
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷 第1號 1992年 3月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No. 1, March 1992

프로펠러에 의해 유기된 선체표면 기진력 해석

이창섭*, 이진태**, 서정천**, 김영기*

An Analysis of Excitation Forces on the Ship Hull Induced by the Propeller by

Lee, C.-S.*, Lee, J.-T.**, Suh, J.-C.** and Kim, Y.-G.*

요 약

본 논문은 비정상 공동 프로펠러의 영향하에 있는 선체표면의 경계치 문제를 해석하고, 이로부터 선체표면에 유기되는 변동압력을 추정할 수 있는 프로그램의 개발과정을 다루고 있다.

본 논문에서는 개발된 프로그램을 캐비티를 표현하는 쏘오스의 영향하에 있는 구 주위의 유동해석에 적용하여 Butler의 해석해와 비교한 것을 실고 있으며, 특히 자유수면 조건을 고주파수 근사방식 또는 강제력 근사방식으로 근사화하였을 때 변동압력에 미치는 영향을 조사하였다.

또한 실제 RO-RO선을 대상으로 예제 계산을 수행하여, 선박설계과정에서 선체표면 기진력의 해석에 사용될 수 있음을 보였다.

Abstract

This paper deals with the procedure for developing a computer program which can predict the pressure fluctuation on the ship hull by solving the boundary value problem on the hull subject to the influence of the unsteady propeller and cavity motions.

The program is applied to the solution of flow around a sphere under the influence of point sources simulating the propeller cavity, and then is compared with the analytic solution based on Butler's sphere theorem. The effect of free surface condition, either pressure-free or rigid-wall, upon the pressure distribution is studied.

발표 : 1991년도 대한조선학회 춘계연구발표회('91. 4. 13)

접수일자 : 1991년 6월 3일, 재접수일자 : 1991년 9월 30일

*정회원, 충남대학교 선박해양공학과

**정회원, 해사기술연구소

The computer code is also applied to a RO-RO ship, leading to the conclusion that the package may be useful for the analysis of excitation forces on the ship hull induced by the propeller in the design process.

1. 서 언

선박의 고속·대형화에 따라 프로펠러에 작용하는 하중이 증대되어 캐비테이션 현상을 피할 수 없고, 근래에는 에너지 절약형 고효율 추진장치가 요구됨에 따라 저회전 대직경 프로펠러가 등장하게 되어 프로펠러와 선체와의 간격이 좁아지고 있다.

이와 같은 경향은 필연적으로 선체표면, 특히 선미표면에 유기되는 프로펠러 기진력을 증가시켜서, 이로 인한 나쁜 영향을 제어할 수 있는 기술을 요구하게 되었다. 즉 캐비테이션이 발생하게 되면 비 캐비테이션 상태보다 5-10배 까지 변동압력 진폭을 증가시키게 되므로 캐비테이션의 제어방식을 터득하는 것이 절실히 요구된다. 가장 이상적인 방법은 캐비테이션이 전혀 발생치 않도록 하는 것이 되겠지만, 대부분의 대형 선박의 경우는 비 캐비테이션이란 전개 면적비의 증가, 따라서 마찰저항의 증가 및 효율의 감소를 의미하기 때문에 전개면적과 캐비테이션 정도 사이의 타협이 이루어져야 하며, 고속정의 경우는 그 운항 목적상 최대속도를 감소시킬 수 없다는 절대적 조건 때문에 캐비테이션을 피할 수 없으므로 캐비테이션의 영향 아래서 알맞는 프로펠러가 설계 되도록 해야 한다. 따라서 캐비테이션에 의한 선체표면 유기압력 추정법의 개발은 최적 프로펠러 설계의 관점에서 절실히 요청된다.

선체표면에 유기되는 프로펠러 변동압력이 프로펠러-선체간격이 커질수록 적어지므로, 변동압력을 제어하기 위하여 간격을 넓히면 좋겠지만 추진효율에 좋지 않은 영향을 주고, 에너지 절약이 지상과제가 된 요즘은 과거에 부과하던 프로펠러 직경의 상한선을 높여가는 추세이므로 변동압력의 정확한 추정은 그 본래의 목적인 진동감소의 차원에서 더욱 발전하여 추진효율의 차원에서도 꼭 필요하게 되었다. 다시 말해서 지금까지는 고

스큐 프로펠러의 설계가 진동의 관점에서 주로 논의되었지만, 스큐의 증가가 변동압력, 나아가 선미 진동을 감소시킴으로, 주어진 변동압력의 허용치안에서 프로펠러-선체의 간격 감소를 시도하여, 즉 고스큐대직경 프로펠러를 설계하여 추진효율을 높이는 연구가 세계적으로 진행되고 있다는 것이다.

선체표면의 변동압력을 추정하는 데에는 시험에 의한 방법과 이론계산에 의한 방법이 있다.(이창섭 등 [1], [2]) 현재의 지식으로는 어느 쪽도 홀로 완전하게 실제적인 문제해결을 주지 못하지만 상호 보완함으로써 어느 정도 효과적으로 설계 목적을 달성시켜 주고 있다. 본 연구의 목적은 현재 불모지 상태에 있는 이 분야의 기술개발을 이룩하여 선미진동 감소와 에너지 절약을 가능하게 할 프로펠러 설계의 가능성을 열어줌으로써 이후의 선박 설계과정에 효과적으로 쓰이게 하기 위한 것이다.

선체표면 변동압력의 추정은 선박과 그 반류 중에서 회전하고 있는 프로펠러의 상호작용을 해석할 수 있어야 가능하다. 선박 주위의 흐름은 점성의 영향이 없는 포텐셜 유동부분과 점성의 영향을 심하게 받는 경계층 부분으로 크게 나눌 수 있는데, 불행하게도 프로펠러는 박리현상등 때문에 이론적 접근이 어려운 선미 두꺼운 경계층속으로 작동함으로써 여러가지 복잡한 조건을 동시에 만족해야 만 진정으로 프로펠러 문제해결이 가능하다.

실선에서의 성능추정에 가장 중요한 부분중 하나는 반류를 추정하는 것이지만 본 연구에서는 이미 알려져 있는 방식(이창섭, 이진태[3])을 채택하기로 하고 여기에는 상세한 설명은 피하기로 한다.

