

## 선박용 로터세일 주위의 난류 유동특성에 관한 수치해석적 연구

김정은\* · 조대환\*\* · 이창용\*\*\*†

\* 목포해양대학교 대학원 박사과정, \*\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 교수, \*\*\* 국립인천해사고등학교 교사

## Numerical Analysis Study on the Turbulent Flow Characteristics around the Rotor Sail for Vessels

Jung-eun Kim\* · Dae-Hwan Cho\*\* · Chang-Yong Lee\*\*\*†

\* Doctor Degree Course, Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\*\* Teacher, Division of Marine Engineering, Incheon National Maritime High School, Incheon 22304, Korea

**요 약** : 국제해사기구(IMO)의 온실가스(GHG) 감축 전략과 같은 환경규제를 강화함에 따라 친환경 선박 및 대체 연료 등 기술 개발이 확대되고 있다. 그의 일환으로 해운사와 조선사를 중심으로 에너지 저감과 풍력 추진 기술을 활용한 선박 추진 기술이 대두되고 있다. 풍력 추진 기술의 확보와 실증 연구를 조선 및 해운 분야에 도입함으로써 친환경 기술을 활용한 고부가가치 시장을 창출할 수 있으며, 운항 선박의 연료 소비율을 줄임으로써 연비를 약 6~8% 정도 향상시켜 GHG의 감축을 기대할 수 있다. 로터 세일(Rotor Sail, RS) 기술은 원형 실린더가 일정한 속도로 회전하여 유체를 통과할 때 실린더의 수직 방향으로 유체역학적 힘을 발생시키는 기술이다. 이를 마그누스 효과(Magnus Effect)라고 하며, 본 연구에서는 선박에 설치된 풍력보조추진 시스템인 RS 주위의 난류 유동특성에 관한 수치해석적 연구를 통하여 추진효율을 높일 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 그래서 RS의 공기 역학적 힘에 영향을 미치는 매개변수로써 속도비(Spin Ratio, SR)와 종횡비(Asspect Ratio, AR) 변화에 따른 양력계수( $C_L$ )와 항력계수( $C_D$ )를 도출하였고, RS 끝단 플레이트(End Plate, EP) 적용에 따른 RS 주변 유동특성을 비교하였다.

**핵심용어** : 풍력 추진 기술, 로터세일, 마그누스 효과, 난류유동, 양력계수, 항력계수

**Abstract** : As environmental regulations such as the International Maritime Organization (IMO)'s strategy to reduce greenhouse gases(GHG) are strengthened, technology development such as eco-friendly ships and alternative fuels is expanding. As part of this, ship propulsion technology using energy reduction and wind propulsion technology is emerging, especially in shipping companies and shipbuilders. By securing wind propulsion technology and introducing empirical research into shipbuilding and shipping, a high value-added market using eco-friendly technology can be created. Moreover, by reducing the fuel consumption rate of operating ships, GHG can be reduced by 6-8%. Rotor Sail (RS) technology is to generate a hydrodynamic lift in the vertical direction of the cylinder when the circular cylinder rotates at a constant speed and passes through the fluid. This is called the Magnus effect, and this study attempted to propose a plan to increase propulsion efficiency through a numerical analysis study on turbulence flow characteristics around RS, a wind power assistance propulsion system installed on a ship. Therefore,  $C_L$  and  $C_D$  values according to SR and AR changes were derived as parameters that affect the aerodynamic force of the RS, and the flow characteristics around the rotor sail were compared according to EP application.

**Key Words** : Wind propulsion technology, Rotor sail, Magnus effect, Turbulent flow, Lift coefficient, Drag coefficient

## 1. 서 론

전 지구적인 이상기후 변화 및 국제해사기구(IMO)의 환경

규제 강화에 대응하기 위하여 선박용 저질연료유 사용 감축 및 다양한 친환경 기술을 적용한 선박 개발이 진행되고 있다(Bae and Yang, 2022). 친환경 선박에는 친환경 연료 추진 선박, 전기추진 선박, 하이브리드 선박, 수소연료전지 선박 등이 있는데, 최근에는 무공해 자원인 풍력을 이용한 선박 추진 기술이 주목받고 있다. 풍력을 이용한 친환경 선박 기

\* First Author : kje38kkr@naver.com, 061-240-5035

† Corresponding Author : greenpia77@naver.com, 032-770-1000

술 중 하나인 로터세일(Rotor Sail, RS)은 회전하는 실린더 형태의 장치로써 마그누스 효과를 이용하여 유체 동역학적 양력을 발생시킨다. Marco et al.(2014)는 마그누스 효과는 회전하는 물체와 유체 사이에 상대속도가 존재할 때 물체의 속도에 수직 방향으로 힘이 발생하는 현상으로 정의하였다. RS는 1920년대 독일의 항공 엔지니어인 Anton Flettner가 선박의 추진 시스템으로 처음 사용되었다.

세계 최초의 RS 선박은 전장 54 m의 'Buckau'호로 배의 선수와 선미에 지름 2.8 m, 높이 18 m의 RS가 각각 설치되어 있었다. 이후 화석연료를 사용한 선박이 증가하면서 RS 선박이 급격하게 감소하였으나 최근 환경문제로 인해 무공해, 무탄소 연료인 풍력을 활용한 선박이 다시 주목받게 되었다(Marco and Mancini, 2016).

21세기에 들어와 풍력 터빈을 만드는 독일 회사인 에너콘(Enercon)사가 화석연료와 RS를 함께 활용하는 'E-Ship 1'호를 개발하였다. 이 선박은 길이 130 m, 너비 22.5 m이며 갑판에는 지름 4 m의 로터세일 4대가 설치되어 있었다. Enercon사에서는 "디젤엔진을 보조하기 위해 사용되는 로터세일은 약 30%의 연료 절감이 가능하다."라고 하였다. 'E-Ship 1'호는 현재도 운항 중이며, 다양한 해양환경에서 17,000 마일 이상을 항해할 수 있는 것으로 검증되었다(Enercon wind company, 2013). Fig. 1은 과거와 현재의 로터세일이 적용된 선박을 나타낸 것이다.

