

ADM을 이용한 덕트 팬 꼬리로터 공력 성능 해석

노나현*, 박동훈, 오세종

부산대학교 항공우주공학과



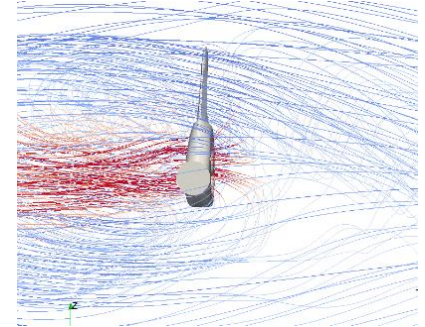
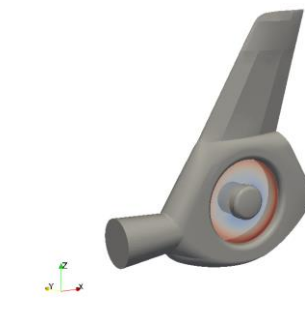
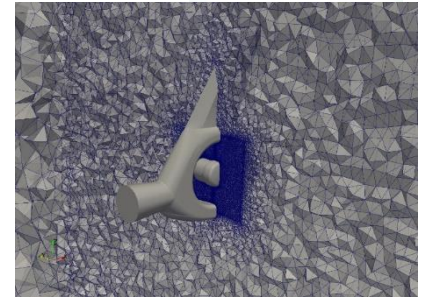
Contents

1. 서론

2. 수치해석 기법

3. 연구 결과

4. 결론



1. Introduction

Motivation

- **일반적 오픈타입 꼬리로터**
 - 메인로터에 의한 토크 상쇄 및 축방향 안정성/조종성 확보
 - 끝단 실속, 와류고리현상 및 외부 충격에 의한 손상 가능성 존재
- **덕트 팬 꼬리로터**
 - 외부 덕트에 쌓여진 형상
 - ✓ 외부 충격에 의한 손상 방지
 - ✓ 덕트에 의한 추가 추력 발생
 - ✓ 강한 유입류 발생하므로 끝단 실속에 대해 상대적으로 자유로움



▲ Sikorsky S-76



▲ EC 155

Motivation

- 일반적 오픈타입 꼬리로터
 - 메인로터에 의한 토크 상쇄 및 축방향 안정성/조종성 확보
 - 끝단 실속, 와류고리현상 및 외부 충격에 의한 손상 가능성 존재
- 덕트 팬 꼬리로터
 - 외부 덕트에 쌓여진 형상
 - ✓ 외부 충격에 의한 손상 방지
 - ✓ 덕트에 의한 추가 추력 발생
 - ✓ 강한 유입류 발생하므로 끝단 실속에 대해 상대적으로 자유로움



▲ Sikorsky S-76



▲ EC 155

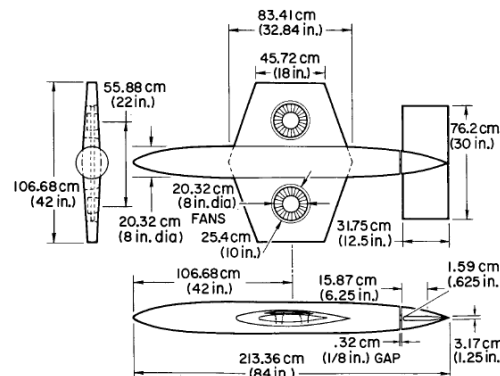
Previous Studies

● Lifting Fan

- Harry H. Heyson[1] (1973)
 - ✓ 덕트에 의한 추가 추력에 대한 모멘텀 이론 도출
 - ✓ 날개에 덕트 팬 위치한 형상에 대한 이론적 연구 수행

● Ducted Fan Tail Rotor

- R. Ganesh et al. [2] (1977)
 - ✓ RAH-66 회전익기의 덕트 팬 꼬리로터 제자리/측풍 비행에 대한 수치적 연구
 - ✓ 각 격자점에서 BET 수행
- Boris et al. [3](2000)
 - ✓ 동일한 로터를 가지는 오픈 타입 꼬리로터와의 결과 비교
 - ✓ 실험에 기반한 Correction factor 적용한 "ROTOR_FAN" 코드 개발



▲ Dimensional characteristics of model [1]



▲ Tail Rotor of KAMOV Ka-60 [3]

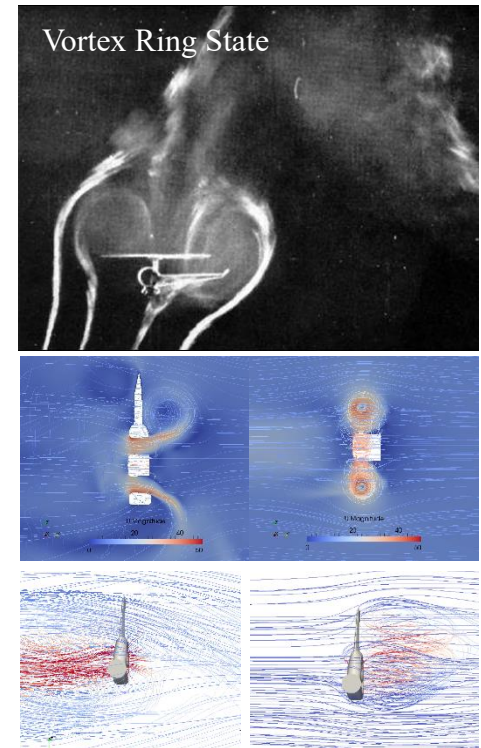
[1] Harry H. Heyson, "Theoretical and experimental investigation of the performance of a fan-in-wing VTOL configuration," NASA TN D-7498, (1973)

[2] Rajagopalan, R. Ganesh, and C. N. Keys. "Detailed Aerodynamic Analysis of the RAH-66 FANTAIL™ Using CFD." Journal of the American Helicopter Society 42.4 (1997): 310-320.

[3] Bourtsev, Boris N., and Serguei V. Selemenev. "Fan-in-fin performance at hover computational method," (2000)

Objective

- 선행 연구의 한계
 - 다양한 운용 조건에 대한 성능제시 부족
 - ✓ 각 구성요소의 추력 변화에 대한 제시 미비
 - 꼬리로터 vortex ring state(VRS) 특성에 대한 연구 부재
 - ✓ 꼬리로터 성능 손실의 주요 변수
 - ✓ 일반적 오픈타입 꼬리로터, 추력 약 80% 손실
- 연구 목표
 - 다양한 운용 조건에 대한 성능 변화 제시
 - ✓ 제자리/전진/측풍 비행 해석
 - ✓ 블레이드 피치각 및 유동 속도에 따라 총 45개 Case 해석
 - 꼬리로터 VRS 특성에 대한 연구
 - ✓ 오픈타입 꼬리로터와의 비교를 통한 덕트 팬 꼬리로터 특성 제시



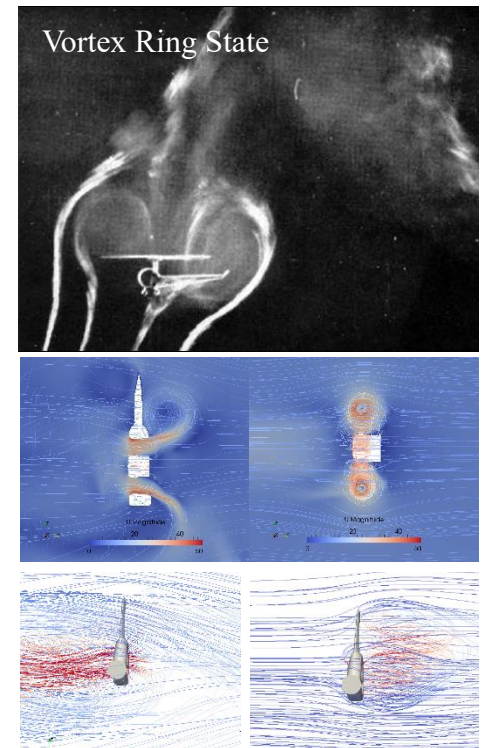
Objective


- **선행 연구의 한계**

- 다양한 운용 조건에 대한 성능제시 부족
 - ✓ 각 구성요소의 추력 변화에 대한 제시 미비
- 꼬리로터 vortex ring state(VRS) 특성에 대한 연구 부재
 - ✓ 꼬리로터 성능 손실의 주요 변수
 - ✓ 일반적 오픈타입 꼬리로터, 추력 약 80% 손실

- **연구 목표**

- **다양한 운용 조건에 대한 성능 변화 제시**
 - ✓ 제자리/전진/측풍 비행 해석
 - ✓ 블레이드 피치각 및 유동 속도에 따라 총 45개 Case 해석
- **꼬리로터 VRS 특성에 대한 연구**
 - ✓ 오픈타입 꼬리로터와의 비교를 통한 덕트 팬 꼬리로터 특성 제시



