

근접장 효과를 고려한 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동압력에 관한 연구

설한신^{†*}, 문일성^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Pressure Fluctuation Induced by Propeller Sheet Cavitation with Consideration of the Near Field Effect

Hanshin Seol^{†*} and Il-Sung Moon^{*}

Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/ KORDI^{*}

Abstract

A theoretical study on the pressure fluctuation induced by a propeller was carried out in this study. The main objective of this study is to analyze the source mechanism of the pressure fluctuation induced by propeller sheet cavitation. To analyze the pressure fluctuation induced by propeller sheet cavitation, modern acoustic theory was applied. Governing equation of pressure fluctuation induced by sheet cavitation was derived using Ffowcs Williams proposed time domain acoustic approaches. Several factors affecting pressure fluctuation were analyzed based on the derived governing equation. Pressure fluctuation result was represented by combined results of the far field term and near field term. Finally, the physical mechanism of pressure fluctuation at the blade rate frequency was analyzed using numerically generated cavitation volume variation.

※Keywords: Pressure fluctuation(변동 압력), Sheet cavitation(얇은 층 공동), Time domain analysis(시간 영역 해석), Near field effect(근접장 효과), Propeller(추진기)

1. 서론

최근 벌크선, 컨테이너, 여객선등 선박의 대형화와 고속화가 이루어짐에 따라 추진기에 작용하는 하중이 점차 커져 추진기 캐비테이션 양이 증가하는 추세이다. 또한 추진기의 높은 추진 효율

이 요구되어 직경이 커진 추진기가 등장하고 있어 추진기와 선체(hull)와의 간격(tip clearance)은 커지지 못하고 있다. 증가하는 캐비테이션과 선체와 추진기의 짧은 거리로 인해 추진기 캐비테이션에 의해 야기되는 변동압력에 대한 문제가 많이 야기되고 있다.

추진기에 의한 선체 변동 압력을 야기하는 요인으로는 날개 하중(loading) 변화, 날개 두께(thickness)의 움직임 그리고 체적의 변화를 일으키며 움직이는 캐비테이션 현상이 있다. 날개 하중 변화 및 날개 두께의 운동에 의한 변동 압력은 그 크기가 추진기 캐비테이션에 의해 야기되는 변동 압력에 비해 매우 작으므로 일반적인 선박의 경우 캐비테이션에 의한 변동압력이 지배적이라고 할 수 있다. 최근에는 이러한 추진기 캐비테이션에 의한 변동 압력을 줄이고 추진 효율을 높이기 위하여 고스쿠 추진기, 날개 끝단부의 하중 감소에 관한 연구와 추진기 개발되고 있다. 이러한 설계 경향은 캐비테이션 부피 변화에 따른 상(phase)를 조절하여 변동 압력을 줄이는데 많은 기여를 하고 있으나 종종 고차의 변동 압력이 커지는 부작용이 나타나고 있다(ITTC 2002).

이와 같이 추진기 캐비테이션의 증가와 선체, 추진기 간격의 제약, 고차(high order) 변동압력의 크기 증가는 선체 진동과 반복 되는 하중에 의한 피로 파괴가 이루어 질 수 있기에 설계 단계에서 이를 예측, 제어할 수 있는 기법이 요구되고 있다(Lee et al. 1992).

이에 관한 연구가 국내외 적으로 많이 진행이 되어 왔다. 포텐셜을 기반으로 한 경계치 문제를 해석하여 선체 표면에서의 유기되는 포텐셜을 구하여 변동 압력을 수치적으로 예측하는 연구가 80년대 후반부터 발표 되고 있다. 90년대 후반에는 MOERI 등 연구기관과 조선소에서 수치 예측과 모형 시험, 모형 시험과 실선 성능 예측, 실선 계측과의 상관 관계에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 국외에서도 ITTC를 중심으로 이에 관한 연구가 많이 발표되고 있다(Lee et al. 1992, Kim et al. 1996, ITTC 2002).

