

CFD를 이용한 180,000 DWT Bulk Carrier용 Pre-Swirl Duct의 파라메트릭 설계

조한나¹·최정은²·전호환^{1,†}
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터²

Parametric Designs of a Pre-swirl Duct for the 180,000DWT Bulk Carrier Using CFD

Han-Na Cho¹·Jung-Eun Choi²·Ho-Hwan Chun^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, a pre-swirl duct for the 180,000 DWT bulk carrier has been designed from a propulsion standpoint using CFD. The stern duct – designed by NMRI – was selected as the initial duct. The objective function is to minimize the value of delivered power in model scale. Design variables of the duct include duct angle, diameter, chord length, and vertical and horizontal displacements from the center. Design variables of the stators are blade number, arrangement angle, chord length, and pitch angle. A parametric design was carried out with the objective function obtained using CFD. Reynolds averaged Navier-Stokes equations have been solved; and the Reynolds stress model applied for the turbulent closure. A double body model is used for the treatment of free-surface. MRF and sliding mesh models have been applied to simulate the actuating propeller. A self-propulsion point has been obtained from the results of towing and self-propelled computations, i.e., form factor obtained from towing computation and towing forces obtained from self-propelled computations of two propeller rotating speeds. The reduction rate of the delivered power of the improved stern duct is 2.9%, whereas that of the initial stern duct is 1.3%. The pre-swirl duct with one inner stator in upper starboard and three outer stators in portside has been designed. The delivered power due to the designed pre-swirl duct is reduced by 5.8%.

Keywords : Pre-swirl duct(PSD, 프리스윙 덕트), Bulk carrier(살물선), Propulsion performance(추진성능), Parametric design(파라메트릭 설계), CFD(전산유체역학)

1. 서론

연료 소비와 탄소 배출을 줄이기 위하여 친환경 선박에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 1970년대 후반부터 다양한 에너지 절감 부가장치(energy-saving devices, 이후 절감장치라 칭함)에 대한 연구가 수행되었고 여러 종류의 선박에 적용되어 왔다 (Shin, et al., 2013; Kim, et al., 2014; 2015). 항해하는 선박에서 에너지가 유실된다. 유실된 에너지의 일부는 프로펠러와 타에 의해 회수된다. 절감장치는 유실 에너지를 적게 하는 장치와 유실된 에너지를 회수하는 장치가 있다. 이러한 절감 장치

는 크게 장착 위치에 따라 세 그룹으로 분류될 수 있다. 하나는 프로펠러 앞에 위치하여 유실 에너지를 줄이거나 프로펠러 면으로 들어오는 유입류를 개선하는 그룹이다. 다른 하나는 프로펠러 뒤에 위치하여 프로펠러 후류의 회전류를 이용하는 그룹이다. 그리고 프로펠러 주위에 위치한 그룹이다.

본 연구는 저속비대선에서 많이 적용하고 있는 프로펠러 앞에 위치한 Pre-Swirl Duct(PSD)를 설계하는 것이다. PSD는 선미 덕트(stern duct, 이후 덕트라 칭함)와 전류 고정 날개(pre-swirl stator, 이후 스테이터라 칭함)가 결합된 절감장치이다. 덕트는 프로펠러 면으로 들어오는 유입류를 균일하게 하고, 추가적인 추력을 발생시키는 절감장치이다 (Schneekluth, 1986). 전류 고정

날개는 프로펠러 면에 유입되는 유동을 프로펠러의 회전방향과 반대방향으로 생성시켜 프로펠러 효율을 향상시키는 절감장치이다 (Lee, et al., 1992; 1994; Kim, et al., 1993; Yang, et al., 2000; 2001; Kang, et al., 2004). 또한, 덕트와 전류조정날개가 결합한 절감장치가 있다 (Mewis & Guiard, 2011; Shin, et al., 2013; Kim, et al., 2014; 2015).

최근 컴퓨터 파워가 급격히 증가하고 수치해석 기법이 발달하고 있지만 조선소에서 실선 스케일에서 절감장치를 개발하기에는 설계 기간을 고려할 때 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 모형선 스케일에서 이중모형을 사용한 예인 및 자항 조건의 이중모형유동에 대한 계산을 수행하여 전달동력을 최소화하는 180,000 DWT 살물선용 PSD를 설계하였다. 설계변수들을 단계적으로 최적화시켜 최적 형상을 구하는 파라메트릭 설계기법을 사용하였다. 2장에서는 대상선형, 3장에서는 수치해석 방법에 대해 서술하였다. 4장에서는 계산에 적용된 격자계를 ITTC가 추천하는 방법에 따라 검증하였다. 5장에서는 덕트와 PSD의 파라메트릭 설계 과정과 결과를 정리하였다.

2. 대상선형

대상선형은 케이프 사이즈급 180,000 DWT Japan Bulk Carrier(JBC)이다. JBC는 덕트가 부착된 선박으로 NMRI (National Maritime Research Institute), Yokohama National University, SRC(Ship Building Research Centre of Japan)가 공동으로 설계하였다. 저항 및 자항 모형시험은 NMRI 예인수조에서 수행하였으며 2015 CFD Tokyo CFD Workshop에서 모형시험 결과를 제공하였다 (<http://www.t2015.nmri.go.jp/index.html>). 대상선형의 실적선은 존재하지 않는다. 대상선형, 프로펠러, 덕트의 주요 요목은 Table 1과 같다.

Table 1 Principal dimensions of objective ship hull, propeller and stern duct

Ship (JBC)		Full scale
Length between perpendiculars	LPP	280.0 m
Breadth	B	45.0 m
Draft at FP and AP	T	25.0 m
Displacement volume	∇	178,369.9 m ³
Wetted surface	S	19,556.1 m ²
Design speed	V _s	14.5 knots
Propeller (MP687)		
Diameter	D _p	8.12 m
No. of blade	Z	5
Expanded area ratio	A _e /A _o	0.5
P/D at 0.7R		0.75
Stern duct		
Diameter	D _D	4.46 m
Angle	δ_D	20 deg
Chord length	L	2.40 m
Center	D, b	0.00 m
Wetted surface	S _D	77.8 m ²

Fig. 1은 대상선형의 정면선도(body plans)와 측면에서 본 그림이다. 선수부는 middle bulb plank type이고 선미부는 선미 벌브가 부착된 전형적인 저속비대상선형이다.

