

항공기 무장 분리 메커니즘 모사를 위한 6자유도 해석 모듈 개발

Development of 6-DOF Analysis Module to Simulate
Aircraft Store Separation Mechanism

최대산*, 이웅현, 이상돈

(주)넥스트폼 기술연구소

목차

I. 연구 배경

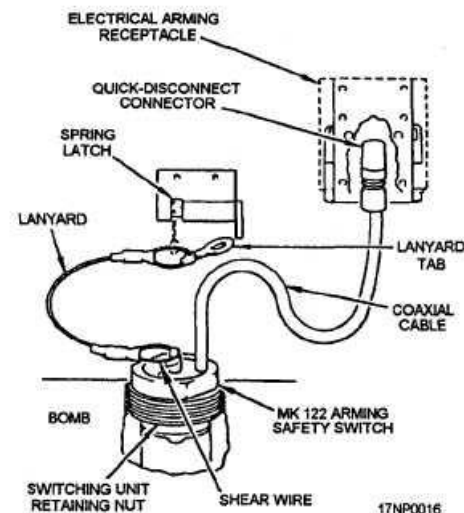
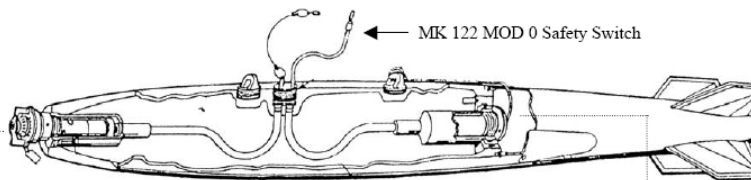
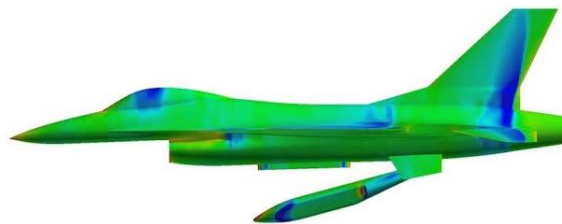
II. 연구 방법

III. 연구 결과

IV. 결론

■ 무장 분리

- 무장 분리 연구에 있어 풍동 시험 및 비행 시험은 고위험/고비용 문제
- CFD를 이용한 무장 분리 연구는 효용이 크다고 할 수 있음
- 항공기의 무장 분리는 Ejector, Sliding rack, Pivot 등을 사용하는 방법이 존재
- 안전 장치, 데이터 전송 : Umbilical cable, fuse 등
 - Umbilical cable이 un-plug 될 때만, 조종면 전개 등 후속 절차 진행 → 무장 분리 문제 시 안전성 재고



연구 배경

■ 연구 필요성

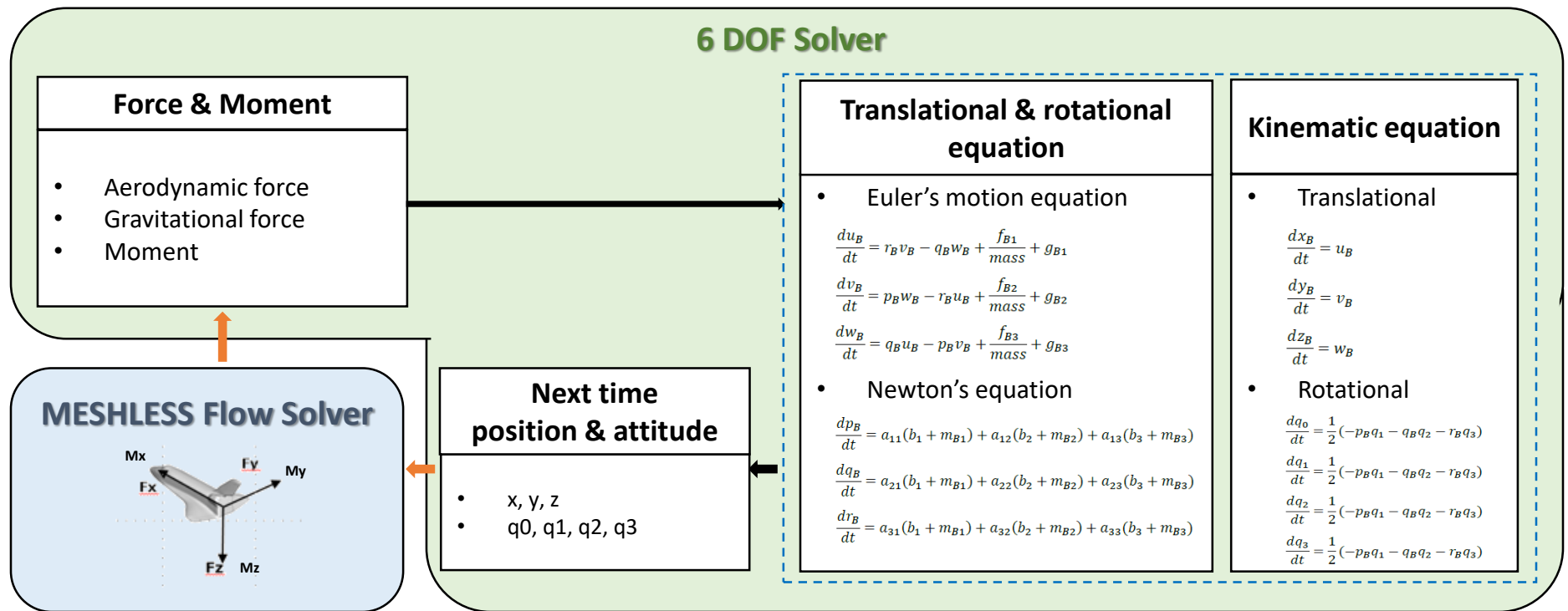
- 실제 무장 분리는 복잡한 절차 및 다양한 메커니즘을 통해 수행
- 무장분리 관련 선행 연구들은 다소 간략화된 형태로 무장 분리 모사 모사한 메커니즘이 이젝터 정도로 한정

■ 연구 목표

- (1) 무장 분리 메커니즘을 보다 정교하게 모사
- (2) 이젝터 뿐만 아니라 여러 무장 분리 메커니즘을 모사
→ 무장 분리 시뮬레이션 해석의 정확도 향상 / 다양한 시나리오 해석 가능

■ 연구에 사용된 기존 해석 솔버 (FAMUS) 구성

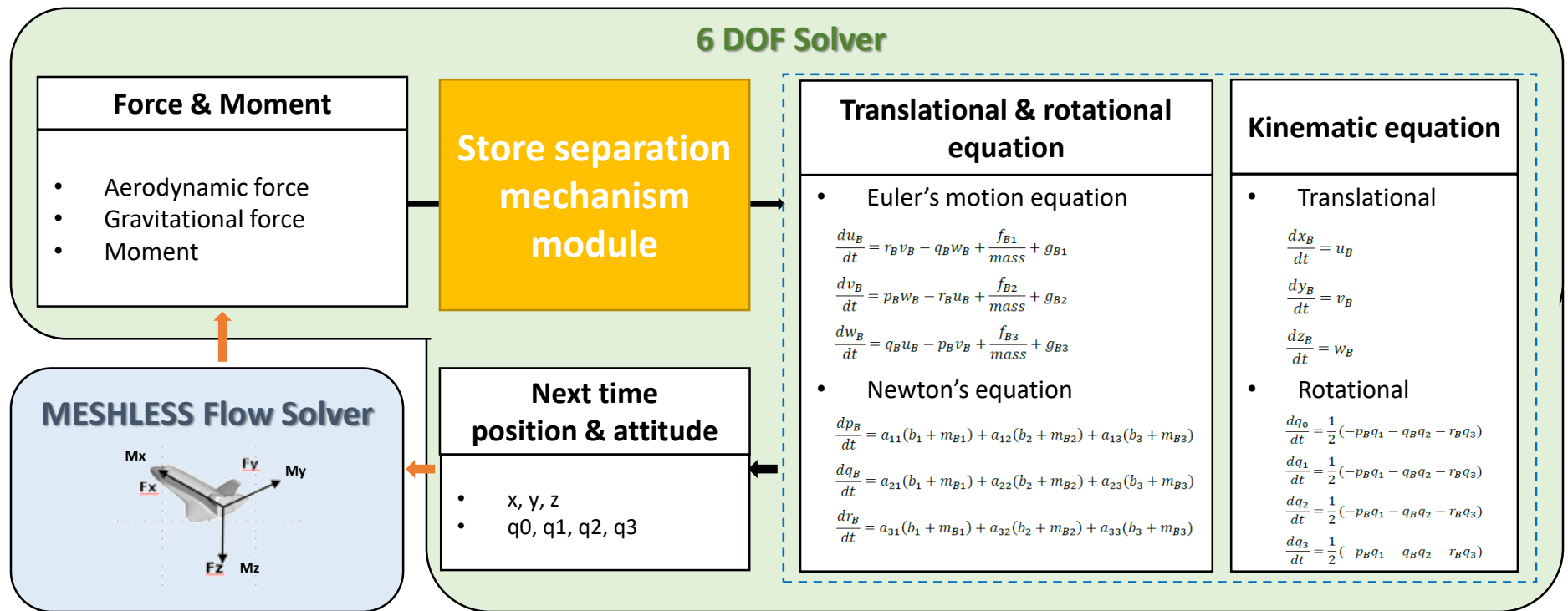
- 공력 해석 모듈 : 공력 계산
- 6 DOF 모듈
 - 공력을 포함한 힘/모멘트 계산
 - 힘/운동 방정식 계산 → 다음 time step의 위치/자세/... → 공력 해석 모듈에 전달



