

다물체 요소 이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션

† 윤현규 · 이홍석* · 박종규* · 김연규**

† 창원대학교 조선해양공학과, *창원대학교 기계공학전공, **한국해양연구원 대덕분원

요약 : 예선이 부선을 예인줄로 연결하여 운항할 시 예인줄에 걸리는 장력 및 형상을 예인줄을 다물체로 분할하여 모델링하였다. 이러한 예인줄 요소에 대한 횡동요를 제외한 5자유도 운동방정식을 구성하고, 각 요소들에 작용하는 힘을 정식화하여 연성 운동방정식을 도출하였다. 예인줄 요소들 간에는 예인줄의 재료 특성에 따른 강성을 가진 스프링과 감쇠장치로 연결하여 동력학적 조건을 부가하였고, 요소의 변형을 허용하는 형태로 운동학적 조건은 설정하지 않았다. 예인줄의 다물체 모델링의 검증에 위하여 단순 낙하, 직진, 사인파 형태로 지그재그로 움직이는 예선과 단순 항력체로 가정한 부선의 운동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

핵심용어 : 예부선, 예인줄, 다물체 요소 모델링, 시뮬레이션

서론

2011 KINPR 주계학술대회

배경

- ▶ 예부선 개요
 - ▶ 국내 예선 등록척수 증가 (1,092척(1997) → 1,236척(2006))
 - ▶ 등록 예선의 80%가 100톤 미만 → 안전에 취약
 - ▶ 다양한 운항형태: 예항, 압항, 협수로 및 천수역 운항 등
 - ▶ 안전 운항 가이드 작성 및 M&S 기반정량적 사고분석 필요성 증대
- ▶ 예인줄 동역학 시뮬레이션 필요
 - ▶ 불안정성이 큰 2물체 연성 문제
 - ▶ 소형 예선에 대한 표준 동역학 모델 부족
 - ▶ 예부선 시뮬레이터에 적합한 예인줄 동역학 모델

목표

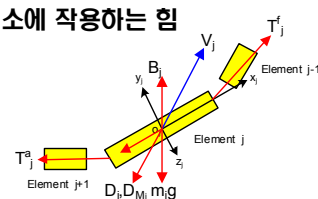
예인줄 요소 및 반복계산(iteration)이 불필요한 예인줄 동역학 모델
→ 예부선 시뮬레이터에 적용

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 3/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

운동방정식

2011 KINPR 주계학술대회

▶ 예인줄 요소에 작용하는 힘



▶ 운동방정식

▶ 5자유도: 횡동요 무시

$$(M + M_A) \ddot{y}' = C + C_A + D + D_M + H + B + W + T^f + T^a$$

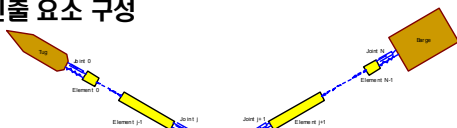
부가장력, 부가 Coriolis 힘, 재료 강성력, 부력, 전방 장력, Coriolis 힘, 유체 항력, 입수중격력, 중력, 후방 장력

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 6/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

예인줄 요소 구성 및 좌표계

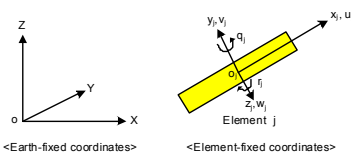
2011 KINPR 주계학술대회

▶ 예인줄 요소 구성



▶ 좌표계

- ▶ 지구고정좌표계(O-XYZ) - 관성좌표계로 간주
- ▶ 예인줄 요소고정좌표계(o_j-x_j y_j z_j) - 물체고정좌표계



▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 5/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

작용력 모델링

2011 KINPR 주계학술대회

▶ Coriolis 힘

▶ 실제로는 관성력

$$C = \begin{bmatrix} -m(gw - rv) \\ -mru \\ mqu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_A = \begin{bmatrix} -m_x qv + m_y rv \\ -m_x ru \\ m_x qu \\ (m_x - m_y) wu \\ (m_x - m_y) rv \end{bmatrix}$$

▶ 유체 항력

▶ 거친 표면을 갖는 원통형 실린더 가정 : $C_f = 0.015, C_D = 1.2$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \rho D |u| C_f \\ -\frac{1}{2} \rho D |u| C_D \\ -\frac{1}{2} \rho D |u| C_D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 8/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

† 교신저자 정희원) hkyoon@changwon.ac.kr

** 정희원 lonepier@moeri.re.kr

작용력 모델링

▶ 재료 감쇠력

- ▶ 인장하중에 최대 신장을 적용

$$D_M = \begin{bmatrix} c_x u \\ c_y v \\ c_z w \\ c_m q \\ c_r r \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \Delta \ddot{x} + 2\zeta_x \omega_m \Delta \dot{x} + \omega_m^2 \Delta x = 0 &\Rightarrow c_x = 2\zeta_x \sqrt{k_y m} \\ \ddot{\theta} + 2\zeta_m \omega_m \dot{\theta} + \omega_m^2 \theta = 0 &\Rightarrow c_m = 2\zeta_m \sqrt{k_r \Delta x I I_y} = 2\zeta_m \sqrt{P I I_y} \end{aligned}$$

