

## 캐비티가 발생한 프로펠러의 변동압력 추정을 위한 실험적 연구

김기섭\*, 문일성\*, 김경열\*, 송인행\*, 이진태\*

An experimental study for prediction of the fluctuating pressure  
 induced by a cavitating propeller

by

K.S. Kim\*, I.S. Moon\*, K.Y. Kim\*, I.H. Song\* and J.T. Lee\*

### 요 약

캐비테이션 터널에서 캐비티가 발생한 프로펠러에 의하여 평판에 작용하는 변동압력이 계측 정도를 향상시키고, 프로펠러 회전수 영향을 최소화 하였다. Sydney Express선의 프로펠러 변동압력에 대한 타기관 계측치 특성과 비교한 결과 당 연구소 계측치는 매우 안정적 경향을 보였다. 그리고 모형선과 실선의 변동압력 계측치 및 평판에 작용하는 변동압력 계측치의 크기와 경향을 비교한다. 평판의 변동압력 계측치로부터 실선 변동압력을 추정코자 양력면 이론에 의한 수치계산에 의해 도출된 강제경계율을 적용하여 타당성을 확인하였다.

### Abstract

The influence of propeller revolution on measurement of fluctuating pressure is almost minimized in the KRISO cavitation tunnel and the measurement accuracy of fluctuating pressure acting on a flat plate due to a cavitating propeller is improved. The measurement data for Sydney Express propeller is compared with the measurement results of other research institutes leading to the conclusion that KRISO data is so stable and reasonable. The fluctuating pressure data measured on a model ship and the prototype ship is compared with the data measured on the flat plate.

---

접수일자 : 1998년 12월 14일, 재접수일자 : 1999년 2월 9일

\*정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

The solid boundary factor, derived from a calculation based on a lifting surface theory, is applied to predict full scale pressure level from the experimental data on the flat plate, showing quite reasonable agreement with full scale data.

## 1. 서 언

최근 컨테이너선들의 대형화·고속화로 프로펠러의 하중이 증대함에 따라 캐비테이션 발생량 증가 등으로 선체표면 변동압력 추정이 매우 중요하게 되었으며 변동압력 추정의 정도 향상이 요구되고 있다. 캐비테이션이 발생하는 프로펠러에 의한 변동압력 모형시험은 반류재현 방법과 변동압력 계측면의 형상에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다.

첫 번째 방법은 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법으로 평판을 계측면으로 하고, 반류는 와이어 메쉬를 이용하여 축방향 반류를 재현하는 것이다. 두 번째는 완전한 모형선을 터널 관측부에 넣고 3차원 반류를 재현하고 선체표면에서 변동압력을 계측하는 방법이다. 세 번째는 선미형상만 완전한 모형을 사용하며 와이어 메쉬등을 부착하여 반류를 재현하고 선체표면에서 변동압력을 계측하는 방법이며, 네 번째는 임의의 기준모형(dummy model)에 부가물 등을 붙여 반류를 재현하는 방법이다. 그러나 캐비테이션 터널과 시험 장치에 따라서 일정한 프로펠러 하중과 캐비테이션 수를 유지하더라도 프로펠러 회전수 변화에 대하여 변동압력 계측값이 크게 다르며, 기관별로 그 특성에도 많은 차이가 있음이 알려져 있다[1]. 이것은 각 기관별로 터널의 동적응답(dynamic tunnel response) 특성과 변동압력 계측장치 자체의 동적특성의 차이에 기인하는 것으로 추정된다[1, 2]. 따라서 방법에 따라 터널 자체와 계측장치의 특성을 잘 파악하고 사용해야 한다. 본 연구는 첫 번째 방법[3]에 대한 것으로, 변동압력 특성과 계측장치 및 터널의 동적 특성을 고려하여 계측 성능 향상을 꾀하고 타 연구기관의 계측결과와 비교한 것을 주 내용으로 하고 있다.