연구 방법

■ 기존 솔버에 무장 분리 메커니즘 구현 모듈 추가

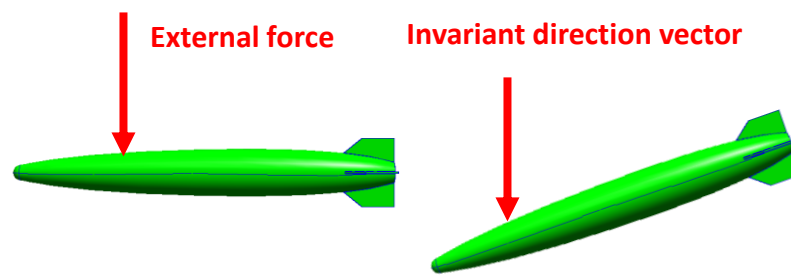
- 공력 해석 모듈 : 공력 계산
- 6 DOF 모듈
 - 공력을 포함한 힘/모멘트 계산 → **무장분리 모사를 위한 구속조건 부여**
→ 힘/운동 방정식 계산 → 다음 time step의 위치/자세/... → 공력 해석 모듈에 전달



■ 요소 힘/운동 구속조건

■ 외력 (External force)

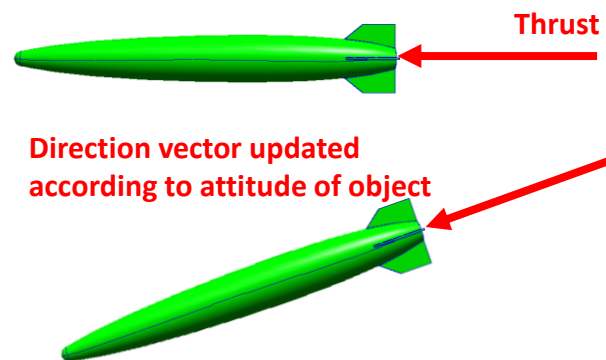
- 사용자가 정의한 외력을 물체 net-force에 적용
- Time step 마다
작용점 위치 변화 만큼, 외력벡터 위치 변환
- 입력 값
 - 작용점 (Body fixed coordinate), 방향 벡터
 - 외력 vs. 시간 – (1) constant, (2) time variant table



< External force vector change over time >

■ 추력 (Thrust)

- 사용자가 정의한 추력을 물체 net-force에 적용
- Time step 마다
추력 작용점 위치 변화 만큼, 추력벡터 위치 변환
물체 자세 변화 만큼, 추력벡터 회전 변환
- 입력 값
 - 작용점 (Body fixed coordinate), 방향 벡터 (variant with time)
 - 외력 vs. 시간 – (1) constant, (2) time variant table



< Thrust vector change over time >

■ 요소 힘/운동 구속조건

■ 병진 / 회전 운동 구속

- 사용자가 정의한 벡터 방향으로 병진운동 / 회전운동 자유도 부여
- 입력 값
 - 방향 벡터 (Translational direction / Rotational axis)

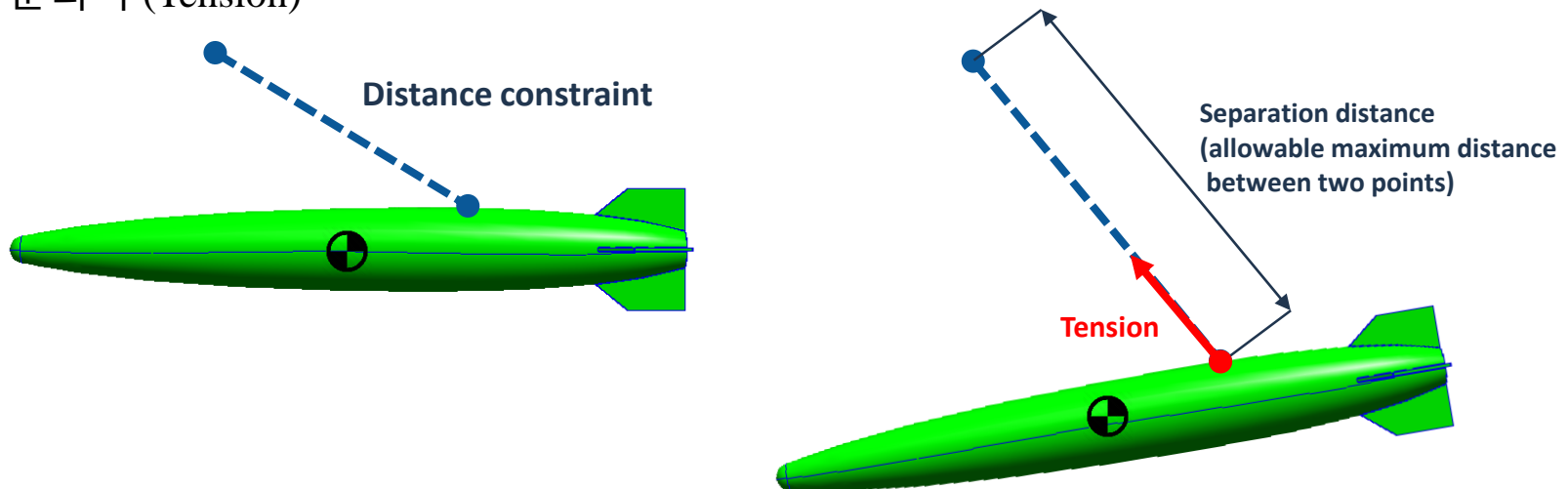
■ 피봇 (Pivot)

- 피봇 점 기준 회전 운동 자유도 부여
- 피봇 점 → 회전 중심 / 변화된 회전 중심 기준 새 MOI 적용 (Parallel axis theorem)
- 입력 값
 - 피봇 위치
 - 방향 벡터

■ 요소 힘/운동 구속조건

■ 거리 구속(Distance)

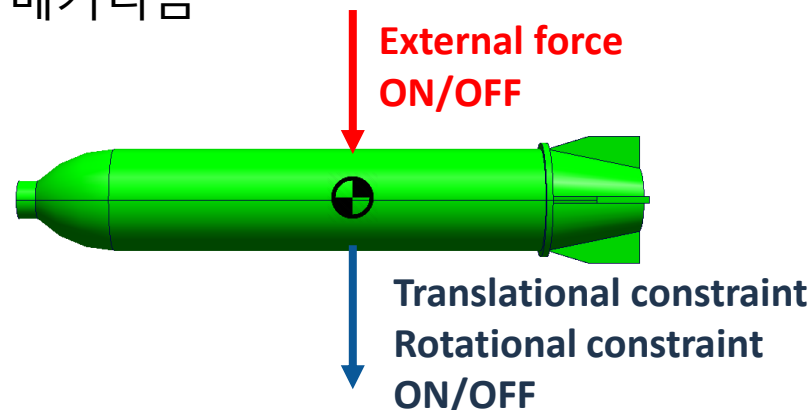
- 두 점의 거리가 분리거리 이상일 때 장력 작용
- 장력 이상의 힘이 작용할 경우 → 구속 비활성화 (Cable un-plug)
- 입력 값
 - Object knot 위치 (Time variant)
 - Root knot 위치 (Fixed)
 - 분리 거리
 - 분리력 (Tension)