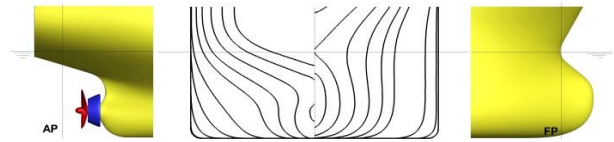


Fig. 1 Body plans and side view of the JBC

Fig. 2는 덕트 형상과 설계 변수들을 나타낸 그림이다. 덕트 단면 모양은 NACA4420이다. 초기 덕트 중심은 프로펠러 중심에 위치에 있다. 초기 덕트 각도(δ_D)는 20이다. 설계 변수인 덕트 각도, 지름(D_D), 코드길이(L), 덕트와 프로펠러 중심간의 수직 거리(d) 및 수평거리(b)를 변경하면서 파라메트릭 설계를 수행하였다.

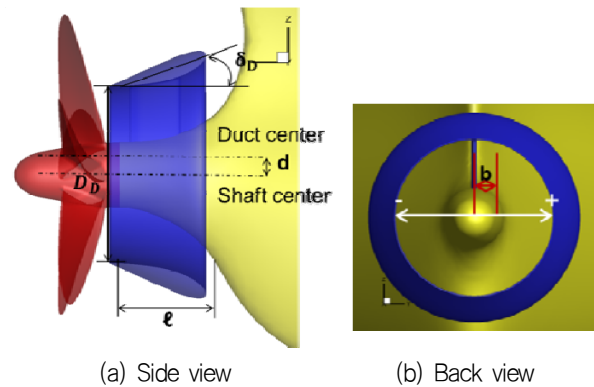


Fig. 2 View of initial stern duct and design variables

3. 수치해석 방법

본 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 선체 고정좌표계로서 유동 방향이 양(+)의 x축, 선박의 우현이 양의 y축이며 중력의 반대방향이 양의 z축으로 하고 선박의 중심면과 자유표면이 만나는 점을 원점으로 하는 우수좌표계이다.

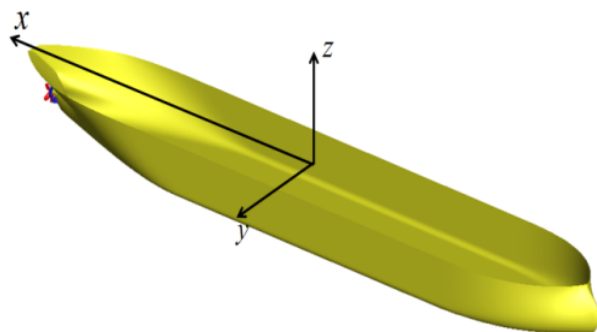


Fig. 3 Coordinate system

3.1 지배방정식

비압축성 난류유동의 지배방정식은 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes식이며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_l \frac{\partial U_i}{\partial x_l} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_l} (\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_l} - \overline{\rho u_i u_l}) \quad (2)$$

여기서 $U_i = (U, V, W)$ 는 $x_i = (x, y, z)$ 방향으로의 유속이다. $p, \rho, \mu, -\overline{\rho u_i u_l}$ 은 정압, 유체밀도, 유체점성, Reynolds stress를 나타낸다.

난류 모형은 Reynolds stress turbulence model을 사용하였다 (Choi, et al., 2010). 이중모형유동 근사를 사용하여 자유표면은 대칭면으로 처리하였다. 그리고 계산의 효율성을 고려하여 물체 표면에는 표준 벽함수를 적용하였다. 유동해석은 Fluent v15.0을 사용하였다.

3.2 수치해석 기법

계산 영역은 유한개의 작은 격자로 나누어지며 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환된다. 공간이산화 처리는 cell-centered 유한체적법을 사용하였다. 대류항은 QUICK scheme을, 확산항은 중앙차분법을 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIMPLEC algorithm을 적용하였다.

3.3 계산 조건

에인 및 자항 조건에서 계산을 수행하였다. 모형선에 타는 부착하지 않았다.

모형선 스케일의 설계속도 ($V_M=1.179\text{m/s}$)에서 계산을 수행하였다. F_N 은 0.142이다. 축척비는 1:40이고 R_{NM} 은 7.46×10^6 이다. $L_{PPM}(7.00\text{m})$ 과 V_M 을 사용하여 무차원하였다. 여기서 아래첨자 M은 모형선을 나타낸다.

계산영역과 경계조건을 Fig. 4에 나타내었다. 계산 영역은 $-1.0 < x/L_{PP} < 1.5, -1.0 < y/L_{PP} < 1.0, -1.0 < z/L_{PP} < 0.0$ 이다.

유입경계면과 바깥 경계면에는 입구속도조건을 적용하였다. 정수면에는 대칭조건을 적용하였다. 출구경계면에는 연속방정식을 이용하여 속도와 압력을 구하는 출구유량 조건을 적용하였다.

에인 및 자항 계산에서 안정적인 해를 구하기 위하여 U, V, W, k, ϵ , p, Reynolds stress 항들은 완화계수 (under-relaxation factor) 0.2를 사용하였다. 연속방정식, U, V, W, k, ϵ , Reynolds stress 항들의 residual은 1.00×10^{-5} 으로 하였다.

