는 회전수가 증가함에 따라 일정하게 증가하는 것을 보이며, 1 차 날개 주파수의 경우는 AP 탱크의 조건을 달리하더라도 변동압력에는 별 차이를 나타내지를 않았다. 그러나 2 차 날개주파수 이상에서는 AP 탱크의 하중 조건에 따라 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 고차로 갈수록 그 값이 낮아서 AP 탱크의 하중 조건이나 계측 위치의 영향을 구분할 수 없었다.

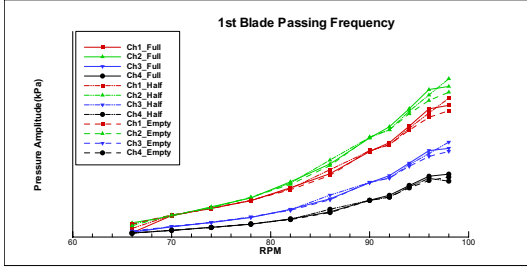


Fig. 1 Measured pressure at 1st blade passing frequency(Case 1)

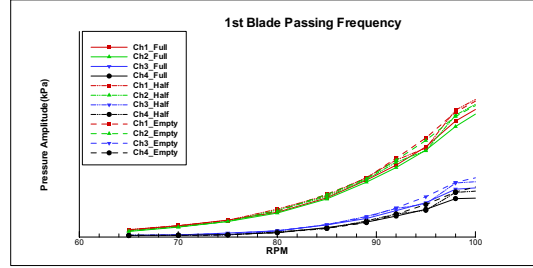


Fig. 5 Measured pressure at 1st blade passing frequency(Case 2)

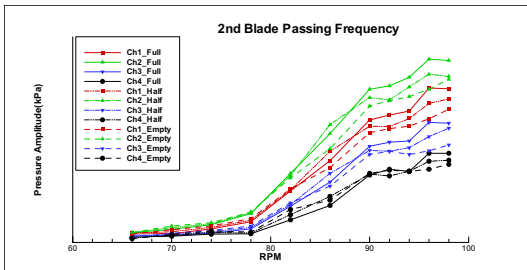


Fig. 2 Measured pressure at 2nd blade passing frequency(Case 1)

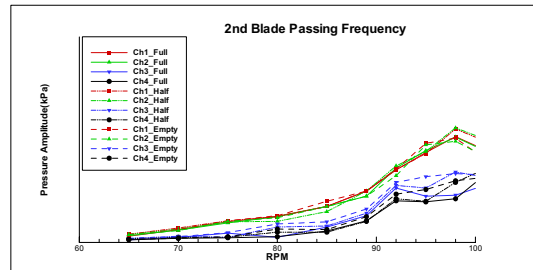


Fig. 6 Measured pressure at 2nd blade passing frequency(Case 2)

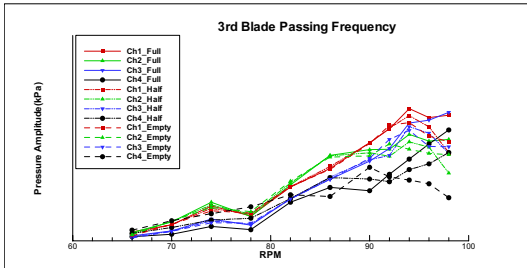


Fig. 3 Measured pressure at 3rd blade passing frequency(Case 1)

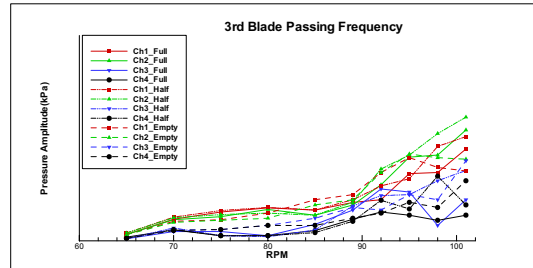


Fig. 7 Measured pressure at 3rd blade passing frequency(Case 2)

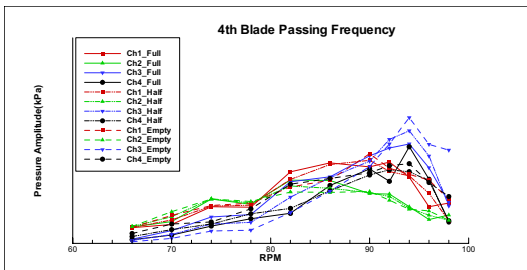


Fig. 4 Measured pressure at 4th blade passing frequency(Case 1)

4. 추정치와 실선 계측 결과의 비교

이론적 해석법과 모형시험을 통한 추정치를 실선 계측치와 비교한 결과를 Fig. 8~9 에 나타내었다.

