

LTS 기법을 이용한 선박의 저항 및 항주자세 수치계산 시간 단축

OpenFOAM Korea Users' Community Conference

2016년 9월 29~30일

한국해양대학교 해양과학기술대학관

정광열, 김재홍

(주) 넥스트폼

연구배경 및 목표

➤ 연구배경

- CFD를 이용하여 저항을 평가하는 것은 일반적임
 - 라이선스 비용 발생
- 다양한 선속과 흘수에서 최적화된 선박에 대한 요구 증대
 - 과도한 수치계산 시간으로 인하여 CFD의 활용에 한계

➤ 연구목표


- 라이선스 비용이 발생하지 않는 저항해석 프로그램 개발
 - 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM 활용
- 해석시간 단축
 - LTS기법을 이용하고 자유수면과 선체움직임에 고정된 시간간격을 적용

수치해석 방법

➤ 지배방정식

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

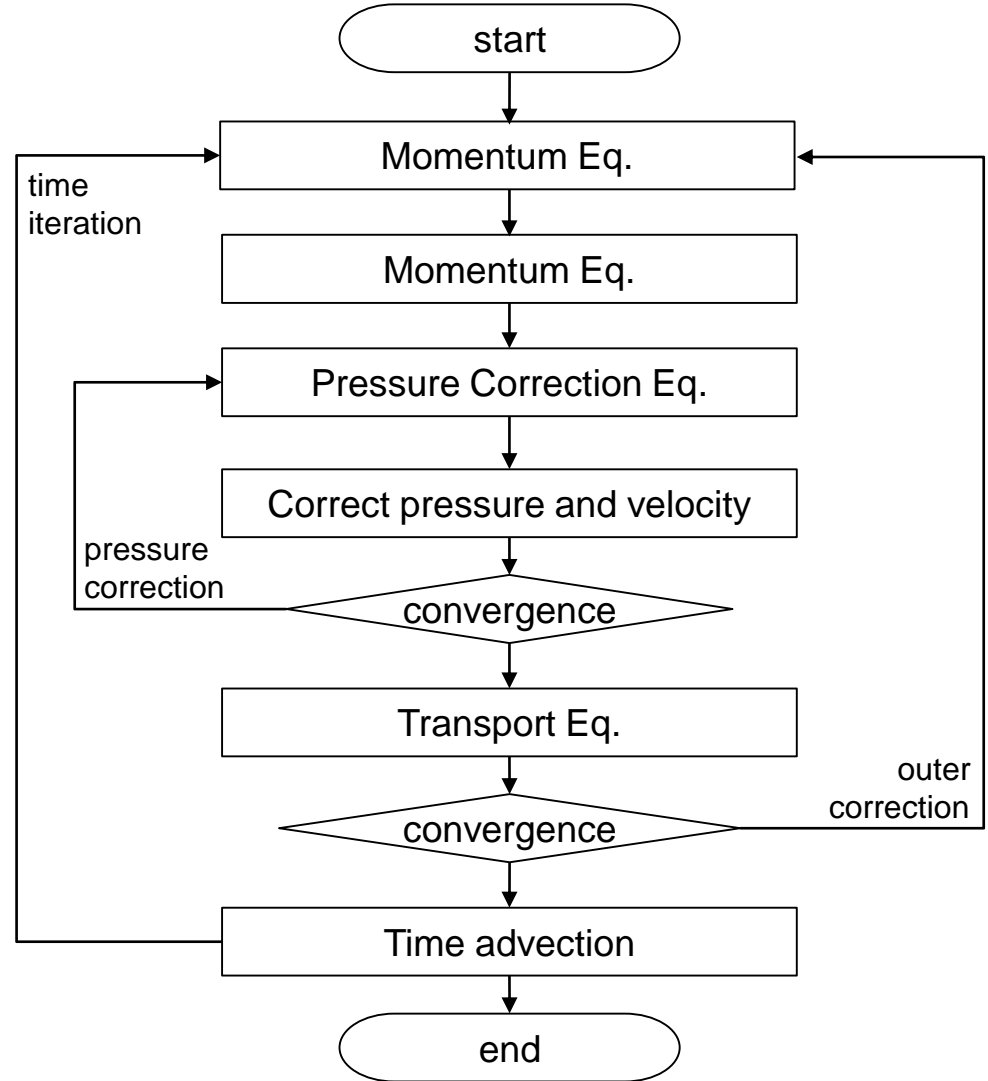

 압력항을 치환
 $p_{rgh} = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \boxed{-\nabla p_{rgh} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho} + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