이론적 방법이 완벽하면 더 이상 좋을 수가 없지만, 그렇지 못한 상황에서의 최선의 접근방식은 물리적 현상을 직접 관찰할 수 있는 모형시험을

통하여 이론을 가능한 한 정확하도록 개발하고, 계통적인 변수 변환방식의 연구는 이론에 의한 컴퓨터 프로그램으로 수행하여 비용과 시간이 많이 소요되는 실험의 수를 최소화하도록 노력하는 것이다.

선각표면 변동압력을 이론적으로 추정하기 위하여는 선체와 프로펠러의 경계치 문제를 동시에, 또는 각각의 문제를 반복계산에 의해, 해석하여야 한다. 이중 프로펠러 이론부분은 Kerwin과 Lee [4] 및 Lee [5]에 의해 발표된 논문이 잘 알려져 있으므로, 본 논문에서는 프로펠러에 의해 유동장(특히, 선각표면)에 유기되는 포텐셜 계산 관련 부분만을 상술하고, 선체 경계치 이론은 Breslin [6]을 인용하여 소개하고, 이를 전산화하여 실제 선박에 응용하는 방법을 집중적으로 소개하고자 한다.

특히, 프로펠러 특이점계와 선체를 표현하는 특이점계에 의해 유기되는 포텐셜을 최근에 새로 개발된 PRpan(서정천 [7]) 프로그램을 써서 계산하였으며, 포텐셜을 기저로 하는 정식화(이진태 [8]) 방법을 사용하여 선체 경계치 문제를 해석하였다.

본 논문은 프로펠러에 의해 유기되는 선체표면 변동압력에 관한 이론 및 수치해석 과정을 보이고, 이의 검증에 위하여 가장 간단한 3차원 형상인구를 채택한 후 그 표면근처에 캐비티를 대표하는 단순 쏘오스를 놓은 후에, 그 쏘오스에 의해 유기되는 포텐셜을 수치적으로 보이고, 그 결과를 해석해와 비교하여 보임으로써, 수치 계산 과정의 유용성, 적합성을 우선 보여주고 있다. 그리고 동일한 프로그램을 실제 선박에 적용하여, 선체표면에 유기되는 변동압력을 계산한 예를 보여준다.

2. 선체 경계치 문제

본 연구의 목적은 프로펠러에 의해 유기된 선체표면 변동압력을 계산하는 과정을 보이는 것이므로, 프로펠러와 선체의 상호작용을 보다 용이하게 다루기 위하여 공통된 좌표계를 사용하는

것이 바람직하다. 따라서 기존에 개발된 프로펠러와 관련된 프로그램을 활용하기 위하여, 프로펠러를 기준 좌표계를 택하기로 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 x-좌표는 프로펠러 평면이 위치할 곳을 원점으로 하고 프로펠러 축 방향을 따라 하류쪽을 양으로 잡고, y-축은 프로펠러 축 중심 위치를 원점으로 하여 중력의 반대 방향으로 양이 되도록 한다. 우수 좌표계를 택하므로 z-축은 좌현쪽을 향할 때 양의 값을 갖게 된다.

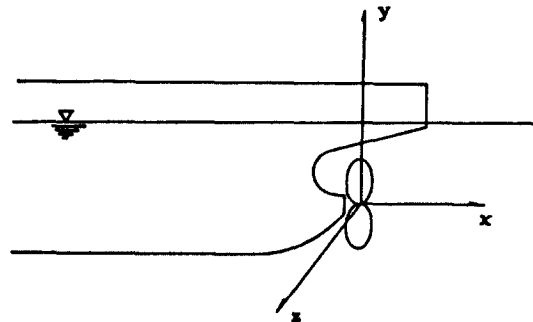


Fig. 1 Coordinate system

2.1 자유수면 경계조건

프로펠러가 회전하며 전진하게 되므로, 자유수면의 조건을 선형화 하여도 이를 엄밀하게 만족시키기 위하여는 방대한 계산을 필요로 한다. 그러나 다른 선박 주위의 이상유체 유동과는 달리 프로펠러 주위의 유동은 프로펠러 회전수의 높음을 고려한 근사화가 가능하며, 본 연구에서는 Breslin 등[6]의 논문에 근거하여 이를 검토하기로 한다. 앞에서 정의된 좌표계를 사용하고 프로펠러에 의해 유기되는 속도 포텐셜 ϕ 를 도입하여 선형화된 자유수면 조건을 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, y=h \quad (1)$$

여기에서 g 는 중력가속도를 의미하며, 프로펠러의 회전수 n , 프로펠러의 날개 수 Z 를 써서 포텐셜

변화의 각속도 ω 를 구하면, q -차의 날개진동수 차수에 대하여,

$$\omega = 2\pi q n Z \quad (2)$$

이므로 포텐셜 ϕ 는, q -차 조화항만 고려하기로 하면,

$$\phi = \varphi(x, y, z) \exp \{i(2\pi q n Z)t\} \quad (3)$$

로 표시되며, 속도 및 길이를 무차원 하기 위한 양으로 선속 U 및 프로펠러 반경 R 을 도입하여

$$\begin{aligned} x^* &= x/R \\ y^* &= y/R \\ \phi^* &= \varphi/UR \end{aligned} \quad (4)$$

을 정의하여, (3) 및 (4)를 (1)식에 넣어 정리하면

$$2\pi^2 q^2 Z^2 \frac{n^2 D}{g} \left(1 - i \frac{J}{\pi q Z} \frac{\partial}{\partial x^*}\right)^2 \phi^* - \frac{\partial \phi^*}{\partial y^*} = 0 \quad (5)$$

로 변형된 자유수면 조건식을 얻는다. 여기에서 $J=U/nD$ 는 전진비, D 는 프로펠러의 직경을 의미한다.

