

레이놀즈 수에 따른 회전 실린더와 회전 익형의 공력 성능 비교 연구

장승현^{‡,*1,2} · 서은비^{‡,**1} · 윤민^{†,1,2}

Influence of Reynolds number on the comparative study of aerodynamic performance between rotating cylinders and rotating airfoils

Seung Hyun Jang^{‡,*1,2}, Eun Bi Seo^{‡,**1}, and Min Yoon^{†,1,2}

Abstract This study numerically analyzes the lift force and power consumption of a rotating cylinder and a rotating airfoil, focusing on variations in diameter, rotation speed ratio, and inlet velocity. Three inlet velocities (u) were selected as 1.767 m/s, 8.83 m/s, and 17.67 m/s, and the rotation speeds were determined based on a rotation speed ratio of 0 to 3 at $u = 1.767$ m/s. The rotating cylinder generates lift due to the Magnus effect but also produces significantly higher drag compared to the rotating airfoil. When the surface area of the rotating cylinder is the same as that of the rotating airfoil, the rotating cylinder requires approximately five times more operating power than the rotating airfoil. Furthermore, the ratio of generated lift power to operating power is notably higher for the rotating airfoil, indicating its superior aerodynamic efficiency. As the Reynolds number increases, these differences become more pronounced. The rotating airfoil consistently requires less operating power while generating sufficient lift across all velocities. These findings highlight that while the rotating cylinder generates more lift, the rotating airfoil is more efficient in terms of power consumption and energy usage.

Key Words : Computational fluid dynamics (전산유체역학), Rotating cylinder (회전 실린더), Rotating airfoil (회전 익형), Lift force (양력), Power (동력)

[†] Corresponding Author, Assistant Professor
E-mail: minyoon@kmou.ac.kr

[‡] These authors contributed equally to this work

* Master's student

** Undergraduate student

¹ Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Republic of Korea

² Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Republic of Korea

1. 서론

해운업은 전 세계적으로 온실가스 배출의 약 3%를 차지하고 있으며⁽¹⁾, 이 수치를 줄이기 위한 다양한 노력이 진행 중이다. 특히 이를 위해 해운 분야의 기술적인 자문을 하는 국제해사기구(International Maritime Organization: IMO)는 50년 탄소중립 실현을 위해 2008년 온실가스 총배출량 대비, 2030년까지 최소 20%, 40년까지 70%까지 감축 목표를 세웠다.⁽²⁾ 선박 및

조선업에서 진행되는 주요 노력은 친환경 연료로의 전환, 탄소 포집 및 저장 기술, 로터 세일과 같은 풍력 기반 보조 추진 시스템 도입 등이 있다. 로터 세일을 도입한 선박은 일반적으로 5%에서 최대 20%까지 연료 절감 효과⁽³⁾를 보인다. 기존 선박에도 상대적으로 간단하게 설치할 수 있고 다양한 기상 조건에서도 유효하며 저속 운항과 함께 사용될 때 더 큰 연료 절감과 탄소 배출 저감 효과를 기대할 수 있는 장점이 있다.

로터 세일은 마그누스 효과를 활용하여 선박의 보조 추진 장치로 사용된다.⁽⁴⁾ 마그누스 효과란 회전하는 실린더 주위에서 바람이 불 때 한쪽에서는 바람이 실린더의 회전과 더해져 속도가 증가하고, 반대쪽에서는 속도가 감소하는 현상을 말한다. 이러한 속도 차이로 인해 양쪽에 압력 차이가 발생하며, 이로 인해 생성된 양력을 선박의 추진 방향과 일치시켜 선박을 전진시키는 데 도움을 준다. 이를 통해 선박의 연료 소비를 줄이고 탄소 배출을 낮출 수 있다.⁽⁵⁾

이와 같은 풍력 기반 보조 추진 장치로는 윈 세일(wing sail), 카이트 세일(kite sail)이 있다. 윈 세일은 항공기 날개와 유사한 고정된 날개 구조를 가진 듯하다. 로터 세일과 달리 회전하지 않으며, 고정된 구조물을 통해 공기 흐름을 최적화하여 양력을 발생시켜 보다 적은 동력으로 풍력을 이용한다. 하지만 로터 세일과 비교하여 바람의 각도에 민감하고 높은 설치 비용이 요구된다.⁽⁶⁾ 카이트 세일은 연을 공중에 띄워 높은 고도에서 강한 바람을 활용해 선박을 추진하는 시스템이다. 회전이 필요하지 않으며, 고고도의 바람을 이용해 추진력을 얻는다. 이 또한 바람 조건에 매우 민감하다.⁽⁷⁾