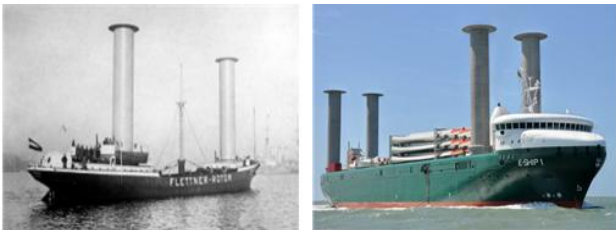


Fig. 1. Current and Past Rotor Sail installed Vessels.

## 2. 선행 연구

로터세일과 관련된 연구는 Langley Field NACA Laboratory에서 Reid et al.(1924)에 의해 진행된 로터세일의 수치해석적 연구를 시작으로 풍동시험을 통한 모형시험에서부터 수치해석 프로그램을 사용한 성능 평가까지 활발하게 이루어지고 있다.

대표적인 로터세일 시험 연구로는 Badalamenti and Prince (2008)에 의해 City University's Handley Page laboratory에서 수행된 풍동시험을 통해 레이놀즈수(Re)가  $1.6 \times 10^4 \leq Re \leq 9.5 \times 10^4$  범위에서 회전하는 원형 실린더의 공기역학적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 주된 연구초점은 실린더 끝단

플레이트(End Plate, EP)의 크기, 양력 및 항력의 상관관계에 관한 분석이었고 EP가 양력을 크게 향상시키며, 양력 대 항력의 비율을 개선할 수 있다는 것을 확인하였다.

Bordogna et al.(2020)는 두 개의 유사한 로터세일의 성능에 대한 공기역학적 상호작용 효과를 이해하기 위해 풍동실험을 수행하였다. 그 결과 두 RS의 공기역학적 성능은 종횡비(Aspect Ratio, AR)와 속도비(Spin Ratio, SR)의 상호작용에 의해 영향을 받으며, RS간의 위치가 서로 가까운 경우, 풍향과 동일 선상에 위치할 때 가장 효과가 큰 것으로 나타났다.

수치해석 프로그램을 이용한 연구에는 회전 실린더를 통과하는 유체 속도에 대해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD)를 활용하여 'Unsteady Reynolds Average Navier Stokes(U-RANS)' 연구를 진행하였다. 예비 2D 연구를 통해 적절한 격자수와 수치 모델을 선정하였다. 그리고 3D 시뮬레이션을 통해 매개변수에 따른 로터세일의 효과를 심층적으로 평가하였으며, 그 결과 RS의 효과를 다양한 회전율에 대한 양력계수( $C_L$ )과 항력계수( $C_D$ )의 관계로 나타내었다(Marco et al., 2014).

Marco et al.(2015)는 Badalamenti and Prince(2008)가 수행한 실험 결과와 비교하였고 수치해석을 위한 조건을 설정하기 위해 예비평가를 수행하였다. 시험에 사용된 RS는  $AR = 5.1$ ,  $D = 0.0889$  m이었으며, RS의 지름과 EP 지름 비( $d_e/d$ )가 2인 조건에 대해 연구를 수행하였다. 양력과 항력의 비( $L/D$ )에 영향을 미치는 제어인자 SR, AR 및  $d_e/d$  사이의 상관관계와 상호작용을 평가하기 위해 실험설계에 기초한 통계적 접근법을 적용하였다.

Hu et al.(2019)는 EP와 원뿔모양의 RS로 구성된 새로운 유형의 RS를 제안하였다. 수치해석 결과를 통해, 높은 SR에서 높은  $C_L$ 을 유지할 수 있으며, 결과적으로 높은  $L/D$ 를 얻을 수 있었다.

Marco and Mancini(2016)는 SR, AR, EP의 효과 및 조건에 대한 RS의 성능 민감도를 평가하였으며, Devaraj and Raju (2017)는 수치해석 프로그램을 사용하여 특정 자유 유속에서 SR에 대한 RS의 성능평가를 수행하였다.

최근에는 RS와 돛을 조합한 초대형 다각형 RS에 대한 연구도 수행되고 있다. Li et al.(2021)은 9면의 다각형 돛 형상에 대한  $C_L$ 과  $C_D$ 를 비교 분석한 결과, 돛의 변의 수가 많을수록  $C_L$ 이 더 크다는 것을 확인하였다. 연구에 사용된 16면 돛은 30만 톤급 유조선에서 실용적 가치가 더 높다는 것을 수치해석적으로 검증하였다.

최근까지 RS 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나, 각 매개변수 간의 상관관계와 영향에 대한 상세 연구는 이루어지지 않고 있다. 그래서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 RS를 지나가는 난류 유동특성을 분석하고  $C_L$ 과  $C_D$ 를 도출하여 선

행 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 RS 성능에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수로써 SR, AR 및 EP를 설정하였다. 이 3개 변수간의 상관관계에 따른 공기역학적 효율을 비교하였고, 와류 특성 차이를 정량적으로 파악하고자 하였다.

### 3. 로터세일 형상 및 해석 조건

#### 3.1. 로터세일 형상

수치해석을 위한 RS의 형상은 ‘E-ship 1’호의 RS를 기준으로 하였으며, Fig. 2로 나타내었다.

RS 제원은 AR=3.5, H=14.0 m 및 D=4.0 m로 설정하였다. 예비시험에서는 부가물이 없는 RS 자체의 성능을 평가하기 위해 EP는 고려하지 않았다.

