

포텐셜 기저 패널법에 의한 프로펠러 보호터널의 형상변화에 관한 연구

서 성 부†

(원고접수일 : 2007년 5월 28일, 심사완료일 : 2007년 7월 10일)

Study on tunnel geometry protecting a propeller using potential based panel method

Sung-Bu Suh†

Abstract : The fishing boat propulsion system employing the modified stern shape and the tunnel to protect a propeller is developed to increase the cruise speed and reduce the problem resulting from the open propeller accidentally catching the waste net and cable on the sea. Using 3 different tunnel types, the model test was performed in the circular water channel and the panel method based on the potential theory is applied to analyze the open water performance of the propeller. In the numerical analysis using the potential-based panel method, it calculates the hydrodynamic interaction between the propeller and the tunnel and evaluates the effect of the tunnel geometry. From the numerical and experimental results differing tunnel geometries, the propulsion efficiency is increased by the larger diameter of the inlet than the outlet of the tunnel and the smaller gap between the propeller tip and the tunnel internal surface. These results provide the information of the propeller system with the tunnel and the hydrodynamic interaction between the propeller and the tunnel.

Key words : Potential based(포텐셜 기저), Panel method(패널법), Protect tunnel(보호터널), Thrust coefficient(추력계수), Torque coefficient(토크계수)

1. 서 론

최근 국내의 연안 어선들의 노출된 프로펠러에 부유폐어망, 로프 등이 감기는 해난사고를 방지하고 고속화를 위하여, 기존 선미형상을 터널 형상으로 개선하고 프로펠러에 보호터널을 부착한 연안어선 개발이 진행되고 있다⁽¹⁾.

본 논문에서는 프로펠러를 보호하기 위해 감싸

고 있는 이러한 보호터널 형상을 덕트(Duct) 형태로 단순화 하여 포텐셜 기저 패널법을 이용한 수치적 계산을 수행하였으며, 회류수조에서의 모형시험 결과⁽²⁾ 와 비교하여 보호터널의 형상 변화가 프로펠러 단독특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 계산에 사용된 보호터널 형상은 3가지 종류의 덕트 형태로, 평행형(parallel type), 유속 감속형(Diffusion type) 및 유속 가속형

† 교신저자(동의대학교 조선해양공학과), E-mail: sbsuh@deu.ac.kr, Tel: 051)890-2591

(Contraction type) 등이다.

덕트 프로펠러의 유동 해석은 여러 학자들에 의해 수행되어 왔으나 대부분의 이론적 연구는 선형 이론과 균일 유동 중에서의 축대칭 덕트에 집중되었다. 국내에서는 1980년대 이후 실험적, 이론적 연구가 이루어 졌으며⁽³⁾ 특히, 실선 장착을 위한 모형 시험 및 결과 해석이 에너지 절약과 연관하여 이루어 졌다⁽⁴⁾. 이후 포텐셜을 이용한 패널법에 의한 이론적 연구가 진행되고 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

본 논문에서는 포텐셜을 기저로 한 패널법을 사용하여 덕트 프로펠러에 작용하는 유입 유동은 균일 유동으로 가정하고, 정상 상태의 유동을 해석한다. 패널법을 사용하여 속도 포텐셜을 덕트와 임펠러 사이의 상호 영향을 반복 계산 없이 시스템 일체를 해석한다. 덕트 프로펠러의 형상은 쌍곡면 패널요소⁽⁷⁾로 근사화 하고 Kutta 조건은 Suh⁽⁸⁾ 등이 제시하는 방법을 택한다. 덕트-프로펠러에서 덕트와 프로펠러의 상호 간섭을 고려할 경우 전통적으로 덕트-프로펠러는 프로펠러를 해석하여 유기속도분포를 구하고 다시 덕트를 해석하는 방법을 많이 사용하였으나, 본 논문에서는 덕트와 프로펠러를 동시에 해석함으로써 덕트와 프로펠러의 상호 간섭을 좀 더 정확히 고려함과 동시에 계산시간의 향상을 도모하였다.