< Distance constraint working concept >

■ 요소 힘/운동 구속조건 조합 → 무장분리 메커니즘

- 예) 이젝터 무장 분리 메커니즘



- 메커니즘 모사를 위한 요소 구속조건 조합

< Force and kinetic constraint combination for store separation simulation >

	힘		운동 구속				ON / OFF Boolean		
	외력	추력	병진	회전	피봇	거리	시간	영역	링크
Ejector	○		○	○			○	○	○
Sliding		○	○	○			○	○	○
Pivot					○		○	○	○
UC						○			○

■ ON/OFF Boolean

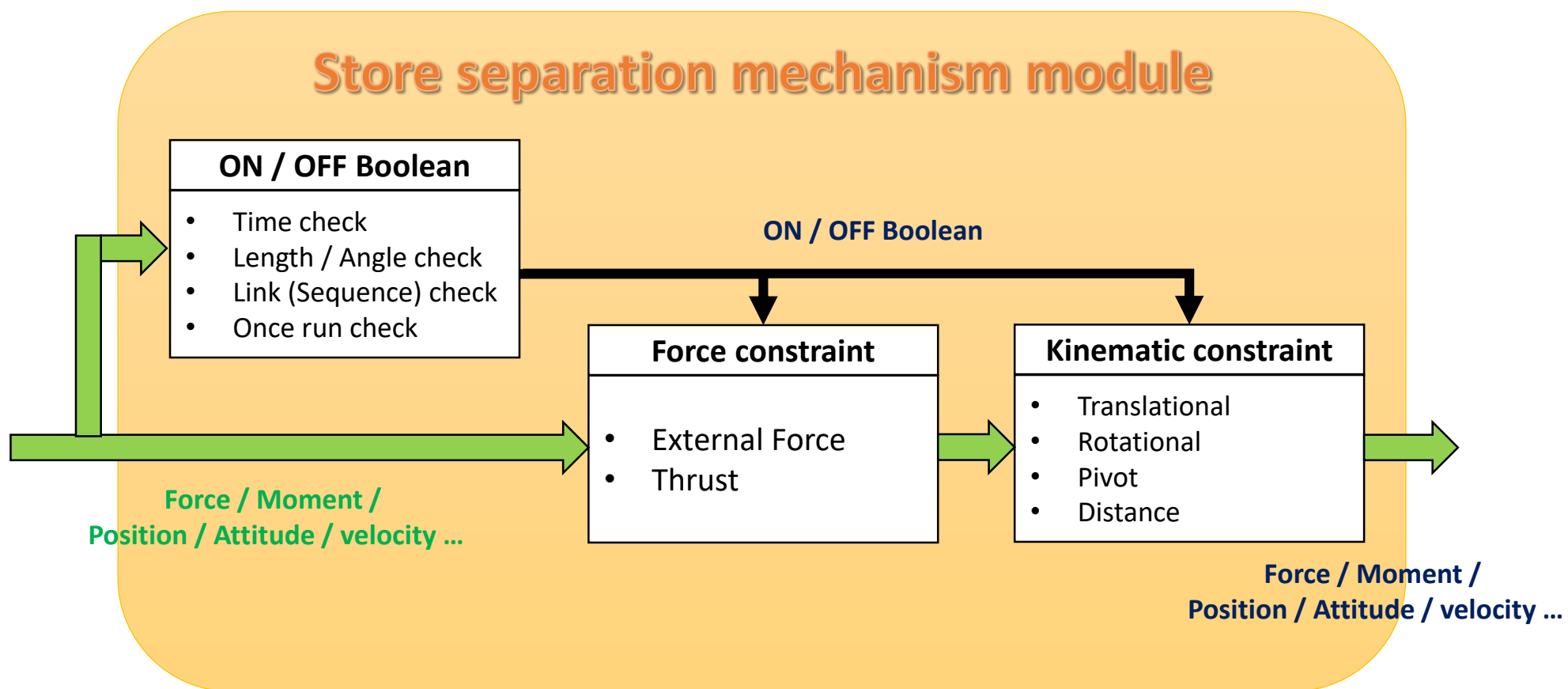
■ 목적

- 여러 구속조건들의 일련의 조합 / 순서를 통해 모사되는 외장분리 문제
ex) 이젝터 → Bomb에 결합된 UC → UC un-plug → Un-plug 이후 delay → Thrust 작용
- 각 구속조건들의 적용 조건, 적용 순서 등을 체계적으로 적용

- (1) 시간, (2) 영역, (3) 링크로 각 구속 조건의 ON / OFF 결정

On/Off boolean	시간	영역	링크
입력 값	(1) 시간 boolean 적용 여부 (2) 시작 시간 (3) 종료 시간	(1) 영역 boolean 적용 여부 (2) 구속 영역 (길이, 각도)	(1) 링크 boolean 적용 여부 (2) 링크할 구속 조건 (타입, 번호) (3) 링크된 구속 조건과 (a) 동시 실행 (b) 조건 종료 후 실행

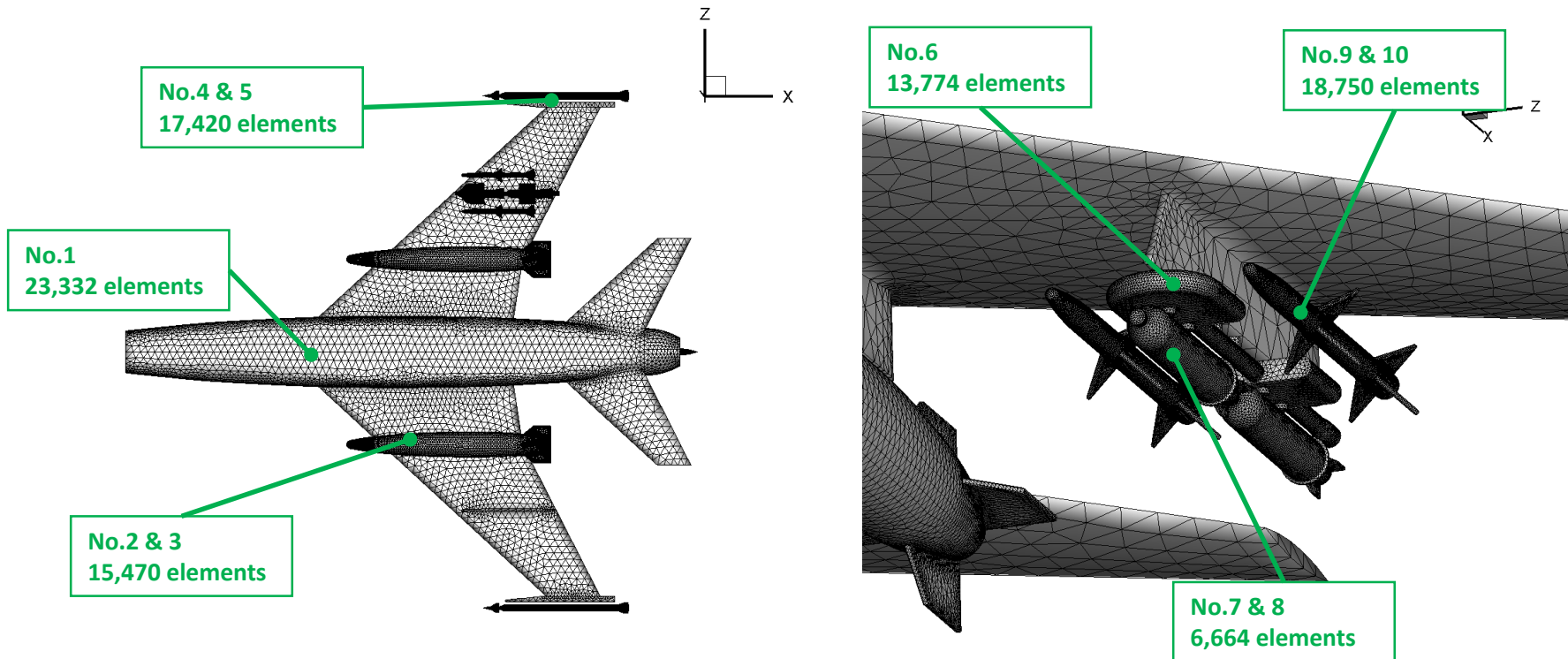
■ 무장 분리 메커니즘 모듈 구성



연구 결과

■ 테스트 문제 : 무장 분리 메커니즘 구현 여부 확인

- 각 무장에 다양한 방식으로 무장 분리 메커니즘 적용
- Open CAD library & clean-up → 형상 파일 획득
- 물성치 (질량, MOI) : 균일 밀도 가정하여 계산
- 표면격자 총 153,714 개, 전체 질점 개수 200~300만개 수준



