
Electro-Magnetics Solver

- OpenFOAM 내 전자기장 솔버 검토 -

• 핵심 솔버 개요

- **electrostaticFoam** : 전하 분포나 전위차에 의해 형성 되는 정전기장을 해석하는 솔버
Ex) 고전압 기기 절연설계, MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 액추에이터, 전기 집진기 설계 등 사용
- **magneticFoam** : 전류가 흐르지 않는 공간에서 영구자석에 의한 자기장을 해석하거나, 외부 자계에 반응하는 강자성체의 자화 거동을 해석하는 솔버
- **mhdFoam** : 전기 전도성 유체가 자기장 내에서 운동할 때 발생하는 복잡한 상호작용을 해석하는 솔버
Ex) 핵융합로의 블랭킷, 금속 주조 공정의 전자기교반 등

솔버명	물리 현상	지배 방정식	주요 변수
electrostaticFoam	정전기학 (Electrostatics)	가우스의 법칙 (전위방정식) $\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho$	전위 (V), 전하 밀도 (ρ) 정상상태 해석 or 시간에 따른 해석
magneticFoam	정자기학 (Magnetostatics)	자기 스칼라 포텐셜 방정식 $\nabla \cdot (\mu \nabla \psi) = 0$	자기 포텐셜 (ψ), 자속 밀도 (B) 정상상태 해석
mhdFoam	자기유체역학 (MHD)	나비에-스토크 + 맥스웰 방정식 $\partial B / \partial t = \nabla \times (U \times B) + \eta \nabla^2 B$	유속 (U), 압력 (p), 자기장 (B) 시간에 따른 해석

- electrostaticFoam 지배 방정식

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho$$

여기서 ϵ 은 유전율(permittibility), ρ 는 공간 전하밀도(space charge density)

- magneticFoam 지배 방정식

- magnetostatics 문제에서 전류 밀도 $J=0$ 인 영역을 가정하면 앙페르의 법칙은 다음과 같이 단순화

$$\nabla \times H = 0$$

$$H = -\nabla \psi$$

여기서 H 는 자기장도(magnetic field intensity), ψ 는 자기 스칼라 포텐셜

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$B = \mu H + \mu_0 M$$

모든 식을 정리하면

$$\nabla \cdot (\mu(-\nabla \psi) + \mu_0 M) = 0$$

$$\nabla \cdot \mu(-\nabla \psi) = \nabla \cdot (\mu_0 M)$$

여기서 μ 는 매질의 투자율, μ_0 는 진공의 투자율, M 은 영구 자석의 자화 벡터

• mhdFoam 지배 방정식

- MHD 현상은 유체역학의 나비에-스톡스 방정식과 전자기학의 맥스웰 방정식이 양방향으로 강하게 결합된 방정식

- 운동량 방정식과 로렌츠 힘

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(UU) - \nabla \cdot (\nu \nabla U) = -\nabla p + \frac{1}{\rho} (J \times B)$$

여기서 J 는 전류밀도, B 는 자속 밀도

- 수치적 안정성을 위해 $J \times B$ 항을 맥스웰 스트레스 텐서의 발산 형태로 변환하여 처리

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(UU) - \nabla \cdot (\nu \nabla U) = -\nabla p + \frac{1}{\rho} \left(\nabla \cdot \left(\frac{BB}{\mu} - \frac{B^2}{2\mu} \right) \right)$$

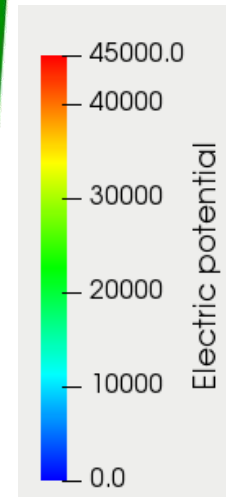
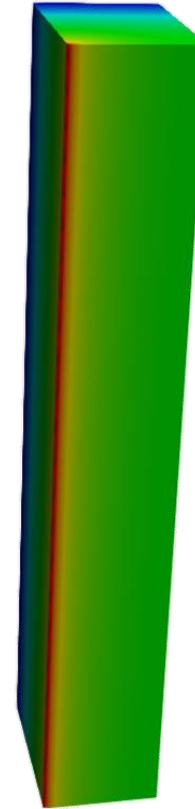
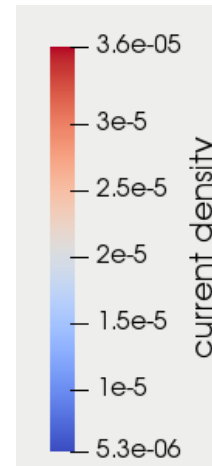
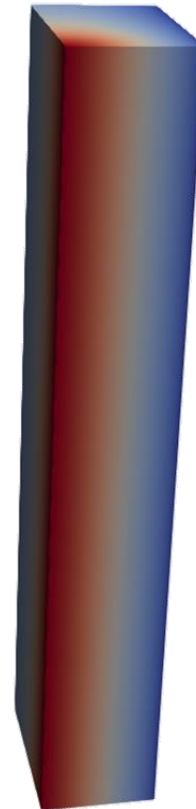
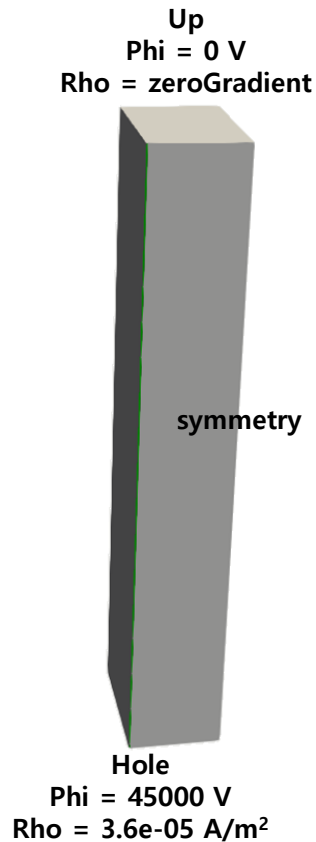
- 유도 방정식