앞선 선행 연구에서 보듯 추진기에 의한 변동압력 예측은 실험적 방법과 이론적 접근에 의한 방

법이 있다. 두 가지 방법 모두 이에 대한 완전한 접근이 어렵다. 이는 이론에 기반한 수치적 접근은 복잡한 캐비테이션 현상을 정확히 모사하기 어렵고 캐비테이션 터널에서의 모형 실험은 관측부(test section)의 크기(blockage effect), 반류 재현법, 레이놀즈(Re) 수에 계측값이 영향을 받기 때문에 실선과의 상관관계에 관한 연구가 먼저 선행되어야 한다. 마지막으로 실선 계측 실험은 선미에 구멍을 뚫어야 하는 굉장히 큰 단점이 있고 선박이 완성단계에서 결과를 얻을 수 있어 개선의 여지가 작다. 그리고 선체 변동 압력이 발생, 전달되는 메커니즘을 물리적으로 파악하기 어렵다는 단점이 있다. 그러므로 이와 같은 이론적, 실험적 방법이 서로 보완하여야만 높은 정도의 예측 결과를 얻을 수 있다.

본 연구는 이론적, 수학적 접근을 통해 추진기에서 발생하는 캐비테이션과 변동압력에 대한 물리적인 의미를 찾고자 하였다. 이러한 물리 현상에 기반을 둔 정교한 예측 기법을 구현한다면 기존의 연구 보다 조금 더 정확한 예측값을 얻을 수 있을 것이라는 판단 하에 본 연구가 시작되었다.

선체 변동압력에 영향을 주는 추진기 캐비테이션은 얇은 총 캐비테이션, 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 및 버블 캐비테이션 등 여러 요인이 있다. 일반적으로 선체 변동 압력은 날개 주파수(blade rate frequency)에서 이산(discrete) 형태의 압력 피크 (pressure peak)값이 계측되며 이는 비정상 얇은 총 캐비테이션에 기인되는 것이라고 알려져 있다.

추진기 얇은 총 캐비테이션에 의한 변동압력을 예측하기 위하여 시간영역에서의 Ffowcs Williams 가 제안한 음향 모델링 기법을 응용하여 적용하였다. 기존의 변동 압력 예측 기법들은 포텐셜을 기반으로 한 경계치 문제를 푸는 방식으로 해석이 되어 결과식이 직관적으로 이해하기 어렵고 계측 지점에 대한 얇은 총 캐비테이션의 상대적 운동과 근접장 효과, 지연 시간(retarded time) 등을 나타내는데 어려움이 있다(Kinns and Bloor 2004, Lee et al. 1992). 이에 반해 시간 영역 음향 기법의 응용해 유도되어진 결과식은 물리적으로 이해가 쉽고 얇은 총 캐비테이션의 운동과 근접장 효

과, 지연 시간등 여러 물리 현상들을 표현 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 추진기 캐비테이션에 의해 유기되는 압력은 식 (1)과 같이 캐비테이션 체적의 이차 시간변화율에 비례하며 캐비테이션과의 거리에 반비례 한다고 알려져 있다.

$$p'(r,t) = \frac{\rho_0 \ddot{Q}(t-r/c)}{4\pi r} = \frac{\rho_0 (R^2 \ddot{R} + 2R\dot{R}^2)}{r} \quad (1)$$

하지만 식 (1)은 변동 압력 생성원이 정지해 있고, 생성원에서 먼거리, 즉 원지장($r \gg R$) 인 경우에만 유효하다. 즉 회전하는 추진기와 선체까지의 간격은 얇은 층 캐비테이션에 의해 발생하는 압력파의 파장에 비하여 매우 가까워 얇은 층 캐비테이션의 운동과 근접장 효과(near field effect)에 따라 변동 압력이 많은 영향을 받을 수 있어 식(1)을 적용 할 수 없다. 하지만 이러한 근접한 위치에서의 변동 압력 생성원의 운동에 의한 효과와 근접장항에 대하여 고찰한 연구 자료 및 문헌은 찾아보기 어려웠다.

그러므로 본 연구에서는 변동 압력에 가장 지배적인 영향을 미치는 추진기 얇은 층 캐비테이션의 거동에 따른 변동압력의 대하여 음향이론을 적용, 얇은 층 캐비테이션의 회전 운동에 의한 생성항 운동 효과와 근접장 효과를 고려한 이론적, 물리적 접근을 시도하였다. 이러한 방식으로 유도되어진 결과는 향후 선체 변동압력에 관한 연구에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 지배 방정식의 유도 및 고찰

앞서 언급한 바와 같이 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의한 변동 압력은 캐비테이션 체적의 시간 변화율에 밀접한 관계가 있으며 변동압력의 정교한 예측을 위해서는 얇은 층 캐비테이션의 운동과 근접장 효과를 모두 고려하여야 한다. 이러한 여러 현상을 고려하기 위하여 음향학 분야에 주로

