

## CPP 설계기법 연구

송인행<sup>†</sup>, 이태구<sup>\*</sup>, 한재문<sup>\*</sup>

삼성중공업 조선해양연구소<sup>\*</sup>

### An Investigation on CPP Design Technology

In-Haeng Song<sup>\*</sup>, Taegoo Lee<sup>\*</sup> and Jae-Moon Han<sup>\*</sup>

Samsung Heavy Industries Co., LTD., Marine Research Institute<sup>\*</sup>

#### Abstract

CPP is widely utilized in RoPax ship, shuttle tanker etc. due to excellent manoeuvrability in low speed, and its usage is recently increased. The CPP was almost designed by CPP maker, and its performance seemed to be not fully optimized.

In this study the whole CPP design procedure was reviewed and design technology of CPP was settled down including calculation of spindle torque and MOI, which was fully confirmed by KHI CPP maker. In order to confirm the CPP design technique, a CPP for shuttle tanker was designed and its performance was verified through series of model tests. The propeller efficiency and face cavitation performance of the CPP was well improved.

This CPP design technology will be contributed to the optimization of performance and cooperation with CPP maker.

※Keywords: CPP(가변피치 프로펠러), Design technology(설계 기술), Spindle torque(스핀들 토크), Performance(성능), Model test(모형시험), Optimization(최적화)

#### 1. 서언

CPP는 저속에서의 우수한 조종성능 때문에 Ro-Pax선을 비롯하여 쇄빙선 등에서 널리 채택하고 있으며, 최근 들어 Shuttle tanker, FPSO 선박 등에서도 dynamic Positioning 용량의 증대 때문에 널리 사용되고 있다. CPP는 후진을 위한 디젤

기관의 역전기어, 또는 터빈 추진선박의 후진 터빈 설비가 필요 없으며, 가속, 정지 성능이 우수하며, 항만에서의 접안성능 및 dynamic positioning 관련 조종성능이 우수하다는 장점이 있다. 이외에도 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 다양한 운항조건에 적합하게 운항이 가능함으로써 기관에 무리를 주지 않을 뿐 아니라, 연료 소비율도 적고 효율도 좋아짐.

† 교신저자: inhaeng.song@samsung.com

042-865-4731

- Shaft generator의 사용시 일정한 RPM의 유지 가능.
- 황천시 엔진의 과부하 작동없이 full engine power 사용 가능
- Low power에서의 추진효율의 향상

현재는 CPP의 날개 설계는 메이커에서 담당하고 있으나, 메이커에서는 지속적인 프로펠러의 성능 향상 보다는 캐비테이션 및 구조 안전성을 더 중시하여 프로펠러 성능이 상대적으로 저하되고 있으며, 추진효율, face 캐비테이션 등의 성능과 잘 조합이 되지 않는 것으로 보인다. 이러한 문제는 CPP 설계를 메이커에 의존하는 동안에는 회피할 수 없을 것이다. 본 연구에서는 향후 메이커와의 공동 설계를 전제로 CPP 설계기술의 자립을 목표로 하여 CPP 설계기법 개발 및 성능 향상에 관한 연구를 수행하였다. 개발된 CPP 설계기법 중 날개 구동 관련 기술은 일본의 CPP 메이커인 KHI의 검토를 받았으며, CPP의 성능을 확인하기 위하여 Shuttle tanker선을 대상으로 프로펠러 설계를 수행하고, 모형시험을 수행하였다. 비교 대상은 기존 Rolls-royce 및 KHI에서 설계된 프로펠러들이다.

## 2. CPP 설계 요소기술 개발

본 연구에서는 기보유의 프로펠러 성능해석 기법을 활용하여 CPP 설계에 필요한 피치각 변화에 따른 offset 생성 프로그램과 연결시켰으며, face 캐비테이션 추정 기법을 개발하였다. 그리고 피치각 변경시 소요되는 spindle torque 추정 기법을 메이커의 자문을 거쳐 개발하였다.

CPP는 작동 기능의 특성상 설계점(통상적으로 100% Pitch 조건) 뿐만 아니라 off-design 조건에서의 성능 추정이 필수적이다. 피치각 변화에 대한 offset 생성은 프로펠러 날개를 반경 및 코오드 방향으로 각 400개씩 fine mesh로 분할한 후 스피들 축을 중심으로 피치각 만큼 회전한 후에 새 반경으로 interpolation함으로써 새로운 offset를 생성하도록 하였다. 프로펠러 새 형상은 기존의 성능해석 프로그램을 사용하여 성능추정을 하도록 하였다.

