대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 44 권 제 2 호 2007 년 4 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 44, No. 2, pp. 93-100, April 2007

CFD 를 이용한 컨테이너선의 Post Swirl Stator 설계기법

김기현†*, 송인행*, 최순호*

삼성중공업 *

Design Technique of Post Swirl Stator in Container Vessels by CFD

Kihyun Kim †*, In-Haeng Song* and Soon Ho Choi *

Samsung Heavy Industries Co., LTD. *

Abstract

Post swirl stator is an energy saving device to recover rotational energy of the propeller. To optimize the performance of post swirl stator in container vessels, computational fluid dynamics using body force method was introduced. A commercial code Fluent was used in conjunction with body force distributed on the surface of actuator disk which is located in the propeller plane to optimize pitch angle of the post swirl stator blade. This study showed that CFD is an important tool to simulate flow behind ship with propeller, rudder and post swirl stator.

※Keywords: Post swirl stator, Body force(물체력), propeller(추진기), viscous flow(점성유동), CFD(계산유체역학), RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes), VLM(와류 격자법)

1. 서론

선박에서의 연료 절감을 위한 장치들은 고유가 시대를 맞이하여 그 중요성이 더욱 커졌으며, 또한 이산화탄소의 배출을 줄일 수 있는 친환경성으로 인하여 국내외 조선사들로부터 각광을 받아왔다. 연료절감장치 중에 스테이터(post swirl stator, pre swirl stator)는 그 효율의 우수성과 비교적 간단한 구조로 인하여 많은 관심을 받고 있다.

스테이터는 프로펠러 회전방향의 운동에너지를 회수하여 추진을 얻고자 하는 대표적인 부가물로 이중반전프로펠러(Contra Rotating Propeller)에 비하여 간단한 장치이며 비용 또한 낮은 장점이 있으며 프로펠러의 전방에 위치하면 전류고정 스테이터 (pre swirl stator), 후방에 위치하면 후류고정 스테이터 (post swirl stator)라 불린다. 전류고정 스테이터에 대한 연구는 1990 년 초부터 MOERI 를 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 최대 6% 의 연료절감효과를 얻은 바 있다(김문찬 등 1993, 이진태 등 1993, 강용덕 등 2004). 반면에 후류고정 스테이터는 국내에서는 그다지 연구가 되지 않은 상태이나, 컨테이너선과 같이 유속이 빠른 경우에도 캐비테이션 발생을 회피할 수 있다. 또한 전류고정 스테이터에 비하여 효율향상은 다소 감

접수일:2006 년 12 월 21 일, 승인일:2007 년 1 월 30 일
†교신저자: kihyun87.kim@samsung.com,042-865-4378

소하나, 스테이터의 부착으로 인한 프로펠러 회전수의 변화가 없기 때문에 운항중의 선박에도 손쉽게 장착이 가능하다는 장점이 있다. 후류고정 스테이터는 타 혼에 부착하는 방식과 Movable 파트에 코스타 벌브(Coaster bulb)와 함께 부착하는 방식으로 나뉜다. 타 혼 부분에 스테이터를 부착하는 방식에 대해서는 최근 MHI 에서 연구가 활발하다(Hoshino et al. 2004). 그러나 MHI 의 타 혼에 스테이터를 설치하는 방식에서는 타 면적이 감소할 뿐 아니라, 프로펠러 축을 선미쪽으로 탈착시킬 수가 없어 엔진룸 쪽으로 탈착시켜야 하기 때문에 많은 보수비용이 발생하게 된다.

본 연구에서는 이러한 post swirl stator 의 설계시 CFD 를 이용한 유동 계산으로 스테이터 날개의 피치각을 최적화 하여 스테이터의 성능을 향상시키고, 모형시험 비용과 시간을 줄일 수 있는 설계기법에 관해 알아보고자 한다. 프로펠러 후류의 유동을 구현하기 위해서 선박 초기 설계 단계에 응용을 목적으로 비교적 간단하며 적은 계산 비용이 요구되는 Body force 법(Stern et al. 1994, 김진 등 2005) 을 FLUENT 와 결합하여 선체-프로펠러-타의 상호 작용을 수치 해석 하였고(부경태 등 2004, 부경태 등 2005), 그 결과를 스테이터의 설계에 이용하였다.