이에 더 나아가 윈 세일, 로터 세일의 장점을 결합하여 익형 선단에 회전 실린더를 결합한 회전 익형(rotating airfoil)이 있다.⁽⁸⁾ 회전 익형은 회전 실린더의 장점은 유지하며 단점을 크게 개선한 기술로, 특히 항공기와 선박 등 다양한 공력 분야에서 주목받고 있다. 회전 실린더를 익형의 선단에 배치하면 실린더가 공기 흐름을 선단에서부터 효율적으로 조정하여 공기

저항을 최소화할 수 있다. 또한 배치된 회전 실린더가 공기 흐름을 정렬하고 경계층이 쉽게 분리되지 않도록 도와주어 경계층 제어가 더 용이해진다. 특히 높은 받음각에서 실린더가 경계층 분리를 억제하여 실속을 늦추고 항공기나 선박의 안정성을 높이는 데 기여한다.⁽⁹⁾

마그누스 효과를 활용한 로터 세일은 주로 해상 운송에서 연료 절감과 탄소 배출 감소를 목표로 연구되어 왔다. 로터 세일의 설계와 성능 최적화에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 다양한 바람 조건에서 어떻게 효율적으로 작동하는지를 분석하는 시뮬레이션 및 실험 연구가 많이 이루어졌다. Norsepower의 실제 운항 테스트를 통한 연구에서는 로터 세일이 선박에서 저속 운항일 때 최대 20%의 연료 절감 효과를 보여주었으며, 이를 통해 해운업에서의 친환경 기술로 자리 잡고 있다.⁽¹⁰⁾ Guzelbulut⁽¹¹⁾는 로터 세일의 최적 설계를 목표로 로터 세일의 회전 속도비를 다양한 환경 조건에서 최적화하였고, 운영 비용을 고려하여 에너지 소비효율이 2.7%에서 4.06%로 증가하는 결과를 보였다.

로터 세일과 회전 익형에 대한 연구들은 각각의 시스템이 독립적으로 선박의 연료 절감 및 성능 향상에 기여하는 방식에 중점을 두고 있다. 로터 세일은 바람의 방향에 크게 의존하지 않고도 연료 절감 효과를 제공하며, 회전 익형은 고 받음각에서 양력을 증대시켜 실속을 지연시키는 장점을 갖고 있다. 그러나 이 두 기술을 함께 비교하거나 결합하여 성능을 평가하거나 이들의 상호 보완적 특성이 실제 운용 환경에서 어떻게 작용하는지에 대한 연구는 부족하다. 이러한 비교 연구는 각각의 장점을 결합하여 최적화된 설계를 도출하고, 해상 및 항공 분야에서의 효율성을 극대화하기 위한 중요한 기반이 될 수 있다.

Seo 등⁽¹²⁾은 입구 속도가 1.767 m/s일 때 실린더와 회전 익형의 공력 성능을 비교하였다. 같은 면적, 회전 속도비 1 조건에서 같은 양력을 발생하는데 필요한 동력은 실린더가 회전 익형보다 3배 높다는 결과를 도출하였다. 이 연구에서는 저 레이놀즈 수 유동을 다루었기 때

문에 레이놀즈 수가 증가함에 따라 급격히 증가하는 항력과 이에 따른 양항비(F_L/F_D)의 변화를 정확히 평가할 수 없다는 한계가 있다.

본 연구에서는 CFD (computational fluid dynamics) 를 이용하여 다양한 속도 조건에서 회전 실린더와 회전 익형의 성능을 비교한다. 회전 속도는 Seo 등⁽¹²⁾과 동일하게 유지하되, 입구 속도가 8.83 m/s, 17.67 m/s일 때 실린더 주위 유동을 CFD 해석하여 로터 세일과 회전 익형의 성능을 분석한다. 이를 통해 마그누스 효과를 활용한 양력 증가와 함께 항력 변화를 비교하고, 회전 익형이 로터 세일보다 얼마나 효율적인 공력 성능을 발휘하는지를 규명한다.

2. 수치해석 조건 및 이론

2.1 지배방정식 및 난류 모델

비압축성 유동의 지배방정식은 연속 방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이다. RANS 방정식은 유체의 시간 평균적인 운동 방정식을 기술하는 방정식으로, 난류 흐름에 발생하는 속도 섭동을 포함한다. 이는 Navier-Stokes 방정식을 레이놀즈 분해 후 시간 평균한 것으로, 난류로 인한 추가적인 응력 항인 레이놀즈 응력이 같이 도입된다. 본 연구에서 유동은 온도 변화가 없는 정상상태로 가정한다. 식 1에는 연속 방정식이 표현되어 있으며, 식 2에는 RANS 방정식을 나타내었다.⁽¹³⁾

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) \\ & = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, μ 는 동점성 계수, \bar{p} 는 평균 압력, t 는 시간을 나타낸다. \bar{u}_i 는 시간 평균

속도, u'_i 는 속도 섭동, x_i 는 직교좌표를 나타낸다.