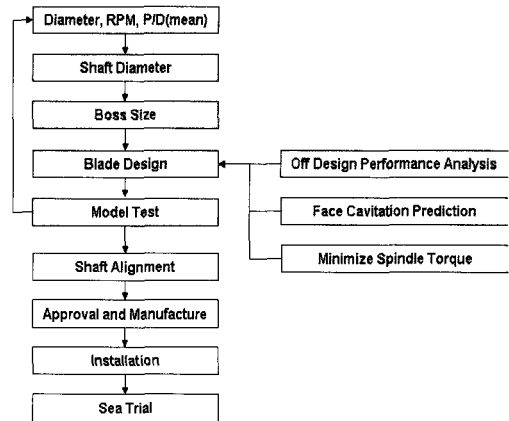


Fig. 1 Flow chart of CPP design

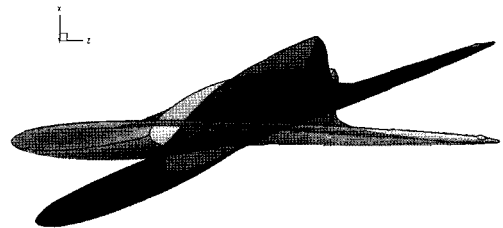


Fig. 2 Rotated CPP blade

Fig. 1은 CPP 설계과정을 보이고 있으며, Fig. 2는 자체 개발한 offset 생성 프로그램에 의한 피치각의 변화에 대한 프로펠러의 형상을 보여준다.

CPP의 설계에서는 off-design 상태에서 특히, 프로펠러 회전수가 동일하게 작동하는 constant RPM mode에서는 프로펠러 압력면의 캐비테이션 발생 가능성이 필연적으로 증가하게 된다. 따라서, CPP의 설계 단계에서의 face cavitation 특성 추정은 필수적으로 검토되어야 할 중요사항이다. 이를 위해 본 연구에서는 비정상 유동 중의 작동하는 프로펠러 날개의 유체역학적 특성은 보오텍스 격자법을 이용하여 해석하였으며, 여러 반경에서 cavitation bucket diagram을 계산하여 프로펠러의 face cavitation 발생 유무를 추정할 수 있는 기법을 개발하였다. 이러한 재래식 캐비테이션 추정방법은 face 캐비테이션 성능의 상대적 향상을 목적으로 충분히 활용 가능할 것으로 본다.

프로펠러 날개 단면에서의 국부 양력계수는

아래에 보듯이 Kutta-Joukowski 정의로부터 계산된다.

$$L = \rho U \Gamma$$

$$C_L = \frac{L}{0.5 \rho U^2 c} = \frac{\rho U \Gamma}{0.5 \rho U^2 c} = \frac{2\Gamma}{Uc}$$

$$C_L = 2 \cdot \frac{\Gamma}{2\pi R U_R} \cdot \frac{2\pi R U_R}{c U_{local}}$$

위식에서 국부 양력계수에 필요한 보오텍스의 세기는 보오텍스 격자법에 대한 경계치 문제를 해석함으로써 구할 수 있다.

Fig. 3은 CPP의 0.783 r/R에서의 face 캐비테이션 및 운항곡선 예를 보여준다. 그림으로부터 대략 0.783 r/R에서 face 캐비테이션이 발생하고 있음을 예측할 수 있다.

