유연 프로펠러의 제작 정도가 단독성능에 미치는 영향

이건화¹·장현길¹·이창섭¹·노인식^{1,†}·이상갑²·현범수²
충남대학교 선박해양공학과¹
한국해양대학교 조선해양시스템공학부²

Effect of Manufacturing Accuracy of Flexible Propeller on the Open Water Performance

Kun-Hwa Lee¹·Hyun-Gil Jang¹·Chang-Sup Lee¹·In-Sik Nho^{1,†}·Sang-Gab Lee²·Beom-Soo Hyun²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Division of Naval Architecture & Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean 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.

The blades of flexible propellers are formed by overlaying and adhering many layers of thin glass-fiber fabric sheets, are compressed and dried in the rigid mold. The current manufacturing process can not avoid the rather irregular deformation of the blades composed of non-isotropic non-uniform fabric structures, and inevitably introduces the different shape-forming errors between blades. In this paper, several flexible model propellers are precisely measured with three-dimensional optical instrument and compared with the original design geometry. The model propellers with the as-measured geometry are evaluated with the lifting-surface-theory-based propeller analysis code. The open-water performance are presented and discussed. The importance of the manufacturing accuracy is addressed to be able to apply the flexible propellers for propulsion of marine vehicles.

Keywords : Flexible propeller(유연 프로펠러), Accuracy of manufacturing(제작 정도), Open water performance(단독 성능)

1. 서론

고감속 복합재료를 이용한 유연 프로펠러는 고력충동주물(Ni-Al-Br)과 같은 금속 재질을 사용하는 기존의 프로펠러에 비해 방사소음 특성이 우수하다고 알려져 있다. 또한 고감속, 흡음 특성 이외에도 높은 비강도, 내부식성 등의 특성은 프로펠러의 재료로서 적합하다고 할 수 있다.

유연 프로펠러에 대한 연구는 주로 2000년대 후반에 이르러 눈에 띄게 나타나고 있으며 설계, 제작 및 성능해석에 관한 논문들이 발표된 바 있다. 국내에서도 마찬가지로 비슷한 시기에 활발한 연구가 수행되고 있다. 대표적으로는 Lee, et al. (2009a), Lee, et al. (2009b)에 의하여 독일 AIR사에 설계 및 제작을 의뢰한 유연 프로펠러와 국내 제작기술을 통한 자체 제작 유연 프로펠러에 대하여 성능 및 소음특성 평가를 수행한 바 있고, 작동시 하중이 작용할 때 프로펠러 날개의 거동을 가시화 하는 시험도 수행된 바 있다. 또한 Jang (2012)은 유탄성 해석을 통해 유연 프로펠러의 변형을 예측하고 변형을 고려한 설계를 수행할 수 있는 절차를 제시한 바 있다.

최근 유연 프로펠러에 대한 관심과 필요성이 더욱 높아지고 있어 실제 추진기로 활용하기 위한 다양한 단계로의 연구로 발전되고 있는 것으로 판단된다. 유연 프로펠러가 실제 추진기로 활용되고 설계 시 목표로 하였던 성능을 가지기 위해서는 설계 형상을 그대로 따르는 정확한 제작이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 연구에 사용되었던 유연 프로펠러 4개를 대상으로 3차원 광학적 방법에 의한 엄밀한 측정을 통하여 제작 정도를 확인하고 수치해석을 통한 단독성능 추정을 통하여 제작 정도가 단독성능에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 유연 프로펠러의 형상 계측

대상이 된 유연 프로펠러는 C1, G1, G2, D로 총 4종이며 프로펠러 설계 오프셋을 바탕으로 작성한 3차원 형상 모델과 비교를 하였다. C1, G1, G2는 36도의 스코를 가진 MOERI의 재고프로펠러 KP069를 기준 프로펠러로 하여 동일 형상에 재료 및 섬유의 배열을 달리하여 국내에서 제작한 것으로 Lee, et al.

