

AOC 2023

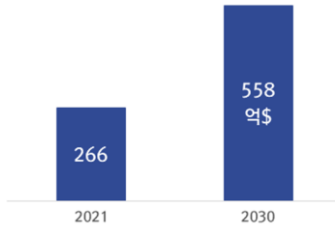
공력성능 향상을 위한 드론 블레이드의 최적형상 도출

창원대학교 기계공학부 조민성

1. 서론

서론

[출처] 정보통신산업진흥원. "드론 시장동향 보고서 2022." 품목별 최신 ICT 보고서(2022): 2-3.



주요 급성장 드론 기술

1위	레이더
2위	적외선 카메라
3위	GPS
4위	수직이착륙기
5위	사진촬영

주요 급성장 드론 수요처

1위	국방
2위	리테일
3위	소비자
4위	공공
5위	엔터테인먼트

- ▶ 드론 시장 규모 2030년 558억 달러
 - 글로벌 드론 시장 2030년까지 연평균 성장률 7.8% 기록할 전망
- ▶ 드론 산업 발전현황
 - 우크라이나 전쟁으로 군용 드론 활용과 이에 따른 시장 성장
 - 국방용 드론시장, 2028년까지 170억 달러로 성장
 - 소비자 드론 시장, 2026년까지 연평균 성장률 15.6%
 - 각국 정부의 드론 도입 증가
 - 스포츠 영화제작 분야에서 드론 활용 증가

우크라이나 전쟁은 사상 첫 드론 전쟁... "60% 중국 DJI 제품"

코로나19 비대면 시대, 이제 드론이 음식배달도 한다



	비행시간 (min)	충전시간 (min)	비행시간/충전시간
X5C	8.5	75	0.11
K200	9	90	0.1
Phantom	13.5	120	0.11
U818A	9	120	0.08
CX-20	13.5	120	0.11
Q500 4k	19	130	0.15
X8C	9	130	0.07

충전시간 ≫ 비행시간
충전시간 대비 비행시간
약 0.07~0.15

드론 활용의 가장 큰 문제점은 "비행시간"

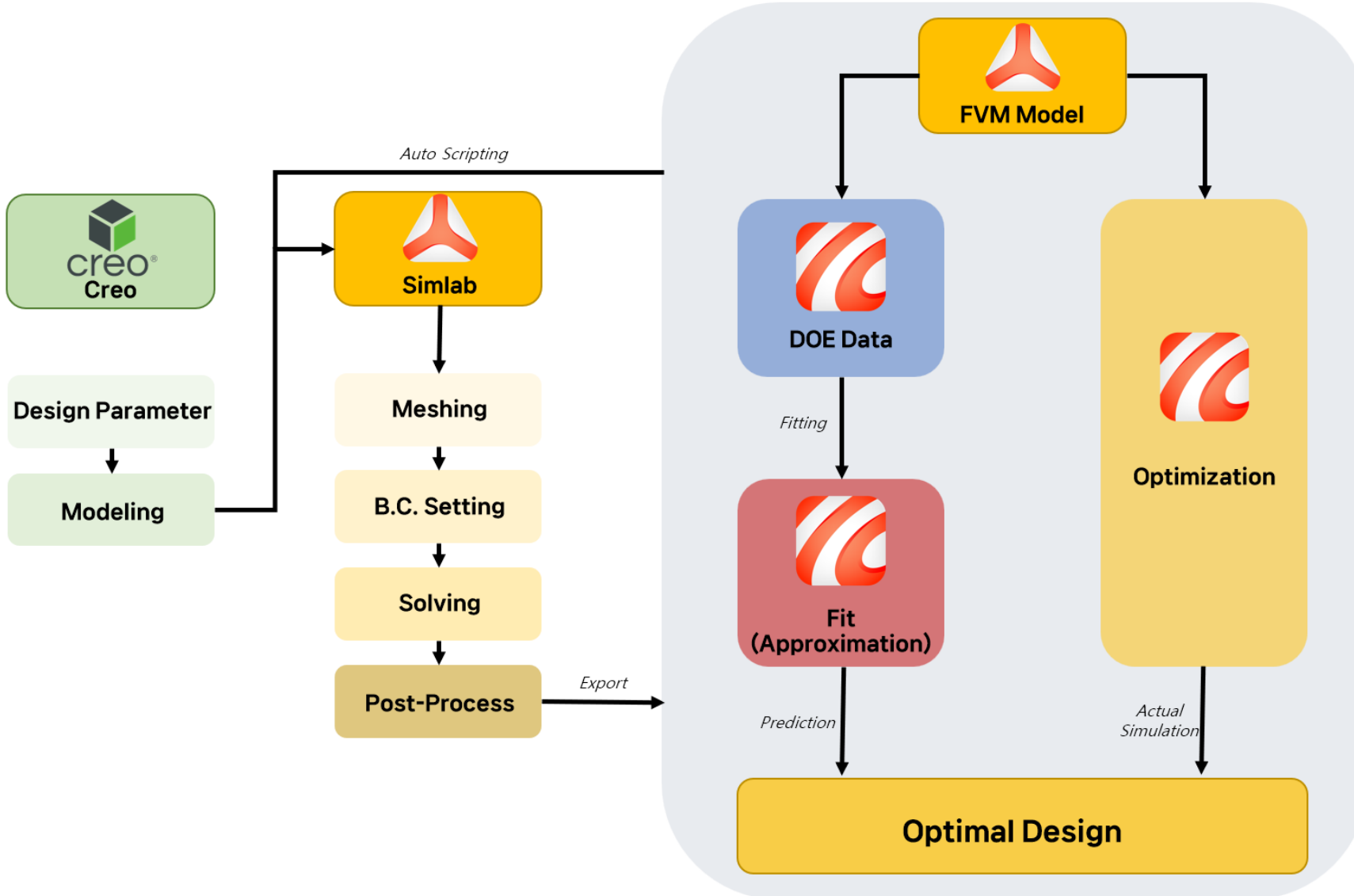
비행시간 늘리기 위해서는 배터리를 크게 해야하나
배터리 용량 ↑ 무게 ↑ 효율 ↓



블레이드의 효율을 늘린다면?
블레이드 공력성능 ↑ 무게 - 효율 ↑



프로세스

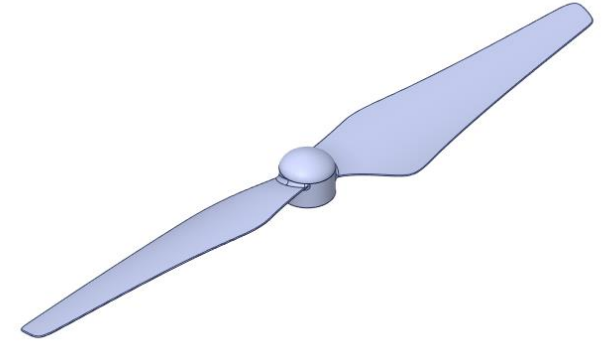


2. 모델링

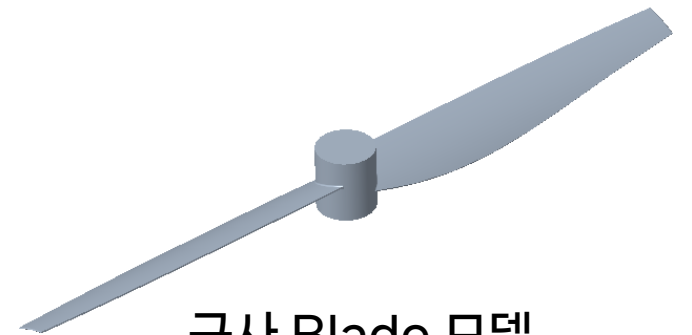
모델링



DJI Phantom 3를 기준으로 모델링

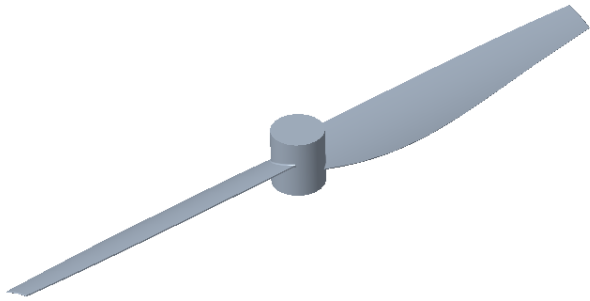


기준 Blade 모델



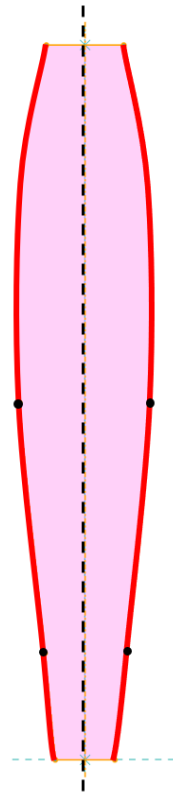
근사 Blade 모델

근사 Blade 모델 - 설계변수 1 (폭)