2. 유동해석

2.1 경계치 문제의 정식화

정상 및 비정상 유동 중의 프로펠러 주위의 유동을 해석하기 위해 포텐셜을 기저로 한 패널 방법이 널리 사용되어 왔으며 그에 대한 자세한 설명은 Lee⁽⁹⁾와 Hsin⁽¹⁰⁾ 등에 언급되어 있다. 덕트를 가진 프로펠러에 대해서도 같은 지배방정식을 사용하며, 우선 경계치 문제의 정식화를 위해 덕트(보호터널) 및 프로펠러가 비점성, 비압축성 유체의 비회전성 무한 유동 중에서 작동한다고 가정한다. 공동(Cavitation)은 발생하지 않는 것으로 간주하며 자유 표면의 영향은 무시한다.

프로펠러의 성능 해석에 적합한 프로펠러의 기준 날개에 고정된 우수 직교 좌표계에서 프로펠러

의 축 중심에 x 축을 위치시키고, 하류 방향을 양으로 하며 그 원점은 프로펠러 면으로 한다. y 축은 프로펠러 기준선과 일치하도록 하며 그 원점은 프로펠러 축 상에 놓는다. z 축은 나머지 두 축과 우수 좌표계를 형성하도록 정의한다.

이상유체(Ideal fluid) 가정 하에서, 유체 영역에서 질량 보존의 법칙이 성립하여야 하므로 지배방정식으로 교란 속도 포텐셜 ϕ 에 대해 Laplace 방정식을 도입한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

프로펠러 주위의 유동을 유일하게 정의하기 위해서 다음과 같은 경계 조건을 부과한다.

- 1) 무한 상방에서의 교란 속도 정지 조건:

$$\nabla \phi = \vec{0}$$

- 2) 프로펠러 날개, 허브 및 덕트 표면에서의 비침투 조건 :

$$\hat{n} \cdot \vec{U}_r + \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$

- 3) 날개 뒷날에서의 Kutta 조건

2.2 적분방정식

지배방정식 (1)을 만족하는 교란 속도포텐셜, ϕ 는

$$\begin{aligned} \phi(\vec{x}) = & \int_{S_B \cup S_D} -\phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} dS \\ & + \int_{S_B \cup S_D} \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n_\xi} G dS \\ & + \int_{S_W} -\Delta \phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} dS \end{aligned} \tag{2}$$

Green 정리로 표현되는 적분 방정식의 적분 구간을 각각의 분할된 경계면 즉, 날개 및 허브 S_B , 덕트 표면 S_D , 후연 반류면 S_W 로 나누어 표현할 수 있다. 여기서 $-\Delta \phi$ 는 프로펠러가 덕트 날개

뒷날에서 후류로 방출되는 포텐셜 차이로 표현되는 법선 다이폴(dipole)의 세기이다. 첨자 ξ 는 적분 변수를 의미한다.

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

\vec{x} = position tor of field point

$\vec{\xi}$ = position tor of surface point

$$R(x;\xi) = |\vec{x} - \vec{\xi}|$$

2.3 프로펠러 날개에의 작용력

물체 표면에서의 교란 속도 포텐셜, ϕ 를 구하여 수치 미분함으로써 유속속도를 구할 수 있으며, 프로펠러 각 반경(Radius) r 에서의 유입 유동 속도, \vec{U}_r 와 합하여 전속도(Total velocity) \vec{V} 를 구하면, Bernoulli 방정식을 이용하여 압력을 계산할 수 있다. 각 반경 r 에서

$$p_\infty + \frac{1}{2} \rho |\vec{U}_A|^2 = p + \frac{1}{2} \rho |\vec{V}|^2 - \frac{\rho}{2} \Omega^2 r^2$$

이므로, 각 반경에서의 유입 속도로 무차원화 된 C_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho |\vec{U}_r|^2} = 1 - \left(\frac{|\vec{V}|}{|\vec{U}_r|} \right)^2$$

덕트 표면에서는 공간 좌표계와 프로펠러에 고정된 좌표계의 상대 운동에 기인하는 비정상 압력 성분을 구할 수 있다.

$$p_\infty + \frac{1}{2} \rho |\vec{U}_A|^2 = p + \frac{1}{2} \rho |\vec{V}|^2 + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

이므로, 각 반경에서의 유입 속도로 무차원화 된 C_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho |\vec{U}_A|^2} = 1 - \left(\frac{|\vec{V}|}{|\vec{U}_A|} \right)^2$$

$$- \left(\frac{|\vec{V}_S|}{|\vec{U}_A|} \right)^2 \frac{2\pi}{J_S} \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{\phi}{R_p V_S}$$

