



# 로터 세일의 형상 변화에 따른 공력학적 성능 비교

우재홍·송지수<sup>†</sup>  
국립한국해양대학교 조선해양시스템공학과

## Comparison of Aerodynamic Performance Based on the Geometric Variation in Rotor Sails

Jaehong Woo·Gisu Song<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean 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.

As global concerns over climate change grow, the shipping industry is facing increasing pressure to reduce carbon emissions. Although crucial for global trade, shipping contributes to approximately 3% of global greenhouse gas emissions. In response, the International Maritime Organization(IMO) established a "Net Zero" goal by 2050, intensifying the demand for eco-friendly shipping technologies. Among these, the rotor sail, which utilizes the Magnus effect to provide auxiliary thrust, has recently received significant attention. In this study, the aerodynamic performance of rotor sails with various design configurations is mainly discussed based on numerical simulations. Eight different rotor sail designs including telescopic model, convex and concave shapes were newly suggested from the base model of rotor sail. In this study, various performance parameters such as lift, drag, torque and energy efficiency were compared and discussed. Additionally, the drag of various geometries in the stationary state were also analyzed.

**Keywords** : Wind assisted ship propulsion(선박풍력보조추진), Rotor Sail(로터 세일), Appendage(부가물), CFD(전산유체역학)

### 1. 서론

전 세계적으로 기후 변화에 대한 우려가 커지면서 해운업계는 강력한 탄소배출 규제의 압박을 받고 있다. 해운업은 세계 무역의 90% 이상을 차지하는 중요한 산업이지만, 동시에 전 세계 탄소 배출량의 약 3%를 차지하는 주요 온실가스 배출원이다. 이러한 상황에서 국제해사기구(IMO)는 2050년까지 선박의 실질적 탄소 배출을 0으로 만드는 'Net Zero' 목표를 선언했다. 이에 따라 친환경 선박에 대한 수요가 급증하고 있으며, 연료 소비를 줄이고 추진 효율을 높이는 기술에 대한 관심도 많이 증가하고 있다. 이러한 기술 중 하나로 주목받고 있는 로터 세일(rotor sail)은 유체역학 현상으로 잘 알려진 매그너스 효과를 활용해 선박에 보조적인 추력을 제공하는 장치이다. 아래 Fig. 1은 실제 선박에 부착되어 현재 운용되고 있는 로터 세일을 나타내었다.

De Marco et al. (2014)는 속도비(SR, Spin ratio), 레이놀즈 수, 종횡비(aspect ratio), 로터 직경과 엔드플레이트 직경의 비(De/D)등 로터 세일의 주요 인자들의 변화에 따른 로터 세일의 유체역학적 성능 변화를 CFD로 분석했다. 이어서 De Marco et al. (2016)은 회전비, 종횡비, 로터 직경과 엔드플레이트 직경의

비 변화를 고려해 CFD 계산 결과를 바탕으로 Surrogate 모델을 사용해 로터 세일의 성능을 예측하는 연구를 진행했다. Garenaux et al. (2020)의 연구에서는 로터 세일 단독일 때와 데크 위에 위치할 때의 차이, 그리고 데크 위에 3개의 로터 세일이 있을 때의 성능 변화, 또한 선박으로 불어오는 바람이 균일 유동(uniform flow)일 때와 대기 경계층 프로파일(atmospheric boundary layer profile)일 때의 성능 변화를 CFD로 분석했다. G. Bordogna et al. (2020)은 풍동실험을 임계 레이놀즈수까지 진행하고, 레이놀즈수에 따른 로터 세일의 성능 변화를 분석했다. Kwon et al. (2022)은 풍동실험 결과와 비교하여 로터 세일을 CFD로 해석할 때 해석 기법에 따른 차이를 분석하였고, 설계 변수에 따른 로터 세일의 성능 변화를 분석하였다. Kim et al. (2023a)는 CFD를 통해 단독상태 로터 세일부터 2개, 4개일 때까지 해석하여



Fig. 1 Rotor sails installed on the VLOC  
(Source: Hakirevic Prevljak, 2025)

로터 세일 개수와 위치에 따른 상호작용과 성능 변화를 연구했다. Kim et al. (2023b)는 로터 세일 표면의 조도 변화에 따른 성능 변화를 풍동실험으로 분석했으며, Park et al. (2024)는 중소형 선박을 위한 비대칭 수직 접이식 로터 세일 모델을 고안하여 CFD로 성능을 예측했다. 이처럼 로터 세일의 성능을 분석하기 위한 CFD 기반의 연구와 풍동실험, 기본 설계 변수에 관한 연구가 꾸준히 진행되어져 왔지만, 로터 세일의 형상 변경이나, 로터 세일에 부가물이 부착되었을 때의 성능 변화를 연구한 사례는 충분하지 않다. 로터 세일 기술의 발전과 성능향상을 위해서는 다양한 형상의 로터 세일에 대한 체계적인 연구도 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 형상적 특성을 가지는 로터 세일을 설계하고, 수치해석을 수행한 후 그 결과를 바탕으로 유체역학적 성능을 평가하였다. 이를 통해 기존 로터 세일과 비교하여 성능 변화를 정량적으로 비교하였으며, 형상 변화가 양력, 항력, 에너지 효율 등 주요 성능 지표에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 기준 로터 세일 선정 및 수치해석 기법

### 2.1 기준 로터 세일 형상

본 연구에서는 기준 로터 세일과 비교하여 부가물과 형상 변화에 따른 효과를 중점적으로 다루기 위해 이미 검증된 연구 결과가 있는 선행 연구의 모델을 기준 형상으로 선정하고자 하였다. 본 연구에서 정의한 기준 로터 세일은 높이 0.947m, 지름 0.158m의 원형 실린더와 두께 0.005m, 직경 0.289m의 엔드플레이트로 구성되어 있는 모형 로터 세일이다. 이 모델은 Kwon et al. (2022) 연구에서 사용되었으며, Garenaux et al. (2020)의 풍동실험 결과값과 비교된 바 있다.

로터 세일을 다양한 회전 속도에서 분석하기 위해 유입류의 속도를 2.717m/s로 고정하고, 로터 세일의 회전 속도를 변화시켜 다양한 속도비에서 연구를 진행하였다. 여기서 속도비는 로터 세일로 불어오는 유입류 속도와 로터 세일의 회전 속도의 비율을 나타낸다. 로터 세일의 제원 및 물성치는 Table 1과 같다.