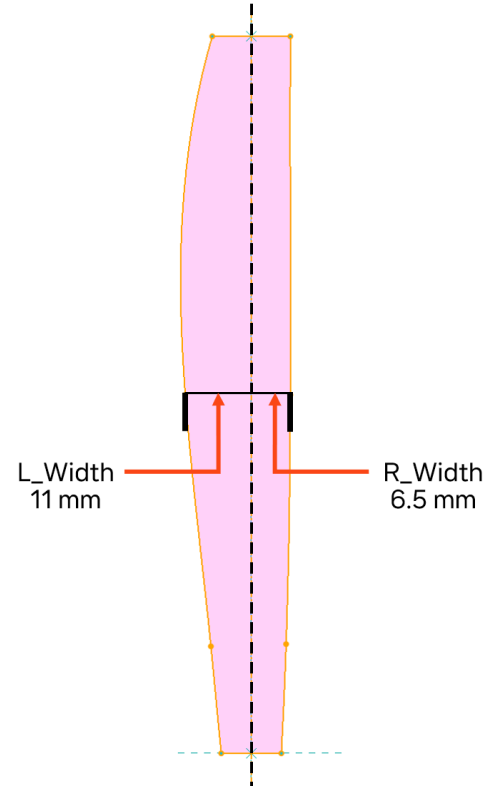


근사 Blade 모델

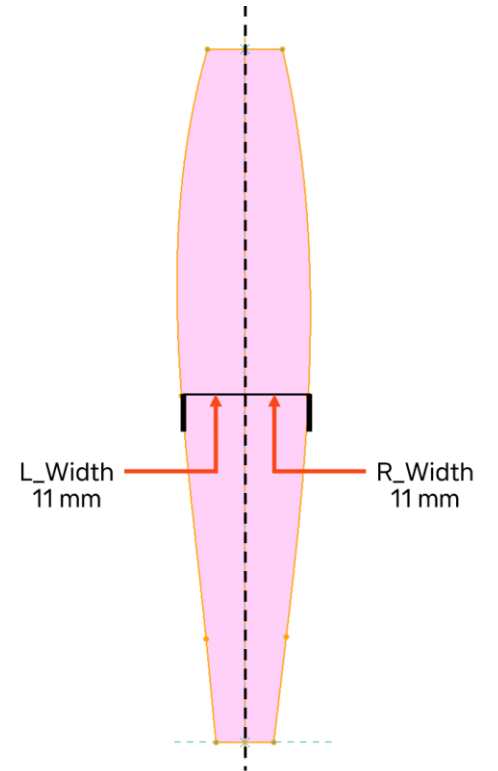
곡선 표현을 위해
스플라인 사용



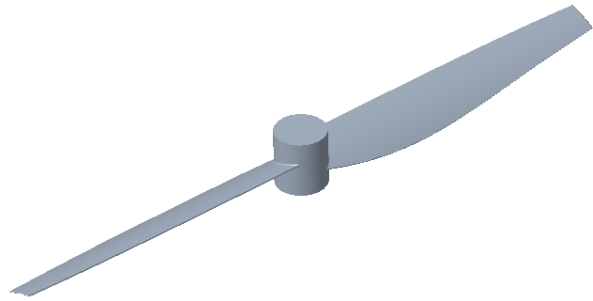
근사 Blade 모델
기본 폭



근사 Blade 모델
변경 폭 예시

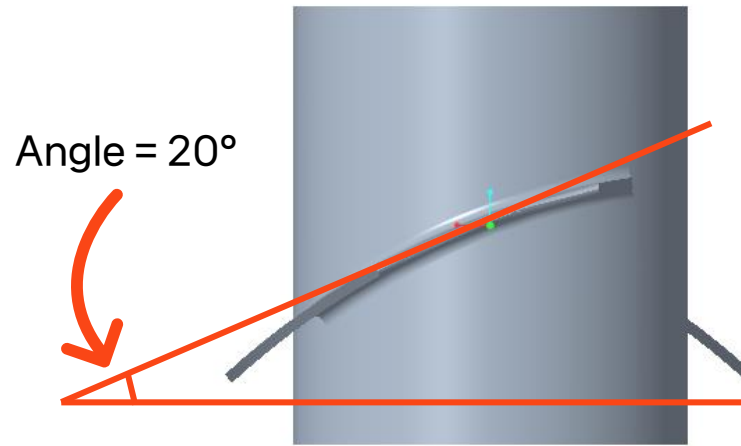


근사 Blade 모델 - 설계변수 2 (각도)