압력을 다시 프로펠러 회전수 n 과 직경 D 를 사용하여 무차원화 하면

$$K_p \equiv \frac{p - p_\infty}{\rho n^2 D^2} = C_p \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{|\vec{U}_r|}{nD} \right)^2 \tag{3}$$

(3)을 날개 표면에서 적분함으로써, 프로펠러 날개에 작용하는 추력과 토크 계수를 구한다.

$$K_T \equiv \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$= \frac{- \int_{S_B} (p - p_\infty) \hat{n} \cdot (-\hat{e}_x) dS}{\rho n^2 D^4}$$

$$= \int_{S_B} K_p \hat{n} \cdot \hat{e}_x \frac{dS}{D^2}$$

$$K_Q \equiv \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$= \frac{- \int_{S_B} (p - p_\infty) \vec{r} \times \hat{n} \cdot \hat{e}_x dS}{\rho n^2 D^5}$$

$$= - \int_{S_B} K_p \frac{\vec{r}}{D} \times \hat{n} \cdot \hat{e}_x \frac{dS}{D^2}$$

3. 수치계산

3.1 프로펠러 및 보호터널 형상 선정

수치계산에 사용된 프로펠러의 주요제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Basic geometry of the propeller

Diameter(mm)	Ship	Model
	550	55
(P/D)mean	0.95	
Ae/Ao	0.85	
No. of blades	3	
Type & section	FPP-MAU	

보호터널 형상은 회류수조에서의 모형시험에 사용된 3가지 종류로, 평행형(Parallel type, I), 감속형(Diffusion type, II) 및 가속형(Contraction type, III) 등을 사용하였다. 모형의 길이는 프로펠러 직경의 1.2배인 66mm로 하였으며 형상별 유입부 및 유출부의 직경은 Table. 2와 같다.

모형시험의 편의를 위해 형상 I의 직경 크기를 형상 II의 유입부 직경 및 형상 III의 유출부 직경과 같은 크기로 제작하였으나, 수치계산은 형상 I의 직경 크기를 2mm씩 추가한 3종류에 대해 수행하였다.

Table 2 Diameter of tunnels

Tunnel type	Diameter(mm)	
	inlet	outlet
Parallel (I)	56.5 (58.75) (60.75)	56.5 (58.75) (60.75)
Diffusion (II)	56.5	65.0
Contraction (III)	65.0	56.5

3.2 이산화 방법

적분 방정식을 해석하기 위해 덕트 프로펠러의 표면을 유한한 크기의 사각형 패널의 집합으로 치환할 필요가 있다. 프로펠러 날개 끝에서의 유동을 좀 더 자세히 계산하기 위하여, 날개 끝에 더 많은 패널이 배열되도록 날개의 반경방향을 Half-Cosine 공식을 사용하여 분할하는 방식이 일반적이다. 하지만 덕트 프로펠러의 경우 에는 이와 같이 분할 할 경우 날개 끝 부근에서 오히려 패널의 모양이 길쭉하게 형성되어 수치해석에 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 반경방향으로 등간격 분할을 선택하였다.

반경위치 r 에서의 각 날개 단면은 캠버(Camber)면을 여현(Cosine)분할 법칙을 따라 다음과 같이 분할하였다.

$$s_n = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi(n-1)}{N_c/2} \right),$$

$$s_{N_c+1-n} = s_n$$

$$n = 1, \dots, N_c/2 + 1$$

여기서, N_c 는 날개의 양쪽 면에 배치될 코드(Chord) 방향 패널의 개수를 의미하며, s 는 코드 길이 c 로 무차원화 한 코드방향 좌표로 $s = 0$ 는 날개 앞날을, $s = 1$ 은 날개의 뒷날을 나타낸다. 이와 같은 방법은 날개의 앞날과 뒷날 부근에 상대적으로 더 많은 수의 패널이 배치되게 되어, 이 부근에서 급격히 변화하는 유동 현상을 좀 더 정확하게 표현하는 것이 가능하다.

프로펠러 날개의 끝 부분은 덕트의 기울기와 함께 일치시켜 날개 끝의 모든 단면이 덕트와 일정한 간격을 유지하도록 하였으며, 각각의 관 요소에서의 제어점(Control point)은 그 패널의 도심에 놓았다.

