

정상 및 비정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능해석

김 광*, 표상우*, 서정천*

Steady/Unsteady Analysis of Ducted Propellers by Using a Surface Panel Method

by

Kim Kwang*, Pyo Sangwoo* and Suh Jung-Chun*

요 약

본 논문에서는 교란 포텐셜을 기저로 하는 패널방법을 사용하여 정상 및 비정상 유동중의 덕트 프로펠러 성능해석을 수행하였다. 경계면은 쌍곡면패널로 이산화하였으며, 각 경계조건은 패널의 중심점에 적용하였고 Kutta조건의 수렴성 향상을 위해 Suh[1]의 방법을 사용하였다. 후류면의 위치계산을 위하여 덕트의 영향을 고려한 비선형 모델을 사용하였다. 비정상 유동중 해석은 시간영역에서 수행하였다.

수치적인 검증은 정상 및 비정상 유동중에 대해서 이루어졌으며 개발된 프로그램이 좋은 수렴성을 가지고 있음을 확인하였다. 날개와 덕트의 간격에 따른 날개의 순환분포 변화를 보였으며 No.19a 덕트를 갖는 Ka4-70 날개(피치비 1.2)에 대해 실험값과 개발된 프로그램의 수치결과를 비교하였다. 비교결과 실험값과 계산값은 좋은 일치를 보이고 있음을 확인하였다.

Abstract

A surface panel method for the analysis of ducted propellers in both uniform and non-uniform onset inflow is developed. A low order, perturbation potential based panel method with an efficient numerical Kutta condition is used. The boundary surface is discretized with hyperboloidal panels and the boundary condition is applied at the panel centroids. The unsteady analysis is based on a time-step algorithm in time domain. Numerical implementation is employed into both steady and unsteady problems. The results with the present method are shown to have good convergence on the circumferential distribution of circulation on the duct. The effect of the propeller tip clearance on the circumferential circulation on the duct is also presented. Numerical results on forces and moments of the propeller and the duct are compared with other numerical results and experimental data.

접수일자 : 1998년 8월 3일, 재접수일자 : 1999년 1월 18일

*서울대학교 조선해양공학과

1. 서론

선박의 대형화 및 고속화로 인해 추진기가 감당해야 할 하중이 커지게 되면서 이로 인해 추진기에 발생하는 공동은 점차 피할 수 없는 현상이 되고 있다. 프로펠러의 공동을 지연시키기 위해, 설계시 공동이 주로 발생하는 프로펠러의 날개부근의 하중을 줄여주거나 덕트를 씌우는 노력이 행해져왔다. 이 중 덕트는 공동의 지연뿐만 아니라 선박의 추진효율 및 조종성의 향상을 가져오기 때문에 오래전부터 많이 사용되어 왔다.

덕트 프로펠러에 대한 연구는 주로 실험에 의존해왔으며[2] 이론적 연구는 대체로 선형이론과 정상 유동중에서의 축대칭 덕트에 집중되어왔다. 초창기에는 덕트를 양력면, 프로펠러를 무한원판 또는 양력선으로 표현하여 계산하였으나[3] 보다 정확한 형상의 표현이 요구되면서 비선형 양력면이론을 거쳐 표면 패널법으로 발전되어 왔다. 초기 표면 패널법은 계산시간을 줄이기 위하여 덕트는 표면 패널법으로 프로펠러는 양력면이론을 근거로 해석한 후 상호 간섭효과를 반복계산으로 처리하였다[4]. 그 후 덕트와 프로펠러를 동시에 표면 패널법으로 계산하는 방법들이 제시되어 왔다 [5],[6]. 그러나 이들 수치방법들은 정상 유동중의 덕트 프로펠러의 해석에 대한 것이며 실제 선박의 운항상태인 비정상 유동중에서의 성능해석은 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 교란 포텐셜을 기저로 하는 패널 방법을 사용하여 정상 및 비정상 유동중의 덕트 프로펠러 주위의 유동을 계산하는 프로그램을 개발하였다. 수렴성 향상을 위해 Suh[1]의 Kutta조건을 적용하였으며 날개의 후류면 위치계산을 위하여 덕트의 영향을 고려한 비선형 모델을 사용하였다. 비정상 유동중 해석은 정상 유동중의 해석 결과를 바탕으로 매 시간마다 각 날개의 위치에서 해를 새로 계산하는 방법을 사용하여 수행하였다.