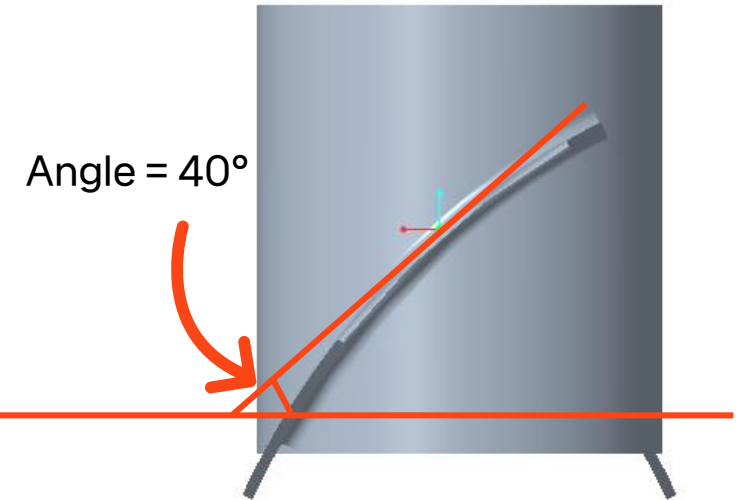


근사 Blade 모델

근사 Blade 모델
기본 각도

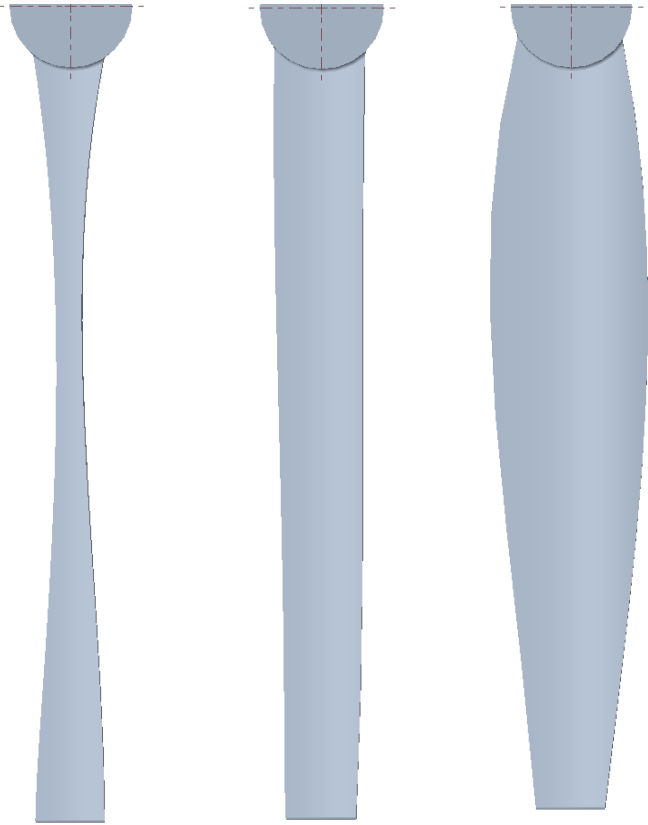


근사 Blade 모델
변경 각도 예시



근사 Blade 모델 - 비교

폭을 바꾼 경우

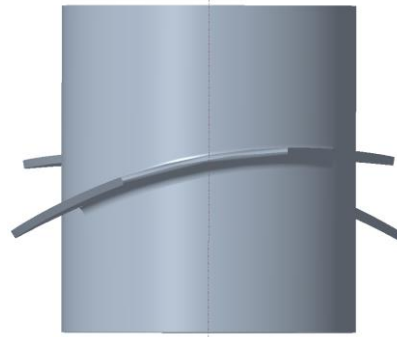


L_Width = 2 mm
R_Width = 2 mm

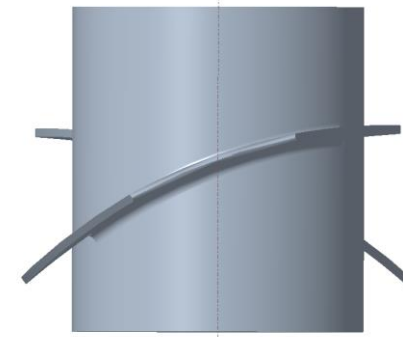
L_Width = 6 mm
R_Width = 6 mm

L_Width = 11 mm
R_Width = 11 mm

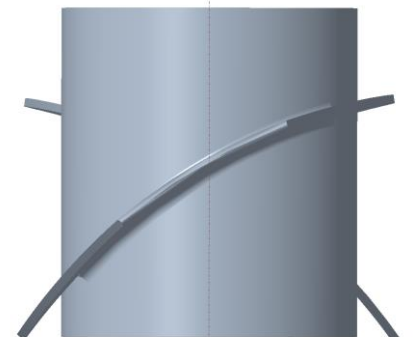
각도를 바꾼 경우



Angle = 10°



Angle = 20°

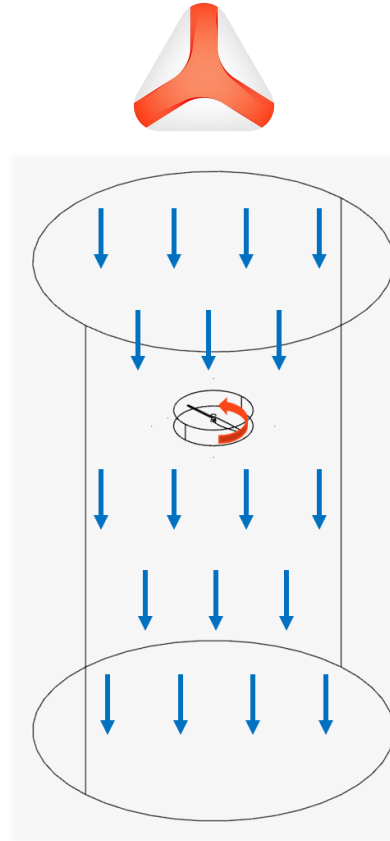


Angle = 30°

설계변수로 다양한 모델 생성 가능

3. CFD 해석

해석모델 정의



특성	값
입구부	5 m/s
회전속도	5000 RPM
물성	Air

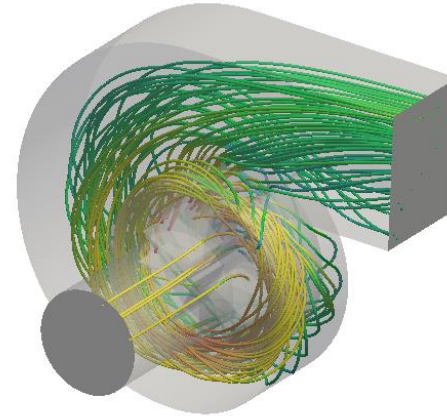
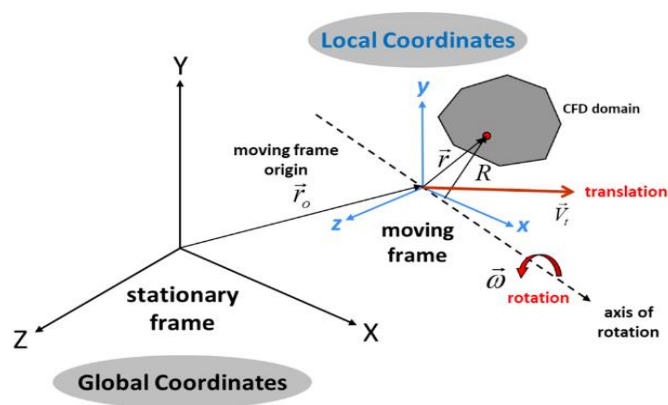
사양 설명서 참고하여 5 m/s의 속도로 상승시
모터가 5000 RPM으로 동작한다고 가정

내부에 속도를 가지는 물체를 가진 유동을 모사하기에는 비용이 많이 소모되므로
물체를 고정시키고 동일한 속도의 유동을 입구영역에 부여하여 근사

Simlab을 이용해서 해석

해석방법 정의

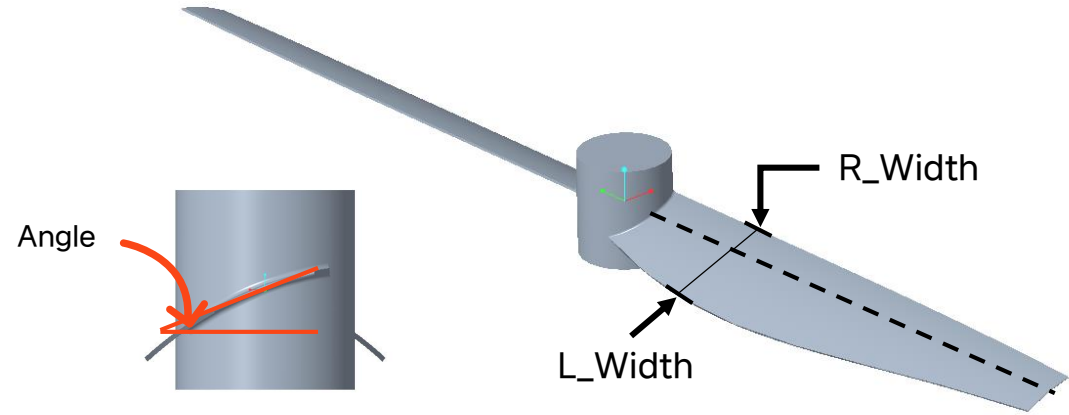
드론 Blade의 회전에 의한 유동을 고려하기 위해 CFD 해석 기법중 Rotating Frame(RF) 기법을 사용
RF 기법은 격자의 변화 없이 원심력과 코리올리 힘에 의한 효과를 부여하여 회전을 모사하는 기법



RF 기법을 적용하기 위해서는 회전력이 직접적으로 고려되는 격자와 회전력이 간접적으로 고려되는 격자가 따로 지정되어 총 회전력을 고려하게 됨

따라서 본 주제인 드론 Blade의 회전에 의한 유동을 모사할 수 있으므로 해석방법으로 선정함

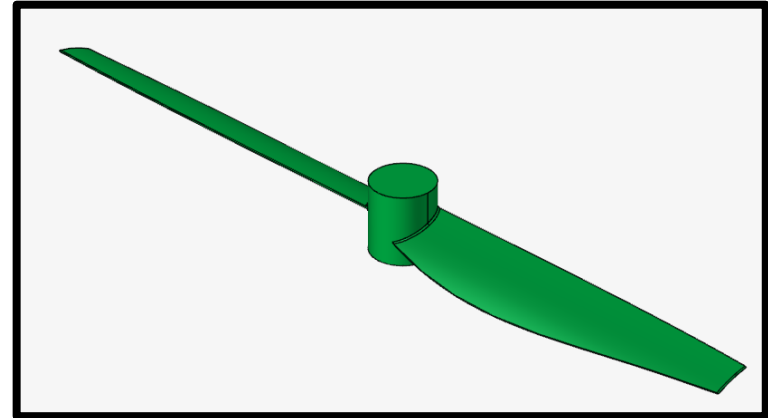
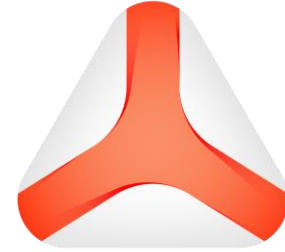
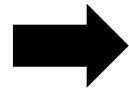
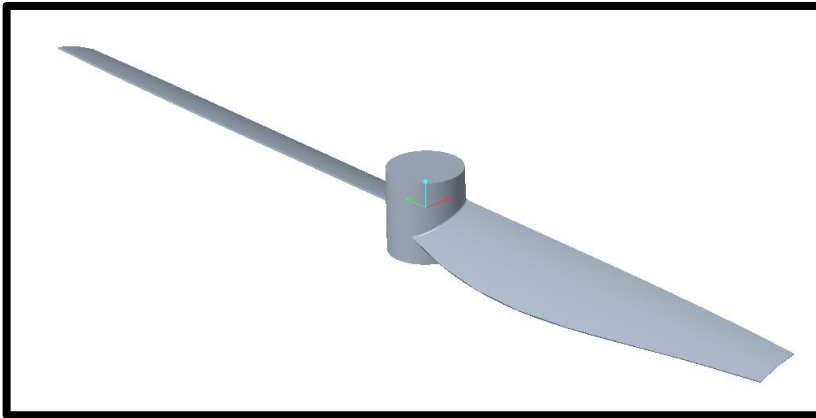
기준 모델링



설계변수	값
Angle	20°
L_Width	11 mm
R_Width	6.5 mm

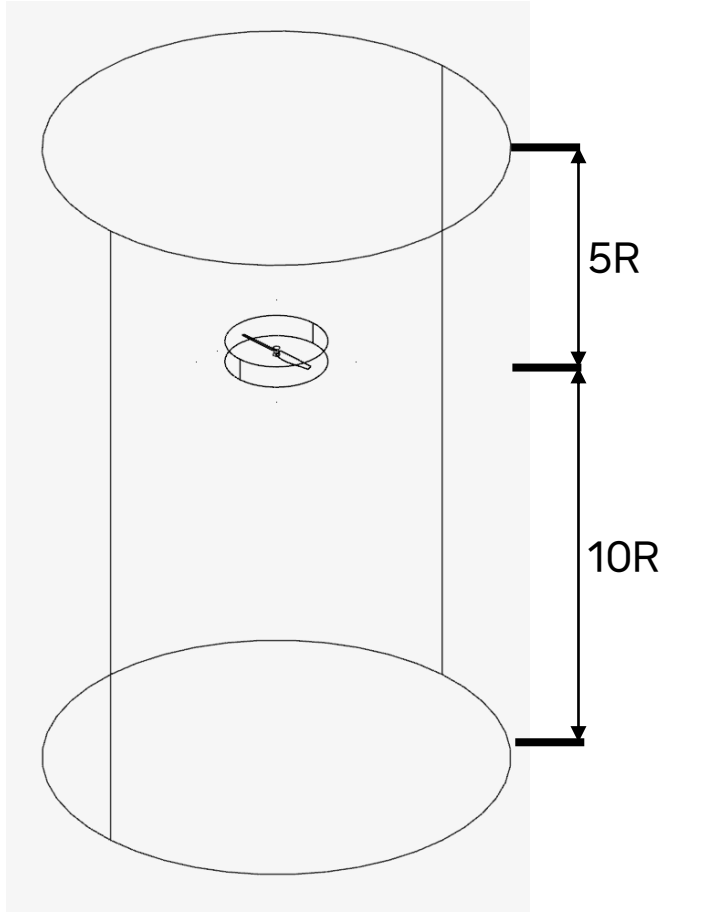
실제 형상과 최대한 유사하게 모델링한 Blade를 기준 유한요소 모델로 사용
최적화시 폭, 각도등이 변화하며 해석을 수행하는데 결과값을 고려할 때 비교할 수 있는 초기값 제공