보통 관심있는 선박 프로펠러에 대하여 첫째항의 상수계수를 계산하여 보면, $q=1, Z=3\sim 5, n^2 D/g=1\sim 2$ 인 경우에,

$$2\pi^2 q^2 Z^2 \frac{n^2 D}{g} = 160\sim 1000 \quad (6)$$

의 매우 큰 수가 되며, 프로펠러에서 무한히 떨어진 곳에서 유기속도장이 영이어야 한다는 조건을 만족하기 위하여, (5) 식은

$$\phi^* = 0 \quad (7)$$

가 되어야 한다. 위식(7)은 고주파수 근사화의

결과로 대부분 경우 프로펠러에 의한 자유수면 조건으로 충분히 만족스럽게 사용되고 있다.

위와 같은 고주파수 자유수면 조건을 만족시키기 위하여 Breslin 등 [6]은 수면위 경상(mirror image)선체 표면에 수면아래에 있는 특이함수와 부호가 반대인 특이함수를 분포하여 선체 경계치 문제를 해석한 바 있으며, 본 연구에서도 동일한 방법을 따르기로 한다.

저 주파수 근사화를 시도하면 (6)식이 영에 수렴한다는 의미이므로 자유수면 조건 (5)식은

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial y^*} = 0 \quad (8)$$

으로 근사화 된다. 이것은 자유수면에서 수직 속도성분이 영인 경우로, 캐비테이션 터널에서의 실험상태에서와 같이 수면이 강체벽으로 차단되는 경우에 해당된다.

2.2 선체 경계치 적분 방정식

고 주파수 근사화에 의한 자유수면 조건, 즉 속도포텐셜이 영이라는 조건을 사용하면 이상유체에서의 경계치 문제는 단순히 선체 표면에서의 경계조건만을 만족시키도록 정식화 될 수 있다.

또한 엄밀한 해를 구하기 위하여는 선체와 프로펠러의 경계치 문제를 동시에 풀어야 하지만, 선체-프로펠러 상호작용에 의한 교란자체가 거리가 멀어질수록 작고 상대쪽의 경계치 문제의 해에 미치는 영향은 고차 비선형 교란이 되므로 무시하고, 본 연구에서는 프로펠러 경계치 문제를 풀어서 얻은 특이함수계에 의하여 유기된 선체 표면에서의 유기속도 및 속도포텐셜 등을 써서 반복계산 없이 선체 경계치 문제를 다루고자 한다.

잘 알려진 선체에서의 경계조건은 법선방향 속도가 영이라는 것이다. Hess & Smith[9]이래 널리 쓰이고 있는 쏘오스 분포방식이 통상의 목적에는 가장 적합하고 사용에 편리하므로 본 연구의 목적으로도 활용될 수 있으나, 본 연구에서는 법선 다이폴을 분포하여 해석하는 방법을 서술하기로 한다.

Breslin에 의하면 다이폴 분포에 의해 경계치 문제를 해석할 경우, 우리가 흔히 다루는 선체 외부의 Neumann 문제는 내부의 Dirichlet 문제로 바뀔 수 있다. 즉, 법선방향의 비침투 조건은 선체 바로 내부표면에서의 포텐셜이 영이 되는 조건으로 치환이 가능하다. 또한 쏘오스에 의한 속도계산보다 법선방향 다이폴(normal dipole)의 사용이 계산 시간의 단축은 물론 나중에 충격압력(impulsive pressure)의 계산에도 편리하다.

본 연구에서는 우선 선체 변동압력 계산에서 정상적인 주기를 갖는 성분에만 관심이 있으므로 선체 표면에서의 전체 포텐셜 $\Phi(x, t)$ 는

$$\Phi_s(x, t) = \sum_q (\Phi_s(x))_q \exp \{i(2\pi q n Z) t\} \quad (9)$$

로 표현할 수 있다고 가정하고, 일반성을 잃지 않으므로 q-차의 조화 포텐셜한 성분만을 다루기로 하자. 그러면, 선체표면에서 유체쪽으로 향하는 법선 벡터 n을 정의했을 때, 선체 표면에 분포된 법선 다이폴에 의해 유기되는 포텐셜은

$$\phi_n(x) = \iint_{S_{II}} \mu(\xi) \frac{\partial G}{\partial n} ds + \iint_{(S_{II})_i} \mu(\xi) \frac{\partial G}{\partial n} ds \quad (10)$$

여기에서 S_{II} 및 $(S_{II})_i$ 는 각각 선체, 경상선체 표면을,

$$G = -\frac{1}{4\pi R} \quad R = |x - \xi| \quad (11)$$

를 의미한다.

식(10)에서 경상전체 위에 위치한 법선 다이폴의 세기는 프로펠러 축의 홀수를 h라 할 때,

$$[\mu(\xi, \eta, \zeta)]_{(S_{II})_i} = -[\mu(\xi, 2h - \eta, \zeta)]_{S_{II}} \quad (12)$$

의 관계를 갖게 된다.

고 주파 자유수면 경계조건을 만족하기 위하여는 프로펠러의 모든 특이 함수에 의한 영향도 경

상위치에 반대부호의 특이함수가 오도록 하여 관심이 있는 선체표면 위치 x에서 유기 포텐셜을 구하여야 한다. 즉, 프로펠러에 의한 전체유기속도 포텐셜은

$$\phi_\infty = [\phi(x)]_P - [\phi(x)]_{P_i} \quad (13)$$

여기에서 하첨자 P와 P_i 는 각각 물수된 프로펠러와 경상프로펠러에 의해 유기되는 속도포텐셜을 뜻하기 위해 도입되었다.

내부포텐셜이 영이 되는 조건을 사용하면

$$0 = \phi_\infty + \phi_n \quad (14)$$

이 되므로, 식(10)과 (13)을 사용하여, 선체표면 위에 있는 점에 식(14)를 적용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\mu(x)}{2} + \iint_{S_{II}} \mu(\xi) \frac{\partial G}{\partial n} ds + \iint_{(S_{II})_i} \mu(\xi) \frac{\partial G}{\partial n} ds \\ = -[\phi(x)]_P - [\phi(x)]_{P_i} \end{aligned} \quad (15)$$

가 된다.