유체가 정지해 있어도, 밀도구배가 있는 자유수면에서는 p_{rgh} 의 구배가 존재

- 난류모델 : SST $k-\omega$



PIMPLE(PISO+SIMPLE) 알고리즘

➤ 비직교격자의 안정화

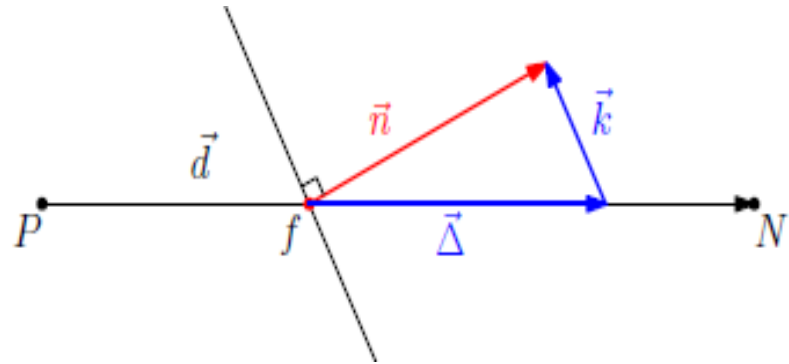
■ 압력 포아송 방정식의 라플라시안 항

- 음해적 처리가 어려움

$$\nabla^2 p = s$$

- 압력의 구배를 양해적으로 처리

$$\nabla^2 p = \nabla \cdot (\vec{n} \cdot (\nabla p)_f)$$



$$\sum S(\vec{n} \cdot (\nabla p)_f) = \sum S \left(|\vec{\Delta}| \frac{p_N - p_P}{|\vec{d}|} + \vec{k} \cdot (\nabla p) \right)$$



- \vec{k} 가 커지면 해가 불안정
- 완화계수를 이용하여 안정성 향상 (Gill 2015)

$$\sum S(\vec{n} \cdot (\nabla p)_f) = \sum S \left(|\vec{\Delta}| \frac{p_N - p_P}{|\vec{d}|} + \vec{k} \cdot (\nabla p)_{old} + \alpha \{ \vec{k} \cdot (\nabla p)_{new} - \vec{k} \cdot (\nabla p)_{old} \} \right)$$

➤ 파도 감쇠

■ 감쇠 영역

- 유입부 : 계산영역의 10% 길이
- 유출부 : 계산영역의 20% 길이

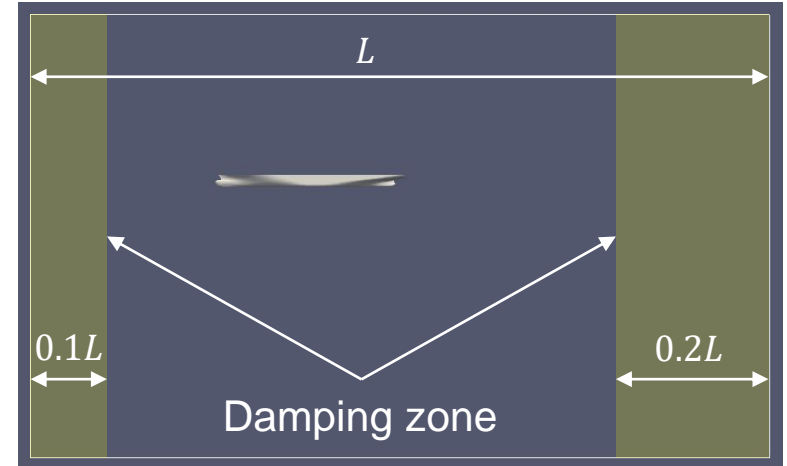
■ 감쇠 방법

- 유동을 두 가지 성분으로 가정

$$U_{\text{calculated}} = U_{\text{disturbed}} + U_{\text{inflow}}$$

- 교란된 성분에 1이하의 수를 곱하여 인위적으로 감쇠

$$U_{\text{new}} = U_{\text{inflow}} + \gamma U_{\text{disturbed}}$$



➤ 유출입경계조건

■ 압력의 유출부 경계조건

- $0.001 < \alpha < 0.999$: Neumann
- $0.001 > \alpha$ or $0.999 < \alpha$: Dirichlet

	Inflow	Outflow	Others
Velocity	Dirichlet	Neumann	symmetry
Pressure	Neumann	Neumann or Dirichlet	
VOF	Neumann	Neumann	
Turbulence	Dirichlet	Neumann	

➤ 동적격자 (항주자세)

■ 보존방정식

$$\frac{d}{dt} \int_V \phi dV + \oint_S ds \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{U}_{mesh}) \phi = \oint_S ds \cdot \mathbf{q}_\phi + \int_V s(\phi) dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV - \oint_S ds \cdot \mathbf{U}_{mesh} = 0$$

■ 격자의 변형

If $d \leq d_{in}$ then $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{ship}$