본 연구에서는 난류 모사를 위해 realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST (shear stress transport) 모델을 사용하였다. Realizable $k-\epsilon$ 모델은 Shih 등⁽¹⁴⁾에 의해 개발되었으며, 기존의 standard $k-\epsilon$ 모델의 성능을 개선한 모델이다. 이 모델은 $k-\epsilon$ 모델의 기본 구조를 유지하면서 난류 점도와 관련된 새로운 방정식을 도입하고, 평균 제곱 와도 변동의 전달 방정식에서 파생된 소산율 전달 방정식을 사용하여 복잡한 유동 조건에서 보다 정밀한 예측이 가능하다. 이와 관련된 방정식들은 난류 운동 에너지 k 와 소산율 ϵ 의 수송 방정식을 포함하고 있으며, 각각 난류 점도와 난류의 에너지 흐름을 설명한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &+ P_K + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ \rho C_1 S_\epsilon + \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\theta \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

식 3은 k 의 수송 방정식이며, 식 4는 ϵ 의 수송 방정식이다. 여기서 μ_t 는 소용돌이 점도계수, P_k 와 P_b 는 각각 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지 생성과 부력에 의한 난류 운동에너지 생성을 나타낸다. 또한, σ_k 와 σ_ϵ 는 각각 k 와 ϵ 에 대한 난류 프란틀 수(Prandtl number)를 나타내며 Y_M 는 전체 소산율에 대한 압축성 난류의 변동 팽창의 기여도를 나타낸다. S_k 와 S_ϵ 는 k 와 ϵ 에 대한 사용자 정의 용어이다. 식에 사용된 C_1 과 C_1 은 모델의 상수로서 실험적 데이터를 통해 결정되며 다음 식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right], C_2 = 1.9, \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad (5)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, C_{1\epsilon} = 1.44, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

여기서 S 는 변형률 텐서, S_{ij} 는 평균 변형률을 나타낸다.

SST 모델은 Menter⁽¹⁵⁾에 의해 개발된 모델로 $k-\epsilon$ 와 $k-\omega$ 의 장점을 결합하여 계산 능력을 향상시켰다. SST 모델은 경계층 근처에서 $k-\omega$ 모델을 사용하고 자유 전단 층에서는 $k-\epsilon$ 모델로 전환하여 각 모델의 장점을 최대한 활용할 수 있도록 설계되었다. 이러한 특징으로 인해 압력 구배가 큰 유동이나 경계층 분리 유동을 해석할 때 높은 정확도를 갖는다. 두 모델의 원활한 전환을 위해 블렌딩 함수(F_1, F_2)를 사용하였다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} &= \alpha S^2 - \beta \omega^2 \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ &+ 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (7)$$

식 6은 k 의 수송 방정식이며, 식 7은 특정 소산을 ω 의 수송 방정식을 나타낸다. 여기서 S 는 유체 흐름의 변형률 속도, F_1 과 F_2 는 블렌딩 함수를 나타낸다. α 는 난류 점성 계수를 계산할 때 사용되는 상수이며 β 와 β^* 는 각각 난류 에너지가 소산되는 비율을 제어하는 상수와 난류 운동 에너지가 소모되는 속도를 나타낸다.

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856 \quad (8)$$

식 8은 k 와 ω 의 난류 프란틀 수를 나타내며 각 모델에서 난류 확산을 제어하는 상수들로 난류 확산 성질을 정의한다.

2.2 형상 및 해석 기법

본 연구에서는 Ansys사의 Fluent v19.2를 사용하여 회전하는 실린더와 Symmetry Joukowski airfoil의 앞전(leading edge)에 회전하는 실린더를 가지는 형상을 2차원으로 해석하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 회전 익형의 형상 정보를 나타낸다. 익형은 symmetry Joukowski airfoil을 사용하였으며 익형 앞전에 시계방향으로 회전하는 실린더를 설치하여 마그누스 효과(Magnus effect)를 활용하여 추가적인 양력을 얻기 위해 구성하였다. 익형의 코드 길이는 38 cm, 실린더 직경은 3.8 cm, 익형과 실린더 사이 간격(gap)은 1 mm로 설정하였다.⁽¹⁶⁾