Assume

$$\zeta_x = 0.5, c_y = c_z = \frac{1}{10} c_x, \zeta_m = \zeta_n = 0.5$$

▶ 입수 충격력, 중력, 부력

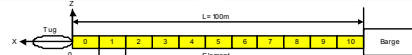
$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{m_j}{\Delta t} v \\ -\frac{m_j}{\Delta t} w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} mg \sin \theta \\ 0 \\ -mg \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -\rho \nabla g \sin \theta \\ 0 \\ \rho \nabla g \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 9/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

대상 예인줄 및 부선

▶ 예인줄 및 부선 사양

항목	값	항목	값
전체 길이	100 m	수선간 길이	50 m
예인줄 단면의 지름	0.05 m	폭	15 m
단위 길이당 무게	1.725 kgf/m	출수	0.5 m
인장강도	16 ton	방형계수	0.9
신장률	15 %	z축 관성반경	0.25L
요소 개수	11		



▶ 예인줄 요소의 강성 및 시뮬레이션 시간 간격

$$k_j = \frac{P}{d}, \quad \Delta t \leq \alpha T_{nj} = \alpha \cdot 2\pi \sqrt{\frac{m_j}{k_j}}$$

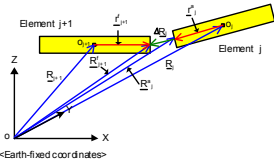
▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 12/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

작용력 모델링

▶ 장력

- ▶ 장력 = 강성계수*예인줄 요소의 연결점 간의 거리

$$\begin{aligned} [T]_{j-3} &= T_j^a + T_j^f \\ [T]_{j-5} &= T_j^a \times T_j^f + T_j^f \times T_j^f \end{aligned} \quad \text{여기서, } \begin{aligned} T_j^a &= k C_{nj}^b \Delta R_j = k C_{nj}^b (R_{j+1} + C_{nj+1}^r T_{j+1}^f - R_j - C_{nj}^r T_j^a) \\ T_j^f &= -C_{nj+1}^b C_{nj}^a T_j^a \end{aligned}$$



▶ 계산 알고리즘

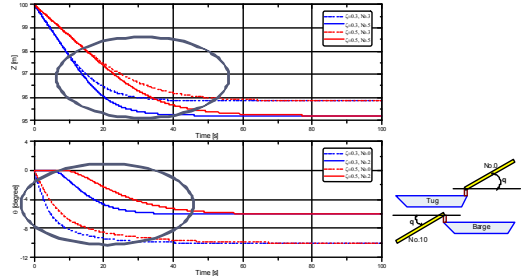
- ▶ j요소 후면 장력을 계산 후, j+1요소의 앞면 장력 계산
- ▶ 0요소 앞면 장력은 예선 예인점에, N요소 후면 장력은 부선 예인점으로 고려

▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 10/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

시뮬레이션 결과

▶ 단순 처짐 경우

- ▶ 표준감쇠비 변화에 따른 예인줄의 처짐 형상 변화



- ▶ 과도 시간구간에서 변화가 있지만 정상상태에서는 일정

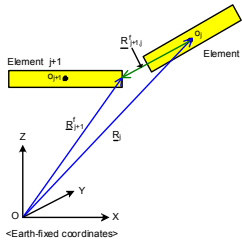
▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 13/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

작용력 모델링

▶ 무장력 조건

- ▶ 인접 예인줄 요소간에 인장이 되지 않는 경우

$$\text{If } \|R_{j+1}^f\| = \|(R_{j+1} + C_{bj+1}^r T_{j+1}^f) - R_j\| \leq \frac{L}{2}, \text{ then } T_j^a = T_{j+1}^f = 0$$

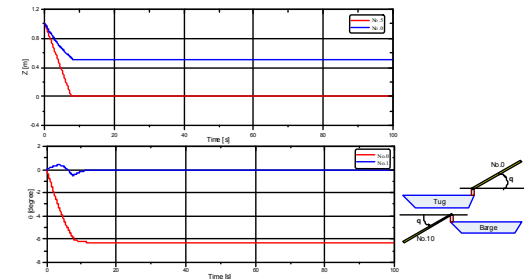


▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 11/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