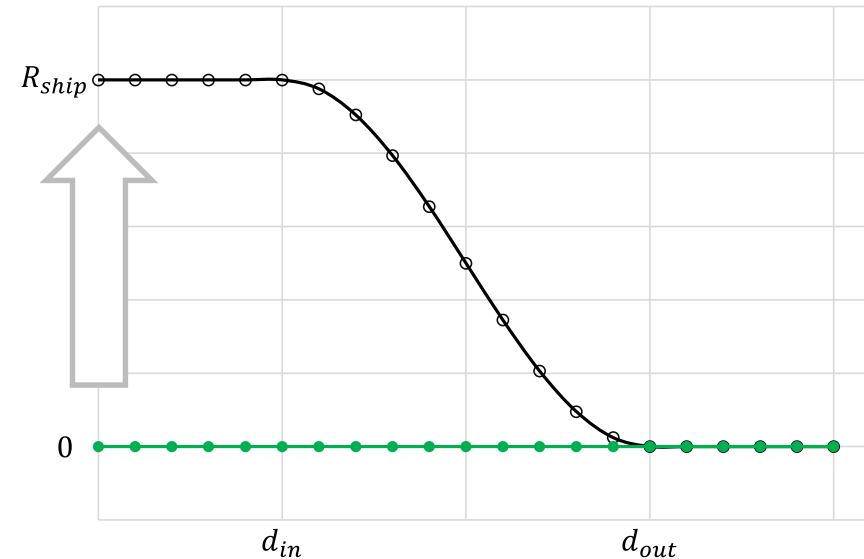
If $d_{in} < d \leq d_{out}$ then $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{ship} \cdot \frac{\cos\left(\frac{(d-d_{in})}{(d_{out}-d_{in})}\pi\right) + 1}{2}$

If $d > d_{out}$ then $\mathbf{R} = \mathbf{0}$

$$\mathbf{R}_{new} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}$$

■ 격자의 속도

$$\mathbf{U}_{mesh} = (\mathbf{R}^{n-1} - \mathbf{R}^n) / dt$$



➤ 시간간격의 정의

- Local Time Stepping

- 시간간격의 결정

$$C_n = \frac{dV}{dt \times \sum |f|}$$

$$dt = \min \left(\frac{dV}{C_{max} \times \sum |f|}, r_s \times dt_{neighbor}, r_t \times dt^{n-1}, dt_{max} \right)$$

- 자유수면의 시간간격

- If $0.001 < \alpha < 0.999$ then $dt = dt_{fs}$

- 선체움직임의 시간간격

- $dt = dt_{fs}$

수치해석 검증-1 (정적격자, Euler)

➤ 해석 조건

■ 대상선박

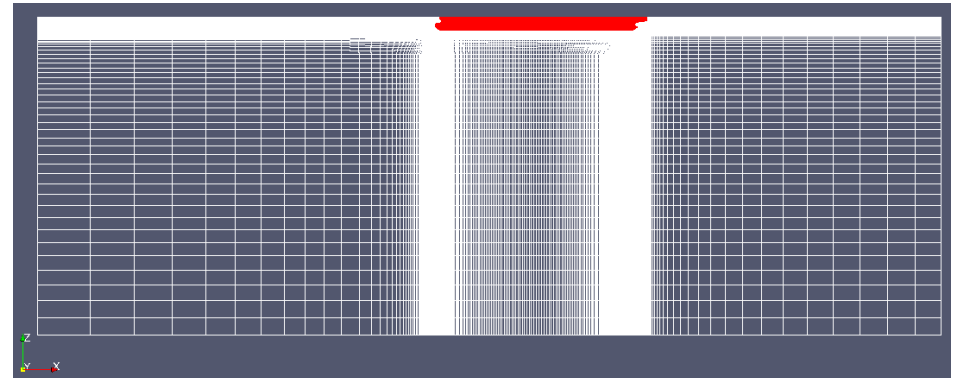
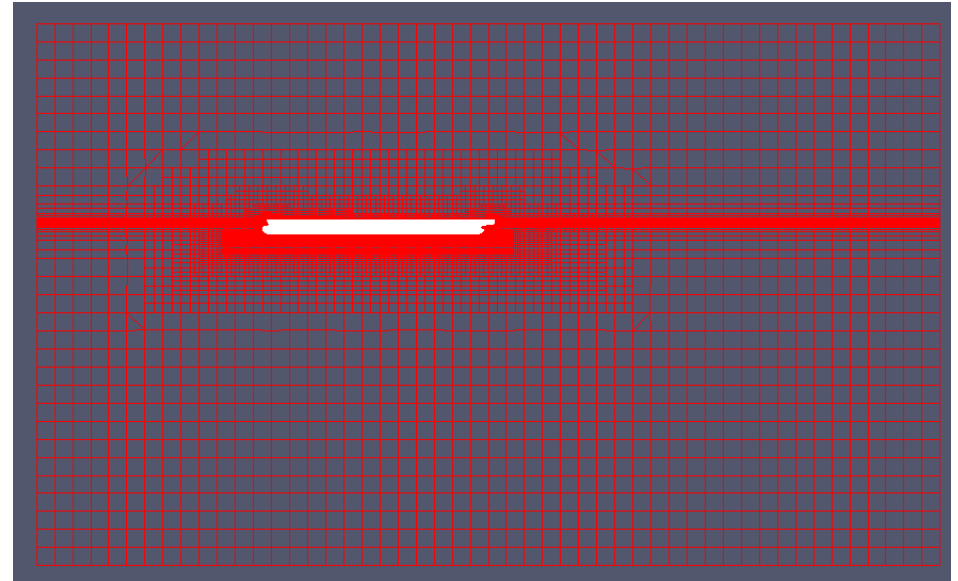
- KCS (항주자세 고정)