- 
- 다양한 조건에 운용되는 덕트 팬 꼬리로터의 성능/유동 특성 이해
 - 전기체 해석 및 전체 시스템 설계에 대한 기초연구 수행

2. Numerical Method

Solution Procedure

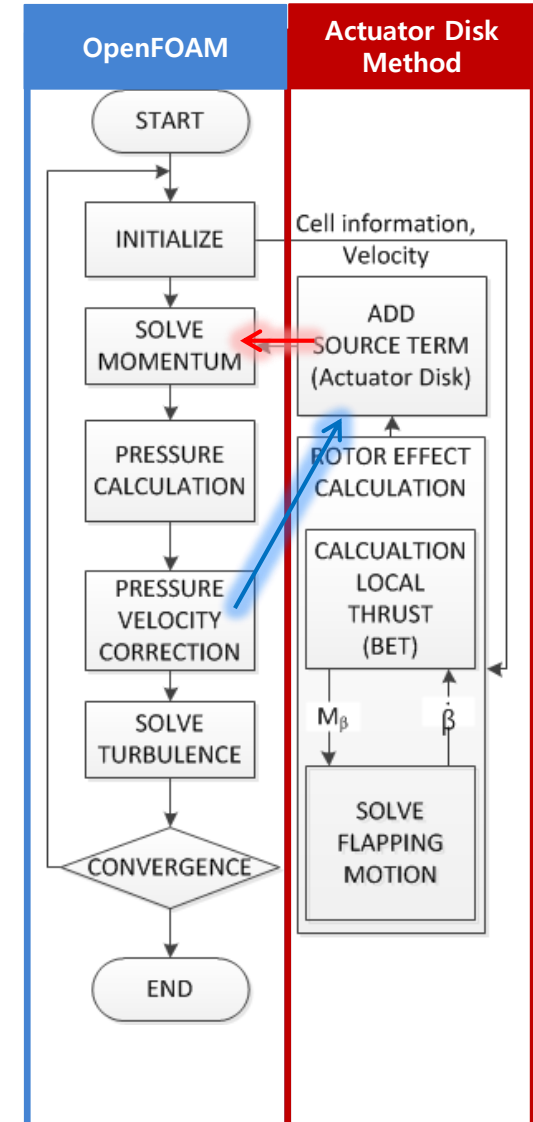
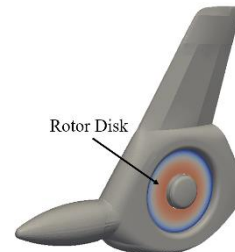
● OpenFOAM + ADM(Actuator Disk Method) Hybrid Method

- Full CFD의 단점
 - ✓ 블레이드 및 동체 주변 격자 생성의 복잡성
 - ✓ 해석에 많은 계산 자원 소요되므로, 파라미터 해석에 부적절
- Blade element Method에 기반한 **Actuator Disk Method**
 - ✓ 임의의 디스크 영역에 로터 효과 모사
 - 계산 도메인의 각 셀에 대한 해석 수행
 - 시간평균화 된 로터 추력, 운동량 방정식에 삽입

$$\rho \frac{DU}{Dt} + (\mu + \mu_t) \cdot \nabla^2 u = \vec{s} - \nabla p$$

$$\vec{s} = \frac{dT}{\rho dV}$$

- 유동장을 통해 도출한 α_{eff} 을 이용한 c_l, c_d Table Lookup
- ✓ 로터 효과 삽입을 위한 간단한 격자 필요
 - 블레이드 주변 복잡한 격자 생성 불필요
- ✓ 해석 소요시간 적음



▲ Algorithm of CFD+ADM Hybrid method

Solution Procedure

● OpenFOAM + ADM(Actuator Disk Method) Hybrid Method

• Full CFD의 단점

- ✓ 블레이드 및 동체 주변 격자 생성
- ✓ 해석에 많은 계산 자원 소요됨

● 로터 성능 및 디스크 영역 운동량

- ADM을 통해 계산

• Blade element Method에 기반한

- ✓ 임의의 디스크 영역에 로터 효과 적용
 - 계산 도메인의 각 셀에 대한
 - 시간평균화 된 로터 추력, 운동량 방정식에 삽입

● 로터 영역을 제외한 전체 해석 도메인

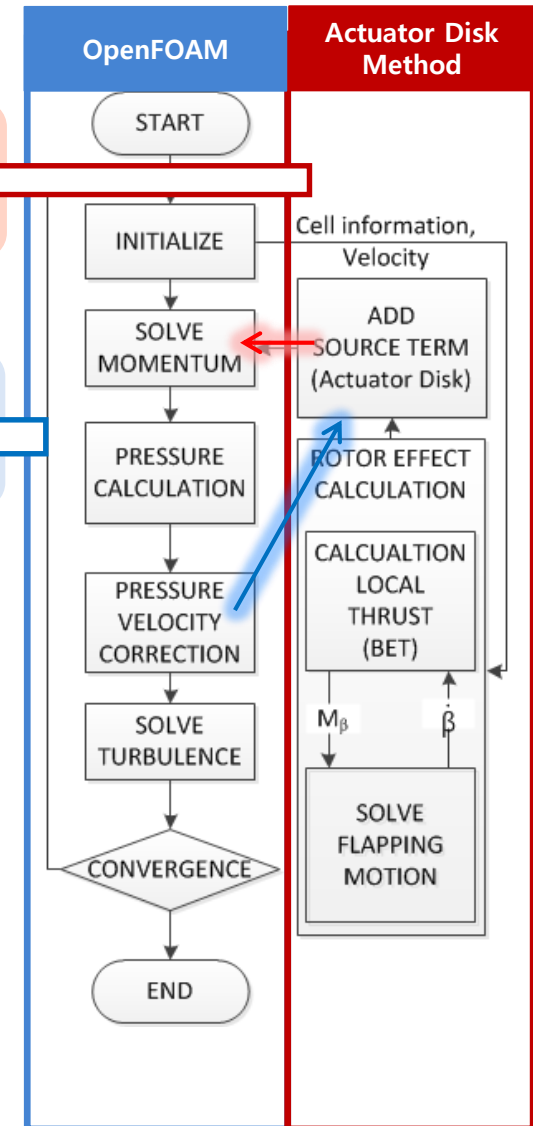
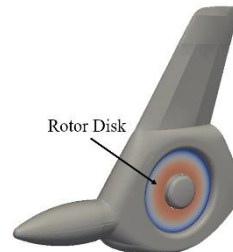
- OpenFOAM을 통해 해석

$$\rho \frac{DU}{Dt} + (\mu + \mu_t) \cdot \nabla^2 u = \vec{s} - \nabla p$$

$$\vec{s} = \frac{dT}{\rho dV}$$

- 유동장을 통해 도출한 α_{eff} 을 이용한 c_l, c_d Table Lookup

- ✓ 로터 효과 삽입을 위한 간단한 격자 필요
 - 블레이드 주변 복잡한 격자 생성 불필요
- ✓ 해석 소요시간 적음



▲ Algorithm of CFD+ADM Hybrid method

Configuration

- EC 155b1기의 꼬리로터

- 로터 정보

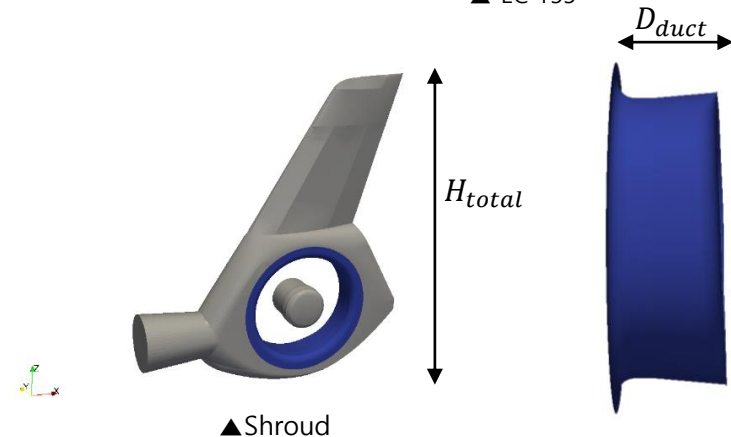
- No. of blades : 10
- No. of airfoil : 5 (OAF3XX series)
- Rotor radius (r_{rotor}) : 0.546m
- RPM : 3579

- 덕트 형상

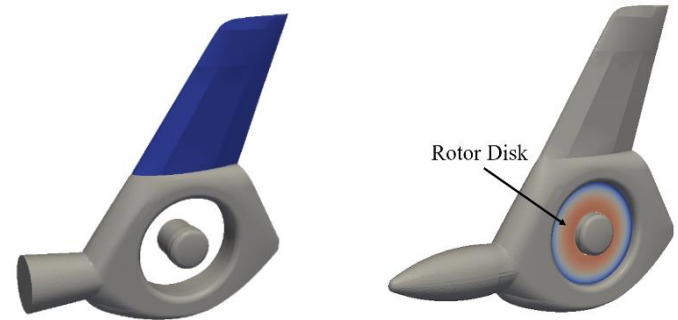
- Non-axisymmetric
- Expansion ratio (σ_d) : 1.15
- Total Height (H_{total}) : $4.35 r_{rotor}$
- Duct depth (D_{duct}) : $1 r_{rotor}$



