

패널법을 이용한 POD형 워터제트 추진장치의 성능해석

김현열^{†*}, 김문찬^{**}, 전호환^{**}, 정석호^{*}

부산대학교 대학원 조선해양공학과^{*}
부산대학교 조선해양공학과^{**}

Performance Analysis of POD-Type Waterjet System by Panel Method

Hyun Yul Kim^{*}, Moon Chan Kim^{**}, Ho Hwan Chun^{**} and Seok Ho Jung^{*}

Dept. of Naval Arch. And Ocean Eng., Graduate School, Pusan National Univ.^{*}
Dept. of Naval Arch. And Ocean Eng., Pusan National Univ.^{**}

Abstract

The aim of this paper is to analyze the steady performance of POD-type waterjet system by panel method. A surface panel method is applied to the present analysis. To analyze the compound propulsor, analysis program has been developed based on a perturbation potential method. The developed code has been validated by comparing the experimental data of shrouded propeller. The validated code has been applied to the POD-type waterjet system which can be used for the propulsion of amphibious vehicle. The computed results have been compared with experimental results, which shows a good agreement between them.

※Keywords: POD-Type (포드형), Waterjet (물분사장치), Panel method(패널법), Performance analysis (성능해석), Potential-based Method (포텐셜 기저법), Duct (덕트)

1. 서론

물 분사 추진은 고속에서나 부하가 큰 추진에서의 캐비테이션 및 박리 문제에 있어서 일반 프로펠러 보다 우수하여 많이 적용되고 있으며, 선박이 고속화, 고마력화 되어짐에 따라 그 사용 빈도

가 점점 늘어나고 있는 추세다. 물분사 추진은 일반 선박뿐만아니라, 도하용 장갑차에 많이 적용되어지고 있는데 이는 저속에서의 높은 조종성능, 저속이지만 고부하가 요구되고, 얕은 물에서도 작동이 가능하고, 임펠러가 덕트내부에서 회전함으로써 갖는 안전성, 소음과 진동감소 등의 이점이 있기 때문이다.

본 연구에서 다루는 Pod 형 워터제트의 경우는 비속도가 굉장히 높아 전형적인 축류형이라 할 수 있으며 덕트가 짧아 일반 배에서 사용하는 덕트형

접수일: 2004년 6월 2일, 승인일: 2004년 7월 21일

† 주저자, E-mail: hyukim@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2757

프로펠러와 유사하다 할 수 있다. 그러므로 임펠러의 효율은 플러쉬형에 비하여 떨어지나 모우먼트 효율이 우수하여 전체적으로 플러쉬형과 비슷하거나 약간 높은 효율을 보인다고 할 수 있다. 또한 유동의 유입이 매우 용이하여 인테이크 부에서의 손실 및 캐비테이션의 위험성이 없는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 POD형 워터젯의 성능을 해석하기 위하여 프로펠러의 단독성능 해석에 성공적으로 적용된 바있는(Lee 1987, 김영기 등 1991) 포텐셜을 기저로 한 패널법을 적용하였다. 관내 유동을 해석하기 위하여 벽면을 형상 그대로 재현하여 벽면의 유기 포텐셜을 계산하였다.

본 연구와 유사한 연구가 문일성 등(1996)에 의해 연구되어 졌으나, 본 연구에서는 덕트 유입 속도와 임펠러에 유입되는 속도의 차이를 고려하여 보다 정도높은 해석이 가능함을 보였으며, 개발된 프로그램의 검증에 위하여 검증된 실험결과가 있는 Shrouded 프로펠러에 대하여 계산하였으며, 검증된 결과를 토대로 Pod형 워터젯에 적용하였다. 본 Pod형 워터젯은 부산대학교에서 실험을 수행하였으며 그 실험 결과와 비교할 수 있었다.