연구 결과

■ 테스트 문제 : 무장 분리 메커니즘 구현 여부 확인

- 자유류 조건 (Transonic ONERA M6 wing)

M_{∞}	Re_{unit}	T_{∞}	P_{∞}
0.84	18.014e6	300 K	95751.07 Pa

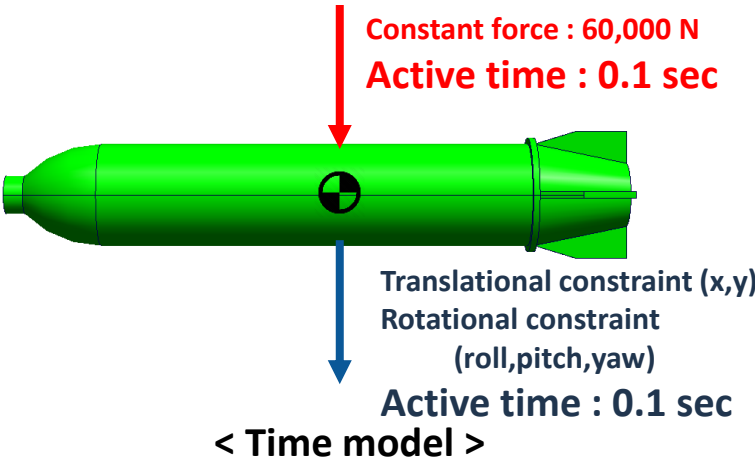
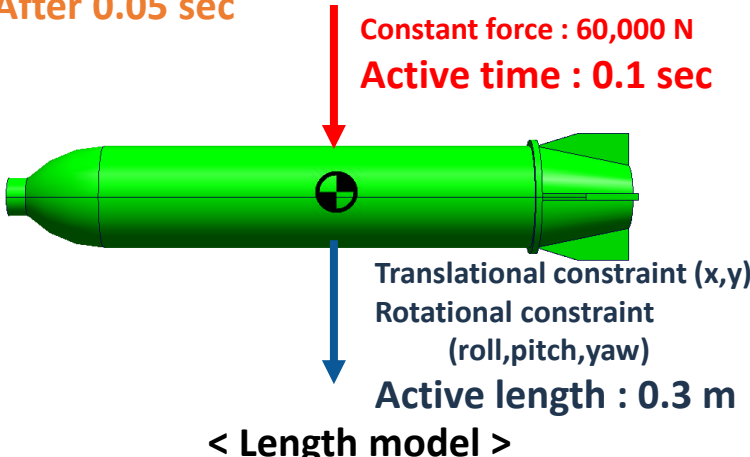
- CFD 계산 알고리즘 / 조건

구분	조건
Governing equation	Euler equation
Gas assumption	Calorically perfect gas
Convective term discretization	M-AUSMPW+
Spatial accuracy order	2 nd
Limiter	MINMOD
Time integral	LU-SGS
CFL number	1.0
Pseudo iteration	600
Physical time step	0.01

연구 결과

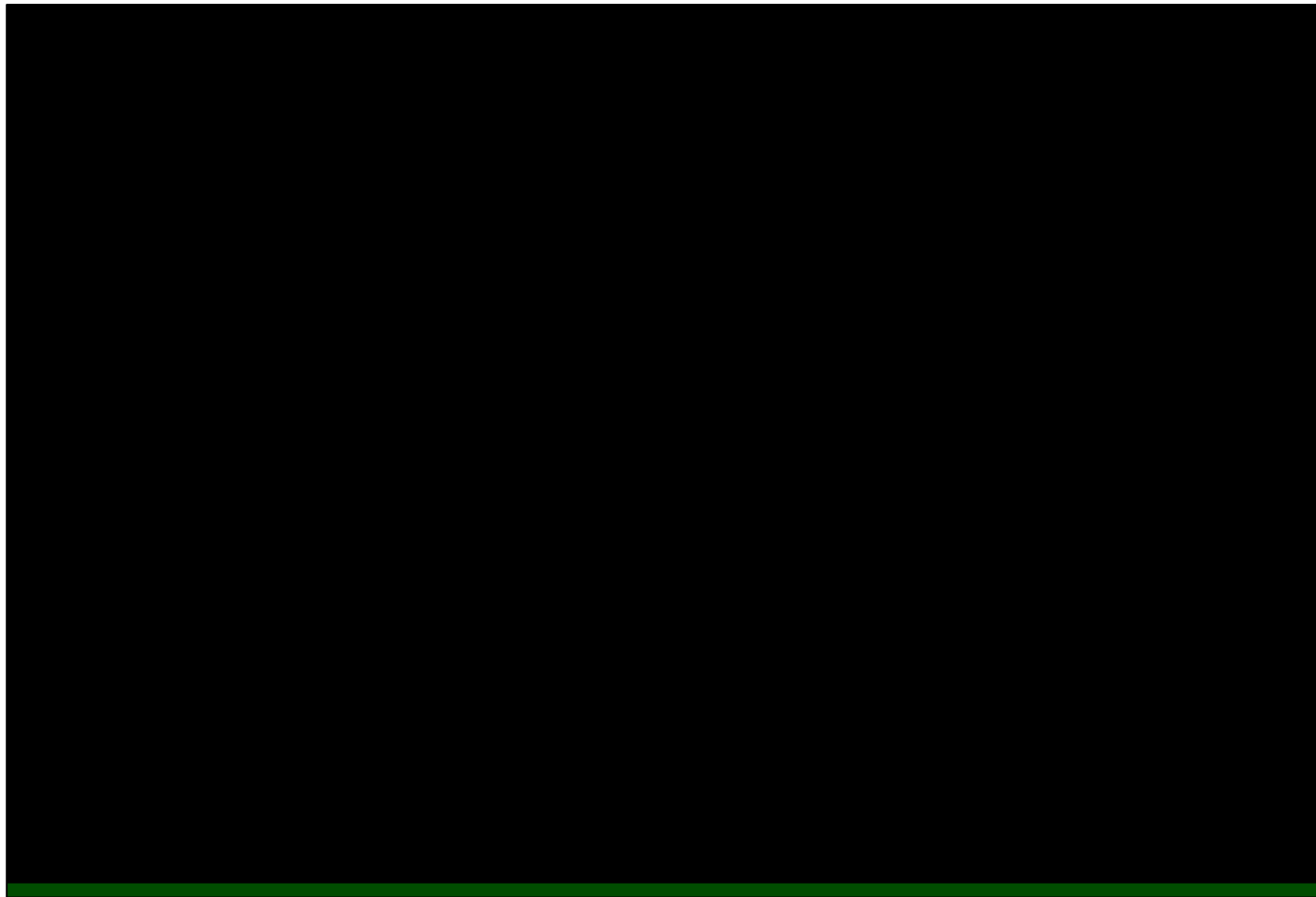
■ Ejector 무장 분리 메커니즘 구현 확인

- 2개의 동일한 Bomb 형상에 Ejector 무장 분리 시나리오 구성
- 궤적 데이터를 통해 정상 작동 확인
- 주요 확인 사항
 - Ejecting force
 - 첫 번째 bomb 분리 후 다음 bomb 이 delay time을가지며 무장 분리
 - 시간/거리에 따른 운동 구속의 on/off 작동

1	 <p>Constant force : 60,000 N Active time : 0.1 sec</p> <p>Translational constraint (x,y) Rotational constraint (roll,pitch,yaw) Active time : 0.1 sec</p> <p>< Time model ></p>
2	<p>After 0.05 sec</p>  <p>Constant force : 60,000 N Active time : 0.1 sec</p> <p>Translational constraint (x,y) Rotational constraint (roll,pitch,yaw) Active length : 0.3 m</p> <p>< Length model ></p>