캐비테이션 터널에서의 실험치와 이론계산 결과를 비교할 때는 터널의 덮개가 자유수면과는 달리 견고하므로, 저 주파수 근사의 경우와 같이 경상 선체위의 다이폴의 세기를 대응되는 위치는 다이폴과 같은 부호가 되도록 바꾸어 주면 된다. 즉, 식(12) 우변의 부호와 식(13)의 경상 프로펠러에 의해 유기되는 포텐셜의 부호를 바꾸어 주면 된다.

2.3 선각 변동압력

앞절에서 유도한 적분 방정식을 해석하여 선각에 분포된 다이폴의 세기를 결정하면, 선각에서의 전체 포텐셜 값은 다이폴의 부호만 바꾸어 구할 수 있다. 따라서, 선형화된 Bernoulli 방정식으로 부터

$$\frac{P}{\rho} = -\left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}\right) \phi = \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}\right) \mu \quad (16)$$

로 표현되며, μ 를 Fourier급수를 표현하면,

$$\mu = \sum_q \mu_q \exp \{i(2\pi q n Z) t\} \quad (17)$$

가 되므로, q -차의 변동압력의 복소 진폭함수는

$$P_q = \rho \left(i 2\pi q n Z + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \mu_q \quad (18)$$

로 표현된다.

변동압력의 첫째항은 충격압력이라 부르고, 둘째항은 전달압력이라 하며, 보통 첫째항의 크기가 월등하기 때문에 둘째항의 계산은 생략한다. 즉,

$$P_q = i \rho (2\pi q n Z) \mu_q \quad (19)$$

2.4 구를 이용한 선체 경계치 문제 해석 검증

2.4.1 서 언

대형 프로그램을 개발하는 과정 또는 개발 완료 단계에서 필요한 절차 중의 하나는 개발된 프로그램을 검증(validation)하는 것이다. 본 연구에서와 같이 복잡한 선형을 일정한 범칙을 따라 판요소(surface panel element)로 치환하여 표현한 후에, 특이함수를 표면에 분포하여 경계치 문제를 해석하는 경우에는 상당히 복잡한 수치계산 과정이 필수적으로 수반되게 되므로, 특히 프로그램의 정도판단 및 유용성, 정확성을 검증하는 작업은 그 신뢰성이 또한 의문시될 수 밖에 없는 복잡한 실험과의 비교 이외에는 달리 뾰족한 방법이 없는 것이 보통이다.

특히 복잡한 기하학적 형상을 갖는 선형 및 프로펠러 사이의 상호작용을 검증하는 과정은 그리 간단하지가 않다. 그러나 선형을 이상적인 형상인 반구로 표현하고, 프로펠러 캐비티를 단순 소오스로 표현한다면, 구 주위의 유동장을 표현할 수 있는 Butler의 해석해(Milne-Thomson[10])가 존재하므로, 수치해석 결과와 해석해의 직접비교로 프로펠러와 상호작용에 대한 기본 선체 사이의 수치계산과정을 검증할 수 있는 큰 잇점이 있다.

또 하나의 장점은 고진동수 가정에 의하여 얻어진 $\phi = 0$ 자유표면 경계조건과 자유표면을 딱딱한 벽으로 치환하여 얻을 수 있는 $\partial\phi/\partial n=0$ 의 경계조건을 해석적으로 비교하여봄으로써, 고진동수 가정이 전체문제 해석에 끼치는 영향을 연구할 수 있으며 동시에 두가지 경계조건에 대한 수치해석 과정을 체계적으로 검증할 수 있다는 것이다.

2.4.2 Butler의 구 정리(sphere theorem)

2차원 유동의 원 정리에 해당하는 정리로서 3차원에는 Butler의 구 정리(sphere theorem)가 있다. 본 정리(Milne-Thomson[10], P.487)에 의하면 반경 a 의 구와 구의 중심에서 거리 $f(f>a)$ 만큼 떨어진 곳에 세기 m 의 소오스가 놓여있을 때, 구 표면에서의 비침투 경계조건을 만족시키는 임의의 유동장점 x 에서의 속도 포텐셜 $\Phi(x)$ 은

- (i) 중심에서 거리 f 만큼 떨어진 좌표 ξ_A 에 있는 원래의 소오스에 의한 속도포텐셜,
- (ii) 중심에서 거리 a^2/f 만큼 떨어져 있으며, 중심과 구 주위의 소오스점을 잇는 직선상의 점 ξ_B 에 위치한 세기 ma/f 의 상소오스(image source)에 의한 속도포텐셜,
- (iii) 위의 상소오스의 위치에서 중심까지 분포된 선밀도 $-m/a$ 인 선쌍크(line sink)에 의한 속도포텐셜의 선형 중첩에 의해 표현될 수 있다.

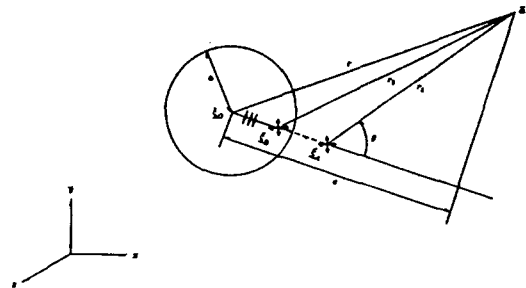


Fig. 2 Geometric characteristic values to represent the velocity potential of the flow around a sphere

즉,

$$\begin{aligned} \phi(x) &= m f_s(x; \xi_A) \\ &+ \frac{ma}{f} \phi_s(x; \xi_B) - \frac{m}{a} \phi_{LS}(x; \xi_0, \xi_B) \\ &= -\frac{m}{4\pi r_1} - \frac{ma}{f} \frac{1}{4\pi r_2} \\ &+ \frac{m}{a} \frac{1}{4\pi} \log \left\{ \frac{-(e - \frac{a^2}{f}) + r_2}{-e + r} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

윗식에서 사용된 기하학적 양들은 Fig.2에 정의되어 있다.

2.4.3 구 주위의 포텐셜 계산

구 표면 및 자유수면으로 부터의 캐비티 소오스의 위치변화에 대한 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같은 좌표계를 선정하였으며, Table 1에 보는 바와 같이 2가지 경우를 선정하여 계산을 수행하였다.