(2012)에서 형상, 제원 및 기본도면을 확인할 수 있다. C1은 탄소섬유강화 복합재료로 제작되었고, G1, G2는 유리섬유강화 복합재료로 제작되었다. D는 국외에서 설계 및 제작된 프로펠러로써 제작사로부터 도면만 제공되었고 재질 정보는 제공되지 않았으나 Lee, et al. (2009a)에서 손상된 날개의 분석 결과 유리섬유강화 복합재료인 것으로 추정하였다. 3차원 형상 계측은 외부 전문 업체 OMA에 의뢰를 통해 수행되었다. 측정 장비는 Fig. 1의 ATOS Triple scan이 사용되었다. 비교에 사용된 형상 모델은 캐드 프로그램을 사용해 NURBS곡면으로 모델링하여 제공되었다.

Fig. 2(a)~2(c)은 C1, G1, G2 프로펠러 계측결과와 형상 모델과의 차이를 (-)0.5mm ~ (+)0.5mm 범위의 색상차트로 나타낸 그림이다. 그림상으로 G1이 전체적으로 제작 오차가 큰 것으로 보여지나 날개별 편차가 가장 작으며 C1은 비교적 편차가 심한 것으로 보여지고 있다.

Fig. 1 3D scanning system (ATOS Triple scan)

Fig. 2 Result of 3d digitizing

Fig. 3 Difference between measured data (gray) and reference model (black, D-propeller)

Fig. 4 Comparison of the section profile with measured data (black line) and reference model (color line)

Fig. 2(d)~2(e)는 D 프로펠러 계측결과와 형상 모델과의 차이를 1번 날개와 2번 날개에 대하여 (-)3.0mm ~ (+)3.0mm 범위의 색상차트로 나타낸 그림이다. 날개별 편차를 쉽게 확인하기

위하여 Fig. 3에 계측값과 형상 모델을 동시에 도시한 그림을 보인다.

Fig. 3에서 검정색이 형상 모델 데이터, 화색이 계측값으로 날개별 편차도 눈에 띄며 날개 끝 부위가 형상 모델보다 선수 쪽으로 이동되는 등 기존 프로펠러의 형상과 다르게 제작된 것을 확인할 수 있다.

계측 결과를 통한 제작 정도의 검증은 3차원 형상 모델을 기준으로 Fig. 4에서와 같이 0.3R~0.97R 구간에서 단면을 이용해 비교하였다. 계측값을 이용한 피치의 계산은 날개의 앞날 및 뒷날의 위치를 결정한 후에 형상 모델을 기준으로 한 변위로 부터 피치각의 변화를 계산하였다. 계측값에서 날개 앞날 및 뒷날의 위치는 곡률을 계산하여 곡률이 가장 큰 부분으로 결정하여야 하지만 목적에 의하여 결정하여도 큰 오차가 발생하지 않는다고 판단하고 있다. 또한 본 논문에서는 편의상 피치의 오차만을 다루었다. 실제로는 캠버, 코드길이, 스윙, 두께분포에도 오차가 있겠지만 상대적으로 단독 성능에 미치는 영향이 적다고 판단하였다.

Table 1 Standard deviation of pitch at each radii

r/R	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
C1	4.2	2.9	2.0	1.2	1.2	1.6	2.7	4.2	6.2	7.4	8.8
G1	1.9	1.1	0.6	0.7	1.3	1.9	2.4	2.7	3.0	3.4	4.1
G2	1.1	0.6	0.8	1.6	2.2	2.8	3.5	4.3	5.4	6.1	6.8
D1	5.9	2.5	1.2	1.9	2.5	2.5	2.3	4.3	7.3	9.4	12.2

Fig. 5 Difference in the pitch between measured data and reference model

반경별 피치분포를 각 날개별로 구하고 이를 평균한 평균피치와 기준 프로펠러와의 차이를 Fig. 5에 보이고 날개간 표준편차는 Table 1에 정리하였다. C1은 피치 분포가 기준 프로펠러에