모델링 전송

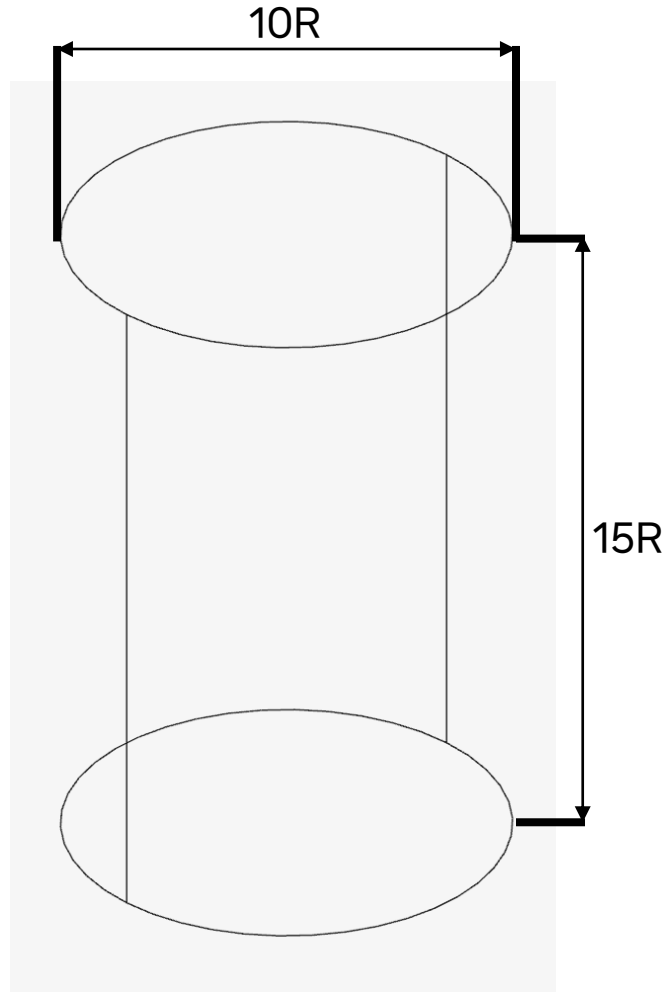


Input Parameter와 Geometry 정보를 함께 전송하여
Parameter 변경하여 Simlab 내부에서 자동으로 모델 재생성

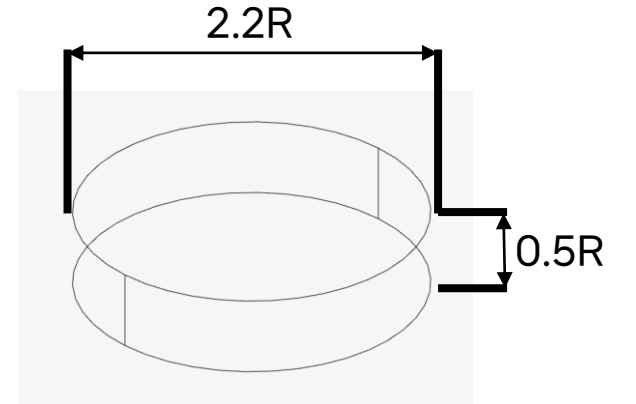
외부유동 모델링 생성



Assembly



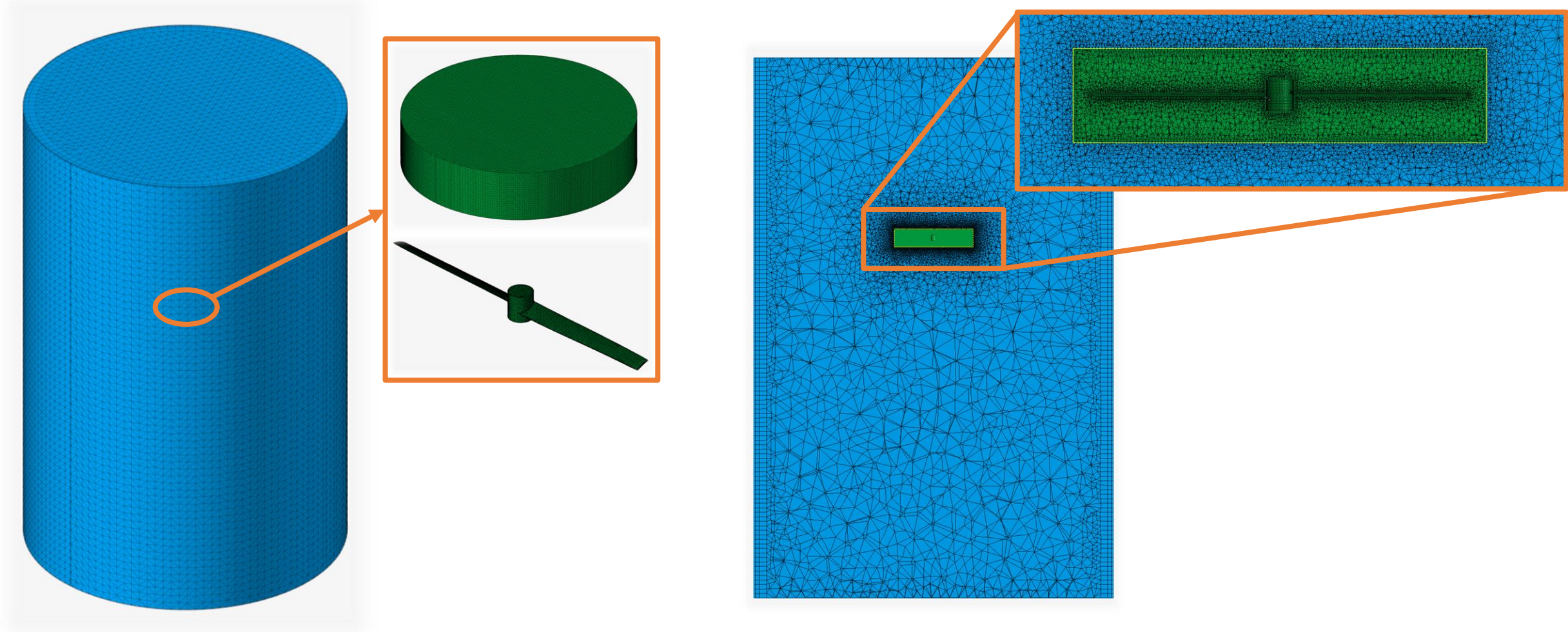
Stationary Domain



Rotate Domain

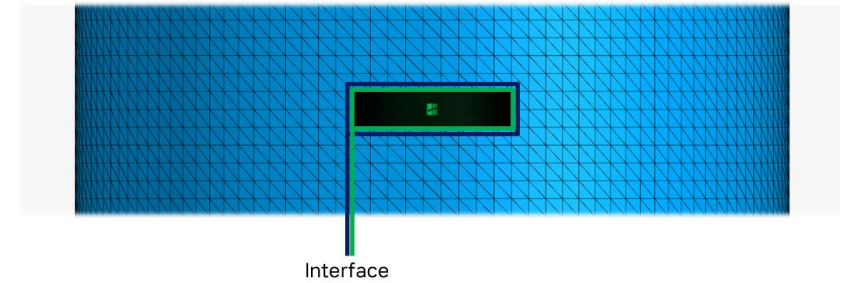
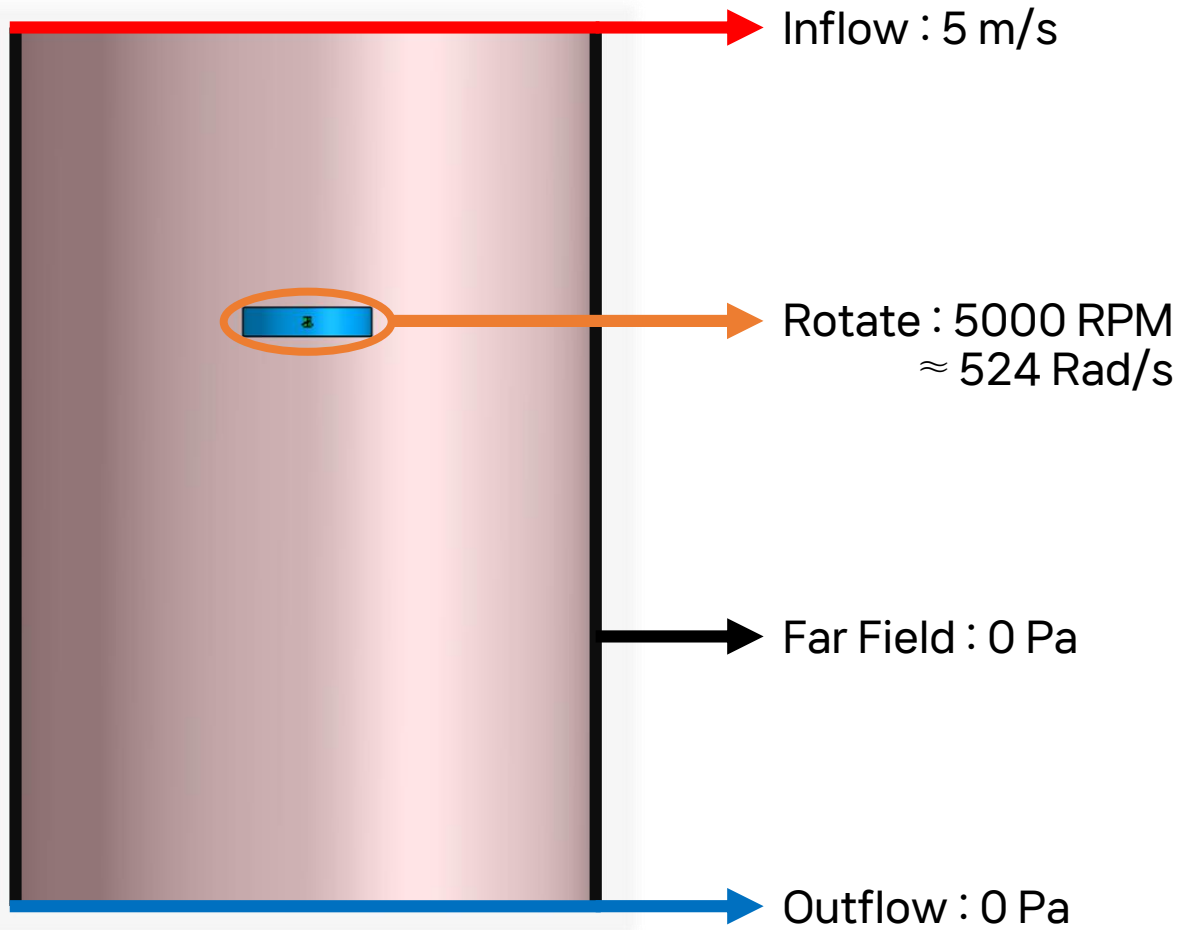
R = 120 mm 로
Blade의 반지름 고려하여
설정하였음

