

로터 세일의 표면 형상과 조도 변화에 따른 마그누스 효과에 관한 실험연구

김영진·황재연·안병권[†]
충남대학교 자율운항시스템공학과

Experimental Study on the Effects of Surface Shape and Roughness on the Magnus Effect of Rotor Sails

Young-Jin Kim·Jae-Yeun Hwang·Byoung-Kwon Ahn[†]
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University

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.

In this study, we devised methods to enhance the efficiency of rotor sails which have been applied as one of the energy saving devices of ships. The idea of the study originated from the notion that installing protrusions or increasing the surface roughness on the smooth surface of the rotor sail could delay the separation of the incoming wind flow and consequently increase the lift force. Five cylinder models were considered and tested in an open-type wind tunnel at Chungnam National University. A smooth surface cylinder exhibits the highest lift-to-drag ratio at a specific Reynolds number, and as the Reynolds number increases this value decreases sharply. The variation in this typical Magnus force can be significantly improved by altering the surface shape and roughness of the rotor sail. It has been observed that increasing the surface roughness improves the lift characteristics, resulting in increased efficiency. Furthermore, it revealed that the reverse Magnus effect which may occur during actual operation in the low spin ratio region can be significantly enhanced.

Keywords : Energy Saving Device(ESD, 에너지절감장치), Rotor sail(로터 세일), Magnus effect(마그누스 효과), Lift-drag ratio(양항비)

1. 서론

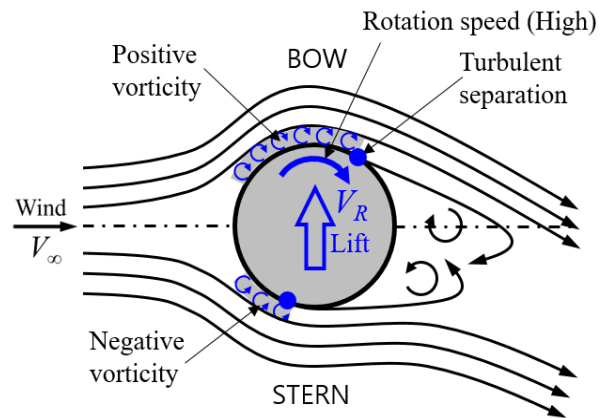
지구 온난화의 영향으로 다양한 사회적 문제가 지속적으로 증가하고 있으며 인류의 지속 가능한 성장과 탄소 저감을 위해 세계 경제는 2020년을 기점으로 저탄소 경제체제에서 무탄소 경제체제로 급격히 변화하고 있다 (Park et al., 2019). 국제해사기구(IMO)도 온실가스 감축 전략(GHG)에 따라 해운 분야의 환경규제를 강화해 왔으며 이에 대응하여 선박의 운항효율 향상을 위한 미찰저항 감소, 고효율 추진기, 에너지절감장치(Energy Saving Device, ESD), 대체 연료 등 다각적인 기술이 연구 개발되고 있다.

최근 선박 추진력의 보조 수단으로 윈 세일(wing sail), 카이트 세일(kite sail), 로터 세일(rotor sail) 등 해상 풍력에너지를 활용하여 운항효율을 향상시킬 수 있는 기술들이 활발히 연구 개발되고 있다. 이 중 로터 세일은 유체역학적으로 잘 알려진 마그누스 효과(Magnus effect)를 이용하는 것으로, 회전하는 원통형 기둥

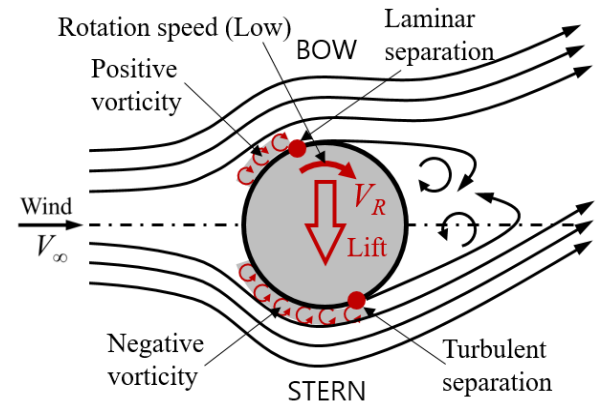
주변에 압력차를 만들어 발생하는 양력을 추진력으로 활용하는 장치이다. 로터 세일은 다른 ESD와는 달리 설치가 상대적으로 쉽고 비용이 적게 들며 결과적으로 연비를 5~10 %까지 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Anemoi Marine, 2015). 독일의 엔지니어인 Anton Flettner가 1922년 마그누스 효과를 활용하여 Flettner 로터, 즉 현재의 로터 세일 장치를 가장 먼저 개발하였고, 1924년 Buckau호에 높이 15 m, 직경 3 m의 로터 세일 2개를 적용하였다. 이는 최초의 로터 세일을 적용한 선박이었으며 기존 보조 추진장치로 사용하던 돛과 관련 장비보다 5배 정도 가벼웠고 운항속도를 30 % 이상 향상시킬 수 있었다 (Peter and John, 2016). 2013년 독일의 풍력 터빈 제조사인 Enercon은 4개의 로터 세일을 보조 추진장치로 사용하는 E-ship1호를 개발한 바 있으며, 동일 크기의 기존 화물선에 비해 평균 25 %의 전체 연료절감 효과가 있음을 보고하였다 (Enercon wind company, 2013). 2018년 영국의 Anemoi사는 64,000 DWT급 벌크선인 MV Afros