그림 2(a)는 회전 익형의 전체 유동장의 격자를 나타내었으며, 익형 앞 유동장의 크기는 익형의 10배, 후류는 익형의 20배의 크기로 형성하였다. 그림 2(b)는 익형 주변의 격자를 나타내었다. 그림 2(b)에서 세밀하게 형성된 gap의 격자를 보여준다. 총 노드의 개수는 유입 속도에 따라 다르게 형성하였으며 1.767 m/s의 속도로 유입 시, 총 노드 수는 488,864개이며 17.67 m/s로 유입 시, 총 노드 수는 619,945개로 형성하였다. 경계조건은 앞과 옆을 velocity inlet으로

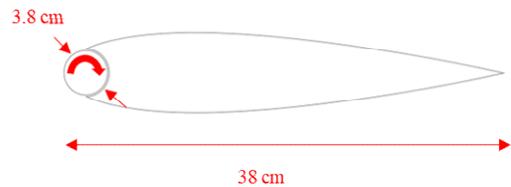


Fig. 1. Geometry of rotating airfoil

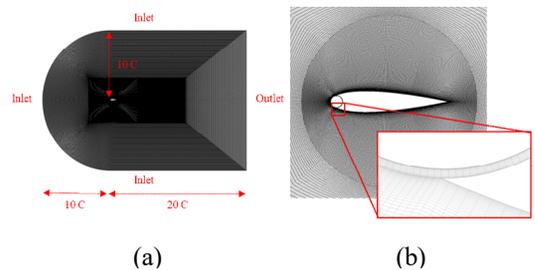


Fig. 2. Mesh generation at (a) entire fluid domain and (b) near airfoil.

설정하여 x축 방향으로 레이놀즈 수 $Re = 4.62 \times 10^4 \sim 4.62 \times 10^5$ 에 해당하는 1.767 m/s ~ 17.67 m/s의 유입 속도를 주었다. 바깥 경계는 pressure outlet으로 지정하였으며, 익형 표면에는 점착 조건을 지정하였다. 익형 앞 실린더는 rotating wall로 지정하여 회전속도비 u_c/u (u_c : 익형의 회전 속도, u : 자유 흐름 속도) = 0 ~ 3 범위에 맞춰 해석을 진행하였다. 유입 속도가 1.767 m/s일 때, 회전 속도가 3인 경우 회전 속도는 2,663 rpm이다. 하지만 유입 속도가 17.67 m/s로 증가한 경우, 회전 속도는 26,536 rpm로 이는 물리적으로 불가능하다. 이를 해결하기 위해 회전 속도 범위의 기준을 유입 속도 1.767 m/s에 맞춰서 $u_c/u = 0 \sim 3$ 일 때의 회전 속도를 다른 유입 속도에도 고정하여 해석을 진행하였다. 회전 익형의 받음각(angle of attack)은 20°로 설정하였다.

실린더는 회전 익형과의 원활한 비교를 위해 면적을 변경해가며 해석을 진행하였으며 이를 위해 회전 익형과 같은 면적일 때의 직경(15 cm)을 기준으로 유의미한 결과 변동을 보여주는 변화 폭을 선정하여 직경을 변경하였다. 이는 각각 7.5 cm, 26.5 cm, 38 cm로 선정하였으며 7.5 cm는 회전 익형 면적과 같은 면적을 갖는 원의 직경보다 작은 경우일 때의 직경이다. 38 cm의 경우 회전 익형의 코드 길이를 직경으로 갖는 경우이며 26.5 cm는 15 cm와 38 cm의 중간 길이를 직경으로 갖는 경우이다. 회전 익형과 동일하게 시계 방향으로 회전한다.

그림 3은 실린더 유동장의 전체 격자와 실린더 주변의 격자를 나타내었다. 유동장은 위쪽과

아래쪽에 각각 S1, S2의 대칭 경계 조건을 적용하였으며, S1은 $85.8^\circ \leq \theta \leq 94.2^\circ$, S2는 $265.8^\circ \leq \theta \leq 274.2^\circ$ 의 범위를 가진다. 유동장 직경 L 은 40D로 설정하였으며 실린더 직경은 7.5 cm ~ 38 cm의 범위로 설정하였다.⁽¹⁷⁾ 경계 조건은 앞을 velocity inlet으로 설정하여 x축 방향으로 1.767 m/s ~ 17.67 m/s의 유입 속도를 주었다. 이는 회전 익형을 기준으로 할 시, 레이놀즈 수 $Re = 4.62 \times 10^4 \sim 4.62 \times 10^5$ 에 해당하는 값이다. 바깥 경계는 pressure outlet으로 지정하였으며, 익형 표면에는 점착 조건과 rotating wall을 설정하여 회전할 수 있도록 설정하였다. 회전 속도는 $u = 1.767$ m/s에 맞춰서 $u_c/u = 0 \sim 3$ 일 때의 회전 속도를 다른 유입 속도에도 고정하여 해석을 진행하였다. 실린더 직경에 따라 총 격자 노드 수는 24,948 ~ 36,540개로 결정되며, 격자 형성 시 첫 번째 격자가 벽에서 $y^+ \leq 1$ 이내에 위치하도록 형성하였다.