격자 생성



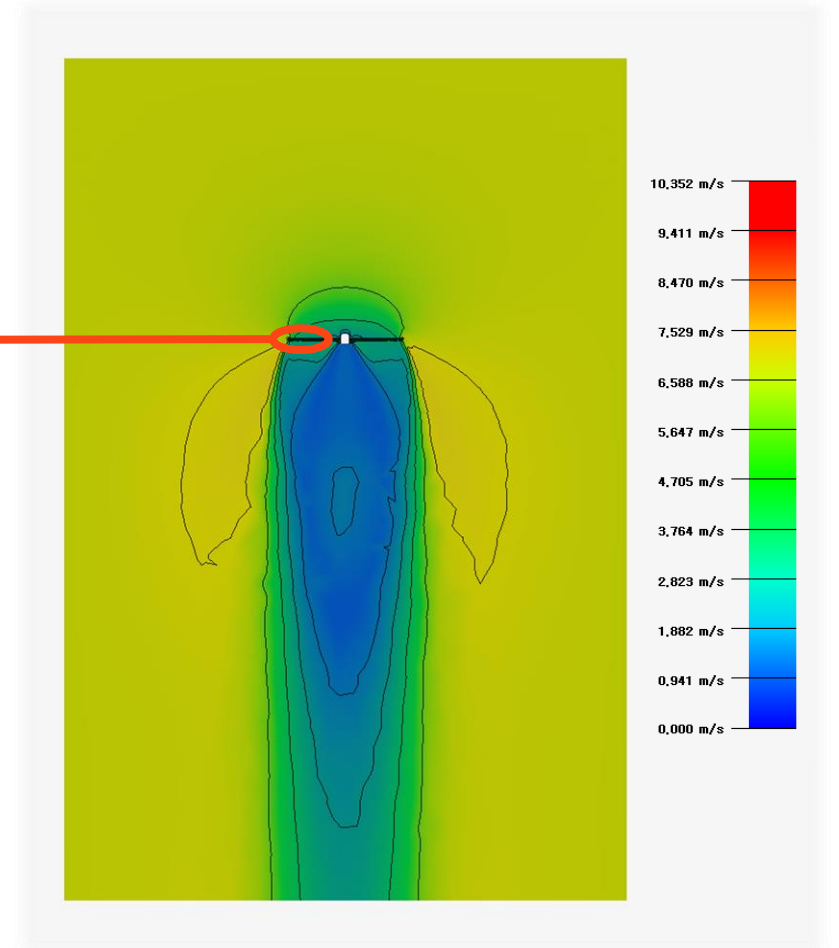
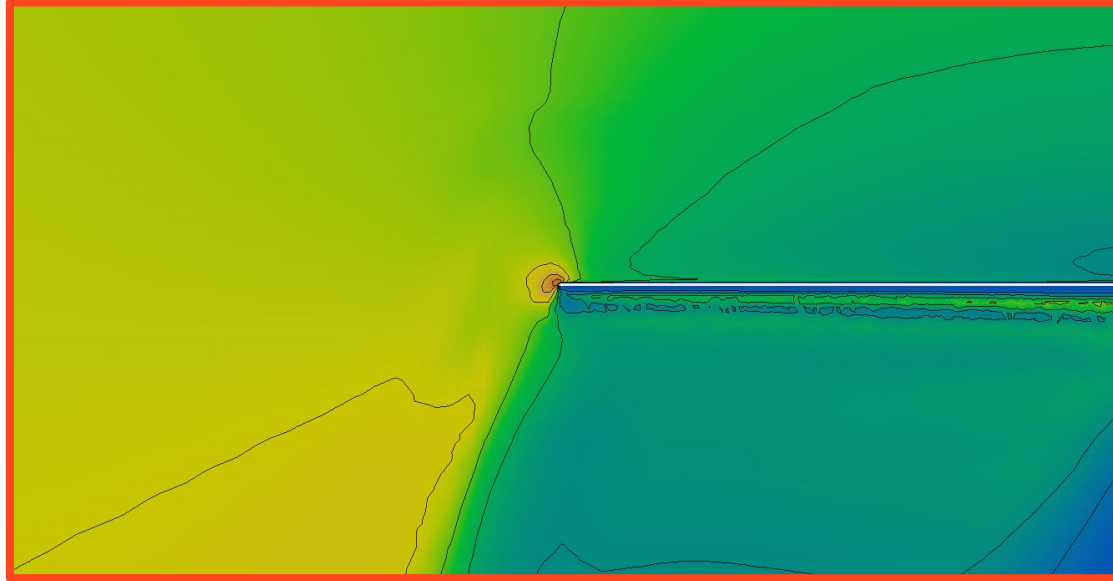
Stationary Domain 격자 수 약 100만 개, Rotate Domain 격자 수 약 80만 개
총 격자 수 180만 개로 격자 생성

경계조건 지정



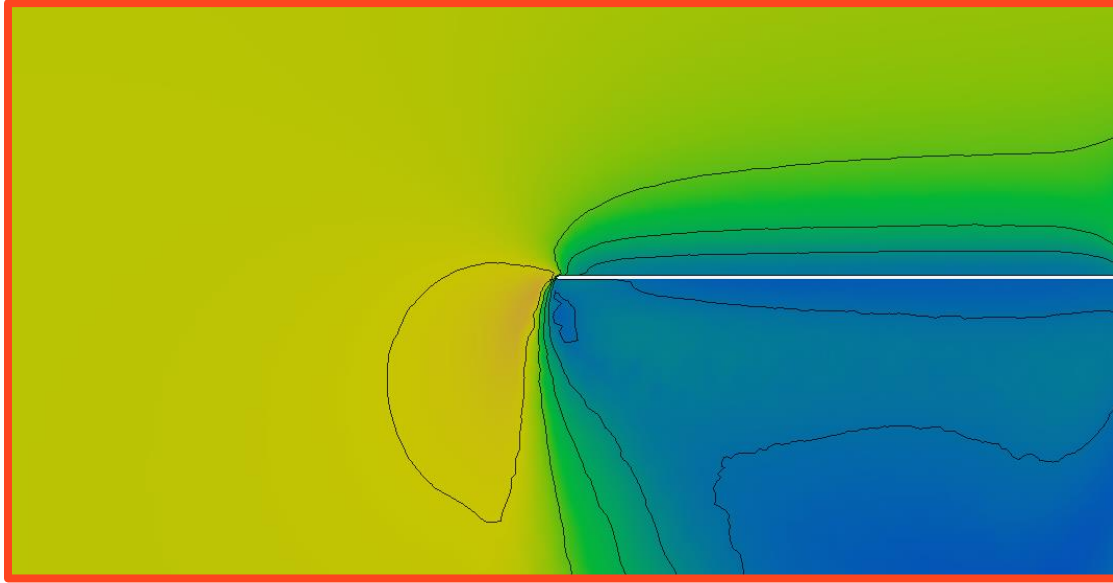
내부 Interface는
자동으로 Auto Wall로
지정되어 물리량 전달됨