■ 격자계

- 적응 격자
 - 격자수 : 1,084,984
- 정렬 격자
 - 격자수 : 1,930,740

■ 시간간격

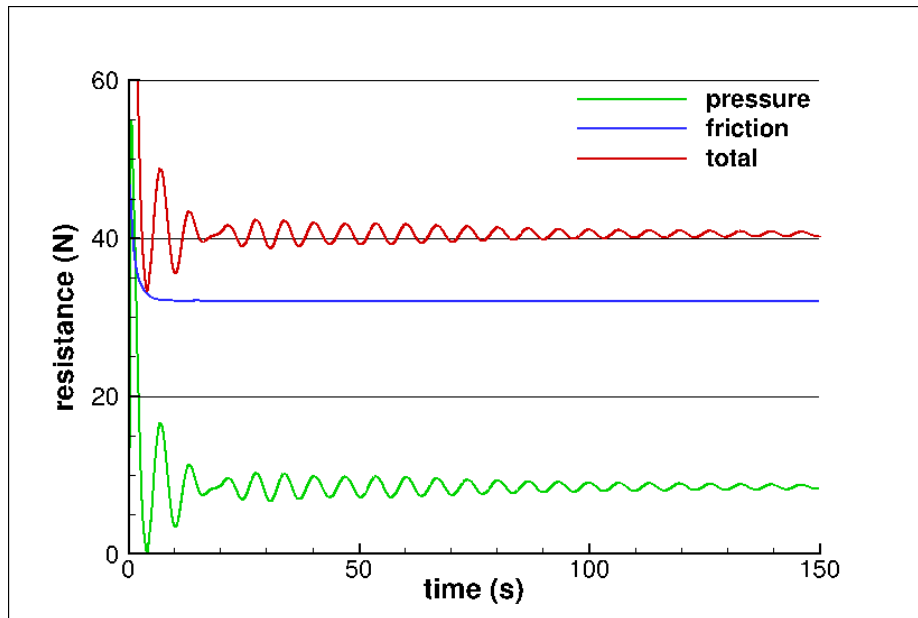
- 0.01 초 (Euler)



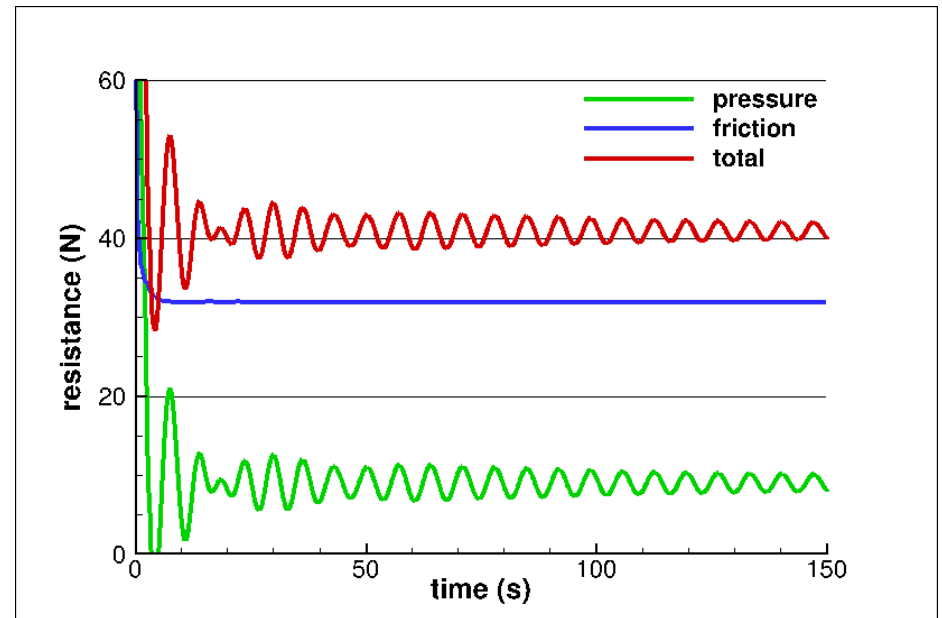
➤ 검증 결과

■ 저항

	마찰저항 (N)	압력 저항 (N)	전저항 (N)	계산시간 (64 cores)
적응 격자	32.030	8.502	40.532 (-1.55%)	3h 43m
정렬 격자	31.898	9.061	40.959 (-0.51%)	7h 14m
실험 결과	32.777 (ITTC '57)	8.393	41.170	-