2. 문제의 정식화

2.1 기본가정

덕트 입구면에서의 유입속도 V_i 는 균일류로 가정하면 입구면에 유입되는 전체유량 Q_i 와 입구면의 면적 A_i 에 의하여 (1)과 같이 결정이 된다.

$$V_i = Q_i/A_i \quad (1)$$

출구면에서의 속도 또한 균일류라고 가정하면 출구면에서의 속도 V_j 는 유량조건에 의하여 A_j 를 출구면의 면적이라 하면 (2)와 같이 된다.

$$V_j = Q_j/A_j \quad (2)$$

여기서 임펠러와 스테이터의 날개와 후연반류면에서의 점성의 영향은 미소하다고 가정한다. 그리하여 임펠러와 스테이터는 비점성, 비압축성인 유체의 비회전성 유동장에서 작동한다고 가정한다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

섭동속도 \vec{v} 는 이상유동장에서 정의 되는 섭동속도 포텐셜 ϕ 를 사용하여 $\vec{v} = \nabla\phi$ 로 표현될 수 있으며 전 유체 영역에서 질량 보존의 법칙이 성립하여야 하므로 지배 방정식으로 Laplace 방정식을 얻는다. 즉,

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (3)$$

식(3)에 다음과 같은 경계 조건을 부과함으로써 물 분사 추진장치 주위의 유동은 유일하게 정의된다.

1) 표면에서의 비침투 조건 :

$$\hat{n} \cdot \vec{V} = \hat{n} \cdot \vec{U}_r + \frac{\partial\phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

여기서, \hat{n} 은 물체 표면에서의 단위 법선 벡터이며 유체영역을 향할 때 양으로 정의된다. 또한 \vec{U}_r 은 유입 유동 속도로, 임펠러에 고정된 좌표계에서 반경 \vec{r} 및 선속 \vec{V}_s 와 임펠러의 회전 각속도 $\vec{\Omega}$ 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{U}_r(r) = \begin{cases} \vec{V}_s(r) - \vec{\Omega} \times \vec{x} & \text{for rotor} \\ \vec{V}_s(r) & \text{for stator} \end{cases} \quad (5)$$

2) Impeller 및 stator의 뒷날에서의 Kutta condition :

$$|\nabla\phi|_{T,E} < \infty \quad (6)$$

3) 후류면에서의 운동학적 경계조건 :

$$\Delta \frac{\partial\phi}{\partial n} = (\hat{n} \cdot \nabla\phi)^+ - (\hat{n} \cdot \nabla\phi)^- = 0 \quad (7)$$

4) 후류면에서의 역학적 경계조건 :

$$\Delta p = p^+ - p^- = 0 \quad (8)$$

무한유체장에서 작동하는 일반적인 프로펠러의 단독성능 해석과는 달리 waterjet system은 제한된 영역에서 작동하기 때문에 입구면과 출구면에 별도의 경계조건을 부과할 필요가 있다.

5) 덕트 입구면 S^{D^+} 에서의 경계조건 :

$$\hat{n} \cdot \vec{V}_i = \hat{n} \cdot \vec{V}_s + \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{Q_i}{A_i} \quad (9)$$

6) 덕트 출구면 S^{D^-} 에서의 경계조건 :

$$\int_{S^{D^+}} \hat{n} \cdot \vec{V}_i dS + \int_{S^{D^-}} \hat{n} \cdot \vec{V}_j dS = 0 \quad (10)$$

2.4 적분방정식

물체경계면에는 normal dipole과 source를 분포하고 후연반류면에 dipole을 분포하면 Green정리로부터 임의의 제어점 \vec{p} 에서의 섭동속도 포텐셜을 다음과 같은 적분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{p}) = & \int_{S^a} -\phi(\vec{q}) \frac{\partial}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS + \int_{S^b} -\frac{\partial \phi(\vec{q})}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS \\ & + \int_{S^{D^+}} -\phi(\vec{q}) \frac{\partial}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS + \int_{S^{D^-}} -\frac{\partial \phi(\vec{q})}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS \\ & + \int_{S^c} -\phi(\vec{q}) \frac{\partial}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS + \int_{S^d} -\frac{\partial \phi(\vec{q})}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS \\ & + \int_{S^w} -\Delta \phi_w \frac{\partial}{\partial n_q} G(\vec{p}, \vec{q}) dS \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $G(\vec{p}, \vec{q})$ 는 Green 함수를 나타내며, \vec{p}, \vec{q} 는 각각 제어점과 특이점을 나타낸다.