본 연구는 타 기관에서 컨테이너선에 대하여 발표된 모형선 변동압력 실험치와 당 연구소에서 수행한 평판 계측치와 비교하여 신뢰성을 검토한다. 또한 실선계측치와 평판 계측치를 비교하고 평판에서 계측한 변동압력으로부터 실선의 변동압력 추정방법을 검토한다. 변동압력 계측면의 크기와 곡률을 고려하여 수치계산으로 도출된 강체경계율(solid boundary factor)을 적용하여 타당성을 살펴보기로 한다.

## 2. 평판계측 변동압력 특성

캐비테이션 터널에서 프로펠러 캐비테이션에 의해 발생하는 변동압력을 계측할 때 사용되는 반류는 예인수조에서 계측된 모형선 3차원 호칭반류(nominal wake)중에 축방향 반류(axial wake)만을 와이어 메쉬(wire mesh)로 재현한다. 변동압력 계측장치는 평판의 표면에 변동압력 센서를 심고 변동압력판은 지지대에 연결되어 터널본체에 설치된다 (Fig.1).

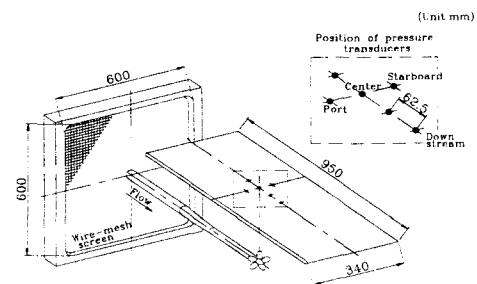


Fig.1 Location of the measuring points for fluctuating pressure measurements

터널의 동적응답 특성과 계측장치의 동적특성 파악을 통한 종합적 해석은 어려운 일이다. 따라

서 비교적 쉬운 방법은 프로펠러의 하중과 캐비테이션 수를 유지하며 프로펠러 속도와 회전수를 변화시키면서 변동압력 특성을 살펴보는 것이다.

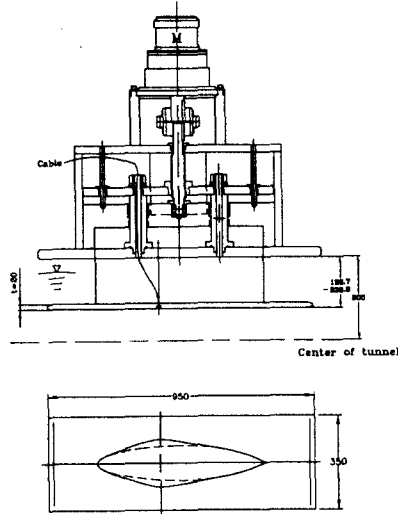


Fig. 2 New system measuring a pressure fluctuation

본 연구에서는 KRISO의 변동압력 계측장치를 Fig. 2에 보는 바와 같이 개선하여 설계·제작하였고[4] 타 연구기관의 계측치와 특성을 비교하였다. 실험대상은 "Sydney Express"선의 프로펠러(KP272)이고 실험조건들(프로펠러, 추정된 유효반류분포,  $KT=0.184$ ,  $\sigma_n=1.826$ , 날개끝 간격등)은 비교 대상 기관과 동일하게 하였다.

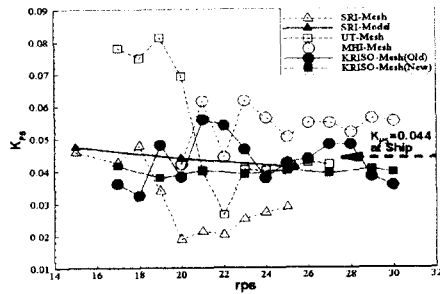


Fig. 3 Influence of propeller rps on pressure fluctuation amplitude at the first blade frequency

이때 기관별 관찰된 캐비테이션 발생량은 Fig. 4에서 보는바와 같으며, 비교적 좋은 상관관계를 보여준다.