연구 결과

- Ejector 무장 분리 메커니즘 구현 확인
 - 비정상 CFD 해석 결과

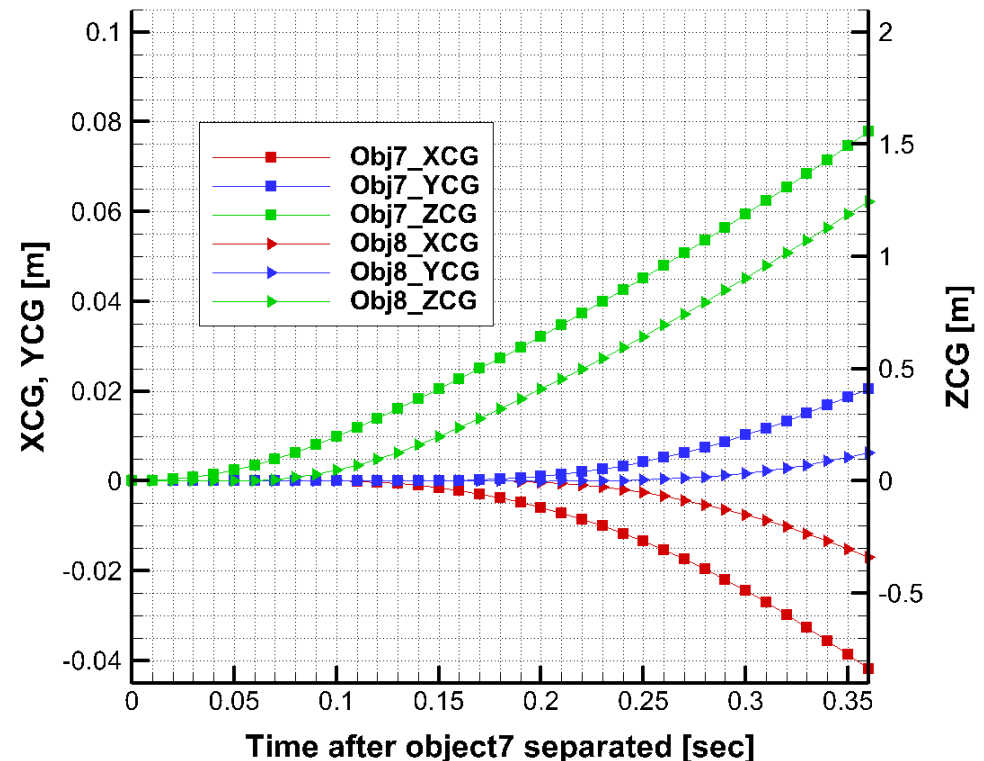
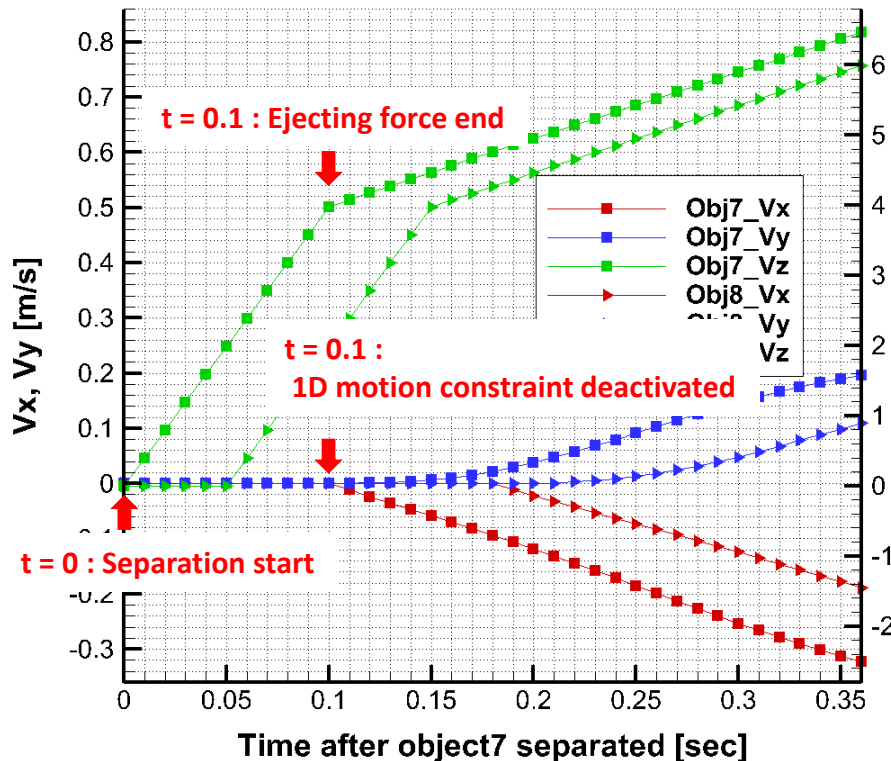
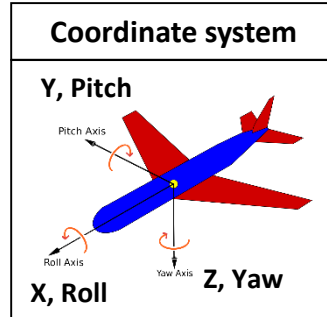


연구 결과

■ Ejector 무장 분리 메커니즘 구현 확인

■ Bomb 1 (time model)

- ① 무장 분리 시작 → Ejecting force / Z 방향 병진 구속 활성화 (Ejector mechanism)
- ② 0.1 sec 이후 → Ejecting force / Z 방향 병진 구속 비활성화

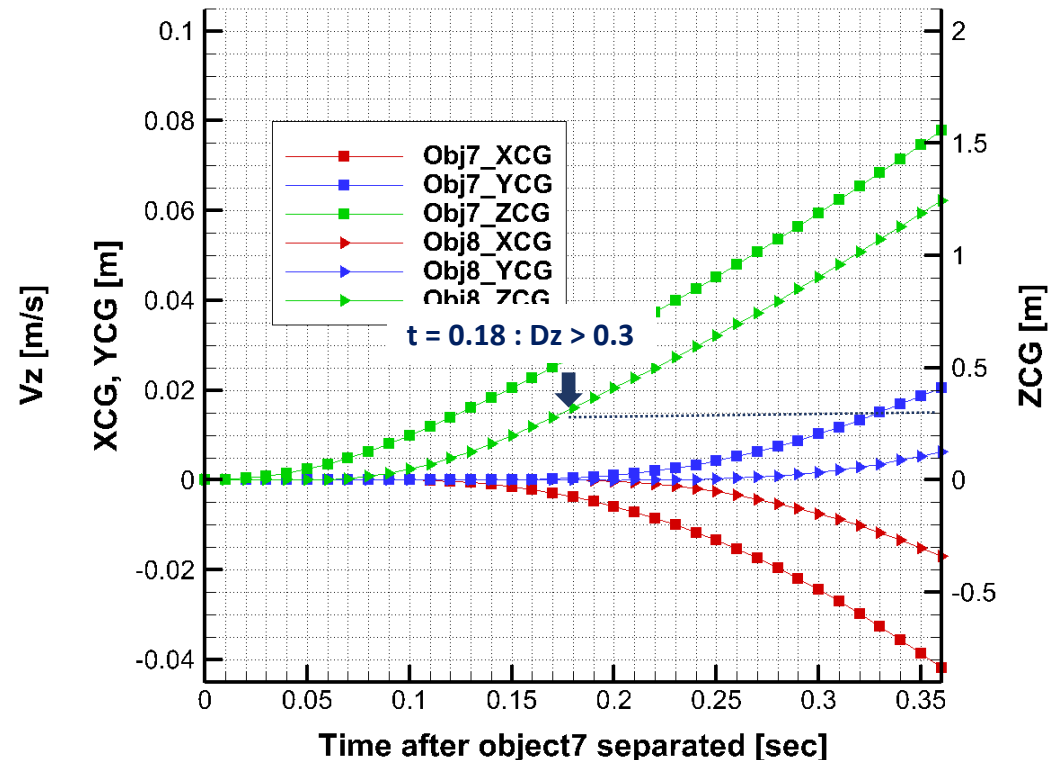
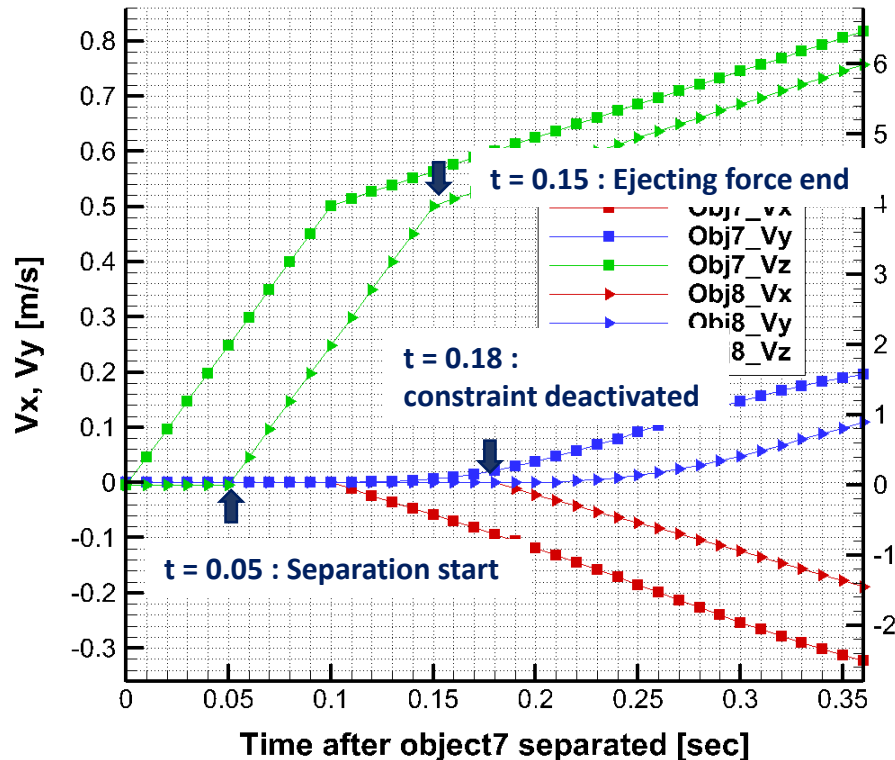
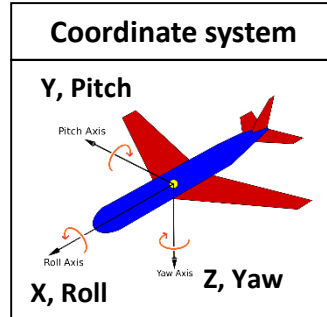