2. 지배 방정식

정상 및 비정상 유동중의 프로펠러 주위의 유동을 해석하기 위해 포텐셜을 기저로 한 패널 방법

이 널리 사용되어 왔으며 그에 대한 자세한 설명은 Lee[7]와 Hsin[8] 등에 언급되어 있다. 덕트를 가진 프로펠러에 대해서도 같은 지배방정식을 사용하며 그 식은 다음과 같다.

$$2\pi\phi_p = \int \int_{S_B} \left[\phi_a \frac{\partial}{\partial n_a} \left(\frac{1}{R(p;q)} \right) - \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_a \frac{1}{R(p;q)} \right] dS + \int \int_{S_W} (\Delta \phi)_a \frac{\partial}{\partial n_a} \left(\frac{1}{R(p;q)} \right) dS \quad (1)$$

여기서, p, q 는 각각 유기속도 포텐셜의 계산점과 특이점을 표시하며 $R(p;q)$ 는 두점사이의 거리를 나타낸다. 덕트를 가진 프로펠러 S_B 는 날개와 허브 그리고 덕트로 나눌 수있으며 그 후류면 S_W 는 날개 및 덕트의 후류면으로 나누어 생각할 수 있다.

3. 수치해석

정상 및 비정상 유동중에서 지배방정식 (1)을 수치적으로 풀기 위하여 다음의 방법들을 사용하였다.

DUCTED PROPELLER (KA4-70 + JD75)
(F/D=1.4, Gap=0.8% R)

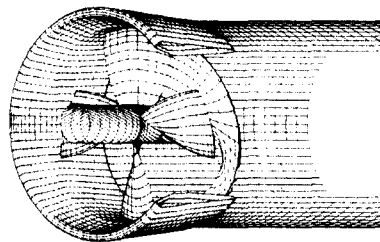


Fig.1 Panel arrangement for a ducted propeller

3.1 정상 유동중의 해석

지배방정식을 수치적으로 풀기 위하여, 프로펠

러 날개, 허브, 덕트와 그 후류면들을 곡면패널로 이산화하였으며 그 모양은 Fig. 1에 보였다. 사용된 다이폴과 소스가 패널위에서 일정세기를 갖는다고 가정하면 식(1)은 다음과 같이 이산화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^{N_T} a_{i,j} \phi_j + \sum_{m=1}^{M_P+M_D} (\Delta \phi)_m W_{i,m} \\
 = & \sum_{j=1}^{N_T} b_{i,j} \sigma_j \quad (2) \\
 & i=1,2,\dots,N_T
 \end{aligned}$$

여기서, N_P, M_P 는 각각 주날개의 코드방향과 스팬방향의 패널개수이고 N_D, M_D 는 주날개 위 덕트부분의 코드방향과 회전방향의 패널개수이며 N_H 는 주날개 허브부분의 패널개수이다. 이 때 주날개 위의 총 패널개수 N_T 는 $N_P \times M_P + N_D \times M_D + N_H$ 로 나타낼 수 있다. 영향계수 $a_{i,j}$ 와 $b_{i,j}$ 는 j 번째 패널에 분포되어 있는 단위세기의 다이폴과 소스에 의해서 i 번째 패널의 계산점에 유기되는 속도포텐셜이다. 후류영향계수 $W_{i,m}$ 는 날개 및 덕트 후류의 m 번째 스트립위의 패널에 분포되어 있는 단위세기의 다이폴들에 의해서 i 번째 패널의 계산점에 유기되는 속도포텐셜이다. $(\Delta \phi)_m$ 은 날개 및 덕트 뒷날의 윗면과 아랫면의 포텐셜차이며 σ_j 는 날개 및 덕트 위에서의 소스세기이다.

