

유체-구조 반복해석법에 의한 유연 프로펠러의 설계 알고리즘 개발

장현길¹·노인식¹·홍창호²·이창섭^{1,†}
충남대학교 선박해양공학과¹
충남대학교 항공우주공학과²

Design Algorithm of Flexible Propeller by Fluid-Structure Interactive Analysis

Hyun-Gil Jang¹·In Sik Nho¹·Chang-Ho Hong²·Chang-Sup Lee^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Department of Aerospace Engineering, Chungnam National 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.

Flexible composite propellers are subject to large deformation under heavy loading, and hence the hydrodynamic performance of deformed propeller might deviate from that of the metallic propeller under negligible deformation. To design the flexible propeller, it is therefore necessary to be able to evaluate the structural response of the blades to the hydrodynamic loadings, and then the influence of the blade deformation upon the hydrodynamic loadings. We use the lifting-surface-theory-based propeller analysis and design codes in solving the hydrodynamic problem, and the finite-element-method program formulated with 20-node iso-parametric solid elements for the analysis of the structural response. The two different hydrodynamic and structural programs are arranged to communicate through the carefully-designed interface scheme which leads to the derivation of the geometric parameters such as the pitch, the rake and the skew distributions common to both programs. The design of flexible propellers, suitable for manufacturing, is shown to perform the required thrust performance when deformed in operation. Sample design shows the fast iteration scheme and the robustness of the design procedure of the flexible propellers.

Keywords : Flexible propeller(유연 프로펠러), Fluid-structure interactive analysis(유체-구조 반복해석), Lifting surface theory(양력면 이론), Vortex lattice method(보오텍스 격자법), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

알루미늄 또는 니켈-알루미늄-브론즈(NiAlBr)와 같은 재질을 사용하는 기존의 프로펠러는 자체의 과도한 중량 때문에 어떤 특정한 수중 운반체의 추진을 위한 프로펠러로서의 응용에 제한을 받을 수 있다. 이러한 중량 문제를 해결하기 위한 방법의 하나로 복합재(composite material)와 같은 가볍고 유연한 재질(flexible material)을 사용하여 프로펠러를 제작하는 방법이 제시되고 있으며, 특히 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 재질은 흡음 특성도 좋아 방사소음을 줄여야 하는 프로펠러의 경우에 더욱 적절한 장점도 있다.

그러나 이러한 유연 재료로 제작된 프로펠러는 구조 강성이 부족하여 하중을 받을 경우 날개 형상의 변형이 커서 높은 하중상태에서 최적의 상태에서 작동하지 않을 가능성이 높은 문제점이

있어 이를 해결할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 이론적으로 수행하기 위해서 우선 프로펠러에 작용하는 유체역학적 성능을 추정하고, 이 유체역학적 하중에 따라 날개형상이 변형되는 것을 추정할 수 있는 구조해석방법을 확보하고 있어야 한다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 계산 능력이 향상되어 유탄성 이론을 적용한 유연 프로펠러의 성능 추정방법이 제시되고 있으며(예를 들어, Motley & Young, 2010; Miller, et al., 2012), 국내에서도 Lee, et al. (2009)에 의한 연구결과가 발표되고 있다.

본 연구에서는 유체역학적 성능해석/프로펠러 설계를 위해서는, 이미 확보하고 있으며 계산 정도가 높은 것으로 확인되고 있는 Kerwin and Lee (1978)의 양력면 이론(Lifting-Surface Theory, Vortex Lattice Method, VLM)에 의한 프로펠러 유체역학적 성능해석 코드(KPA4), Kim, et al. (1995)의 프로펠러 설계 코드(KPD4)를 사용하고, 이미 고정밀 구조성능 해석능력이 입증된 Nho, et al. (2004)의 유한요소법(Finite Element Method, FEM)

을 적용한 구조역학적 성능해석 프로그램(ProSTEC)을 이용하기로 한다. 그러나 양력면 이론에 기반한 KPA4 프로그램에서 프로펠러 날개를 기하학적으로 처리하는 방법과 유한요소이론에 기반한 ProSTEC 프로그램에서 20-절점 육면체 등매개변수 요소를 기하학적으로 처리하는 방법이 상이하여, 두 프로그램 사이의 인터페이스에서 오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 두 프로그램 사이의 인터페이스를 원활하게 하는 처리장치를 개발하였으며, 유연 프로펠러의 변형을 고려한 설계기법에 이를 적용하여 변형 후 목표하중을 갖도록 설계 형상을 찾아가는 절차를 완성하였다.