덕트 프로펠러의 경우 후류면의 반경 수축이 거의 일어나지 않기 때문에 본 논문에서는 반경 수축이 없는 후류면 모형을 사용하였다.

프로펠러 허브(Hub)의 경우, 상류 방향은 타원형 단면으로 가정하였으며 하류는 프로펠러의 허브에서 이탈된 반류면과 허브 표면이 일치 되도록 하였다. 허브 상류방향 캡(Cap)의 길이는 모형시험에 사용된 것의 크기에 변화를 주어 계산하였다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에 보호터널 형상변화에 따른 분할된 날개 표면 및 덕트와 반류면의 이산화한 모습을 나타내었다.

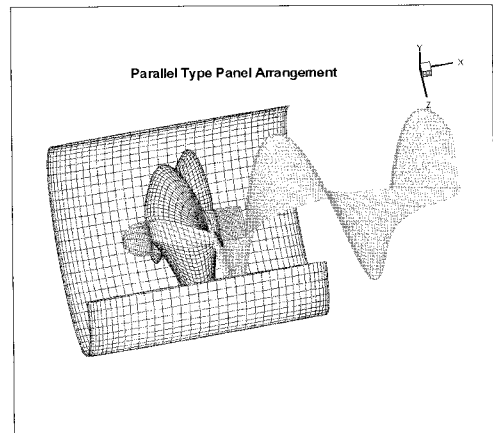


Fig. 1 Panel arrangement for type I

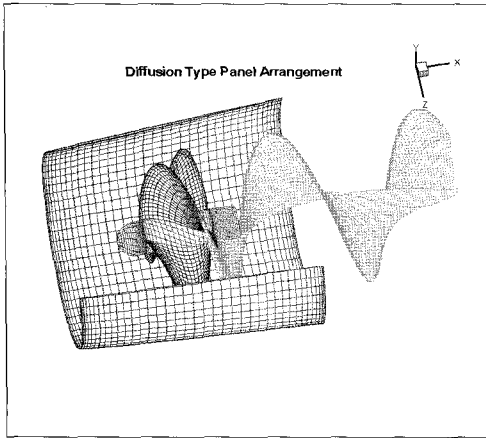


Fig. 2 Panel arrangement for type II

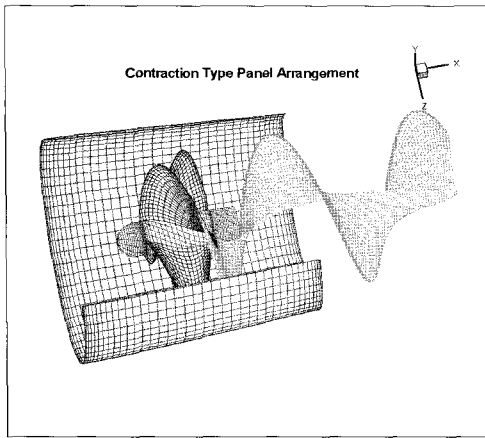


Fig. 3 Panel arrangement for type III

3.3 계산 결과 및 고찰

보호터널을 부착하지 않은 상태에서의 프로펠러 단독성능 계산 결과를 회류수조에서의 실험값 및 MAU 계열 도표^[11]에서의 추정치와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 포텐셜 이론에 의한 점성 효과로 인해 토크의 경우 실험값과 약간의 차이를 보이고 있으나, 추력의 경우 전진계수(Advanced coefficient) $J = V_A/nD$ 가 낮은 범위를 제외하고는 좋은 일치를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 예인수조에서의 모형시험 결과를 토대로 작성된 계열도표에 의한 추정치는 토크는 비교적 잘 일치하고 있는 반면, 추력이 조금 크게 나오고 있다. 이는 전개면적비(A_e/A_o)가 0.85인 프로펠러를 계

열도표의 지원범위 0.3-0.5에서 초월하여 추정한 영향이 있는 것으로도 보여진다.