2. 유동해석

2.1 Post swirl stator 작동원리

Post swirl stator 는 프로펠러의 회전 방향의 에너지를 축방향으로 변환하여 추진력으로 이용하기 위한 부가장치로 그 작동원리는 Fig. 1 에서 나타난 바와 같이 스테이터 날개에 걸린 양력을 추력 성분으로 변환하는 장치이다. Fig. 1 에서와 같이 스테이터 핀이 유입 유동에 대해 일정한 유입각도를 가지고 있을 때, 축방향의 속도인 Vx 와 접선방향의 속도인 Vt 로 속도 성분을 나눌 수 있고, 그 유입 각도 때문에 양력과 항력이 발생하게 되고 결과적으로 두 힘의 합에 의해서 추력이 발생하게 된다. 이때 스테이터의 피치각은 민감한 설계인자로 양력의 방향이 반대로 되면 추력 대신 항력 으로 작용하여 오히려 성능을 떨어뜨리게 되므로

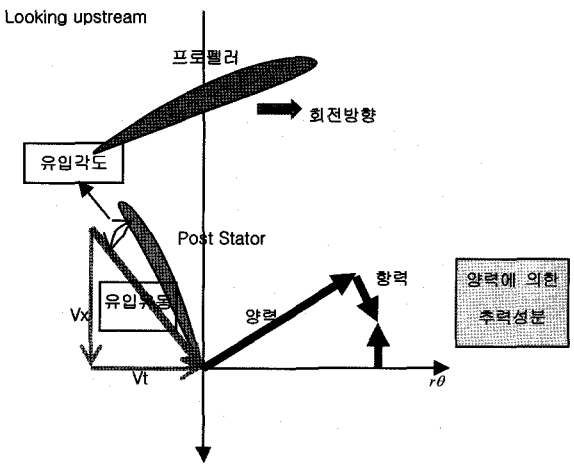


Fig. 1 Operating mechanism of post swirl stator

피치각이 스테이터의 성능을 결정하는 중요한 인자가 된다.

2.2 유동해석

유동해석은 상용 코드인 FLUENT 6.2 을 사용하였고, 지배방정식은 RANS 방정식이며, 속도와 압력의 연성에는 SIMPLEC 알고리즘, convection-diffusion 항은 2 차정도의 UPWIND scheme 을 사용하였고, 점성항은 2 차 정도의 이산화 방법을 사용하였다. 난류모델로는 Wall function 을 가지는 Realizable k-epsilon 2-equation 난류모델을 적용하여 난류 닫힘 문제를 만족시켰다.

2.3 격자계와 경계조건

격자계는 상용프로그램인 Gridgen V15 를 이용하여 생성하였으며, 격자계는 34 개의 block 과 1,400,000 만개의 cell 로 구성된 O-H 타입의 정렬 격자계이며 선수부분의 유무가 프로펠러와 스테이터 주위의 유동에 영향을 미치지 않으므로 계산 시간을 줄이기 위하여 편의상 선수부분은 생략되었다. 대상 선박은 8,500TEU 컨테이너선이며 그 주요목과 수치해석을 위한 계산 조건은 Table 1 에 잘 나타나 있다. 프로펠러면에 body force 를 분포시켜 프로펠러의 회전을 모사하도록 하기 위해 선체방향으로 하나의 cell 과 프로펠러 반경방향까지로 이루어진 하나의 block 을 구성하였다.