2. 프로펠러 기하학

본 연구는 유체역학적 해석 프로그램과 구조해석 코드의 연동을 통해 변형이 고려된 프로펠러 형상을 설계하는 것이 목적이다. 해석 코드간의 연동을 위해서 우선적으로 고려해야 할 것은 해석 대상의 형상 모델링 정보이다. VLM과 FEM 코드간의 형상 정보 교환은 ProSTEC에 이미 개발되어 있으나 본 연구에서 개발된 알고리즘을 위해서 반복수행시 재입력 될 형상정보를 재생성하는 것이 추가적으로 필요하다. 본 장에서는 이산화 된 형상 좌표들로부터 프로펠러 형상 변수들인 피치(Pitch), 레이크(Rake), 스큐(Skew), 코드 길이(Chord length)를 추적하는 방법을 설명하고 있다.

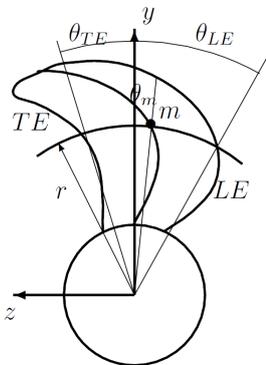


Fig. 1 Projected outline (Lee, et al., 2007)

Fig. 1은 프로펠러의 정면 윤곽도를 나타내고 있다. 그림에서 x, y, z - 축의 (+)방향은 각각 하류방향, 지구 중력반대인 상방향, 좌현쪽을 가리킨다. LE는 날개 앞날, TE는 날개 뒷날을 의미하며 아래의 식에서는 각각 하첨자 l, t 로 표기하기로 한다. 정면 윤곽도에서는 날개 단면 기준점(중요점)이 프로펠러 기준선인 y 축과 이루는 각도인 스큐각 θ_m 이 그대로 나타난다. 이때 특정 반경 (r)에서 앞날과 뒷날의 좌표를 알게 되면 앞날과 뒷날이 프로펠러 기준선과 이루는 각은 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 따라서 스큐각 θ_m 은 앞날과 뒷날이 이루는 각의 절반이므로 식 (2)와 같다.

Fig. 2는 특정 반경의 단면을 전개한 모습으로 코드길이 c 가 앞날과 뒷날의 직선거리로 나타나며, 피치각과 레이크의 크기도 직접적으로 나타난다.

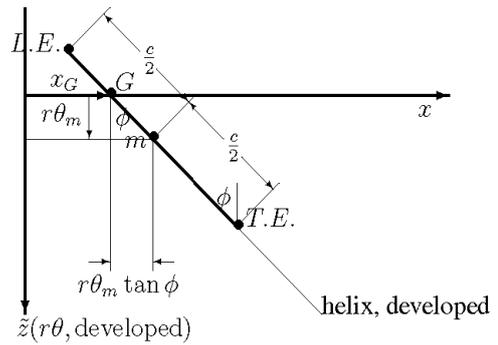


Fig. 2 Propeller geometry in $x - r\theta$ coordinate (Lee, et al., 2007)

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

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

앞서와 마찬가지로 특정 반경(r)에서 앞날과 뒷날의 좌표를 알게 되면 식 (1)에 의해 $\theta_{l,t}$ 를 구하고 앞날과 뒷날의 x 축 방향 거리를 활용해 식(3)과 같이 피치각 ϕ 를 구할 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 제작기 준선까지의 축방향 직선거리로 스큐가 없다면 날개 단면 기준점의 x 좌표가 그대로 레이크가 된다. 날개 단면 기준점은 스큐의 영향으로 Fig. 2의 $r\theta_m \tan \phi$ 의 양 만큼 이동하게 되므로 식 (4)와 같이 날개 단면 기준점의 x 좌표로부터 스큐에 의한 x 방향 이동량을 빼주면 레이크 x_G 를 구할 수 있다.