PSD 설계를 위한 프로펠러 주위 유동 모사는 MRF(Moving Reference Frame) 방법을 사용하였다. MRF는 회전하는 물체를 표현하기 위해 프레임 정보를 프로펠러 회전수에 맞게 회전시키는 방법이며, 추력과 토오크 값을 허용 오차 내에서 구할 수 있지만, 프로펠러 후류를 정확하게 표현하지 못한다. 따라서 PSD 설계에서는 계산 시간을 고려하여 MRF방법을 사용하였다. PSD 설계를 완료한 후 PSD가 장착된 프로펠러 후류의 유동을 좀 더 정확하게 분석하기 위하여 sliding mesh 기법을 적용하였다. 이때 MRF 결과를 초기 값으로 하였으며, sub-iteration 수는 45이고 1°씩 프로펠러를 회전하였다

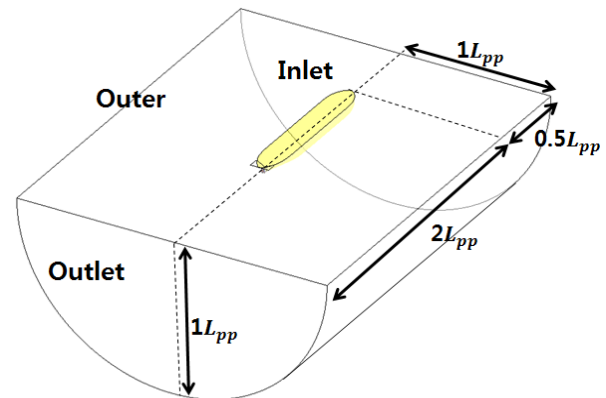


Fig. 4 Computational domain and boundary conditions

3.4 점성저항 및 자항요소 추정방법

형상계수($1+k$, form factor)는 다음 식으로 구할 수 있다고 가정한다 (Choi, et al., 2010).

$$(1+k) = \frac{C_{VM}}{C_{FM}} \quad (3)$$

여기서 C_{VM} 은 이중모형을 사용하여 구한 전저항계수로 점성저항 계수이다. C_{FM} 은 ITTC-1957 모형선-실선 상관식에서 구한 평판의 마찰저항계수이다.

표면마찰보정 (SFC, Skin Friction Correction)은 식 (4)를 사용하여 구할 수 있다.

$$SFC = \frac{1}{2} \rho S_M V_M^2 (1+k) (C_{FM} - C_{FS}) \quad (4)$$

본 연구에서는 절감장치에 기인한 형상계수의 변화는 고려하지 않았고 침수표면적의 증가만을 고려하였다 (Kim, et al., 2015). 자항점은 2개의 프로펠러 회전속도 (n_m)에 대한 자항 계산 결과로부터 내삽법을 이용하여 구한다. 즉, 자항점에서는 식 (4)로 표현되는 SFC와 식 (5)로 표현되는 에인력 (TF, Towing Force)과 같다.

$$TF = R_{VM}^{SP} - T_M \quad (5)$$

여기서 R_{VM}^{SP} 과 T_M 은 자항 상태에서의 모형선 저항과 프로펠러 추력이다.

전달동력(PD_M , delivered power)과 추력감소계수(t , thrust deduction fraction)은 다음의 식으로 표현된다.

$$PD_M = 2\pi n_M Q_M \quad (6)$$

$$t = \frac{R_{VM}^{SP} - R_{VM}}{T_M} \quad (7)$$

여기서 R_{VM} 과 Q_M 은 예인 상태에서의 모형선 저항과 프로펠러 토크이다.

4. 격자생성과 불확실성 해석

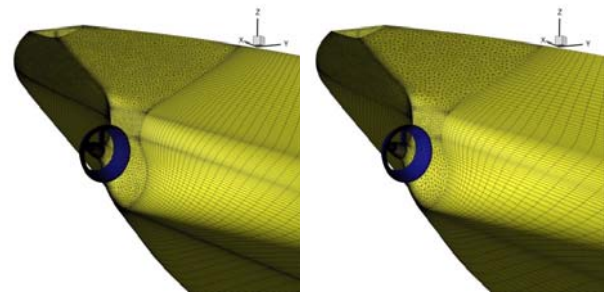
저항 및 자항 계산 결과의 일관성을 유지하기 위해서 자항 계산을 위한 격자를 먼저 생성하고 난 뒤에 저항 계산을 위한 격자를 생성하였다. 차이는 프로펠러 직경과 축방향 길이보다 보다 약간 큰 실린더 형태인 블록이다.

격자생성은 상용 코드인 Gridgen code를 사용하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 육면체의 정렬 격자와 사면체의 비정렬 격자가 함께 있는 하이브리드 격자 시스템을 사용하였다. 격자 시스템 구조는 선체의 모양을 고려하여 다중 블록 O-H 형태로 구성하였다. Fig. 5는 격자의 불확실성 해석을 위해 사용된 3가지 격자 시스템의 선미 부근의 선체표면의 격자분포를 나타낸다.

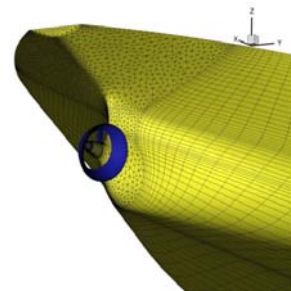
사용된 격자계의 수치해석 결과에 대한 격자 의존성을 조사하기 위하여, 23차 ITTC에서 추천하는 방법 (Stern, et al., 2006)에 따라 GS1, GS2, GS3의 3가지 격자계를 사용하여 점성저항 계수(C_{VM})를 조사하였다. 3가지 격자계는 Table 2에서 보는 바와 같이 GS1이 가장 조밀하다. GS2와 GS3의 격자 수는 일정한 비율 ($r_G = \sqrt{2}$)로 감소한다. 원칙적으로는 격자간 길이비 ($\Delta x_2/\Delta x_1 = \Delta x_3/\Delta x_2$)로 검증하여야 하나 본 연구에서는 격자 수를 r_G 의 비율로 감소시켰다. 여기서 $y+$ 는 선체표면으로부터의 첫 번째 격자 높이의 평균값을 벽좌표계를 사용하여 표시한 값으로 벽법칙을 만족하는 대수영역에 있다.