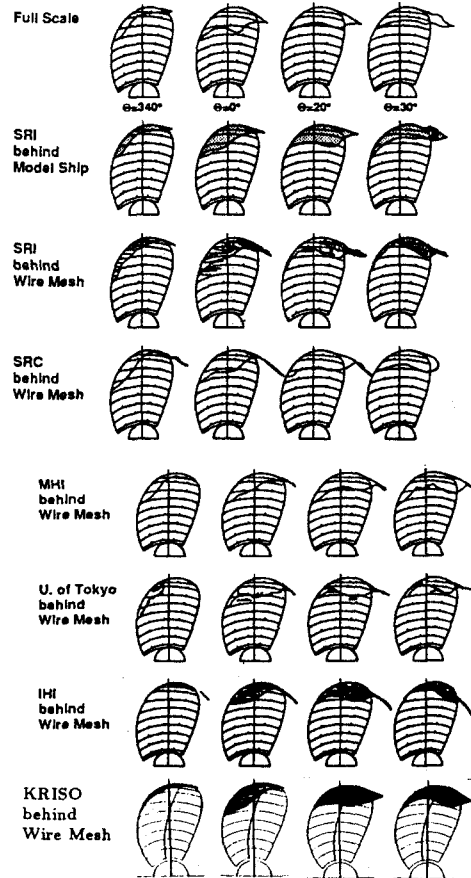


Fig. 4 Cavitation patterns of KP272 on the roughened blade surface in non-uniform flow at several facilities

계측결과는 Fig. 3 같이 새로이 제작한 계측장치에서는 프로펠러 회전수에 따라 더욱 안정적인 값을 보여주며 모형선을 사용한 SRI와 유사한 값을 주고 있다. 반면에 와이어 메쉬를 사용한 경우를 살펴보면 동경대(UT) 경우는 22rpm 이하에서, 미쓰비시 중공업(MHI)은 25rpm 이하에서, 일본 선박연구소(SRI)는 낮은 회전수에서 변동폭이 크며

평균 계측치도 큰 차이를 보인다. 따라서 개선된 변동압력 계측장치는 프로펠러 회전수등에 크게 영향을 거의 받지 않고 매우 안정적인 계측치를 나타내고 있음을 관찰할 수 있다.

3. 평판, 모형선 및 실선 변동 압력

평판에 작용하는 변동압력 계측은 관측부 단면적이 작은 캐비테이션 터널에서 주로 사용되는 방법이며, 모형선 사용은 비교적 단면적이 큰 터널에서 이루어진다. 각각의 방법은 장단점을 갖고 있으며, 전자의 경우는 단 시간내에 설치가 가능하고 제작 경비면에서도 매우 유리한 반면에 횡방향 반류재현이 어려운 단점이 있다. 후자의 경우는 횡방향 반류를 고려 할 수 있으며 터널에 따라서는 선미유동장 전체 조절을 위하여 유동 조절장치(flow liner)등을 설치하여야 한다[1]. 그리고 압력센서 부착 및 모형선 설치에 많은 시간과 경비가 소요된다.

관측부의 벽(wall) 존재로 인하여 캐비테이션 체적에 변화를 주어 변동압력에 미치는 영향은 관측부 단면적에 비하여 모형 프로펠러 크기가 과다하지 않을 경우에는 적다[7]. 따라서 본 연구에서는 터널 관측부 크기가 변동압력에 미치는 영향을 고려하지 않고, 모형선 변동압력 계측치와 KRISO 터널의 변동압력 계측치를 비교한다. 대상선은 3600TEU급 컨테이너선으로 실험조건은 서로 동일하게 MCR에서  $KT=0.197$ ,  $\sigma n0.7R=1.411$ , 날개 끝 간격/직경=0.33 이다. 모형프로펠러는 KP420이고 날개수는 5개이다. 모형선 변동압력 계측은[8] HSVA에서 이루어졌다 (Fig. 5).

center에서 1차 조화함수의 크기는 모형선 계측치가 평균 계측치에 대하여 약 80%정도에 해당하고 전반적인 분포가 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 따라서 강체 경계율을 고려하면 평균 계측치로부터 모형선 계측치를 어느정도는 예측할 수 있으리라 생각된다.