또한 CPP에서는 spindle 축을 중심으로 날개를 회전시키기 때문에 spindle 축에 작용하는 힘을 계산하여야 한다. Spindle 토오크는 centrifugal 토오크, hydrodynamic 토오크, frictional 토오크로 구성된다. 임의의 반경 위치에서 hydrodynamic 토오크는 프로펠러 성능해석 프로그램에서 계산되며, frictional 토오크는 프로펠러의 pitch가 변경되지 않게 하기 위해 가해지는 토오크이다. Centrifugal 토오크와 hydrodynamic 토오크의 합이 frictional 토오크 보다 작아야 날개가 회전하지 않는다. 원심력으로 인한 spindle 토오크는 항상 피치가 영인 방향으로 작용한다. 즉, 피치가 양이면 음의 피치 방향으로, 피치가 음이면 양의 피치 방향으로 작용한다. 상기 요소에 의한 성분을 계산할 수 있는 프로그램을 작성하였으며, CPP 메이커인 일본의 KHI의 검토를 받았다. 한편 일본 CPP 메이커의 경우 유럽 메이커와는 달리 조선소에서 CPP blade 설계를 하기도 하며, 이 경우 blade 성능에 대해서는 조선소가 책임을 지며 machinery 부분은 메이커가 책임을 지는 사례가 많다. 따라서 CPP 성능 향상 및 설계 자립을 기대하려면 현실적으로 일본 메이커와의 우호적인 관계 정립이 필요하다고 본다. CPP 설계요소기술이 확보된 후 대상선을 선정하였으며, CPP의 설계 및 모형시험을 통하여 CPP 관련 설계요소기술 및 설계기술을 검증하였다.

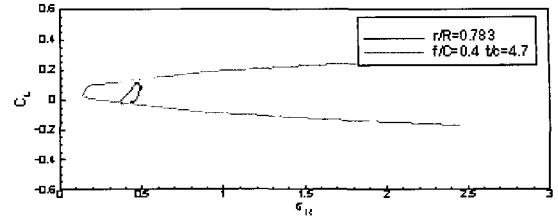


Fig. 3 Face cavitation bucket(0.783 r/R)

### 3. CPP 설계 및 성능시험

#### 3.1 CPP 설계

대상선은 147.5k Shuttle Tanker선으로, L/B = 5.70, B/T=2.90이며, 엔진은 NCR에서 20,630 ps X 87.9 RPM이다. CPP에서는 피치를 조정할 수 있기 때문에 일반 프로펠러 설계시 고려하는 RPM 마진은 보통 전혀 고려하지 않고 있다. 프로펠러 초기 설계 결과로부터 프로펠러의 날개수는 40이며, 직경은 8.0 m로 결정되었다. 동 선형 및 엔진에 대하여 설계된 프로펠러는 모두 2개로, Rolls-royce에서 설계한 프로펠러(SP161)와 KHI에서 설계한 프로펠러(SP251)가 있다. CPP에서는 대부분 직경 및 전개면적비는 날개중량을 감소시켜 spindle torque를 감소시킬 수 있도록 일반 프로펠러 보다 작게 사용한다.

본 연구에서 설계된 프로펠러(SP306)의 기본제원은 기존 프로펠러들과 함께 Table 1에 보였다. Table 1로부터 Rolls-royce 설계는 SHI 설계 대비 캠버가 크며, 피치의 tip unloading이 큼을 알 수 있다. CPP에서 tip에서의 피치를 과도하게 감소시키게 되면 back 캐비테이션 성능은 향상될 것이나, face 캐비테이션 성능이 뒤떨어질 뿐 아니라, 추진효율의 감소도 우려된다.

#### 3.2 CPP 단독시험 및 자항시험 결과

보통 CPP에서는 운항중에 피치를 증가시키는 경우는 거의 없으나, 항만에서는 선속이 낮기 때문에 피치를 감소시키는 경우는 흔하다. 여기서는 본 연구에서 설계된 CPP인 SP306에 대하여 피치가 0°, -5°, -10° 회전한 경우에 대한 피치분포를 계

Table 1 Main dimensions of the propellers

Type	RR Design (SP161)	KHI Design (SP251)	SHI Design (SP306)
Dia(m)	8.0	8.0	8.0
Ae/Ao	0.443	0.474	0.452
(P/D)m	0.745	0.768	0.776
$P_{0.95R}/P_{0.7R}$	0.870	0.861	0.909
Hub ratio	0.243	0.250	0.243