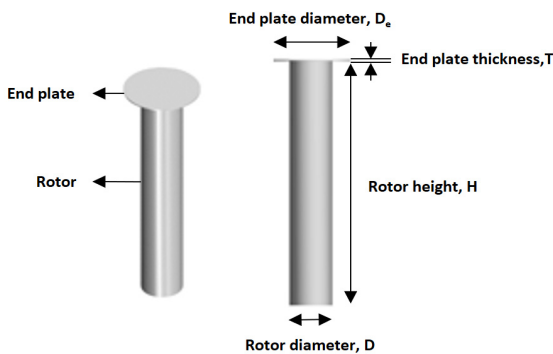


Fig. 2 Reference rotor sail dimension

Table 1 Reference model dimensions

Quantity	Symbol	Value	Unit
Rotor height	H	0.947	m
Rotor diameter	D	0.158	m
End plate thickness	T	0.005	m
End plate diameter	D <sub>e</sub>	0.289	m
Density of air	ρ <sub>air</sub>	1.184	Kg/m <sup>3</sup>
Dynamic viscosity of air	μ <sub>air</sub>	1.83E-05	Kg/(m·s)
Inflow velocity	U	2.717	m/s
Rotor speed	ω	0 ~ 172	Rad/s
Reynolds number	Re	2.74E+04	-
Spin ratio	SR	1~5	-

### 2.2 수치해석 기법 및 경계 조건의 정의

로터 세일의 공기역학적 성능을 분석하기 위해 유체 해석용 상용 코드인 STAR CCM+ Ver. 15.06을 사용하였다. 로터 세일 주변의 유동장은 3차원 비압축성 점성 유동으로 가정하였으며, 일정한 속도의 유입류와 회전 속도를 가진 로터 세일의 주변 유동장은 정상 상태로 가정하였다. 수치해석을 위한 지배 방정식은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였고, 유체의 운동량 전달을 계산하는 대류 항에는 유동의 상류 방향에 가중치를 두는 2차 상류 차분법을 적용하였다. 속도-압력 연계는 압력과 속도를 독립적으로 계산하여 연속 방정식을 만족할 때까지 반복 계산을 수행하는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다. 난류 모델은 선행 연구인 Kwon et al. (2022), De Marco et al. (2014)의 결과를 참고하여 K-ω SST 모델 (Menter, 1994)을 사용하여 계산하였다. 적용된 수치 기법은 Table 2에 정리하였다.

계산영역의 크기는 로터 세일의 직경 D를 기준 길이로 정의하였으며, 계산영역의 크기와 경계 조건은 아래 Fig. 3에 나타내었다. 특히 바닥 면의 경계 조건에 따라 로터 세일의 해석 결과가 달라질 수 있다는 점은 Kwon et al. (2022)와 Garenaux et al. (2020)의 연구에서 언급된 바 있다. 선행 연구에 따르면 로터 세일

Table 2 Numerical method

Subjects	Description
Tool	STAR-CCM+ Ver.15.06
Governing equation	RANS
Convection term	2 <sup>nd</sup> Upwind
Pressure-Velocity coupling	SIMPLE
Turbulence model	K-ω SST model (Menter, 1994)

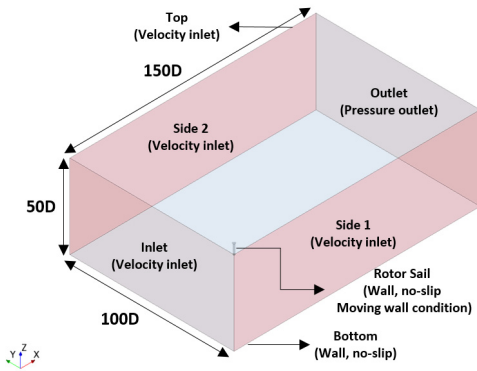


Fig. 3 Computational domain

단독 연구를 위해 바닥 면의 경계 조건으로 대칭 경계 조건 (symmetry)이 제시되어 있으나, 풍동실험 결과와의 비교하기 위해서는 Wall(no-slip) 조건이 더 적합하다고 판단하였다. 로터 세일의 회전은 로터 세일과 엔드플레이트의 표면을 벽(wall) 조건으로 정의하되, 회전 속도를 부여하는 방식으로 구현하였다.

### 2.3 격자계 구성

수치해석을 위한 격자계는 아래 Fig. 4에 나타내었다. De Marco et al. (2014)의 연구에서 Trimmer 격자보다 Polyhedral 격자가 더 적합하다는 결론을 바탕으로 본 연구에서 사용된 격자계도 Polyhedral 격자를 사용하여 구성하였다.

본 연구에서는 격자 구성 시 경계층의 사실적인 구현과 앞선 선행 연구인 Kwon et al. (2022), De Marco et al. (2014, 2016), 그리고 Park et al. (2024) 등을 참고하여  $y_1^+$  가 1이 되도록 설정하였다.

### 2.4 격자계 수렴도 평가

연구에서 사용할 격자계를 결정하고자 격자계 수렴성 평가를 먼저 수행하였으며, 이를 위해 Garenaux et al. (2020)의 연구

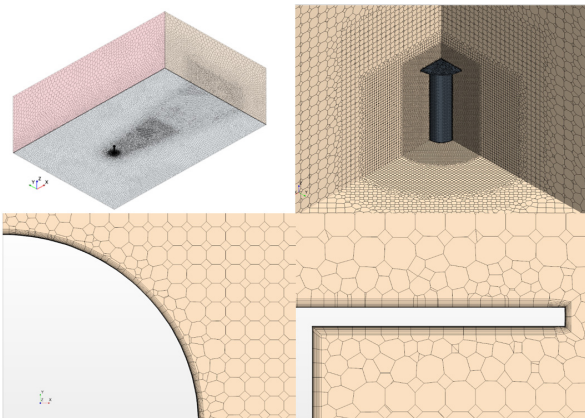


Fig. 4 Grid system

에서 사용된 MARIN과 Puetz BV의 풍동시험 결과 값을 활용하였다. 풍동시험결과 중 선박의 추력에 직접적으로 영향을 미치는 양력계수( $C_L$ )를 비교하였으며, 각 계수의 정의는 아래 식 (1)과 같다. 여기서, Lift는 CFD 해석에서 도출된 로터 세일의 양력값을, A는 유입류 방향을 기준으로 한 로터 세일의 투영 단면적을 의미한다.

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (1)$$

격자의 불확실성을 평가하기 위해 격자 수렴 지수(GCI, Grid Convergence Index)를 이용하였으며 식 (2)를 통해 계산되었다 (Celik et al., 2008). 격자 크기는  $\sqrt{2}$  배씩 증가시키며 Coarse, Medium, Fine의 세 가지 격자를 사용하여 수행하였다. 평가에 사용된 케이스는 풍동실험 결과값이 존재하는 속도비 2.4에서 진행하였다.  $Q$ 는 해당 격자에서 값을 뜻하며, 아래첨자 1, 2, 3은 순서대로 Fine, Medium, Coarse 격자를 나타낸다.  $r_{21}$ 은 Medium과 Fine 격자 사이 격자 크기 비율을 나타내며,  $\epsilon_{21}, \epsilon_{32}$ 는 각각 Medium-Fine, Coarse-Medium 사이 차이를 뜻한다. 수렴 정도는 수렴비(Refinement ratio,  $R$ )를 통해 평가하였다 (Xing et al. 2010). 본 방식은 Coarse와 Medium 격자 간 차이와 Medium과 Fine grid 격자 간 차이를 통해 격자의 수렴 정도를 판별하는 방식으로 식 (3)를 통해 계산된다. 결과는 아래 Table 3에 정리하였다.