연구 결과

■ Ejector 무장 분리 메커니즘 구현 확인

■ Bomb 2 (length model)

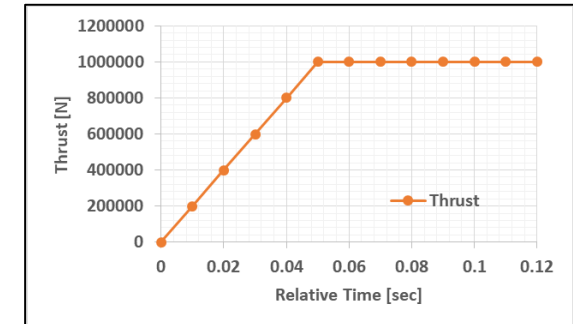
- ① Bomb 1 분리 이후 0.05 sec 지연 시간
- ② 0.05 sec 분리 시작 → Ejecting force / Z 방향 병진 구속 활성화
- ③ 0.15 sec → Ejecting force 비활성화
- ④ Ejector 구속 거리 ($Dz > 0.3$ m) 도달 : 0.18 sec → Z 방향 병진 구속 비활성화



연구 결과

■ Pivot & Umbilical cable 메커니즘 구현 확인

- Bomb 형상에 Pivot 구속 조건, UC이 포함된 복잡한 무장 분리 시나리오 구성
- 궤적 데이터를 통해 정상 작동 확인



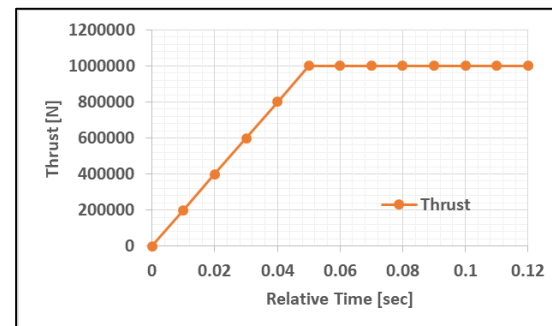
1	<p>Constant force : 10,000 N Active time : 0.00 ~ 0.05 sec</p>	2	<p>Release angle : 6 deg.</p>
3	<p>Sep. distance : 2 m Tension : 200 N</p>	4	<p>Thrust (Time variant) Start 0.06 sec. after umbilical un-plug signal</p>

연구 결과

■ Pivot & Umbilical cable 메커니즘 구현 확인

■ 주요 확인 사항

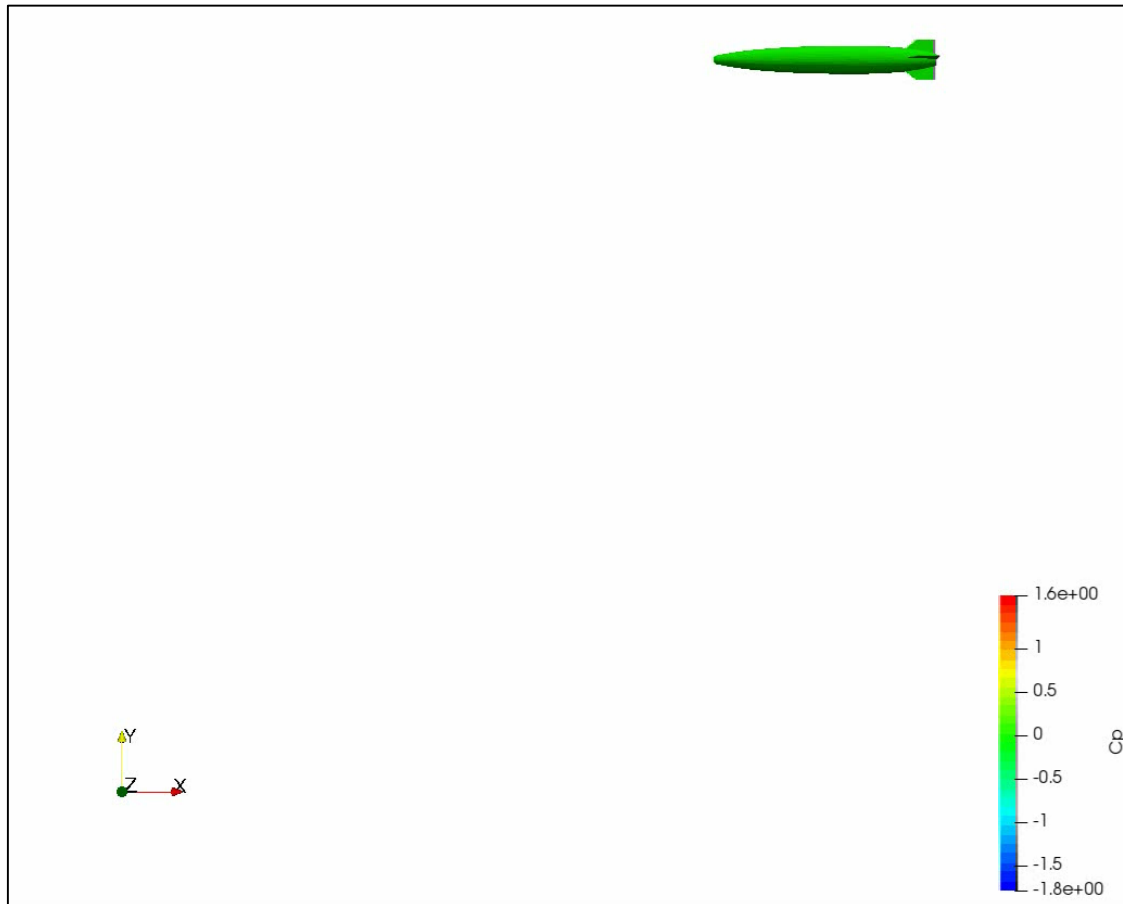
- Pivot 구속 → 분리각 도달 시 구속 off
- UC → 분리거리 도달 시 un-plug (다음 process를 위한 신호)
- Un-plug 0.06 sec 이후 추력 발생 시작



1	<p>Umbilical cable</p> <p>Pivot</p> <p>Constant force : 10,000 N Active time : 0.00 ~ 0.05 sec</p>	2	<p>Umbilical cable</p> <p>Pivot</p> <p>Release angle : 6 deg.</p>
3	<p>Umbilical cable</p> <p>Sep. distance : 2 m</p> <p>Tension : 200 N</p>	4	<p>Thrust (Time variant) Start 0.06 sec. after umbilical un-plug signal</p>