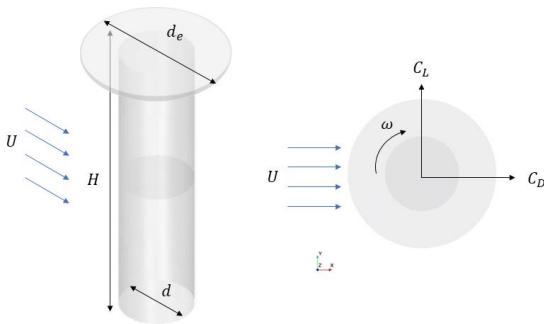


Fig. 2. Geometry of Rotor Sail.

#### 3.2. 수치해석 조건

본 연구에서는 CFD 소프트웨어인 STAR-CCM+ Ver.15.06을 이용하여 비압축성 유동에서 URANS 모델을 통한 RS 주변의 비정상 와류 이탈(vortex shedding) 유동특성을 분석하였다.

난류 모델은 k- $\omega$  Shear Stress-Transport(SST) 모델을 사용하였다. 이는 회전체 벽면 유동에서의 해석 정확도가 높은 난류모델이기 때문이다. 그리고 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 Marco et al.(2014)의 격자 및 경계조건과 동일한 난류모델을 사용하였으므로 수치해석의 신뢰도를 검증할 수 있다.

RS 및 공간격자로 회전 운동에 적합한 다면체 격자(Polyhedral Mesh)를 사용하였으며, 격자 기본 크기는 5.0m로 설정하였다. 격자의 독립성을 검토하기 위해, 격자 기본 크기 4.0 m(약 440만개), 5.0 m(240만개) 및 6.0 m(150만개) 3가지 조건에 대해서 유동장 내에 격자수를 변경하며 수치해석한 결과 격자 240만개 이상에서는 440만 일 때와 거의 유사한 해석결과를 얻을 수 있었으며, 수치해석에서는 해석시간의 효율성을 위해 240만 개로 격자로 생성하였다. 또한 계산 부

하를 줄이기 위해 RS의 크기의 1/2로 모델링하였고, 대칭 평면을 사용하였다. RS 벽면 흐름의 특징에 대해 정확히 예측하기 위해서 속도 구배가 발생하는 RS 벽면에 6개 경계층을 추가하였고 벽 함수(Wall function)를 적용하였다. 첫 번째 경계층에서 No-slip 조건을 만족하기 위해 1.0 이하의 무차원 연직거리(y+) 값을 적용했다(Marco and Mancini, 2016).

회전영역 및 후류 주위에 양질의 격자를 생성하기 위해 다중블록 격자계(multi-block grid system)를 사용하였으며, 후류영역 2블록, 회전영역 2블록의 격자를 추가하였다. Fig. 3은 해석 격자를 나타낸 것으로써, (a) 전체 유동장, (b) 세부 격자형상이다.

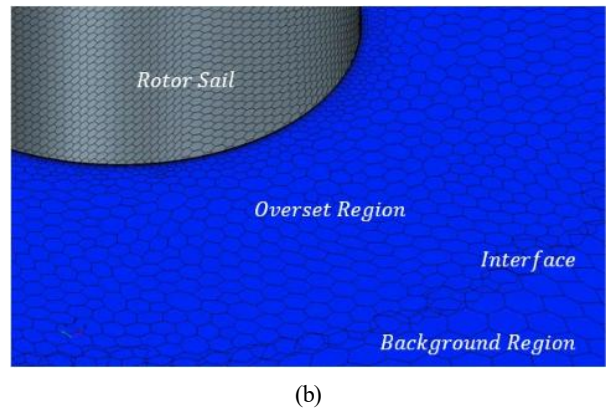
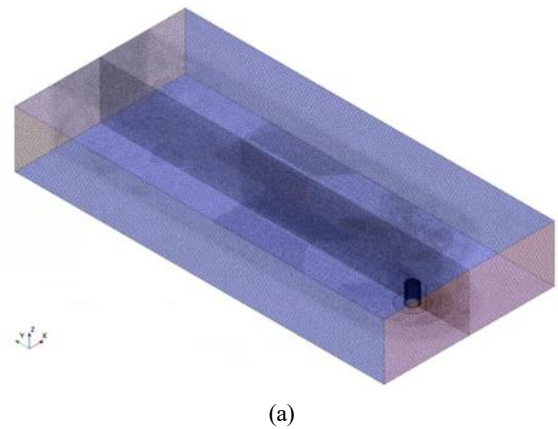


Fig. 3. Mesh of Domain and Rotor Sail. (a) Full flow field mesh, (b) Detailed mesh.

Fig. 4는 유동장의 경계조건을 나타낸 것이다. 유동장의 전방은 균일한 유동 속도를 위하여 Velocity Inlet으로 설정하였으며, 회전 각속도와 SR에 따라 유동 속도(U)=20, 10, 6.67, 5 m/s로 하였다. 그리고 유동장의 후방은 압력 출구(Pressure Outlet)로 하여 0 Pa로 설정하였다. 그리고 유동장의 상하부 및 좌우면은 하부면에 대해서 대칭 평면(Symmetry Plane) 조건으로 설정하였다. 또한 로터 회전을 구현하기 위해 회전

영역(Overset Region)과 비회전 배경 영역(Background Region) 사이에 중첩 원통형 영역(Interface)을 설정하였다.