비하여 커지는 방향의 오차가 측정되었고 G1, G2, D는 작아지는 방향의 오차가 측정되었다. 오차의 크기는 C1과 G2가 작은 편이고 D가 다른 프로펠러들에 비하여 상당히 큰 오차를 가지는 것으로 보인다. 또한 반경 방향 오차의 변화를 보면 C1의 경우 비교적 변화가 적으나 G1, G2, D의 경우 날개 끝으로 갈수록 오차가 심화되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(a)~6(d)는 각 날개간의 편차를 확인할 수 있도록 날개별로 측정된 피치 분포와 각 프로펠러의 평균 피치, 그리고 기준 프로펠러의 피치 분포를 도시하였다. 날개 간의 편차는 C1과 D가 비슷한 수준으로 크고 G1, G2가 작은 편차를 가진다. G1의 경우 5번 날개, G2의 경우에는 1번 날개가 다른 날개에 비하여 오차가 크다. 제작 오차가 큰 날개에서 다른 날개와 유사한 정도를 유지하였다면 좀 더 높은 제작 정도를 기대할 수 있었을 것이다.

다시 정리하면 C1은 피치의 평균값이 기준 프로펠러와의 오차가 적지만 날개 간의 편차가 크므로 피치의 평균값 및 제작 정도를 신뢰할 수 없다. 반면 G1, G2는 날개 간의 편차가 작아서 제작 정도의 일관성이 확보되었다고 볼 수 있으며 어느 정도 정도 높은 제작이 이루어 졌다고 판단된다. D 프로펠러의 경우에는 0.5R 이상의 반경에서부터 오차가 커서 기준 프로펠러와 전혀 다른 성능을 낼 것으로 예상된다.

3. 단독 성능 검토

다른 프로펠러 형상 변수들은 무시하고 제작 오차가 피치 분포에만 영향을 준다고 가정하고 기존의 형상 변수에서 형상 계측을 통해 도출한 피치 분포를 적용하여 단독성능 수치해석을 수행하였다. 수치해석 프로그램은 양력면 이론에 의한 프로펠러 정상 성능해석 프로그램 (Kerwin & Lee, 1978)을 사용하였다. 예측된 피치값은 다항식 최소제곱법을 사용한 곡선 맞춤(curve fitting) 후에 사용되었다.

Fig. 7은 기준 프로펠러가 같은 C1, G1, G2 프로펠러 각각의 평균 피치를 사용하여 계산된 단독성능 도표이다. 그림에서 피치 분포의 차이에 해당하는 성능의 변화를 확인할 수 있으며 검토된 결과는 다음과 같다.

C1의 추력 계수 및 토크 계수는 전 영역의 전진계수에서 기준 프로펠러에 비해 증가하였고 G1, G2는 감소하였다. 효율 곡선은 $J=1.0$ 까지 거의 동일하게 나타나고 있다. C1, G2의 경우 평균 피치가 기준 프로펠러에 가장 근접한 결과를 보였으므로 단독 성능에서도 기준 프로펠러와 유사한 성능을 보이는 것으로 계산되었다.

C1의 경우 G1, G2에 비해 날개간의 제작 편차가 크므로 편차에 따른 영향을 알아보기 위해 C1의 날개별 피치를 각각 적용하여 계산을 수행하였다. Fig. 8에 추력 계수 및 토크 계수가 가장 크고 가장 작은 두 개의 날개에 대한 결과를 도시하였다. 1번 날개와 4번 날개의 제작 정도 차이에 따른 단독 성능 차이는 평균 피치에 의한 단독 성능에 대하여 $J=1.0$ 에서 추력 계수가 약 12%, 토크 계수가 11%, 효율이 0.8%에 해당되었다. 이러한 사

실은 날개 간의 제작 편차가 프로펠러가 단독 상태에서 작동 중에도 임의의 지점에 비정상 하중으로 작용할 수 있음을 말해 준다. 유연 프로펠러가 사용될 수 있는 특수한 목적을 감안하면 유연 프로펠러의 장점에 상반되는 결과를 보일 수도 있을 것이다.