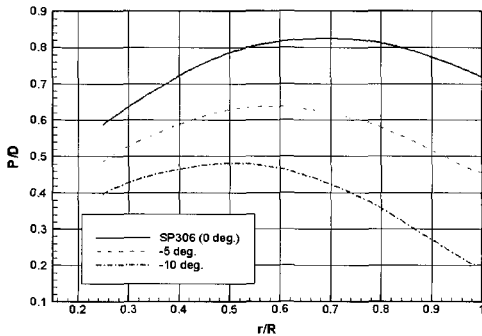


Fig. 4 P/D distribution for various pitch angle

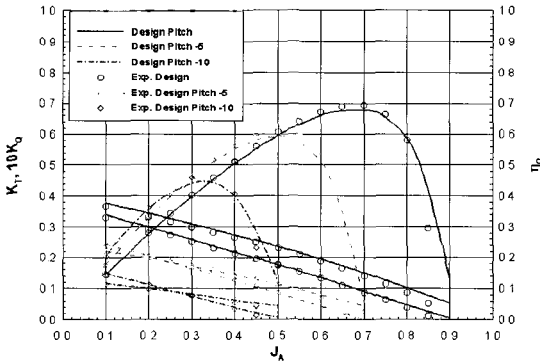


Fig. 5 POW test results with predicted values for various pitch angle

Table 2 Results of self-propulsion tests

Type	RR Design (SP161)	KHI Design (SP251)	SHI Design (SP306)
wts	0.315	0.326	0.313
t	0.233	0.235	0.218
eta_H	1.121	1.135	1.137
eta_R	1.006	0.986	0.996
eta_O	0.581	0.592	0.598
eta_D	0.656	0.663	0.677
Ns	92.2	88.6	86.9

산하여 Fig. 4에 보였다. 피치 회전각이 클수록 tip에서 피치 감소가 현저함을 알 수 있다. 저속에서 운항할 경우에는 피치를 감소시켜야 하기 때문에 face 캐비테이션의 발생을 고려하여야 한다. 본 연구에서 설계한 프로펠러인 SP306의 피치는 tip에서 과도한 부하감소를 피하도록 함으로써 저속에서의 face 캐비테이션 성능을 확보하도록 하였다. 각 피치각에 대하여 수행한 CPP 단독시험 결과를 추정값과 함께 Fig. 5에 보였으며, 대체로 프로펠러 단독성능은 추정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

CPP를 장착하여 수행한 각 피치각에 대한 자항 시험 결과는 Rolls-royce에서 설계한 CPP(SP161) 그리고 KHI에서 설계한 CPP(SP251)와 함께 Table 2에 비교하였다. 본 연구에서 설계한 프로펠러인 SP306의 추진효율은 SP161 대비 3.2% 그리고 SP251 대비 2.1%가 향상되었다.

3.3 공동시험 결과

설계된 CPP의 캐비테이션 성능을 검증하기 위하여 당사의 대형공동수조에서 SP161과 함께 비교 실험을 수행하였으며, 각각 피치각이 -5°에 대하여도 캐비테이션 시험을 수행하였다. Fig. 7에 캐비테이션 관찰 결과를 보였다. 캐비테이션은 모두 tip 근처에서 발생하였으며, 피치각의 변화에 대해서는 그다지 차이가 발생하지 않았다.

선체변동압력도 계측하였으나, 두 프로펠러 모두에서 1차 날개주파수에서 약 1 kPa 정도로 진동 측면에서 문제가 없는 수준으로 나타났다.

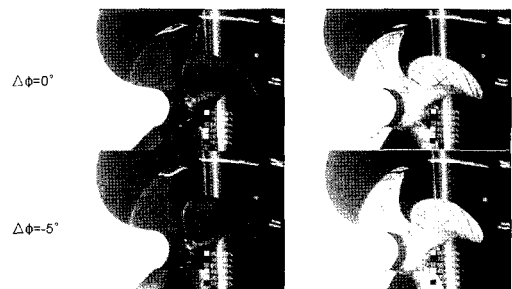


Fig. 6 Observed cavitation pattern for various pitch angle(SP306 & SP161)

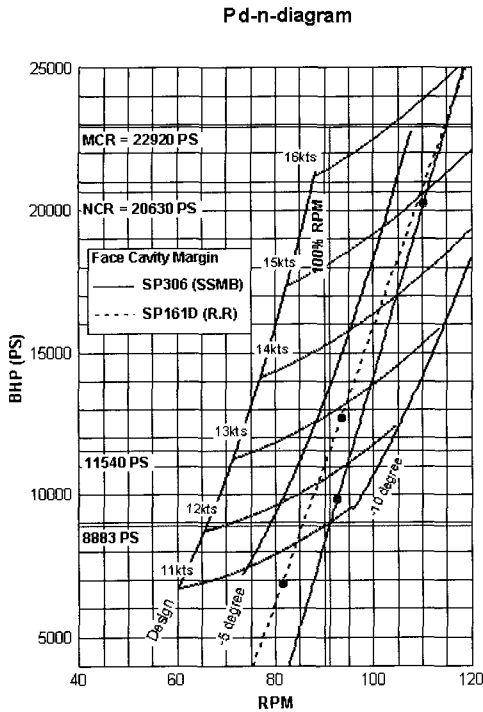


Fig. 7 Measured face cavitation inception on Vs-BHP-RPM curve(SP306 & SP161)

