

전류고정날개 설계에 대한 연구

최정은*, 서흥원**, 정석호***

Study on the Design of Pre-Swirl Stator Vanes

J. E. Choi*, H. W. Seo** and S. H. Chung***

Key Words : 에너지 절약장치(Energy-Saving Device), 전류고정날개(Pre-Swirl Stator Vanes)

Abstract

The study on the design of pre-swirl stator vanes is performed. The pre-swirl stator vanes is an energy-saving device to improve propulsive performance by providing pre-swirl to the propeller inflow. The theoretical background and the design conditions for pre-swirl stator vanes are presented. The flow characteristics around the pre-swirl stator vanes attached ship hull are analyzed through the experimental method. The technique to determine the optimum location, angle and the number of stator vane is investigated and applied it to 310,000 TDW VLCC. The flow velocities are measured using 5-hole Pitot tubes at the condition with and without a propeller.

1. 서론

선박의 저항, 추진성능은 크게 두 가지 방법으로 향상시킬 수 있다. 하나는 선체 및 프로펠러에 의하여 유실되는 에너지를 최소화하는 것이다. 이는 선형 및 프로펠러의 개발을 통하여 선체에 작용하는 저항을 줄이고 선체와 프로펠러의 효율을 향상시킴으로써 달성할 수 있다. 다른 하나는 유실된 에너지를 최대한 회수하는 것이다. 선체와 프로펠러에 의하여 유실된 에너지는 프로펠러와 타에 의해 회수되거나 완전히 회수되는 것은 아니다. 따라서 최적의 에너지 절약형 선형개발은 선체, 프로펠러, 타 등을 효율적으로 설계하고 필요하면 적합한 에너지 절약장치(ESD, Energy-Saving Device)를 부착하여 유실된 에너지를 회수함으로써 달성될 수 있을 것이다. ESD는 1973년 에너지 위기이후 많은 연구가 있었으며 여러 가지 ESD가 개발되었다.

이러한 ESD는 선체구조의 복잡성으로 인한 추가비용이 소요되는 단점이 있다. 그러나 연료비의 상승과 원유, 산물, 광석운반선 등의 저속선이 대형화됨에 따라 이러한 단점은 상대적으로 중요하지 않게 됨으로써 ESD에 의한 추진효율향상이 주요한 과제가 되고 있다.

ESD는 부착위치에 따라 프로펠러 전류, 후류 및 전·후류 ESD로 구분할 수 있다. 전류 ESD는 ① 프로펠러 유입류에 미리 회전류를 생성시키거나, ② 프로펠러 유입류를 개선하거나, 혹은 ③ 유동박리를 지연시킴으로써 선박의 성능을 개선시키는 장치이다. 후류 ESD는 ① 프로펠러 후류의 회전에너지를 이용하거나, ② 프로펠러 cap 뒤의 점성손실을 감소시키거나, 와류를 감소시킴으로써, 혹은 ③ 부가추력을 생성시킴으로써 선박의 성능을 개선시키는 장치이다.

고정날개 추진시스템을 이용한 ESD는 지금까지 많은 연구가

있었다. 고정날개 추진시스템은 프로펠러의 전류에 고정날개를 부착하는 전류고정날개(Pre-Swirl Stator Vanes) 추진시스템 [1-7]과 프로펠러의 후류에 고정날개를 부착하는 후류고정날개(Post-Swirl Stator Vanes) 추진시스템[8-10]으로 분류할 수 있다. 전류고정날개 추진시스템은 잠수함에 적용되기도 하고[11], 후류고정날개 추진시스템은 프로펠러 전면에 Wake Equalizing Duct와 함께 부착되어 사용되기도 한다[12].

본 연구에서는 전류고정날개주위의 유동특성을 실험적으로 해석하여 최적의 전류고정날개의 장착위치, 각도 및 개수를 결정하는 기법을 연구하였다. 대상선은 최근 현대중공업에서 건조한 310,000 TDW VLCC이며 모형시험은 현대선박해양연구소 예인수조에서 수행하였다.

2. 전류고정날개의 설계

2.1 전류고정날개의 유체동역학적 특성

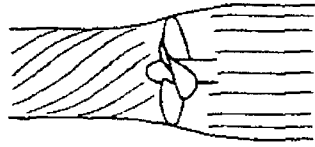
프로펠러는 날개 면에서의 마찰저항과 프로펠러 후류에서의 회전유동에 기인하여 에너지가 유실되며 이상적인 효율(η_{pi})을 갖지 못하고 있다[13].

