

유체-구조 연성 효과를 고려한 복합소재 유연 프로펠러의 설계

김지혜¹·안병권^{1,†}·김건도²
충남대학교 선박해양공학과¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소²

Design of Flexible Composite Propellers considering Fluid-structure Interaction

Ji-Hye Kim¹·Byoung-Kwon Ahn^{1,†}·Gun-Do Kim²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO²

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.

Due to its flexibility of the composite propeller blade, it is necessary to design a shape capable of generating a desired load at a design point in consideration of the shape change of the propeller. In order to design it, we need to evaluate not only the hydrodynamic force around it, but also its structural response of flexible propeller according to its deformation. So, it is necessary to develop a design tool to predict the hydroelastic performance of a flexible propeller with deformation considering fluid-structure interaction and special operating conditions. Finally a design optimization tool for flexible propeller made of CFRP is required. In this study, a design methodology of the specific flexible composite propeller is suggested, considering fluid-structural interaction analysis of the specific flexible propeller.

Keywords : Composite propeller(복합소재 프로펠러), Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP, 탄소섬유강화플라스틱), Vortex Lattice Method(VLM, 와류격자법), Finite Element Method(FEM, 유한요소법), Fluid-Structure Interaction(FSI, 유체-구조 상호 작용)

1. 서론

탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 복합소재는 탄소섬유를 강화제로 하는 플라스틱계 복합소재로서 뛰어난 성형 성능을 갖는 고강도·고탄성의 경량 소재로 주목을 받고 있다. 원하는 정도의 유연성과 강도를 갖는 섬유 조직 및 적층 배열에 따라 금형(Mold)에 적층 제작되기 때문에 높은 정적 강도뿐만 아니라 뛰어난 피로 특성을 갖는다. 또한, CFRP 복합소재는 마찰 및 마모성이 뛰어나며 가공성이 높은 첨단 복합소재로서 기계, 자동차, 철도, 우주항공, 전자, 로봇, 스포츠레저 등 다양한 산업 분야에서 핵심 소재로 이용되고 있다. 특히 선박용 프로펠러와 유사한 특징을 갖는 풍력 발전용 블레이드의 경우, 발전기의 대형화로 인한 블레이드의 경량화 및 고강도화를 위해 CFRP 복합소재를 사용한 고효율 풍력 발전용 블레

이드의 개발에 집중하고 있다. 또한, 이에 따른 높은 효율 향상에 따라 그 수요가 급격하게 증가하는 추세이다. 최근 선박 분야에서 국제해사기구(IMO)의 선박제조연비지수(EEDI) 채택의 의무화에 따른 이산화탄소 배출량 감소를 목표로 한 대폭적인 연비개선의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 IMO의 환경규제에 대응하고자 에너지 절감을 위한 친환경 선박 개발의 일환으로 선박 연비 향상에 효과적인 CFRP 복합소재를 적용한 선박용 프로펠러의 제작 및 검증 기법의 연구 개발이 시급한 실정이다.

CFRP 복합소재를 프로펠러에 적용하여 얻을 수 있는 대표적인 장점으로는 첫째, CFRP 복합소재 프로펠러는 NAB(Nickel-Aluminum-Bronze) 또는 MAB(Manganese-Aluminum-Bronze)와 같은 동합금이 주재료로 사용하는 기존의 선박용 프로펠러 대비 동일한 형상에서도 상당한 무게 절감이 가능하기 때문에 축에 걸리는 하중을 감소시킴으로써 축 진동을 감소시킨다. 둘째, 고강도의 소재 특

성 때문에 기존 선박용 프로펠러와 동일한 강도를 유지하면서도 프로펠러의 두께를 더 얇고 확장 면적비를 더 작게 설계할 수 있고, 이에 따른 프로펠러의 효율 향상 효과를 얻을 수 있다. 셋째, 복합소재 프로펠러는 작용하는 하중에 따라 변형량이 다르게 발생하게 된다. 이를 이용하여 설계 속도 이외의 작동 조건에서도 프로펠러의 효율 증가 향상 효과를 얻을 수 있다. 이 외에도 재료적 특성으로 캐비테이션 유기소음 및 침식 성능 향상, 피로 성능 및 진동 감쇠 특성 개선 등의 이점을 갖는 것으로 알려져 있다(Mouritz et al., 2001). 이러한 이유로 현재 미국, 독일, 일본 등을 중심으로 CFRP 복합소재 유연 프로펠러의 설계, 제작 및 실용화를 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

또한, 기존의 동합금보다 가볍고 성능이 우수한 “차세대 선박용 프로펠러” 시장을 선점하기 위한 관련 기술 개발에 집중하고 있다. 선진국의 경우 시제품 단계에 도달해 있으나, 국내의 경우 유연 프로펠러의 성능해석 및 설계를 위한 기초이론 정립 단계의 연구가 수행되고 있으며 실험실 규모의 기본 성능검증 및 핵심성능 평가가 필요한 실정이다. 복합소재 프로펠러의 효과에 대해 최초로 그 가능성을 보인 실험으로는 Ashkenazi et al.(1974)의 연구가 있다(Ashkenazi et al., 1974). 직경 0.25~0.3m의 복합소재 프로펠러 및 금속 재료 프로펠러를 배수량 2~5000톤의 상선에 장착하여 5~35knot의 속도로 시운전을 수행하였다.

복합 소재 프로펠러 및 금속 프로펠러 모두 선속, 연료 소비, 엔진 부하, 운용 생애 주기 등에서 유사한 결과를 보였으나, 복합소재 프로펠러는 엔진 및 축 진동을 약 25% 감소시켜 선체의 소음과 진동을 줄인다고 발표된 바 있다. 1980년대 이후 군함, 소형 보트, 어뢰 등에 장착된 복합소재 프로펠러의 소음 평가 및 성능 실험이 독일, 미국 등에서 활발히 진행 중이나, 군사 관련 기술 개발 사항으로 공개된 정보가 미미한 실정이다. 네덜란드의 Airborne Composite 사는 자국 군함에 사용되는 복합소재 프로펠러를 제작한 것으로 알려져 있으며, 독일의 선박건조 기업인 Howaldtswerke-Deutsche Werft 사 또한 잠수함에 사용되는 복합소재 프로펠러를 제작하여 경량화 및 소음 저감 효과를 확인한 것으로 알려져 있다(ThyssenKrupp, 2011). 또한, 최근 일본의 선박용 프로펠러 제작회사인 나카시마 프로펠러 사에서는 CFRP를 적용한 프로펠러를 개발하여 세계 최초로 상선에 탑재하였다. 개발한 복합소재 프로펠러는 기존 금속재 프로펠러 대비 경량화 30%, 소요 마력 감소 9%, 프로펠러 단독 효율 향상 2.4%를 얻었다고 발표하였다. 이를 발판으로 나카시마 프로펠러 사에서는 복합소재 프로펠러에 대한 조기 양산화를 추진 중이다(Nakashima Propeller Co., Ltd., 2015). 거슬러 올라가 프로펠러에 대표적인 유연 재질인 섬유강화 플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP)를 사용하여 성능의 변화를 처음 정리한 논문은 DTMMB의 Searle and Shot(1994)로서, 그들은 프로펠러를 복합소재로 제작할 경우의 장단점을 재질특성, 제작상의 이점, 유체 역학적인 성능 등의 관점에서 고찰함으로써 복합소재 프로펠러의 타당성을 입증한 바 있다. 결론적으로 이 연구를 통하여 FRP를 사용하게 되면 탄성으로 인한 성능 변화는 매우 크기 때문에 FRP 등 재질을 사용할 시 유탄성을 고려한 프로펠러 설계