연구 결과

- Pivot & Umbilical cable 메커니즘 구현 확인
 - 비정상 CFD 해석 결과

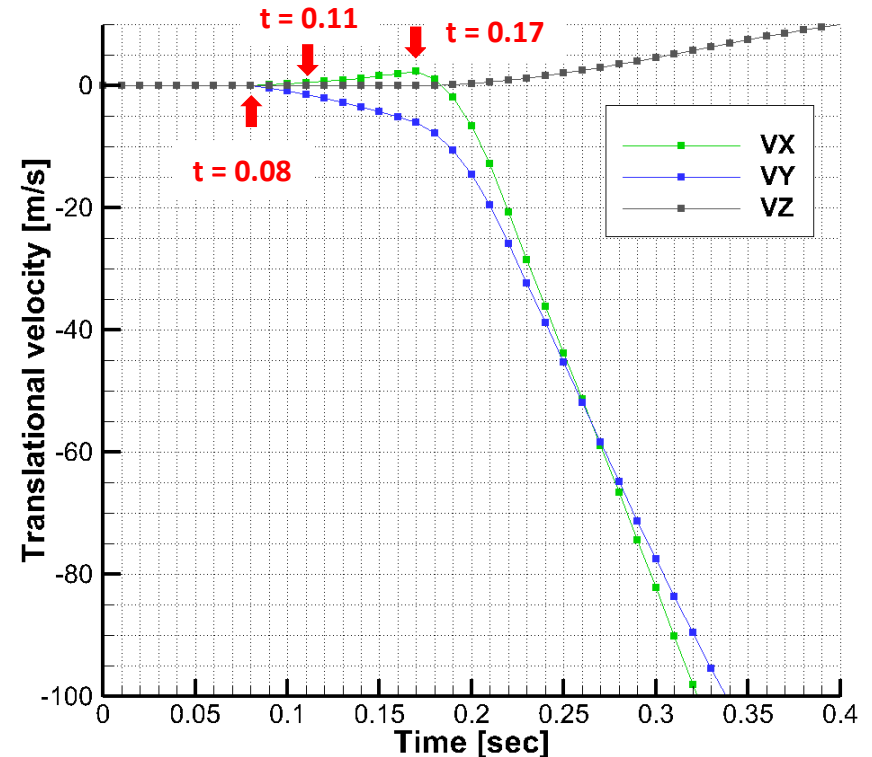
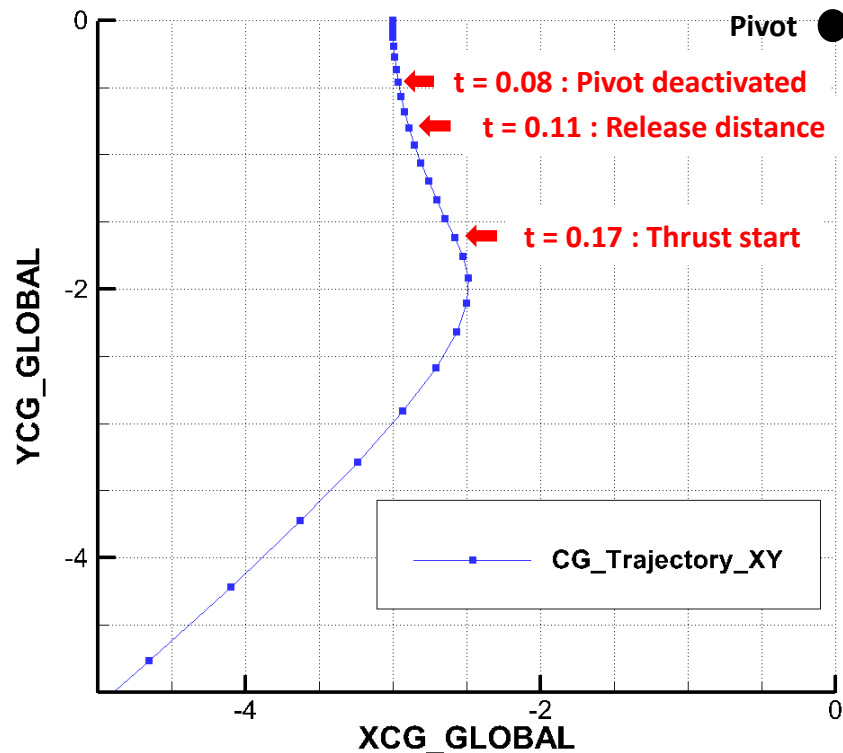


연구 결과

■ Pivot & Umbilical cable 메커니즘 구현 확인

■ 궤적 데이터를 통해 정상 작동 확인

- ① 무장 분리 시작 → 피봇 운동
- ② 피봇 분리각 도달 → 피봇 비활성화 → 낙하 시작
- ③ UC 분리 거리 도달 → UC unplug 신호 전달
- ④ UC unplug 신호 0.06초 이후 추력 발생



■ 요약

- 보다 실제적이고 정확한 무장 분리 메커니즘 모사 연구
- 요소 힘/운동 구속 조건 및 ON/OFF Boolean 의 조합을 통해 대표적인 무장 분리 메커니즘 모사 (Ejector, Sliding missile, Pivot, UC)
- 테스트 문제 해석을 통해 구현된 메커니즘 모듈 구현 여부 확인

■ 후속 연구 계획

- 구현된 메커니즘 모듈 정확도, 신뢰성 평가
 - 시뮬레이션 결과와 비교할 실제적인 무장 분리 궤적데이터 필요
- 항공기 가속/회전 기동 중 무장 분리 모사

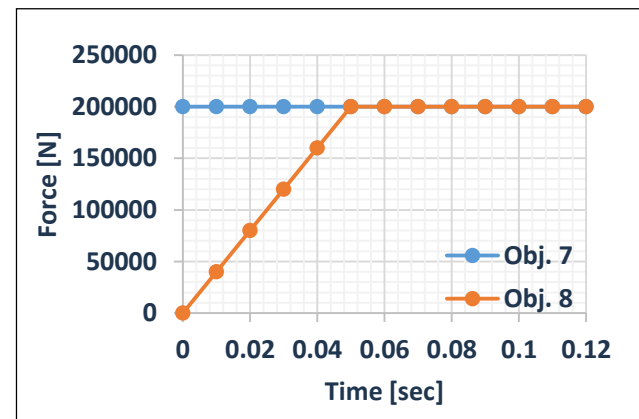
감사합니다.

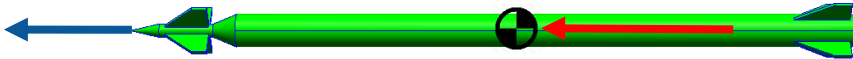
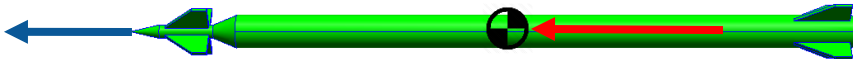
Thank you.

연구 결과

■ Sliding 무장 분리 메커니즘 구현 확인

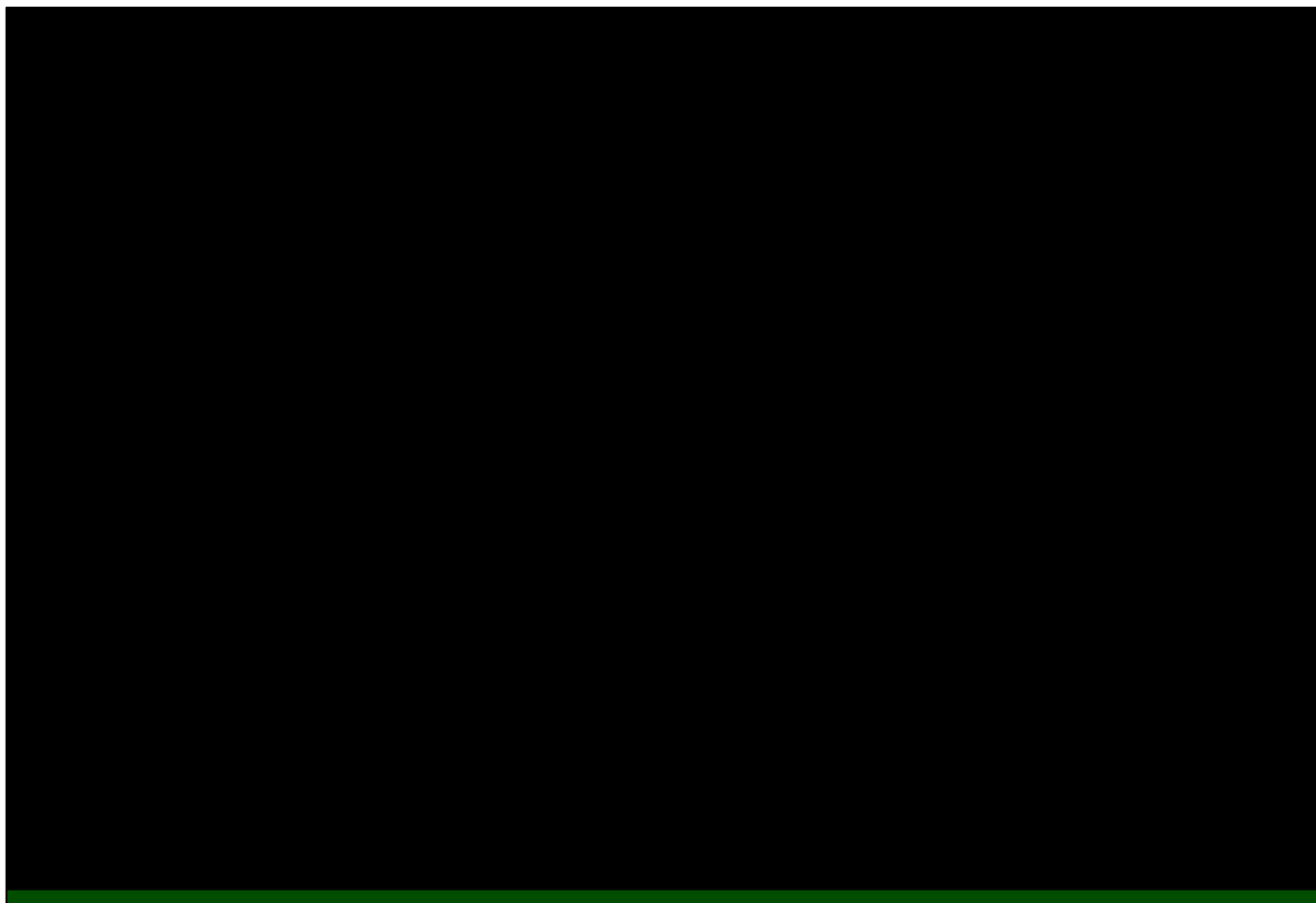
- 2개의 동일한 missile 형상에 sliding 무장 분리 시나리오 구성
- 궤적 데이터를 통해 정상 작동 확인
- 주요 확인 사항
 - Sliding시 병진 운동 구속 적용 여부
 - 시간에 따른 운동 구속의 on/off 작동
 - Time variant thrust