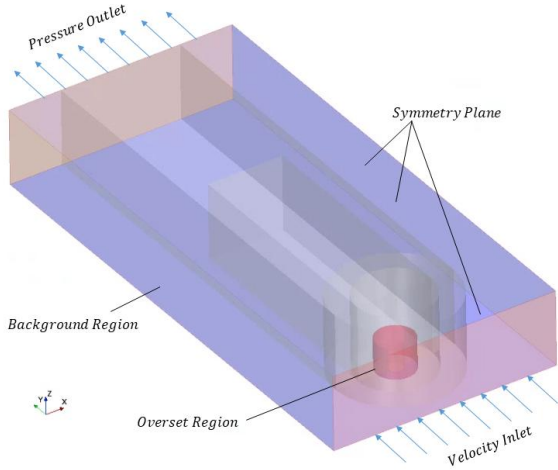


Fig. 4. Domain dimension and Boundary Condition.

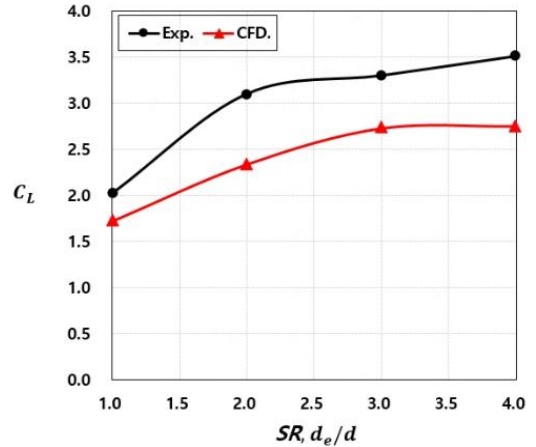
각속도는 실제 RS 운용 값과 유사한 10 rad/s로 설정하였으며, 이에 따른 Velocity Inlet에서의 자유 유동 속도와 레이놀즈수는 Table 1에 나타내었다. Time-step은 Marco et al.(2014) 예비 수치해석에서 검토한 최적값인 0.00125로 설정하였고 물리적 해석 시간은 도출하고자 하는 값의 수렴성이 확보되는 최소시간인 20s로 설정하였다. 수치해석의 수렴성은 잔차 (Residual)가  $10^{-5}$ 에 도달하고  $C_L$ 과  $C_D$ 가 일정해지면 수렴한 것으로 간주하였다.

Table 1. Parameter of Preliminary analysis

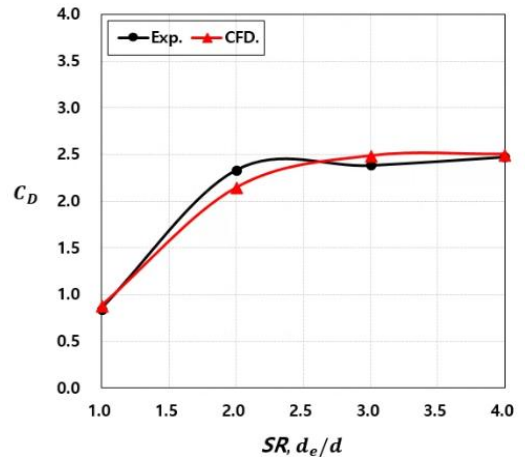
Spin ratio	$\Omega$ (rad/s)	U (m/s)	Re	Time-step (s)	Physical Time (s)
1.0	10	20.0	5.11e+06	0.00125	20
2.0		10.0	2.55e+06		
3.0		6.67	1.70e+06		
4.0		5.00	1.28e+06		

수치해석을 통해  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_L/C_D$  를 구하였으며, Fig. 5는 Marco et al.(2014)의 수치해석 결과를 비교한 것이다. 그리고  $C_L$ 와  $C_D$ 는 식(1)로 정의된다. 여기서, L은 양력(N),  $\rho$ 는 밀도( $kg/m^3$ ), S는 면적( $m^2$ ), U는 속도( $m/s$ )이다.

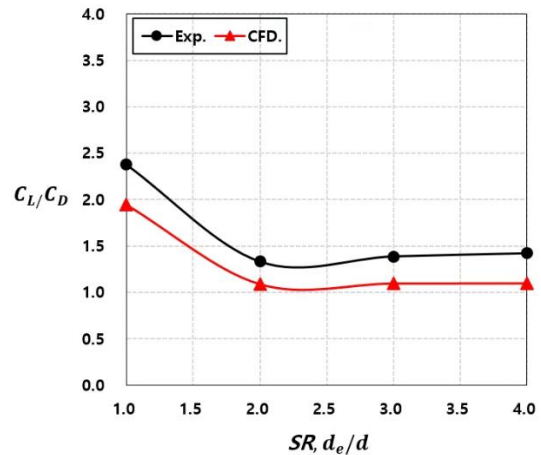
$$C_L = \frac{L}{0.5\rho S U^2}, \quad C_D = \frac{D}{0.5\rho S U^2} \quad (1)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Comparison of  $C_L$ ,  $C_D$  and  $C_L/C_D$  between experiment and CFD graph.

수치해석 결과, SR이 증가함에 따라  $C_L$ ,  $C_D$ 도 함께 증가하는 경향을 보였다.  $1 < SR < 2$  일 경우,  $C_L$ ,  $C_D$ 가 크게 증가하였으며,  $2 < SR < 4$  일 경우, 소폭 증가하는 경향을 보였다. 이는 SR이 커질수록  $C_L$ 이 증가하는 폭보다  $C_D$ 가 증가하는 폭이 더 크므로 공기역학적 효율인  $C_L/C_D$  값이 작아지기 때문이다.

전반적인 결과에 대한 경향성은 Marco et al.(2014)와 유사한 것으로 나타났으나, SR=2에서  $C_L$ 는 최대 25% 오차가,  $C_D$ 는 최대 8%의 오차가 발생하였다. 이는 RS 성능에 가장 큰 영향을 미치는  $y^+$  값 즉, 경계층 개수 및 두께 등의 차이에서 기인 된 것으로 판단하였다.