일반적으로 프로펠러 후류의 회전속도에 기인한 프로펠러 단독효율감소는 프로펠러 단독효율의 10% 정도이다. 프로펠러 후류의 회전유동에 기인한 에너지 손실 (Fig.1 (a) 참조)은 프로펠러 전류에 고정날개를 부착하거나(Fig.1 (b) 참조)와 프로펠러 후류에 고정날개를 부착하여 (Fig.1 (c) 참조) 회전유동을 감소시켜 프로펠러의 효율을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 고정날개가 프로펠러 전류에 있는 것이 후류에 있는 것보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 이는 프로펠러 후류에 있는 고정날개가 더 많은 저항을 받는 것으로 추정되기 때문이다. 전류고정날개를 실선에 부착하여 수행된 시운전결과[1]를 보면 7~8% 정도의 에너지 감소효과가 있었으며 조종, 날개 면에 작용하는 구조역학적인 문제 및 진동에는 큰 문제가 없는 것으로 판명되었다.

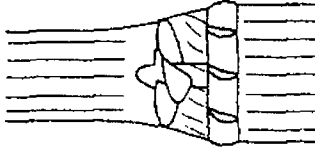
* 현대중공업(주) 선박해양연구소, jechoi@hhi.co.kr

** 현대중공업(주) 선박해양연구소, hwseo@hhi.co.kr

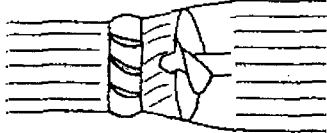
*** 현대중공업(주) 선박해양연구소, hquest@hhi.co.kr



(a) Propeller in open water



(b) Stator vanes forward of propeller



(c) Stator vanes aft of propeller

Fig. 1 Recovery of rotational energy of propeller slipstream by stator vanes

전류고정날개 추진시스템은 프로펠러에 유입되는 유동을 미리 회전시켜 프로펠러에 의하여 형성되는 회전운동성분이 이와 상쇄되도록 함으로써 회전으로 인한 운동에너지를 감소시키는 장치이다. 즉, 프로펠러에 의해 유기되는 접선속도와 반대방향인 접선속도를 주기 위한 장치이다. 이 장치는 회전유동감소로 인한 추력 감소가 전류고정날개에 작용하는 저항증가보다 클 때 효과적이다.

2.3 전류고정날개의 설계조건

결과해석을 위하여 우수좌표계를 사용하였으며 사용된 좌표계는 Fig.2와 같은 이중좌표계이다. 수선면과 선수수선(F.P., Forward Perpendicular)의 교차점을 원점으로 하고 선체주위 유동의 흐름 방향을 x축, 우현 방향을 y축, 그리고 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 z축으로 하는 Cartesian 직교좌표계를 전체 좌표계(global coordinate system : xyz)로 사용하였으며 프로펠러 주위 유동해석 결과에 대하여는 프로펠러 설계자료로의 활용을 위하여 프로펠러 중심을 원점으로 한 국부좌표계(local coordinate system : x'y'z')를 도입하였다.



Fig. 2 Coordinate system

전류고정날개에 기인한 회전류와 프로펠러 후류의 회전에너지는 circulation(Γ)를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \int_A \omega_x dA = R_c \int_0^{2\pi} V_\theta d\theta \quad (1)$$

여기서 ω_x 는 축방향 와류이고 V_θ 는 접선방향 속도이다. Control plane은 프로펠러 disk의 뒷부분에 위치한 프로펠러와 동일축상의 원통이고 반경(R_c)은 프로펠러 반경(R_p)보다 약

간 작다.

전류고정날개에 기인한 회전류가 프로펠러 후류의 회전에너지를 제거시키기 위해서는 전류고정날개에 기인한 circulation (Γ_{HS})과 프로펠러에 기인한 circulation(Γ_{HP})은 크기는 같고 방향이 반대여야 한다. 즉

$$\nabla \Gamma = \Gamma_{HS} + \Gamma_{HP} = 0 \quad (2)$$

식 (2)로 표현된 방정식이 최적의 전류고정날개에 대한 최적의 설계 조건식이며 이 식을 만족하는 고정날개의 위치 및 각도가 최소의 저항을 가져야 한다. 고정날개에 작용하는 저항계수 (C_V)는 고정날개에 수직방향으로 작용하는 응력에 기인한 저항성분 (C_{VP})과 접선방향으로 작용하는 응력에 기인한 저항성분 (C_{VF})으로 나누어지며 식 (3)과 같이 구하여진다.

$$C_V = C_{VP} + C_{VF} = \frac{1}{S_{ST}} \iint (-c_p n_x + c_{fx}) ds \quad (3)$$

여기서 n_x 는 고정날개에서의 단위수직 vector의 x성분이며, S_{ST} 는 무차원화된 고정날개의 침수표면적이고, c_p 와 c_{fx} 는 고정날개에 작용하는 수직응력과 수평응력에 기인한 국부저항계수이고 $\frac{1}{2} \rho U_o^2$ 으로 무차원화 되었다.