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 \left| \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right|}{r_{21}^p - 1} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}} \right| \right|$$

$$\epsilon_{ij} = Q_i - Q_j$$

$$R = \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 < R < 1 & : \text{Monotonic convergence} \\ R < 0 & : \text{Oscillatory convergence} \\ R > 1 & : \text{Divergence} \end{cases}$$

Table 3 Results of grid convergence test

	Coarse	Medium	Fine	GCI	R
Cells	1.4M	3.2M	8.3M	-	-
$C_L$	5.6162	5.3268	5.3236	0.0009%	0.0112
Error	11.3%	5.6%	5.5%	-	-

결과를 보면, GCI계산을 통한 격자 불확실성은 0.0009%로 나타났으며, 격자 크기에 따른 격자 수렴비는 0.0112로 단조 수렴 상태임을 확인하였다. 또한, 약 320만 개의 Medium 격자와 약 830만 개의 Fine 격자 간 결과 차이가 약 0.1%에 불과하여, Medium 격자로도 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Medium 격자를 기준 격자로 사용하여 연구를 진행하였다.

앞서 검증한 결과를 바탕으로 수치해석 기법에 대한 최종 검증을 수행하였다. 최종 검증은 3가지 속도비에 대해 풍동 실험 결과와 비교하였으며, 추가로 이전 연구 (Kwon et al., 2022)의 결과와도 비교하였다. 그 결과, Table 4에 나타난 바와 같이, 모든 속도비에서 전반적으로 이전 연구결과 대비 실험결과에 더 근접한 경향을 보임을 확인할 수 있었는데 그 원인으로 본 연구에서 사용된 로터 세일 주변의 조밀한 격자 영역이 기존 연구 대비 넓게 정의됨으로써 유동장이 보다 넓은 영역에서 사실적으로 묘사되었을 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of present study and model test

SR			1.4	2.4	3.4
$C_L$	EXP	Model test	2.065 (100.0%)	5.044 (100.0%)	6.973 (100.0%)
	CFD	Kwon et al. (2022)	2.344 (+13.53%)	5.490 (+8.83%)	7.626 (+9.36%)
		Present	2.197 (+6.42%)	5.327 (+5.60%)	7.202 (+3.28%)
$C_D$	EXP	Model test	0.509 (100.0%)	1.510 (100.0%)	3.03 (100.0%)
	CFD	Kwon et al. (2022)	0.615 (+20.90%)	1.610 (+6.57%)	3.193 (+5.29%)
		Present	0.606 (+19.17%)	1.636 (+8.34%)	2.945 (-3.56%)

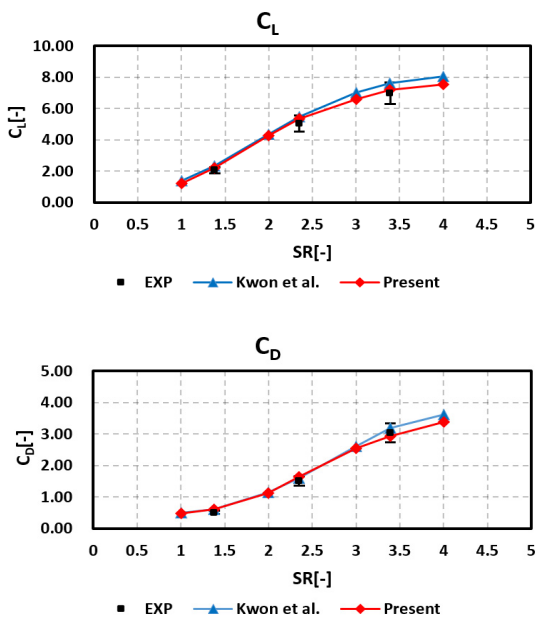


Fig. 5 Results of  $C_L$  and  $C_D$

### 3. 해석결과

#### 3.1 해석 모델

본 연구에서는 로터 세일의 공기역학적 성능을 개선하기 위해 Table 5에 나타난 바와 같이 총 8가지 형상의 로터 세일을 정의하였는데, 각각의 형상적 특징에 대하여 기술하고자 한다. 먼저, 엔드플레이트와 같은 크기의 플레이트가 로터의 중앙부에 복수개로 부착된 버전을 검토하였다. 이 모델은 정지 상태에서 로터 세일의 후면에 발생하는 칼만 볼텍스를 감소시켜 로터 세일에 의한 저항을 줄이기 위해 설계되었으며, 부착된 플레이트 개수에 따라 각각 '2-Plate', '3-Plate'로 정의하였다. 다음으로 엔드플레이트의 영향을 확인하기 위해 기준 형상인 'Base'에서 엔드플레이트가 없는 버전인 'W/O EP'를 만들어 성능 변화를 비교하였으며, 추가로 기준 로터 세일과 형상은 동일하지만 엔드플레이트만 회전하지 않는 'Fixed EP'도 정의하였다. 로터 세일의 직경이 변하는 경우도 검토하기 위해 로터 세일을 3등분한 후, 아랫부분을 기존 직경의 1.1배, 윗부분을 기존 직경의 0.9배로 구성한 'Telescopic' 모델과 가장 아랫부분을 기존 직경의 1.1배로 시작하여 가장 윗부분이 기존 직경의 0.9배로 위로 갈수록 얇아지는 형태의 'Cone' 모델도 정의하였다. 마지막으로 로터 세일의 중앙 부근이 볼록한 'Convex' 모델과 반대로 중앙 부근이 오목한 'Concave' 모델까지 총 8가지의 다양한 로터 세일을 정의하여 기존 대비 성능 변화를 분석하였다.

Table 5 Various rotor sail configurations

2-Plate	3-Plate	Fixed EP	W/O EP
Telescopic	Cone	Convex	Concave

#### 3.2 공력특성의 비교

앞서 설명한 모델들의 양력, 항력, 토크, 에너지 효율에 대해 속도비를 변화시키며 기준 형상의 각 값들을 기준으로 정의하여 비교하였다. 그리고, 에너지 효율은 양력(L), 유입류 속도(U), 토크(Q), 회전 속도( $\omega$ )를 기반으로 한 산정 식에 따라 계산하였다.