이산화된 식(2)의 근사해를 구하기 위해서, 덕트의 회전방향으로는 균일분포, 프로펠러 날개의 반경방향으로는 반코사인 분포를, 그리고 프로펠러 날개 및 덕트의 코드 방향으로는 코사인분포를 사용하여 패널을 분포하였고 후류면에서는 반코사인 분포를 사용하였다(Fig. 1). 이는 유동변화가 급격하게 이루어진다고 생각되는 날개 끝단과 날개 앞날, 그리고 날개 뒷날에 더 조밀하게 패널을 분포시키기 위해서이다. 후류면의 위치계산을 위해 후류면의 시작지점과 끝지점에서 덕트 및 프로펠러

에 의해 유기되는 속도를 계산하고 그를 이용하여 후류면의 새로운 위치를 찾아 후류면에서 경계조건을 만족시키는 비선형 모델[8]을 사용하였다. 계산시 날개끝 보조텍스는 코어크기가 프로펠러 반경의 0.2%이고 프로펠러 최대 순환의 80% 크기를 가지며 후류면과 같은 위치에 놓인다고 가정하여 포함시켰다. 영향계수 및 행렬의 계산, 그리고 Kutta 조건은 Pyo등[9]의 방법을 사용하였다.

3.2 비정상 유동중의 해석

시간 영역에서 정의되는 비정상 유동문제를 풀기 위해 시간을 균일 간격으로 나누고, 매 시간, 주 날개에서 정상유동 문제를 푼 후, 그 결과를 이용하여 나머지 날개에 대한 특이점 값들을 매 시간 새로 계산하였다. 이 계산에 사용된 이산화된 식은 다음과 같다[10].

$$\sum_{j=1}^{N_T} a_{i,j} \phi_j(n) + \sum_{m=1}^{M_P+M_D} W_{i,m,1} (\Delta \phi)_{m,1}(n) = B_i(n)$$

$$\begin{aligned}
 B_i(n) = & \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_T} b^k_{i,j} \sigma^k_{i,j}(n) - \\
 & \sum_{k=2}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_T} a^k_{i,j} \phi^k_j(n) - \\
 & \sum_{k=2}^{N_B} \sum_{m=1}^{M_P+M_D} \sum_{l=1}^{N_W} W^k_{i,m,l} (\Delta \phi)^k_{m,l}(n) \\
 & \sum_{m=1}^{M_P+M_D} \sum_{l=2}^{N_W} (\Delta \phi)_{m,l}(n) \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, N_B 는 프로펠러의 날개수이며, N_W 는 날개 및 덕트 후류면의 유선방향 패널개수이고 n 은 시간을 나타내며 첨자 k 는 k 번째 날개에서의 값을 의미한다.

매 시간 모든 특이점의 값을 알기 때문에 날개의 뒷날에서 떨어져 나가는 보조텍스의 세기를 계산할 수 있고, 매 시간마다 전 시간에 구해진 값들을 이용하여 위의 절차를 되풀이하면 원하는 값들을 구할 수 있다. 이 방법은 매 시간 모든 날개

를 동시에 푸는 직접적인 방법보다 수렴을 위해 더 많은 횟수의 계산을 하여야하는 단점은 있지만 계산해야 하는 행렬의 크기가 작고 계산시간이 덜 걸린다는 장점이 있다. 자세한 계산은 김 등[11]의 방법을 사용하였다.