### 3.3 매개변수에 따른 수치해석 조건

예비 해석을 통한 수치해석의 타당성을 검증하였고 동일한 격자와 경계조건에서 SR, AR의 변화 및 EP 적용에 따른 추가 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 SR과 AR의 변화에 따른 RS의  $C_L$ ,  $C_D$ 의 영향과 EP 적용 시,  $de/d$  변화에 따른 효과를 비교·분석하고 이를 바탕으로 최적의 공기역학적 효율을 내는 RS의 SR, AR,  $de/d$  조건을 선정하고자 하였다.

EP가 있는 RS는 EP가 없는 RS보다 양력이 2배 증가한다는 Marco et al.(2014)의 선행연구 결과가 있으므로, EP 유무에 따른 비교조건은 설정하지 않았다. 또한 SR과  $de/d$ 의 값이 증가할 때  $C_L$ ,  $C_D$  값이 어떻게 변화하는지 비교하였다.

수치해석에 사용된 RS의 형상은 Fig. 6과 같으며, X축은 SR과  $de/d$ 를, Y축은 AR로 나타내었다. 그리고 매개변수인 SR, AR 및  $de/d$ 에 따른 해석 Case는 Table 2에 제시하였다.

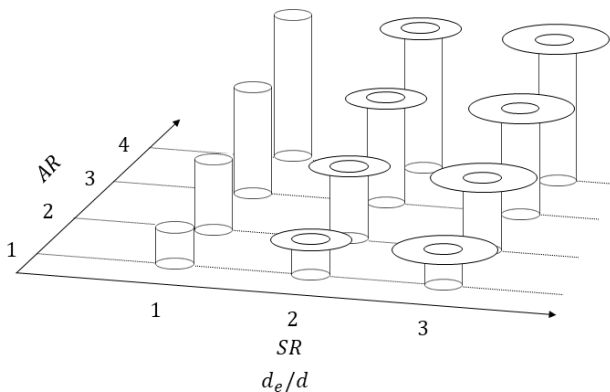


Fig. 6. Geometry of Rotor Sails tested.

Table 2. Values of analyzed Variables

AR	SR	de/d
1.0	1.0	1.0
	2.0	2.0
	3.0	3.0
2.0	1.0	1.0
	2.0	2.0
	3.0	3.0
3.0	1.0	1.0
	2.0	2.0
	3.0	3.0
4.0	1.0	1.0
	2.0	2.0
	3.0	3.0

## 4. 수치해석 결과 및 고찰

### 4.1 SR 변화에 따른 수치해석 결과

Fig. 7은 X축 SR, Y축 AR 변화에 따른  $C_L$ 과  $C_D$  및 공기역학적 효율을 나타낸 그래프이다.

RS에 의해 발생하는 공기역학적 힘은 SR에 의해 영향을 받는다. 끝단 플레이트가 설치되어 있지 않거나 AR이 클수록,  $C_L$ 와  $C_D$ 는 SR에 비례하는 경향을 보인다(Marco, 2015). Figs. 7(a)와 7(b)에서는 SR이 증가할수록  $C_L$ 와  $C_D$ 는 비례하여 증가하는 추세를 보였다. 이는 RS에 의해 발생하는 공기역학적 힘은 EP가 설치되어 있지 않거나 SR이 클수록,  $C_L$ 와  $C_D$ 는 SR에 비례하는 경향을 보인다는 Marco(2015)의 결과와 유사하였다.

또 회전속도가 증가할수록 RS 주변의 유동 속도가 빨라졌기 때문에 높은 양력을 얻기 위해서는 높은 SR을 적용하는 것이 효율적이다. 그러나 공기역학적 효율 부분에서는 SR=2 이상에서  $C_D$ 가 커지기 때문에 높은 SR을 적용하는 것은 비효율적이라고 분석하였다(Hu et al., 2019).

### 4.2 AR 변화에 따른 수치해석 결과

AR이 증가할수록  $C_L$ 과  $C_D$ 는 증가하는 경향을 보였고, 공기역학적 효율성도 증가하였다. 또한  $de/d=2$ 에서  $C_L$ 과  $C_D$  증가 폭이 가장 큰 것을 확인하였다. AR=1의 경우,  $SR \leq 2$ 에서는  $C_L$ 과  $C_D$  값이 역전되었고  $2 < SR$ 에서는 다시  $C_L$ 이  $C_D$ 보다 크게 나타났다. 이는 AR=1인 조건에서 발생하는 양력이 작기 때문에 빠른 자유 유동을 가지는  $SR \leq 2$  조건에서 보다 항력이 크게 작용하였기 때문이다. 그래서

RS의 주요 형상 인자는 AR이며 RS가 공기역학적 힘을 생성하는 데에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