시뮬레이션 결과

▶ 단순 처짐 경우

- ▶ 수면 위 1m 에서 자유낙하하는 경우



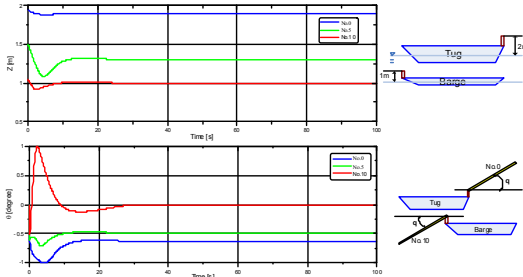
- ▶ No.1, 10 예인줄 요소를 제외하고는 수면상에 위치

▶ 다음체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 14/21 CHANGWON NATIONAL UNIVERSITY

시뮬레이션 결과

▶ 예선이 일정속력으로 전진하는 경우

- ▶ 초기 예부선 간격은 100m, 예인점 위치는 각각 2, 1 m



- ▶ 초기 과도구간 및 정상상태 예인줄 형상은 타당함

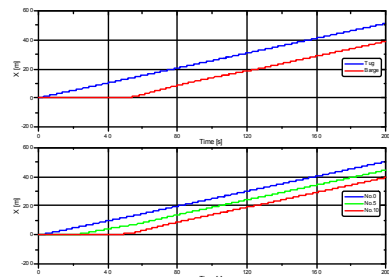
▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 15/21



시뮬레이션 결과

▶ 예인줄이 예선의 계선주에서 풀리기 시작하는 경우

- ▶ 초기 예부선은 동일 위치, 예선이 5 knots의 속력으로 전진



- ▶ 예인줄 요소에 따라 이동 시간이 다르고, 동일 간격 유지

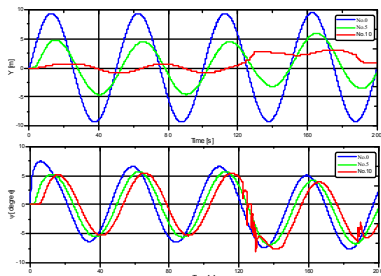
▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 19/21



시뮬레이션 결과

▶ 예선이 전진하면서 사인 운동을 하는 경우

- ▶ 2 knots, Y방향 진폭 10 m, 주기 50 초



- ▶ 예선에서 먼 요소일 수록 Y방향 변위는 줄어듦

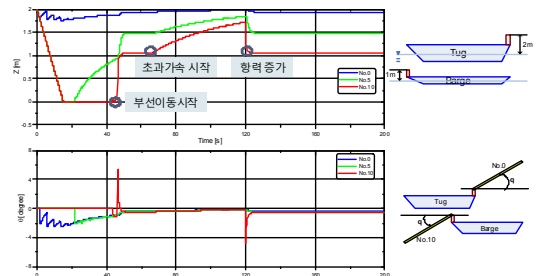
▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 17/21



시뮬레이션 결과

▶ 예인줄이 예선의 계선주에서 풀리기 시작하는 경우

- ▶ 초기 예부선은 동일 위치, 예선이 5 knots의 속력으로 전진



- ▶ 과도 구간 후 정상상태 도달

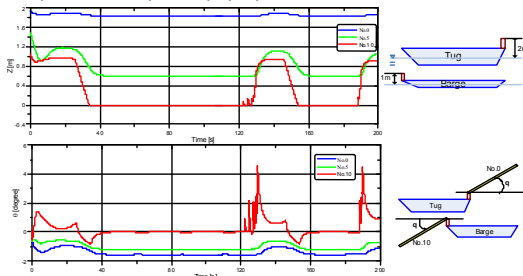
▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 20/21



시뮬레이션 결과

▶ 예선이 전진하면서 사인 운동을 하는 경우

- ▶ 2 knots, Y방향 진폭 10 m, 주기 50 초



- ▶ 부선에 작용하는 인장력이 주기적으로 작용

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 18/21



결론 및 향후과제

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학 모델링

- ▶ 예인줄 요소를 5자유도 운동체로 가정
- ▶ 예인줄 요소들 간에는 스프링, 댐퍼로 연결되어 있고, 동역학적 평형 조건식 적용

- Catenary 모델링에서 고려가 어려운 비인장상태 모사
- 기존의 관성좌표계에서의 3자유도 운동모델에 비하여 예인줄 요소고정좌표계에서 운동을 기술함에 따라 작용력 고려 용이
- 반복과정이 없으므로, 실제 컴퓨팅 시간 예측 → 시뮬레이터에 적용 가능 (일정거리 모델은 어려움)

▶ 모델 검증용을 위한 시뮬레이션 계산 결과 및 고찰

- ▶ 다양한 상태에 대한 시뮬레이션 결과는 실제 예상치와 유사함

▶ 향후 과제

- ▶ 재료 감쇠력 결정 방안 정립 ← 실험 방안
- ▶ 입수충격력, 수면 근처에서의 부력 및 부심 계산 정도 향상
- ▶ 여러 예인줄 모델에 따른 시뮬레이션 결과 비교 및 검토

▶ 다물체 요소이론을 이용한 예인줄 동역학의 모델링 및 시뮬레이션 21/21