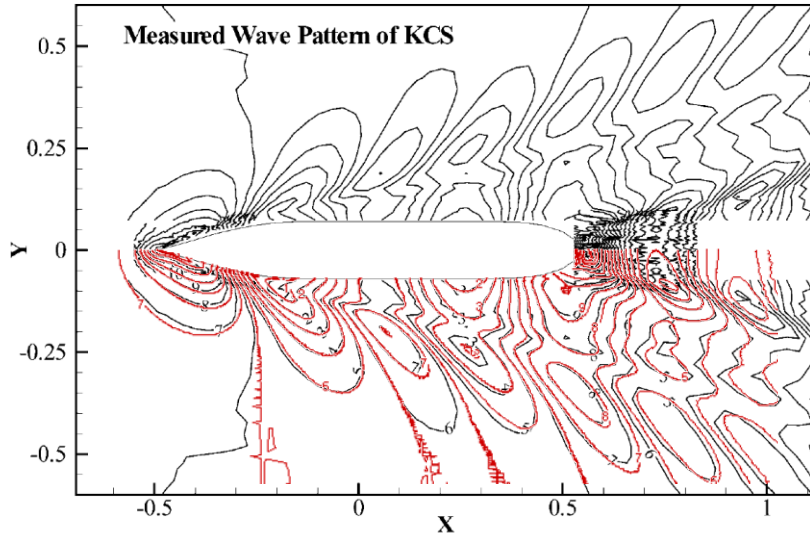


적응 격자

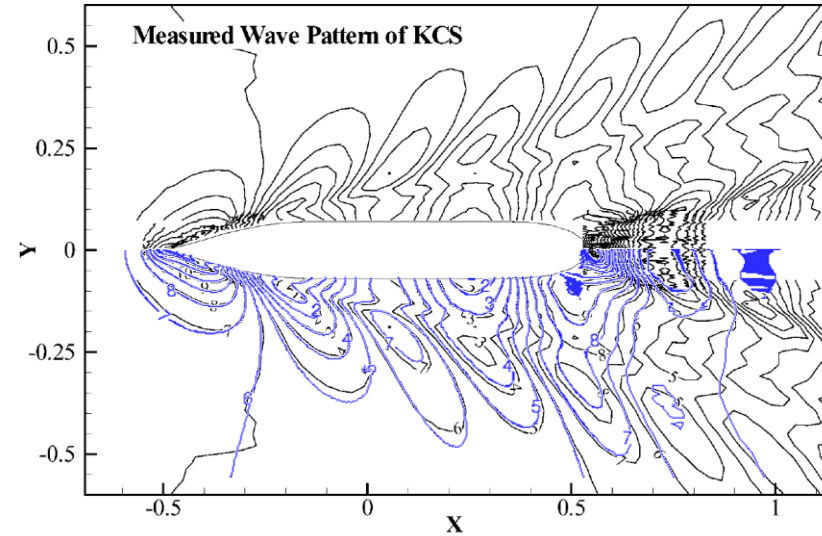


정렬 격자

■ 파형

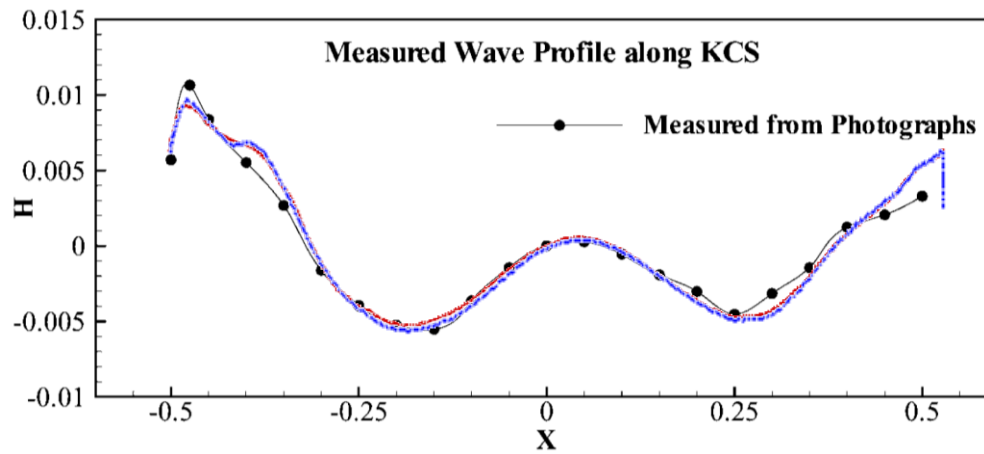


적응격자