해석결과 확인

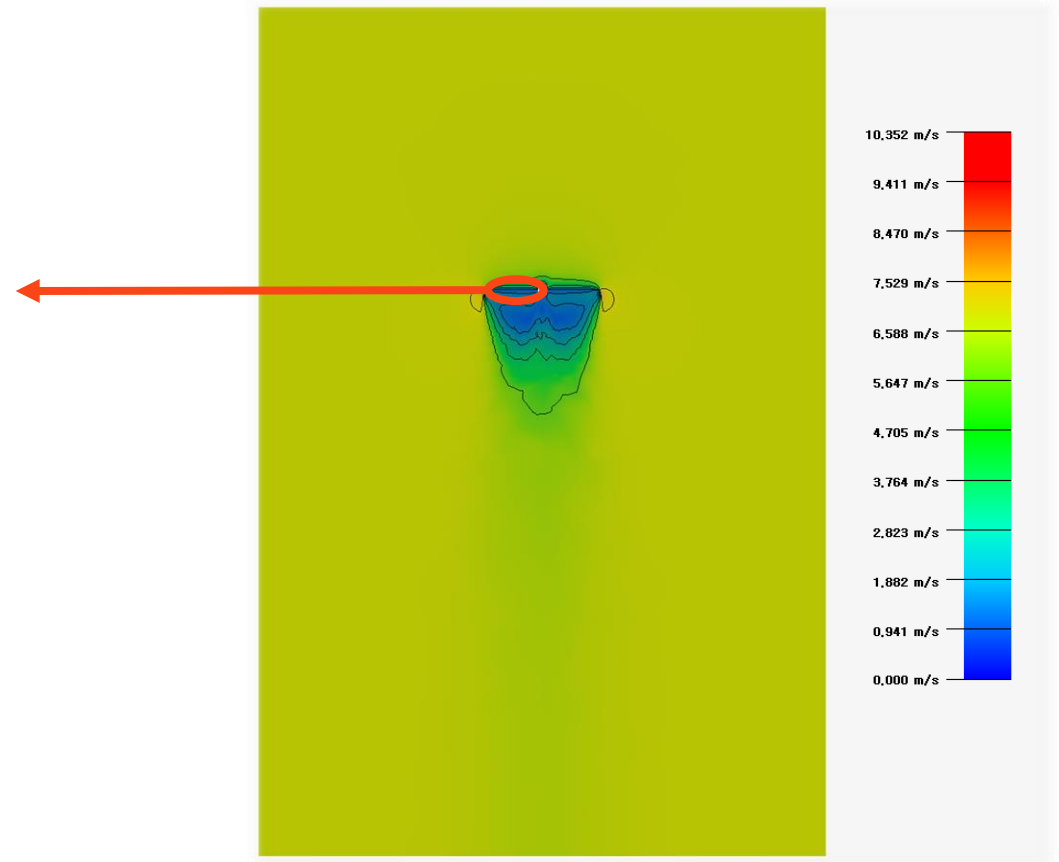


회전효과 부여한 해석 수행 후 결과 확인
회전에 의한 유동박리 확인할 수 있음

해석결과 비교1

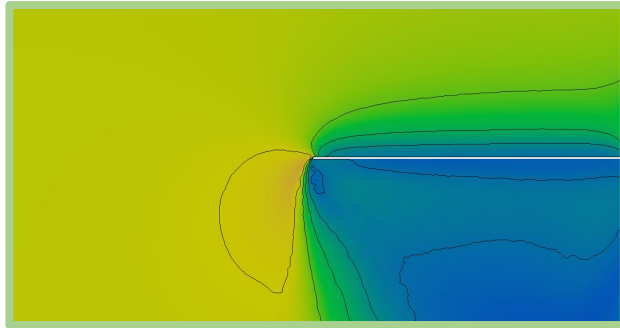


회전효과 부여하지 않은 해석 수행 후 결과 확인
단순한 항력 유동임을 확인할 수 있음

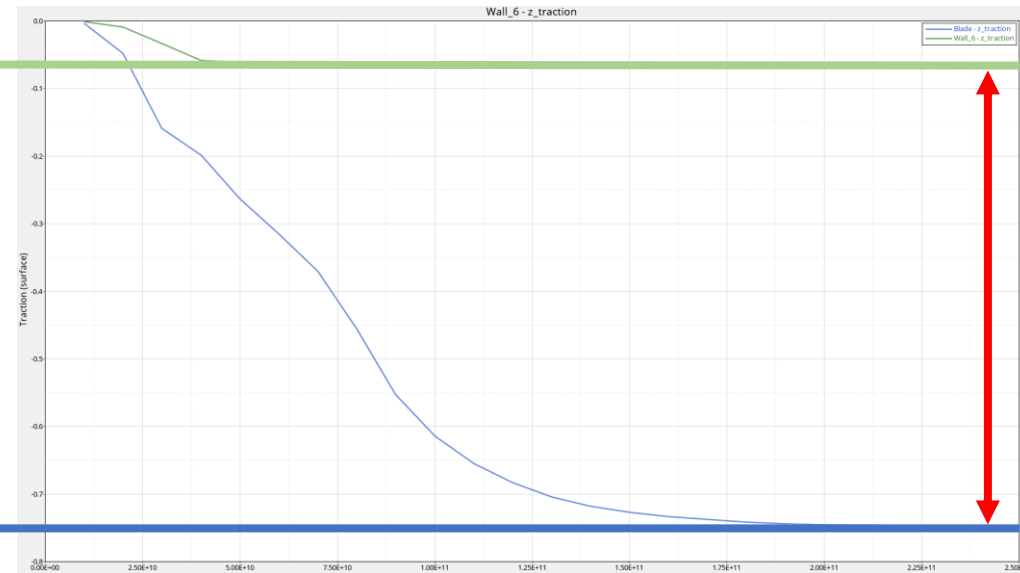
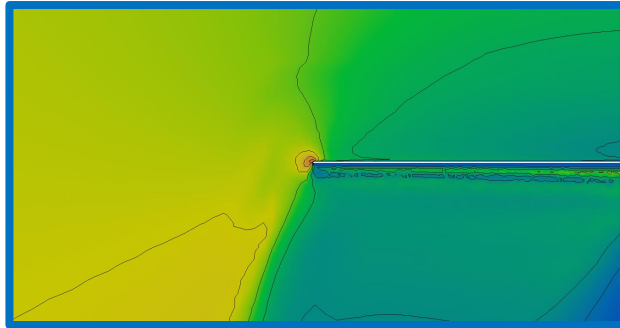


해석결과 비교2

회전효과 X



회전효과 O

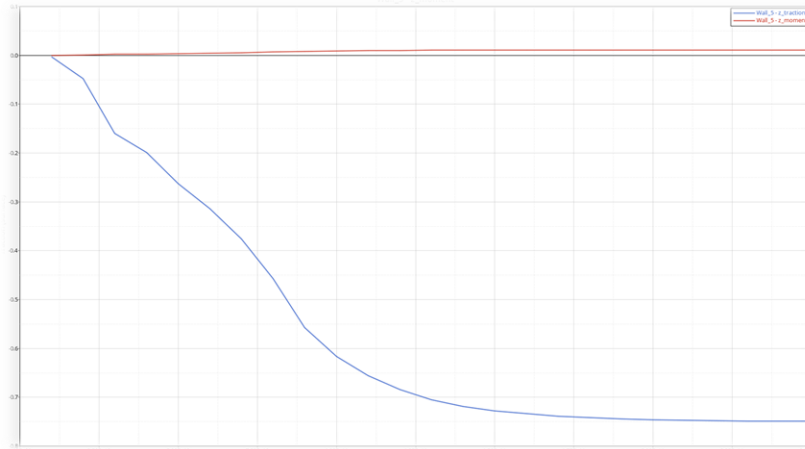


회전효과를 고려하지 않은 케이스와 고려한 케이스를 비교해보았을 때
회전효과를 고려한 경우 회전력에 의한 Lift Force가 결과값에 나타남을 확인함

4. 최적화

최적화 문제 정식화

앞선 초기 모델의 해석을 통해 계산한 Z Direction Traction Force와 Z Moment는 다음과 같음



$$Z \text{ Moment} = 0.0107 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Z \text{ Direction Traction Force} = -0.7492 \text{ N}$$

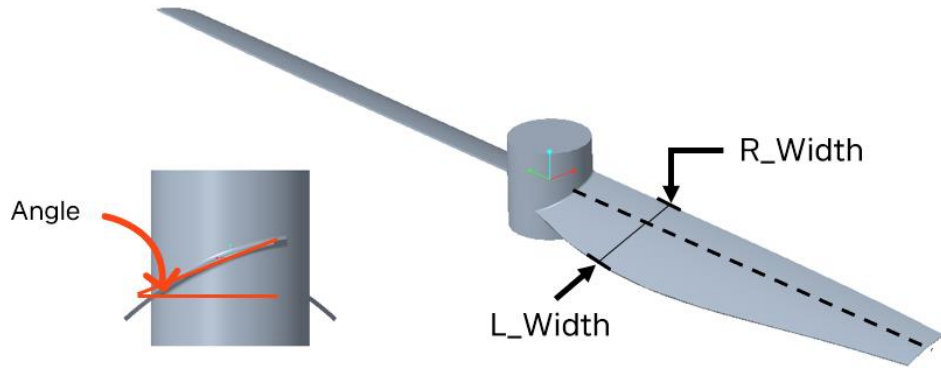
Z Direction Tracton Force를 양력이라고 가정했을 때
결과의 정량적 비교가 가능하도록 양력의 무차원화

$$\text{양력계수 } C_L = \frac{2 \cdot T}{\rho \cdot A \cdot V_\infty^2} \quad T = Z \text{ Direction Traction Force}, \rho = \text{Density}, A = \text{area}, V_\infty = \text{Air Velocity}$$

$$\text{Ex) } T = -0.7492 \text{ N 일 때 } C_L = \frac{2 \cdot (0.7492)}{1.225 \cdot \pi \cdot 0.12^2 \cdot 5^2} = 1.082$$

최적화 문제 정식화

Blade의 L_Width, R_Width, Angle 변화를 통해
양력계수를 최대화 하고, 회전 Moment를 초기값 이하로 하는 것을 목표로 함