▲ EC 155



▲ Shroud



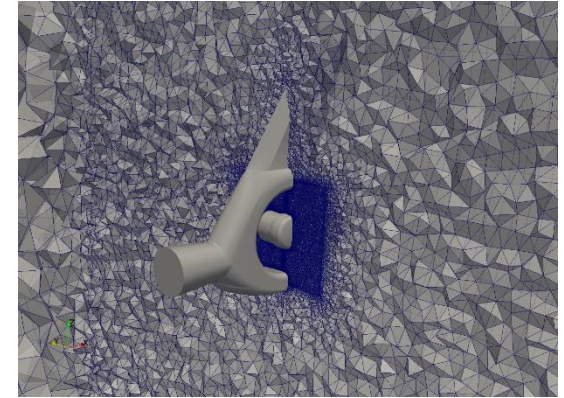
▲ Vertical Fin

▲ Total Geometry

Computational Grid & Analysis Conditions

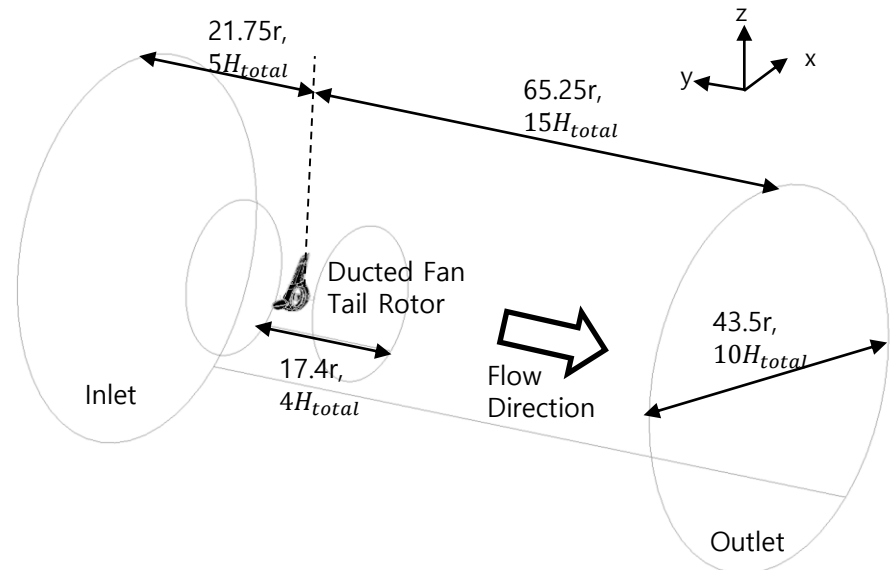
● Computational grid

- 로터 디스크 영역 제외 모든 공간 비정렬 격자로 구성
- 총 격자 수 : 15.6×10^6
- 원방 형태 : Cylinder
- 도메인 확장 : $-21.75 \leq \frac{x}{r_{rotor}} \leq 21.75$
 $-65.25 \leq \frac{y}{r_{rotor}} \leq 21.75$
 $-21.75 \leq \frac{z}{r_{rotor}} \leq 21.75$
- 팬 반지름 2배 이내 영역에 조밀한 격자 생성



● Analysis condition

- 제자리 비행
 - ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-30^\circ \sim 20^\circ$ } 6 case
- 전진 비행
 - ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-14.7^\circ \sim 2.3^\circ$ }
 - ✓ 자유류 속도(U_∞) : $10 \sim 70 \text{ m/s}$ } 7 case
- 측풍 비행
 - ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-10^\circ \sim 25^\circ$ }
 - ✓ 자유류 속도(U_∞) : $10 \sim 70 \text{ m/s}$ } 32 case



3. Results and Discussion

Numerical Validation

- 해석 조건

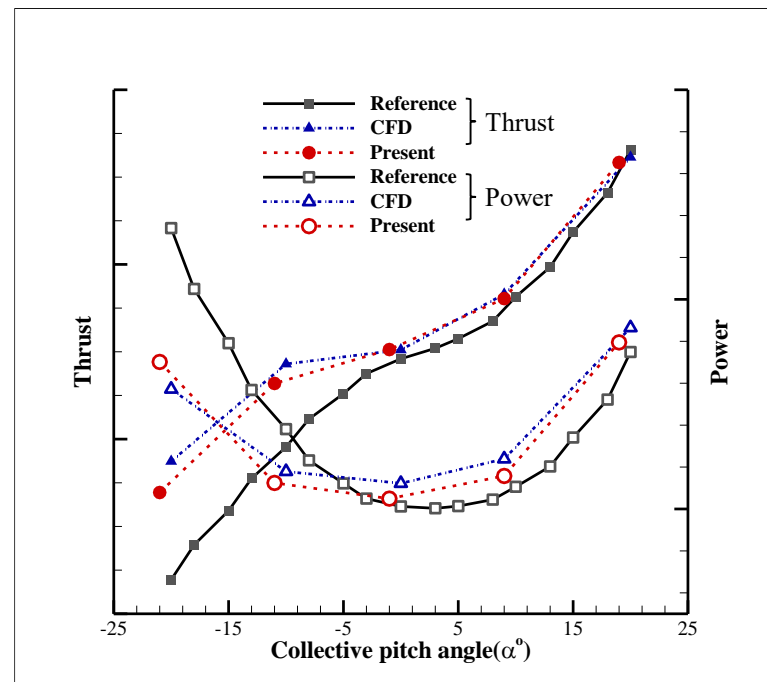
- 제자리 비행
 - ✓ 블레이드 피치각 : $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$

- 전기체 시험/수치해석 결과와 비교

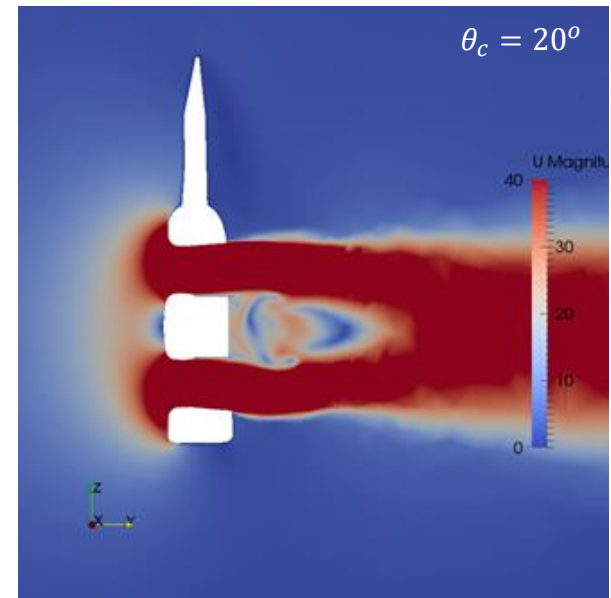
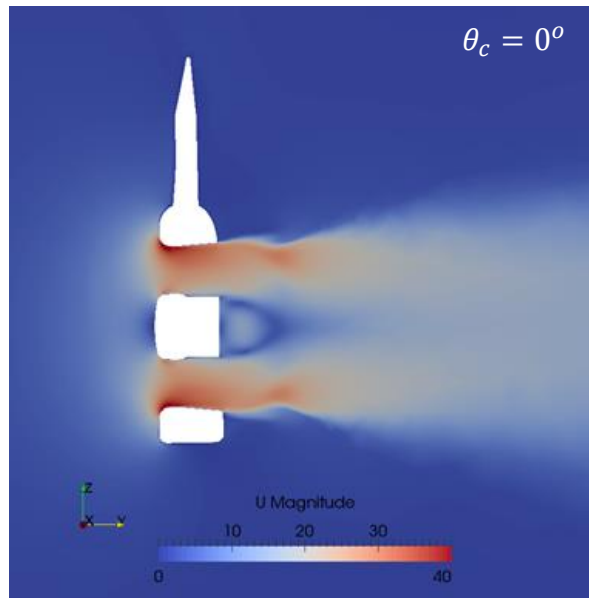
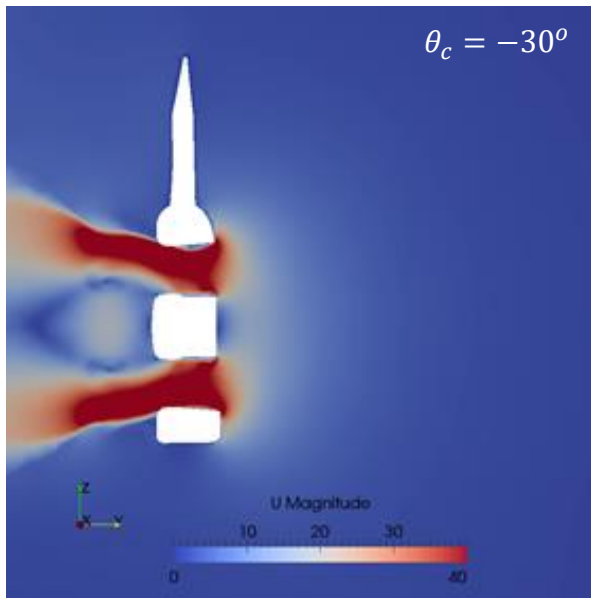
- 전기체 시험 결과 : Airbus Helicopter
- 수치해석 결과 : Korean Aerospace Industries
STAR CCM+