기법의 개발이 필요한 것으로 밝혀졌다.

또한, 유연 프로펠러의 경우 어떠한 작동 조건에서도 변형을 무시할 수 있는 기존 금속재 프로펠러와 비교했을 때, 무거운 하중 조건하에서는 상대적으로 큰 변형을 가진다. 복합소재 프로펠러 날개의 유연성으로 인해 설계자는 프로펠러의 초기 설계 단계에서 다양한 유체 역학 하중 조건에 따른 날개의 변형을 고려해야 하며, 이는 프로펠러 성능이 프로펠러의 형상과 직접적으로 관련되어 있기 때문에 매우 중요하다. 따라서 프로펠러 형상의 변화를 반영하여 설계 점에서 원하는 하중을 발생시킬 수 있는 형상을 설계할 필요가 있다. 이를 설계하기 위해서는 주변의 유체역학적 힘뿐만 아니라 유연 날개의 변형에 따른 구조 응답해석이 요구된다. 이를 위해서 유체-구조의 상호작용이 고려된 유탄성 해석 기술과 선체 후류에서 작동하는 선박용 프로펠러의 특수한 조건을 고려하여 설계할 수 있는 기본 기술이 필요하다. 또한, 이를 고도화하여 최종적으로 복합소재 유연 프로펠러의 최적 설계를 가능하게 하는 기술이 요구된다. 이에 90년대 후반부터 2000년대에 이르기까지 복합소재 프로펠러의 변형을 고려한 유탄성 해석 및 설계 기법에 대한 연구가 활발히 수행 중에 있다.

본 연구팀은 복합소재 유연 프로펠러의 유탄성 성능 해석을 위해 와류격자법(Vortex Lattice Method, VLM)을 기반으로 하는 프로펠러 유탄성 해석 프로그램인 KPA4와 KPD4를 사용하였으며, 프로펠러의 구조해석을 위해 Nho et al.(2004)이 개발한 프로펠러 강도 해석 프로그램인 ProSTEC를 적용하였다. 이전 연구를 통해 두 해석 프로그램의 인터페이스를 구축하고 복합소재 유연 프로펠러의 역설계 기법을 제시하였으며(Jang et al., 2012), 이후 불균일 반류장에서 작동하는 복합소재 유연 프로펠러의 비정상 성능해석을 수행하여 프로펠러의 변형을 예측하고, 진동과 침식을 피하기 위한 동적 거동에 대한 수치 해석을 수행한 바 있다(Kim et al., 2018). 또한, 기존의 등방성 소재에 국한했던 해석 방법을 적층 복합소재의 적용이 가능하도록 해석법을 확장하고, 복합소재 및 적층 방식에 따른 복합소재 프로펠러의 변형 및 응력 분포를 확인하였다(Kim et al., 2019).

본 연구에서는 최종적으로 복합소재 프로펠러의 설계 알고리즘을 제시하였으며, 이를 통해 설계점에서 변형 이후에 목표 하중을 갖는 변형 전 형상을 예측하였다. 또한, 복합소재의 적층 방식에 따라 설계점을 벗어난 다른 운항 조건에서도 기존 금속재 프로펠러 대비 높은 성능을 가질 수 있음을 확인하였다.

2. 복합소재 프로펠러의 설계 기법

2.1 설계 알고리즘

앞서 구축한 프로그램을 이용하여 복합소재 프로펠러를 설계하는 절차를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 먼저 변형을 고려하지 않은 상태에서 기존의 형상 설계 프로그램을 이용하여 금속재 프로펠러를 설계하는 방식과 동일하게 설계점에서 목표 추력을 갖는 프로펠러를 설계한다. 두 번째 단계에서 프로펠러가 설계점에서 변형 이후에 앞서 설계한 목표 형상을 가질 수 있도록

프로펠러의 재질과 적층 방식을 설계한다.

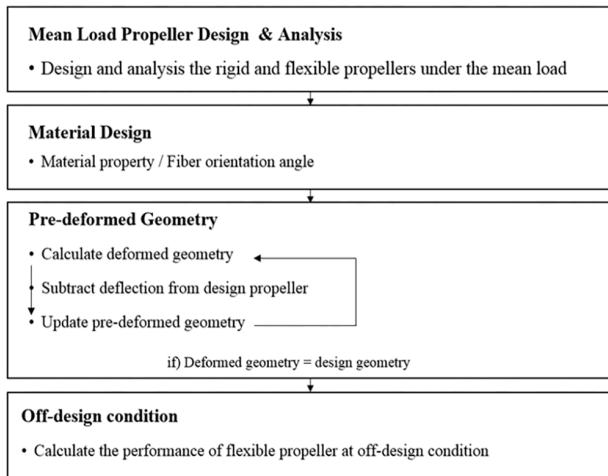


Fig. 1 Design procedure of composite propeller

세 번째 단계에서는 설계한 재질과 적층 방식을 갖는 목표 형상을 변형 전 형상(pre-deformed propeller)으로 우선 가정하고, 변형량을 계산하여 변형 후 형상(deformed propeller)을 도출한다. 그 후 변형 후 형상과 목표 형상의 차이를 변형 전 형상에서 빼줌으로써 새로운 변형 전 형상을 구하고, 이를 이용하여 다시 변형 후 형상을 구한다. 결과적으로 변형 후 형상과 목표 형상이 일치할 때까지 반복계산을 수행해줌으로써 변형 이후에 목표 형상을 갖는 변형 전 형상을 도출한다. 본 단계에서 유동해석과 구조해석 프로그램 사이에 정보를 반복적으로 교환하며 계산이 수행된다. 마지막으로 설계점에 대해서 도출된 변형 전 형상을 이용하여 설계 속도를 포함하는 다양한 운용 조건하에서의 복합소재 프로펠러의 변형과 유체역학적 성능을 예측할 수 있다.