Maximize C_L

Subject to $Moment \leq 0.01 N \cdot m$

Maximize C_L

Subject to $Moment \leq 0.01 N \cdot m$

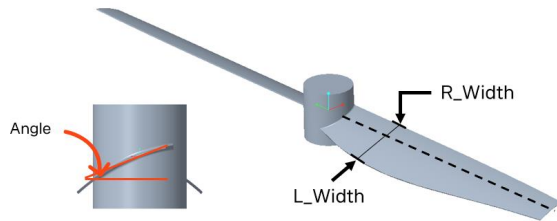
$$10^\circ \leq Angle \leq 30^\circ$$

$$2mm \leq L_Width \leq 11mm$$

$$2mm \leq R_Width \leq 11mm$$

DOE

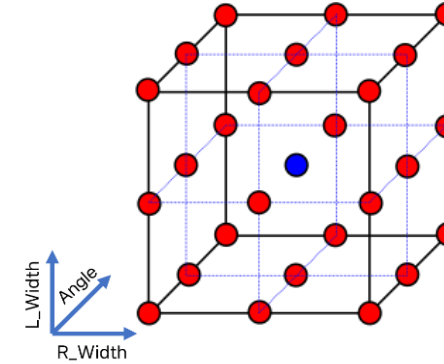
최적화를 위해 Full-Factorial 방법 이용하여 3개의 입력변수에 대해 3 Level DOE 실시함
 Runs = $3^3 = 27$



$$10^\circ \leq \text{Angle} \leq 30^\circ$$

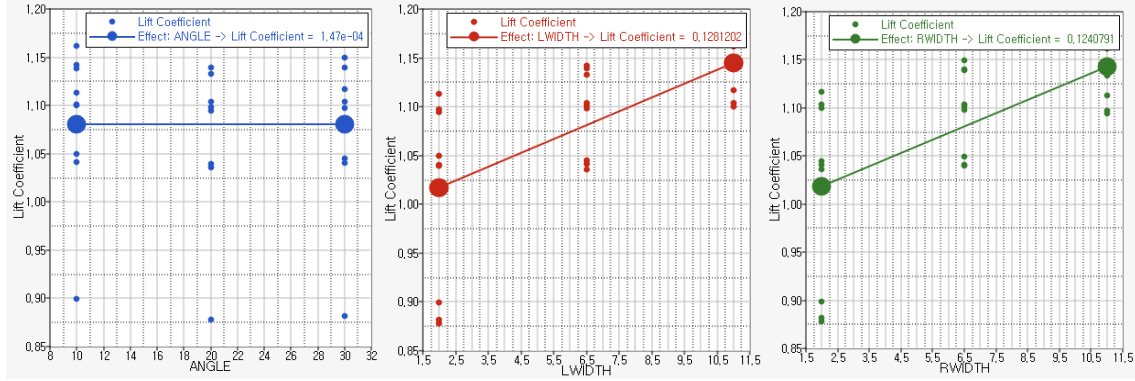
$$2\text{mm} \leq \text{L_Width} \leq 11\text{mm}$$

$$2\text{mm} \leq \text{R_Width} \leq 11\text{mm}$$

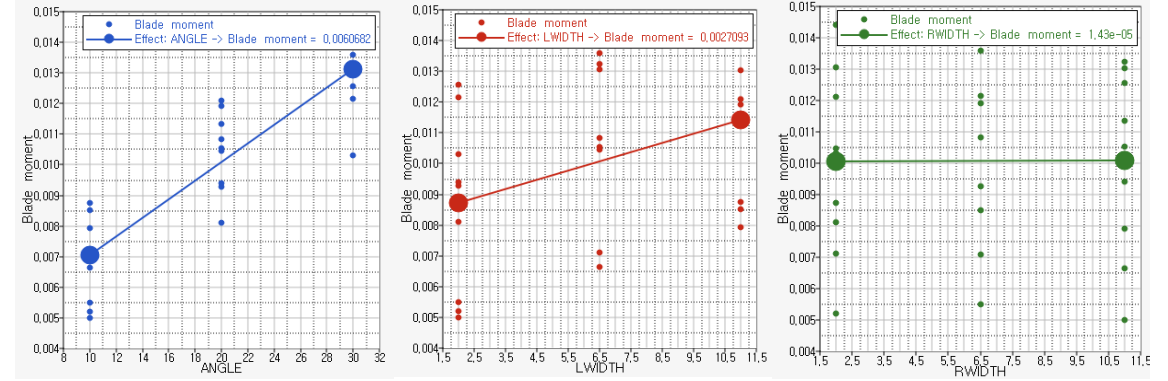


No.	Angle	L_Width	R_Width	No.	Angle	L_Width	R_Width	No.	Angle	L_Width	R_Width
1	10	2	2	10	20	2	2	19	30	2	2
2	10	2	6.5	11	20	2	6.5	20	30	2	6.5
3	10	2	11	12	20	2	11	21	30	2	11
4	10	6.5	2	13	20	6.5	2	22	30	6.5	2
5	10	6.5	6.5	14	20	6.5	6.5	23	30	6.5	6.5
6	10	6.5	11	15	20	6.5	11	24	30	6.5	11
7	10	11	2	16	20	11	2	25	30	11	2
8	10	11	6.5	17	20	11	6.5	26	30	11	6.5
9	10	11	11	18	20	11	11	27	30	11	11

양력계수의 Linear Effect



Moment의 Linear Effect

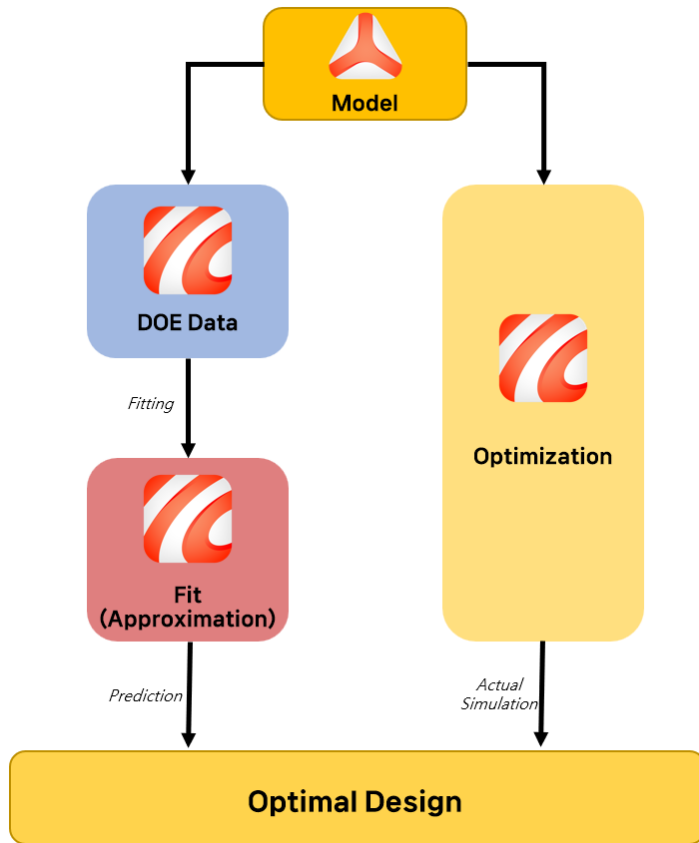


No.	양력계수	Moment	No.	양력계수	Moment	No.	양력계수	Moment
1	0.8991	0.0052	10	0.8782	0.0081	19	0.8818	0.0103
2	1.0492	0.0054	11	1.0395	0.0092	20	1.0406	0.0121
3	1.1127	0.0049	12	1.0946	0.0094	21	1.0972	0.0125
4	1.0411	0.0071	13	1.0361	0.0104	22	1.045	0.013
5	1.1012	0.0071	14	1.0979	0.0108	23	1.1038	0.0135
6	1.1422	0.0066	15	1.1332	0.0105	24	1.1394	0.0132
7	1.0998	0.0087	16	1.1034	0.0121	25	1.1167	0.0144
8	1.1387	0.0085	17	1.1397	0.0119	26	1.1492	0.0139
9	1.1614	0.0079	18	1.1639	0.0113	27	1.1732	0.013

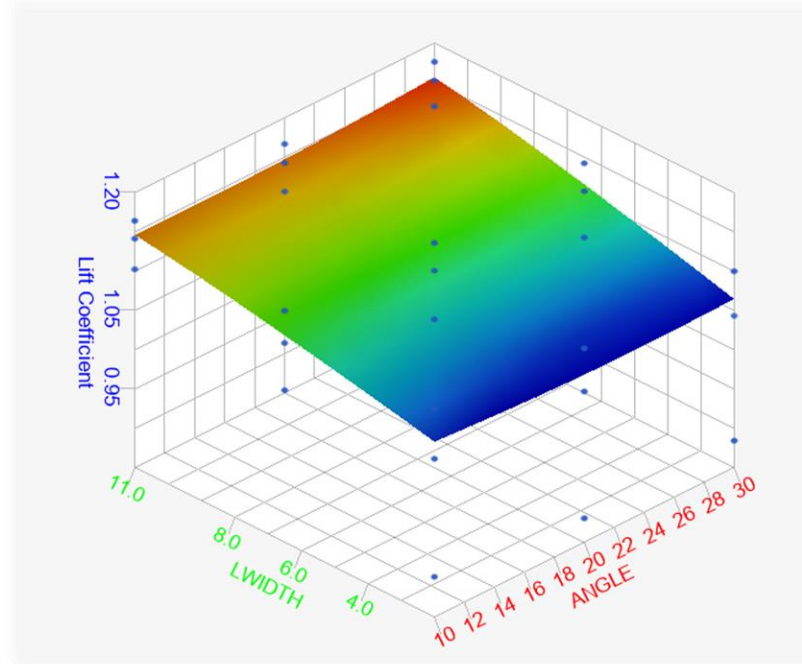
Linear Effect를 확인했을 때 양력계수의 관점에서 Angle의 영향이 미미함
Moment의 관점에서 R_Width의 영향이 미미함

Fit

DOE를 통해 얻어낸 데이터를 Fit 과정을 통해 모델을 학습하고 파라미터를 조정하여 실험결과와 더욱 일치하는 결과를 얻을 수 있음
 FAST 기법 사용하였고, 결정계수 높게 나타남