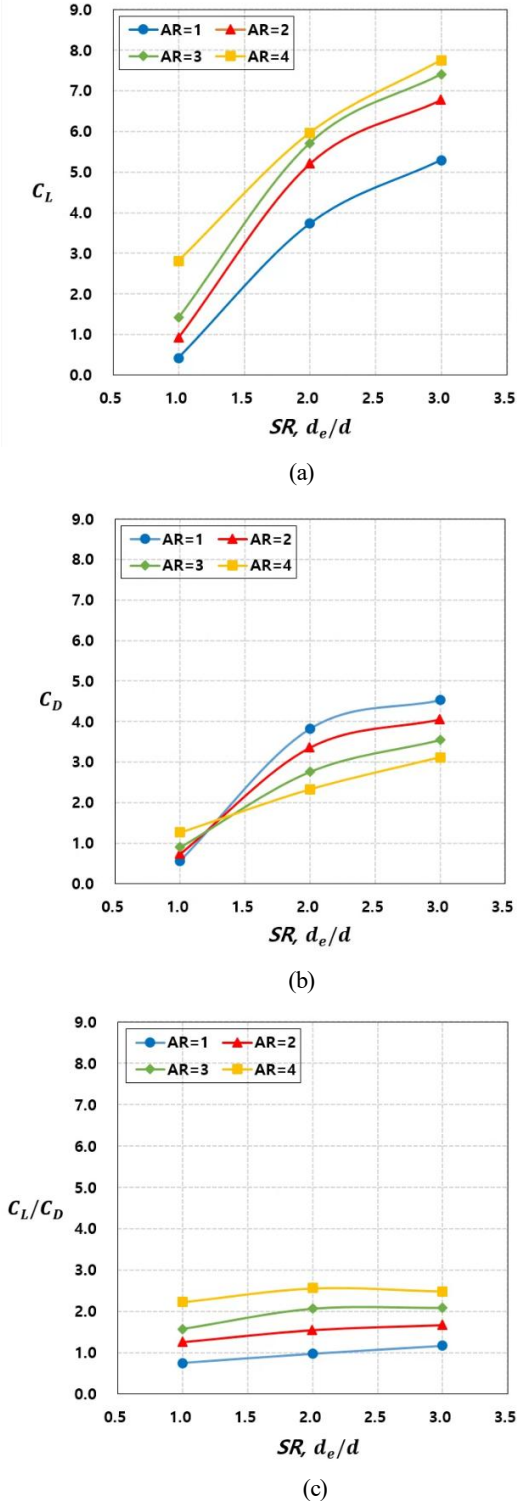


Fig. 7. Response curves for  $C_L$ ,  $C_D$  and  $C_L/C_D$  at various SR, AR and  $de/d$  for RS.

#### 4.3 EP 변화에 따른 수치해석 결과

EP는 Prantl(1925)이 처음 제안한 장치로, 공기역학적 효율을 최적화하기 위해 RS 상부에 설치한 플레이트이다. RS에 설치함으로써 RS 후류 부분에 와류 현상을 완화하여  $C_L$ 을 향상시키는 역할을 한다.

Figs. 7(a), 7(b)와 같이 EP 미설치 조건( $SR=1$ )과 EP 설치 조건( $SR=2$ )을 비교하였을 때, EP 설치 시  $C_L$ 과  $C_D$ 가 크게 증가하였다. EP 유무에 따른  $C_L$ ,  $C_D$ 의 증가 폭을 분석한 결과 AR이 작을수록 증가 폭이 컸으며  $C_L$ 이 최대 약 7배 정도 증가하였다. 또한 SR과  $de/d$ 가 증가함에 따라  $C_L$ 과  $C_D$ 가 함께 증가하는 경향을 보였다. 이는 Marco et al.(2014)에서 제시한  $SR=1$ 에서는  $de/d$ 가 작을수록 더 작은  $C_D$ 를 도출하였고 그 이상의 SR에서는  $de/d$ 가 클수록 작은  $C_D$ 를 얻을 수 있다는 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 SR이 증가할수록 EP 지름도 함께 커지나,  $1 < SR < 2$ 에서 증가한 폭 대비  $2 < SR$ 에서는  $C_L$ 과  $C_D$  값이 소폭 증가하는 추세를 보였다. 따라서 높은 SR에서는  $de/d$  값이 SR의 증가에 따라 선형적으로 증가하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.4 매개변수에 따른 속도장과 와류장의 비교

Fig. 8은 매개변수 변화조건에 따른 속도장을 나타낸 것이다. Figs. 8(a)와 8(b)는 AR=2일 때 SR과  $de/d$  변화에 따른 후류 속도장을 비교한 것이고, Figs. 8(c)와 8(d)는 AR=4일 때 SR과  $de/d$  변화에 따른 후류 속도장을 비교한 것이다.

Figs. 8(a)와 8(c)에서는  $SR=1$ 인 경우로써 자유 유속이 빠르고 EP가 없기 때문에 RS의 후류에서 와류 이탈(Vortex shedding) 발생이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 Figs. 8(b)와 8(d)에서는  $SR=3$ 으로 자유 유속이 느리며 또한 지름이 큰 EP가 적용됨에 따라, 후류는 거의 Steady 상태에 가깝게 나타났다.

Figs. 8(a)와 8(c)를 비교하였을 때, Fig. 8(a)는 AR이 작아서 Vortex shedding이 선명하게 관찰되었고 와류의 폭도 넓게 분포해 있었으나, Fig. 8(c)에서는 Fig. 8(a)에 비해 Vortex shedding과 폭이 모두 감소하였고 길이도 길어지는 경향을 보였다.

Fig. 9는 매개변수 변화조건에 따른 와류장을 나타낸 것이다. Figs. 9(a)와 9(b)는 AR=2일 때 SR과  $de/d$  변화에 따른 와류장을 비교한 것이고, Figs. 9(c)와 9(d)는 AR=4일 때 SR과  $de/d$  변화에 따른 와류장을 비교한 것이다.

Figs. 9(a)와 9(b)를 비교하였을 때 EP가 없는 RS에서 와류가 강하게 나타났고 Figs. 9(c)와 9(d)에서도 동일한 경향을 보였다. Fig. 9(d)에서는 SR과  $de/d$ 가 커짐에 따라 와류가 거의 사라졌고 난류 운동 에너지도 낮게 나타났다.