2.2 프로펠러의 기하학적 매개변수 도출

앞선 계산 절차 중 일단 프로펠러의 변형량이 계산되면 다음 반복 계산 수행 시 재입력 될 형상정보를 도출하는 과정이 필요하다. 변형된 프로펠러 형상 좌표들로부터 프로펠러의 기하학적 매개변수들인 피치(P , pitch), 레이크(X_G , rake), 스큐(θ_m , skew)를 도출하는 방법을 기술하고자 한다. 특정 반경 r 에서 프로펠러 날개 단면의 앞날(leading edge)과 뒷날(trailing edge)의 좌표를 알게 되면, 앞날과 뒷날이 프로펠러 기준선과 이루는 각 $\theta_{l,t}$ 는 다음 식 (1)을 통해 구할 수 있다. 이때 $x_{l,t}$, $z_{l,t}$ 와 $y_{l,t}$ 는 각각 날개 단면 앞날과 뒷날의 x, z, y 좌표 값이며, 스큐는 앞날과 뒷날이 이루는 각의 절반이므로 다음 식 (2)로 정의된다.

$$\theta_{l,t} = \tan^{-1} \frac{z_{l,t}}{y_{l,t}} \quad (1)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_l + \theta_t}{2} \quad (2)$$

또한 특정 반경 r 에서의 앞날과 뒷날의 좌표를 알면, 앞날과 뒷날의 축 방향 거리 ($x_t - x_l$)를 이용해 피치각(ϕ)을 계산 할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{x_t - x_l}{r(\theta_t - \theta_l)} \right\} \quad (3)$$

레이크의 경우 각 반경에서 프로펠러 기준선으로부터 제작기준선까지의 축방향 직선거리로, 다음 식 (4)와 같이 날개 단면 기준점의 좌표로부터 스큐에 의한 방향 이동량을 빼줌으로써 계산할 수 있다. 이때, x_m 은 각 반경별 날개단면 중심점의 x 좌표 값을 나타낸다.

$$x_G = x_m - r\theta_m \tan\phi \quad (4)$$

3. 복합소재 프로펠러의 설계 예시

설계 기법의 검증을 위하여 기존 연구(Motley et al., 2009)를 통해 수치해석 결과가 존재하는 프로펠러 5474m에 대하여 설계 속도를 포함하는 다양한 운용 조건하에서의 복합소재 프로펠러의 변형과 성능을 예측하였다. 설계점이 $J=0.66(n=780)$ 인 프로펠러 5474m에 적용된 물성치는 다음과 같다.

Young's modulus $E_1=171.4\text{GPa}$, $E_2=E_3=9.08\text{GPa}$

Shear modulus $G_{12}=5.29\text{GPa}$

Poisson's ratio $\nu_{12}=0.32$

Density $\rho=1,500\text{kg/m}^3$

이때 복합소재의 프로펠러는 두께 방향으로 두 개의 판(ply)으로 구성되어 있으며, 하나의 판(ply)은 5개의 층(layer)으로 이루어져 있다.

Table 1 Geometry of propeller 5474m

r/R	P [mm]	XG [mm]	ϕ_m [deg]	c [mm]	f_0 [mm]	t_0 [mm]
0.20	381.09	4.87	-5.46	76.25	-2.12	25.37
0.28	542.23	17.57	-3.56	80.38	1.22	17.31
0.36	620.14	28.37	-1.14	84.78	2.74	14.58
0.44	648.29	35.61	1.69	88.56	3.28	12.29
0.52	643.44	39.68	4.90	91.25	3.35	10.29
0.6	620.41	41.64	8.42	92.71	3.19	8.48
0.7	562.52	42.46	13.22	92.33	2.81	6.47
0.8	483.38	42.41	18.44	87.42	2.17	4.82
0.9	387.10	42.79	24.07	72.65	1.25	3.72
0.95	321.01	44.36	27.05	58.67	0.73	3.50
1.00	249.91	48.37	30.16	38.02	0.25	1.84

프로펠러 5474m의 자세한 형상 정보는 Table 1에 나타내었다. 여기서 R 은 프로펠러의 반경, c , f_0 , t_0 는 각각 각 반경 조

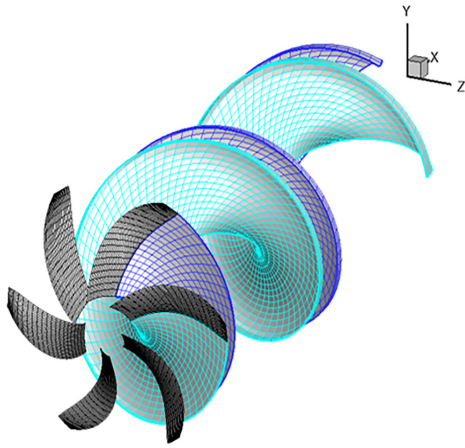


Fig. 2 Discretized propeller blades and trailing wake

건별 날개 단면의 코드 길이, 최대 캠버, 그리고 최대 두께를 나타낸다. Fig. 2는 유체해석법에 사용된 이산화된 프로펠러 날개와 후류면을 보여준다. 먼저, 설계점에서 목표 추력을 갖는 프로펠러 5475m를 사용하기로 한다. 그 후 복합소재의 물성치 및 적층 각도에 대한 설계가 요구된다. Motley et al. (2009)은 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 적용하여 복합소재 프로펠러의 적층 각도를 찾기 위한 최적화기법을 제시하였다 (Plucinski et al., 2007, Liu and Young, 2009). 본 연구에서 이를 적용하여 도출한 최적 적층 각도는 $(30^\circ/30^\circ/90^\circ/90^\circ/30^\circ)_s=(30^\circ/30^\circ/90^\circ/90^\circ/30^\circ/30^\circ/90^\circ/90^\circ/30^\circ/30^\circ)$ 이다. 또한, Motley et al.(2009)는 해석의 용이성을 위하여 프로펠러의 변형량이 동일하다는 조건하에 서로 다른 적층 각도를 갖는 10개의 층을 하나의 등각도($+32^\circ$)를 갖는 10개의 층으로 치환하여 계산을 수행하였으며, 본 논문에서도 이와 동일한 적층 각도를 적용하여 계산을 수행하였다.