Table 1 Coordinate of the cavity source point (R=sphere radius)

Case	x/R	y/R(above B.L.)	z/R
A	1.1	0.5	0.0
B	0.0	-0.5	0.0

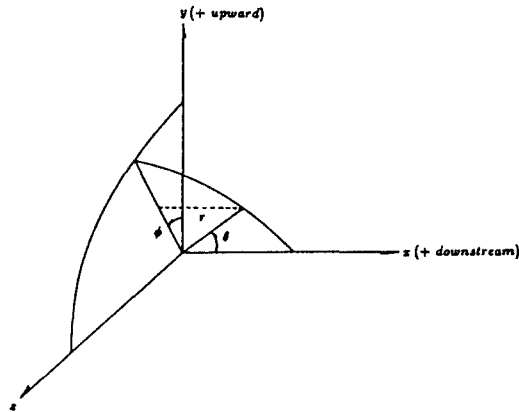


Fig. 3 Rectangular and spherical coordinate system for sphere

첫째 경우 (A)는 소오스가 선체표면에 가까이 선부근처에 위치한 경우이며, 둘째 경우 (B)는 소오스가 선체 중앙부 바로 아랫부분에 위치한 경우이다.

Fig. 4, 5, 6은 이들 포텐셜의 분포양상을 자유수면 경계조건이 $\phi = 0$ 와 $\partial\phi/\partial n = 0$ 인 각각의 경우에 대한 계산결과를 함께 보여 주고 있다. 이들로부터 해석해와 수치 계산 결과가 잘 일치함을 우선 확인할 수 있다.

Fig. 4 (Case A)로 부터 자유수면 경계조건의 차이는 자유수면 근처에서 ϕ 의 분포에 극심한 차이를 준다는 사실을 확인할 수 있으며, Fig.5 (case A)로 부터도 횡단면에서의 분포양상도 자유수면 경계조건의 차이에 의해 근본적으로 다른 거동을 보이고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

비슷한 계산을 캐비티 소오스가 중앙단면 아래에 위치한 경우(Case B)에 대하여 계산을 수행한 결과가 Fig.6에 도시되어 있다. 앞의 경우에 비하여 비교적 자유수면의 영향이 적게 나타나고 있는 바, 이는 선체의 blockage 효과가 크게 작용 하기 때문이라고 판단된다.

본 절에서는 가장 간단한 3차원 형상인 구를 사용하여 선체 표면 경계치 문제의 해석이 바르게 수행되고 있음을 보여주었다. 특히, Butler의 구의 정리에 의한 해석해와의 비교를 통하여, 수치 해석 방법의 엄밀성을 보여주었으며, 특히 자유수면 조건의 차이 (즉, $\phi = 0$ 또는 $\partial\phi/\partial n = 0$)가 선각에서의 포텐셜에 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

3. 프로펠러에 의한 유기 속도 포텐셜의 계산

프로펠러에 의한 선체 기진력의 해석을 위하여는 먼저 공동프로펠러 경계치 문제의 해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 Lee [5]의 비정상 공동 양력면 이론에 근거한 프로그램을 사용하였다. 본 프로그램은 프로펠러의 하중 및 캐비티의 거동을 표현하기 위한 보오텍스 및 소오스의 세기를 시간의 함수로 최종결과를 준다.

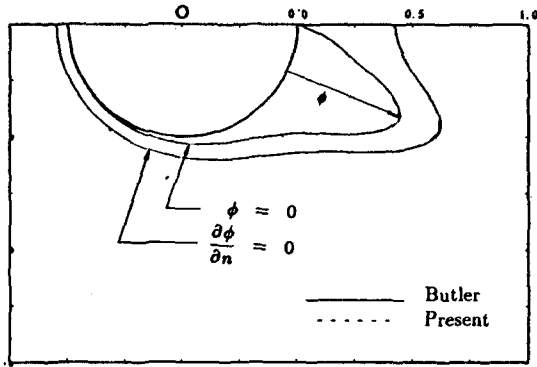


Fig. 4 Potential distribution along the keel line for the pressure-free and rigid-wall free-surface boundary condition (Case A)

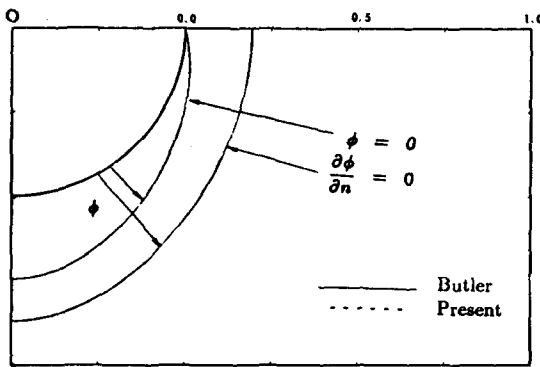


Fig. 5 Potential distribution along the transverse section (Case A)

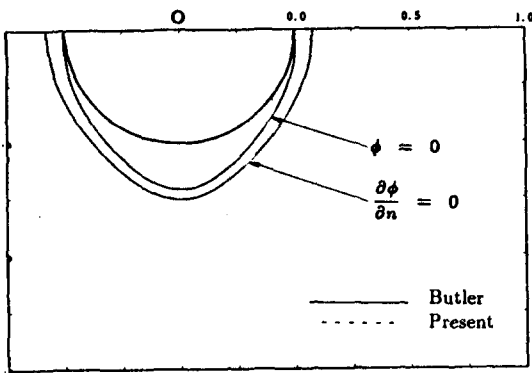


Fig. 6 Potential distribution along the keel line for the pressure-free and rigid-wall free-surface boundary condition (Case B)

위에서 구한 특이함수에 의해 유기되는 포텐셜을 효과적으로 구하기 위하여 보오텍스를 격자형으로 분포된 모양에서 고리모양 순환 보오텍스(reentrant vortex)의 분포로 재구성한 후 이를 다시 다이폴로 치환하게 되며, 보오텍스 세기로부터 프로펠러 특이함수계를 나타내는 다이폴의 세기를 우선 결정한다. 다이폴의 세기를 알면, 임의의 유동장 내 위치에서 유기 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

4. 선체표면 변동압력 예제 계산

4.1 입력 및 프로펠러 출력 예

프로펠러에 의해 유기된 선체표면에서의 변동압력을 추정하기 위하여 대상 선박으로 RO-RO선을 선정하였다.