4.1 이론적 해석결과와 계측결과와의 비교

계측결과와 이론적 계산방법에 의한 추정치를 Table 4 에서 비교하였으며, 이 비교 결과에 의하

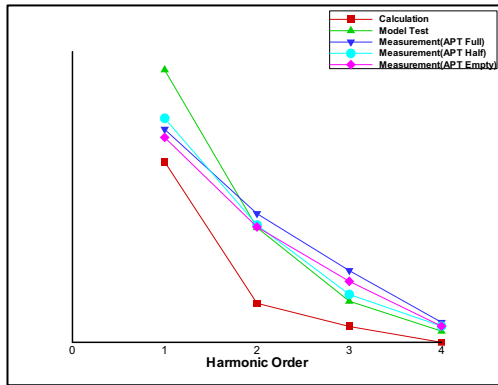


Fig. 8 The maximum pressure amplitude at MCR (Case 1)

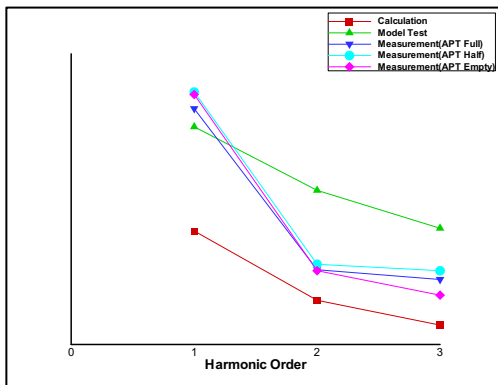


Fig. 9 The maximum pressure amplitude at MCR (Case 2)

Table 4 The deviation of pressure between measurement and numerical calculation (Measurement/Calculation)

	Harmonic Order	APT Full	APT Half	APT Empty
Case 1	1st	1.180	1.241	1.135
	2nd	3.289	2.999	2.947
	3rd	4.507	3.011	3.832
	4th	6.900	5.600	5.600
Case 2	1st	2.079	2.226	2.204
	2nd	1.694	1.817	1.669
	3rd	3.346	3.794	2.542

면 날개주파수 1 차에서 Case 1 은 약 0.1 배, Case 2 는 약 1.2 배 정도 계산 치보다 계측 치가 크게 나오는 경향을 보이고 있으며, 2 차 이상에서는 계측결과와 계산결과 간 오차가 매우 크게 나타나므로 계산 결과를 신뢰할 수 없다.

4.2 모형시험과 계측결과의 비교

계측결과와 모형시험에 의한 추정치를 Table 5 과 Fig.8~9 에서 비교하였으며, 이 결과에 의하면 날개주파수 1 차에서 Case 1 은 모형시험 결과가 크게, case 2 는 계측 치가 크게 나오는 경향을 보이고, 2 차 이상에서는 반대로 Case 1 에서는 계측 치가 Case 2 에서는 모형시험 결과치가 크게 나오는 것을 보인다.

Table 5 The deviation of pressure between measurement and numerical calculation (Measurement/Motel Test)

	Harmonic Order	APT Full	APT Half	APT Empty
Case 1	1st	0.782	0.822	0.752
	2nd	1.122	1.023	1.006
	3rd	1.746	1.166	1.484
	4th	1.792	1.455	1.455
Case 2	1st	1.083	1.160	1.148
	2nd	0.485	0.521	0.478
	3rd	0.559	0.634	0.425

5. 결론

1) 이론적 방법에 의한 변동압력의 추정 결과가 실선 계측 결과와 너무 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 특히 2 차 이상의 변동압력은 거의 계산이 되지 않는다고 보아야 될 정도이다. 이것이 모델링 방법 때문인지 프로그램의 한계인지는 알 수

없지만, 향후 설계단계에서 이론적 해석에 의한 추정결과를 그대로 이용하기 위해서는 실제 상황을 보다 더 잘 반영할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

2) 통상 선체 진동해석에는 Solid boundary factor 를 적용해 모형시험 결과의 80%치를 사용하고 있다. 하지만 이번 계측결과와의 비교에서 알 수 있듯이 어떤 일관된 경향을 나타내지 않기 때문에 이를 그대로 적용하는 것은 무리가 있다.

3) 모형시험에 의한 변동압력의 추정 정도를 높이기 위해서는 보다 많은 실선 계측을 통해 계측 자료를 확보하고 이를 통해 보정치를 구해야 할 것이다.

현재까지 개발된 많은 이론적 방법들과 모형시험을 통해 설계단계에서 변동압력을 추정하고 이를 강제진동해석에 이용해 왔다. 그러나 이들 방법들에 포함된 많은 가정들로 인해 실제와 많은 차이를 보인다. 따라서 전 선체 진동 해석을 통해 거주구 및 선미 구조물의 진동응답 수준을 예측하기 위해서는 주요 기진력인 선미 표면 변동압력의 정확한 추정이 요구된다.

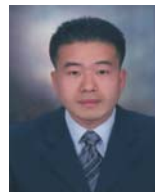
이를 위해서 많은 실선 계측 데이터를 수집하여 모형시험과 이론적 방법의 정도를 향상 시켜야 한다. 그러나 프로펠러 유기 변동압력을 계측을 위해서는 선미 외판에 구멍을 뚫어야 하기 때문에 선주들을 설득하는 것이 쉽지 않다. 하지만 이러한 시도는 정확한 진동 수준 예측을 위해서 반드시 해야 하는 과정이므로 보다 쉽고 안전한 방법을 찾아야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 이창섭, 이진태, 서정천, 김영기, 1992, “ 프로펠러에 의해유기된 선체표면 기진력 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 29 권, 제 1 호, pp. 81-92.
- 이창섭, 김기섭, 서정천, 최종수, 1985, “ 프로펠러에 의한 선체표면 변동압력의 추정(제 1 보: 실험적연구),” 대한조선학회 논문집, 제 22 권, 제 2 호, pp. 12-26.
- 한국선급, 1997, 선박진동소음제어지침.
- 한재문, 이창섭, 1996, “ 프로펠러 캐비테이션에 의해 유기된 변동압력 계산,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 434-437.
- DnV, 1985, Vibration Control in Ships.



< 이 기 문 >



< 양 성 봉 >



< 김 문 수 >