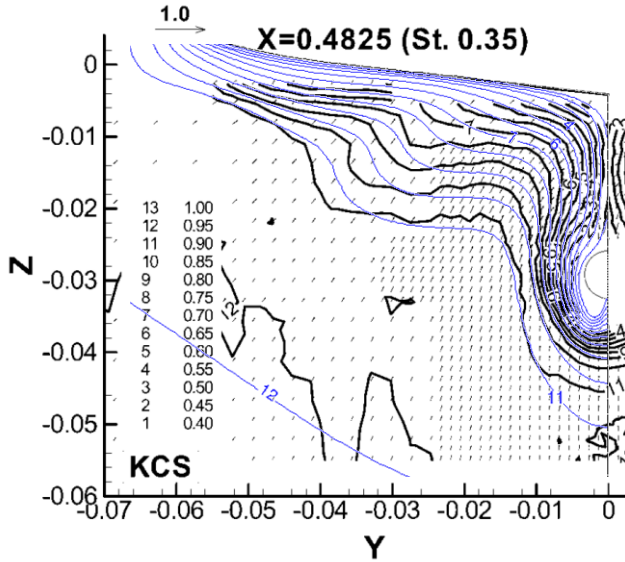
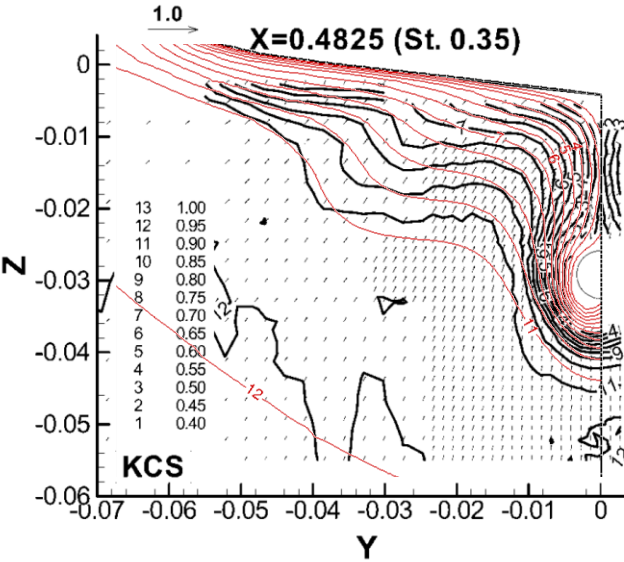
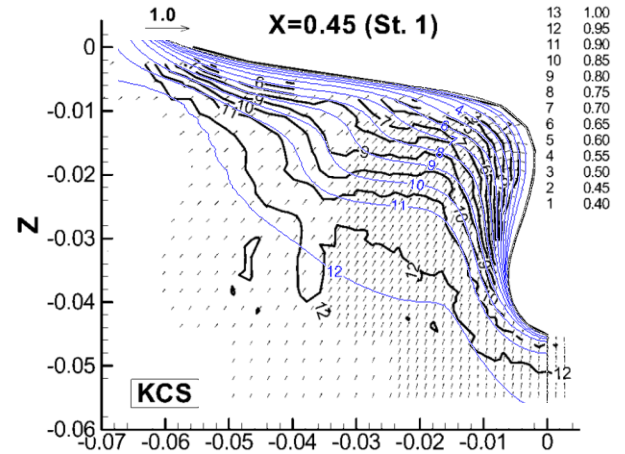
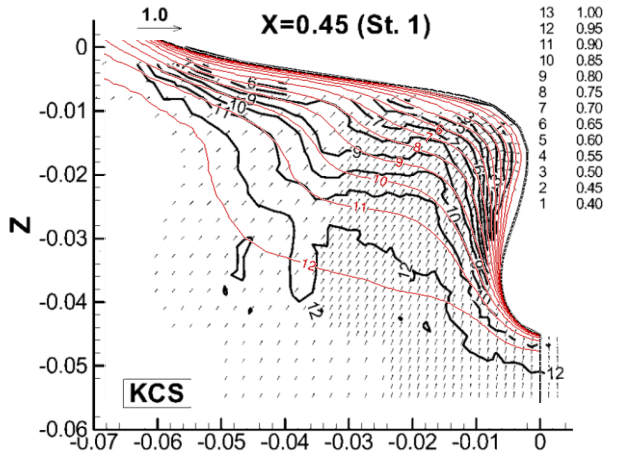