Table 2,3은 각각 대상 RO-RO선의 주요제원 및 이에 장착된 프로펠러의 주요요목을 정리한 것이며, Fig. 7과 Fig. 8은 계산에 사용된 프로펠러의

Table 2 Principal particulars of the RO-RO ship

Hull		Engine	
LBP	190.00 M	MCR	12910 PS
B _{MLF}	32.26 M		102.0 rpm
Draft _{MLD}	9.00 M	NOP	11620 PS
C _B	0.5663		98.5 rpm

Table 3 Principal particulars of the RO-RO propeller

Number of blade	4
Diameter	6500.0 (mm)
Pitch ratio (at 0.7 R)	0.8631
Exp. area ratio (at 0.7 R)	0.5550
Max. blade width ratio	0.3015
Max. blade thickness ratio	0.0486
Boss ratio	0.1631
Skew	37°
Rake angle	0°

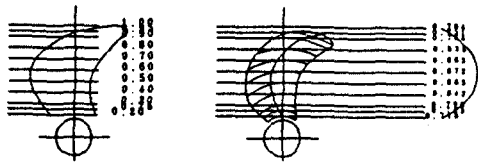
도면과 반류분포 모양을 보여준다.

Lee[5]의 이론에 의거한 프로그램의 출력 결과 중 선체표면에 직접 변동압력을 유기하게 될 공동의 형상을 Fig. 9에 보여주고 있으며, 이때의 공동체적의 프로펠러 위치에 대한 변화를 Fig. 10에 보여주고 있다.

4.2 유기속도 포텐셜 계산 예

선체표면의 제어점 위치에 프로펠러 특이함수 계에 의해 유기된 속도 포텐셜은 시간영역에서 계산되어, Fourier 급수의 형태로 선체 경계치 문제 해석의 입력자료로 제공된다. Fig. 11은 프로펠러 날개끝 바로 위에 위치한 선체표면에 유기되는 속도포텐셜의 시간에 대한 변화를 보여준다. RO-RO선 프로펠러의 날개수 $Z=4$ 이므로 유기 포텐셜의 값은 날개수 차수가 가장 두드러지게 나타난다.

DIA. (MM)	6500.00	SKEW(DEG)	20.50
NO. OF BLADES	4	RAKE(MM)	0.02
AE/AO	0.56	RH/RO	0.16
P/D AT.7R	0.872	NACA 66 MOD. SECTION	A=0.8 MEAN LINE



EXP. CONTOUR PROJ. CONTOUR PITCH/D

Fig. 7 Drawing of the RO-RO propeller

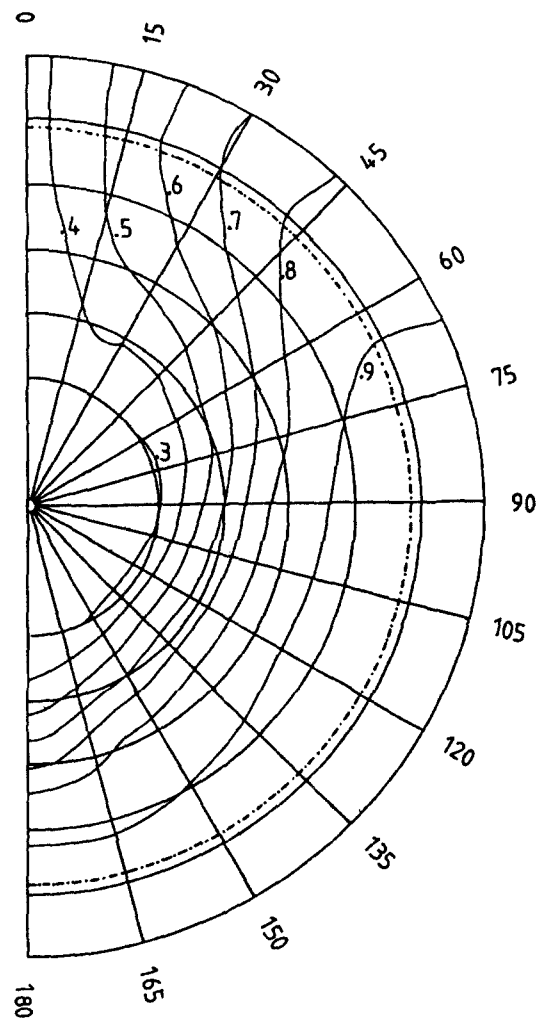
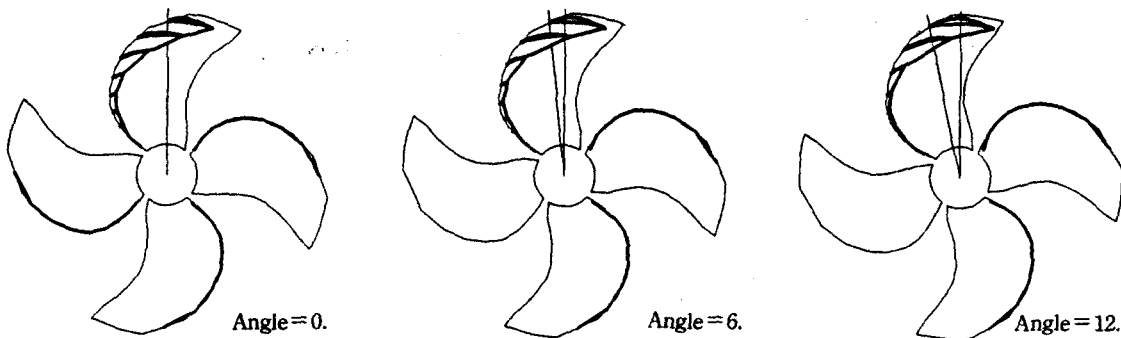


Fig. 8 Wake distribution of the RO-RO ship (Full-load condition)