호에 로터 세일 4기를 설치하여 상용화에 성공했으며 핀란드의 Norsepower사 역시 로터 세일 상용화에 사업을 전개 중이다. 국내에서도 로터 세일 적용을 위한 기초 기술 및 실증 단계의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

친환경 선박의 보조 추진장치로 로터 세일이 다시 주목받게 되면서 특히 세일의 최적 형상과 크기, 적용 유속 범위 등과 관련한 다양한 연구가 수행되고 있다. Badalamenti and Prince (2008)은 원형 실린더의 공기역학적 특성과 끝단에 설치된 끝 단판(end plate)의 크기에 따른 양력 및 항력의 상관관계를 평가하기 위해 $1.6 \times 10^4 \leq Re \leq 9.5 \times 10^4$ 범위의 풍동실험 연구를 수행하여 적정 크기의 끝 단판은 양력을 크게 향상시켜 결과적으로 양항비를 증가시킨다는 것을 확인하였다. 원형 실린더는 레이놀즈 수(유입 풍속과 실린더의 직경으로 정의됨)에 따라 양항력 특성이 달라지며 특히 2×10^5 부근에서 난류의 발달로 인해 항력 계수가 급격하게 낮아지기 때문에 이보다 낮은 레이놀즈 수 영역을 아임계(sub-critical) 유동영역, 높은 영역은 초임계(super-critical) 유동영역으로 구분한다. Bordogna et al. (2019)은 일련의 풍동실험을 수행하여 레이놀즈 수 변화에 따른 로터 세일의 공기역학적 특성에 대한 연구를 통해 로터 세일의 양력계수는 유입 풍속과 로터의 회전속도의 비율로 정의되는 속도비(Spin Ratio, SR) 2.5 이하에서 레이놀즈 수의 영향을 크게 받으며 초임계 유동영역에서는 그 영향이 미미하다는 것을 확인하였다. 또한 로터 세일의 속도비와 상대적 위치에 따른 특성을 평가하여 두 개의 로터 세일을 바람 방향과 일치하는 일렬로 배치할 때 상호작용이 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다 (Bordogna et al., 2020). 수치해석적 연구들은 로터 세일의 속도비, 세일의 종횡비(Asspect Ratio, AR), 끝 단판의 유무에 따라 작용하는 힘과 주위의 유동 특성을 분석한 연구가 주류를 이루고 있다. Kim et al. (2022), Kwon et al. (2022)은 로터 세일의 주요 설계 인자는 속도비와 종횡비이며 그 비율이 증가함에 따라 양력계수도 비례하여 증가하며, 끝 단판이 있는 경우 양력이 최대 7배 정도 증가한다는 것을 보였다. 특히 속도비가 1인 영역에서는 작은 끝 단판을, 그 이상의 속도비에서는 큰 끝 단판을 사용하는 것이 항력을 줄이는데 더 효과적이며, 끝 단판이 없는 로터 세일은 속도비가 증가함에 따라 후류의 와류강도가 높아지며 속도비가 1일 때는 와류의 박리현상이 뚜렷하게 나타나며 2보다 클 때는 준 정상 상태가 됨을 보였다. Muto et al. (2011)은 회전하는 3차원 구를 대상으로 수치해석을 수행하여 특정 속도로 회전할 때 임계 레이놀즈 수 영역에서 유동 박리점의 변화에 따라 역방향의 마그누스 힘이 발생함을 보였다. 로터 세일은 마그누스 힘을 선박의 추력으로 최대한 활용할 수 있어야 한다. 즉, Fig. 1(a)와 같이 선박의 진행 방향과 동일한 방향으로 최대한 높은 양력이 발생하도록 하여야 한다. 회전하는 실린더에서 발생하는 양력 성능은 상대 속도가 빠른 면과 느린 면에서의 유동 박리 특성과 직결되어 있다. 하지만 임계 레이놀즈 범위에서 실린더의 회전속도가 일정 수준 이하이거나 속도비가 낮은 구간, 즉 회전속도보다 풍속이 지배적일 때 Fig. 1(b)와 같이 층류 박리(laminar separation)가 형성되어 역방향으로 마그누스 힘이 작용할 수도 있기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.