쓰이고 있는 Ffowcs Williams에 의해 유도되어진 식을 응용, 이를 추진기 얇은 층 캐비테이션에 적용하여 지배방정식을 유도하였다. 얇은 층 캐비테이션의 체적 변화에 의하여 생성되는 변동압력은 얇은 층 캐비테이션의 체적 변화로 인한 질량 가속효과에 비례하므로 식(2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$p'(\vec{x},t) = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{1}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 \dot{Q}(\tau^*)] \quad (2)$$

여기서 p' 은 변동 압력, ρ_0 와 c_0 는 각각 교란되지 않은 유체의 밀도와 음속을 나타낸다. Q 는 얇은 층 캐비테이션의 체적이며 이의 일차 변화율과 이차 변화율을 각각 \dot{Q}, \ddot{Q} 로 나타내었다. 또한 파동 방정식의 Green 함수와 변동 압력 생성항과 관측지점과의 관계에서 식(3)과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$g(\tau^*) = \tau^* - t + \frac{r}{c_0} \quad (3) \\ r = c_0(t - \tau^*) = |\vec{x} - \vec{x}_s|$$

τ^*, t 는 각각 생성항 시간과 관측점 시간이며 \vec{x}, \vec{x}_s 는 관측점과 생성원의 위치를 의미한다. 임의의 세기(strength)가 $q(\vec{x}_s, t)$ 인 변동 압력 생성원에 의한 변동 압력장은 식(4) 와 같다.

$$p'(\vec{x},t) = \int \frac{q(\vec{x}_s, \tau^*)}{4\pi |\vec{x} - \vec{x}_s|} d^3y \quad (4)$$

만약 얇은 층 캐비테이션이 운동하지 않고 정지한 상태에서 체적이 변화하고 관측지점이 생성원에서 아주 멀리 떨어져 있다면 파동 방정식의 그린 함수 정리에 의하여 식(2)의 해는 결과식 (4)와 유사한 형태인 식(1)과 같이 구해진다.

하지만 얇은 층 캐비테이션은 체적이 변화하면서 블레이드와 함께 회전운동을 하고 있기

때문에 생성원을 관측점 위치에서 상대 속도를 고려하여 표현하면 식 (5)와 같은 해가 구해진다.

$$p'(\vec{x}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*)}{4\pi r(1-M_r)} \right] \quad (5)$$

또한 식 (3)에서 아래 식(6)와 같은 관계식을 구할 수 있으며

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial t} = \frac{1}{1-M_r} \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial t} \right|_{\vec{x}} = \left(\frac{1}{1-M_r} \frac{\partial}{\partial \tau^*} \right) \Big|_{x|_{ret}}$$

최종적으로 얇은 층 캐비테이션에 의해 야기 되는 변동압력은 식(7)과 같이 유도된다.

$$4\pi p'(\vec{x}, t) = \frac{1}{1-M_r} \frac{\partial}{\partial \tau^*} \left\{ \frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*)}{r(1-M_r)} \right\} \quad (7)$$

여기서, 아래와 같이 몇 가지 물리현상에 대한 관계식들을 도입한다. 거리를 생성원 시간(source time)에 대하여 미분하면 상대 속도(v_r)가 구해진다. 관측점에서 보았을 때 거리가 멀어지면 상대 속도가 작아지므로 거리의 생성원 시간(source time)에 대한 미분은 식(8)과 같은 음의 부호를 가지게 된다.

$$\frac{\partial r}{\partial \tau^*} = -v_r \quad (8)$$

상대 마하수(relative mach number) M_r 은 생성원에서 관측점 방향으로의 마하수를 의미하며 이는 $M_r = \vec{v} \cdot \vec{r} / c_0$ 로 나타낼 수 있다. 또한 식(7)의 생성시간(source time)에 대한 미분을 풀기 위하여 아래와 같은 관계식 식(9)와 식(10)을 사용하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau^*} \left(\frac{\dot{Q}(\tau^*)}{r} \right) &= \frac{\frac{\partial \dot{Q}(\tau^*)}{\partial \tau^*} r - \dot{Q}(\tau^*) \frac{\partial r}{\partial \tau^*}}{r^2} \quad (9) \\ &= \frac{\ddot{Q}(\tau^*) r + \dot{Q}(\tau^*) v_r}{r^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial M_r}{\partial \tau^*} = \frac{1}{c_0 r} \left(r_i \frac{\partial v_i}{\partial \tau^*} + v_r^2 - v^2 \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \hat{r}_i}{\partial \tau^*} = \frac{\hat{r}_i v_r - v_i}{r}$$