Table 1 Principal particulars and calculation conditions

LBP	m	319.0
Beam	m	42.8
Draught	m	13.0
Ship speed	knots	25.0
Advance Ratio	Js	0.7
Propeller revolution	rps	9.12

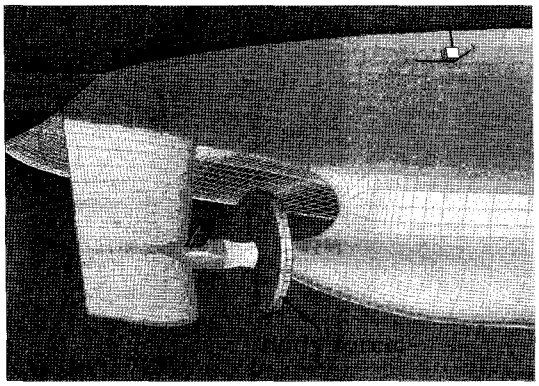


Fig. 2 Grid systems

수치 해석 과정에서 RANS 방정식의 생성항으로 Body force 가 주어지게 된다.

선체 표면에서의 경계조건은 No-slip 조건을 적용하였으며, 자유수면의 위치에 계산의 편의상 대칭면의 경계조건을 적용하여 유동이 대칭이 되도록 하였고, 입구면에는 균일 유입조건을 그리고 출구면에서는 내부의 유동으로부터 외삽(extrapolate)하여 정해지는 Neumann 조건이 사용되었다.

2.4 물체력 (Body force)

Body force 법은 선체-프로펠러-스테이터-타의 상호작용을 잘 고려하기 위해 비대칭 물체력(Non-axisymmetric body force)법을 이용하였다(김기현 등 2005).

비대칭 물체력(Non-axisymmetric body force)은 RANS 방정식 기반의 수치계산으로 구해진 프로펠러 유입유동과 프로펠러 회전수를 입력 조건으로 포텐셜을 기저로 한 프로펠러 성능해석 프로그램(Vortex Lattice Method)에 의해 식(1), (2)로 구해진다(Choi 2000).

$$f_{bx}\Delta x\int_{r_1}^{r_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2} r\,d\theta dr = \frac{4K_T}{J_S^2} I_{VLM} \tag{1}$$

$$f_{b\theta}\Delta x\int_{r_1}^{r_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2} r^2\,d\theta dr = \frac{8K_Q}{J_S^2} J_{VLM} \tag{2}$$

여기서, K_T, K_Q는 프로펠러 해석 코드에서 계산된 추력 및 토오크 계수를 의미하여 I_{VLM}, J_{VLM}은 해석 코드에서 구해지는 축 방향 과 회전방향의 Body force 분포를 의미한다. 축 방향 및 회전방향 분포는 프로펠러 loading 분포 $\Gamma(r,\theta)$를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{VLM} = \frac{\int_{r_1}^{r_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\Gamma(r,\theta)\,d\theta dr}{\int_{r_H}^{r_P}\int_{\theta_0}^{\theta_{2\pi}}\Gamma(r,\theta)\,d\theta dr} \tag{3}$$

$$J_{VLM} = \frac{\int_{r_1}^{r_2}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\Gamma(r,\theta)\,r\,d\theta dr}{\int_{r_H}^{r_P}\int_{\theta_0}^{\theta_{2\pi}}\Gamma(r,\theta)\,r\,d\theta dr} \tag{4}$$

이렇게 구해진 물체력을 RANS 식에 대입하여 Fig. 3과 같이 수렴이 이루어질 때까지 반복 계산을 수행하여 최종 결과를 얻을 수 있다. Fig. 4 는 유입 유동 변화에 따른 프로펠러 성능해석에서 추력과 토오크계수 수렴도를 보이고 있다. 반복계산 네 번째에서 약 1% 이내로 수렴하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 반복계산은 7 회 수행하였다. 또한 프로펠러 코드와 반복 계산이 진행되는 동안 Fluent 계산은 충분히 수렴할 수 있도록 약 1000 번의 수치계산을 수행하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 초기 설계된 스테이터의 성능 검증