Fig. 3과 4는 코드, 스패, 두께 방향 요소의 개수에 따라 계산된 변형 전(pre-deformed)과 후(after-deformed)의 대표적인 프로펠러 형상 파라미터 분포의 차이를 보여준다. 변형 후 형상의 경우 반복계산을 통해 1% 오차 이내로 수렴하도록 계산되기 때문에, 요소의 개수에 상관없이 피치와 레이크의 분포가 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 반면 변형 전 형상의 경우 요소의 개수가 달라짐에 따라 값의 차이를 보인다. 코드와 스패 방향으로 12개의 요소로 계산된 결과 값은 다른 결과들과 크게 차이를 보이지만, 각각 15개와 18개의 요소로 계산된 결과는 유사한 분포를 보인다. 이를 통해 코드와 스패방향으로 15개 이상의 요소로 계산할 때 충분한 수렴 값을 얻는 것으로 판단하여, 이후 계산은 코드, 스패, 두께 방향으로 각각 $15 \times 15 \times 2$ 개의 요소를 사용하여 수행하였다.

Fig. 5는 변형 전 형상을 찾기 위한 반복 계산 횟수에 따라 변하는 프로펠러 끝단($r/R=1.0$)에서의 목표, 변형 전 그리고 변형 후 프로펠러의 형상 파라미터(피치, 레이크, 스쿼)를 보여준다. 변형 후 프로펠러의 형상 파라미터가 목표 형상의 값과 일치하도록 반복 계산을 수행하며, 3~4회의 반복 계산으로 변형 후 목표 하중을 갖는 프로펠러의 형상 파라미터가 1% 오차 이내로 일치함을 확인할 수 있다.