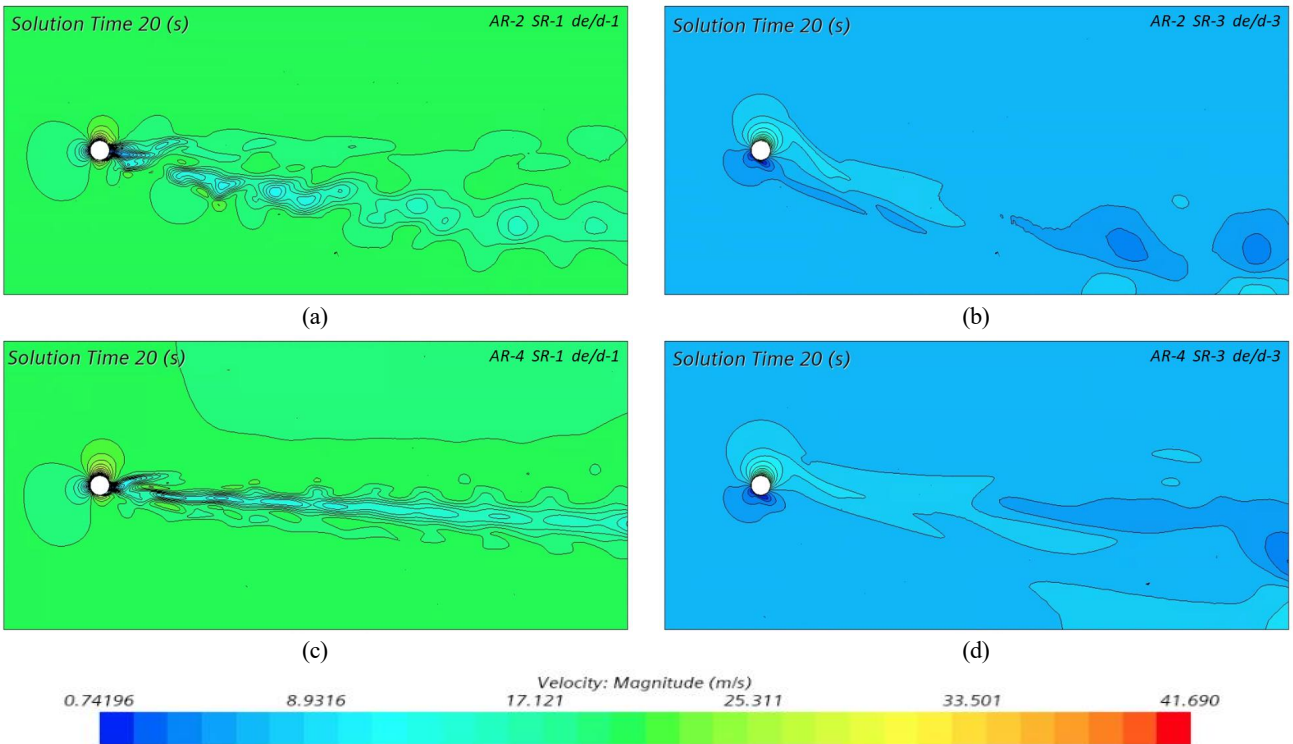


Fig. 8. Velocity field for each variable. (a) AR=1, SR=1,  $de/d=1$ , (b) AR=1, SR=3,  $de/d=3$ , (c) AR=4, SR=1,  $de/d=1$ , (d) AR=4, SR=3,  $de/d=3$ .

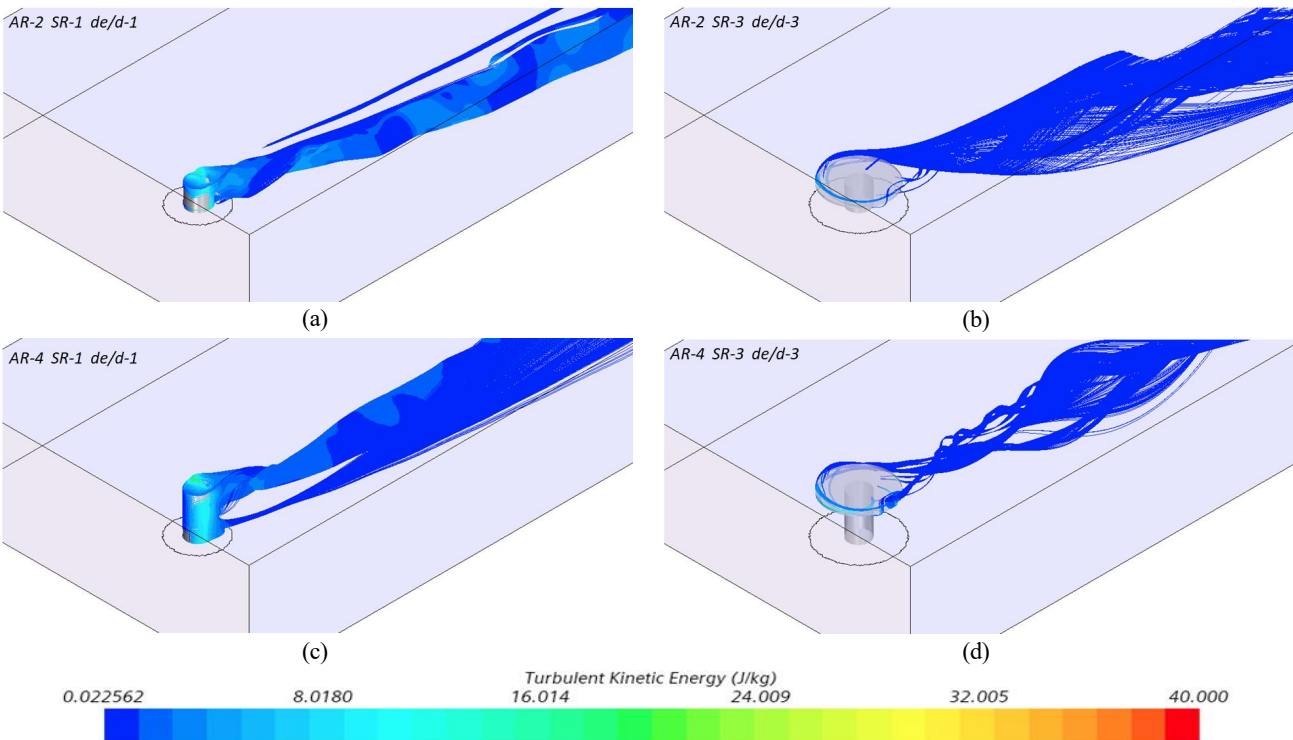


Fig. 9. Vortex structures for each variable. (a) AR=1, SR=1,  $de/d=1$ , (b) AR=1, SR=3,  $de/d=3$ , (c) AR=4, SR=1,  $de/d=1$ , (d) AR=4, SR=3,  $de/d=3$ .