모형시험에서 타의 leading edge 에서 계측된 반류 분포를 이용한 초기 설계된 스테이터의 성

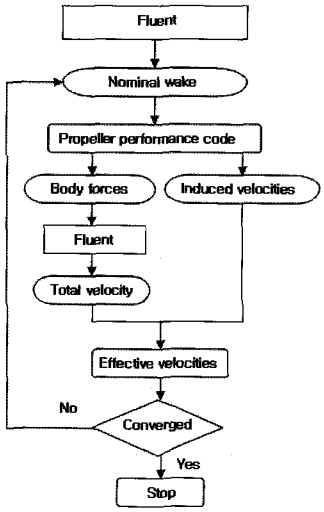


Fig. 3 Flow chart for interactive calculation

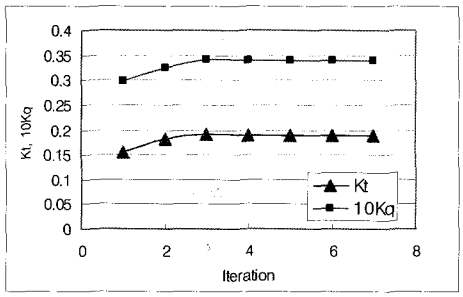


Fig. 4 Convergence history of K_T and K_Q

에는 스테이터와 러더에서의 유선가시화와 압력 분포를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 벌브 형상의 상부에 높은 압력의 stagnation point 가 존재하여 저항을 크게 하고(김기현 등 2005) 스테이터 후방의 유선 또한 부드럽게 이어지지 않고 있다.

3.2 스테이터 날개 위치의 최적화

이러한 벌브 형상으로 인한 저항증가의 문제점의 해결을 위하여 벌브 형상을 shaft 타입으로 교체한 후 다시 CFD 계산을 수행한 결과 Fig. 6 과 같이 stagnation point 가 사라짐을 알 수 있으나 스테이터 후방의 유동은 여전히 부드럽지 않게 흘러간다. 이는 스테이터와 러더 사이의 간격이 너무 좁고 피치각이 상대적으로 작아 그 사이의 유

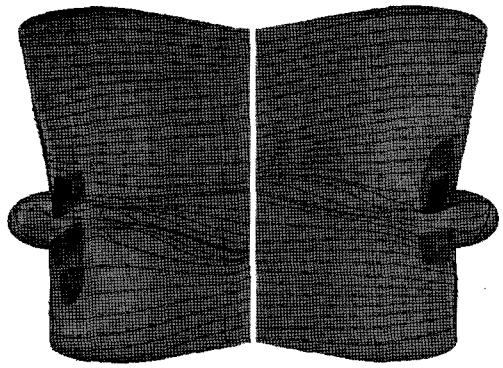


Fig. 5 Streamline and pressure distribution for bulb stator

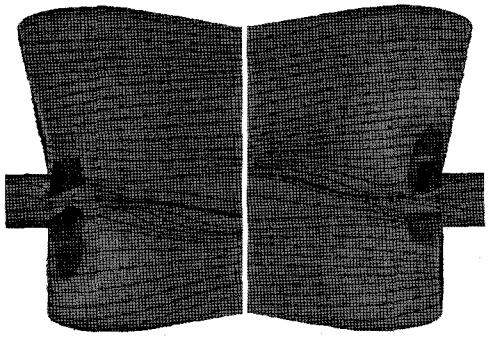


Fig. 6 Streamline and pressure distribution for shaft stator

동이 너무 가속되기 때문으로 판단된다.

이에 Fig. 7 에서와 같이 스테이터 날개를 0.5 chord length 만큼 프로펠러쪽으로 전진 이동시켜 CFD 계산을 수행한 결과 Fig. 7 과 같이 스테이터 후류의 유동이 부드러워짐을 알 수 있고, 또한 프로펠러와 스테이터 날개와의 사이가 가까워져서 프로펠러 회전에너지의 회수가 더 잘될 것으로 예상된다.

Table 2 에 CFD 계산결과로 나온 저항계수(Cd)가 비교되어 있다. 벌브 형상을 가진 스테이터의 경우 0.5 chord length 전진시킨 shaft 스테이터보다 저항 계수가 33% 높고, 같은 shaft 스테이터의 경우에도, 앞으로 0.5 chord length 전진시킴으로써 5%의 저항 절감의 효과가 있었다.