한편 저속에서의 face 캐비테이션 성능을 확인하기 위하여 -5°에서의 face 캐비테이션 초생시험을 수행하였다. 프로펠러는 SP306 및 SP161이 사용되었다. 시험 결과 SP306은 SP161 대비 100% NCR 회전수에서 약 2°만큼 face 캐비테이션 초생이 향상되었다. 이는 약 23%의 마력에 해당된다. 이 결과는 Fig. 7에 Vs-BHP-RPM 곡선 상에 보였다. 한편 Fig. 7에 보인 Vs-BHP-RPM 곡선은 피치를 0°, -5°, -10° 회전시켜 수행한 자항시험 결과를 사용하여 작성한 것이다. 0°의 피치각에서 추진효율이 가장 우수하며, 피치각이 감소할수록 성능이 감소하도록 자항요소가 변화하고 있음을 알 수 있다.

한편 CPP의 설계에는 날개를 회전시키는데 필요한 스피들 토크의 추정이 필수적이다. 스피들 토크에 가장 영향을 큰 것으로 스쿠가 있다. Fig. 8에는 SP161, SP251 그리고 SP306에 대해 스피들 토크를 계산하여 비교하였으며, 이로부터 SP306의 스피들 토크가 가장 작음을 알 수 있다.

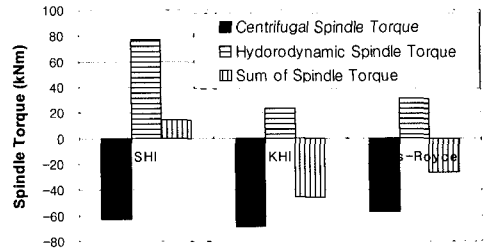


Fig. 8 Calculated spindle torque for SP161, SP251 & SP161

#### 4. 결론

본 연구에서는 CPP 설계시 필요한 설계기법을 개발하였으며, 개발된 프로그램에는 피치변화에 대한 offset 생성 및 성능 추정 그리고 face 캐비테이션 추정 기법이 포함되어 있다. 개발된 프로그램은 모형실험결과와 비교한 결과 정도가 우수한 것으로 나타났다. 또한 FPP 설계시 확보된 경험을 바탕으로 CPP 설계에 적용한 결과 메이커 설계의 CPP 보다 back 캐비테이션은 유사한 반면 추진효율 및 face 캐비테이션 성능이 모두 향상된 결과를 얻었다. 또한 메이커의 협조를 받아 완성한 스피들 토크 추정기법으로 스피들 토크를 해석한 결과 메이커의 그것 보다 감소함을 알 수 있었다. 본 연구에서 개발된 CPP의 설계기법 및 성능 향상은 향후 CPP 설계 자립화 및 실선 적용에 기여할 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- 나윤철, 송인행, 안종우, 1997, "선박 프로펠러용 고효율 2차원 날개단면 개발," 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 1호, pp. 11~23.
- 송인행 외, 2000, "2차원 날개단면의 앞날 형상 변화에 따른 캐비테이션 특성 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 1호, pp. 60~66.
- Beek, T.v., 1995, "The Role of Cavitation in the Design of Controllable Pitch Propellers," Proceedings of PROCNAV '95, Newcastle.
- Jessup, S. et al., 1996, "Cavitation Performance

Evaluation of Naval Surface Ship Propellers with Standard and Advanced Blade Section," 20th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., pp. 101-116

- Kuiper, G., 1996, "Effect of Skew and Rake on Cavitation Inception for Propeller Blades with Thick Blade Sections," 20th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., pp. 83-100.
- Tornblad, J., 1987, "Marine Propellers and Propulsion of Ships," Kamewa, pp.11-1~11-25.



< 송 인 행 >



< 이 태 구 >



< 한 재 문 >