Table 2 Grid systems for the uncertainty analysis

Duct	Grid system	Grid dimension	No. of grids	y+
Without	GS1	411×143×185	7.70M	90
	GS2	291×101×131	2.92M	130
	GS3	204×71×92	1.05M	180
With	GS1	411×143×185	8.03M	90
	GS2	291×101×131	3.08M	130
	GS3	204×71×92	1.12M	190



(a) Fine grid system : GS1 (b) Medium grid system : GS2



(c) Coarse grid system : GS3

Fig. 5 Partial view of grid systems at the stern for the grid dependency study

3가지 격자계에 대한 점성저항계수들을 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Viscous resistance coefficient ($C_{VM} \times 103$) using three grid systems

Stern duct	GS1	GS2	GS3
Without	4.025	4.096	4.250
With	4.005	4.072	4.218

Table 4 Verification of the computational results

Duct	U_1	ϵ_{21}	ϵ_{32}	R_G	P_G	C_G	δ^*_{REG}	U_G	U_{SN}	$U_{SN}\%S_2$
Without	0.075	0.071	0.154	0.458	2.251	1.182	0.060	0.096	0.096	2.35
With	0.315	0.067	0.147	0.455	2.269	1.196	0.056	0.093	0.093	2.28

$C_{VM} \times 10^3$ 에 대한 오차와 수치 불확실성은 Table 4에 정리하였다. 여기서 U_I 는 반복계산 불확실성(iterative uncertainty), U_G 는 격자 불확실성(grid uncertainty), 그리고 U_{SN} 은 수치해석 불확실성(simulation uncertainty)이다.

Fig. 6는 GS2를 사용한 C_{VM} 의 수렴해 (s_2)의 이력(convergence history)을 나타낸다. U_I 는 C_{VM} 진폭의 반 값으로 추정하였다.

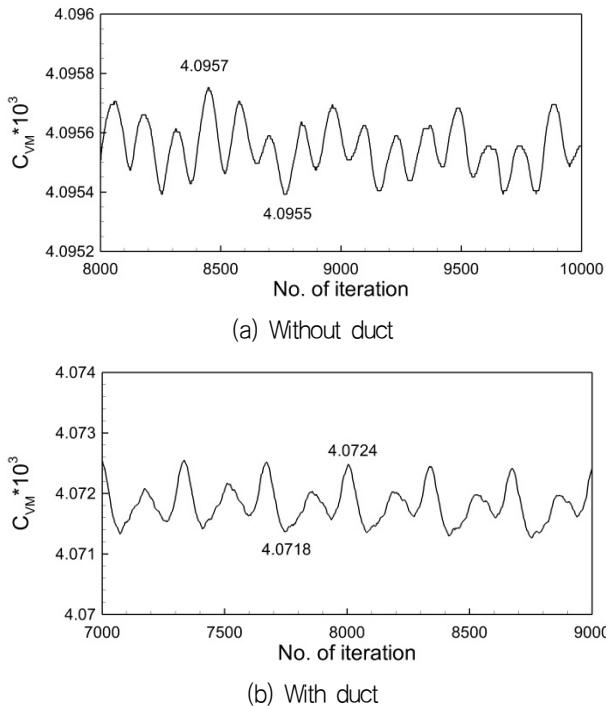


Fig. 6 Convergence history of CVM for the last few periods using GS2 without and with stern duct

R_G (convergence ratio, 수렴비)는 다음과 같이 정의 된다.

$$r_G = \epsilon_{21} / \epsilon_{32} \quad (8)$$

여기서 ϵ_{ij} ($=S_i - S_j$)는 GS₁와 GS_j의 격자계를 사용한 수렴해(S_i 와 S_j)의 차이를 나타낸다. $0 < R_G < 1$ 이므로 Table 4의 점성저항계수들은 단조 수렴한다고 추정할 수 있다.

P_G (estimated order of accuracy, 정확도), C_G (correction factor, 보정계수)와 δ_{REG}^* (격자계의 수치오차)는 다음과 같이 정의 된다.

$$P_G = \frac{\ln(\epsilon_{32} / \epsilon_{21})}{\ln(r_G)} \quad (9)$$

$$C_G = \frac{r_G^{P_G} - 1}{r_G^{P_{\geq st}} - 1} \quad (10)$$

$$\delta_{REG}^* = C_G \frac{\epsilon_{21}}{r_G^{P_G} - 1} \quad (11)$$

여기서 $P_{Gest} = 2$ 라고 가정하였다. 따라서 U_G 와 U_{SN} 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$U_G = [2(1 - C_G) + 1] |\delta_{REG}^*| \text{ for } |1 - \delta_{REG}^*| \geq 0.125 \quad (12)$$

$$U_{SN} = \sqrt{U_G^2 + U_I^2} \quad (13)$$

격자의존성 해석결과를 바탕으로 GS2를 격자 시스템을 이용하여 계산을 수행하였다. 프로펠러 면과 선미 덕트 주변에서는 가장 듬성한 GS3보다는 좀 더 많은 격자가 필요하였고, 가장 조밀한 GS1보다는 계산시간을 줄이기 위해서이다. S_2 에 대한 비교 오차 $U_{SN} \% S_2$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$U_{SN} \% S_2 = U_{SN} / S_2 \times 100 \quad (14)$$

덕트 유무에 따른 추정된 $U_{SN} S_2$ 는 2.4%와 2.3%의 수준에서 격자에 의한 불확실성이 존재한다.

정수면을 대칭조건을 사용하여 구한 유동해석 결과(이중모형)와 VOF(Volume of Fluid)를 사용하여 구한 유동해석 결과(자유표면)를 비교하기 위하여 덕트 입구면 ($x=0.4625$)의 축방향 유속과 횡방향 속도벡터를 Fig. 7에 비교 하였다. 자유표면 결과는 모형선의 수직운동을 자유롭게 한 상태에서 구한 값이다 (2015 CFD Tokyo CFD Workshop, <http://www.t2015.nmri.go.jp>). 자유표면에 기인한 유동 변화가 존재하지만 PSD 설계에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 추정된다.