Table 2 Drag coefficient comparison

	bulb stator	Shaft stator	Shaft stator (0.5 C 전진)
Cd(CFD)	0.028	0.022	0.021
Cd(%)	133	105	100

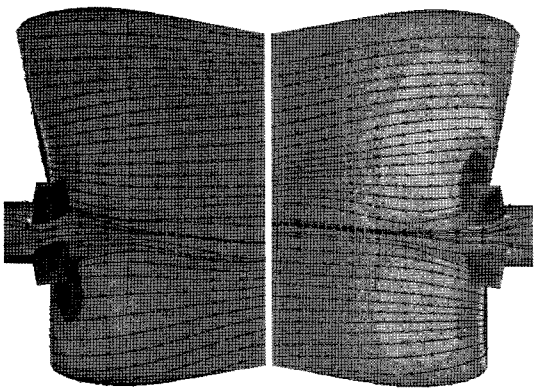


Fig. 7 Streamline and pressure distribution

3.3 스테이터 날개 부착각의 최적화

스테이터 날개의 부착각을 최적화 하기 위해 스테이터 주위의 유선을 살펴보았다. Fig 8.에서와 같이 좌현 상부의 날개와 러더 사이에 유선이 집중되었고 그 날개의 leading edge 부근에서의 유선은 자연스럽지 못한데 이는 스테이터에 걸리는 저항을 높이는 한 요인이 된다. 따라서 기존의 타와 좌현 상부의 날개의 간격을 증가시키고, 피치각을 시계방향으로 회전을 시켜서 유동을 보다 원활하게 만들어 저항감소의 효과를 얻었다. 우현 하부의 날개의 경우도 마찬가지로 러더로부터 멀어지게 하고 피치각도 시계방향으로 증가시켰다. 최종적으로 설계된 스테이터는 나머지 날개도 타로부터 멀어지게 해서 스테이터와 타 사이의 유동을 원활하게 하였다. 그리하여 스테이터 날개의 부착각도를 최적화 할 수 있었다.

3.4 스테이터 날개 피치각의 최적화

스테이터의 성능 향상을 목적으로 스테이터 날개의 피치각을 최적화하기 위해 각 날개의 0.3, 0.5, 0.7r/R 을 지나는 평면의 유동을 살펴보았다. Fig. 9 와 10 에 각각의 경우에 해당하는 유선과 압력 분포를 보여주는데 fin1 과 2 는 우현 상부와 하부의 날개에 해당하고, fin3 과 4 는 좌현 하부와 상부의 날개에 해당하며 각각의 날개에서 왼편으로부터 오른편으로 가면서 0.3, 0.5, 0.7r/R 을 지나는 평면을 나타낸다.

Fig. 9 는 각 날개의 0.3r/R(좌측), 0.5r/R(중간), 0.7r/R(우측)에서의 유선가시화를 보여준다. Fin 1 에서의 유동은 0.3R 에서 압력분포가 추력을 발생시키는 방향과 반대로 나타나서 스테이터 fin 이 추력이 아닌 저항으로 작용함을 알 수 있고 피치각이 유선의 방향으로 조정될 필요가 있다. Fin 2 의 경우도 마찬가지로 0.3R 에서의 압력분포가 반대로 나타나 피치각의 조정이 필요하다. Fin 3 과 4 의 경우에도 양력의 방향을 바꾸기 위하여 피치각의 조정이 필요하다.