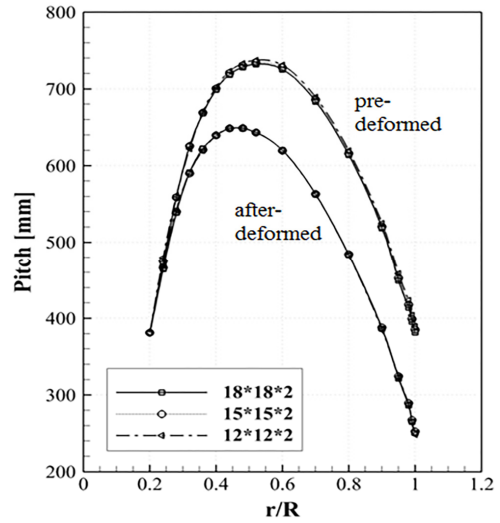


Fig. 3 Pitch distribution according to number of element

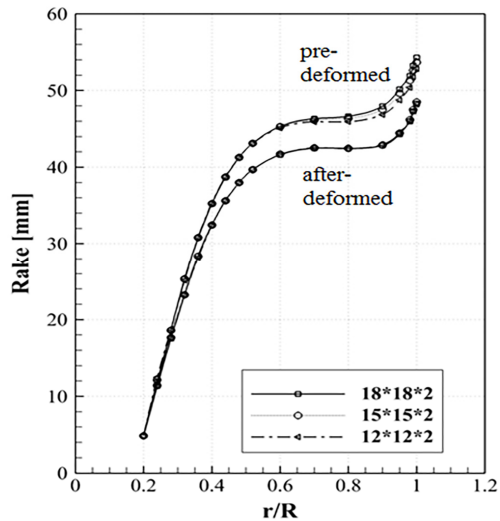


Fig. 4 Rake distribution according to number of element

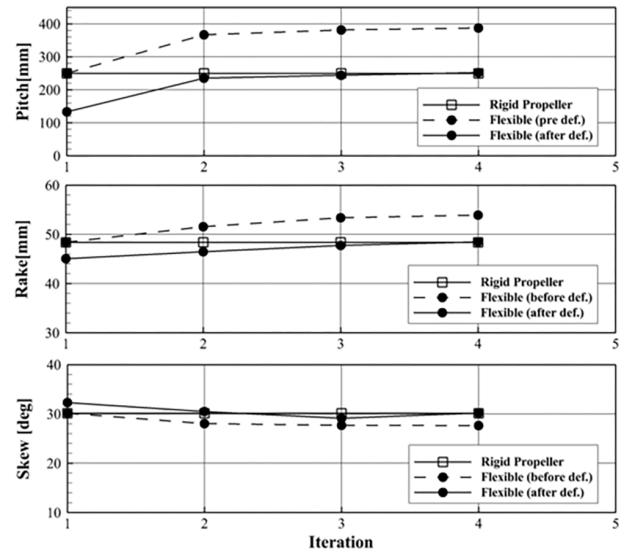


Fig. 5 Convergence characteristics of design parameters for propeller 5474m

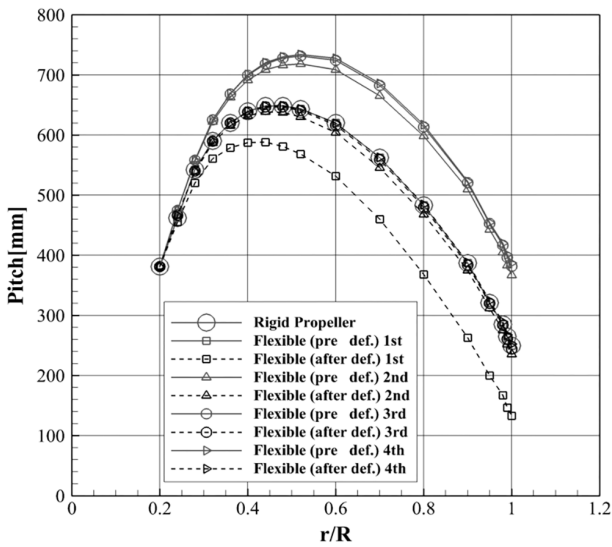


Fig. 6 Convergence characteristics of pitch distribution

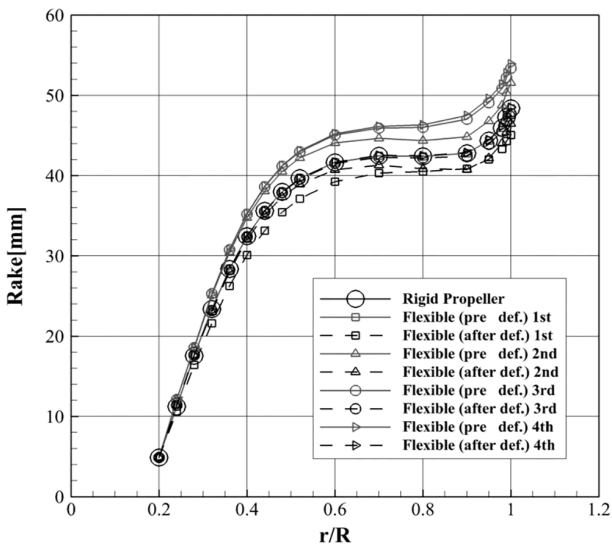


Fig. 7 Convergence characteristics of rake distribution

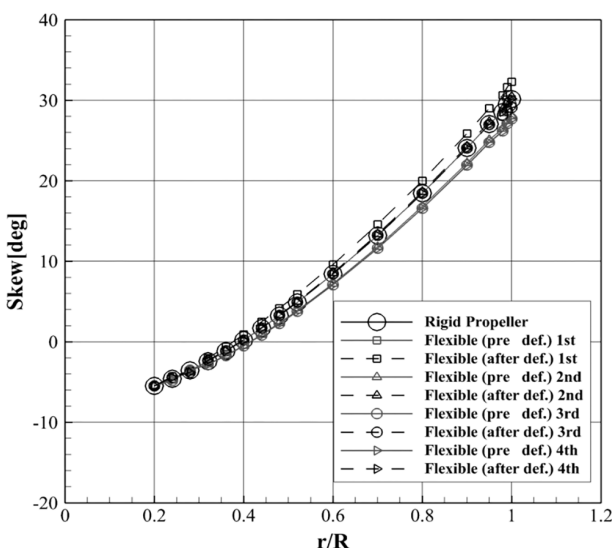


Fig. 8 Convergence characteristics of skew distribution

Fig. 6~8은 반복 횟수에 따라 변하는 목표, 변형 전 그리고 변형 후 프로펠러의 각 형상 파라미터들을 변경 방향으로 나타내었다. 앞선 계산 결과들을 통해 프로펠러의 변형은 피치와 레이크는 작아지는 방향으로, 스쿠는 커지는 방향으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 변형 후와 목표 하중을 갖는 프로펠러의 모든 형상 파라미터들이 3~4회 반복계산 내에 변경 방향 값까지 일치함을 확인하였다.

Table 2는 목표, 변형 전 그리고 변형 후 프로펠러 끝단에서의 피치각을 기준 연구 결과 (Motley et al., 2009)와 비교하여 나타내었다. 우선 설계점인 $J=0.66$ 에서 목표와 변형 후 프로펠러 끝단에서의 피치각도가 1% 이하의 오차율로 거의 일치함을 확인할 수 있다. 계산된 변형 전 프로펠러 끝단에서의 피치각이 기준 연구 결과와 다소 차이를 보이지만, 이는 수치해석 방법의 차이 및 수치해석상 구현된 프로펠러 형상의 차이에 기인한 유체력을 구조해석을 위하여 요소에 재배치하는 과정에서 발생하는 수치해석적 오류에서 기인한 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of tip pitch angle (degree)

	Rigid	Flexible (pre def.)	Flexible (after def.)
Motley et al.[14]	7.43	12.33	7.43
present	7.50	11.36	7.50
diff.(%)	0.94	7.89	0.94

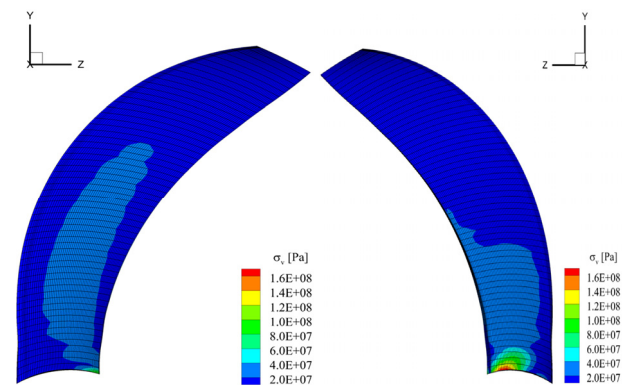


Fig. 9 Distribution of von Mises stress acting on the suction and pressure side of 5474m (780rpm, $J=0.66$)

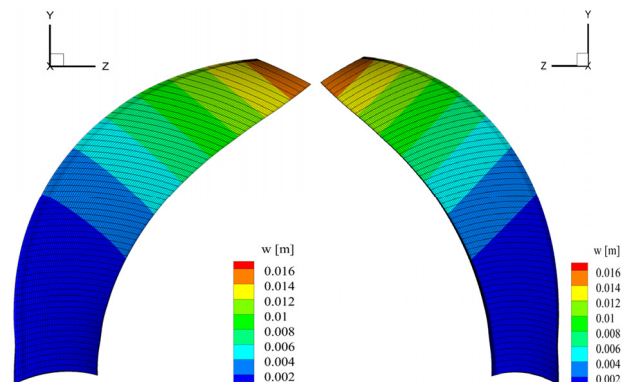


Fig. 10 Distribution of displacement on the suction and pressure side of 5474m (780rpm, $J=0.66$)

Fig. 9와 10은 설계점($J=0.66$)에서의 프로펠러 5474m에 작용하는 등가응력과 변형량 분포를 보여준다. 최대 등가응력은 프로펠러의 허브와 가까운 압력면에서 발생하고 있으며, 변형량의 최대 값은 16mm이고 이는 프로펠러의 끝단에서 발생한다. Fig. 11은 최종적으로 설계점($J=0.66$)을 포함한 다양한 운항 조건($J=0.5, 0.8, 0.9$)에서의 변형 후 프로펠러의 성능해석 결과를 보여준다. 설계점 이외의 다른 운항 조건에서의 복합소재 프로펠러의 변형량 및 성능은 설계점에서 계산된 변형 전 프로펠러 형상을 기준으로 운항 조건을 달리하여 계산을 수행하였다. Fig. 11의 계산 결과를 살펴보면 먼저 설계점에서는 복합소재 프로펠러와 목표 형상을 갖는 프로펠러의 추력계수(K_T), 토크계수($10K_Q$), 단독효율(η_0)이 모두 일치하는 것을 확인할 수 있다