3. 결과

항력(drag, F_D)은 유체가 물체를 지나면서 물체의 진행 방향에 반대되는 힘을 말한다. 실린더 주위에서 흐르는 유체는 전면에는 고압, 후면에는 저압을 형성하게 되며, 이로 인해 압력 항력이 발생한다. 이 항력은 유체의 흐름 속도와 물체의 형상에 크게 의존하며, 난류 유동에서는 점성에 의한 항력이 증가할 수 있다. 양력(lift, F_L)은 유체가 물체를 지나면서 물체에 수직으로 작용하는 힘이다. 물체가 받음각을 가지거나 회전할 경우, 유체의 흐름이 비대칭이 되면서 양력이 발생한다. 특히 실린더가 회전할 경우 마그누스 효과로 인해 비대칭적인 유동이 발생하며, 양력이 증가하고 회전 속도에 따라 양력의 크기가 변화한다. 이와 같이 양력과 항력은 물체가 유체와 상호작용할 때 발생하는 두 가지 주요한 힘으로, 각각 물체의 전진 방향과 수직 방향에 작용하는 힘이다. 실린더의 양력은 회전 익형보다 크지만 실린더의 항력이 회전 익형에 비해 막대하여, 본 연구에서는 에너지 효율성 판단을 위해 동력으로 성능

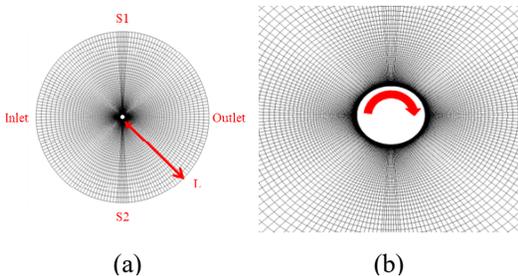


Fig. 3. Mesh generation at (a) entire fluid domain and (b) near cylinder.

을 평가하였다.

작동 동력(operating power, P)은 회전하는 물체에 작용하는 힘과 회전 속도를 결합하여 물체가 회전하는 데 필요한 시간당 에너지를 나타낸다.

$$P = T\omega \quad (10)$$

동력의 계산식은 식 10과 같다. 여기서 T 는 토크(torque)로 물체가 회전할 때 받는 회전력을, ω 는 각속도로 물체가 초당 회전하는 각도를 의미한다. 양력으로부터 발생한 동력은 양력에 유입 속도를 곱하여 ($F_L u$) 계산할 수 있다.

본 연구는 저 레이놀즈 수부터 고 레이놀즈 수까지 세 가지 유입 속도를 지정하여 해석을 진행하였다. 저 레이놀즈 수일 때의 유입 속도는 1.767 m/s이며 고 레이놀즈 수일 때의 유입 속도는 17.67 m/s로 그 중간값은 8.83 m/s로 선정하였다. 비교 값으로는 양력, 항력, 동력을 선정하였으며 저 레이놀즈 수와 고 레이놀즈 수의 차이 또한 비교하였다.

그림 4는 서로 다른 직경과 유입 속도에 따른 익형과 실린더 간 F_L 의 변화를 보여준다. x 축 하단은 면적비($A_{Cylinder}/A_{Airfoil}$)로, 실린더의 면적($A_{Cylinder}$)을 익형의 면적($A_{Airfoil}$)으로 나눈 값

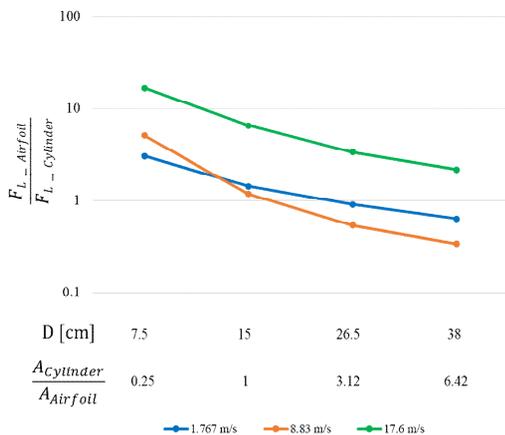


Fig. 4. Variation of lift ratio between rotating airfoil and cylinder across different diameters and inlet velocities