1	<p>Constant force : 200,000 N Active time : always</p>  <p>Translational constraint (y,z) Rotational constraint (roll,pitch,yaw) Active time : 0.2 sec</p> <p>< Constant model ></p>	2	<p>Force with rising time: 200,000 N Active time : always</p>  <p>Translational constraint (y,z) Rotational constraint (roll,pitch,yaw) Active time : 0.2 sec</p> <p>< Time variant model ></p>
---	---	---	--

연구 결과

- Sliding 무장 분리 메커니즘 구현 확인
 - 비정상 CFD 해석 결과

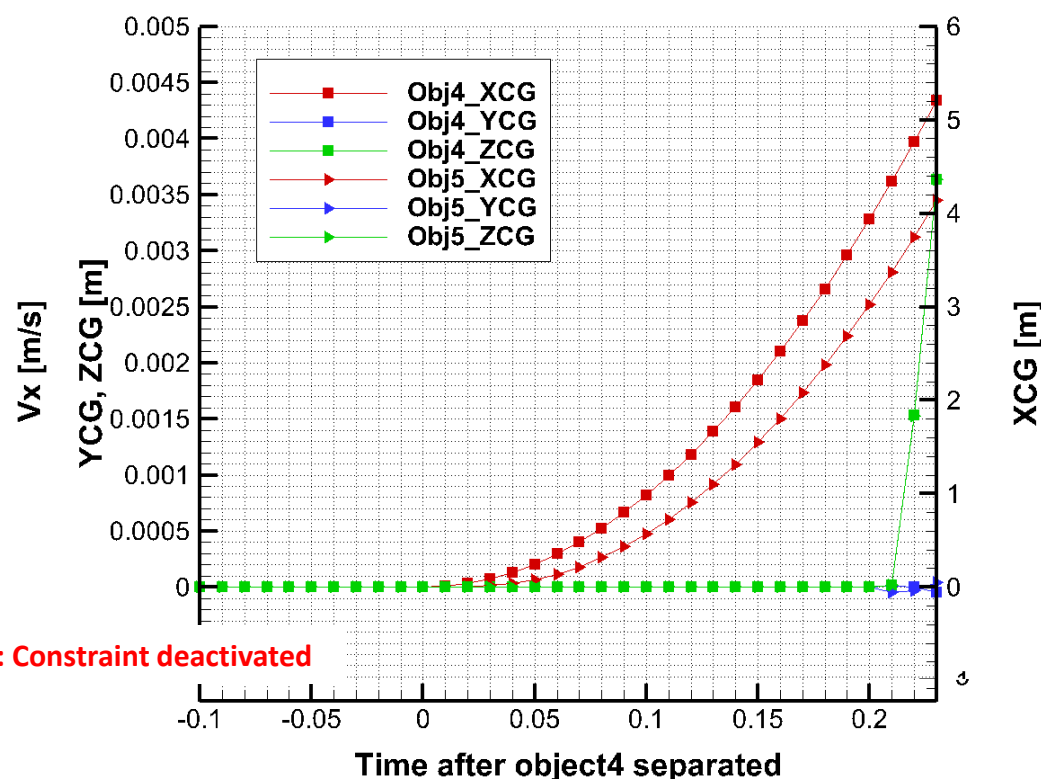
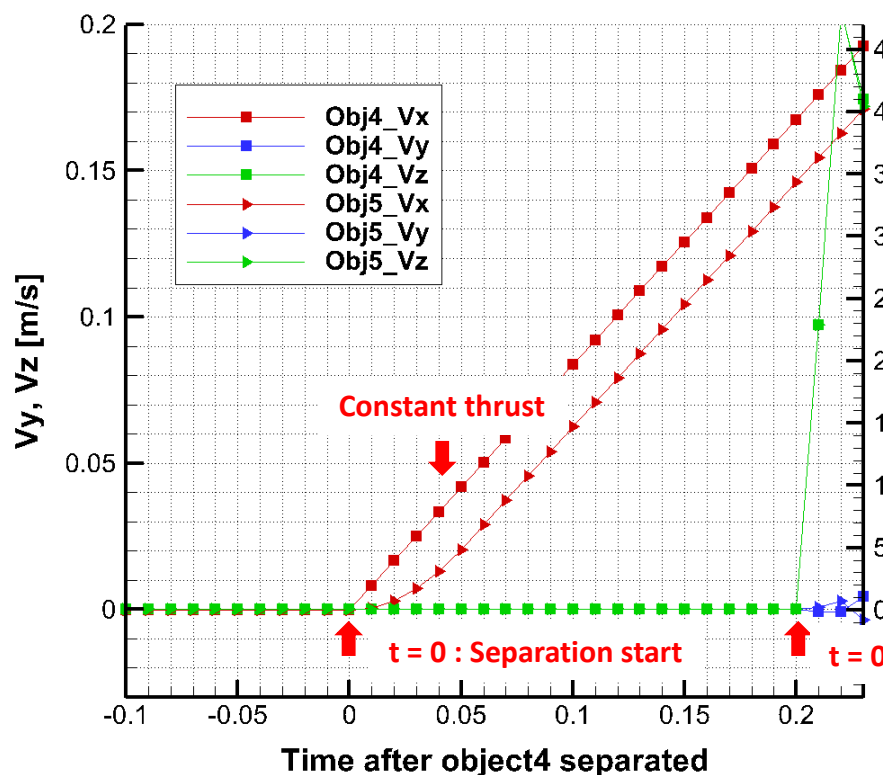
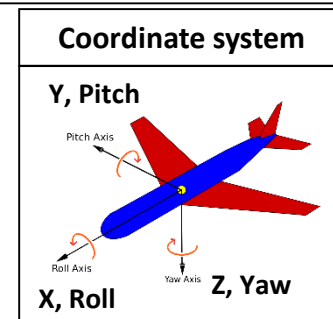


연구 결과

■ Sliding 무장 분리 메커니즘 구현 확인

■ Missile 1 (Constant model)

- ① 무장 분리 시작 → Thrust force (Constant) / X 방향 병진 구속 활성화 (Sliding mechanism)
- ② Sliding 구속 시간 도달 (0.2 sec) → X 방향 병진 구속 비활성화



연구 결과

■ Sliding 무장 분리 메커니즘 구현 확인

■ Missile 2 (Time variant model)

- ① 무장 분리 시작 → Thrust force (Time variant) / X 방향 병진 구속 활성화 (Sliding mechanism)
- ② Sliding 구속 시간 도달 (0.2 sec) → X 방향 병진 구속 비활성화