3. 관 내부 유동 해석

3.1 내부유동문제 해석을 위한 가정

적분방정식(11)을 이산화된 형식으로 표현할

수 있다. 출구면 조건 (9)와 동력학적 경계조건(4)을 통해 알 수 있는 법선방향의 유량 ($\partial \phi / \partial n$)으로부터 미지항과 기지항으로 정리하면 식(12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \phi_{i(p)} + \sum_{j=1}^{N^B} \phi_j \int_{S_j} \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ & + \sum_{i=1}^{N^E} \Delta \phi_{T,E} \int_{S_{T,E}} \frac{\partial G}{\partial n} dS + \sum_{i_b=1}^{N^{D^-}} \phi_{i_b} \int_{S_{i_b}} \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ & + \sum_{i=1}^{N^E} \Delta \phi_{T,E} \int_{S_{T,E}} \frac{\partial G}{\partial n} dS + \sum_{i_b=1}^{N^{D^-}} \phi_{i_b} \int_{S_{i_b}} \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ & = \sum_{j=1}^{N^B} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_j \int_{S_j} G dS - \sum_{i_b=1}^{N^{D^-}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{i_b} \int_{S_{i_b}} G dS \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 N^B 는 임펠러와 스테이터, 덕트에 있는 패널수를 나타내고, N^{D^+}, N^{D^-} 는 입구면과 출구면의 패널수를 의미한다. 식(12)에 Kutta 조건을 적용하면 총 미지항의 개수는 $N = N^B + N^{D^+} + N^{D^-}$ 이다.

3.2 임펠러, 스테이터, 덕트의 이산화

수치해석을 위하여 임펠러와 스테이터, 덕트의 표면을 사각형 패널로 이산화 하였으며, Fig.5에 도시 하였다. 임펠러와 스테이터의 앞날부근은 다른 부분에 비하여 유동이 급격히 변하는 곳이다. 따라서 코오드 방향으로 Cosine 분할법을 사용하면, 날개의 앞날과 뒷날 부근에 상대적으로 더 많은 수의 패널이 배치되어 이 부근에서 급격히 변화하는 유동현상을 좀 더 정확하게 표현하는 것이 가능하다.

반경방향으로의 분할은 통상적으로 Half-Cosine 공식을 사용하여 분할하여왔다. 하지만 물 분사 추진기의 경우 임펠러 날개끝의 코오드길이 가 길고, 덕트가 바로 인접하여 위치하고 있으므로 오히려 수치적으로 불안정한 해를 주게된다. 또한 스테이터의 경우 덕트표면에 부착되기 때문에 임펠러와 동일한 문제에 봉착하게 된다. 따라서 본 논문에서는 반경방향으로 등간격으로 분할하였다.

4. Shrouded propeller를 이용한 검증

본 논문에서 사용한 패널법을 검증하기 위하여 Shrouded propeller와 비교 검증을 하였다. POD형 워터제트 추진장치와는 달리 Stator가 없이 실린더와 프로펠러만의 조합으로 이루어져있으며, 본 프로그램의 관내유동에 대한 적용의 타당성을 검증할 수 가 있다.

Shrouded propeller의 제원(Van Manen 1962)에 의하여 Fig. 1와 같이 shrouded propeller를 사각 패널로 형상화된 모습이다. propeller는 코오드방향 40개, 반경방향으로 8개의 패널로 구성되었으며, 축방향으로 100개, 반경방향으로는 30개의 패널로 구성되었다. Fig. 1는 helical type으로 형상화한 것이다. 일반적으로 보다 정확한 계산을 위하여 helical-type을 사용하므로, 본 논문에서도 helical-type의 덕트로 구성하였다.