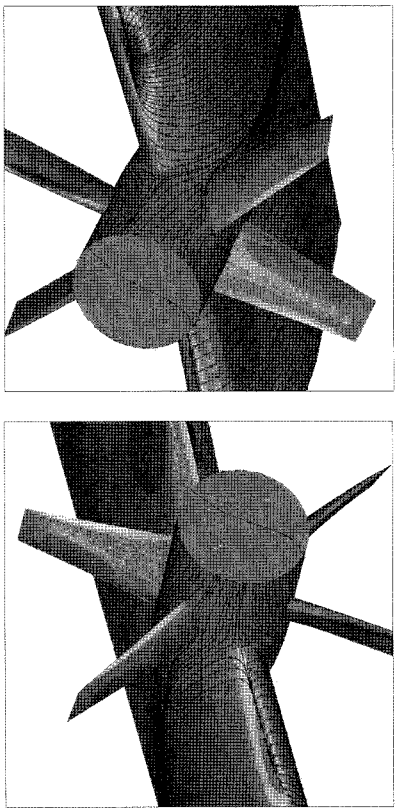
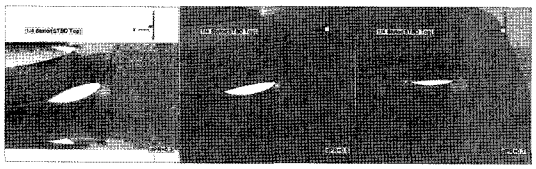
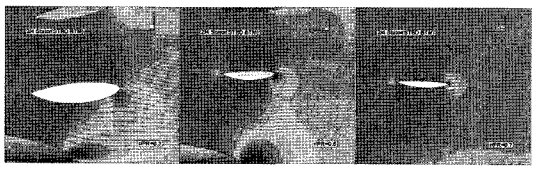


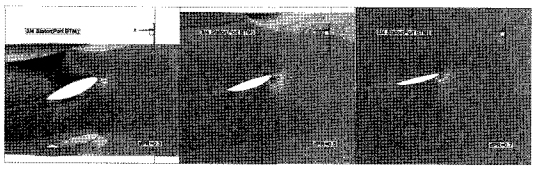
Fig. 8 Streamline and pressure distribution (Oblique view)



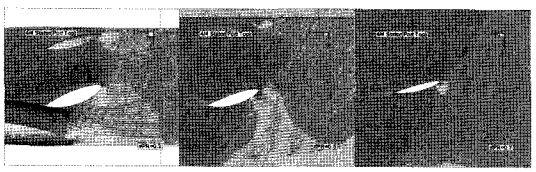
(a) fin1



(b) fin2

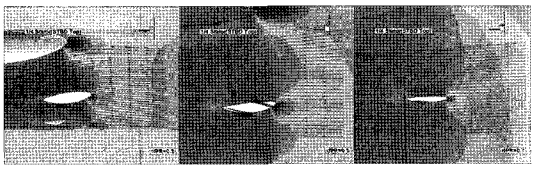


(c) fin3

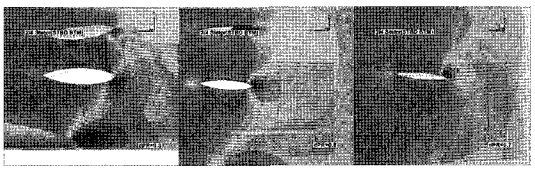


(d) fin4

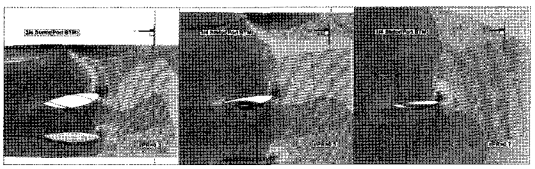
Fig. 9 Streamline and pressure distribution for each fin (Before pitch angle optimization)



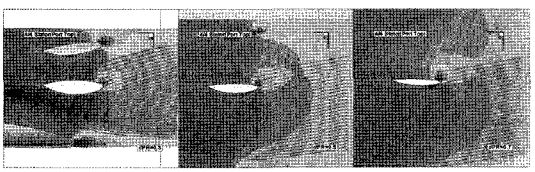
(a) fin1



(b) fin2



(c) fin3



(d) fin4

Fig. 10 Streamline and pressure distribution for each fin (After pitch angle optimization)

반복된 피치각 조절과 CFD 시뮬레이션 결과 아래와 같이 유동에 최적화된 결과를 얻게 되었다 (Fig. 10).