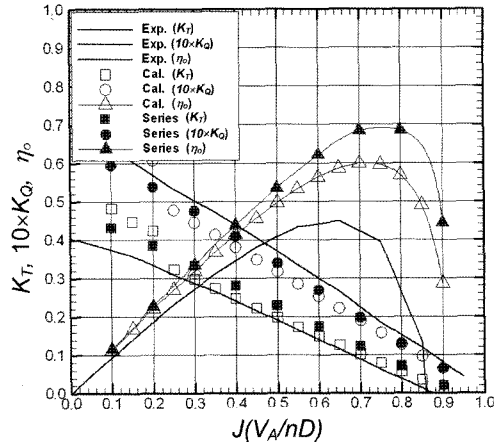


Fig. 4 Open water performance (w/o tunnel)

다음으로 프로펠러와 보호터널과의 간격 차이에 따른 영향을 알아보기 위해 형상 I의 직경변화에 따른 수치계산 수행 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

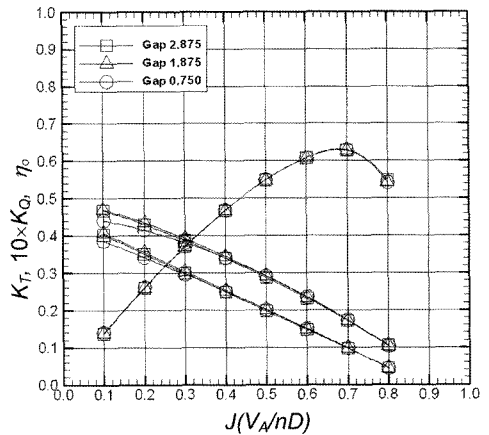


Fig. 5 Gap effect between propeller tip and the tunnel internal surface

덕트와 프로펠러의 간격변화에 따른 단독특성 실험 결과에 의하면^[12], 간격이 적을수록 단독효율은 상승하는 효과를 보이는데 본 논문의 계산결과에서도 미미하지만 이러한 경향을 확인 할 수 있었다. 덕트의 내면에 형성되는 경계층 유동과 프

로펠러 날개 끝 주위에 발생하는 날개 끝 와류 (Tip vortex)의 형성은 레이놀즈 수(Reynolds number)에 따라서 큰 영향을 받는다. 그림에서 낮은 레이놀즈 수의 범위에 해당하는 전진계수 $J=0.2$ 이하의 경우, 추력의 변화보다 토크의 변화가 상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6, 7, 8에서는 프로펠러 보호터널 형상 I, II, III를 장착한 상태에서의 수치계산 결과를 회류수조에서의 모형시험 결과와 비교하여 나타내었다.

그림에서 보는바와 같이 전진계수 $J=0.45$ 이하에서는 보호터널 형상에 관계없이 추력 및 토크 계측치 모두가 프로펠러 단독의 경우 보다 적게 나타남을 알 수 있다. 그러나 모형시험에서 사용된 것 보다 길이가 작은 허브 캡을 사용하여 수행한 수치계산 결과는 추력 및 토크의 감소량이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 채택한 패널법이 날개 앞날의 유동 박리 현상을 고려하지 않은 관계로 입사각이 큰 경우인 낮은 전진계수에서 프로펠러의 성능 추정의 정도가 다소 떨어짐을 감안 하더라도, $J=0.45$ 이하에서는 보호터널 내부에서의 허브 캡의 길이 및 단면적의 크기가 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서의 $J=0.45$ 이하는 김기섭^[13] 등이 제안한 낮은 레이놀즈수가 영향을 끼치는 범위이므로 이에 따른 현상일 가능성도 배제할 수 없어 보인다.

전진계수 $J=0.45$ 이상에서의 계산 결과는 보호터널 형상에 따라 명확하게 구분되어 나타나고 있다. 형상 I의 경우, 추력은 실험값과 좋은 일치를 보이면서 프로펠러 단독상태에서와 유사한 값을 가지지만 토크는 프로펠러 단독상태와 별 차이가 없는 실험값 보다 작음을 알 수 있다. 형상 II의 경우, 추력은 형상 I에서와 같이 실험값과 좋은 일치를 보이지만 프로펠러 단독상태보다 작고 토크는 프로펠러 단독상태에 비해 작아진 실험값보다도 더욱 작은 값을 보이고 있다. 형상 III의 경우, 추력은 이번에도 역시 실험값과 좋은 일치를 보이지만 프로펠러 단독상태보다 큰 값이고 토크는 프로펠러 단독상태보다는 크지만 이 또한

실험값보다는 작은 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 전진계수 J 의 증가로, 점성효과가 큰 날개 끝 와류 발생의 영향이 커지게 되는 변화로 생각되어진다. 즉 프로펠러 평면 후류에서 유속이 더욱 증가하는 형상 III이 형상 I의 경우 보다 그 영향이 큰 반면에, 후류에서 유속이 점점 감소하는 형상 II의 경우에는 그 영향이 반대의 경향을 보이고 있다. 또한 이러한 변화는 점성효과가 큰 토크 값 에서 더욱 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다.