식 (7)은 최종적으로 아래와 같은 식(11)의 형태로 전개되어 진다.

$$\begin{aligned} 4\pi p'(\vec{x}, t) &= \frac{\rho_0 \ddot{Q}(\tau^*)}{r(1-M_r)^2} \quad (11) \\ &+ \frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*) \hat{M}_i \hat{r}_i}{r(1-M_r)^3} \\ &+ \frac{\rho_0 \dot{Q}(\tau^*) c_0 (M_r - M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \end{aligned}$$

식 (11)의 첫 번째 항은 일반적으로 알려진 식 (1)의 형태에 생성원의 움직임으로 나타나는 $(1-M_r)^{-1}$ 이 곱해 졌음을 볼 수 있다. 변동압력 생성원이 정지해 있지 않고 운동하고 있을 때는 결과 식 (11)과 같이 여러 항들이 변동 압력에 영향을 미치고 있음을 볼 수 있다. 식(11)은 임의의 위치 \vec{x} 에서 관측점 시각 t 에서의 변동압력을 의미하며 이는 변동압력 생성원이 \vec{x}_s 위치에서 생성시각 τ^* 에서 생성된 변동 압력이 전파된 것이다. 각 항에서 $(1-M_r)^{-1}$ 은 변동 압력 생성원 즉 얇은 층 캐비테이션이 블레이드를 따라 움직일 때, 관측점에서 같은 거리에 있을 경우라도 관측점으로 다가오는 경우 ($M_r > 0$)가 관측점에서 멀어지는 경우 ($M_r < 0$)보다 더 압력 섭동이 더 강렬함

을 알 수 있으며 식(11)의 앞의 두 항은 $1/r$ 에 비례하는 원지장항(far field term)이며 마지막 항은 $1/r^2$ 에 비례하는 근접장항 (near field term)임 알 수 있다.

즉, 최종 결과 식에서 보듯 추진기 블레이드와 함께 운동하면서 체적이 변화하는 얇은 층 캐비테이션에 의해 야기되는 변동 압력의 경우는 생성원과 관측점 사이의 거리가 가까워 생성원 시간에서 체적의 일차 변화율, 이차 변화율 모두 변동 압력에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 얇은 층 캐비테이션의 운동에 의한 상대 속도 효과 또한 고려되어야 함을 알 수 있다.

또한 임의의 관측자 시간(t)에서의 변동 압력은 생성원 시간 (τ^*)에서 발생한 압력에 의한 것이므로 이러한 지연시간을 해석에 고려하여야 한다. 이러한 지연시간은 식(12)와 같은 형태로 계산할 수 있다.

$$g = \tau^* - t + \frac{r}{c_0} \quad (12)$$

하지만 식 (12)에서 r 이 τ^* 의 함수이기에 닫힌 형태로 계산될 수는 없으며 수치적 반복 계산이 필요하며 본 논문에서는 회전익상의 각 음원 지연 시간 계산에 빠른 수렴성을 가지는 Newton 방법을 적용하였다(Seol et al. 2004a, Seol et al. 2004b).

$$c(\tau^* - t) + r = 0 \quad (13)$$

그리고 임의의 관측점에서의 변동압력은 식(13)에 의해 반복 계산되어 구해진 생성원 시각에서의 각 블레이드의 캐비테이션에 의해 유기되는 변동압력의 합으로 나타난다. 시간영역에서 이러한 방식으로 구해진 변동 압력은 푸리에 변환(Fourier Transform)을 통해 날개 주파수(blade rate frequency)에서의 변동압력 값으로 나타나며 전체 변동 압력값은 ITTC에서 추천하는 식 (14)와 같은 방법을 사용하였다.

$$\tilde{P} = \sqrt{P_1^2 + 2P_2^2 + 3P_3^2 + 4P_4^2} \quad (14)$$

2.2 변동압력 생성원에 대한 고찰

2.1절에서 구해진 지배방정식을 활용하여 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의한 선체에 유기되는 변동압력을 물리적으로 분석하기 위하여 스쿼, 레이크, 피치가 없는 기본 형상의 추진기 모델과 운용 조건, 얇은 층 캐비테이션의 체적 변화를 가정하였다. 변동 압력에 영향을 미칠 것이라 판단되는 여러 요인들에 대해 모의 해석을 시행하여 이에 대한 분석을 시도 하였다.