실선 변동압력 계측은[9] 4000TEU급 컨테이너선에 대한 것이며, 캐비테이션 터널에서 평판에 작용하는 변동압력 계측치와 비교한다. 모형프로

펠러는 KP420이고 실험조건은 100% MCR에서  $KT=0.192$ ,  $\sigma n0.7R=1.4769$ 이며, 날개 끝 간격/직경=0.33 이다.

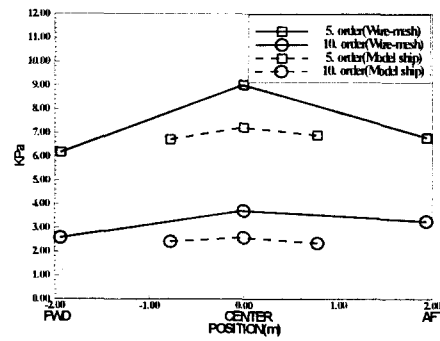
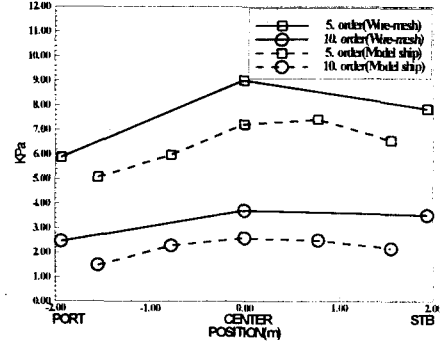


Fig.5 Comparison of the fluctuating pressures on flat plate with those on model ship

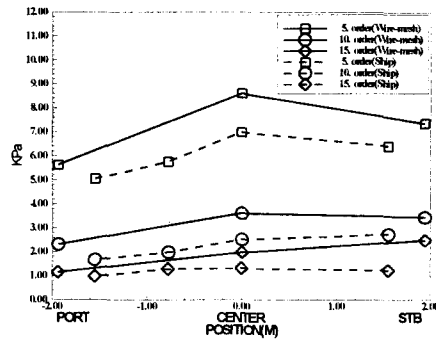


Fig.6 Comparison of the fluctuating pressures on flat plate with full scale data

비교는 Fig. 6에서와 같이 전반적으로 좋은 경향을 보여주고 있으며 Center에서 1차 조화함수 크기는 실선 계측치가 터널에서 평판 계측치의 약 82% 정도에 해당한다.

4. 실선 변동압력 추정

대형 캐비테이션 터널에서 모형선 변동압력 계측치는 실선 변동압력 계측치와 일반적으로 좋은 경향을 보여주고 있다. 소형 터널에서 평판에 작용하는 변동압력 계측치로부터 실선 변동압력 추정을 위하여 도출된 강제경계율[10]을 적용하여 앞장에서 비교한 실험치 결과를 해석해 본다. 본 실험에 사용된 유한 평판의 경우 강제 경계율 (solid boundary factor)은 다음과 같다.

$$(S.B.F)_{Plate} = \frac{(P)_{Plate}}{(P)_{F.S}}$$

(P)<sub>Plate</sub> : pressure on plate  
 (P)<sub>F.S</sub> : pressure at free space

프로펠러 위로 무한 평판이 있다면 (S.B.F.)<sub>plate</sub> 는 2.0 이지만 실험시에 사용한 유한평판의 경우는 Xforship 프로그램[5]으로 수치 해석결과 Table 1에서 보는 바와 같이 약 1.89 정도이다. 수치계산에 사용된 Xforship 프로그램은 양력면 이론에 의해 캐비테이션을 계산하고 계측 표면은 양력판으로 이산화한다. 선체표면 형상을 고려하기 위하여 모형선 계측 3차원 반류를 사용하고 선체표면을 이산화하여 양력판 이론 경계치 문제를 수치 해석한다.