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

3. 설계 알고리즘

설계 조건에 따라 프로펠러의 요구 추력(하중)이 결정되면 양력면이론에 의한 설계프로그램을 통해 형상 설계가 가능하다. 일반적으로 프로펠러는 강제로 간주하여도 무리가 없지만 본 연구는 유연프로펠러를 대상으로 하고 있기 때문에 작동하중에 의한 프로펠러의 변형을 반드시 고려해야 한다.

설계 알고리즘은 어떤 특정 반경에서의 날개의 한 면(여기서는 설명의 단순화를 위해 흡입면 한쪽만 보인다)이 유체역학적 하중에 의해 변형된 형상을 관찰함으로써 유도될 수 있다. Fig. 3은 목표하중(Target Loading, TL)을 보이는 날개의 한 단면(A)가

유체역학적 하중에 의해 변형(상징적으로 날개위에 있는 점에서의 변형량을 FEM 프로그램을 적용하여 구하며 $\vec{\delta}$ 로 표기한다) 되어, 날개 $(A) + \vec{\delta}$ 로 변형됨을 보인다. Fig. 3이 날개 특정부위의 $(x/R, z/R)$ 좌표만 보여주고 있지만, 코드방향의 형상의

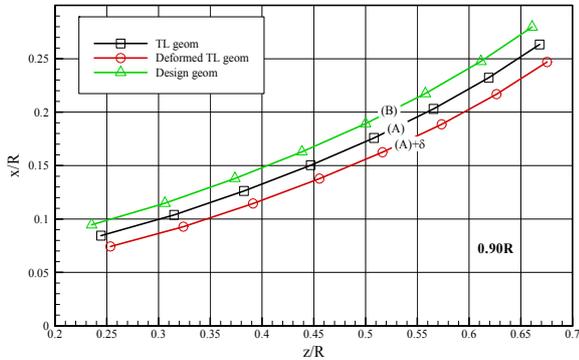


Fig. 3 Suction-side of a propeller blade at a particular radius

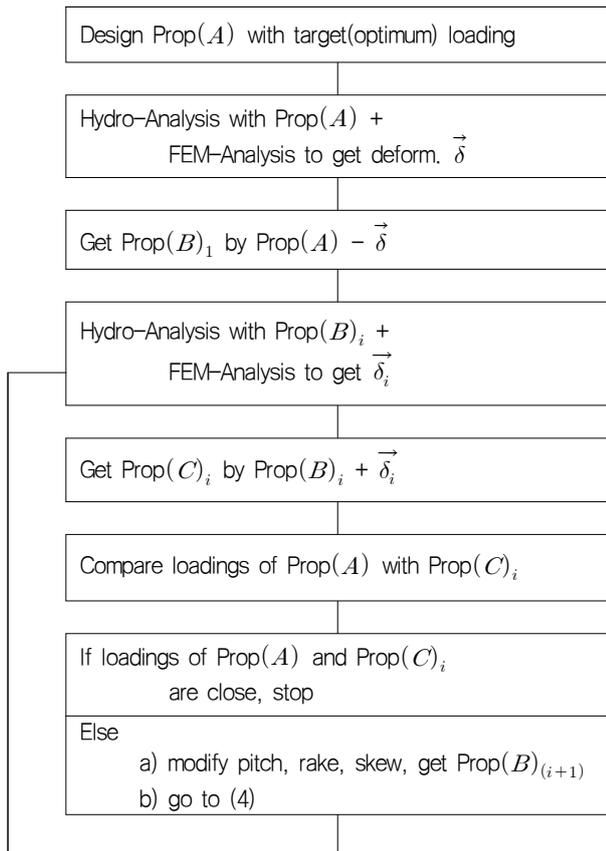


Fig. 4 Flexible propeller design algorithm

변화를 충분히 보여주며, 날개의 변형이 거의 평행하게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 이 관찰을 근거로 변형을 반대로 주어, 날개 $(A) - \vec{\delta}$ 를 계산하여, 단면 (B) 라고 부른다. 우리의 기대는 프로펠러가 실제 추진력을 낼 때 단면 (B) 가 하중을 받아 단면 (A) 로, 또는 단면 (A) 와 유사하게 변형하여, 처음의 목표하