Fig. 9은 D프로펠러의 계산 결과이다. 평균 피치에 의한 결과와 각 날개별 피치에 의한 결과를 함께 도시하였다. 피치의 분포가 기준 프로펠러와 크게 다름에서도 알 수 있듯이 계측 결과에서의 예상대로 추력 계수 및 토크 계수는 기준 프로펠러에 비해 감소하였으며, 효율은 약간 상승하는 것으로 계산되었다.

4. 결 론

복합재료를 사용하여 제작된 유연 프로펠러를 대상으로 3차원 광학적 방법에 의해 제작 정도를 계측하고 기준 프로펠러와 비교 및 단독성능 수치해석을 수행하였다. 계측된 결과를 바탕으로 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

- 평균 피치 정도 : $C1 \approx G2 > G1 > D$
- 날개 간의 편차 : $G1 \approx G2 > C1 \approx D$
- C1, G2의 평균 피치가 기준 프로펠러와 가깝게 제작되었다.
- C1은 날개 간의 편차가 크므로 평균 피치만을 보고 잘 제작되었다고 평가할 수는 없다.
- G1, G2는 날개 간의 편차가 작으므로 제작 정도의 일관성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.
- D는 0.5R 이후에서 기준프로펠러와 큰 차이를 보이며 날개 간의 편차도 비교적 큰 편이다.
- 국외 제작 프로펠러(D)에 비하여 잘 만들어진 국내 제작 프로펠러(C1, G1, G2)의 경우에도 제작 오차에 따라 추력 계수 및 토크 계수가 평균적으로 5% 정도 차이를 가짐을 확인하였다.

제작의 정도를 검증하는 목적은 제작 오차의 원인을 분석하고 해결 방안을 연구하기 위함이라고 할 수 있다. 유연 프로펠러의 제작 정도에 영향을 주는 원인은 장비의 정밀도, 제작자의 숙련도, 복합재료가 가진 특성 및 제작 방식 등의 기술적인 변수를 비롯해 기온, 습도 등의 환경적인 변수 등 여러 가지가 있을 수 있다. 본 연구의 일련의 결과로 판단할 때 유리섬유강화 복합재료로 제작된 G1과 G2의 제작 일관성이 우수하므로 국내의 복합재 유연 프로펠러 제작 기술 수준을 긍정적으로 평가할 수 있을 것이다. 그러나 알루미늄으로 제작되는 모형 프로펠러의 제작공차가 0.05mm 수준임을 감안하면 복합재료 프로펠러 제작 기술의 향상을 위해 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

향후 본 논문에서 검토의 대상이 되었던 프로펠러에 대하여 연구를 계속하여 제작 오차와 오차 발생 원인의 상관관계를 검토하고, 제작 오차 또는 제작 후 변형을 고려하는 제작 기법, 최소화 하는 제작 기법을 확립할 수 있어야 할 것이다.

Fig. 6 Pitch measurement result and reference model's pitch

Fig. 7 Comparison of open water performance between reference propeller and measured C1, G1, G2 propeller

Fig. 8 Comparison of open water performance between reference propeller and measured C1 propeller

Fig. 9 Comparison of open water performance between reference propeller and measured D propeller

후 기

본 연구는 한국해양대학교 수중운동체특화연구센터의 ‘탄성변형을 고려한 복합재 추진기 설계기법 연구(SM-42)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Jang, H.G., 2012. *Design of flexible composite propeller*. Ph.D. Chungnam National University.
- Kerwin, J.E. & Lee, C.S., 1978. Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory. *SNAME Transactions*, 86, pp.218–253.

- Lee, S.G. Byun, J.H. Paik, B.G. & Hyun, B.S., 2009a. Production & Performance Assessment of Composite Material Flexible Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.667–674.
- Lee, S.G. Hwang, J.O. & Byun, J.H., 2009b. Material & Structural Characteristics of Composite Material Flexible Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(2), pp.203–217.
- Lee, S.G. et al., 2012. Enhanced Manufacturing and Performance Analysis of Flexible Composite Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.521–527.

이 건 화

장 현 길

이 창 섭

노 인 식

이 상 갑

현 범 수