	Label	Value	Value	X Axis	Y Axis	Constraints
1	ANGLE		24.140000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	N/A
2	LWIDTH		4.2770000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	N/A
3	RWIDTH		7.5890000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	N/A



결정계수

Sample Points	30
양력계수	0.9996406
Moment	0.9990001

최적화

	Angle	L_Width	R_Width	양력계수	Moment	Constraint		Angle	L_Width	R_Width	양력계수	Moment	Constraint		Angle	L_Width	R_Width	양력계수	Moment	Constraint
1	20	6	6	1.084709	0.01067	Violated	11	15.1584	3.82016	4.38752	1.036418	0.00818	Feasible	21	11.0243	10.38812	11	1.159946	0.008234	Feasible
2	15.75531	11	11	1.160018	0.009832	Feasible	12	11.95039	11	11	1.160985	0.008338	Feasible	22	10	10.84978	10.08544	1.158011	0.008053	Feasible
3	26.48	8.552	3.944	1.099199	0.013239	Violated	13	24.7904	4.13696	8.47712	1.09331	0.011449	Violated	23	20.8544	9.09056	3.69632	1.099268	0.01167	Violated
4	12.088	8.8112	8.9264	1.138778	0.00854	Feasible	14	10.76779	11	11	1.161343	0.007912	Feasible	24	10	10.7504	10.51776	1.160413	0.007945	Feasible
5	24.464	9.1136	8.7392	1.141175	0.012518	Violated	15	15.8624	7.90976	3.99872	1.085209	0.009557	Feasible	25	15.6128	6.95072	8.96384	1.125986	0.009069	Feasible
6	12.332	9.9218	10.2746	1.154373	0.00865	Feasible	16	10.34765	11	10.98857	1.163115	0.00792	Feasible	26	10.25119	10.69736	11	1.160589	0.007848	Feasible
7	25.776	4.4624	4.3328	1.042633	0.011521	Violated	17	13.7824	8.91776	6.37472	1.121204	0.00917	Feasible	27	14.8448	3.30752	6.93344	1.066605	0.007673	Feasible
8	10.998	10.5077	10.4744	1.159579	0.007889	Feasible	18	10	10.84286	11	1.165187	0.007917	Feasible	28	10	10.87685	11	1.160693	0.007889	Optimal
9	15.7664	4.07936	9.36992	1.102209	0.008292	Feasible	19	10.25302	9.643547	11	1.155516	0.007592	Feasible	29	12.10168	10.23358	11	1.158975	0.008583	Feasible
10	10.32144	11	11	1.163941	0.007935	Feasible	20	10	11	10.78675	1.16145	0.007948	Feasible	30	10	10.97851	11	1.160955	0.007917	Feasible

GRSM 방법 사용하여 최적화 실시하였으며 총 30번의 Evaluation 실시함

최종결과는 다음과 같이 나타남

$$Angle = 10^\circ$$

$$L_Width = 10.88\text{ mm}$$

$$R_Width = 11\text{ mm}$$

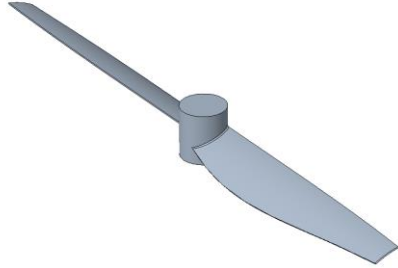
$$C_L = 1.1652$$

$$Moment = 0.007917\text{ N} \cdot \text{m}$$

5. 결론

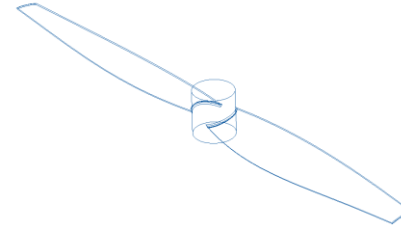
결론

Initial Design



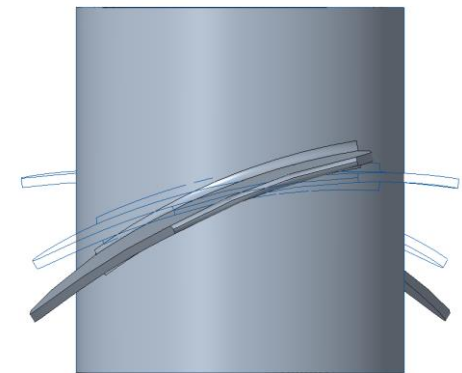
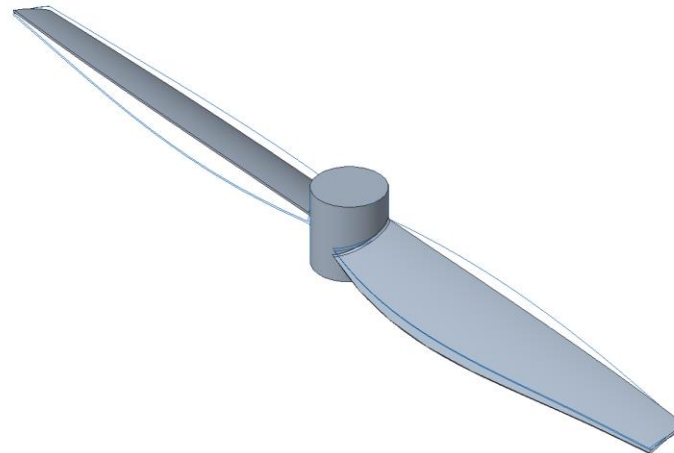
Angle = 20°
L_Width = 11 mm
R_Width = 6.5 mm

Optimal Design

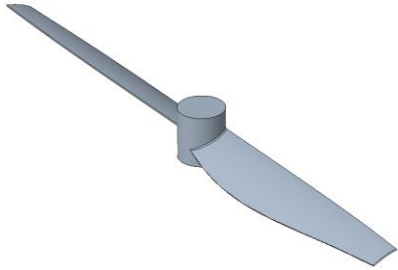


Angle = 10°
L_Width = 10.88 mm
R_Width = 11 mm

Initial Design과 Optimal Design 의 비교



Initial Design

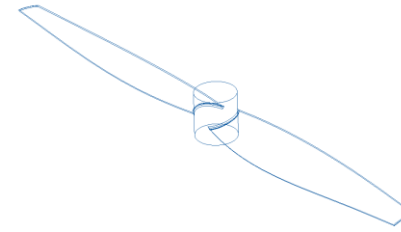


Angle = 20°
L_Width = 11 mm
R_Width = 6.5 mm

$$C_L = 1.082$$

$$\text{Moment} = 0.0107 N \cdot m$$

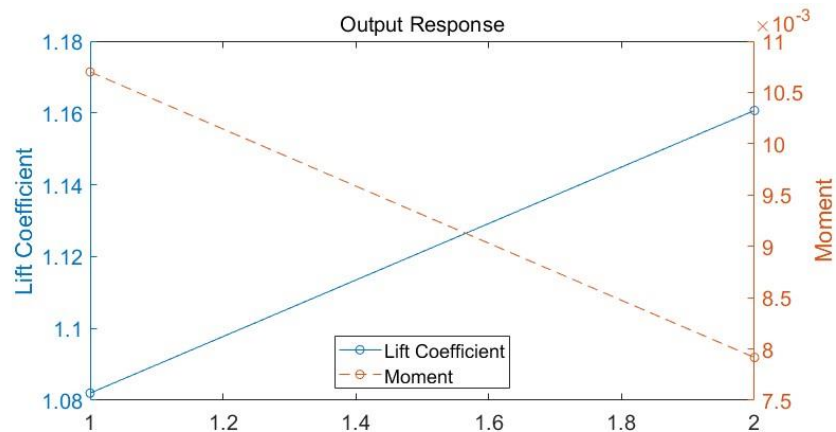
Optimal Design



Angle = 10°
L_Width = 10.88 mm
R_Width = 11 mm

$$C_L = 1.1652$$

$$\text{Moment} = 0.007917 N \cdot m$$



드론 Blade의 양력계수 최대화를 목표로
각도, 폭에 대한 최적화를 진행하였음
양력계수는 기존 대비 **약 7.3%** 증가하였으며
Moment는 기존 대비 **약 26%** 감소한 결과를 얻음

감사합니다 !

참고문헌

- [1]. 임수근. 우크라이나 전쟁은 사상 첫 드론 전쟁... "60% 중국 DJI 제품". YTN. 2023.02.17
- [2]. 고명훈. 코로나19 비대면 시대, 이제 드론이 음식배달도 한다. 환경경찰뉴스. 2020.09.17
- [3] 최원, et al. "MRF 기법을 이용한 초소형 비행체 프로펠러 공력특성 연구." *한국전산유체공학회 학술대회논문집*(2010): 32-36.
- [4] Yilmaz, Erdem, and Junling Hu. "Cfd study of quadcopter aerodynamics at static thrust conditions." *Proceedings of the ASEE Northeast 2018 Annual Conference, West Hartford, CT, USA*. 2018.
- [5] Li, Yi, et al. "A biomimetic rotor-configuration design for optimal aerodynamic performance in quadrotor drone." *Journal of Bionic Engineering* 18.4 (2021): 824-839.
- [6] Vijayanandh, R., et al. "Design and parametric study of counter-rotating propeller of unmanned aerial vehicles for high-payload applications based on CFD-MRF approach." *International Journal of Vehicle Structures & Systems* 14.7 (2022): 840-848.