중 상태와 비슷한 상태에서 유연 프로펠러가 작동할 것을 예상하는 것이다. Fig. 3에서 3개의 곡선이 평행하게 나타나므로, 날개의 변형을 피치, 레이크, 스큐의 변화로 표현할 수 있으리라고 예상할 수 있으며, 실제로도 기하학적인 형상의 변화가 상당히 빠르고, 안정적인 수렴성을 보인다.

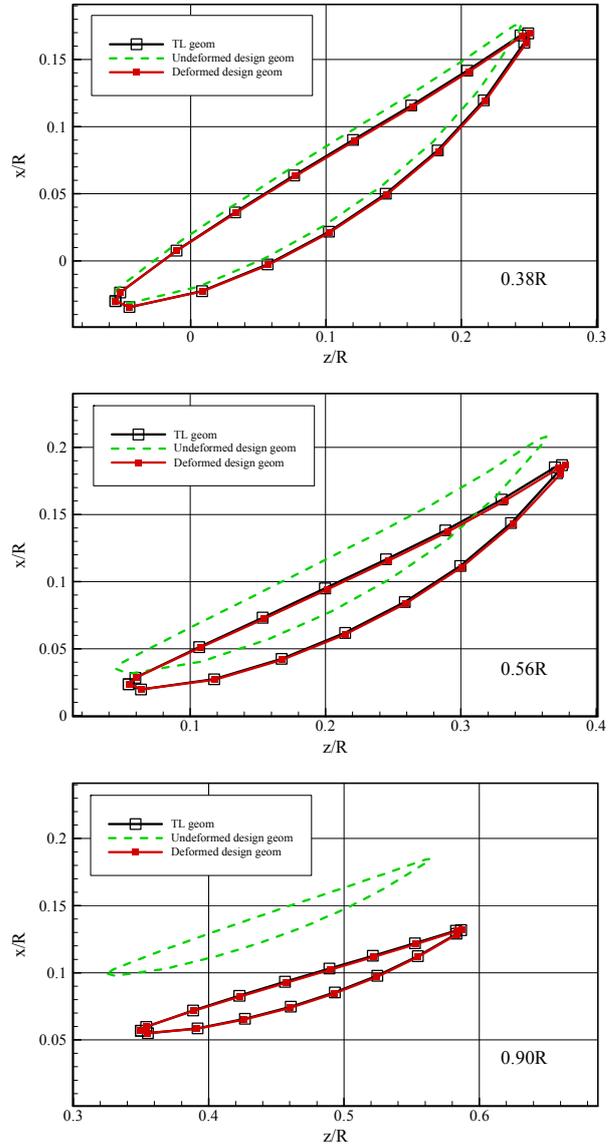


Fig. 5 Geometry having the target loading(open square) and geometry for the manufacturing(dashed line) and the deformed geometry(filled square) in operation are compared at three different radii

- 1) Prop(A)의 기하학적 형상은 목표하중(TL) 성능을 만족하는 프로펠러로 기존의 형상 설계 프로그램에 의해 구해진다.
- 2) Prop(B)_i는 설계 목표를 만족할 때까지 반복하여 수정되는 형상으로 설계절차가 완료된 후 제작에 사용될 최종형상이 된다.
- 3) Prop(C)_i는 Prop(B)_i에 유체역학적 해석과 구조강도해석을 순차적으로 수행하여 변형된 형상이다.