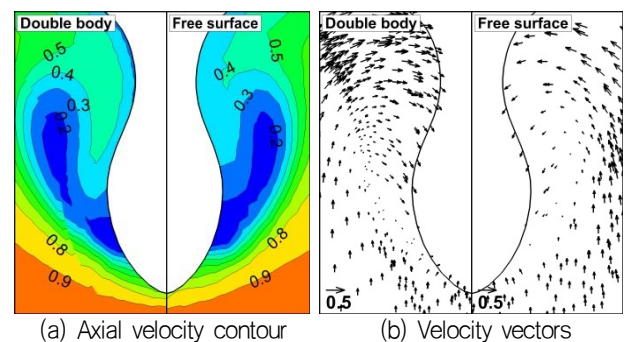


Fig. 7 Axial velocity contours and velocity vectors on the plane in front of the duct ($x=0.4625$) with duct and without propeller condition

자항 계산을 위한 격자 수는 덕트가 부착되지 않은 경우가 3.73M, 부착한 경우가 3.90M이다.

계산에는 Intel Xeon E52697v2/2.7G-30M-12C를 사용하였다. 계산 시간은 24 코어를 사용하였을 때 GS2인 경우 예인과 자항 계산에 소요된 시간은 각각 1일이다.

5. Pre-swirl duct 설계

대상선에 적합한 PSD를 개발하기 위해 먼저 초기 덕트를 개선한 후에 스테이터를 설계하였다. 목적함수는 최소 전달동력이다.

5.1 선미 덕트 설계

Table 1의 덕트를 초기 덕트로 선정하여 덕트를 개선한 후에 PSD를 개발하였다. 초기 덕트 부착 유무에 따른 저항 및 자항 계산결과를 Table 5에 정리하였다. 여기서 RR%는 선미 덕트 부착에 따른 감소비를 나타낸 것이며 다음과 같이 표현된다.

$$PR\% = \frac{\varnothing^{duct} - \varnothing}{\varnothing} \times 100 \quad (15)$$

여기서 \varnothing 는 각각의 변수들을 나타낸다.

Table 5 Comparisons of the resistance and propulsion parameters of model ship without and with stern duct

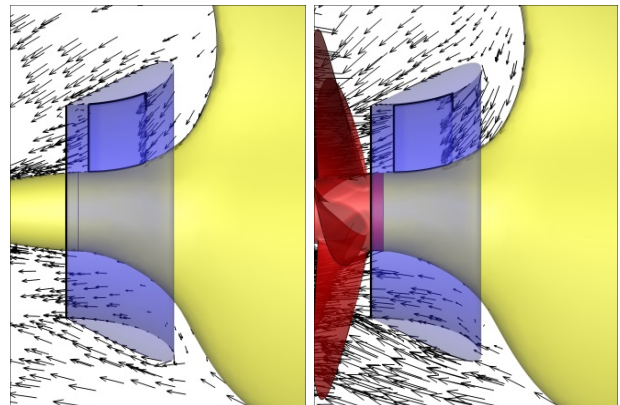
	Without duct	With initial duct	RR%
RVM [N]	35.30	35.25	-0.15
1+k	1.297		
SFC [N]	19.33	19.41	0.44
nM [rps]	7.387	7.308	-1.08
RVMSP [N]	38.60	38.88	0.70
TM [N]	19.27	19.46	0.97
QM [Nm]	0.527	0.526	-0.23
PDM [W]	24.45	24.13	-1.31
t	0.171	0.184	7.20

성능이 우수한 덕트는 프로펠러 면으로 들어오는 유입류를 균일하게 만들어 준다. 또한, 추력을 발생시켜 저항을 줄여주는 역할을 한다. 초기 덕트는 예인 상태일 때 점성저항이 0.15% 감소하였다. 그러나 자항 상태일 때 점성저항이 0.70%증가함에 따라 추진성능 관점에서 선미 덕트를 개선하는 것이 필요하다.

Fig. 8과 같이 자항 상태에서는 프로펠러의 영향 등으로 인해 예인상태와 비교하여 선미 덕트에 유입되는 유속이 달라지는데 이 점을 고려하여 덕트를 개선하였다. 즉, 덕트 각도(duct angle) 보다 낮은 각도로 유속이 유입하는 경우, 덕트의 저항이 증가하므로 이를 고려하여 설계 하여야 한다고 판단된다.

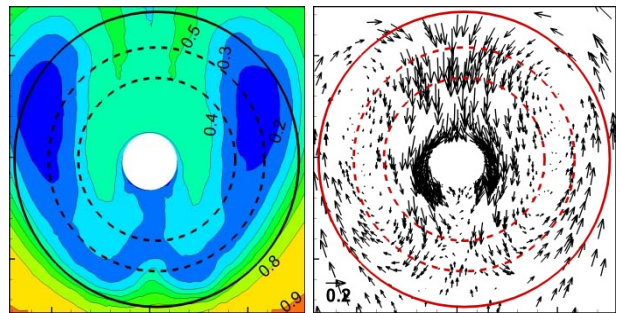
Fig. 9는 덕트 유무에 따른 예인조건에서 프로펠러 면에 유입되는 축방향속도 contour와 횡방향 속도벡터를 비교한 그림이다,

실선 원은 프로펠러 회전 영역, 점선 원은 덕트를 나타낸다. 덕트 설계를 위하여 자항계산도 수행하여야 하므로 예인조건에서도 전 영역에서 계산을 수행하였다. 수치 소산(numerical dissipation) 및 수치 확산(numerical dispersion) 등의 오차로 인하여 완전한 좌우 대칭은 아니나 덕트 설계에는 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있다. 덕트 내부의 축방향 유속은 0.25% 증가하지만 덕트 반류의 영향으로 프로펠러 면에 유입되는 축방향 속도는 10.9% 감소한다. 이로 인해서 프로펠러의 회전수가 줄어든 것으로 추정된다. 덕트를 부착함으로써 덕트내부의 속도분포가 균일해졌음을 알 수 있다.