변동 압력 생성원에 대한 고찰을 위해 임의의 추진기 모델과 운용조건을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 또한 방위각 0° 에서 가장 큰 체적을 가지면서 방위각 0° 를 기준으로 대칭형의 얇은 층 캐비테이션의 체적 변화를 가정하여 이의 체적 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

여러 요인들에 의한 효과를 분석하기 위하여 일반적으로 변동 압력 측정 지점인 추진기 회전면 상방(C)과 좌현(P)과 우현(S), 앞(F)과 뒷(A) 방향 (Fig. 1 참조) 그리고 필요에 따라 다양한 위치에서의 변동 압력을 지배 방정식 (11)에 기반 하여 해석하였다.

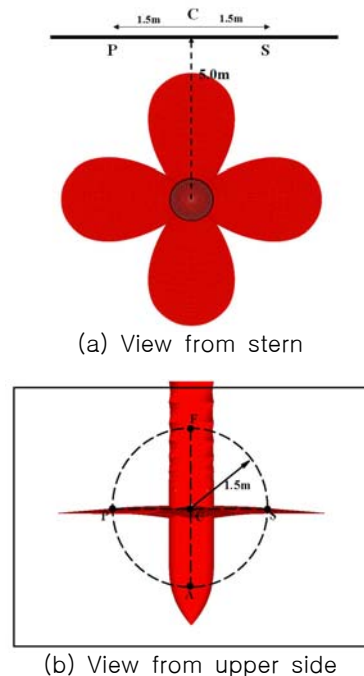


Fig. 1 Simulation model

Table 1 Propeller data & operating condition

Propeller Diameter	6.0m
Hub-diameter ratio	0.17
Number of blades	4
Propeller rotational speed	120 rpm
Tip Clearance	2.0m
Ship speed (V_S)	30 knot

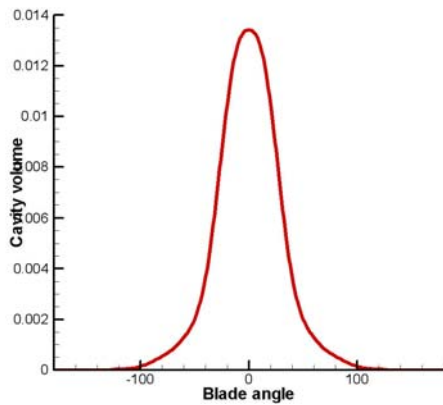


Fig. 2 Volume variation of sheet cavity

2.2.1 시간 영역에서의 변동 압력 계산

시간영역에서 어떠한 형태로 변동압력이 나타나 는지를 보기 위하여 각 블레이드의 얇은 층 캐비 테이션에 의해 유기되는 변동압력을 계산하였다.

Fig. 3은 관측점 시각(observer time)과 추진기 회전면 상방에서(C) 블레이드가 1회전 하는 동안 각 블레이드의 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동 압력과 이들의 합으로 나타나는 최종적 변동 압력 결과를 나타낸 결과이다. 블레이드가 4개인 프로펠러이므로 블레이드가 1회전하는 동안 4번의 압력파가 유기됨을 볼 수 있으며 각 블레이드가 얇은 층 캐비테이션이 생성되는 방위가 -100° 에서 100° 사이에서 큰 변동압력을 야기 하고 캐비테이션이 거의 생기지 않는 영역에서는 유기되는 변동 압력이 매우 작음을 볼 수 있다. 또한 각 블레이드 위의 얇은 층 캐비테이션이 성장-붕괴 과정을 거침에 따라서 양의 압력과 음의 압력이 순차적으