에너지 효율 계산식은 선행 연구인 Kwon et al. (2022)에서 사용된 식으로, 아래 식 (5)와 같이 정의된다.

$$E = \frac{L^* U}{Q^* \omega} = \frac{L^* U}{Power} \quad (5)$$

먼저 기준 형상과 플레이트가 부착된 모델의 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 속도비가 3 이상일 때 기준 대비 양력이 증가하였으며, 2-plate는 최대 9%, 3-plate는 최대 18%까지 증가하였다. 이는 플레이트가 부착됨으로써 로터 저압부(suction side)의 압력이 Base 로터 저압부보다 전체적으로 저감되었기 때문인데, 후술하겠으나 Fig. 14 (속도비=5)에서 확인할 수 있다. 그러나 모든 Spin ratio에서 항력 또한 증가하였고, 특히, 토크는 최소 80%에서 최대 140%까지 증가하여 최종적으로 에너지 효율이 기준 대비 절반 수준으로 감소하였다. 이는 플레이트의 존재로 인해 토크 증가가 유발되어 결국 효율 감소로 이어졌음을 나타낸다. 이러한 경향은 Kwon et al. (2022)의 선행논문에서도 확인할 수 있다.

다음으로 엔드플레이트의 영향을 비교한 모델의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 해당 결과를 보면, 기존 모델과 동일한 속도비 조건에서 양력과 토크가 모두 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히, 양력이 감소되는 비율보다 토크가 감소되는 비율이 커서 에너지 효율은 기존의 로터 세일에 비해 모든 속도비에서 개선되는 것으로 산출되었다. 하지만 실제 산출되는 양력이 감소하였다는 것은 선박의 추력에 기여하는 양이 감소되었다는 것을 의미하므로 엔드플레이트가 고정되거나 없는 로터 세일이 기존의 로터 세일 대비 개선된 점은 없다고 판단하는 것이 합리적이다.

세 번째로 Telescopic 및 Cone에 대한 결과는 Fig. 8에 표시

하였다. 초기 낮은 속도비에서 기존 대비 낮은 양력을 보였으나, 높은 속도비에서는 기존 대비 약 2% 증가하였다. 토크는 최소 3%에서 최대 10%까지 기존 대비 증가하였으며, 최종적으로 양력 증가 비율보다 토크 증가 비율이 더 높아 에너지 효율 측면에서 기존 대비 낮은 수치를 보였다. 항력의 경우, 가장 낮은 속도비에서 기존 대비 9%~20% 증가하였으나, 다른 속도비에서는 기존 대비 4%~12% 낮게 측정되었다.

마지막으로, Convex와 Concave의 결과를 Fig. 9에 제시하였으며, 양력에서 서로 상반된 경향을 보였다. Convex는 속도비가 증가할수록 양력이 감소하는 경향을 보인 반면, Concave는 속도비가 높아질수록 양력이 증가하는 경향을 보였다. 토크는 기존 대비 근소하게 증가하였으나, 증가 폭이 작고 속도비에 따른 변화도 크지 않아 에너지 효율은 양력과 유사한 경향을 나타냈다. 항력의 경우, 낮은 속도비에서는 기존보다 증가했으나 높은 속도비로 갈수록 기존과 유사한 수준을 보이는 경향이 나타났다.

### 3.3 토크의 분포 비교

앞서 분석한 결과, 다른 모델들과 비교했을 때 플레이트가 부착된 경우 토크가 크게 증가한 반면, 엔드플레이트가 없거나 회전하지 않는 경우에는 토크가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 본 절에서는 기준 로터 세일에서 엔드플레이트가 차지하는 토크의 비중 및 플레이트 부착 시 토크 비중의 분포를 비교, 분석하였다.

Fig. 10과 11은 로터 세일의 형상별 토크 분포를 나타낸다. 먼저, 기준 로터 세일의 경우 전체 토크 중 약 58%가 엔드플레이트에 집중되어 있어 매우 큰 비중을 차지하며, 회전하는 로터 자체

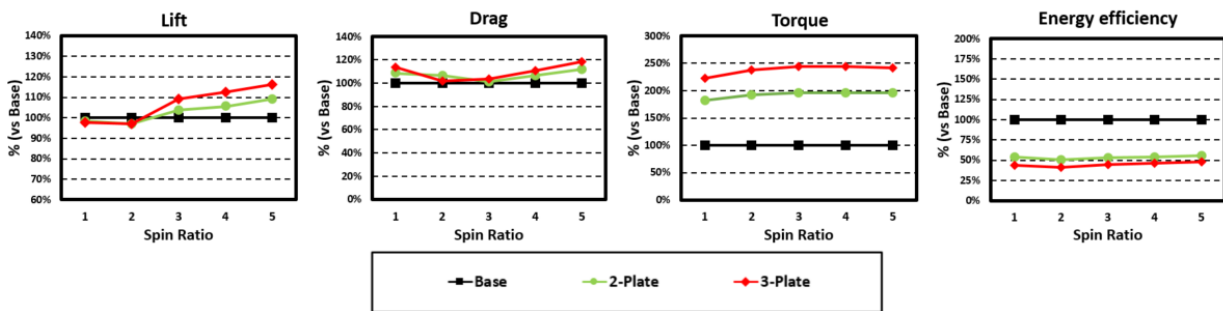


Fig. 6 Comparison of Lift, Drag, Torque, and Energy Efficiency for 2-Plate and 3-Plate

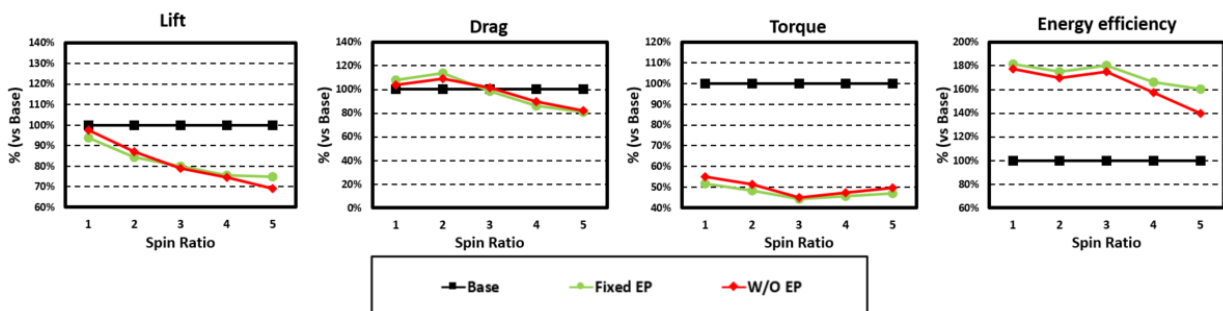


Fig. 7 Comparison of Lift, Drag, Torque, and Energy Efficiency for Fixed EP and W/O EP