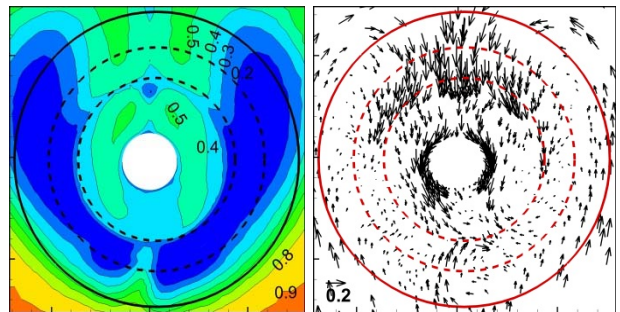


(a) Towing (b) Self-propelled

Fig. 8 Streamlines around a stern duct at towing and self-propulsion conditions



(a) Without duct



(b) With duct

Fig. 9 Axial velocity contour and velocity vector on the propeller plane : towing condition

Fig. 10은 덕트 유무에 따른 자항 조건에서 프로펠러 후류에서의 축방향 평균 속도 contour와 횡방향 속도벡터를 비교한 그림이다. 덕트가 부착됨에 따라 축방향속도가 줄어들었음을 알 수 있다. 이에 따라 회전수가 1.1%줄어 들고 전달동력이 1.3%줄어 들었다.

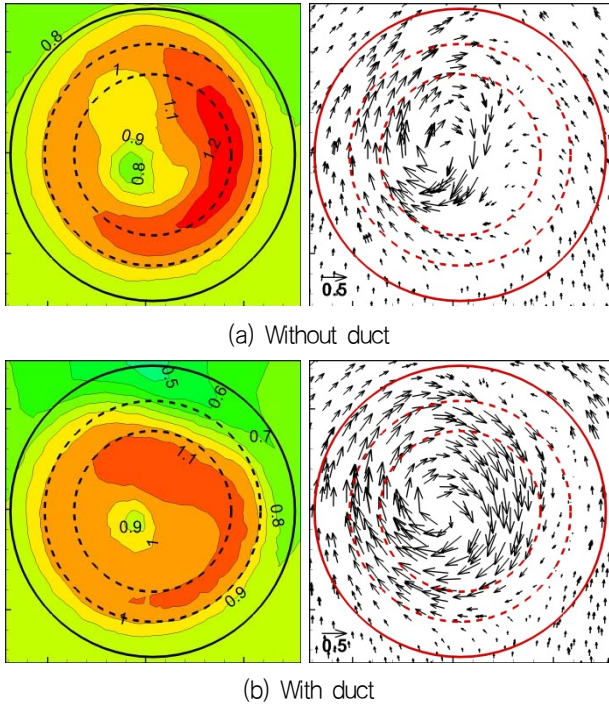


Fig. 10 Axial velocity contours and velocity vectors

5.2 선미 덕트 설계

설계 변수는 덕트 각도 (δ_D), 덕트 지름 (D_D), 덕트 하부의 코드 길이 (L), 덕트 상하 위치 (d)와 좌우 위치 (b)이다. 설계변수들을 차례로 바꾸어 최적의 설계변수들을 구하는 파라메트릭 설계를 통해 덕트를 설계하였다. 즉, 한 개의 설계변수가 변경될 때 나머지 변수들은 고정한다. 파라메트릭 설계 순서는 $\delta_D \rightarrow D_D \rightarrow L \rightarrow d \rightarrow b$ 으로 진행하였으며 수치해석 결과는 Table 6에 나타내었다.

초기 덕트에 기인한 전달동력 감소는 1.3%이다. 파라메트릭 설계 결과에서 최적의 설계변수들을 굵은 글씨로 표시하였다. 덕트 각도는 20° 에서 16° 로, 중심위치가 무한으로 프로펠러 직경의 0.025로 이동하였을 때 전달동력이 최소가 되었다. 나머지 설계 변수들은 변화하지 않았다. 덕트 각도가 14° 인 경우가 전달동력이 최소이나, 이 경우 Fig. 11에서 보는 바와 같이 붉은 선으로 표시된 덕트 부근의 선미에서 유동박리가 발생하여 제외하였다. 여기서 흥미로운 점은 덕트 직경이 일반적인 경우보다 작은 초기 직경인 $0.55D_P$ 가 최적인 것으로 평가된 것이다.

파라메트릭 설계 결과들을 Table 7에 정리하였다. 최적화된 덕트에 기인한 전달 마력 감소는 4.2%이다.

Table 6 Results of the parametric design of stern duct

Parameter	Value	n_M [rps]	t	PD_M [W]
Initial		7.39	0.171	24.45
δ_D [deg]	12	7.32	0.161	23.92
	14	7.28	0.164	23.72
	16	7.27	0.169	23.75
	18	7.28	0.175	23.91
	20	7.31	0.184	24.13
	22	7.24	0.190	23.93
D_D/D_P	0.49	7.35	0.174	24.32
	0.54	7.34	0.172	24.18
	0.55	7.27	0.169	23.75
	0.6	7.3	0.167	23.82
	0.64	7.32	0.168	23.99
	0.69	7.29	0.167	23.83
L/D_P	0.3	7.27	0.169	23.75
	0.28	7.3	0.169	23.92
d/D_P	0.26	7.29	0.168	23.87
	0.24	7.26	0.168	23.77
	0.18	7.31	0.167	23.97
	0.000	7.27	0.169	23.75
b/D_P	-0.025	7.31	0.170	23.98
	0.025	7.28	0.169	23.87
	0.049	7.33	0.171	24.26
	0.079	7.29	0.170	24.11
	0.000	7.27	0.169	23.75
	0.025	7.23	0.169	23.44
0.050	7.24	0.170	23.45	

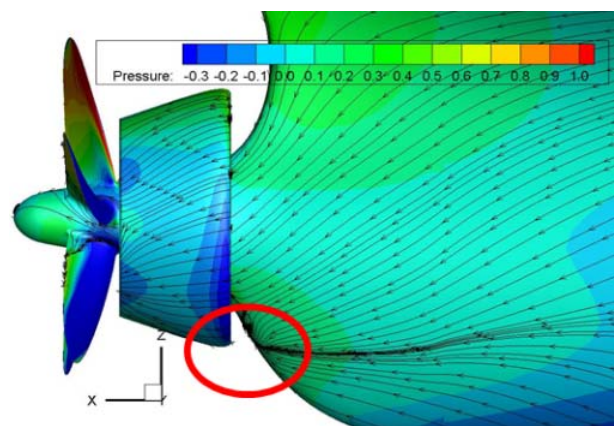


Fig. 11 Pressure distribution and limiting streamlines around stern duct

Table 7 Results of the parametric design of stern duct

Duct	nM [rps]	RPMS ^P [N]	T _M [N]	Q _M [Nm]	t	PDM [W]
Without	7.39	38.60	19.27	0.527	0.171	24.45
Initial	7.31	38.88	19.46	0.526	0.184	24.13
Optimized	7.23	38.54	19.13	0.516	0.169	23.44

5.3 Pre-Swirl Duct 설계

Fig. 12는 파라메트릭 설계로 구한 덕트의 입구 면에 유입되는 속도분포를 나타낸 그림이다. 덕트 내부 유동은 좌우현 모두 하강류이다. 덕트의 영향으로 덕트 후류에서는 급격한 속도 감소 효과가 나타난다. 덕트 외부유동은 저속비대선의 특징인 빌지 보 오텍스에 기인한 유동 특성이 나타난다.