- 해석 결과

- 낮은 블레이드 피치각에서의 오차 확인
 - ✓ 전기체 시험, 메인로터에 의한 영향 포함
- 동일 형상(꼬리로터 독립)에 대한 수치해석 결과의 오차 3% 이내
 - ✓ 상용 코드로 수행된 수치해석 대비 신뢰성 있는 결과 도출



Hover Flight



- 해석 조건

- ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-30^\circ \sim 20^\circ$

- 속도장 분석

- 블레이드 피치각 증가할 수록 유도 속도 증가
- ✓ 음의 블레이드 피치각, 유동 역전 발생

- 공력 성능 결과

- 블레이드 피치각 증가에 의한 추력/동력 증가

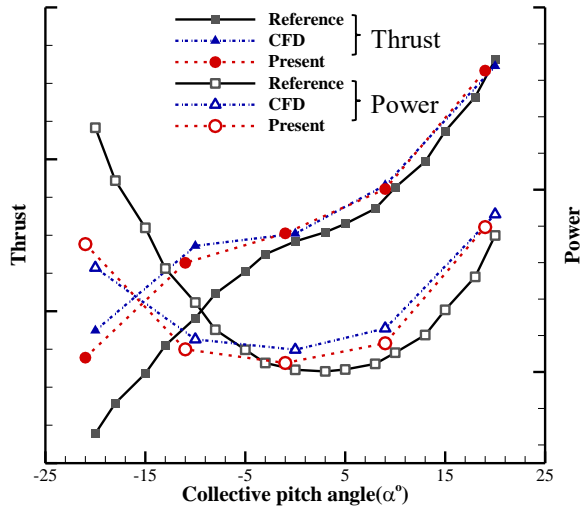
- 표면 압력 분포

- 피치각 증가에 의한 입구 영역 압력 감소 명확
- ✓ 높은 로터 추력에 의해 빠른 속도로 유동 유입됨에 기인

- 덕트 내부 유동 흐름

- 1) 덕트 입구를 따른 유동 가속 및 압력 감소 (1-2)
- 2) 로터 영역 지나며 압력 감소 (2-3)
- 3) 디퓨저면을 따른 유동 확산 (3-4)

Hover Flight



● 해석 조건

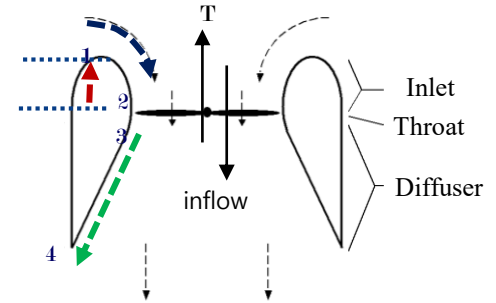
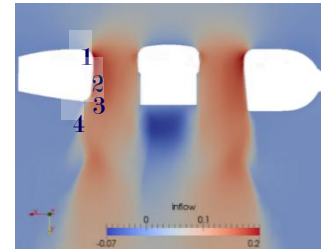
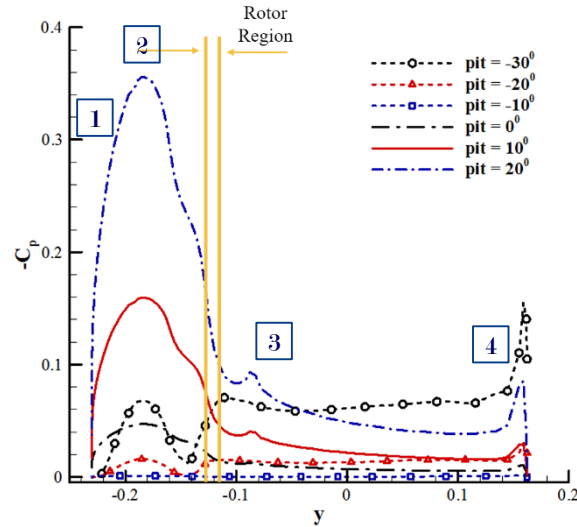
- ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-30^\circ \sim 20^\circ$

● 속도장 분석

- 블레이드 피치각 증가할 수록 유도 속도 증가
- ✓ 음의 블레이드 피치각, 유동 역전 발생

● 공력 성능 결과

- 블레이드 피치각 증가에 의한 추력/동력 증가



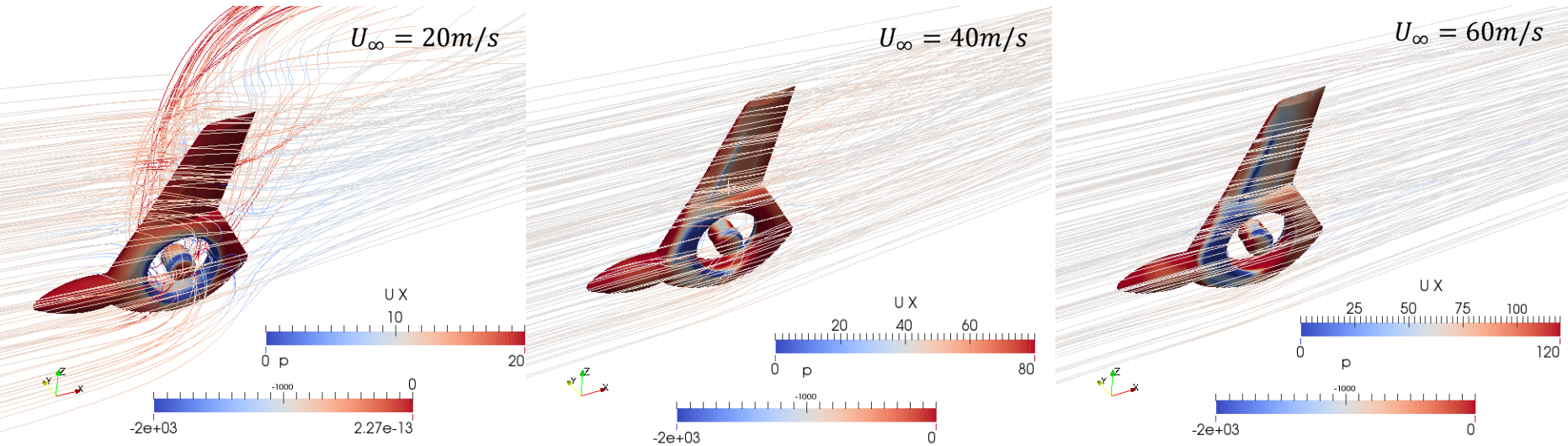
● 표면 압력 분포

- 피치각 증가에 의한 입구 영역 압력 감소 명확
- ✓ 높은 로터 추력에 의해 빠른 속도로 유동 유입됨에 기인

● 덕트 내부 유동 흐름

- 1) 덕트 입구를 따른 유동 가속 및 압력 감소 (1-2)
- 2) 로터 영역 지나며 압력 감소 (2-3)
- 3) 디퓨저면을 따른 유동 확산 (3-4)