2.4 전류고정날개의 설계방법

최적의 전류고정날개를 설계하는 과정은 아래에 설명되어져 있으며 Fig.3에 정리하였다.

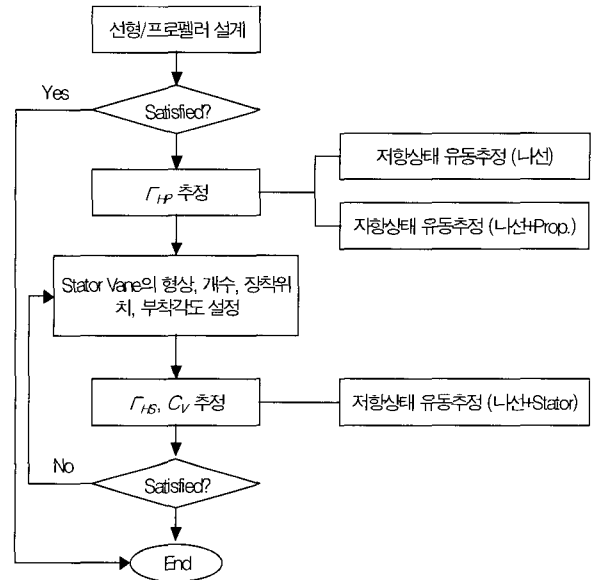


Fig. 3 Flowchart for the optimum design of pre-swirl stator vane

- ① 주어진 선형에 적합한 최적의 프로펠러 및 타를 설계한다.
- ② 고정날개가 부착되어 있지 않은 저항상태에서의 프로펠러 후류 유동을 추정하여 Γ_{HP} 를 구한다.
- ③ 나선상태에서의 유동을 해석하여 고정날개의 초기 형상, 개수, 장착위치 및 부착각도를 결정한다.
- ④ 고정날개가 부착되어져 있고 프로펠러가 없는 저항상태에서

의 유동해석을 수행하여 Γ_{HS} 를 구한다.

- ⑤ 고정날개의 형상, 개수, 장착위치 및 부착각도를 변경하여 설계 조건식[$Min.(\nabla\Gamma)$ and $Min.(C_V)$]을 만족하는지의 여부와 고정날개에 기인한 저항과의 관계를 구한다.
- ⑥ 결과가 만족할 때까지 ④-⑤단계를 반복하여 최적의 고정날개를 찾는다.

3. 수치해석 및 유속측정

3.1 대상선 선정

대상선은 현대중공업에서 개발한 310,000 TDW VLCC를 선정하였다. 선박의 주요치수는 Table 1에 표시하였다. 고정날개 초기형상은 NACA66이고 장착위치는 St. 0.574이다.

Table 1 Principal particulars of ship

L_{PP} (m)	320.00
L_{WL} (m)	326.50
B (m)	58.00
T_F (m)	20.95
T_A (m)	20.95
S (m^2)	27388.9
∇ (m^3)	314501
L_{CB} (m), + forward	10.078
C_B	0.8089
C_M	0.9980
λ	47.560

3.2 유속측정

유속측정을 위한 모형시험은 현대선박해양연구소 예인수조에서 수행하였다. 예인수조의 크기는 길이 210m 폭 14m 깊이가 6m이며 예인전차 최대속도는 11.0m/sec이다. 모형선은 Table 1에 표시된 축적비(λ)로 나무로 제작하였다. 난류를 제한하기 위하여 St. 19.5와 bulb 중간위치에 직경 3.2mm 높이 2.5mm cylinder 모양의 stud가 25mm 간격으로 박혀져있다.