Fin 1 의 경우 기존의 피치각에서 시계방향으로 5° 회전한 결과 압력분포가 추력을 발생시키는 방향으로 양력이 발생하게 되었다. 시뮬레이션에서 같은 방향으로 5° 를 더 회전했을 경우에는 양력의 방향이 저항을 증가시키는 쪽으로 바뀌어 오히려 저항을 증가시키는 결과를 가져왔다. 이처럼 피치각의 조절은 매우 민감하게 반응하므로 스테이터의 효율을 결정 짓는 중요한 설계요소임을 알 수 있다. Fin 2 의 경우에는 기존의 camber 분포로는 추력을 발생시키는 방향으로의 양력을 발생시키기 어려우므로 camber 분포를 변경하였고 피치각 또한 유선 방향으로 변경시켰다. 그 결과 fin 2 에서 발생하는 저항을 감소화 할 수 있었다. Fin 3 에서는 기존의 피치각으로부터 5° 회전함으로써 양력을 극대화할 수 있었는데, 이로 인하여 모든 fin 중에서 가장 큰 추력을 얻어 저항이 최소화되었다. Fin 4 는 피치각을 10° 회전하였을 때 가장 작은 저항값을 가졌으나 fin 의 tip 쪽에서 cavitation 이 발생될 우려가 있어서 5° 만 회전하였고, 5° 만의 회전으로도 충분한 저항 감소의 효과가 있었다. Table 3 에 각 fin 과 러더에 걸리는 저항값을 CFD 계산 결과로 비교하였다. Table 2 에 나타난 바와 같이 각 fin 의 피치각 조절 후 각 fin 에 걸리는 저항의 값이 현저하게 줄었다. 이는 CFD 계산 결과를 토대로 유동장의 분석을 통하여

Table 3 Drag coefficient comparison before and after pitch angle optimization(Cdx1000)

	Before optimization	After optimization
fin1	1.50	0.97
fin2	1.30	1.05
fin3	1.81	0.04
fin4	2.16	0.66
rudder	9.22	9.91
total	15.97	12.63

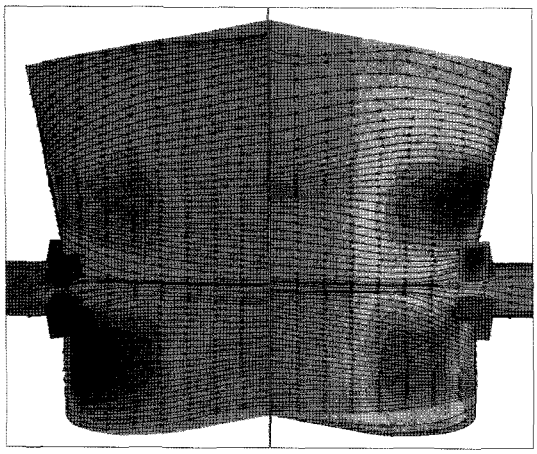


Fig. 11 Streamline and pressure distribution after pitch optimization

설계를 변경하는 것이 효과가 있음을 증명하며, 예인수조 시험결과도 이와 유사한 경향을 보여 주었다.

Fig. 11 에 스테이터 날개의 피치각 최적화 후 스테이터와 러더면에서의 유선가시화와 압력분포를 보여 주고 있다. 앞서서 살펴 본 유선가시화(Fig. 7)와는 다르게 스테이터의 leading edge 부근의 유동이 피치각 조절로 인하여 자연스러워짐을 알 수 있다.

3.5 모형시험 결과

최적화된 스테이터의 성능을 검증하기 위한모형시험이 SSMB(Samsung Ship Model Basin)에서

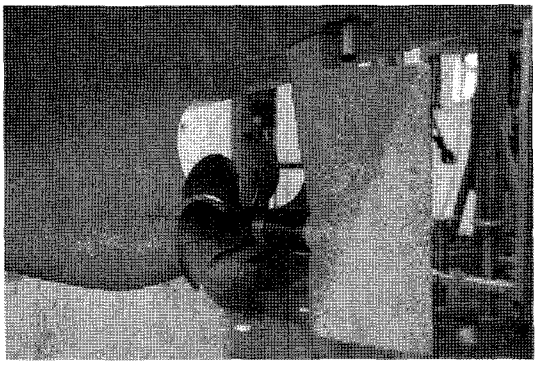


Fig. 12 Hull and post swirl stator for model test

Table 4 Model test results (ITTC Performance prediction Method)

Type	Normal Rudder	Initial stator	Final stator
Jm	0.706	0.701	0.710
Wts	0.222	0.262	0.212
thdf	0.154	0.164	0.133
PD ratio	100.0%	102.2%	97.9%

수행되었다.