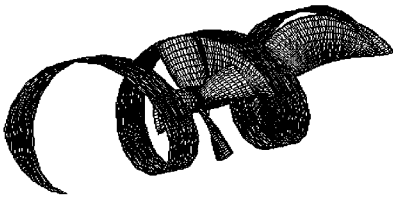


Fig. 1 Geometrical representation for a elical type duct and shrouded propeller by panels

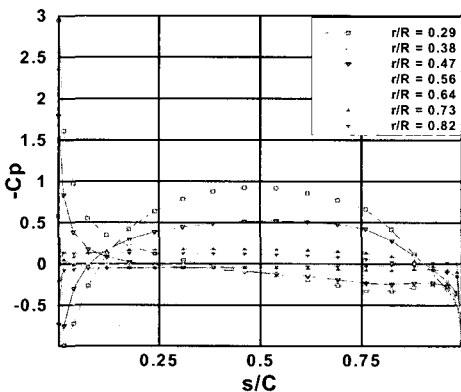


Fig. 2 Pressure distribution on shrouded propeller

Fig. 2는 날개에서의 압력분포를 나타내었다. 덕트와 가까운 뒷날에서는 조금 불안정한 해를 보 이다. Fig. 3은 날개에서의 하중분포이며, Fig. 4는 성능계수들의 실험결과와 계산결과를 비교하고 있다. 비교적 잘 일치하는 결과를 보인다.

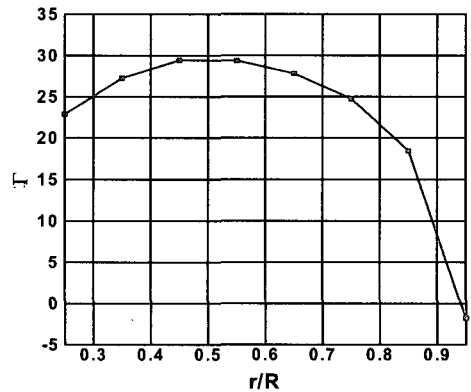


Fig. 3 Circulation distribution on shrouded propeller

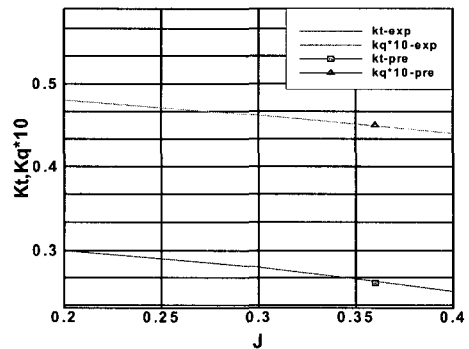


Fig. 4 Comparison of $\cdot K_T, 10 \cdot K_Q$ between experiment and computation

5. POD형 워터제트의 성능해석

POD형 워터제트에 대한 제원은 Table 1과 같다. 본 논문에서는 덕트에서의 제어점과 프로펠러 날개끝 부근에서의 특이점과의 중첩으로 인해 해의 정확성이 떨어지는 직선형 덕트보다는 보다 해의 정확성을 고려하여 날개 상류에서는 피치를 따라 유선방향으로 패널을 유지 시키고, 스테이터

하류 부분에서는 후류면과 일치하도록 패널을 구성하였다. 따라서 Fig. 5에서와 같이 패널을 구성하여 계산을 수행하였으며, 날개끝에서의 해의 안정성을 위하여 날개 코드방향의 패널은 같은 크기로 등분할하였으며, 덕트의 축방향으로는 임펠러와 스테이터 부근에서 인렛부보다 조밀하게 구성하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 임펠러와 스테이터에서의 압력분포를 도시하고 있다. 스테이터에서는 노즐에 가까워 지면서 속도가 줄어 들고 압력이 높아지는 것을 볼 수가 있다. Fig. 8에서는 스테이터에 비해서 임펠러에 많은 하중이 분포함을 보여주고 있다. 특히 본 연구모델의 형상적인 특징으로 인하여, 스테이터에서는 음의 값이 계산 나온 것을 알 수 가있다. 본 계산에서는 반복계산방법을 사용하여, 반복수가 증가할수록 임펠러에 걸리는 하중이 줄어들면서 수렴하는 것을 볼 수가 있었다.