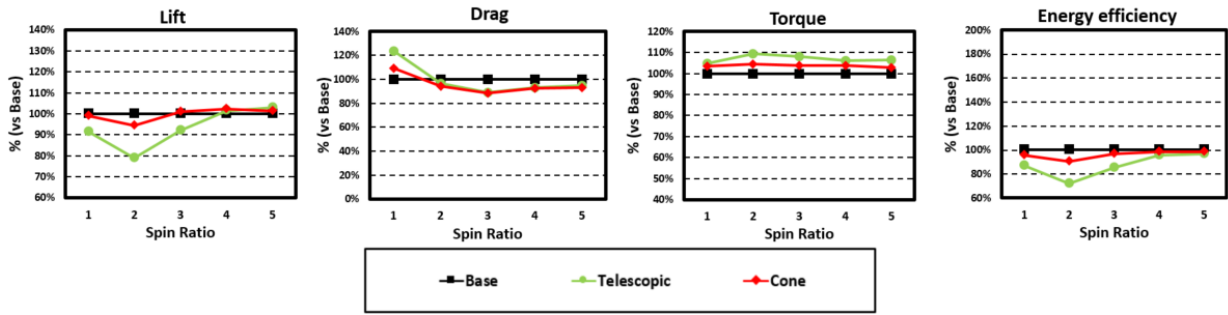


Fig. 8 Comparison of Lift, Drag, Torque, and Energy Efficiency for Telescopic and Cone

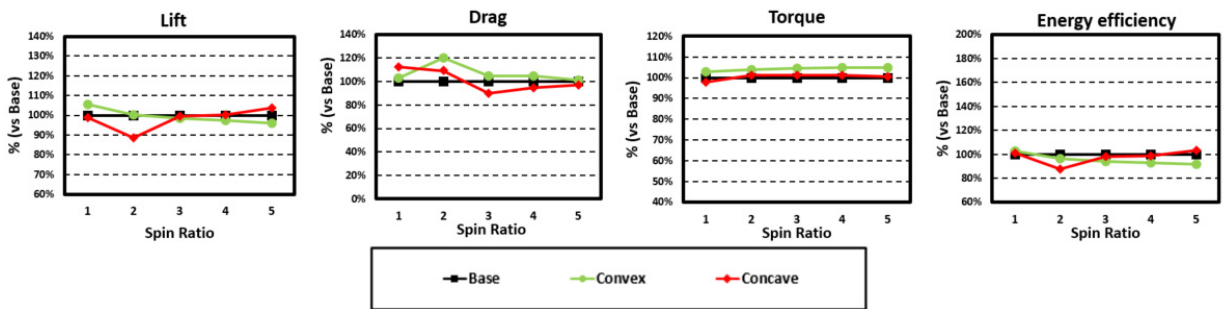


Fig. 9 Comparison of Lift, Drag, Torque, and Energy Efficiency for Convex and Concave

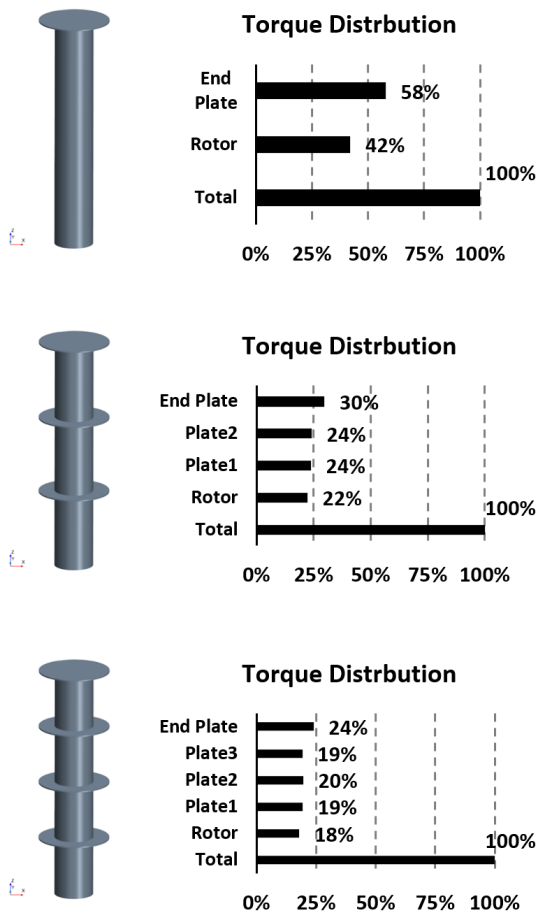


Fig. 10 Comparison of torque distribution with 2-Plate and 3-Plate at SR = 2.4

보다 더 큰 토크값이 유발되는 것으로 확인되었다. 2-Plate에서는 엔드플레이트가 전체 토크의 약 30%를 차지하였으며, 부착된 두 개의 플레이트는 각각 24%의 토크를 기록하였다. 이는 각각의 플레이트가 로터보다 높은 토크를 발생시킴을 보여준다. 3-Plate도 각 플레이트의 토크가 로터보다 높은 값을 보였으며, 플레이트 하나의 토크가 로터의 토크를 초과하기 때문에 플레이트 개수가 늘어날수록 전체 토크가 급격히 증가하는 결과를 나타냈다.

추가로, 기준 로터 세일의 높이에 따른 토크 분포도 분석하였다. Fig. 11의 결과를 보면, 엔드플레이트 다음으로 가장 큰 비중을 차지하는 부분이 로터 세일의 가장 아랫단임을 확인할 수 있었다. 가장 아랫단인 0~0.25H 구간은 전체 토크의 약 14%를 차지하였으며, 나머지 구간들은 각각 약 9%로 비슷한 분포를 보였다.