이다. $u = 1.767$ m/s와 $u = 8.83$ m/s인 경우, 실린더가 26.5 cm, 38 cm일 경우 회전 익형보다 더 높은 F_L 을 가지며 $u = 17.6$ m/s의 경우, 모든 실린더의 크기보다 회전 익형이 더 높은 F_L 을 가진다. 이는 어느 유입 속도에서도 회전 속도만 같다면 회전 익형이 실린더보다 높은 F_L 을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 5는 $u = 1.767$ m/s이고 $u_c/u = 1$ 인 유동에서 실린더와 회전 익형의 압력 등고면, 속도 등고면을 보여준다. 압력 등고면의 경우, 두 등고면의 압력 차가 유사하며 이로부터 F_L 이 근사함을 알 수 있다. 회전 익형의 실린더가 더 작은 면적을 가지는 만큼 같은 속도비일 때 더 빠르게 회전한다. 그 결과 익형 상부 유동이 가속되어 유동 박리가 지연됨을 속도장을 통해 확인할 수 있다. 한편, 실린더는 회전 익형에 비해 유동 박리가 전단에 발생하여 넓은 범위 저속의 범위를 가진다. 저속 구간을 벡터장으로 확인한 결과, 와류가 생성되어 이로 인한 항력이 높아지는 것을 예측할 수 있다.

표 1은 각 유입 속도에서의 작동 동력과 생산 동력비 ($F_L u/P$)를 정리하였다. $F_L u/P$ 의 경우,

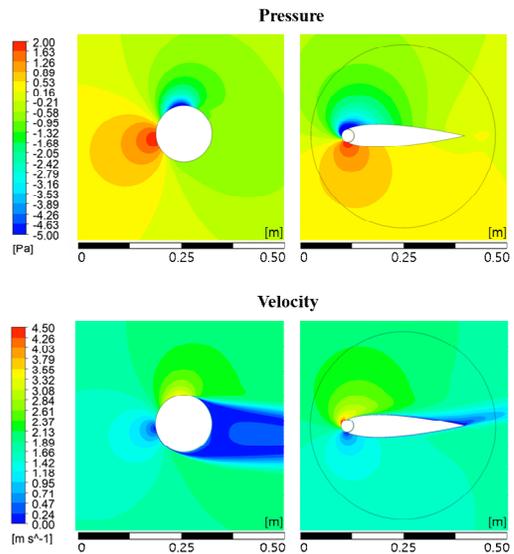


Fig. 5. Pressure and velocity contours of rotating cylinder and rotating airfoil at $u = 1.767$ m/s and $u_c / u = 1$

Table 1. The information of operating power and generated power ratio of rotating cylinders and rotating airfoils

| | | Cylinder diameter [cm] | | | | Rotating airfoil |
|-------------|-----------|------------------------|--------|--------|--------|------------------|
| | | 7.5 | 15 | 26.5 | 38 | |
| P [W] | 1.767 m/s | 0.0051 | 0.0084 | 0.0132 | 0.0178 | 0.0026 |
| | 8.83 m/s | 0.020 | 0.033 | 0.048 | 0.062 | 0.0046 |
| | 17.67 m/s | 0.131 | 0.208 | 0.317 | 0.430 | 0.0420 |
| $F_L u / P$ | 1.767 m/s | 49.2 | 60.0 | 63.1 | 66.9 | 426.3 |
| | 8.83 m/s | 107.1 | 281.9 | 429.0 | 513.3 | 705.3 |
| | 17.67 m/s | 556.1 | 897.7 | 1155.2 | 1360.4 | 14386.3 |

생산된 추진력 대비 에너지 소비를 나타내는 무차원 수치로 양력 생성 대비 동력 소모의 효율성을 정량적으로 평가할 수 있다. $u = 1.767$ m/s일 때, 실린더는 회전 익형보다 더 많은 동력을 소비하지만, $F_L u / P$ 는 회전 익형이 실린더보다 최소 6.37배 크게 나타났다. $u = 8.83$ m/s일 때의 $F_L u / P$ 를 비교하면 회전 익형이 실린더에 비해 최소 1.37배에서 최대 6.6배 우수하고 동력 소모는 최소 4.3배에서 최대 13.5배 우수하였다. $u = 17.6$ m/s일 때는 실린더는 회전 익형보다 최소 3.1배에서 최대 10.2배 더 발생하였지만 $F_L u / P$ 의 경우, 최소 10배에서 최대 31배 더 우수한 에너지 효율성을 보였다.