6. 모형 시험 결과와의 비교

모형시험에 사용된 POD 모형은 1/3.5의 scale로 제작 되어 졌으며, 워터제트에는 19개의 압력관을 Fig. 12와 같이 정의된 위치의 각 section에 3 또는 4개의 관을 설치하여 계측된 압력의 평균값을 사용하였다. Fig. 9는 압력탭이 설치된 모형을 보여주고 있으며, 입구부근에는 symmetric한 날개단면 형상의 3개의 유동안내깃도 보여주고 있다.

워터제트의 성능해석시 사용하는 다음과 같은 무차원수를 사용하였다.

유량계수 $J_Q = \frac{Q_j}{nD^3}$

수두계수 $K_H = \frac{gH}{n^2D^2}$

토크계수 $K_Q = \frac{Q_t}{\rho n^2D^5}$

여기서 D 는 임펠러의 지름, Q_j 는 유량, n 은 회전수, g 는 중력가속도, H 는 수두증가, Q_t 는

임펠러의 토크이다. Fig. 10은 워터제트의 성능계수들을 수치해석 계산결과와 실험결과를 비교한 것이다. 실험모형 제작시의 간극의 효과를 감안하면 비교적 잘 일치한다고 볼 수가 있다.

Table 1 Principal particulars of propeller and stator for presented POD waterjet system

	Rotor	Stator
No. of blades	5	11
Hub ratio	0.44	0.44
$(P/D)_{mean}$	0.76	

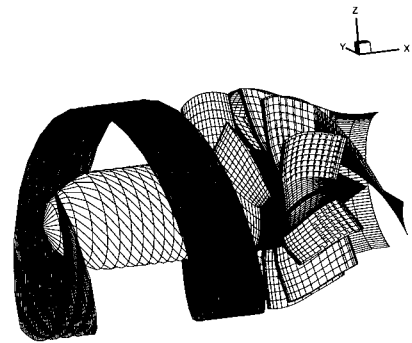


Fig. 5 Geometrical representation for a helical type duct and POD waterjet system by panels