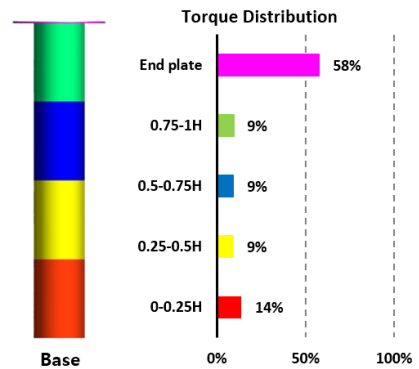


Fig. 11 Torque distribution by height of Base at SR = 2.4

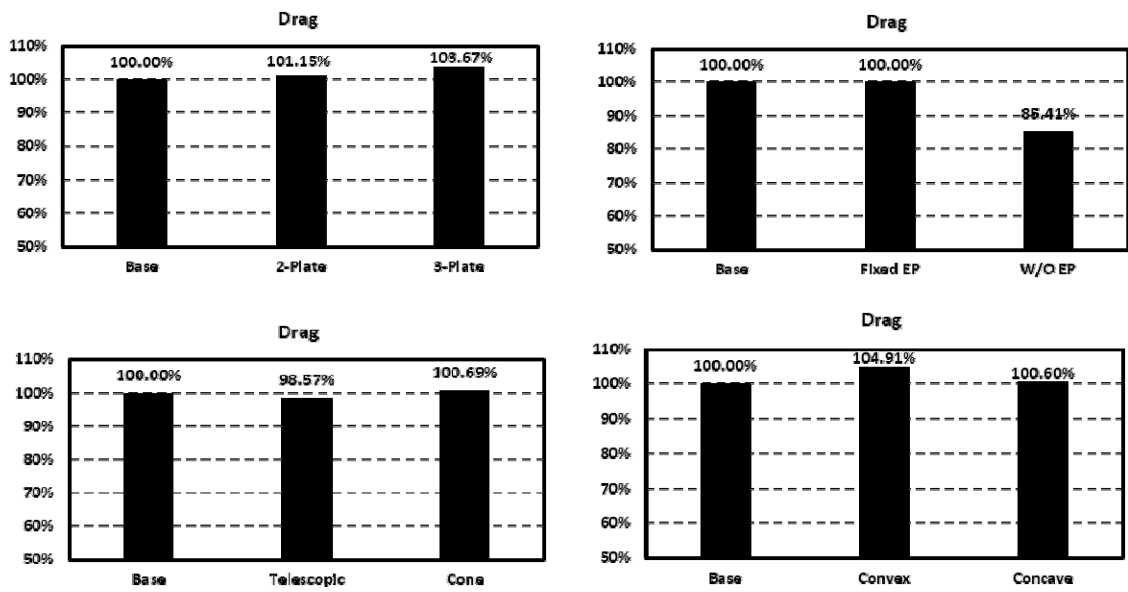


Fig. 12 Comparison of Drag for Each Model in a Stationary State

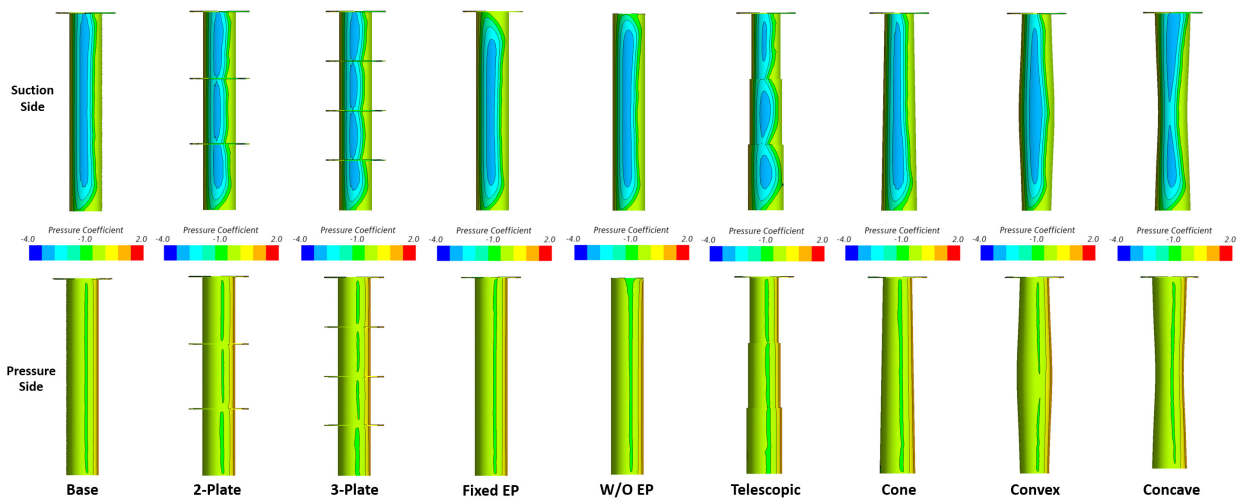


Fig. 13 Pressure coefficient distribution at SR = 1

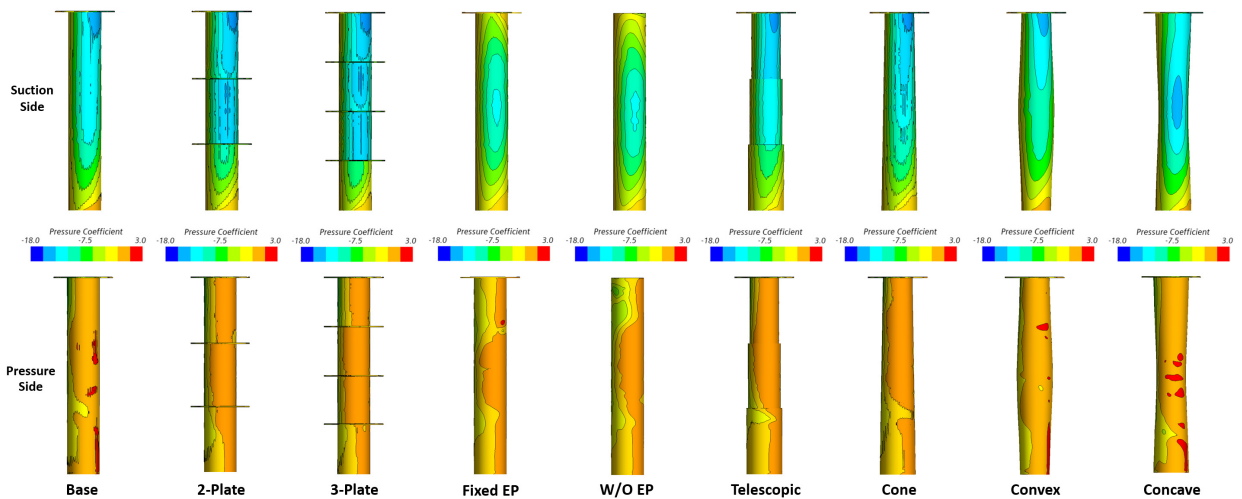


Fig. 14 Pressure coefficient distribution at SR = 5

### 3.4 정지 상태에서의 항력 비교

아래 Fig. 12은 회전하지 않을 때의 항력을 비교한 그래프이다. 플레이트가 부착된 경우, 개수가 많아질수록 항력이 증가했으며, 예상했던 칼만 볼텍스 억제 효과는 나타나지 않았다. 엔드 플레이트가 없는 W/O EP 모델은 항력이 약 15% 감소해, 엔드 플레이트가 항력에도 영향을 미친다는 점을 보여준다. Telescopic 모델은 약 1.5% 감소, Cone은 약 0.7% 증가로 큰 차이를 보이지 않았고, Convex는 약 5% 증가, Concave는 기존 과 유사한 값을 나타냈다. 전반적으로 엔드플레이트가 없는 경우를 제외하면, 항력 변화는 미미했다.

### 3.5 표면 입력 분포

Fig. 13, 14는 각 모델의 표면 압력 계수(Cp) 분포를 나타낸 것이다. 위쪽 두 행은 속도비 1, 아래쪽 두 행은 속도비 5에서의 결과이며, 각 행의 경우, 상단은 흡입면(Suction Side), 하단은 압력면(Pressure Side)의 결과이다.