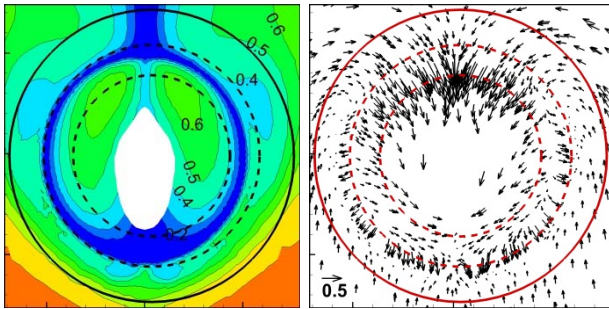


Fig. 12 Axial velocity contours and velocity vectors on the plane of ahead the optimized stern duct

프로펠러 회전 방향을 고려할 때, 프로펠러 면에 유입되는 유동의 좌현을 하강류로 우현을 상승류로 만들어 주는 스테이터를 설계하는 것이 프로펠러 효율 면에서 유리하다.

설계변수는 스테이터 날개 수와 배치각도, 그리고 피치각도이다. 날개 단면은 NACA6612를 적용하였다. 스테이터 날개로 유입되는 유동각(α)은 다음 식을 이용하여 구한다.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_t}{V_x} \quad (16)$$

여기서 V_t 는 스테이터 유입면에서의 원주방향 속도 성분이다. 스테이터 날개 수와 배치각도는 Fig. 12의 유속 분포에 따라 결정한다. 스테이터 날개로 유입되는 유동각이 원주방향으로도 변하므로 날개의 원주방향 피치각도 각기 다른 최적의 스테이터가 존재할 것이다. 본 연구에서는 스테이터 개수와 배치각도, 그리고 각 날개의 피치각도를 파라메트릭 과정을 통하여 구하였다. 피치각도는 각 스테이터 날개의 대표지점을 선정하여 원주방향으로 일정한 받음각을 갖는 스테이터를 설계하였다. 스테이터 피치각은 초기값은 스테이터 날개로 유입되는 유동의 대표 받음각

(angle of attack)이 7°가 되도록 정하였다. Fig. 12은 파라메트릭 설계를 위한 PSD 후보군들을 나타낸다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 덕트 내부는 하강류이다. 덕트 내부의 우현에는 프로펠러 회전방향과 반대방향인 상승류로 만들기 위한 스테이터 2개와 좌현 하부에는 하강류를 만들기 위한 스테이터 1개를 Fig. 13(a)의 No. 1과 같이 배치하였다. 횡단면 속도벡터 방향이 달라지는 부분에 스테이터를 배치하였다. No.1의 경우, 덕트의 직경이 작아서 스테이터에 대한 효과가 크지 않았다. 이를 보완하기 위해서 스테이터를 덕트 외부로 뺀 나가는 형상으로 Fig. 13(b)의 No.2와 같이 설계하였다. 이 때 덕트의 좌현 외부를 프로펠러 회전 방향과 반대방향인 하강류로 만들기 위해 스테이터를 배치하였다. No.2의 경우 덕트 내부의 스테이터 영향에 따라 오히려 저항이 커지는 현상이 발생되었다. 그리하여 Fig. 13(c)의 No.3와 같이 덕트 내부의 우현에는 상승류, 외부의 좌현에는 하강류로 만들어 주도록 설계하였다. 하지만 스테이터의 뿌리 부분에서 심한 박리가 생겼다. 결론적으로 대표 유입류를 덕트의 직경으로 들어오는 유입류로 하는 Fig. 13(d)의 No.4를 설계하였다.

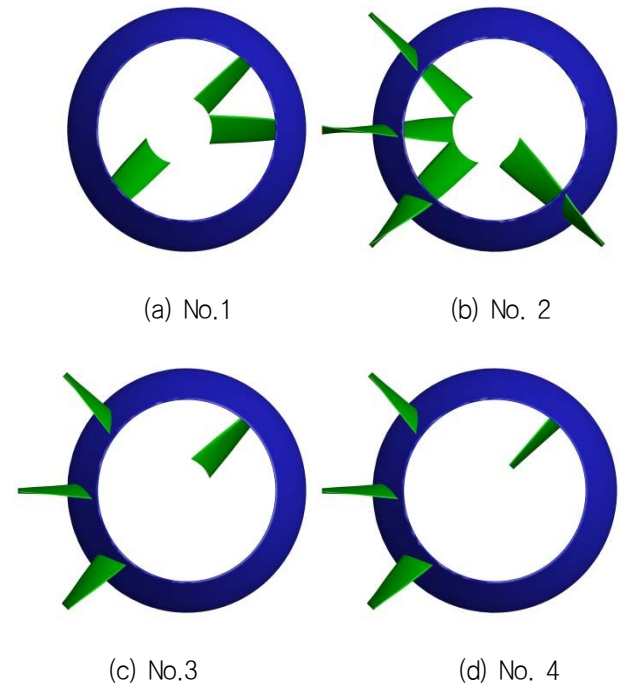


Fig. 13 Candidates of pre-swirl stator

Table 8 Results of the parametric design of PSD

No.	n _M [rps]	R _{PM} ^{SP} [N]	T _M [N]	Q _M [Nm]	t	PD _M [W]
1	7.08	39.83	20.41	0.527	0.232	23.43
2	7.05	39.92	20.48	0.530	0.222	23.45
3	7.10	39.10	19.67	0.522	0.193	23.27
4	7.09	38.85	19.42	0.517	0.182	23.04

각 후보군의 스테이터 최적 피치각들은 파라메트릭 방법을 사

용하여 구하였다. 각 후보군들의 파라메트릭 설계결과, 전달동력이 최소인 형상들의 성능을 Table 8에 정리하였다. No.4의 경우 박리가 약해지고 전달 마력이 5.8% 감소하였다.