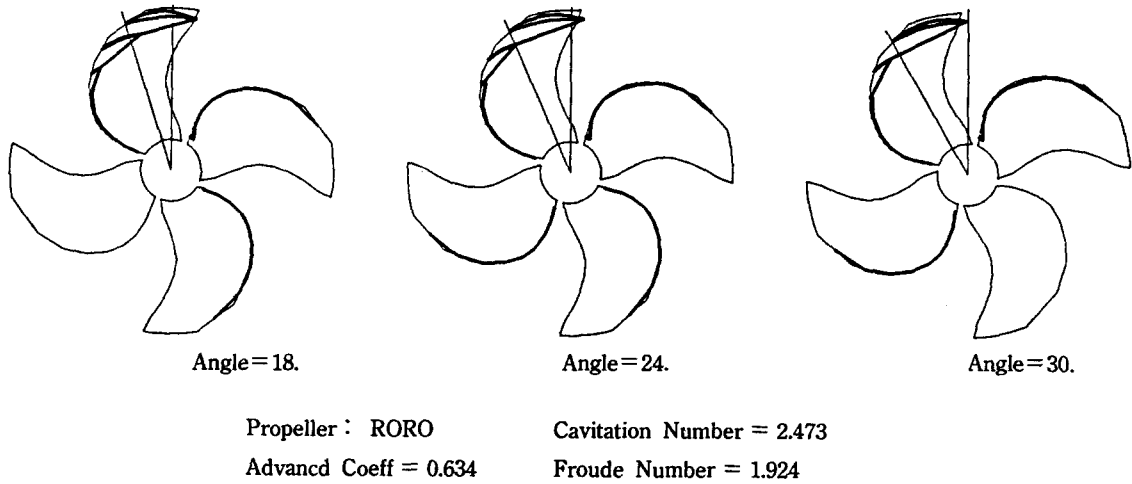


Fig. 9 Predicted cavity extent and thickness distribution

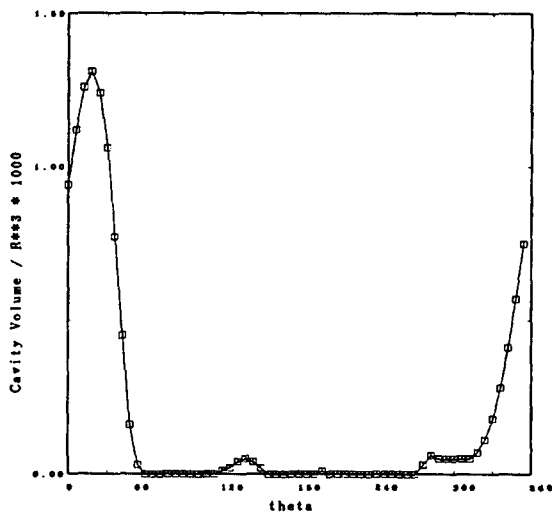


Fig. 10 Cavity volume variation with angular position

4.3 선체경계치 문제 해석 예

Fig. 12는 계산 대상 RO-RO 선박의 물수부분의 선각을 4각형 판요소로 치환한 모양을 보여준다. 이 선박에 대하여 선체표면에 구한 날개진동수 변동압력의 진폭을 kPa 단위로 그림을 그리면 Fig. 13과 같은 결과를 얻는다. 프로펠러 변동압력의 영향이 주로 선미에만 국한되므로 선수부분은 결

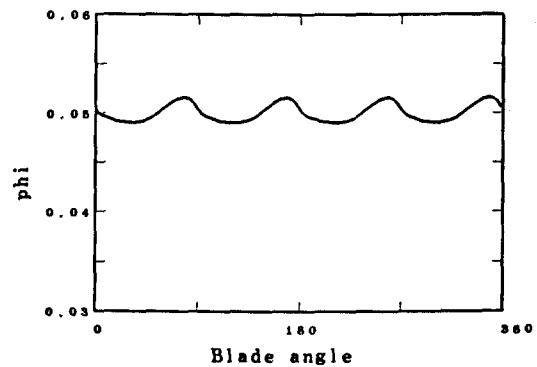


Fig. 11 A typical induced potential variation

과 제시에서 제거하여 보였다. 이때 자유수면 경계조건은 고진동수 $\phi = 0$ 을 사용하였으며, 최고 압력 피크값은 2.3kPa이며, $(x/R, y/R, z/R) = (-0.3, 1.5, -0.2)$ 의 위치에 발생되고 있다. 이로 미루어 최고 피크값은 프로펠러보다 약간 전방위치에 우현쪽에 치우쳐 나타남을 알 수 있다. 본 계산에 사용된 RO-RO선은 실질적으로 본 해석의 결과에 의하면, 선체표면을 통해 전달되는 기진력의 수준은 허용한계인 8kPa보다 낮음을 확인함으로써, 선미진동의 위험성이 낮다는 것을 알 수 있다.

자유수면 경계조건을 강체벽(rigid wall)으로 치환하여($\partial\phi/\partial n=0$) 계산을 수행한 결과 Fig. 14