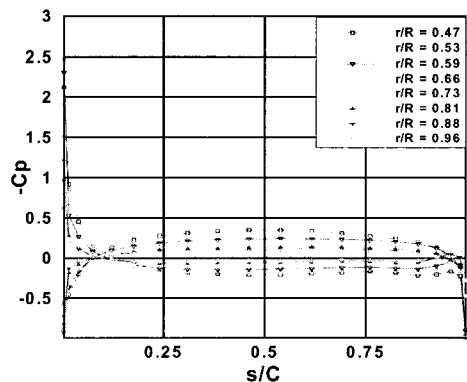


Fig. 6 Pressure distribution on impeller of POD waterjet system

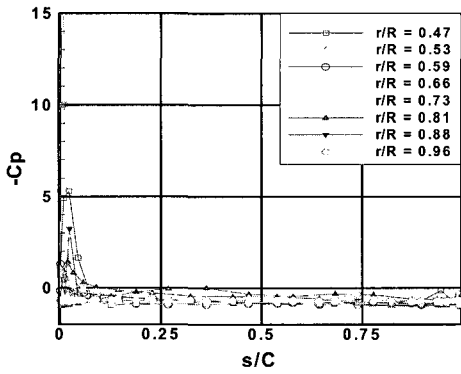


Fig. 7 Pressure distribution on stator of POD waterjet system

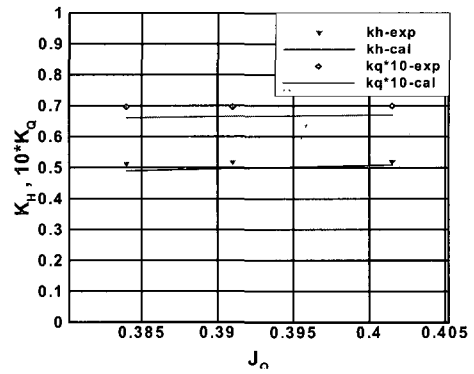


Fig. 10 Comparison of $K_H, 10*K_Q$ between experiment and computation

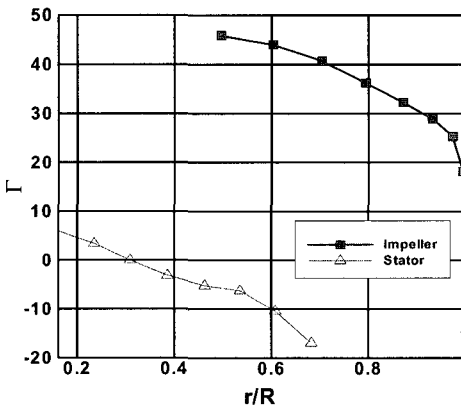


Fig. 8 Circulation distribution on POD waterjet system

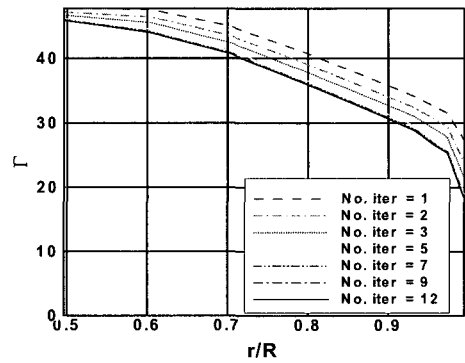


Fig. 11 Convergence of circulation on impeller

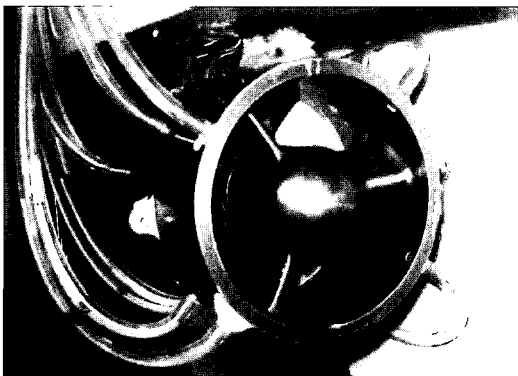


Fig. 9 1/3.5 scale model

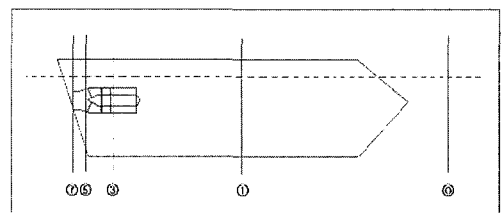


Fig. 12 Definition of station number

7. 결론 및 고찰

본 논문에서는 POD형 물분사추진장치의 성능 해석을 위해서 포텐셜을 기저로한 패널법을 사용하였다. 경계 표면에 특이점을 직접 분포시켜, 3

차원 형상을 보다 정확하게 고려하였으며, 그 계산의 검증을 위해 사용한 shrouded propeller에서는 본 방법의 타당성을 입증하였다. 이를 토대로 POD형 워터제트에도 적용하여 실험결과와 성능계수들을 비교하여 만족할 만한 결과를 얻을 수가 있었다.

참 고 문 헌

- 김영기, 이창섭, 이진태, 1991, "포텐셜을 기저로 한 양력판 이론에 의한 프로펠러의 정상 및 비정상 성능해석," 대한조선학회, 추계학술대회 논문집.
- 윤일성, 이창섭, 송인행, 김기섭, 1996, "패널법에 의한 물 분사 추진장치의 성능해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집.
- Lee, J.T., 1987, A potential based panel method for the analysis of marine propellers in steady flow, Ph.D Thesis, MIT., 150p.

Van Manen.,J.D., 1962, " Effect of radial load distribution on the performance of shrouded propellers", Spring meeting of R.I.N.A.



< 김 현 열 >



< 김 문 찬 >



< 전 호 환 >



< 정 석 호 >