(a) Positive Magnus effect



(b) Negative Magnus effect

Fig. 1 Separation point and Magnus force

본 연구는 최근 들어 다시 주목받고 있는 로터 세일의 효율을 향상시킬 수 있는 방법을 고안하고 풍동 모형실험을 통해 성능 특성을 평가할 목적으로 수행되었다. 현재 일반적으로 사용되는 로터 세일은 중량 감소를 위해 탄소강화섬유로 제작된 표면이 매끈한 원통형 관을 사용하고 있다. 본 연구는 매끈한 표면에 돌기를 설치하여 형상을 변화시키거나 표면의 조도를 증가시키면 유입 유동의 박리를 지연시켜 결과적으로 양력을 증가시킬 수 있을 것이라는 아이디어에서 출발하였다. 표면이 매끄러운 원형 실린더를 기준으로 축 방향으로 긴 돌기가 각각 2개, 4개 부착된 두 종의 실린더와 표면 조도를 증가시킨 두 종의 실린더를 포함하여 총 5종의 실린더 모형을 대상으로 개방형 풍동에서 모형실험을 수행하고 발생하는 마그누스 힘의 특성을 비교, 분석하였다.

2. 실험 장치 및 조건

실험은 충남대학교의 개방형 풍동(Fig. 2)에서 수행되었다. 시험부 단면은 820 mm × 250 mm(H × B), 길이는 400 mm이며 최대 풍속은 35 m/s이다. 터널 내부의 압력 범위는 64.64 Pa ~ 748.29 Pa이며, 터널 벽면의 경계층 영향을 줄이기 위해 시험 부로부터 0.1 m 떨어진 곳에서 모형을 위치시켰고 별도의 하부

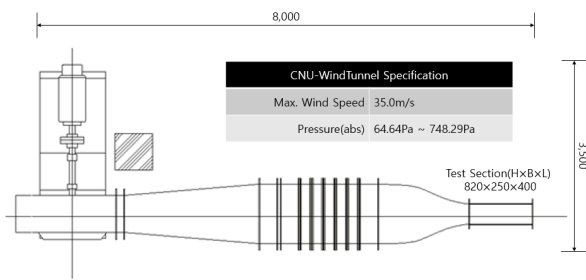


Fig. 2 CNU Wind Tunnel

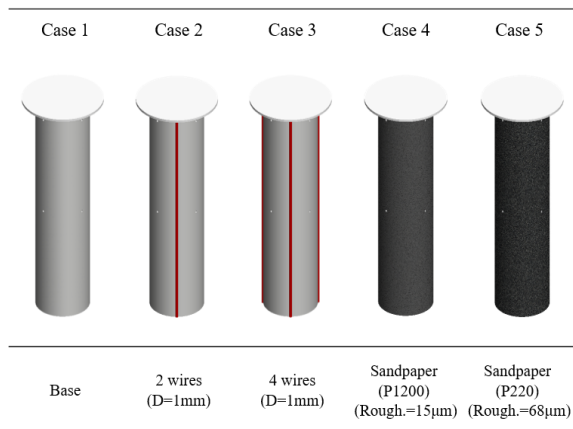


Fig. 3 Test models

구조물로 분력계와 로터 세일 모형을 지지할 수 있도록 설계하였다.

실험에 사용된 원형 실린더는 지름 80 mm, 높이 160 mm로 아크릴로 제작하였으며 끝 단판의 지름은 실린더의 1.5배로 고정하였다. 표면이 매끈한 모델을 Case 1로 지정하고 실린더의 축 방향으로 직경 1 mm 와이어 두 줄을 180도 간격으로 설치한 Case 2, 90도 간격으로 4줄을 설치한 Case 3, 표면 조도가 15 µm인 사포(P1200)를 부착한 Case 4, 68 µm(P220)를 부착한 Case 5로 명명하고 발생하는 유체력 특성을 평가하였다(Fig. 3 참조).