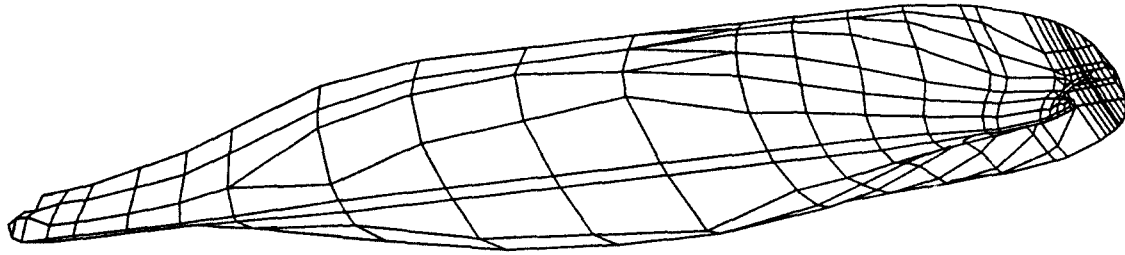


Fig. 12 Quadrilateral representation of the ship hull of a RO-RO ship

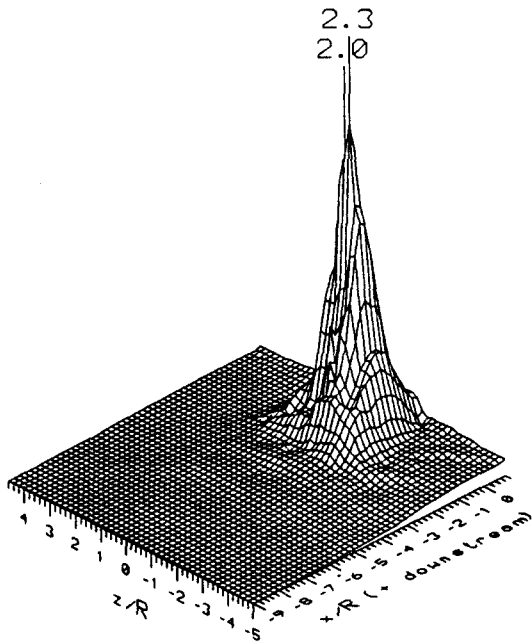


Fig. 13 Blade frequency pressure fluctuation on ship hull with pressure-free water surface condition

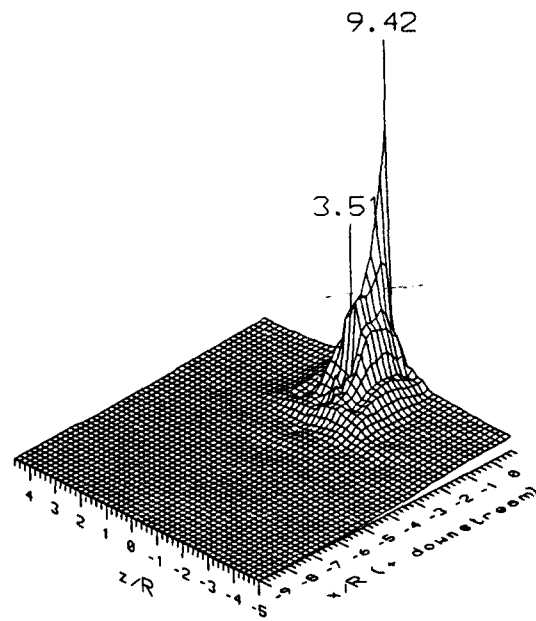


Fig.14 Blade frequency pressure fluctuation on ship hull with rigid-wall water surface condition

에 보여주고 있다. 프로펠러 부근에서의 압력 피크가 3.5kPa로 나오는 것은 Fig. 13의 경우와 크게 차이가 없으나, 중앙 종단면 위의 선각 표면을 따라서 선미로 가며 크게 증가하는 경향을 보인다. 본 논문의 전반부에서 구를 활용하여 자유수면 경계조건의 차이가 전체 포텐셜 변화에 큰 영향을 주는 것을 보인 바 있는 바, Fig. 14도 선미 부근에서는 강체벽 수면조건의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

5. 결 언

1) 다이폴의 유기속도 및 속도 계산을 위한 새로운 프로그램인 PRpan을 사용하여, 선체 경계치 문제 해석용 프로그램을 완성하였다. 본 프로그램을 사용하여 구에 대하여 수치해석한 결과를, Butler의 해석해와 비교하여 보임으로써 수치해석 과정의 엄밀성을 보였다. 특히 자유수면 조건의

차이 (즉, $\phi = 0$ 또는 $\partial\phi/\partial n = 0$)가 선각에서의 포텐셜에 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

2) 비정상 공동 양력면 이론 등의 방법에 의해 프로펠러의 경계치 문제를 해결한 후, 새로이 개발된 선체표면 기진력 해석 프로그램을 수행하여 줌으로써 선체 표면 변동 압력을 계산할 수 있도록 하였다. 새로운 선체 표면 기진력 해석 프로그램의 활용으로 선체 진동해석의 가장 중요한 압력 자료를 공급할 수 있게 되었다.

3) 입력 변수를 다양하게 변화시켜가며 선체 변동압력을 최소화하는 이론적 프로펠러 설계를 가능하게 하였으며 따라서 모형시험은 이러한 매개변수의 체계적인 변화연구에 대한 검증 목적으로 제한됨으로써, 그 횟수를 최소화할 수 있게 되어 시간적, 경제적 절약이 가능하게 되었다.

본 연구는 과학기술처의 지원으로 해사기술연구소에서 수행 중인 CSDP 과제의 일부 과제로 수행되었음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] 이창섭등, "프로펠러에 의한 선체표면 변동 압력 추정법 개발," 한국 기계연구소 연구보고서 UDC 629-11, 1983.
- [2] 이창섭, 김기섭, 서정천, 최종수, "프로펠러에 의한 선체표면 변동 압력의 추정-실험적 연구," 대한조선학회지, 제22권 2호, 1985. pp. 12-26.
- [3] 이창섭, 이진태, "선미후류-프로펠러 상호작용을 고려한 유효반류 추정법," 대한조선학회지, 제27권 제2호, 1990. pp. 1-12
- [4] Kerwin, J.E. and Lee, C.-S., "Prediction of steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory", *Trans. SNAME*, Vol. 86. 1978. pp. 218-253.
- [5] 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.
- [6] Breslin, J.P. van Houten, R.J., Kerwin, J.E. & Johnsson, C.A., "Theoretical and experimental propeller-induced hull pressures arising from intermittent blade cavitation, loading, and thickness", *Trans. SNAME*, Vol. 90. pp. 111-151, 1982.
- [7] Suh, J.-C., "Analytical Evaluations of the Surface Integrals of the singularity Method", *Proc. of Workshop on Propulsor Technology '91*, Taejeon, Korea, March 27, 1991.
- [8] Lee, J.-T., "A Potential Based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow", Ph.D. Thesis, Dep't of Ocean Eng's, MIT, 1987.
- [9] Hess, J.L. and Smith, A.M.O., "Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies", *J. Ship Research*, Vol. 8, No. 2 1964. pp. 22-44.
- [10] Milne-Thomson, "Theoretical Hydrodynamics", 5-th Ed., MacMillan Press, 1968.