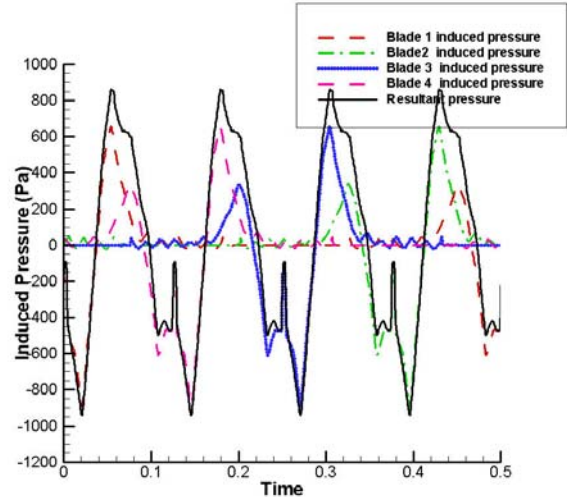


Fig. 3 Induced pressure fluctuation and resultant pressure

로 발생하는 것을 볼 수 있으며 최종적인 변동압 력은 이들에 의한 합, 즉 각 블레이드에서 도달하 는 변동압력 들의 위상차에 의한 상쇄-증폭 과정 을 거쳐 나타남을 볼 수 있다.

2.2.2 근접장항과 원지장항에 대한 고찰

일반적으로 캐비테이션에 의해 유기되는 압력을 거리에 따라서 근접장항, 원지장항 그리고 이들의 합으로 나타나는 전체 변동 압력을 계산하여 각 항들이 전체 변동 압력에서 어느 정도 영향을 미 치는지에 대하여 고찰 하였다.

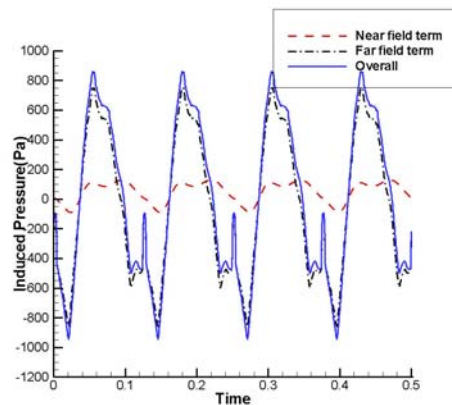


Fig. 4 Analysis of pressure fluctuation (near field term & far field term)

Fig. 4는 추진기 회전면 상방 (C)에서의 관측자 시간에서의 유기되는 근접장항, 원지장항 변동 압력과 이들의 합을 계산한 전체 변동 압력 결과를 나타낸 결과이다.

결과에서 보듯 원지장항이 전체 변동압력에서 많은 부분을 차지하고 있으나 근접장항 또한 본 결과에서 나타나듯이 전체 변동압력의 약 15%정도를 차지하고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 일반적으로 캐비테이션에 의해 유기되는 압력을 계산하는 식(1)은 근접장 효과가 무시되기 때문에 정확한 변동 압력을 예측할 수 없음을 알 수 있다.

또한 각 항들의 거리 감쇄 효과를 알아보기 위하여 회전면 상방으로 Tip Clearance 를 변화시키며 근접장항과 원지장항에 의해 유기되는 변동 압력을 계산하여 Fig. 5에 도시하였다. 지배 방정식 식(11)에서와 같이 근접장항은 $1/r^2$ 에 비례하고 원지장항은 $1/r$ 에 비례하기에 추진기, 즉 변동 압력 생성원으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 근접장항에 의한 값은 급격하게 감쇄함을 볼 수 있고 상대적으로 원거리에서는 원지장항이 지배적임을 알 수 있고 이는 식(1)과 유사한 결과를 나타낸다. 하지만 최근 건조 되고 있는 일반적인 선박의 선체와 추진기 사이의 간극(Tc/D)은 1.0이하이므로 근접장항에 의해 유기되는 변동압력 값을 무시할 수 없음을 Fig. 5의 결과에서도 알 수 있다.

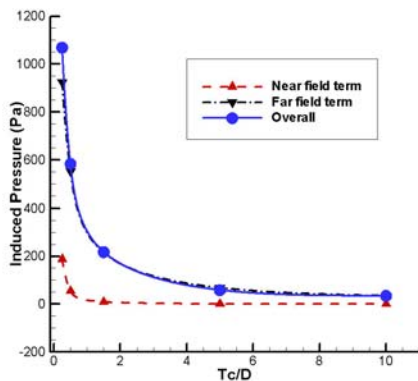
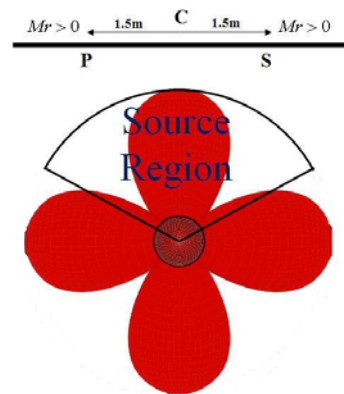