- 4) Prop(C)_{*i*}의 유체역학적 작동하중이 Prop(A)와 차이가 허용치 이상이면, Prop(C)_{*i*}와 Prop(A)의 형상 차이에 의한 형상 수정량을 식 (5)와 같이 적용하여 반복 수행한다.
- 5) Prop(C)의 작동하중이 Prop(A)와 동일한 하중을 발생시킨면(즉, 수정량이 허용치보다 적어지면) 설계절차가 완료된다.

$$B_{i+1} = B_i + (A - C_i) \tag{5}$$

Fig. 4의 알고리즘을 적용하여 예제 설계를 수행한 일부 과정이 Fig. 5에 정리되어 있다. 그림에서 설계 추진력을 내는 운전 상태에서 목표하중을 보일 Prop(A) 날개의 단면을 목표하중형상(TL geom)으로 표기하고, Fig. 3에서 설명하였던 $-\delta$ 를 적용하여 구한 Prop(B)의 날개 형상(즉, 제작에 적용할 형상)을 설계형상(undeformed design geom)으로 표기하였으며, Prop(B)가 정상추진 운전 중에 변형하여 도달하는 형상을 갖는 프로펠러를 Prop(C)로 표기하여 보인다. 앞의 Fig. 3에서 보인 것과 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 특히 3~4차례의 반복계산 이후에는 완전히 수렴된 설계 프로펠러 형상 (B)가 얻어지고, 이때 변형된 형상 (C)가 목표하중을 갖는 (A)와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 3개의 선택된 반경에서 ($x/R, z/R$)의 관계만을 보이고 있으나, 변형량은 허브에서 날개끝으로 갈수록 점점 커지고 있음을 알 수 있다.

4. 설계 예제

본 연구의 검증을 위하여 목표하중을 갖는 프로펠러로 스쿠가 비교적 큰 KP069 프로펠러를 재고프로펠러로 선정하여 예제 계산을 수행하였다. 구조해석 수행에 사용된 재료의 Young's modulus는 10GPa로 설정하였다. 설계점은 $J=0.9$, RPM=2000으로 단독상태에서 계산을 수행하였다. 해석 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Principal condition and material properties

TL Prop.	KP069
Diameter(mm)	250.0
J	0.90
K_T	0.20
RPM	2000
Young's Modulus(GPa)	10.0
Poisson ratio	0.17
Density(kg/m ³)	2200.0

KPA4를 사용해 추정된 TL geom의 날개 표면에 작용하는 압

력분포를 Fig. 6에 보인다. 여기서 추정된 압력분포와 함께 날개 형상 정보를 ProSTEC에 전달하면 FEM 해석에 의해 Fig. 7, 8의 결과를 얻을 수 있다. Fig. 7, 8은 프로펠러 날개가 운전 중에 유체역학적 하중을 받아 변형된 모습을 3차원 그림으로 보인 것이다. 허브에서 날개 끝까지의 여러 반경위치에서 날개 단면이 변화하는 전체적인 모습을 개략적으로 관찰할 수 있다. Fig. 8은 여러 반경위치에서 변형량을 표시하여 특히 날개 끝으로 갈수록 변형이 심화되는 모습을 보여준다. 또한 변형된 형상은 피치가 레이크가 감소하는 방향, 스쿠가 증가하는 방향으로 변형됨을 그림에서 확인할 수 있다.