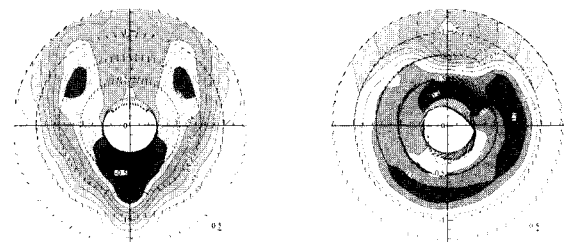
프로펠러면에서의 국부유속 계측을 위하여 5개의 5-hole Pitot tube가 부착된 rake를 사용하였으며 계측은 St. 0.574에서 5°간격으로 조사하였다. Sinkage와 trim이 자유로운 상태에서 수행하였으며 설계속도에서 조사하였다. 설계속도는 15.7knot이며 해당하는 Fn 는 0.144이고 실선과 모형선의 Rn 는 각각 2.175×10^9 과 6.918×10^6 이다. 5-hole Pitot tube는 6mm의 직경을 갖는 구형이며 중앙구멍과 측면 구멍의 각도가 30°이다. 각각의 구멍들은 압력계(용량 : 1.25psi)와 비닐튜브로 연결되어져 있다. Pitot tube의 kinematic calibration 영역은 pitch와 yaw 각도가 $\pm 30^\circ$ 이다. 유동각도가 이 영역을 벗어난 자료는 의미가 없어 자료해석에서 제외되었다.

4. 결과 및 토의

수치해석 및 실험 결과 해석을 위한 조절면(control plane)의 중심은 프로펠러 축과 동일하고 반경은 프로펠러 반경보다 약간 크며 ($R_C/R_p = 1.2366$) St. 0.212에 위치한 원형이다. 조절면에서 프로펠러가 부착되지 않은 상태와 프로펠러가 작동되는 상

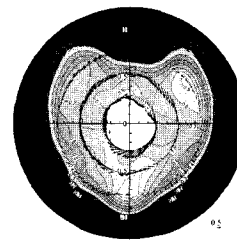
태에서의 축방향속도(V_x) 등고선, 2차유동을 나타내는 속도 벡터, 축방향 와류분포 및 그 차이를 Fig.4 와 Fig.5에 각각 나타내었으며 프로펠러에 기인한 2차유동 및 축방향 와류분포를 Fig.6에 나타내었다.

Fig.4에서 나타난 바와 같이 나선상태에서의 축방향속도는 프로펠러 상단부와 하단중심부근에 저속영역이 있으며 강한 2차유동과 와류가 있음을 알 수 있다. 프로펠러 상단부에는 크기는 작으나 넓은 범위이고 하단중심부는 크기는 크나 좁은 범위이다. 프로펠러가 작동하는 상태에서는 프로펠러 상단면에서 저속영역이 있으며 프로펠러 중심축 부근($r/R < 0.5$)에 프로펠러 회전방향으로 강한 와류가 존재한다. 프로펠러에 기인한 축방향 속도 증가가 좌현하단부와 우현 및 좌현상단부가 크며 와류의 변화는 좌현에 넓게 퍼져 있으며, 우현에서는 상단부와 중심하단부에 좁게 있다.



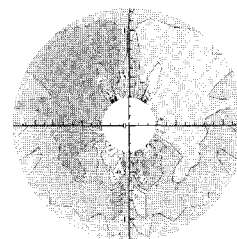
(a) Without propeller

(b) With propeller



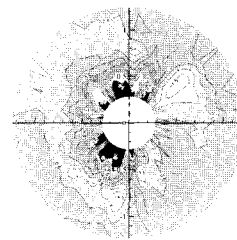
(c) Difference

Fig. 4 Axial velocity contour and velocity vector at the control plane before attaching pre-swirl stator vanes



(a) Without propeller

(b) With propeller



(c) Difference

Fig. 5 Longitudinal vorticity contour at the control plane before attaching pre-swirl stator vanes

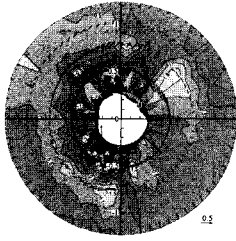


Fig. 6 Difference of longitudinal vorticity contour and velocity vectors at the control plane before attaching pre-swirl stator vanes

전류고정날개의 부착위치 및 날개길이는 프로펠러에 기인한 2차유동(혹은 ω_x)이 최소가 되도록 하여야 하며 전류고정날개가 선박의 성능에 미치는 영향을 Table 2에 정리하였다. 여기서 R은 프로펠러 반경이다.