계산된 (S.B.F)<sub>Hull</sub> = (P)<sub>Hull</sub> / (P)<sub>F.S</sub> 는 Table 1에서 보는 바와 같이 1.2 ~ 1.6에 해당한다. 따라서 평판에 작용하는 변동압력치로부터 실선계측은 다음과 같이 이루어진다.

$$(Exp. Value)_{Hull} = (Exp. Value)_{Plate} * (S.B.F)_{H.P}$$

여기서, (Exp. Value)<sub>Plate</sub>는 KRISO 터널에서 계측한 평판의 변동압력 값이고, (S.B.F)<sub>HP</sub> = (S.B.F)<sub>Hull</sub> / (S.B.F)<sub>Plate</sub>이다. 1차 조화함수 크기를 볼 때 모형선 계측치가 평판 계측치의 약 80%에 해당하고 실선 계측치와 평판 계측치도 약 82%에 해당하는 것을 알수 있다. 이것은 선형과

프로펠러에 따라 약간의 차이는 있으나 Table 1에서 보는 (S.B.F)<sub>H.P</sub> 범위에 해당함을 알 수 있다. 따라서 이와 같이 평판의 변동압력 계측으로부터 실선 변동압력 추정이 매우 타당성 있음을 얘기할 수 있다.

Table 1 Calculated solid boundary factors (S.B.F.) for various propellers

Prop.	(S.B.F) <sub>Plate</sub>	(S.B.F) <sub>Hull</sub>	(S.B.F) <sub>HP</sub>
A1	1.890	1.350	0.714
A2	1.890	1.350	0.714
A3	1.890	1.350	0.714
B	1.887	1.217	0.645
E1	1.892	1.521	0.804
E2	1.892	1.512	0.800
E3	1.891	1.514	0.800

5. 결 언

KRISO의 캐비테이션 터널 특성을 고려한 변동압력 계측장치가 안정적인 계측치를 보여주고 있다. 터널 실험치가 모형선 및 실선 변동압력 계측치와 매우 유사한 경향을 보여주고 있으며 제시된 강제경계율을 적용하면 실선 변동압력 추정에 활용할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] "Report of the cavitation committee", 19th International Towing Tank Conference, Proceedings Vol.1, 1990.  
 [2] "Report of the cavitation committee", 18th International Towing Tank Conference, Proceedings Vol.1, 1987.  
 [3] 이창섭, 김기섭, 서정천, 최중수, "프로펠러에 의한 선체표면 변동압력 추정", 대한조선학회지 제 22권 제2호, 1985. 6.  
 [4] 김경열 외, "캐비테이션 터널에서 변동압력 계측

- 및 실선성능 예측정도 향상연구”, 한국기계연구원 보고서 UCK032-2052·D, 1997. 7.
- [5] 김영기, 이창섭, “프로펠러에 의해 유기된 선체 표면 기진력 해석”, 대한조선학회 논문집 29권, 1992. 3.
- [6] Lee, C.-S., “Prediction of the Transient Cavitation on Marine Propellers by Numerical Lifting-Surface Theory”. Proceedings of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, Japan, Oct. 1980.
- [7] Huse, E. “Effect of tunnel walls upon propeller-induced pressures in cavitation tunnel”, Conference on Cavitation, Edinburgh, Scotland, 1974
- [8] 류민철, 황운식, 김용수, 배영수, “프로펠러 캐비테이션 및 선체 변동압력계산”, 대한조선학회 춘계연구발표회, 1996
- [9] 유영복, 서형균, 김덕준, “Design Draft에서의 Container선 시운전”, 대한조선학회 춘계연구발표회, 1996
- [10] 김문찬, 김기섭, 송인행, “선체변동압력에 관한 실험과 이론의 비교연구”, 대한조선학회 논문집 제33권 제1호, 1996