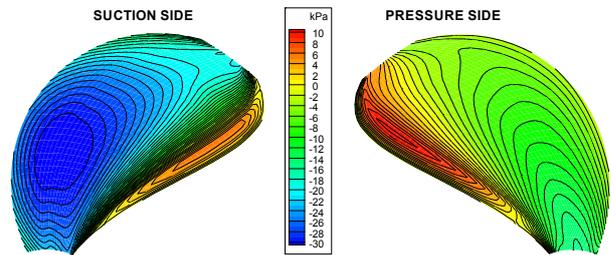


Fig. 6 Prediction of surface pressure distributions

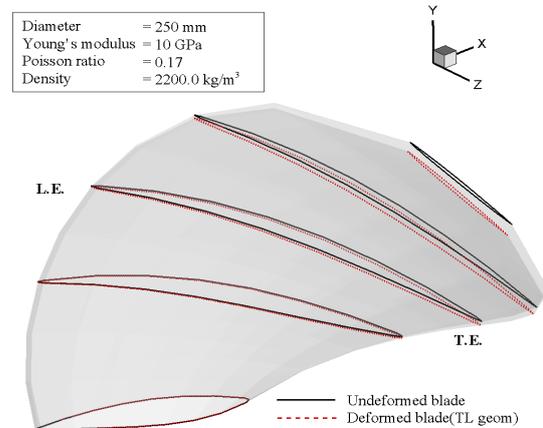


Fig. 7 Comparison of shapes of the deformed(in-operation) blade predicted by the present procedure with the undeformed(manufacturing-ready) design blade

앞 절에서는 날개 표면의 형상이 변화하고 수렴하는 과정을 보았다. 앞에서 관찰되는 기하학적 형상으로부터 날개의 가장 중요한 기하학적 매개변수인 피치, 레이크, 스쿠가 도출되고, 반복계산과정을 통해 수렴되어 가는 모습을 보이고자 한다.

Fig 9~11에서 보는 바와 같이 피치, 레이크, 스쿠값의 반경 방향 분포가 아주 빠르게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 여기서 실선은 변형 전 형상, 파선은 변형 후 형상으로 최종 형상은 4회의 반복 계산으로 결정되었으며 허용치는 변형량의 0.1%로 하였다. 이로부터 유연 프로펠러의 설계과정에서 가장 중요한 기하학적 매개변수를 정확하게 찾아갈 수 있음을 확인하였다.

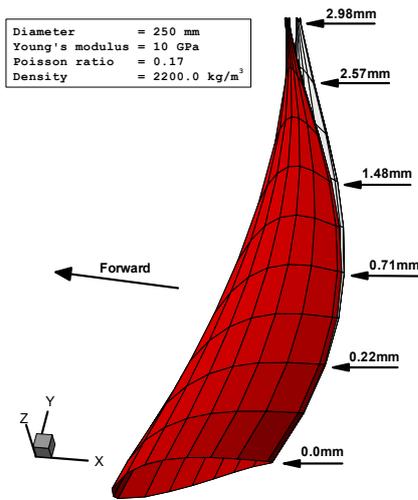


Fig. 8 Blade deformation predicted by the present procedure: undeformed design blade(grey) and the deformed blade(red) at the design condition

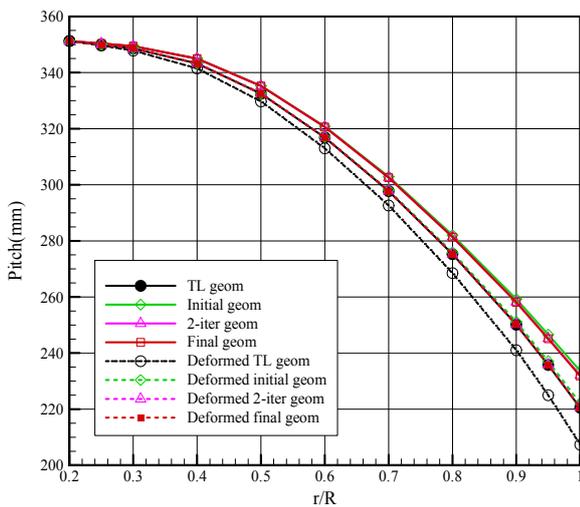


Fig. 9 Pitch distributions of the propeller having the target loading (filled circle), the design propeller (solid lines) and the deformed propeller in operation (dashed lines) are compared

Fig. 12는 최종설계형상의 변형 전과 후 이에 대응되는 반경 방향 순환의 분포를 보여준다. 기하학적 형상의 수렴에 따라 순환분포도 수렴한 것을 관찰할 수 있다. 여기에는 목표하중형상인 Prop(A)가 변형하였을 때와 변형하지 않았을 때의 순환의 값이 감소/증가하는 것을 함께 보였다. 그림으로부터 형상 변화에서 관찰했던 선형 거동(linear behavior)이 순환분포의 변화에도 그대로 나타남을 알 수 있다.