실험 장치는 Fig. 4와 같이 실린더, 중앙 디스크, 모터, 스트

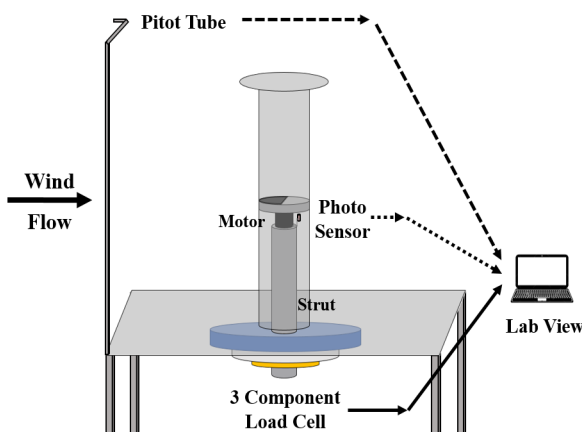


Fig. 4 Schematic view of the test-setup

럿으로 구성하였으며 실린더가 높은 RPM으로 회전할 때 구조적 안정성과 편심의 발생을 최소화하기 위해 두께 10 mm인 속이 빈 형태로 제작하였다. 실린더의 75 mm의 위치에 모터와 연결되는 중앙 디스크를 두었으며 분력계와 연결되는 스트럿은 알루미늄으로 제작하였다. 모터는 T-MOTOR사의 AT2308KV2600 모델을 사용하였으며 보통의 BLDC 모터와는 다르게 축이 아닌 모터의 실린더가 직접 회전하는 방식으로 높은 RPM에서도 안정적인 특성이 있다. 유입 풍속은 피토관(Pitot tube)을 사용하여 측정하였으며, 실린더 안쪽에 부착된 포토센서(photo sensor)를 이용하여 회전수를 측정하였다. 작용하는 유체력은 자체 설계하여 제작한 3분력계를 사용하여 측정하였고, 실험은 총 3회에 걸쳐 동일 조건에서 반복 수행하였다.

실린더에 작용하는 마그누스 효과에 의한 유체력 특성은 실린더의 회전속도와 유입 풍속의 속도비를 기준으로 평가하였다.

$$SR = \frac{V_R}{V_\infty} \tag{1}$$

$$V_R = RPM \times \frac{2\pi r}{60} \tag{2}$$

여기서 V_∞ , V_R , r 은 각각 유입 풍속과 실린더의 회전속도, 실린더의 반지름을 의미한다.

본 실험에서는 로터 세일의 회전수를 2,500 RPM으로 고정하고 풍속을 5 ~ 30 m/s까지 증가시키면서 속도비를 조절하였으며, 이때 속도비의 범위는 0.35 ~ 2.10, 레이놀즈 수의 범위는 아임계유동 범위인 $2.7 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$ 이다(Table 1 참조).

원형 실린더에 작용하는 양력 및 항력은 실린더의 정면 면적(A)으로 무차원화하여 평가하였으며, 여기서 공기의 밀도(ρ)는 1.224 kg/m^3 , 점성계수(μ)는 $1.785 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A} \tag{3}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A} \tag{4}$$

$$Re = \frac{\rho V_\infty d}{\mu} \tag{5}$$

Table 1 Test conditions

Flow speed [m/s]	5 ~ 30
Model RPM [RPM]	2,500
Spin Ratio	0.35 ~ 2.10
Reynolds number	$2.7 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$

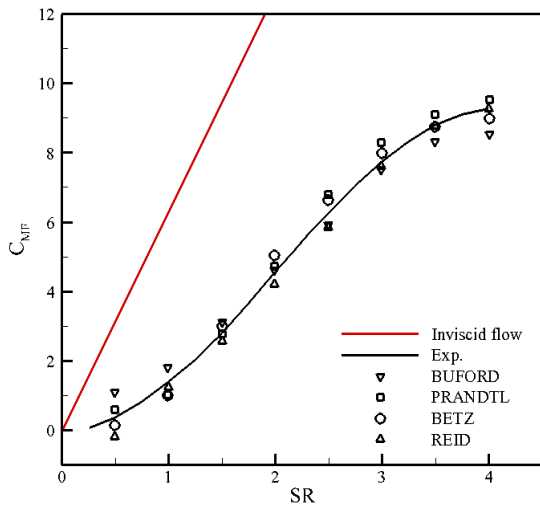


Fig. 5 Magnus force coefficient (Buford, 1954)

Buford (1954)는 Fig. 5의 실험연구를 통해 로터 세일과 같이 단면의 반경이 r 인 2차원 원형인 물체의 표면을 흐르는 점성 유동의 순환(circulation) 속도(V_C)와 마그누스 힘계수(C_{MF})의 관계식을 아래 식과 같이 정의하였다.

$$\Gamma = 1.6\pi r V_C \quad (6)$$

$$F_L = \rho V_\infty \Gamma = \rho V_\infty 1.6\pi r V_C \quad (7)$$

$$C_{MF} = \frac{F_L}{0.5\rho V_\infty^2 d} = 1.6\pi \frac{V_C}{V_\infty} \quad (8)$$

3. 결과 분석

먼저, 최대 회전수 조건에서 유입 풍속의 변화(레이놀즈 수 변화)에 따른 항력 및 양력 특성을 평가하였다. Fig. 6은 항력계수로 5종 모두 레이놀즈 수가 증가할수록 항력계수가 낮아지는 일반적인 항력계수의 특성을 확인할 수 있다. 표면 조도에 변화를 준 Case 4와 5의 경우 매끄러운 표면(Case 1)과 비교하여 낮은 레이놀즈 수 영역에서 항력계수가 낮게 예측되었으며, 이는 유입 유동의 박리점이 후류로 더 이동함으로써 압력 항력이 감소하는 효과가 있음을 알 수 있다. 돌기를 설치한 Case 2, 3의 항력은 전체 구간에서 동일한 경향성을 보이며 매끈한 표면과 비교하여 다소 높게 예측되었으며, 축 방향으로 설치된 돌기는 항력을 증가시킨다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 양력계수로 매끈한 표면의 경우 유입 풍속 20 m/s (레이놀즈 수 1.1×10^5) 조건부터 양력계수가 0으로 수렴하는 특징을 보였다. 상대적으로 낮은 풍속 (레이놀즈 수 5×10^4)에서 Case 2를 제외하고 모든 경우 양력값은 크게 증가하였다. Fig. 8은 전체 시험조건에서의 양항비를 보여준다. 먼저 매끈한 표면의 실린더는 특정 레이놀즈 수에서 최대 양항비가 나타나며 레이놀즈 수가 증가할수록 그 값이 감소하