먼저, 플레이트가 부착된 모델의 결과를 보면, 기존 형상에서는 압력 분포가 부드럽게 이어지는 반면, 플레이트가 부착된 모델에서는 플레이트의 존재로 인해 압력 분포가 끊기는 부분이 발생하였다. 앞서 분석한 양력 결과와 비교했을 때, 플레이트가 부착된 모델은 높은 회전 속도에서 기존 대비 양력이 크게 증가하였다. 이는 플레이트의 존재로 인해 저압부와 고압부의 면적이 모두 확대되었기 때문이다.

엔드플레이트의 영향을 확인하기 위해 분석한 두 모델의 결과를 보면, 낮은 회전 속도에서는 압력 분포가 기존 모델과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 높은 회전 속도에서는 차이가 명확하게 나타났다. 엔드플레이트가 없는 W/O EP 모델과 회전하지 않는 Fixed EP 모델 모두 저압부에서 압력 분포가 기존보다 덜 낮아지고, 고압부에서도 기존보다 압력이 크게 증가하지 않았다. 이에 따라 양면의 압력 차가 줄어들어 양력이 상당히 감소한 것을 확인할 수 있었다.

다음으로, Telescopic 모델과 Cone 모델의 결과를 보면, 낮은 회전 속도에서는 두 모델 모두 기존 대비 낮은 양력을 보였는데, 이는 고압부에서 압력이 높아지는 영역이 기존보다 줄어들어 압력 차가 감소했기 때문이다. 반면, 높은 회전 속도에서는 두 모델 모두 기존 모델과 비교했을 때 저압부의 영향보다 고압부의 영향이 더 두드러졌다. 압력이 높아지는 영역의 크기가 기존 모델보다 넓어지면서 양력이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로, Convex 모델의 경우 속도비가 1일 때 고압부에서 압력이 높아지는 영역과 저압부에서 압력이 낮아지는 영역 모두 기존 모델 대비 증가하였다. 그러나 속도비가 5일 때는 고압부에서 압력이 높은 영역이 기존 모델보다 넓어졌지만, 저압부에서 압력이 낮게 형성되는 영역이 줄어들어 양력이 감소한 것으로 나타났다. Concave 모델의 경우 속도비가 1일 때는 고압부에서의 압력이 전체적으로 기존보다 낮게 형성되었지만, 속도비가 5일

때는 오히려 기존보다 압력이 더 높게 형성되어 양력이 기존보다 증가한 것을 확인할 수 있었다.

### 3.6 로터 세일 전방 유속 변화

표면 압력 분포 결과에 따르면, 엔드플레이트가 없는 W/O EP 모델뿐만 아니라 회전이 고정된 Fixed EP 모델에서도 로터 세일 하단부에서의 압력 감소가 관측되었다. 이는 엔드플레이트의 영향이 로터 세일 하단부까지 미치는 것으로 해석되며, 이에 따라 로터 세일 중심으로부터 1D 전방 위치에서의 유동 특성을 확인하고자 하였다(Fig. 15).

Fig. 16은 로터 세일 중심으로부터 1D 전방 위치에서 유입류의 속도를 높이별로 나타낸 그래프이다. 그래프의 x축은 초기 유입류의 속도 U로, y축은 로터 세일의 높이 H로 무차원화 하여 나타내었다.

Fig. 16의 결과를 살펴보면, 기존 모델에서는 로터 세일 중앙부에서 유입류가 가장 빠르게 형성되었으며, 바닥면과 엔드플레이트 부근으로 갈수록 유속이 감소하는 양상을 보였다. Fixed EP 모델의 경우, 전체적인 유속의 속도는 기존 모델보다 낮았지만, 유속의 분포는 기존 모델과 비슷한 양상을 보였다. 반면, W/O EP 모델은 상부로 갈수록 유속이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 유입류가 로터의 중앙부로 유입되지 않고 상단부로 빠져나갔음을 의미한다. 이러한 결과를 통해, 엔드플레이트가 유입류를 로터 방향으로 유도하고 상단부로 빠져나가는 유동을 막아주는 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 6의 수치는 Fig. 16에 제시된 각 모델의 유입 유속 분포 결과를 정량적으로 비교한 것이다. 기존 모델은 전체 높이(H) 및 하단부(0~0.25H)에서 가장 높은 평균 유입 속도(Mean u/U)를 나타내며, 기준값(100%)으로 설정되었다. Fixed EP 모델은 기존에 비해 전체 높이에서 약 7.8%, 하단부에서는 약 6.5% 감소된 유속을 보였으며, W/O EP 모델은 전체 높이 기준 Fixed EP 모델