Forward Flight



● 해석 조건

- ✓ 전진속도 : 10~70m/s
- ✓ 전기체 시험 기반, 전진 속도에 따라 별도의 블레이드 피치각 적용

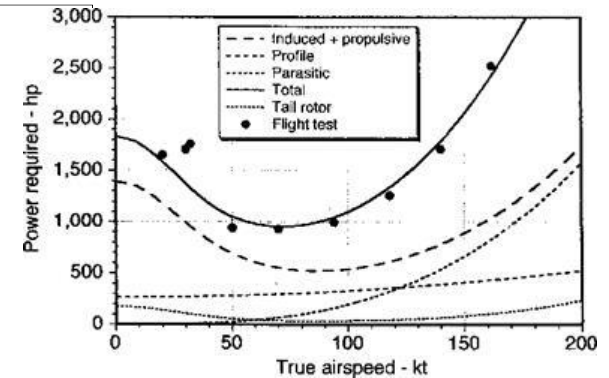
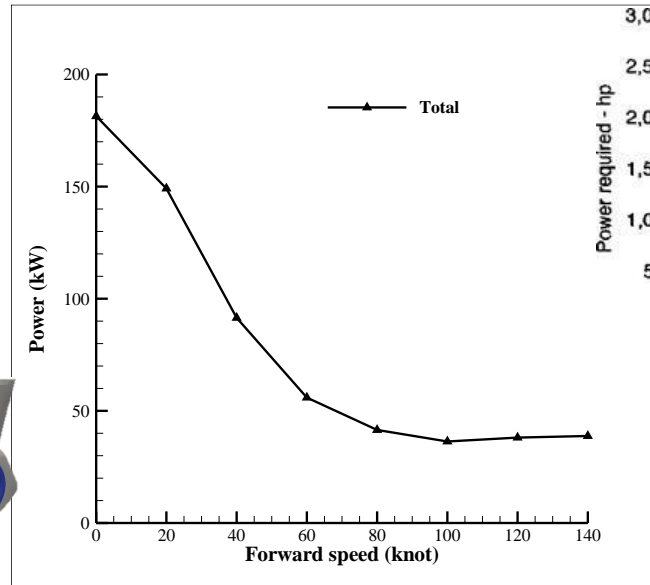
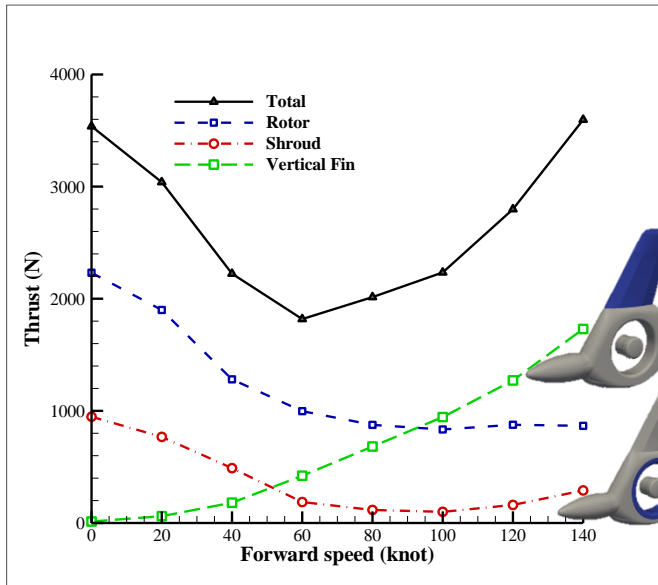
● 유동장 분석

- 전진속도 증가하며 로터를 통한 후류 생성 약화
 - ✓ 메인로터 토크 상쇄에 필요한 블레이드 피치각 감소에 기인
- 수직 꼬리날개 윗면에서의 압력 감소 명확

● 공력 성능

- 구성요소별 추력 성능
 - ✓ 로터 : 피치각 감소에 의한 성능 저하
 - ✓ 덕트 : 로터에 의한 유동 모멘텀 감소로 인한 성능 저감
 - ✓ 수직 꼬리날개 : 전진 비행하는 고정익과 동일한 효과로 추력 증가
- 전체 추력
 - ✓ 일반적 메인로터의 전진속도에 따른 요구동력 그래프와 경향성 일치
 - 합당한 결과 도출하였음을 확인

Forward Flight



● 해석 조건

- ✓ 전진속도 : 10~70m/s
- ✓ 전기체 시험 기반, 전진 속도에 따라 별도의 블레이드 피치각 적용

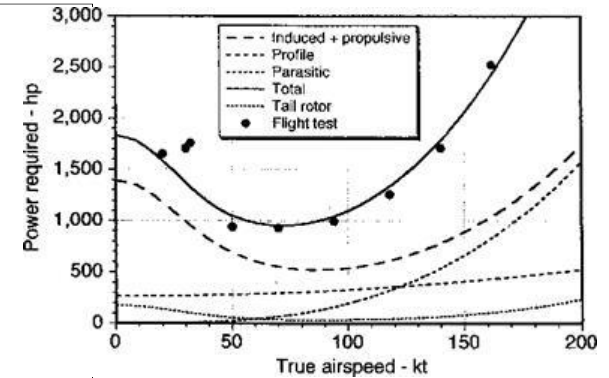
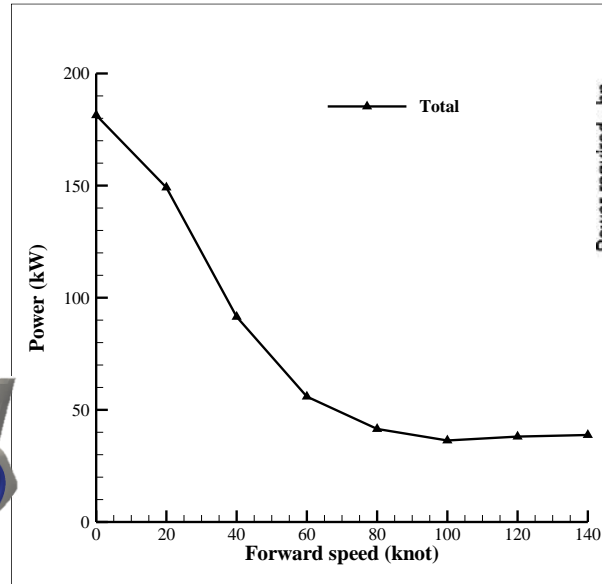
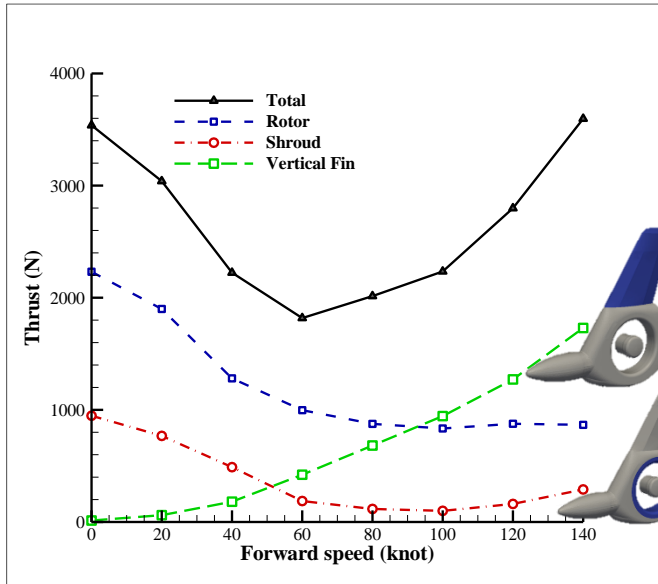
● 유동장 분석

- 전진속도 증가하며 로터를 통한 후류 생성 약화
 - ✓ 메인로터 토크 상쇄에 필요한 블레이드 피치각 감소에 기인
- 수직 꼬리날개 윗면에서의 압력 감소 명화

● 공력 성능

- 구성요소별 추력 성능
 - ✓ 로터 : 피치각 감소에 의한 성능 저하
 - ✓ 덕트 : 로터에 의한 유동 모멘텀 감소로 인한 성능 저감
 - ✓ 수직 꼬리날개 : 전진 비행하는 고정익과 동일한 효과로 추력 증가
- 전체 추력
 - ✓ 일반적 메인로터의 전진속도에 따른 요구동력 그래프와 경향성 일치
 - 합당한 결과 도출하였음을 확인

Forward Flight



해석 조건

- ✓ 전진속도 : 10~70m/s
- ✓ 전기체 시험 기반, 전진 속도에 따라 별도의 블레이드 피치각 적용

유동장 분석

- 전진속도 증가하면 커다란 토크 출력 생성

- 전진 속도에 따라 로터 효율 저감되는 덕트 팬의 특성 고려한 설계 필요

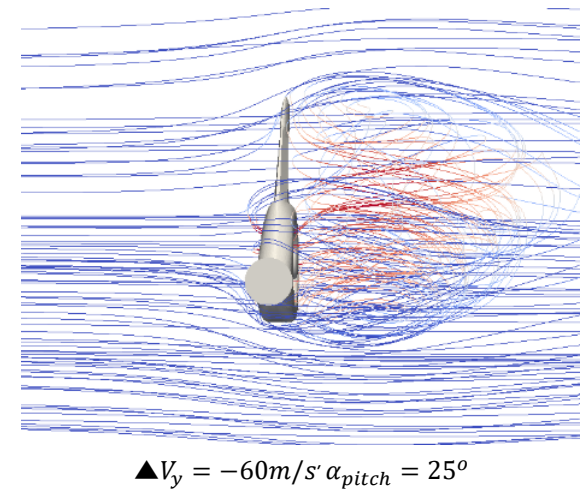
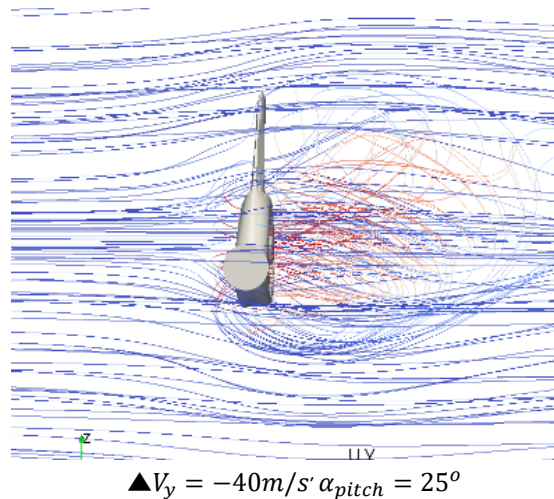
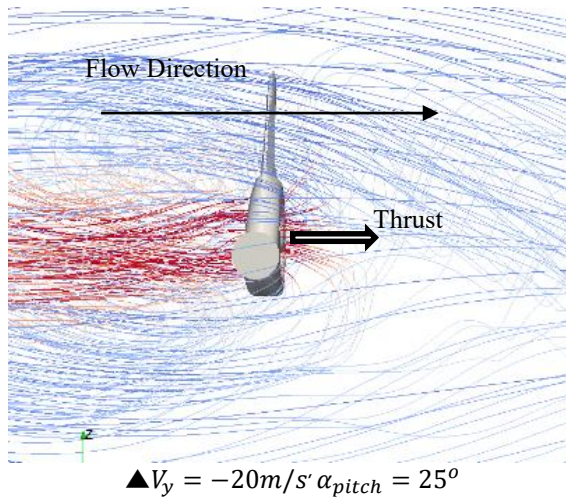
- ✓ 고정익과 동일한 효과로 인해 추력 증가하는 수직 꼬리 날개 설계의 중요성