## 5. 결론

본 연구에서는 CFD를 활용하여 매개변수 SR, AR 및 EP에 따른 RS의 공기역학적 힘과 RS 주위의 유동특성을 수치해석적으로 분석하였다. 그 결과 수치해석 모델에 따른 경계조건을 바탕으로 해석한 결론은 다음과 같았다.

(1) RS의 주요 형상 인자는 SR과 AR이고 회전하는 RS의 공기역학적 힘을 생성하는데 큰 영향을 미쳤으며, SR과 AR이 증가함에 따라  $C_L$ 도 비례하여 증가하였다.

(2) EP 적용에 따른  $C_L$ 과  $C_D$ 의 차이가 크며, EP가 설치된 RS에서의 공기역학적 효율이 더 높은 것으로 확인되었다. 또한 최대 양력을 얻기 위해 SR에 따라 EP 지름의 선택이 달라지며, SR=1에서는 작은 EP를, 그 이상의 SR에서는 큰 EP를 사용하는 것이  $C_D$ 를 적게 하는데 더 효과적이었다.

(3) EP가 없는 RS에서는 SR이 증가함에 따라 RS의 후류에서의 와류도 확대되는 경향을 보였고, SR=1로 작을 때에는 와류 이탈 현상이 뚜렷하게 보였으나,  $2 < SR$ 일 때에는 거의 정상상태가 되는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 본 연구에서는 매개변수인 SR, AR 및 EP에 따른 단일 RS에 대해서 분석하였으나, 추후 다중 RS 배치에 따른 영향 및 후류 유동특성에 대해 연구를 추가로 진행할 계획이다.

## Abbreviations

---

<i>AR</i>	: 종횡비(Asspect Ratio)
$C_L$	: 항력계수(Lift Coefficient)
$C_D$	: 양력계수(Drag Coefficient)
<i>d</i>	: 로터세일 지름(m)
$d_e$	: 로터세일 끝단 플레이트 지름(m)
<i>EP</i>	: 로터세일 끝단 플레이트(End plate)
<i>H</i>	: 로터세일 높이(m)
$\Omega$	: 각속도(=rad/s)
<i>Re</i>	: 레이놀즈 수(= $U \cdot d/\nu$ )
<i>RS</i>	: 로터세일(Rotor Sail)
<i>SR</i>	: 속도비(Spin Ratio)
<i>URANS</i>	: Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes
<i>U</i>	: 자유 유동 속도(m/s)
$\omega$	: 로터세일 각속도

---

## References

- [1] Badalamenti, C. and S. A. Prince(2008), Effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow, the 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, USA.
- [2] Bae, C. S. and W. J. Yang(2022), Analysis of the Importance of Eco-friendly Ship Dissemination Policy using the Analytic Hierarchy Process in Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Research Paper Vol. 28, No. 1, pp. 117-124
- [3] Bordogna, G., S. Muggiasca, S. Giappino, M. Belloli, J. A. Keuning, and R. H. M. Huijsmans(2020), The effects of the aerodynamic interaction on the performance of two Flettner rotors, Final version published in: Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 196.
- [4] De Marco, A., S. Mancini, and C. Pensa(2014), Preliminary analysis for marine application of Flettner rotors, in Proceedings of the 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime (INT-NAM '14), Istanbul, Turkey, October.
- [5] De Marco, A., S. Mancini, C. Pensa, R. Scognamiglio, and L. Vitiello(2015), Marine application of flettner rotors: numerical study on a systematic variation of geometric factor by DOE approach, the 6th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE '15), vol. 1, Rome, Italy.
- [6] De Marco, A. and S. Mancini(2016), Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2016, Article ID 3458750, p. 12.
- [7] Devaraj, V. and J. Raju(2017), Feasibility Study of Flettner Rotor Propulsion Using Numerical Analysis, 2017 IJEDR, Volume 5, Issue 4.
- [8] Enercon Wind Company(2013), Enercon E-ship 1: a wind-hybrid commercial cargo ship in Proceedings of the 4th Conference on Ship Efficiency.
- [9] Hu, Jiangping, Yanxia Wang, Jinfang Wei, and Jingpu Chen(2019), The Dynamic Performance of a Rotating Frustum of a cone, in Proceedings of Sixth International Symposium on Marine Propulsors, smp'19, Rome, Italy.
- [10] Li, B., R. Zhang, B. Zhang, Q. Yang, and C. Guo(2021), An assisted Propulsion device of vessel utilizing wind energy based on magnus effect in Proceedings of Applied Ocean Research Volume 114, September 2021.



- [11] Prandtl, L.(1925), The Magnus effect and wind-powered ships, Naturwissenschaften, vol. 13, pp. 1787-1806.
- [12] Reid, E. G.(1924). Tests of rotating cylinders, NACA TN 209, pp. 10-11.

---

Received : 2022. 05. 02.

Revised : 2022. 06. 20.

Accepted : 2022. 06. 27.