4. 계산결과

4.1 정상 유동중의 덕트

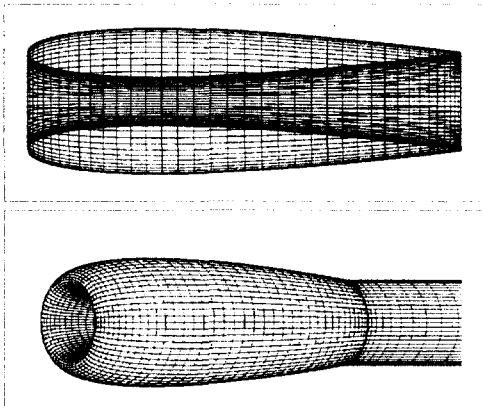


Fig. 2 Panel arrangement for a long duct

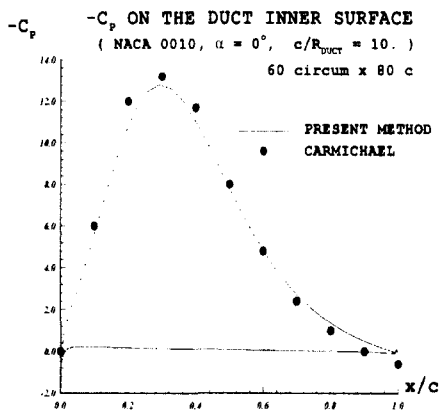


Fig. 3 Pressure distributions on the inner surface of the duct

개발된 프로그램을 검증하기 위한 첫 번째 과정으로 프로펠러가 없는 축대칭 덕트에 대한 계산을 수행하였다. 덕트의 단면은 NACA0010이고 받음각은 0도이며 덕트의 앞날 반경은 덕트 코드길이의 1/10이다. 이러한 긴 덕트의 계산은 압력계산시 많은 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 계산의 경우 코드방향으로는 코사인 분포를, 원호방향으로는 균일 간격을 사용하여 패널을 분포시켰으며 사용된 패널 수는 각각 80,60개이다 (Fig. 2). 계산에서 구한 덕트 안쪽의 압력분포가 Fig. 3에 보여지고 있으며 이를 고차의 패널방법 [12]의 결과와 비교를 하였다. 비교 결과 서로 좋은 일치성을 보임을 알 수 있다.

4.2 정상 유동중 덕트프로펠러

정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능 해석프로그램의 수렴성을 검증하기 위하여 피치비 P/D 가 1.4인 Ka4-70형태의 프로펠러와 JD75형태[13]의 덕트를 갖는 덕트 프로펠러에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 4는 덕트의 코드방향 패널개수를 40개로, Fig. 5는 덕트의 원호방향 패널개수를 20개로 고정시킨 상태에서 덕트의 회전방향 순환변화를 도시하고있으며 두 경우 모두 좋은 수렴성을 보여주고 있다. Fig. 5에서 코드방향 패널개수가 30개인 경우 다른 경우와 차이를 보여주고 있는데 이는 패널개수가 덕트를 표현하기에 너무 적어서이며 이로부터 최소한 40개의코드방향 패널개수가 필요함을 알 수 있다.

프로펠러와 덕트간의 간격에 따른 덕트의 순환변화를 Fig. 6에 나타내었다. 계산에 사용된 패널개수는 날개의 코드방향 및 반경방향으로 각각 20,10개이며 덕트의 회전방향 및 코드방향으로 각각 20,40개이다, 간격이 감소하면서 덕트의 순환 최대값이 증가하며 회전방향 변화가 커짐을 볼 수 있다. 이는 간격이 감소하면서 덕트의 압력면 주위의 유속이 빨라져 압력이 감소하므로써 생기는 결과로 다른 수치계산 결과와 일치한다[4].

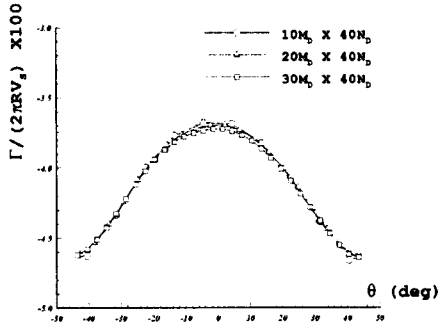


Fig. 4 Convergence test of a ducted propeller with different circumferential panels on the duct in steady flow

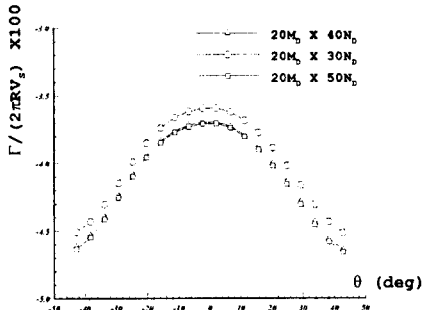


Fig. 5 Convergence test of a ducted propeller with different chordwise panels on the duct in steady flow