Table 2 Effect of pre-swirl stator vane's location and length

	$r/R < 0.5$	$r/R < 0.8$	$r/R < 1.0$	$1.0 \leq r/R$
$0^\circ < \theta \leq 90^\circ$	○	×	×	×
$90^\circ < \theta \leq 180^\circ$	○	○	△	×
$180^\circ < \theta \leq 270^\circ$	○	×	×	×
$270^\circ < \theta \leq 360^\circ$	△	×	×	×

5. 결론

선체주위의 유동특성 추정으로부터 전류고정날개의 장착위치와 각도, 개수를 결정하는 설계기법을 정립하였으며 310,000 TDW VLCC에 적용하였다. 고정날개의 효과는 좌현상반부의 $r/R < 1.0$ 와 좌현하반부 및 우현상반부의 $r/R < 0.5$ 에서 가장 효율이 높으며 우현하반부에서는 효과가 낮을 것으로 추정된다. 그리고 우현에서는 고정날개의 효과가 좁은 영역에 한정되어 있으므로 설계시 주의를 요한다.

전류고정날개는 비교적 간단한 유체역학적 원리에 근거를 두고 있으므로 설계 예상치와 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 좀 더 완벽한 설계를 위하여 개발되어야 할 기술과 문제점이 있으며 아래에 정리하였다.

- ① 프로펠러에 기인하여 유동각도가 변하므로 고정날개의 장착각도를 결정하기 위하여 프로펠러가 작동하고 있는 상태에서 paint test, tuft test 등의 유선가시화 기법 개발이 필요하다.
- ② 전류고정날개의 효과를 추정할 수 있는 저항, 자항시험 기법 및 해석기법의 개발이 필요하다.
- ③ 모형선과 실선에서의 경계층 두께 및 유동의 차이가 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 실선 적용시 선체 반류에서의 난류강도(turbulent intensity) 증가 및 Reynolds No.의 증가에 따른 박리현상 감소에 의하여 항력계수의 감소가 추정되며 그에 따른 추진효율도 커지리라 예상된다.
- ④ 본 연구에서 무시한 부분이 고려되어야 한다. 즉, 고정날개에

는 적으나 추력이 있으며, 회전에너지가 모두 고정날개에 의하여 회수되는 것으로 가정하였으나 일부는 타에 의하여 회수된다.

- ⑤ 프로펠러와 타가 부착된 자항상태에서의 선체주위 유동특성을 파악을 위한 모형시험 기법의 개발이 필요하다.

참고문헌

- [1] Takekuma, K. et al., "Development of Reaction Fin as a Device for Improvement of Propulsive Performance of High Block Coefficient Ships", J. of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.150 (1981), pp.74-84.
- [2] Lee, J.T. et al, "Development of a Preswirl Stator-Propeller System for Improvement Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator propulsion System", Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.29, No.4 (1992), pp.132-145.
- [3] Kim, M.C. et al, "A Study on the Asymmetric Preswirl Stator System", Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.30, No.1 (1993), pp.30-44.
- [4] Lee, J.T. et al, "Development of a Preswirl Stator Propulsion System for a 300K VLCC", Trans. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.31, No.1 (1994), pp.1-13.
- [5] Yang, J.M. et al, "Effect of Pre-Swirl Stator vane on the Propeller Hull Interaction of a Full Ship", Proc. of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp.188-191, (2000).
- [6] Yang, J.M. et al, "Effect of Pre-Swirl Stator Vane on the Propeller Hull Interaction (2)", Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp.216-219, (2001).
- [7] Yang, J.M. et al, "Effect of Vertical Pre-Swirl Stator Vanes on the Propulsion Performance of a 300K Class VLCC", Practical Design of Ships and Other Floating Structures, pp.799-805, (2001).
- [8] Ikehata, M., "On the Improvement of Propulsive Performance of a Ship by the Stator behind the Propeller", J. of Kansai Soc. of Naval Architecture, Vol.188 (1983), p.95.
- [9] Blaurock, J., "Propeller Plus Vane Wheel, an Unconventional Propulsive System", International Symposium on Ship Hydrodynamics and Energy Saving, Madrid, (1983).
- [10] Tanaka, M. et al, "Improved Grim Vane Wheel System And The Latest Application to VLCC", 4th Int. Symposium on Marine Engineering, Kobe, Vol.2, pp.A-6-9-A-6-16, (1990).
- [11] Yao, H. and Shen, H., "Development and Experimental Study of a Novel Submarine Guide Vane Propeller System", Practical Design of Ships and Other Floating Structures, pp. 807-814, (2001).
- [12] Blaurock, J., "An Appraisal of Unconventional Aftbody Configurations and Propulsion Devices", Marine Technology, Vol.27 No.6 (1990), pp.325-336.
- [13] Mori, M. et al, "IHI A. T. Fin - 1st Report Its Principle and Development", IHI Engineering Review Vol.17 No.1 (1984), pp.1-7.