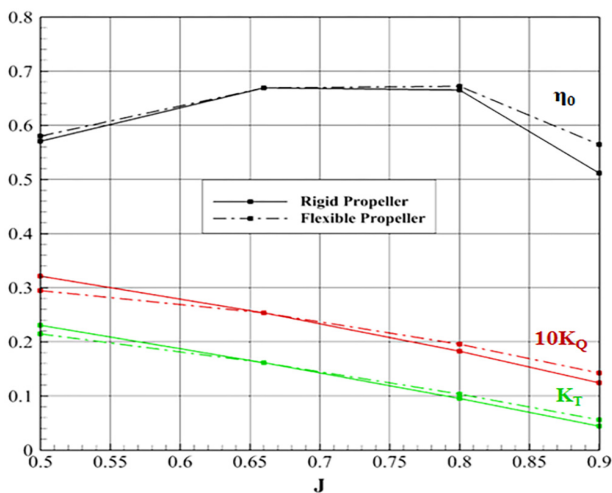


Fig. 11 Comparison of predicted performance between rigid and flexible (after deformed) propeller

Table 3 Predicted performance of rigid propeller 5474m

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.50	0.2305	0.3214	0.5707
0.66	0.1616	0.2537	0.6690
0.80	0.0954	0.1825	0.6654
0.90	0.0444	0.1243	0.5120

Table 4 Predicted performance of flexible (after-deformed) propeller 5474m

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.50	0.2148	0.2948	0.5799
0.66	0.1616	0.2537	0.6690
0.80	0.1034	0.1959	0.6722
0.90	0.0561	0.1425	0.5645

Table 5 Comparison of the predicted performance of rigid and flexible (after-deformed) propeller 5474m

J	ΔK_T (%)	$\Delta 10K_Q$ (%)	$\Delta \eta_0$ (%)
0.50	-6.81	-8.28	1.61
0.66	-	-	-
0.80	8.39	7.34	1.02
0.90	26.35	14.64	10.25

또한, 설계점을 기준으로 전진비가 작은 경우 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 작으며, 이때 토크의 감소량이 추력의 감소량보다 상대적으로 더 크기 때문에 효율이 향상한 것을 확인할 수 있다. 반대로 설계점을 기준으로 전진비가 큰 범위에서는 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 크며, 이때는 추력의 증가율이 토크의 증가율보다 상대적으로 더 크기 때문에 효율이 향상한 것으로 판단된다. 결과적으로 설계점에서 목표 하중을 갖는 프로펠러와 동일한 추력을 갖는 복합소재 프로펠러 5474m은 최적 적층 각도를 사용하였을 경우 설계점 이외의 운항조건에서 최소 1%에서 최대 10%까지 효율 증대 효과를 얻을 수 있다(Table 3~5). 계산된 변형 전 프로펠러 형상(회색)과 각 운항 속도에서의 복합소재 프로펠러의 변형 형상을 Fig. 12와 13에 나타내었다.

전진비가 작아질수록 변형량이 커져 복합소재 프로펠러의 형상이 변형 전 프로펠러에서 더 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 추가로 설계점 이외의 다른 운항 조건에서의 효율 향상 효과의 요인을 보다 면밀히 파악하기 위하여, 프로펠러의 주요 형상 파라미터(레이크, 스큐, 피치)의 변화가 프로펠러의 효율에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

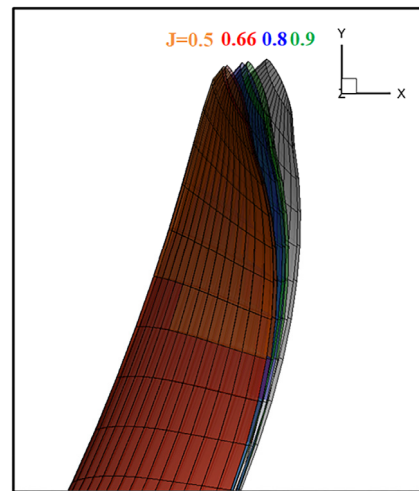


Fig. 12 Deformed shape of composite propeller at the different operating condition

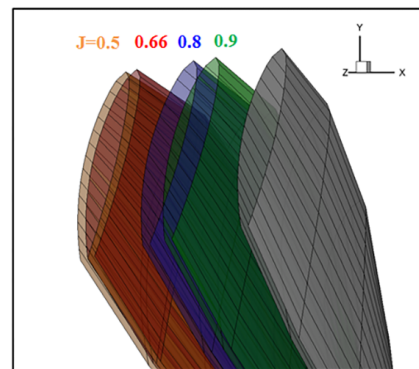


Fig. 13 Deformed shape of composite propeller near tip region at the different operating condition

Table 6~11은 레이크, 스쿼, 피치의 반경 방향 분포 중 하나가 운항 조건에 따라 변하지 않고 설계점에서의 변형 값으로 고정되었을 경우, 프로펠러의 효율이 어떻게 변하는지 확인한 결과를 보여준다. 먼저, 피치와 스쿼 분포는 각 운항 조건에 따라 계산된 값을 사용하고, 레이크 분포는 운항 조건에 상관없이 설계점에서 계산된 값으로 고정한 후 복합소재 프로펠러의 성능을 계산하였다.

Table 6의 계산 결과를 살펴보면 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 4의 결과 값과 마찬가지로 설계점을 기준으로 전진비가 작은 경우, 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 크다. 그리고 설계점을 기준으로 큰 전진비에서는 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 작게 나타난다. 또한, 목표 형상을 갖는 프로펠러 대비 복합소재 프로펠러의 성능을 비교한 결과(Table 7)가 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 5의 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 이를 통해 레이크의 변화는 설계점 이외의 운항 조건에서 나타나는 효율 증대 효과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 레이크의 경우 전진비가 작아질수록, 즉 레이크가 커질수록 프로펠러의 유효 직경이 커지면서 적게나마 프로펠러 효율이 커지는 효과가 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위해 보다 면밀하게 결과를 살펴보면 레이크의 분포를 설계점에서의 값으로 고정시킨 Table 7의 결과가 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 5의 결과와 비교했을 때, 작은 전진비에서는 효율 증가율이 상대적으로 작고 전진비가 큰 경우 효율 증가율이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 여기서 레이크의 분포를 설계점에서의 값으로 고정시켰다는 것은 다시 말해 모든 운항 조건에서 복합소재 프로펠러의 유효 직경이 동일하다는 것을 의미한다. 즉, 레이크의 변형은 유효 직경의 변화를 초래함으로써 프로펠러 효율에 영향을 미치고 있을 확인하였다.