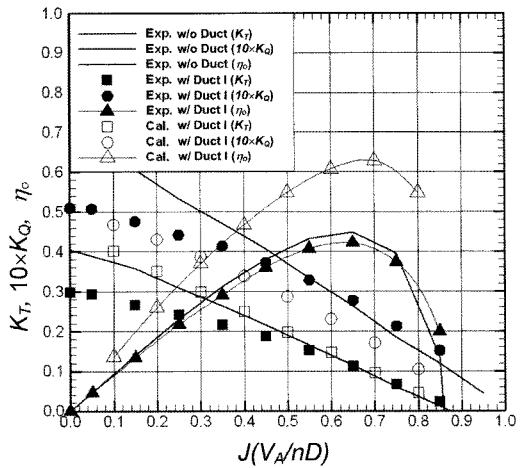


Fig. 6 Open water performance (w/ type I)

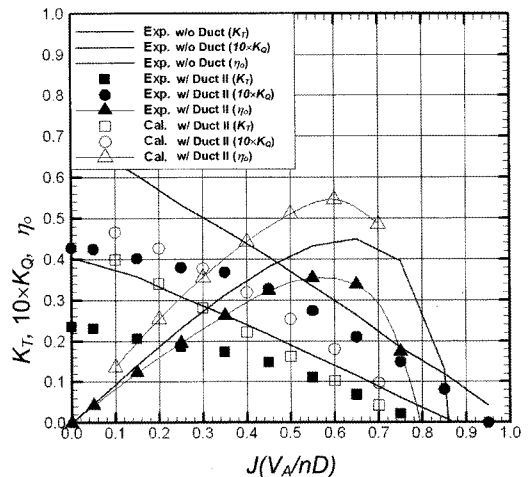


Fig. 7 Open water performance (w/ type II)

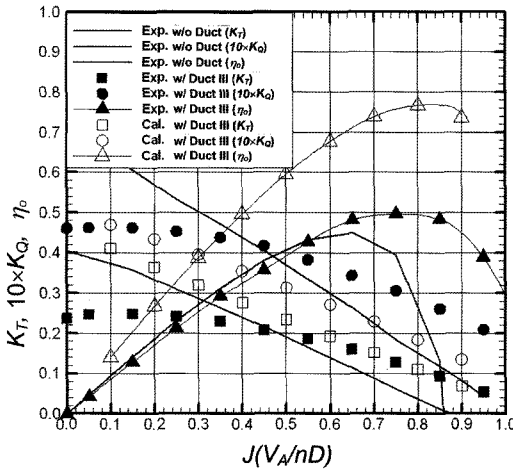


Fig. 8 Open water performance (w/ type III)

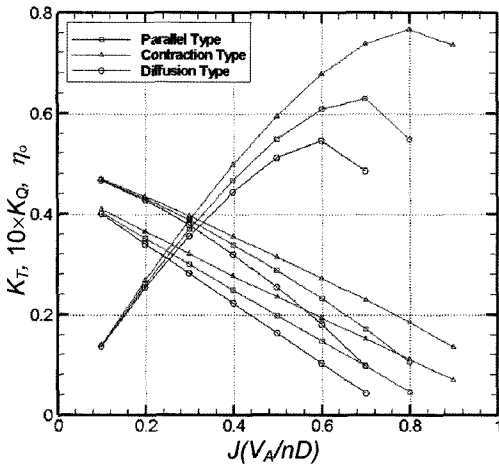


Fig. 9 Comparison of open water performance for each tunnel type

이상의 결과를 종합하면, 계산값의 비교를 나타내고 있는 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 본 논문에서의 프로펠러 보호터널 형상 III은 프로펠러 단독효율이 우수할 뿐만 아니라, 가속형 형태로 인한 보호터널 자체의 추가 추력 증가도 기대되고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 포텐셜 기저 패널법을 이용하여