정렬 격자

Level	H
16	0.010
15	0.009
14	0.008
13	0.007
12	0.006
11	0.005
10	0.004
9	0.003
8	0.002
7	0.001
6	0.000
5	-0.001
4	-0.002
3	-0.003
2	-0.004
1	-0.005



반류부포



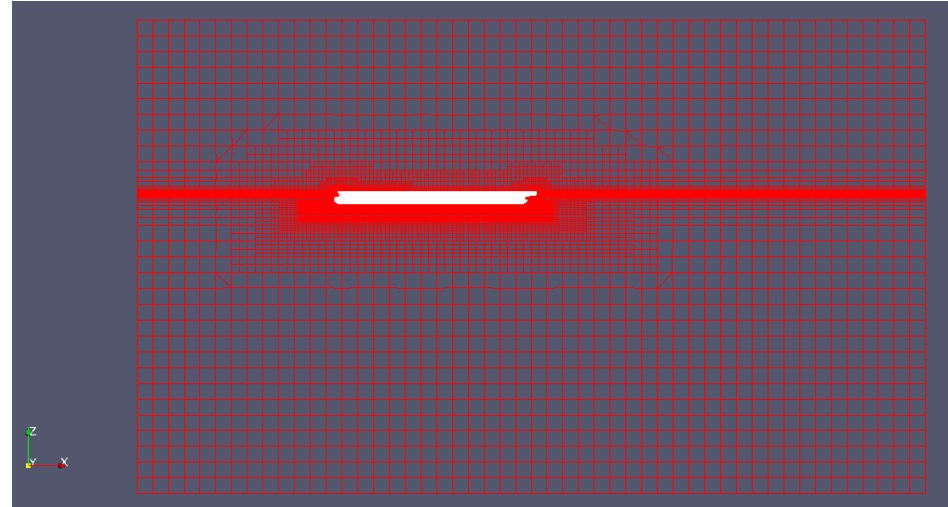
적응격자

정렬격자

수치해석 검증-2 (동적격자, LTS)

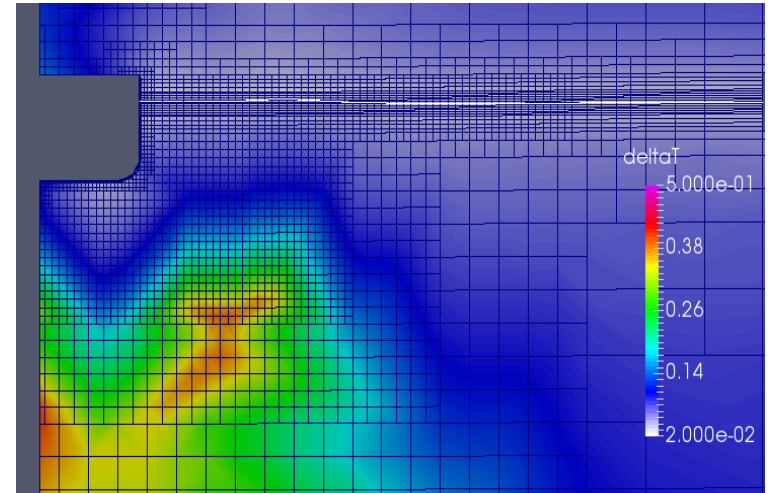
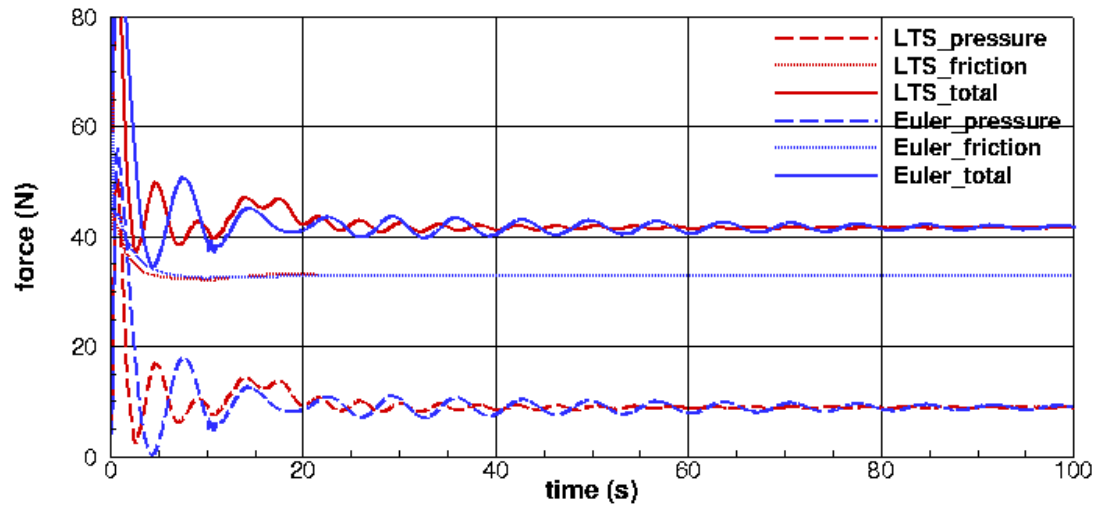
➤ 해석 조건