Table 6 Predicted performance of flexible (after-deformed) propeller 5474 ignoring the rake changing according to the operating condition

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.50	0.2130	0.2933	0.5779
0.66	0.1616	0.2537	0.6690
0.80	0.1040	0.1967	0.6730
0.90	0.0567	0.1435	0.5660

Table 7 Comparison of the predicted performance of rigid and flexible (after-deformed) propeller 5474m ignoring the rake changing according to the operating condition

J	ΔK_T (%)	$\Delta 10K_Q$ (%)	$\Delta \eta_0$ (%)
0.50	-7.59	-8.74	1.26
0.66	-	-	-
0.80	9.01	7.78	1.14
0.90	27.70	15.45	10.55

Table 8 Predicted performance of flexible (after-deformed) propeller 5474m ignoring the skew changing according to the operating condition

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.50	0.2143	0.2934	0.5811
0.66	0.1616	0.2537	0.6690
0.80	0.1035	0.1959	0.6727
0.90	0.0563	0.1425	0.5659

Table 9 Comparison of the predicted performance of rigid and flexible (after-deformed) propeller 5474m ignoring the skew changing according to the operating condition

J	ΔK_T (%)	$\Delta 10K_Q$ (%)	$\Delta \eta_0$ (%)
0.50	-7.03	-8.71	1.82
0.66	-	-	-
0.80	8.49	7.34	1.10
0.90	26.80	14.64	10.53

Table 10 Predicted performance of flexible (after-deformed) propeller 5474m ignoring the pitch changing according to the operating condition

J	K_T	$10K_Q$	η_0
0.50	0.2341	0.3266	0.5704
0.66	0.1616	0.2537	0.6690
0.80	0.0959	0.1841	0.6629
0.90	0.0447	0.1256	0.5093

Table 11 Comparison of the predicted performance of rigid and flexible (after-deformed) propeller 5474m ignoring the pitch changing according to the operating condition

J	ΔK_T (%)	$\Delta 10K_Q$ (%)	$\Delta \eta_0$ (%)
0.50	1.56	1.62	-0.05
0.66	-	-	-
0.80	0.52	0.88	-0.38
0.90	0.68	1.05	-0.53

두 번째로, 피치와 레이크 분포는 각 운항조건에 따라 계산된 값을 사용하고, 스쿼 분포는 운항조건에 상관없이 설계점에서 계산된 값으로 고정한 후 복합소재 프로펠러의 성능을 계산하였다. Table 8의 계산 결과를 살펴보면, 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 4의 결과 값과 마찬가지로 설계점을 기준으로 작은 전진비에서는 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 크며, 설계점을 기준으로 큰 전진비에서는 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 작게 나타난다. 또한, 목표 형상을 갖는 프로펠러 대비 복합소재 프로펠러의 성능을 비교한 결과(Table 9)가 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 5의 결과와 유사함을 확인할 수 있으며, 이를 통해, 스쿼의 변화는 설계점 이외의 운항 조건에서 나타나는 효율 증대 효과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 마지막으로, 스쿼와 레이크 분포는 각 운항조건에 따라 계산된 값을 사용하고 피치 분포

는 운항조건에 상관없이 설계점에서 계산된 값으로 고정한 후 복합소재 프로펠러의 성능을 계산하였다. Table 10의 계산 결과를 살펴보면 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 4의 결과 값과 다르게 설계점을 제외한 모든 전진비에서는 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러보다 크게 나타난다. 또한, 목표 형상을 갖는 프로펠러 대비 복합소재 프로펠러의 성능을 비교한 결과 (Table 11)가 고정된 형상 파라미터가 없는 Table 5의 결과와 전혀 다른 양상을 보임을 확인할 수 있다. 피치 분포를 설계점에서 계산된 값으로 고정한 경우 설계점을 제외한 모든 전진비에서 프로펠러의 효율이 현저하게 감소하였으며, 이를 통해 피치의 변화는 설계점 이외의 운항 조건에서 나타나는 효율 증대 효과에 지배적인 영향을 미침을 확인할 수 있다. 앞선 피치 분포가 설계점 이외의 운항 조건에서 나타나는 효율 증대 효과에 지배적인 영향을 미침을 확인하였다.

피치각은 변화는 결국 운항조건에 따라 프로펠러 날개단면에 작용하는 받음각이 변하는 것으로 간주할 수 있다. 받음각은 피치각(ϕ)과 유체역학적 피치각(hydrodynamic pitch angle, β_i)의 차이로, 이때 유체역학적 피치각은 아래와 같이 정의된다(Fig. 14).

$$\beta_i = \tan^{-1} \frac{V_A + u_z}{wr + u_t} \quad (5)$$

여기서, V_A 와 wr 은 반경 r 의 위치에 있는 프로펠러 단면에 유입되는 속도 성분이며, u_a 와 u_t 는 실제 프로펠러의 유체역학적인 작동에 의해 프로펠러 위치에 유입되는 속도 성분을 나타낸다. 보다 면밀하게 연관성을 살펴보기 위하여, 복합소재 프로펠러와 목표 형상을 갖는 프로펠러의 반경방향 받음각(angle of attack)을 전진비에 따라 비교하여 Fig. 15에 도시하였으며, 설계점에서 복합소재 프로펠러와 목표 형상을 갖는 프로펠러의 받음각 분포가 동일함을 확인할 수 있다. 또한, 설계점을 기준으로 전진비가 작은 경우 복합소재 프로펠러의 받음각이 목표 형상을 갖는 프로펠러의 받음각보다 작게 나타나며, 이는 결국 받음각의 영향으로 해당 영역에서 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러의 값보다 작게 나타남을 확인할 수 있다. 설계점을 기준으로 전진비가 큰 범위에서는 복합소재 프로펠러의 받음각이 목표 형상을 갖는 프로펠러의 받음각보다 크게 나타나며, 이는 해당 영역에서 복합소재 프로펠러의 추력과 토크가 목표 형상을 갖는 프로펠러의 값보다 크게 나타나는 현상을 설명해준다.