3종류의 단순 덕트 형태로 가정한 프로펠러 보호터널에 대하여 수치계산을 수행하였고, 그 결과를 회류수조에서의 모형시험 결과와 비교하여 보호터널 형상이 프로펠러 단독특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이로 부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 보호터널과 프로펠러의 간격이 적을수록 단독효율은 상승하는 효과를 보이고, 낮은 레이놀즈 수의 범위에서는 추력의 변화보다 토크의 변화가 상대적으로 크게 나타난다.
- (2) 낮은 전진계수 J에서는 보호터널 내부에서의 허브 캡의 길이 및 단면적의 크기가 프로펠러 단독성능에 매우 큰 영향을 끼친다.
- (3) 유속이 증가함에 따라 날개 끝 와류의 영향이 커지게 되고, 이로 인해 보호터널 형상별 단독성능이 명확하게 구분되어 나타난다. 본 연구에서는 가속형태의 형상 III의 보호터널이 가장 우수한 단독효율을 보인다.

본 연구 결과를 토대로 수치계산과 실험의 상호 보완 과정이 필요하고, 덕트 내부 유동에 대한 정밀 계측 및 날개와 덕트의 간극유지는 앞으로 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 고재용, 심상목, 박충환, 서성부, 배동균, “세미워터제트형 연안어선 개발에 관한 연구”, 한국해양학회지, 제27권, 제1호, pp.16-22, 2003.
- [2] 심상목, 박충환, 서성부, 고재용, “프로펠러 보호터널 부착 연안어선 개발에 관한 연구”, 대한조선학회추계학술대회, pp.117-121, 2003.
- [3] 양승일 등, 추진효율 향상을 위한 DUCT-PROPELLER SYSTEM 연구, 한국기계연구소보고서, UCE81-115D, 1981
- [4] 이창섭 등, 덕트-프로펠러 시스템에 관한 연구, 한국기계연구소 보고서, UCN178-381D, 1984.
- [5] 문일성, 이창섭, 김영기, “포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 덕트-프로펠러의 정상성능해

석”, 대한조선학회추계학술대회, 1994.

- [6] 김광, 표상우, 서정천, “정상 및 비정상 유동중 덕트 프로펠러의 성능해석”, 대한조선학회논문집, 제36권, 제1호, pp.30-36, 1999.
- [7] 이창섭, 서정천, “쌍곡면 패널에의 다이폴 분포”, 대한조선학회 논문집, 제32권, 제2호, pp 32-42, 1995.
- [8] Suh, J.C., Lee, J.T. and Suh, S.B., “A bilinear source and doublet distribution over a planar panel, and its application to surface panel method,” 19th. Symposium on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, pp 837-847, 1992.
- [9] Lee, J.T., “A potential based panel method for the analysis of marine propellers in steady flow.” Ph.D. Thesis, MIT, August, 1987.
- [10] Hsin, C.Y., “Development and analysis of panel method for propellers in unsteady flow”, Ph.D. Thesis, MIT, September, 1990.
- [11] 서정천, 이창섭, “MAU 프로펠러 단독특성의 수식표현”, 한국기계연구소 소보, 제11집, pp 95-101, 1984.
- [12] 김기섭, 김경열, 안종우, 이진태, 박의동, 채한복, 이한성, “덕트 로터의 날개끝 보오텍스 캐비테이션 초기발생특성”, 대한조선학회논문집, 제36권, 제1호, pp.37-46, 1999.
- [13] 김기섭, 김경열, 안종우, “예인수조와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 단독특성의 실험적 상호관계 해석”, 대한조선학회논문집, 제37권, 제1호, pp 26-39, 2000.

저 자 소 개



서성부(徐晟釜)

1961년 6월, 1984년 부산대학교 조선공학과 졸업(학사), 1986년 동대학원 조선해양공학과 졸업(석사), 2002년 동대학원 조선해양공학과 졸업(박사), 1989년-1995년 한국기계연구원 선임연구원, 1995년-1998년 한진중공업 선임연구원, 2002년-2005년 중소조선연구원 책임연구원, 2005년-현재 동의대학교 조선해양공학과 교수.