본 예제 계산이 사용된 프로펠러의 스쿠가 36도로 비교적 큰 값임에도 불구하고 순환분포가 변화하는 거동이 선형적이라는 것은 유연 설계 이론이 기본적으로 선형성에 기반할 수 있음을 보이는 것이고, 따라서 선형 설계이론이 유용할 것이라는 것을 의미한다.

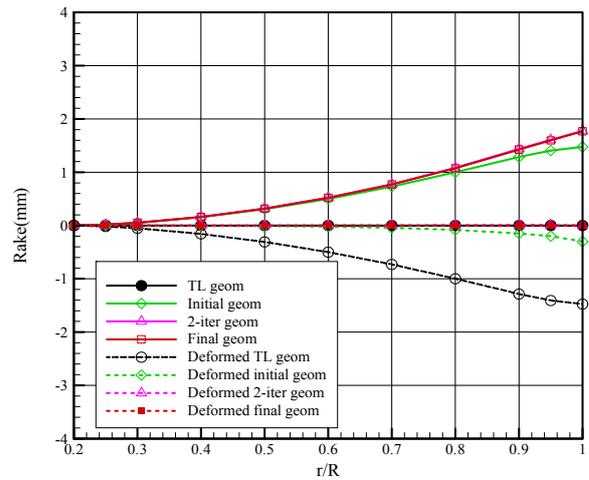


Fig. 10 Rake distributions of the propeller having the target loading, the design propeller and the deformed propeller in operation are compared

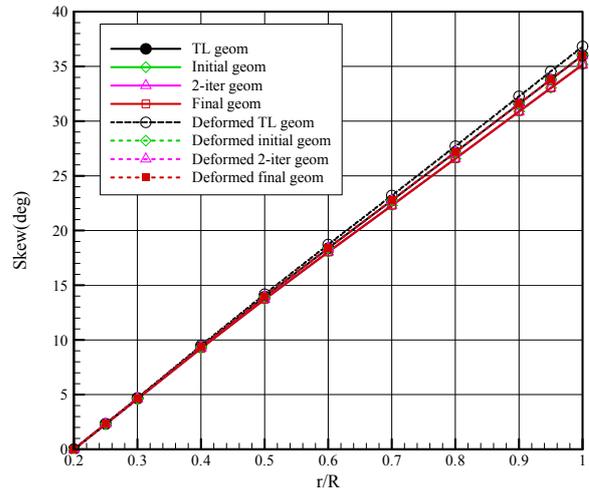


Fig. 11 Skew distributions of the propeller having the target loading, the design propeller and the deformed propeller in operation are compared

Fig. 13은 설계 프로펠러의 각각의 상태에 따른 단독성능을 비교한 것이다. 쇠선은 설계된 프로펠러가 변형하지 않는다고 가정하였을 때이고, 파선은 작동 하중에 의해 변형하였을 때, 그리고 실선은 변형하지 않는 목표하중 형상이다. 설계된 프로펠러가 변형하지 않는 경우 쇠선과 같은 성능을 보일 것이다. 그러나 유연 재질로 제작된 설계 프로펠러는 형상이 변형되어 파선과 같이 동일 전진계수에서의 추력 및 토크 계수가 감소함을 알 수 있다. 또한 목표하중 형상의 성능과 비교할 때, 설계 전진계수인 $J=0.9$ 에서 변형된 형상의 성능은 목표하중 형상의 성능과 일치하고 있으며 설계점보다 높거나 낮은 전진계수에서는 서로 다른 하중상태에 의해 변형에 의한 성능 변화의 폭이 각기 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 변형 후 형상과 목표하중 형상의 효율 비교는 거의 구분하기 힘들 정도로 유사하여 좀 더 큰 변형을 가지는 경우를 설정하고 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다.