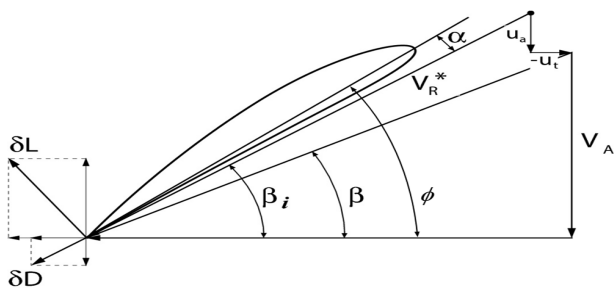


Fig. 14 Propeller velocity diagram and its realization at a cylindrical section at radius r

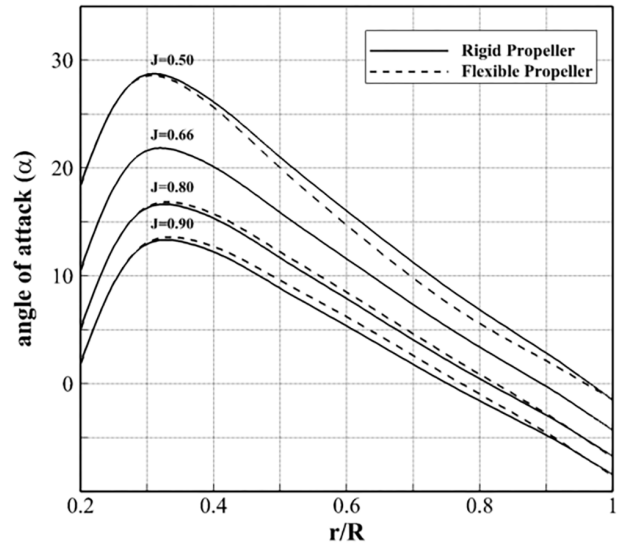


Fig. 15 Distribution of angle of attack at the different operating condition

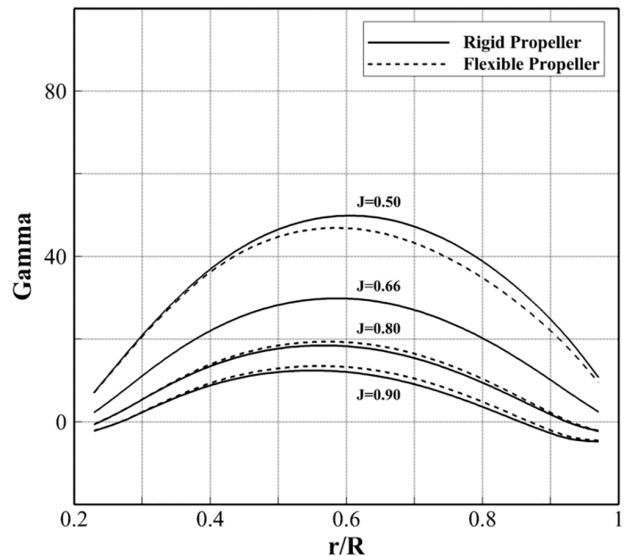


Fig. 16 Circulation distribution at the different operating condition

또한, 복합소재 프로펠러와 목표 형상을 갖는 프로펠러의 전진비에 따른 반경 방향 순환 분포(Fig. 16)를 통해 앞선 Fig. 15의 결과를 설명할 수 있다. 설계점을 기준으로 전진비가 낮으면 복합소재 프로펠러의 전체 순환 분포가 목표 형상을 갖는 프로펠러 대비 작게 나타나며, 설계점을 기준으로 전진비가 큰 범위에서는 반대로 큰 값을 갖는다. 결과적으로 이러한 거동이 설계점을 제외한 운항점에서의 프로펠러 효율 증가 효과를 야기했음을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 복합소재 유연 프로펠러의 유탄성 성능 해석을 수행하기 위해 VLM-FEM 연동 수치해석 프로그램을 개발하고

복합소재 프로펠러의 설계 알고리즘을 정립하였다. 이를 통해 설계점에서의 변형 전 형상을 예측하고 설계점을 제외한 여러 운항 조건에서의 복합소재 프로펠러의 변형 형상과 성능을 예측하여 기존 연구 결과와 비교를 통해 해석 방법을 검증하였다. 본 연구를 기반으로 복합소재 프로펠러의 설계 방법을 완성하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

1) 모든 프로펠러는 불균일 반류 중에서 작동하기 때문에 복합소재 프로펠러의 하중에 따른 변형 거동을 살펴볼 필요가 있다. 이를 위한 해석 프로그램의 확장 및 검증 절차가 필요하다.

2) 복합소재 프로펠러는 섬유의 적층 방식에 따라 프로펠러의 변형 및 성능이 크게 달라지며, 원하는 성능을 갖는 복합소재 프로펠러의 설계를 위해서는 복합소재에 대한 충분한 이해와 복합소재의 적층 방식에 대한 최적화 기법이 요구된다.

3) 설계한 복합소재 프로펠러의 설계 및 적층 기법을 확인하고 유동 현상을 보다 면밀하게 살펴보기 위하여 모형선 스케일의 복합소재 프로펠러의 제작 및 실험을 통한 비교/검증 절차가 요구된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업핵심기술개발사업(10062293)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ashkenazi, Y., Golfman, I., Rezhkov, L. & Sidorov, N., 1974. *Glass-fiber-reinforced plastic parts in ship machinery*, Sudostroyenniye Publishing House.
- Jang, H.G., Nho, I.S., Hong, C.H. & Lee, C.S., 2012, Design algorithms of flexible propeller by fluid-structure interactive analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.528-533.
- Kim, J.H., Ahn, B.K., Lee, C.S. & Kim, G.D., 2019. Numerical prediction of hydroelastic performance of the flexible composite propeller. *International Journal of Ocean and Polar Engineering*, 29(3), pp.1-8.
- Kim, J.H., Ahn, B.K., Ruy, W.S., Lee, C.S. & Kim, G.D., 2018. Fluid-structure interaction analysis of flexible composite propellers. *The Annual Autumn Conference of Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, Korea, 8-9 November 2018.
- Liu, Z. & Young, Y.L., 2009. Utilization of bend-twist coupling for performance enhancement of composite marine propellers. *Journal of Fluids and Structures*, 25, pp.1102-1116.
- Motley, M.R., Liu, Z. & Young, Y.L., 2009. Utilizing fluid-structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake. *Composite Structures*, 90(3), pp.304-313.
- Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P. & Challis, K., 2001. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structure*, 53, pp.21-41.
- Nakashima Propeller Co., Ltd. Composite Business Dept., https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/assets/pdf/katsudou201511_D.pdf [Accessed 19 January 2019].
- Nho, I.S., Lee, J.Y., Lee, H.Y. & Lee, C.S., 2004. A dynamic structural analysis system for propeller blades. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(2), pp.114-120.
- Plucinski, M.M., Young, Y.L. & Liu, Z., 2007. Optimization of self-twisting composite marine propeller using a genetic algorithms. *16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan, 8-13 July 2007.
- Searle, T. & Shot, D., 1994. Are composite propellers the way forward for small boats, *Materials World. The Journal of the Institute of Materials*, 2(2), pp.69-70.
- ThyssenKrupp, 2011. Acoustically optimized propeller made from composite materials. *Techforum*, 1, pp.59-63.



김지혜

안병권

김건도