Fig. 14는 스테이터에 기인한 프로펠러 면에서의 횡방향 속도 벡터 변화를 나타낸 그림이다. 스테이터의 영향으로 반시계 방향의 유동이 생성되었음을 알 수 있다.

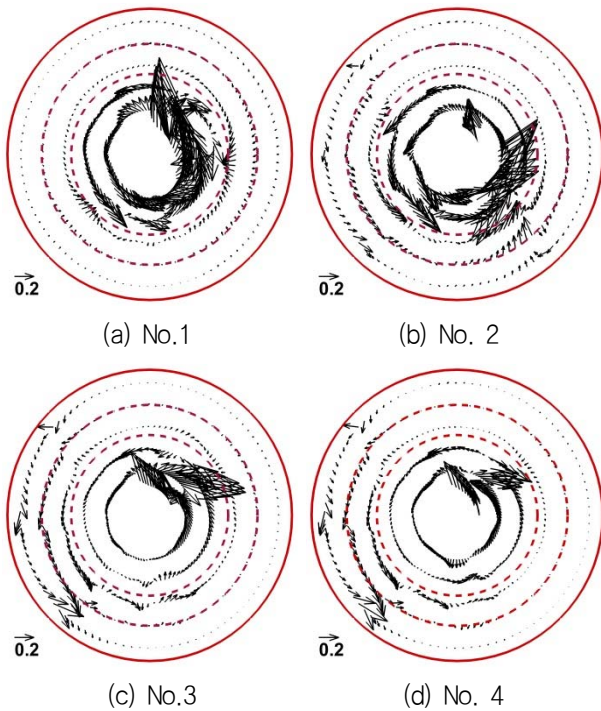


Fig. 14 Change of velocity vectors on the propeller plane due to the stators of the PSD candidates

6. 결론

본 연구에서는 180,000 DWT bulk carrier에 적합한 선미 덕트와 PSD를 모형선 스케일의 설계속도에서 파라메트릭 스테디를 통하여 설계하였다. 목적 함수는 최소 전달동력이며 CFD를 이용하여 구하였다.

초기 선미 덕트 각도를 4° 줄이고 중심위치를 프로펠러 직경의 0.025만큼 우현으로 이동시킴으로써 전달동력이 4.2% 감소하였다.

- 선미 덕트의 내부유동은 하강류이며 바깥유동은 저속비대선에서 나타나는 빌지보웍스 유동 특성이 나타난다.
- 선미 덕트 내부에는 우현 상부에 1개의 스테이터를, 외부에는 좌현에 3개의 스테이터를 부착하는 PSD를 설계하였다.
- 스테이터 각 날개의 피치각은 유입속도에 대한 받음각을 파라메타로하여 설계하였다.
- 설계된 PSD에 의해서 전달동력은 5.8% 감소하였다.
- 선미 덕트와 PSD 주위에는 유동 박리가 발생할 가능성이 있으므로 이를 회피하여 설계하여야 한다.

후기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, J.E. Min, K.S. Kim, J.H. Lee, S.B. & Seo, H.W., 2010. Resistance and Propulsion Characteristics of Various Commercial Ships based on CFD Results. *Ocean Engineering*, 37, pp.549-566.
- Kang, Y.D. Kim, M.C. & Chun, H.H., 2004. A Study on the Design of a Biased Asymmetric Pre-swirl Stator Propulsion System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(3), pp.13-21.
- Kim, J.H. Choi, J.E. Choi, B.J. & Chung, S.H., 2014. Twisted Rudder for Reducing Fuel-oil Consumption. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6, pp.715-722.
- Kim, J.H. Choi, J.E. Choi, B.J. Chung, S.H. & Seo, H.W., 2015. Development of Energy-saving Devices for a Full Slow-speed Ship through Improving Propulsion Performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7, pp.390-398.
- Kim, M.C. Lee, J.T. Suh, J.C. & Kim, H.C., 1993. A Study on the Asymmetric Preswirl Stator System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(1), pp.30-44.
- Lee, J.T. Kim, M.C. Suh, J.C. Kim, S.H. & Choi, J.G., 1992. Development of a Preswirl Stator-propeller System for Improvement Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator propulsion system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(4), pp.132-145.
- Lee, J.T. Kim, M.C. Van, S.H., Kim, K.S. & Kim, H.C., 1994. Development of a Preswirl Stator Propulsion System for a 300K VLCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(1), pp.1-13.
- Mewis, F. & Guiard, T., 2011. Mewis duct - new developments, solutions and conclusions. *Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, June 2011.
- Schneekluth, H., 1986. Wake Equalizing Euct. *The Naval Architect*, 103, pp.147-150.

Stern, F. Wilson, R. & Shao, J., 2006. Quantitative Approach to V&V of CFD Simulations and Certification of CFD Codes. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 50, pp.1335-1355.

Shin, H.J. Lee, J.S. Lee, K.H. Han, M.R. Hur, E.B. & Shin, S.C., 2013. Numerical and Experimental Investigation of Conventional and Un-conventional Preswirl Duct for VLCC. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), pp.414-430.

Yang, J.M. Lee, S.J. Kim, H.C. Suh, J.C. & Park, Y.M., 2000. Effect of pre-swirl stator vane on the pro-peller hull interaction of a full ship. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, Ulsan, 9-10 November 2000, pp.188-191.

Yang, J.M. Kim, K., Park, K.H. Kim, H.C. Suh, J.C. & Park, Y.M., 2001. Effect of pre-swirl stator vane on the propeller hull interaction (2). *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, Seoul, 8-9 November 2001, pp.216-219.