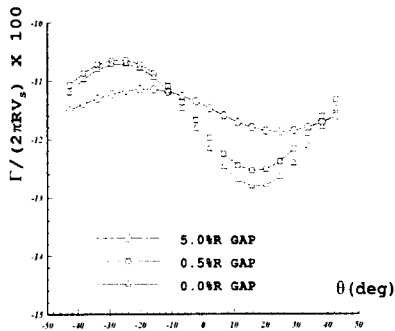


Fig. 6 Influence of tip gap on the radial distribution of circulation on the blades

마지막으로 실험결과가 있는 No. 19a형태[5]의 덕트에 대해서 계산을 수행하고 그 결과와 실험값을 Fig. 7에 도시하였다. 계산된 덕트 및 프로펠러의 K_T, K_Q 가 전진비가 큰 경우를 제외하고는 실험값과 좋은 일치를 보여주고 있다.

전진비가 큰 경우 덕트의 추력 K_{TD} 는 실험값과 좋은 일치를 보이는 반면 프로펠러의 추력은 실험값 보다 크게 토오크는 작게 계산되었는데 이는 가정된 마찰계수 C_F 값이 적절치 않아서인 것으로 추정된다. 이 때 계산에 사용된 덕트의 길이는 프로펠러의 반경과 같으며 간격은 프로펠러 반경의 0.0125 배이고 프로펠러 날개는 Ka4-70형태이며 피치비 P/D 는 1.2이다. 사용된 패널개수는 Fig. 6에서와 같으며 마찰계수 C_F 는 0.0035를 사용하였다.

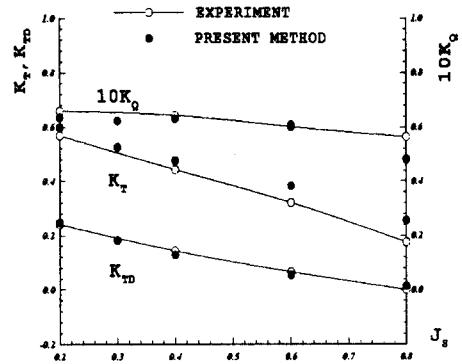


Fig. 7 K_T & K_Q for the blade and the duct in steady flow

4.3 비정상유동중 덕트프로펠러

비정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능 해석 프로그램의 수렴성을 검증하기 위해서 3 cyclic 유입 유동[11]을 사용하여 계산하였다. 주날개 위의 한 점에 대해($r/R=0.72$) 날개가 회전하면서 변화하는 순환을 Fig. 8과 9에 도시하였다. 코드방향 및 반경방향으로 각각 20,10개로 고정된 날개의 패널개수에 대해 Fig. 8은 덕트의 회전방향 패널

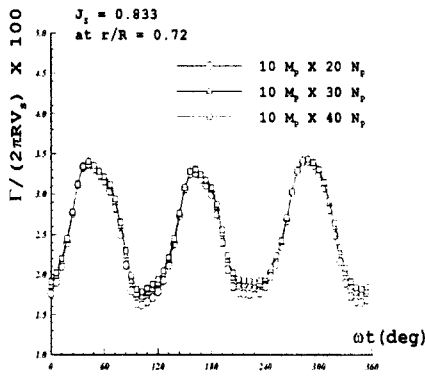


Fig. 8 Convergence test of a ducted propeller with different chordwise panels on the blade in unsteady flow

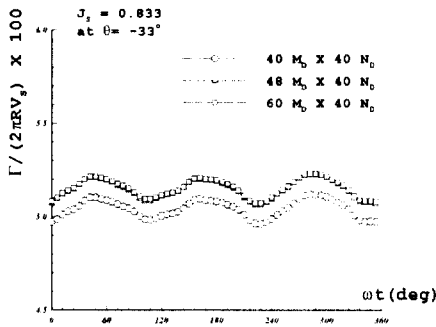


Fig. 9 Convergence test of a ducted propeller with different circumferential panels on the duct in unsteady flow