- 대상선박
 - KCS (항주자세 고정)
- 격자계
 - 적응 격자
 - 격자수 : 1,084,984
- 시간간격
 - Euler : 0.02 초
 - LTS : 0.02초 (자유수면, 선체운동)



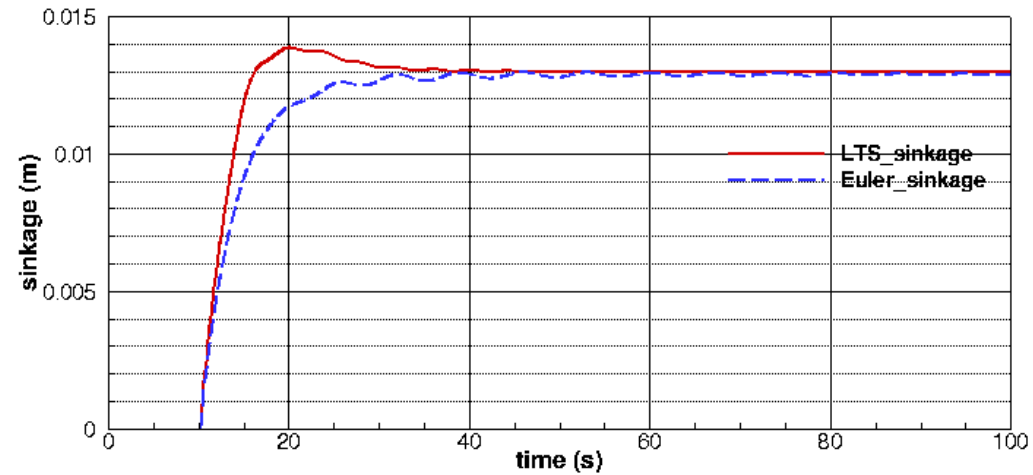
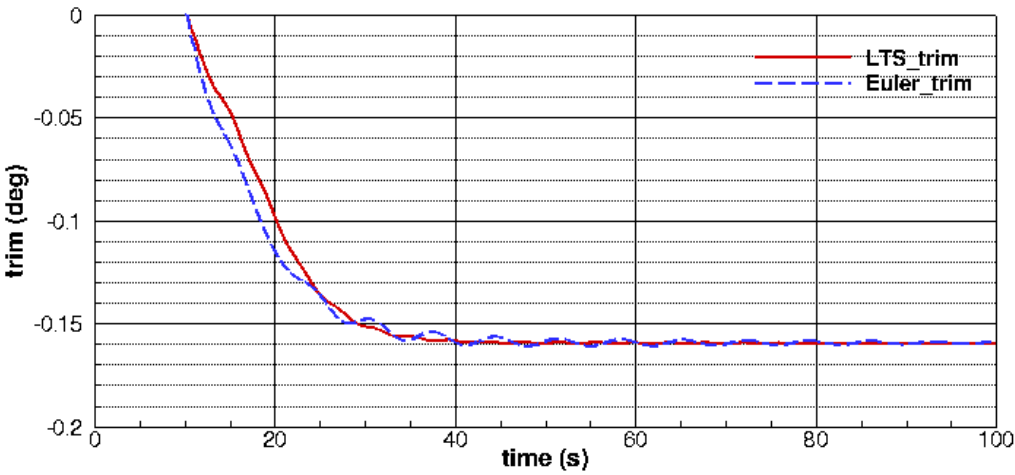
➤ 해석결과

■ 저항



	$C_F \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
LTS	2.828	0.764	3.592 (-1.97%)
Euler	2.829	0.765	3.594 (-1.95%)
Exp	2.832	0.832	3.664

■ 항주자세



	Trim (deg.)	Sinkage (m)
LTS	-0.160 (5.3%)	0.0130 (5.7%)
Euler	-0.160 (5.3%)	0.0129 (5.8%)
Exp. data	-0.169	0.0138

결론 및 향후연구

➤ 결론

- 상용 저항해석 프로그램을 대체할 수 있을 것으로 판단됨
 - 저항 오차 2% 이내, 항주자세 오차 6% 이내
- 동적격자와 LTS를 동시에 적용하여 계산시간을 단축함
 - Euler 대비 약 40% 수렴속도가 빠름

➤ 향후연구

- 압력저항 성분 수렴속도 향상 방법
- POW 및 저항해석 적용성 검토