Fig. 5 Pressure fluctuation according to the tip clearance(near field term & far field term)

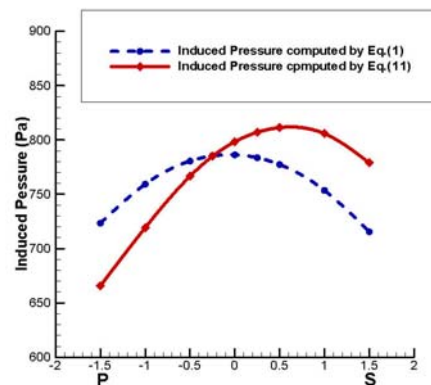
2.2.3 상대 회전 속도에 의한 효과 고찰

유도된 지배 방정식 (11)에서도 알 수 있듯이 추진기 블레이드의 회전 즉, 변동압력 생성원의 운동에 의해 나타나는 고정된 관측점과의 상대 속도에 관련된 항이 나타난다.

앞 선 결과에서 밝혔듯이 변동 압력은 근접장항에 의하여 생성원과 관측점과의 거리에 굉장히 큰 영향을 받기 때문에 상대 속도를 고려하지 않은 경우 회전면 직상방 관측점(C)지점에서 가장 큰 변동 압력이 예측된다. 하지만 생성원의 회전 운동 효과를 고려하게 되면 Fig. 6의 결과와 같이 좌현방향(P)보다 우현방향(S)에서 더 큰 변동 압력값이 예측된다.



(a) Schematic diagram



(b) Computed result of induced pressure

Fig. 6 Induced pressure fluctuation (effect of relative velocity)

본 연구에서 가정된 캐비테이션 체적 변화는 (Fig. 2참조)가 $\pm 30^\circ$ 부근에서 가장 큰 생성원 세기(source strength)를 가지며 방위각 0° 를 기준으로 대칭형의 생성원 세기를 가진다. 전체적인 변동압력 생성원은 방위각 $-100^\circ \sim 100^\circ$ 영역의 대칭형이 되며 좌현(P)쪽은 생성원(source region)이 멀어지고 있으며 우현(S)은 생성원이 다가오고 있어 동일한 거리만큼 생성원과 떨어져 있더라도 우현(S)에서 더 큰 변동 압력값이 유기되었고 최대 변동 압력이 유기되는 지점도 회전면 직상방에서 우현으로 조금 치우친 지점에서 나타났다. 그림 6-(b)의 결과에서 나타났듯이 생성원의 상대 운동을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 경우 예측되는 유기 변동 압력 값이 달라짐을 볼 수 있다.

2.3 평판에서의 변동압력 결과

앞선 2.2절에서 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기 되는 변동압력의 생성 원리 및 이에 영향을 주는 여러 요인들에 대하여 고찰하였다. 근접장 효과와 얇은 층 캐비테이션의 운동에 의한 상대 속도 효과등이 변동 압력예측에 있어 무시할 수 없는 요소임을 파악하였다. 기존의 알려진 식(1)과 캐비테이션 체적 변화율, 캐비테이션과 계측점과의 거리에 따른 지연시간, 그리고 앞서 고찰한 근접장 효과와 상대 속도 효과등을 모두 고려된 본 연구에서 활용한, 식(11)의 결과를 비교하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 평판위의 각 지점에서의 변동 압력을 계산하여 4차 날개 주파수(blade rate frequency)까지의 변동압력 결과를 Table 2에 나타내었으며 식(11)을 활용한 평판에서의 최종 변동압력 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

3. 결론

본 연구에서는 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동 압력의 생성원에 대하여 이론적으로 고찰하였다. 이를 위하여 최근 변동 압력을 예측하기 위하여 많이 활용되고 있는 음향학의 음향 생성 모델링을 응용하였다. 임의의 위치에서 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동 압력의 지배 방정식을 물리적, 수학적 접근을 통

해 유도 하였다. 또한 변동 압력에 영향을 주는 여러 요인들을 유도되어진 지배 방정식의 각 항 및 변수 들을 분석하여 그 특성을 파악하였다.