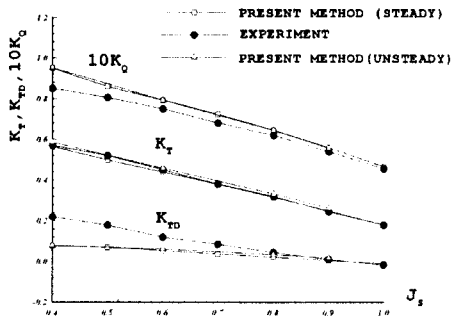


Fig. 10 K_T & K_Q for the blade and the duct

개수를 10개로 고정된 후 덕트의 코드방향 패널 변화에 따른 수렴성을, Fig. 9는 덕트의 원호방향 패널개수를 40개로 고정된 후 덕트의 원호방향 패널개수에 대한 수렴성을 보여주고 있다. 마지막으로 비정상 프로그램의 성능검증의 하나로 정상 유동의 경우를 비정상 프로그램으로 해석하여 그 결과를 실험값 및 정상유동 프로그램과 비교하였다. 두 결과가 좋은 일치를 보이고 있음을 확인하였으며 Fig. 10에 도시하였다. 계산에 사용된 덕트와 프로펠러는 Fig. 7과 같은 No. 19a와 Ka4-70이다.

5. 결 언

패널방법을 이용하여 정상과 비정상중의 덕트 프로펠러의 성능을 해석하는 프로그램을 개발하였다. 계산 결과는 좋은 수렴성을 보였으며 계산값과 실험값과도 좋은 일치를 보였다. 본 논문에서 택한 방법이 덕트 프로펠러 추력 및 토크 계산 활용 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J-C Suh, J-T Lee and S.B. Suh., "A Bi-Linear Source and Doublet Distribution Over a Planar Panel and Its Applications to Surface Panel Methods" 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 1992.
- [2] J. D. van Manen and M. W. C. Oosterveld., "Analysis of Ducted-Propeller Design" Annual meeting, SNAME, NewYork , 1966.
- [3] W. B. Morgan, "Theory of the Annular Airfoil and Ducted Propeller," Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, 1962.
- [4] J. E. Kerwin, S. A. Kinnas, J.-T. Lee and W.-Z. Shih, "A Surface Panel Method for the Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers," Trans. SNAME, No.4, 1987.
- [5] C. Kawakita, "A Surface Panel Method for Ducted Propellers with New Wake Model

- Based on Velocity Measurements," *Journal of SNAJ*, Vol.172, 1992
- [6] 문일성, 이창섭, 김영기, "포텐셜을 기저로한 패널 법에 의한 덕트 프로펠러의 정상 성능해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, 1994.
- [7] J.-T. Lee, "A Potential Based Panel Method for The Analysis of Marine Propellers," Ph.D. thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, August, 1987.
- [8] C-Y Hsin, "Development and Analysis of Panel Method for Propellers in Unsteady Flow," Ph.D. thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, September, 1990.
- [9] D. S. Greeley and J. E. Kerwin, "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow," *Trans. SNAME*, Vol.90, 1982.
- [10] Sangwoo Pyo, Jung-Chun Suh, Kwang Kim, "Improvements on a Steady Panel Method for Propellers," *Proceedings of CHMHM'97*, Shanghai, China, August 25-27, 1997
- [11] 김 광, 서정천, 표상우 "비정상 유동중의 프로펠러 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, 1997
- [12] R. L. Carmichael and L. L. Erickson, "Pan Air-a Higher Order Panel Method for Predicting Subsonic and Supersonic Linear Potential Flows About Arbitrary Configurations," *AIAA Paper 81-0252*, 1981.
- [13] Z.-B. Sheng, J.-S. Yang, , and Y.-Y. Cai, "A Collection of Series Test Charts of Marine Propellers of China", Published by the Editorial Office of Shipbuilding of China, 1983