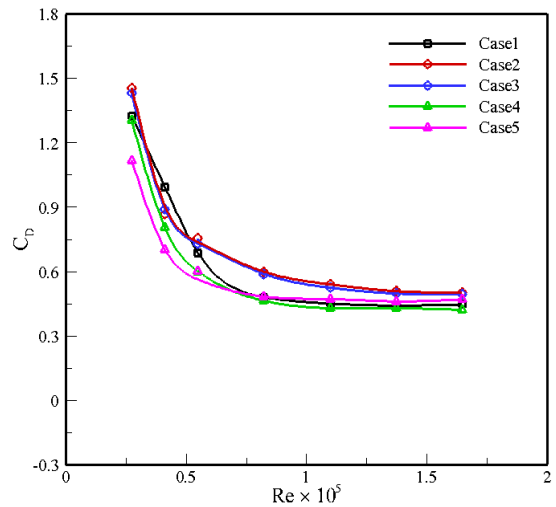


Fig. 6 Drag coefficient vs Re

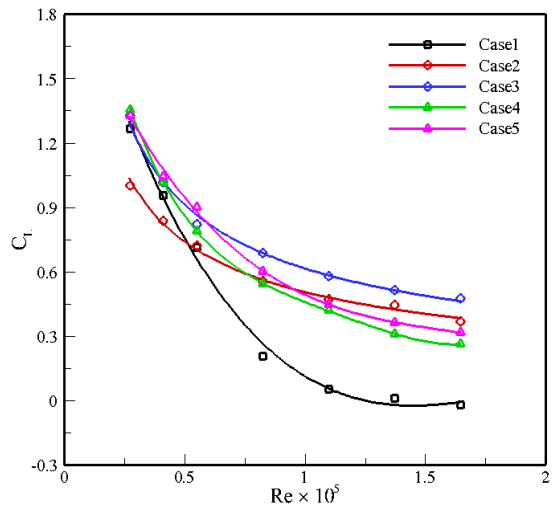


Fig. 7 Lift coefficient vs Re

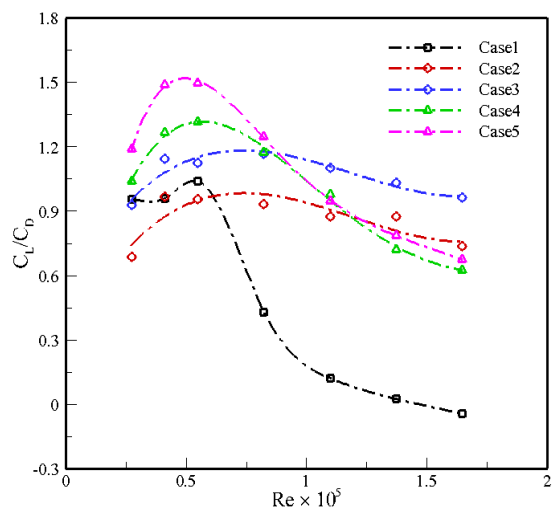


Fig. 8 Lift and drag ratio vs Re

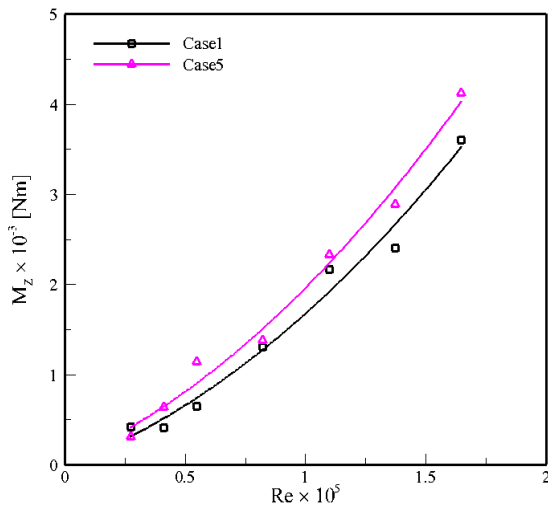


Fig. 9 Comparison of moments

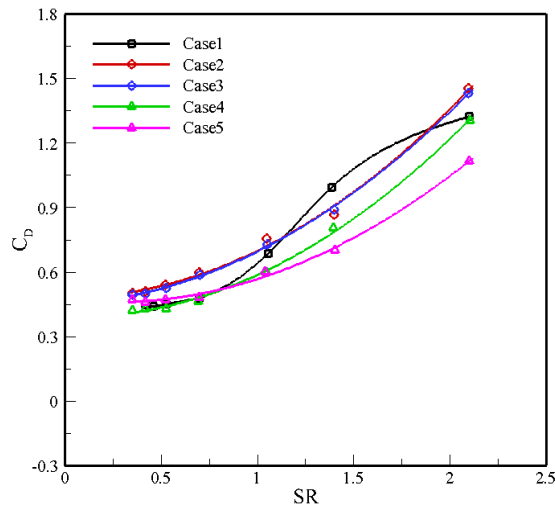


Fig. 10 Drag coefficient vs SR

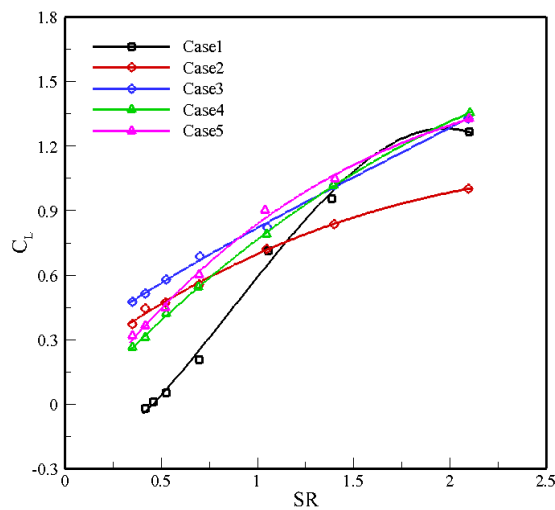


Fig. 11 Lift coefficient vs SR

는 특성을 보였다. 이는 로터 세일에서 나타나는 전형적인 마그누스 효과의 특성으로 표면 형상과 조도를 변화시키면 그 특성이 매우 크게 개선될 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 비교 대상 모델 중 Case 5가 가장 높은 양항비 특성을 보였으며, Case 2와 3의 경우 최대 양항비 이후 유입 풍속이 증가하더라도 일정한 수준의 양항비가 유지되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9은 동일 조건에서 가장 큰 양항비를 보이는 Case 5의 모멘트를 Case 1과 비교한 결과로 서로 비슷한 값과 유사한 경향을 보였으며, 이는 표면 조도의 증가로 인해 로터 세일의 동력 특성과 편심력 유발에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 속도비 변화에 따른 로터 세일의 양항력 특성을 평가하였다. Fig. 10은 항력계수로 매끄러운 표면의 로터 세일의 경우 속도비가 커짐에 따라 제곱에 비례하여 증가하다가 일정 값 이상에서는 증가비율이 역전되는 경향으로 나타나지만 표면 돌기와 조도가 다른 세일의 경우 2차식 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. Case 2와 3의 경우 거의 비슷한 수준의 항력이 작용하며, 표면 조도가 큰 Case 5의 경우 가장 낮은 항력이 작용함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 증가된 표면 조도는 유입 유동의 박리점을 후류 방향으로 이동시켜 입력 항력을 감소시키기 때문인 것으로 설명할 수 있다. Fig. 11은 양력계수를 보여주며 모든 경우 속도비 1.5 이하 구간에서 양력값이 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 양항비를 비교한 결과로 앞서 유입 풍속의 변화에 따른 결과와 마찬가지로 특정 속도비에서 최대 양항비 값을 가지며, Case 5의 경우 가장 좋은 특성을 보였다. 즉 표면 조도의 증가는 유입 유동의 박리 특성을 개선하여 입력 항력을 줄이고 양력을 증가시켜 결과적으로 마그누스 효과를 개선한다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 13 참고). 또한 4개의 표면 돌기를 설치하는 경우 매끄러운 표면의 로터 세일과 유사한 수준의 최대 양항비 값을 가지며 속도비가 증가하여도 양항비 값이 일정하게 유지되는 특성이 있음을 알 수 있다.