생산 동력과 $F_L u / P$ 모두 u 가 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 실린더와 회전 익형을 비교하였을 때, $u = 17.6$ m/s에서 가장 큰 차이가 나타났고, $u = 8.83$ m/s에서는 차이가 가장 적었다. 실린더의 경우, 직경이 커짐에 따라 $F_L u / P$ 와 동력이 모두 증가하는 경향을 보였다. 이는 직경이 클수록 유체에 의한 저항력이 커지며, 이에 따라 F_L 및 추진력 대비 더 많은 에너지가 소모됨을 나타낸다. 이와 같이 회전 속도가 동일할 때 회전 익형은 실린더보다 낮은 동력을 필요로 하며 효율성 측면에서 더 우수한 결과를 보였다.

그림 6은 $u = 17.6$ m/s이고 $u_c / u = 2$ 인 유동에서의 압력 및 속도 등고면을 보여준다. 고 레이놀즈 수에서의 압력 등고면을 보면 압력의 분포는 그림 5와 같지만 유입 속도의 증가로에 따

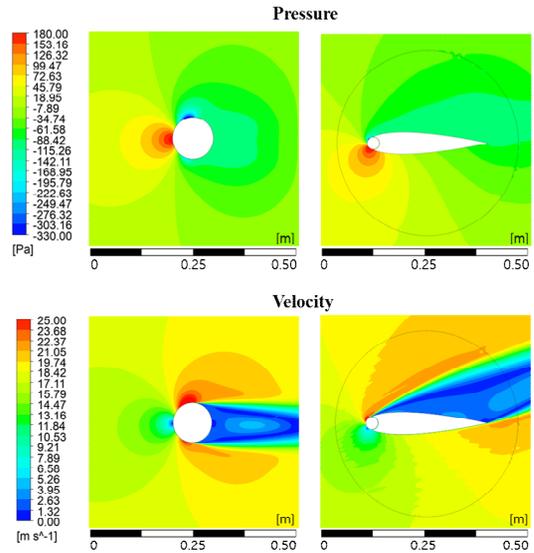


Fig. 6. Pressure and velocity contours of cylinder and rotating airfoil at $u = 17.6$ m/s and $u_c / u = 0.2$

라 압력의 최대값과 최저값의 범위가 극대화된 것을 확인할 수 있다. 속도 등고면의 경우, 저 레이놀즈 수와 달리, 실린더 주위의 고속 영역이 상부뿐만 아니라 하부까지 확장되었고, 저속의 와류 구역이 좁아지는 현상을 관찰할 수 있다. 회전 익형에서는 유입 속도의 영향이 더 커지면서, 그림 5에 비해 유동 박리가 더 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 논의

본 연구에서는 다양한 직경과 u_c / u 를 가진 실린더를 $u = 1.76$ m/s, 8.83 m/s, 17.6 m/s에서 회전 익형과 비교하여 공력 성능을 평가하였다. 공력 성능 평가에는 실린더와 회전 익형의 F_L , 생산 동력 등이 사용되었다. 또한 양력 생성 대비 동력 소비를 정량적으로 평가하기 위해 이에 대한 무차원 수인 $F_L u / P$ 로도 비교를 진행하였다.

1. $u = 1.767$ m/s에서 회전 실린더는 마그누스 효과에 의해 F_L 를 발생시키며 $u_c / u = 1$ 일 때 15 cm 실린더와 회전 익형의 F_L 는 각각 0.439과 0.628로 회전 익형이 약 1.4배 높은 F_L 을 발생하였고 생산 동력 또한 약 3.36배 크다.

이러한 이유는 회전 익형은 익형 형상의 특성으로 인해 유동 박리가 지연되며 F_D 가 감소하고, 효율적으로 양력을 생성할 수 있다. 그 결과, 회전 익형은 회전 실린더에 비해 약 7.1배의 더 높은 $F_L u / P$ 를 가지며 $u = 1.767$ m/s에서 상대적으로 우수한 에너지 효율을 유지하였다.

2. $u = 8.83$ m/s에서는 26.5 cm 이상의 실린더가 F_L 에서 우위를 보였으나, 동력 소모와 $F_L u / P$ 측면에서 회전 익형이 모든 직경의 실린더에 비해 상대적으로 우수하였다. 7.5 cm 직경의 실린더는 회전 익형보다 더 낮은 F_L 을 도출하였지만, 동력 부분에서는 약 1.9배 더 소모되었다. 이를 통해 회전 익형이 다양한 유동 조건에서 실린더보다 우수한 공력 효율을 보이며, 실질적인 공력 응용에서 더 적합한 선택일 수 있음을 확인하였다.