Table 2 Pressure fluctuation amplitudes (a) Induced pressure computed by eqn. (1)

P_{si} (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	After
P_{s1}	0.618	0.689	0.618	0.591	0.591
P_{s2}	0.185	0.141	0.156	0.136	0.136
P_{s3}	0.145	0.169	0.152	0.139	0.139
P_{s4}	0.050	0.067	0.054	0.054	0.054

(b) Induced pressure computed by eqn.(11)

P_{si} (kPa)	Port	Center	Starboard	Forward	After
P_{s1}	0.583	0.702	0.662	0.598	0.595
P_{s2}	0.155	0.142	0.181	0.144	0.128
P_{s3}	0.125	0.169	0.172	0.141	0.137
P_{s4}	0.046	0.066	0.059	0.053	0.052

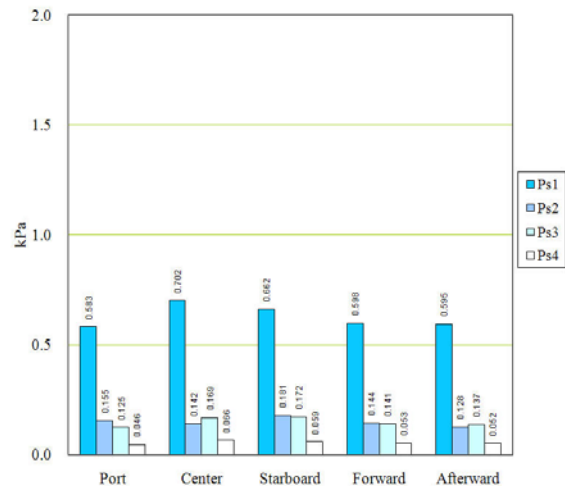


Fig. 7 Pressure fluctuation magnitude of the model propeller

추진기의 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동 압력은 식(1)과 같이 단순히 캐비티 체적의 2차 변화율에 비례하고 거리에 반비례하는 것이 아님을 밝혔다. 유도되어진 지배 방정식 식 (11)에서 나타나듯 캐비티 체적의 1차 변화율과 2차 변화율에 모두 관련이 있으며 거리에 반비례하는 원자장항과 거리의 제곱에 반비례하는 근접장항의 복합적인 결과에 의해 나타남을 알 수 있었다. 또한 결과적으로 추진기 얇은 층 캐비테이션에 의해 유기되는 변동 압력을 정확히 예측하기 위해서는 근접장 효과와 생성원의 운동에 의한 효과, 지연 시간등이 모두 고려되어야만 함을 여러 모의 계산 (simulation) 결과의 고찰을 통해 밝혔다.

본 논문에서 제시된 지배 방정식 및 변동 압력에 대한 연구 결과는 향후 추진기에 의해 유기되는 변동 압력 예측 기법 개발 및 변동 압력 연구에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

향후 본 연구 결과에 근거한 수치 변동 압력 예측 기법의 개발에 대한 연구가 진행 될 예정이며 기존에 활용되고 있는 예측 기법과의 비교, 캐비테이션 터널 실험, 실선 계측 결과와의 비교, 분석에 관한 추가적인 연구가 수행 될 예정에 있다. 이러한 연구는 설계 단계에서 선체에 유기 되는 변동 압력을 예측, 제어 기법을 마련하는 유용한 도구로서 활용 할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구결과는 한국해양연구원에서 수행한 "수조 및 대형 터널의 새로운 시험 기법 개발 (PES128B)"의 연구 성과 중 일부임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- Kim, M.C., Kim, K.S. and Song, I.H., 1996, "A Study of a Correlation between Experiments and Calculations of Pressure Fluctuation on Hull Surface," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 1, pp. 19-26.

- Kinns, R. and Bloor, C.D., 2004, "Hull vibration excitation due to monopole and dipole propeller sources," Journal of Sound and Vibration, Vol. 270, pp. 951-980.
- Lee, C.S., Lee, J.T., Suh, J.C. and Kim, Y.G., 1992, "An Analysis of Excitation Forces on the Ship Hull Induced by the Propeller," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 29, No. 1, pp. 81-92.
- Seol, H., Lee, S., Pyo, S.W. and Suh, J.C., 2004a, "Numerical Analysis of Underwater Propeller Noise (Part 1. Non-Cavitating Noise)," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 21-32.
- Seol, H., Lee, S., Pyo, S.W. and Suh, J.C., 2004b, "Numerical Analysis of Underwater Propeller Noise (Part 2. Cavitating Noise)," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 33-46.
- "The Specialist Committee on Cavitation Induced Pressures," 2002, 23rd International Towing Tank Conference, pp. 417-458.



< 설한신 > < 문일성 >