경

공력 성능

- 구성요소별 추력 성능
 - ✓ 로터 : 피치각 감소에 의한 성능 저하
 - ✓ 덕트 : 로터에 의한 유동 모멘텀 감소로 인한 성능 저감
 - ✓ 수직 꼬리날개 : 전진 비행하는 고정익과 동일한 효과로 추력 증가

Sideward Flight



● 해석 조건

- ✓ 측풍속도 : $10 \sim 70\text{m/s}$
- ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-10^\circ \sim 25^\circ$

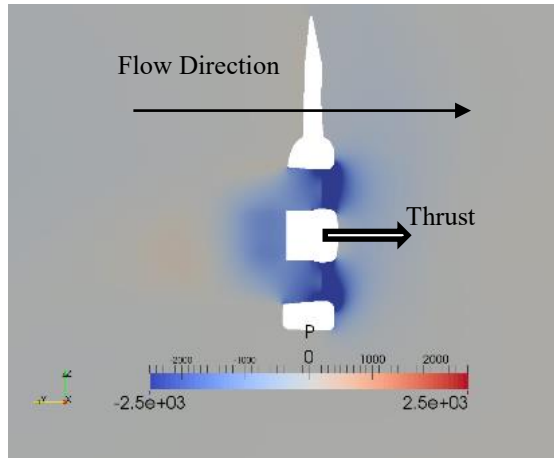
● 속도장 분석

- $V_y = -10\text{m/s} \sim -30\text{m/s}$
 - ✓ 로터에 의한 후류 명확
- $V_y = -40\text{m/s} \sim -70\text{m/s}$
 - ✓ 로터 후류 사라지며 유동 역전 발생

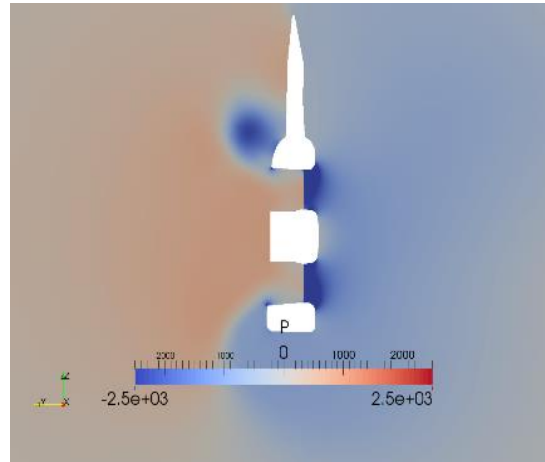
● 압력장 분석

- $V_y = -40\text{m/s}$
 - ✓ 덕트 내 압력의 역전
- $V_y = -60\text{m/s}$
 - ✓ 로터면에 의한 압력 점프 감소
 - 로터 성능 감소 예상 가능

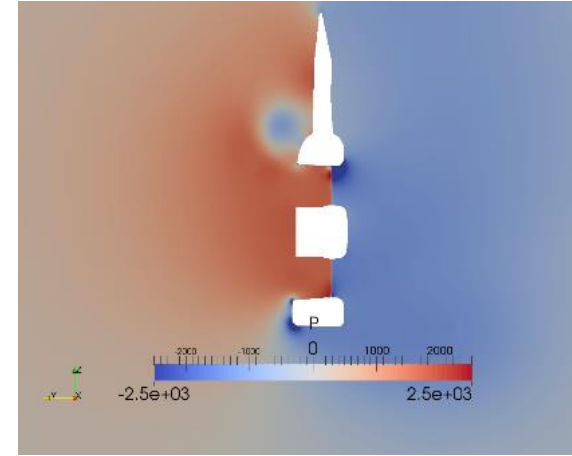
Sideward Flight



$$\blacktriangle V_y = -20 \text{ m/s} \quad \alpha_{pitch} = 25^\circ$$



$$\blacktriangle V_y = -40 \text{ m/s} \quad \alpha_{pitch} = 25^\circ$$



$$\blacktriangle V_y = -60 \text{ m/s} \quad \alpha_{pitch} = 25^\circ$$

● 해석 조건

- ✓ 측풍속도 : 10~70m/s
- ✓ 블레이드 피치각 (θ°) : $-10^\circ \sim 25^\circ$

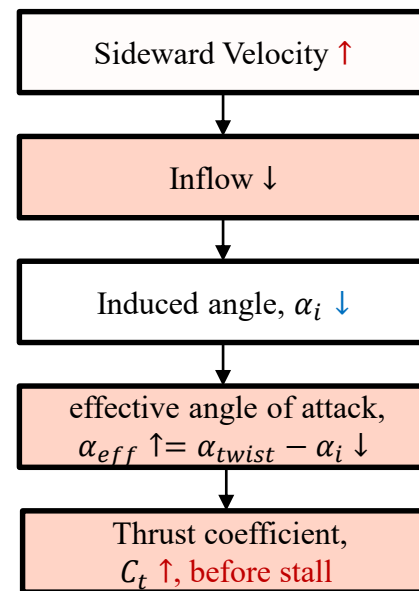
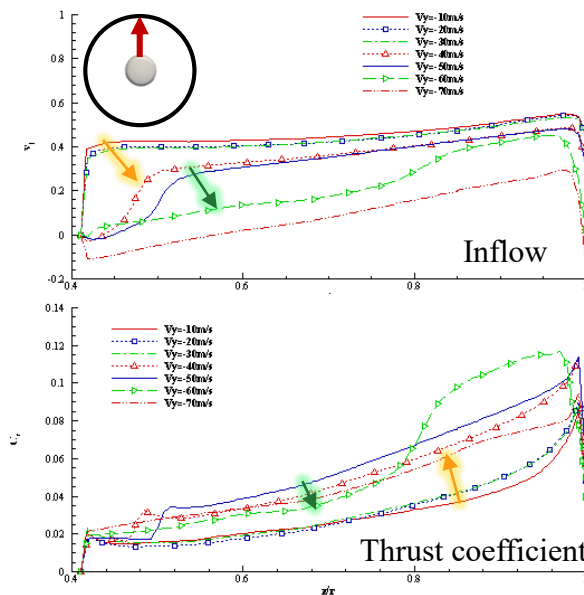
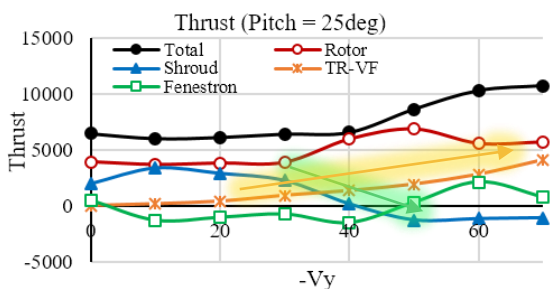
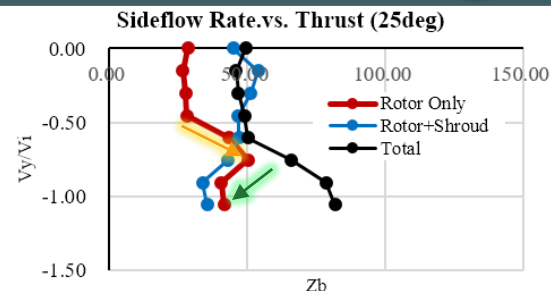
● 속도장 분석

- $V_y = -10 \text{ m/s} \sim -30 \text{ m/s}$
 - ✓ 로터에 의한 후류 명확
- $V_y = -40 \text{ m/s} \sim -70 \text{ m/s}$
 - ✓ 로터 후류 사라지며 유동 역전 발생

● 압력장 분석

- $V_y = -40 \text{ m/s}$
 - ✓ 덕트 내 압력의 역전
- $V_y = -60 \text{ m/s}$
 - ✓ 로터 윗면의 저압부 감소
 - 로터 성능 감소 예상 가능
- 전반에 걸쳐, 수직 꼬리날개 주변 압력차 증가