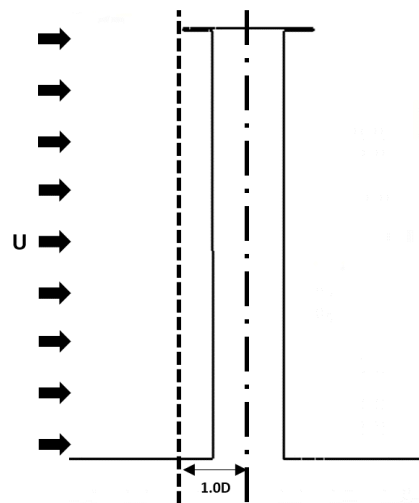


Fig. 15 Definition of monitoring points in front of the rotor sail

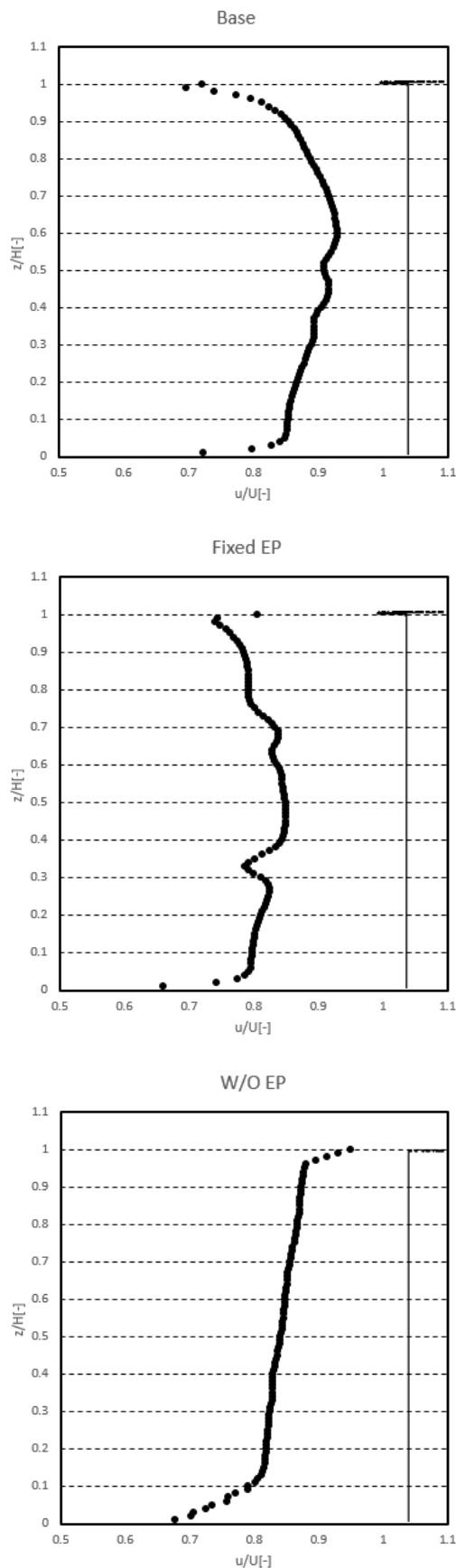


Fig. 16 Inflow velocity distribution at SR = 5

Table 6 Comparison of Mean  $u/U$  for Base and End plate Models

Type	Height	Mean $u/U$ [-]	%
Base	0~H	0.8786	100.0%
	0~0.25H	0.8509	100.0%
Fixed EP	0~H	0.8100	92.2%
	0~0.25H	0.7953	93.5%
W/O EP	0~H	0.8369	95.3%
	0~0.25H	0.7864	92.4%

보다 상대적으로 높은 평균 유입 속도를 보였으나, 하단부의 유속은 세 모델 중 가장 낮은 수치를 기록하였다. 이는 Fig. 16에서도 확인되듯, 유동이 로터 세일의 하부보다는 상부로 빠져나가는 경향이 두드러졌기 때문이다, 결과적으로 엔드플레이트의 존재 및 회전은 유입류를 로터의 중앙부뿐만이 아니라 하부까지 유도하는데 기여함을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 형상의 로터 세일에 대해 유체역학적 성능을 분석하고, 각 형상에 따른 양력, 토크, 에너지 효율 등의 변화를 비교하였다.

1. 기존 로터 세일에 플레이트를 2개 혹은 3개 부착한 경우, 양력은 증가하였으나 토크 역시 크게 증가하여 전체 에너지 효율은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 토크 분포를 통해 분석한 결과, 기존 로터 세일의 엔드플레이트가 전체 토크의 약 60%를 차지하고 있었으며, 플레이트 하나가 생성하는 토크가 로터 본체보다 더 큰 수준으로 작용함을 확인하였다. 따라서 로터 세일에 부가 구조물을 추가할 경우, 토크 변화가 에너지 효율에 미치는 영향을 면밀히 고려할 필요가 있다.

2. Fixed EP 및 W/O EP 모델을 통해 엔드플레이트의 유체역학적 역할을 분석한 결과, 두 모델 모두 토크가 감소하여 에너지 효율 측면에서는 개선된 성능을 보였으나, 속도비 증가 시 양력 증가율이 기존 모델에 비해 낮아 추력 확보에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 이는 엔드플레이트가 단순한 부가 구조물이 아닌, 유입 유동의 구조를 형성하고 유동을 안정적으로 하단까지 유도하는 핵심 요소임을 시사한다. 실제 Fig. 16의 유속 분포와 Table 6의 평균 유속 비교 결과에서도 기존 모델이 가장 높은 평균 유입 속도를 기록하였으며, W/O EP 모델은 하단 유속이 가장 낮게 나타났다. 이를 통해 엔드플레이트가 유동을 하부까지 유도하고 가속시키는 효과적인 역할을 하고 있음을 정량적으로 확인하였다.

3. Telescopic과 Cone 모델은 속도비 증가에 따라 양력 증가를 보였지만, 토크 또한 함께 증가하여 에너지 효율 향상에는 기여하지 못했다. Convex 모델은 낮은 속도비 구간에서는 양력과 효율 모두 우수한 성능을 보였으나, 속도비가 높아질수록 성능이 감소하였다. 반대로 Concave 모델은 높은 속도비에서 기존 모델

대비 더 우수한 양력과 에너지 효율을 보였다.

4. 미작동 조건에서의 항력 분석 결과, 엔드플레이트가 제거된 경우를 제외하면 대부분의 형상에서 기존 대비 큰 차이를 보이지 않았다

이상의 결과를 종합하면, 로터 세일의 성능은 단순한 형상 변경이나 부가물 유무에 따라 결정되는 것이 아니라, 유동의 구조와 방향성을 어떻게 형성하고 유도하느냐에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 특히, 엔드플레이트는 유동을 안정화하고 하단부까지 가속시키는 중요한 설계 요소로, 이에 대한 최적화 설계가 성능 향상의 핵심이 될 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 회전 속도 및 풍속 조건에서 엔드플레이트 형상 최적화, 추가 부가물 설계, 또는 유동 제어 장치와의 융합 등 새로운 설계 전략을 도입함으로써, 양력 성능과 에너지 효율의 균형을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2023RIS-007)

## References

Bordogna, G., Muggiacsa, S., Giappino, 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 & Industrial Aerodynamics*, 188, pp.19-29.

Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J. and Freitas, C., 2008. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluid Engineering*, 130(7), pp.078001-078004.

De Marco, A., Mancini, S. and Pensa, C., 2014. Preliminary analysis for marine application of flettner rotors. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime Engineering*, Yildiz Technical University, Istanbul, 23-24 October 2014.

De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G. and De Luca, F., 2016. Flettner rotor concept for marine applications: a systematic study. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016, 3458750, pp.12.

Garenaux, M., Schot, J. and Eggers, R., 2020. Numerical analysis of flettner rotors performances on the marine hybrid transition coaster. *High-Performance Marine Vehicles (HIPER)*, Cortana, Italy.

Hakirevic Prevljak, N., 2025. Oman's Asyad Group introduces wind-powered mega vessel[Online] (Updated 8 May 2025) Available at : <https://www.offshore-energy.biz/omans-asyad-group-introduces-wind-powered-mega-vessel/> [Accessed 2 July 2025].

Kim, J.E., Cho, D.H. and Lee, C.Y., 2023(a). Numerical study on the effect of the arrangement type of rotor sail on lift formation. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 29(2), pp.197-206.

Kim, Y.J., Hwang, J.Y. and Ahn, B.K., 2023(b). Experimental study on the effects of surface shape and roughness on the magnus effect of rotor sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(5), pp.351-357.

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, 100493.

Park, J.Y., Seo, J.H. and Park, D.W., 2024. Numerical study on the aerodynamic performance of asymmetric vertical folding rotor sail. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(2), pp.68-76.

Xing, T. and Stern, F., 2010. Factors of safety for richardson extrapolation. *Journal of Fluid Engineering*, 132, 061403.



우재홍

송지수