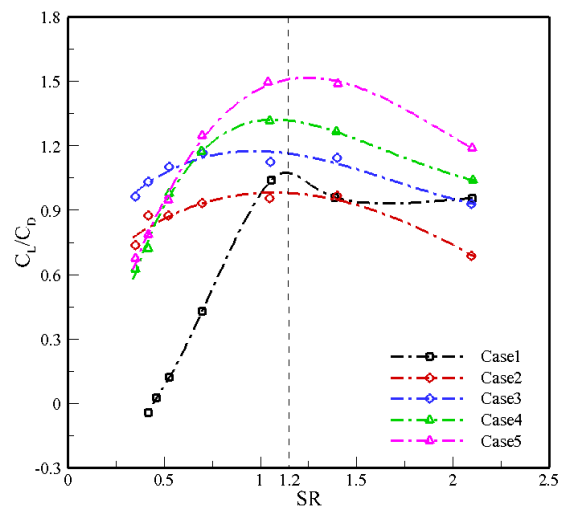


Fig. 12 Lift and drag ratio vs SR

Fig. 14는 식 (8)에서 정의한 마그누스 힘계수(C_{MF})를 비교한 결과로 역방향 마그누스 힘은 속도비가 0.5보다 작은 구간에서 발생한다고 알려져 있으며 (Muto et al., 2011), 본 연구에서도 표면이 매끈한 로터 세일의 경우 0.45보다 낮은 속도비 구간에서 역방향 마그누스 힘이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 돌기를 설치한 경우와 표면 조도를 증가시킨 세일의 경우 낮은 속도비 영역에서 역방향 마그누스 힘이 작용하지 않을 뿐만 아니라 힘계수의 값도 매우 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 13서 보여주는 바와 같이 세일 표면의 변화와 표면 조도의 증가는 양의 와류를 증가시켜 층류 박리점을 후류 방향으로 이동시켜 결과적으로 압력 항력이 줄어들고 양력이 증가하여 마그누스 효과를 증가시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 15는 SR이 1 이하인 영역에서의 마그누스 힘계수(C_{MF})를 Buford (1954)의 실험과 비교한 결과로, 표면 조도를 증가시켜 역