Sideward Flight



● 유입류 변화에 의한 공력 성능 변화

• 로터 성능 변화

- ✓ 유동 역전 지점(-40m/s)에서의 추력 급증
 - 유동 역전에 의한 유입류 감소
 - 유효 받음각 증가로 인한 추력 상승
- ✓ -60m/s이후의 추력 급감
 - 급격히 증가한 유효받음각에 의한 실속 유도
 - 유입류 감소함에도 불구하고, 추력 감소

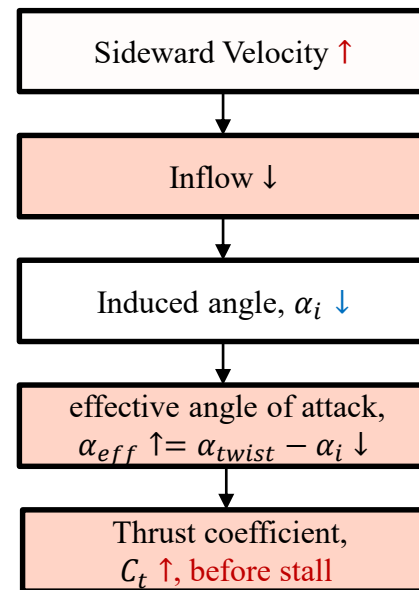
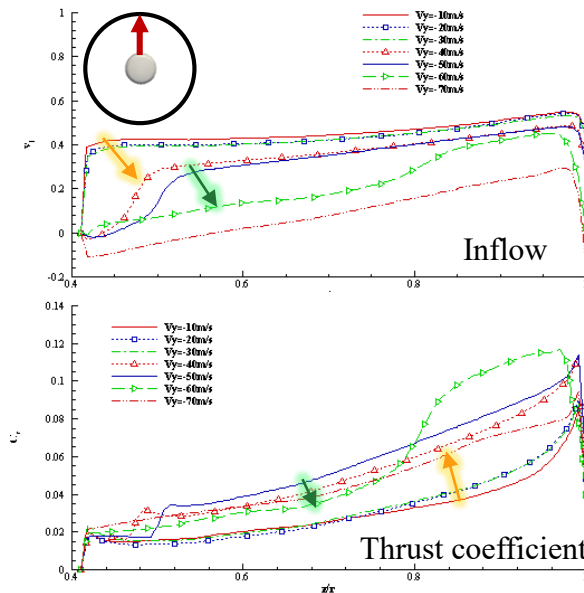
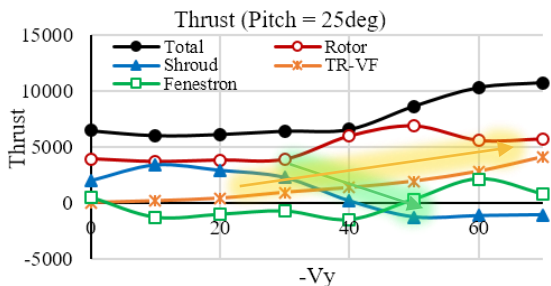
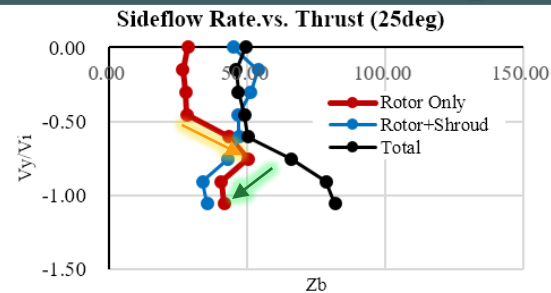
• 덕트 성능 변화

- ✓ 유동 역전과 동시에 성능 급감

• 전체 성능 변화

- ✓ 로터 성능 변화에도 불구하고, 꾸준히 증가
 - 수직 꼬리날개에 의한 추력 증가함에 기인

Sideward Flight



● 유입류 변화에 의한 공력 성능 변화

• 로터 성능 변화

- ✓ 유동 역전 지점(-40m/s)에서의 추력 급증
 - 유동 역전에 의한 유입류 감소
 - 유효 받음각 증가로 인한 추력 상승
- ✓ -60m/s이후의 추력 급감
 - 급격히 증가한 유효받음각에 의한 실속 유도

• 덕트 성능 변화

- ✓ 유동 역전과 동시에 성능 급감

• 전체 성능 변화

- ✓ 로터 성능 변화에도 불구하고, 꾸준히 증가
 - 수직 꼬리날개에 의한 추력 증가함에 기인

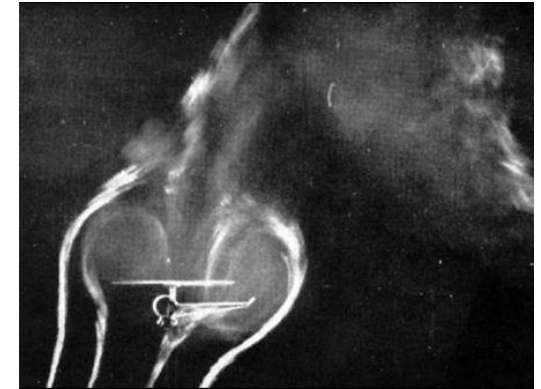
- 강한 측풍에서도 전체 추력 증가하는 덕트 팬 꼬리로터의 유용성 검증

- ✓ 평판과 유사한 효과로 인해 추력 증가하는 수직 꼬리 날개 설계의 중요성

Vortex Ring State Characteristics

● 와류고리현상

- 도넛 모양으로 발생하는 유동의 고리 영역안에 로터가 잠기는 현상
 - ✓ 로터에서 발생한 후류가, 자유류 속도에 의해 다시 로터 방향으로 이동하며 발생
 - ✓ 일반적인 메인로터의 경우 10~20%의 추력 손실 발생
 - ✓ 오픈타입 꼬리로터의 경우 70~80%의 추력 손실 발생



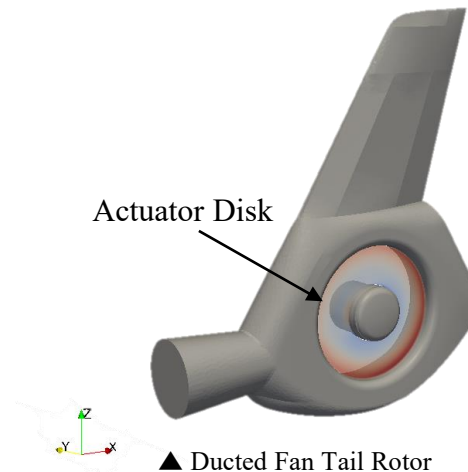
▲ Vortex Ring State [4]

● 덕트 팬 꼬리로터의 유동 특성 분석

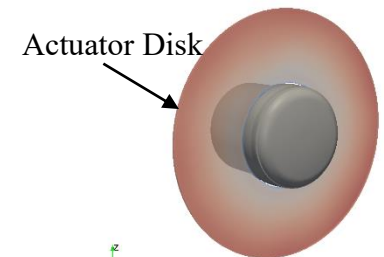
- 동일한 로터를 가지는 오픈타입 꼬리로터와의 유동장/공력성능 비교 수행

● Analysis Condition

- 블레이드 피치각 : 0°
- 측풍 속도 : $0\text{m/s} \sim -30\text{m/s}$



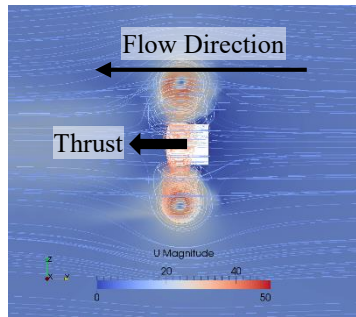
▲ Ducted Fan Tail Rotor



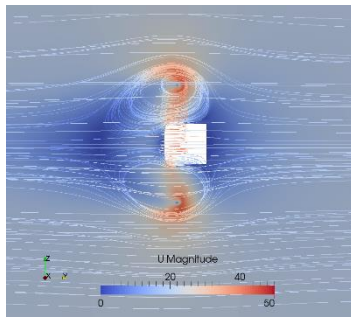
▲ Open Type Tail Rotor

[4] Meijer Drees, Ir J., and Ir WP Hendal. "Airflow patterns in the neighborhood of helicopter rotors: a description of some smoke tests carried out in a wind-tunnel at Amsterdam." Aircraft Engineering and Aerospace Technology 23.4 (1951): 107-111.