Fig. 12 는 모형선에 장착된 최적화된스테이터를 보여준다. 최종 모형시험 결과는 Table 4 에 보였으며, 보통의 러더와 초기 벌브를 채택한 스테이터, 최종적으로 최적화된 shaft 를 사용한 스테이터의 예인 수조 시험 결과를 보였다. 한편 해석법은 1978 ITTC 표준 시험법을 따랐으며 해석시 스테이터는 부가물로 처리하였다. 최종적으로 최적화된 스테이터의 경우에 보통의 러더보다 2.1%의 전달마력의 감소효과를 보여준다. 이는 탱커선을 대상으로 전류고정 스테이터에서 얻은 최대 6%의 연료절감효과 보다는 다소 낮은 수치이나(김문찬 등 1993), 스테이터 날개의 연료절감효과가 고속 컨테이너선에서는 저속선에서보다 감소하며, 후류고정 스테이터의 날개수 및 직경도 전류고정 스테이터 대비 감소한 점을 감안하면 크게 작은 수치는 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 컨테이너선의 Post swirl stator 의 성능 향상을 위한 기법으로 상용 코드인 Fluent 와 Body force 법을 이용하여 선체-프로펠러-스테이터-타를 고려한 선체 주위의 수치계산을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 러더와 스테이터의 사이의 복잡한 유동을 수치계산을 통해 확인할 수 있었고, 스테이터의 부착위치와 각도를 최적화할 수 있었다.
- 스테이터 날개의 피치각은 스테이터의 성능을 결정짓는 중요한 인자인데, CFD 의 계산을 통해서 그 피치각을 최적화할 수 있었다.
- 스테이터의 설계시 CFD 를 이용하여 핵심 설계인자를 최적화할 수 있음을 알게 되었고, 따라서 모형시험의 비용과 시간을 절약할 수 있었다.

참 고 문 헌

• 강용덕, 김문찬, 전호환, 2004, "편재된 비대칭형 전류고정날개 추진시스템에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 3 호, pp. 13-21.

• 김기현, 김정중, 최순호, 2005, " Body Force 법을 이용한 선체-추진기-타 주위의 점성 유동해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 640-646.

• 김문찬, 이진태, 서정천, 김호충, 1993, "비대칭형 전류고정날개 추진시스템 연구," 대한조선학회 논문집, 제 30 권, 제 1 호, pp. 30-44.

• 김 진, 박일룡, 김광수, 반석호, 2005, "KRISO 컨테이너 및 VLCC 선형에 대한 RANS 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 6 호, pp. 593-600.

• 부경태, 홍춘범, 이경준, 2004, "선체/추진기/타를 고려한 선미 유동장 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 527-531.

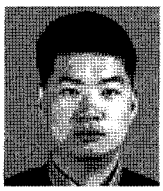
• 부경태, 홍춘범, 백광준, 2005, "CFD 를 이용한 자항 상태 시뮬레이션," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 599-604.

• 이진태, 김문찬, 반석호, 김기섭, 김호충, 1993, "30 만톤 초대형 유조선을 위한 전류고정날개 추진시스템 개발," 대한조선학회 논문집, 제 31 권, 제 1 호, pp. 1-13.

• Choi, J.K., 2000, Vortical Inflow-propeller Interaction Using an Unsteady Three Dimensional Euler Solver, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin.

• Hoshino, T., Oshima, A., Fujita, K., Kuroiwa, T., Hayashi, F. and Yamazaki, E., 2004," Development of High-Performance Stator Fin by Using Advanced Panel Method," Technical Review Vol. 41, No. 6, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

• Stern, F., Kim, H.T., Zhang, D.H., Toda ,Y., Kerwin, J. and Jessup, S., 1994," Computation of Viscous Flow Around Propeller-Body Configurations: Series 60. C_B=0.6 Ship Model," Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 2, pp. 137-157.



<김 기 현> <송 인 행> <최 순 호>