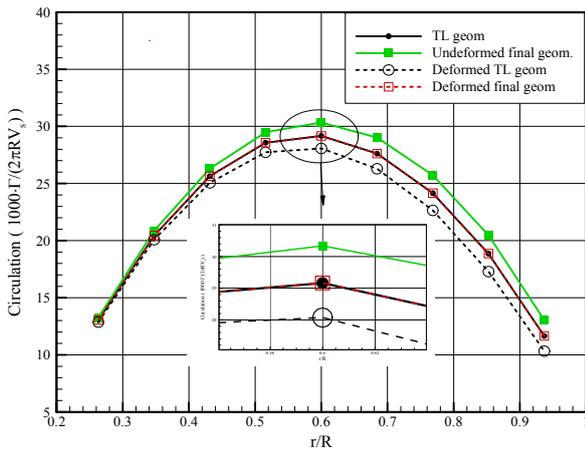


Fig. 12 Circulation distributions of the propeller having the target loading(filled circle), the design propeller(filled squares) and the deformed propeller in operation(open symbols) are compared

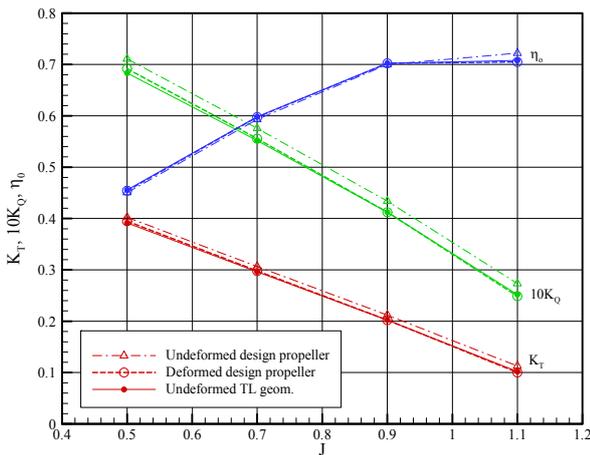


Fig. 13 Comparison of predicted performance of the deformed, undeformed propeller and undeformed TL geometry

5. 결론

변형을 고려한 유연 프로펠러의 설계기법이 개발되었다. 전통적인 강체 프로펠러 설계이론을 사용해 프로펠러가 설치될 수중 운반체의 운항조건에 맞는 목표하중을 갖도록 프로펠러를 설계하고, 유연 프로펠러가 변형 후 목표하중을 갖도록 설계 형상을 찾아가는 절차를 완성하였다. 프로펠러의 설계 및 성능해석을 위해서는 양력면-이론에 기반하는 프로그램(KPA4)를 사용하였고, 날개의 변형을 추정하기 위해서는 유한요소-이론에 기반하는 프로그램(ProSTEC)을 사용하였다. 변형량이 비교적 커도 선형성에 기반한 현재의 설계 절차가 빠른 수렴성을 보이는 것을 확인하였고, 설계 절차가 안정적임을 확인하였다.

후기

본 연구는 수중운동체특화연구센터의 ‘탄성변형을 고려한 복합재 추진기 설계기법 연구(SM-42)’, 그리고 ‘지식경제부 산업원천기술개발사업, 10033668, 추진기 및 방향타 최적설계 시스템 기술’의 지원으로 수행된 연구결과물의 일부입니다.

참고 문헌

- Kerwin, J.E. & Lee, C.S., 1978. Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory. *Transactions of The society of naval architects and marine engineers*, 86, pp.218-258.
- Kim, J.H. Kim, S.K. & Lee, C.S., 1995. Design of propeller blade shape by vortex distribution method. *Proceedings of 6-th International symposium on practical design of ships and mobile units*, Seoul, Republic of Korea, 17-22 September 1995.
- Lee, C.S. et al., 2007. *Propeller Design*. Munundang.
- Lee, S.G. Byun, J.H. Paik, B.G. & Hyun, B.S., 2009. Production & Performance Assessment of Composite Material Flexible Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.667-674.
- Motley, M.R. & Young, Y.L., 2010. Performance-based design of adaptive composite marine propellers. *28-th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Pasadena, California, 12-17 September 2010.
- Miller, R. Kim, S.E. Rhee, B. & Young, Y.L., 2012. Unsteady Fluid Structure Interaction Response of Marine Propellers in Crashback. *29-th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Gothenburg, Sweden, 26-31 August 2012.
- 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.