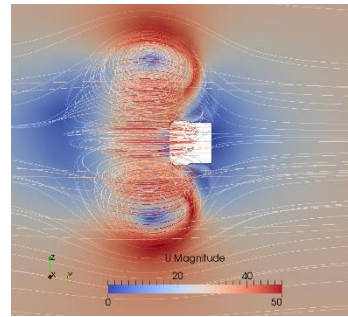
Vortex Ring State Characteristics



▲ $V_y = -10\text{m/s}$



▲ $V_y = -20\text{m/s}$

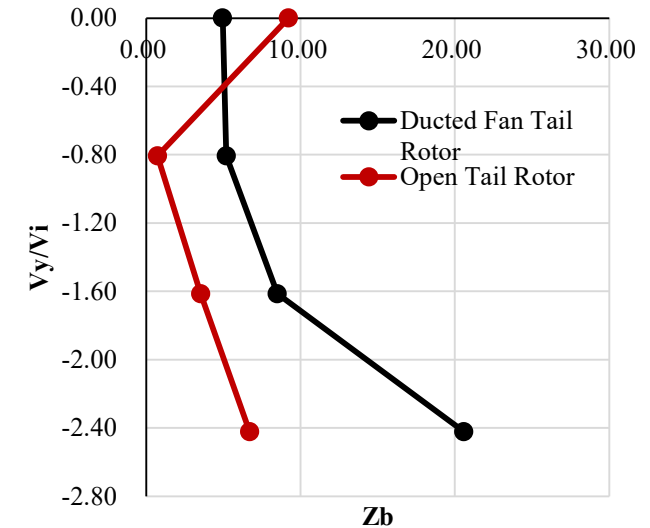


▲ $V_y = -30\text{m/s}$

● 오픈타입 꼬리로터

- 유동 특성
 - ✓ 끝단 와류, 자유류 유동에 의해 로터 방향으로 이동
 - ✓ 두 유동의 상호관계에 의해 와류고리현상에 잠김
- 공력 성능
 - ✓ 로터 추력 약 90% 감소

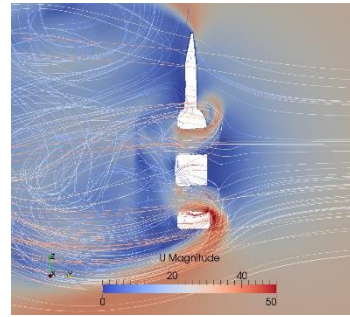
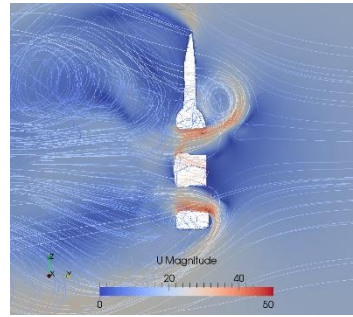
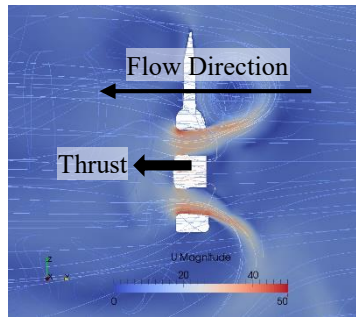
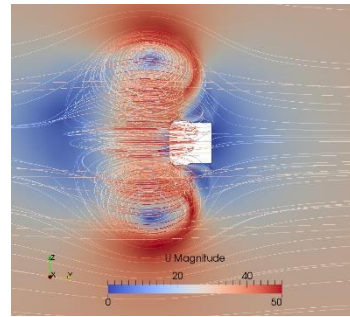
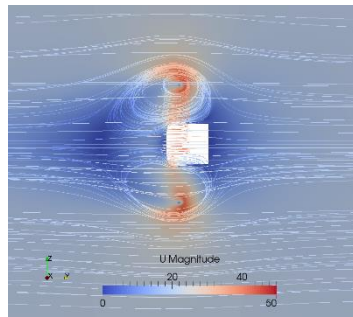
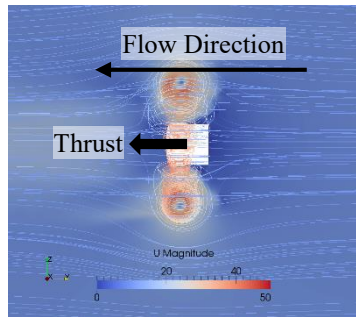
Sideflow Rate.vs. Thrust (0deg)



● 덕트 팬 꼬리로터

- 유동 특성
 - ✓ 덕트에 의해 끝단 와류 자체의 발생 미비
 - ✓ 덕트면을 따라 후류 바깥으로 확산
- 공력 성능
 - ✓ 와류고리현상에 의한 추력 손실 발생치 않음

Vortex Ring State Characteristics



▲ $V_y = -10\text{m/s}$

▲ $V_y = -20\text{m/s}$

▲ $V_y = -30\text{m/s}$

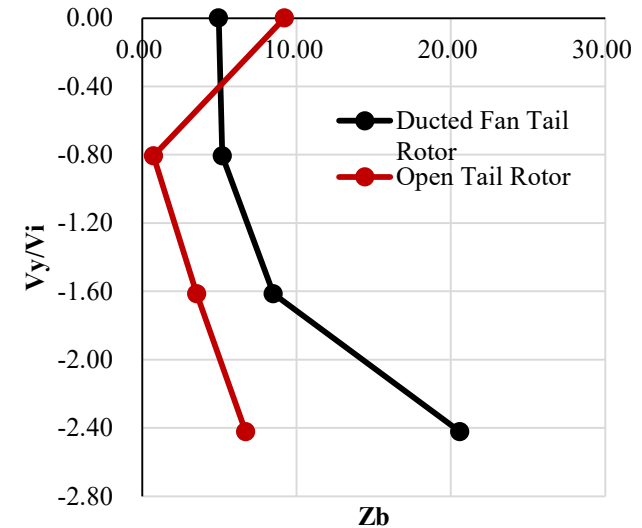
● 오픈타입 꼬리로터

- 유동 특성
 - ✓ 끝단 와류, 자유류 유동에 의해 로터 방향으로 이동
 - ✓ 두 유동의 상호관계에 의해 와류고리현상에 잠김
- 공력 성능

● 덕트 팬 꼬리로터

- 유동 특성
 - ✓ 덕트에 의해 끝단 와류 자체의 발생 미비
 - ✓ 덕트면을 따라 후류 바깥으로 확산
- 공력 성능

Sideflow Rate vs. Thrust (0deg)

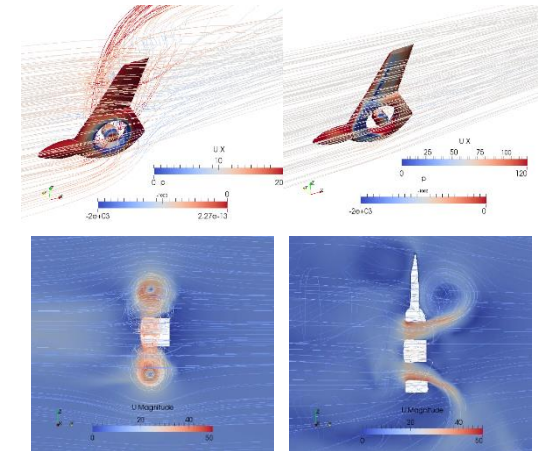
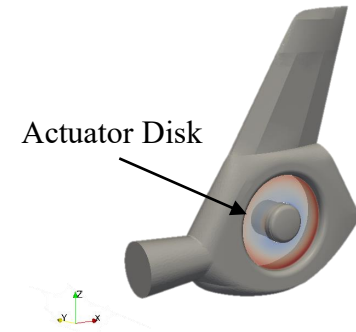


- 와류고리현상 발생하지 않는 덕트 팬 꼬리로터의 유용성 입증
 - ✓ 오픈타입 꼬리로터를 가지는 회전익기보다 넓은 범위에서 운용 가능할 것으로 기대

4. Conclusion

Conclusion

- **Objective : ADM을 이용한 덕트 팬 공력 성능 해석**
 - OpenFOAM 솔버에 ADM 삽입
 - ✓ 해석 격자 생성이 용이하며, 계산 소요 시간이 적으므로 파라미터 해석에 적합
 - ✓ 간략화 한 모델임에도 성능 예측 및 경향성 분석에 우수한 코드임을 검증
- **다양한 운용 조건에 대한 성능 변화 제시**
 - ✓ 제자리 비행
 - 블레이드 피치각 증가에 의한 덕트 입구 압력 감소 확인
 - ✓ 전진 비행
 - 메인로터 토크 상쇄에 필요한 블레이드 피치각 감소에 의한 로터/덕트 추력 감소
 - 수직 꼬리날개, 전진비행하는 고정익과 동일한 효과 발생
 - ✓ 측풍 비행/ 와류고리현상 특성
 - 유입류 감소에 의한 로터 추력 증가 확인
 - 형상적 특성에 의해 와류고리현상에 잠기지 않는 유용성 검증
- **향후 연구 계획**
 - 다양한 조건에 운용되는 덕트 팬 꼬리로터의 성능/유동 특성 이해 기반으로한 전기체 해석
 - ✓ 메인로터 후류 영향 고려를 위한 Actuator Surface Method 삽입



감사합니다.