3. $u = 17.6$ m/s에서는 회전 실린더와 회전 익형의 성능 차이가 더욱 두드러지게 나타난다. 회전 실린더의 경우 고속 조건에서 유동이 급격히 난류로 발달하며, 실린더 주위에서 발생하는 와류와 넓은 박리 영역으로 인해 F_D 가 크게 증가한다. 이로 인해 실린더는 $u = 17.6$ m/s에서 높은 F_L 를 유지할 수 있지만, F_D 역시 크게 증가하여 생산 동력이 크게 증가하면서 에너지 효율이 크게 저하된다. 반면, 회전 익형은 $u = 17.6$ m/s에서도 유동 박리가 지연되고, F_D 증가가 상대적으로 적다. 이에 따라 회전 익형은 고속 조건에서도 높은 $F_L u / P$ 를 유지하며 실린더에 비해 에너지 효율이 훨씬 뛰어난 공력 성능을 보여준다.

이러한 결과는 회전 익형이 회전 실린더보다 동력 소모와 공력 효율 면에서 우수함을 보여주며, 특히 항공기나 선박과 같은 에너지 효율이 중요한 응용 분야에 적용할 경우, $F_L u / P$ 의 향상과 에너지 효율 향상으로 이어질 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

REFERENCES

- 1) Friedman, A., 2024, "The International Maritime Organization's Revised Greenhouse Gas Strategy: A Political Signal of Shipping's Regulatory Future." *The International Journal of Marine and Coastal Law*, Vol. 1, pp. 1~27.
- 2) MEPC, R., 2023 "2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships."
- 3) Pan, X., Liu, J., Lee, C. T., and Pan, X., 2024. "Technological innovations for sustainable transformation towards carbon neutrality." *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 31, pp. 41480~41481.
- 4) Nuttall, P., and Kaitu'u, J., 2016 "The magnus effect and the flettner rotor: Potential application for future oceanic Shipping." *The Journal of Pacific Studies*, Vol. 36(2), pp. 161~182.
- 5) Angelini, G., Muggiasca, S., and Belloli, M., 2023, "A Techno-Economic Analysis of a Cargo Ship Using Flettner Rotors." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11(1), p. 229.
- 6) Vigna, V., and Figari, M., 2023 "Wind-assisted ship propulsion: Matching Flettner rotors with diesel engines and controllable pitch propellers." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11(5), p. 1072.
- 7) Formosa, W., Sant, T., De Marco Muscat-Fenech, C., and Figari, M., 2023 "Wind-assisted ship propulsion of a series 60 ship using a static kite sail." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11(1), p. 117.
- 8) Jang, S.H., Bae, S.J., Baddegamage, B.H.B.P.D., and Yoon, M., 2024, "Study of flow characteristics of a rotating airfoils in tandem." *Proceedings of the 13th National Conference of Korea Fluid Engineering*, Vol. 13(1), p. 205.
- 9) Zhang, Y. Y., Huang, D. G., Sun, X. J., and Wu, G. Q., 2010 "Exploration in optimal design of an airfoil with a leading edge rotating cylinder." *Journal of Thermal Science*,

- Vol. 19, pp. 318~325.
- 10) Karnan, C. M., Thanikachalam, V., Rajesh, M., and Anbazhahan, K., 2018 “A review of flettner rotor sails.” *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*, Vol. 6(4), pp. 561~565.
 - 11) Guzelbulut, C., and Suzuki, K., 2023 “Optimal Design of Rotor Sails Based on Environmental Conditions and Cost.” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12(1), p. 31.
 - 12) Seo, E. B., Jang, S. H., and Yoon, M., 2024, “Aerodynamic Performance of Rotating Cylinders with Varying Diameter and Speed Ratio.” *Proceedings of the 13th National Conference of Korea Fluid Engineering*, Vol. 13(1), p. 205.
 - 13) Wilcox, D. C., 1998 “Turbulence Modeling for CFD.” DCW industries, La Canada.
 - 14) Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J., 1995 “A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows.” *Computers & Fluids*, Vol. 24(3), pp. 227~238.
 - 15) Menter, F. R., 1994 “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.” *AIAA Journal*, Vol. 32(8), pp. 1598~1605.
 - 16) Modi, V. J., 1997 “Moving surface boundary-layer control: a review.” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 11(6), pp. 627~663.
 - 17) Karabelas, S. J., 2010 “Large eddy simulation of high-Reynolds number flow past a rotating cylinder.” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31(4), pp. 518~527.