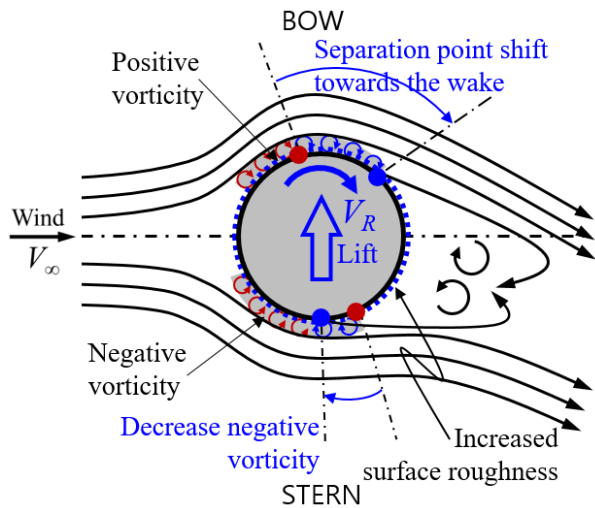


Fig. 13 Improved Magnus effect by increasing surface roughness

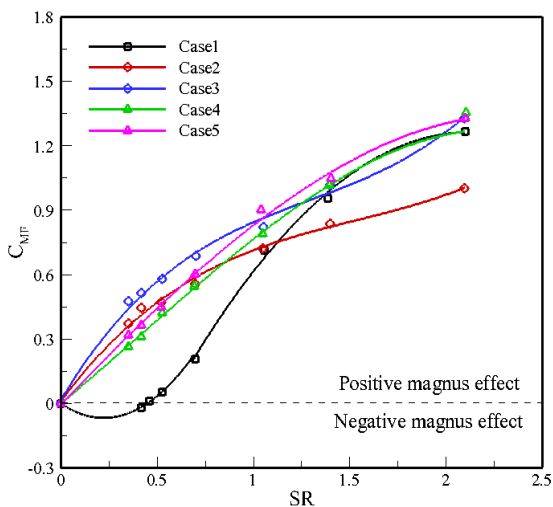


Fig. 14 Magnus force coefficient vs SR

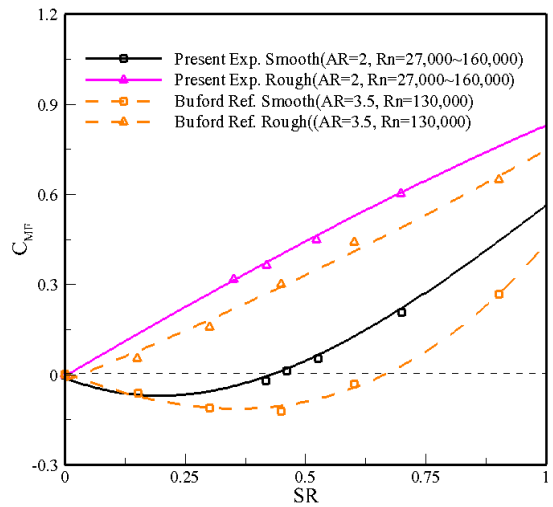


Fig. 15 Comparison of improved negative Magnus effects

방향 마그누스 힘의 발생을 방지할 수 있음을 보여준다. 본 실험에서는 RPM을 고정하고 풍속을 변화시키며 속도비를 조절하였고 Buford는 풍속을 고정하고 RPM을 변화시키며 속도비를 조절하였다. Buford의 실험모형은 종횡비 3.5를 사용하였으나 레이놀즈 수가 상대적으로 작아 본 연구의 실험모형보다 작은 마그누스 힘 계수를 보인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 최근 들어 다시 주목받고 있는 로터 세일의 매끈한 표면에 돌기를 설치하거나 표면 조도를 높여줌으로써 마그누스 효과를 향상시킬 수 있음을 풍동 모형시험을 통해 실증하였다. 실전에서 로터 세일이 운용되는 풍속 조건과 로터의 회전수 범위를 고려하여 속도비를 상사시켜 작용하는 양력과 항력을 계측하여 마그누스 효과를 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 유입 풍속의 변화(레이놀즈 수 변화)에 따라 로터 세일에 작용하는 항력 및 양력 특성의 변화는 마그누스 효과와 직결된다. 매끈한 표면의 실린더는 특정 레이놀즈 수에서 최대 양항비를 가지며 레이놀즈 수가 증가할수록 그 값이 급격하게 감소한다. 이러한 전형적인 마그누스 힘의 변화는 로터 세일의 표면 형상과 조도를 변화시키면 그 특성을 매우 크게 개선할 수 있다는 것을 확인하였다. 비교 대상 모델 중 표면 조도를 거칠게 하는 경우 전체 풍속 구간에서 양항비가 높아지며, 표면에 돌기가 있는 경우 최대 양항비 이후 유입 풍속이 증가하더라도 일정한 수준의 양항비가 유지된다는 것을 확인하였다.
- 속도비 증가에 따른 양항력 특성을 평가한 결과 매끄러운 표면의 로터 세일의 항력은 3차식 특성으로 나타내며, 표면 돌기와 조도가 다른 세일의 경우 2차식 특성을 갖는다.

특히 표면 조도의 변화는 유입 유동의 박리점을 이동시켜 낮은 항력이 작용하며 결과적으로 양항력 특성이 개선된다는 것을 확인하였다.

- 무엇보다 낮은 속도비 구간에서 발생할 수 있는 역방향 마그누스 효과를 크게 개선할 수 있음을 보였다.
- 실선의 로터 세일은 마그누스 효과를 극대화하는 것과 더불어 구조적 안정성과 진동 특성이 중요하다. 일반적인 로터 세일의 유입 풍속은 30m/s 이하이며 이를 고려한다면 표면 형상의 변화보다는 표면 조도를 증가시키는 것이 로터 세일의 효율을 효과적으로 높일 수 있는 방안이라 판단되며, 최근 건축구조물의 표면을 거칠게 할 수 있는 다양한 종류의 가벼운 발포 재료들이 많이 개발되어 있어 이를 이용하면 로터 세일의 중량을 거의 증가시키지 않고 표면 조도를 높여 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0017006, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)과 KTTC 실험유체역학 컨테스트의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

Anemoi Marine, 2022. *Anemoi-Marine-Technologies-Brochure*, URL: <http://www.anemoimarine.com>

Badalamenti, C. and Prince S.A., 2008. Effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow, *28th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 18–21 August 2008.

Bordogna, G., Muggiasca, S., Ginappino, S., Belloli, M., Keuning, J.A., Huijsmans, R.H.M. and van't Veer, A.P., 2019. Experiments on a flettner rotor at critical and supercritical reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188, pp.19–29.

Bordogna, G., Muggiasca, S., Ginappino, S., Belloli, M., Keuning, J.A. and Huijsmans, R.H.M., 2020. The effects of the aerodynamic interaction on the performance of two flettner rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 196, 104024.

Buford, W.E., 1954. *Magnus effect In the case of rotating cylinders and shell*. MEMORANDUM Report No. 821.

Enercon Wind Company, 2013. Enercon E-ship 1 wind hybrid commercial cargo ship. *4th Conference on Ship Efficiency*, Hamburg, Germany, 23–24 September 2013.

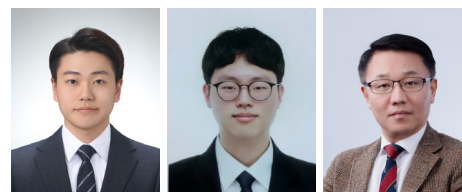
Kim, J.E., Cho, D.H. and Lee, C.Y., 2022. Numerical analysis study on the turbulent flow characteristics around the rotor sail for vessels. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 28(4), pp.648–656.

Kwon, C.S., Yeon, S.M., Kim, Y.C., Kim, Y.G., Kim, Y.H and Kang, H.J., 2022. A parametric study for a flettner rotor in standalone condition using CFD. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, pp.1–11.

Muto, M., Watanabe, H., Tsubokura, M. and Oshima, N., 2011. Negative magnus effect on a rotating sphere at around the critical Reynolds number. *Journal of Physics: Conference Series*, 318, 032021.

Park, H.S., Ha, S.Y. and Park, S.W., 2019. *International Maritime Organization(IMO), 40% greenhouse gas by 2030 Reduction target, new propulsion fuel(fossil fuel-OUT) means development and use*. KMI trend analysis Report Vol. 137.

Peter, N. and John, K., 2016. The magnus effect and flettner rotor: potential application for future oceanic shipping, *Journal of Pacific Studies*, 36(2), pp.161–182.



김영진

황재연

안병권