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \nabla(UB) - \nabla(BU) = \nabla \cdot (\eta \nabla B)$$

여기서 η 는 자기 확산계수

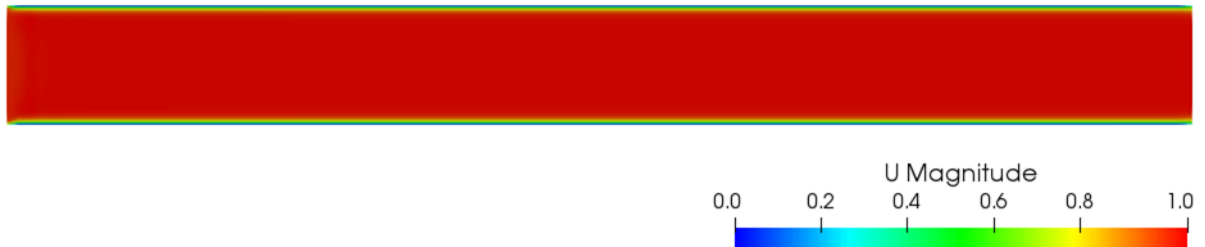
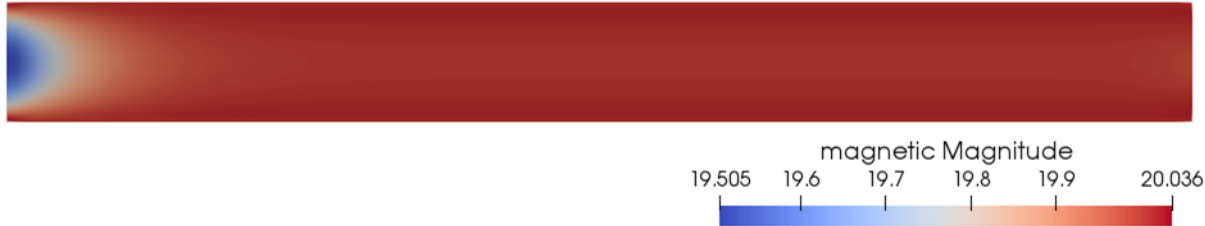
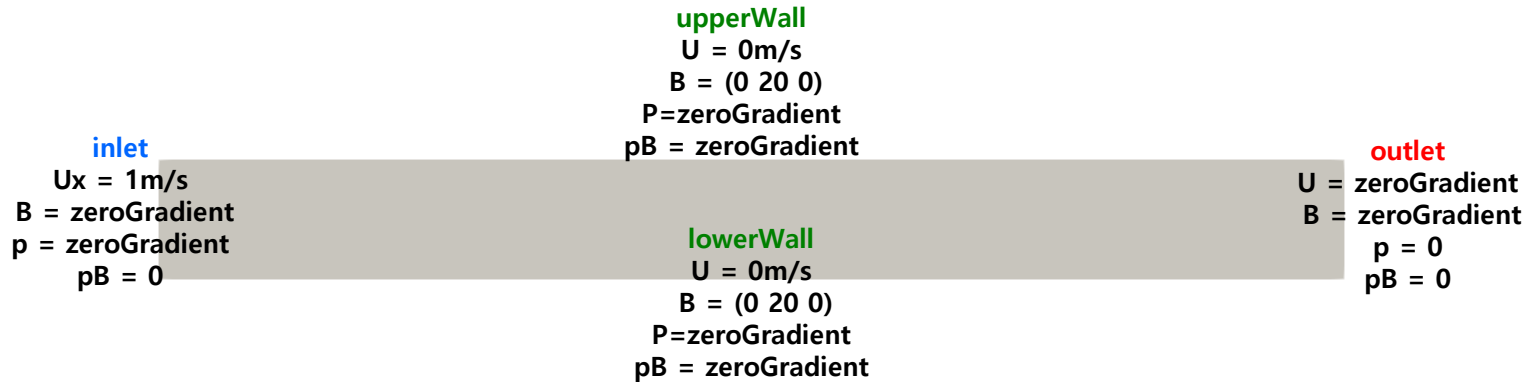
- electrostaticFoam 예제

- 시간에 따라 Electric potential과 공간 전하밀도 해석 가능



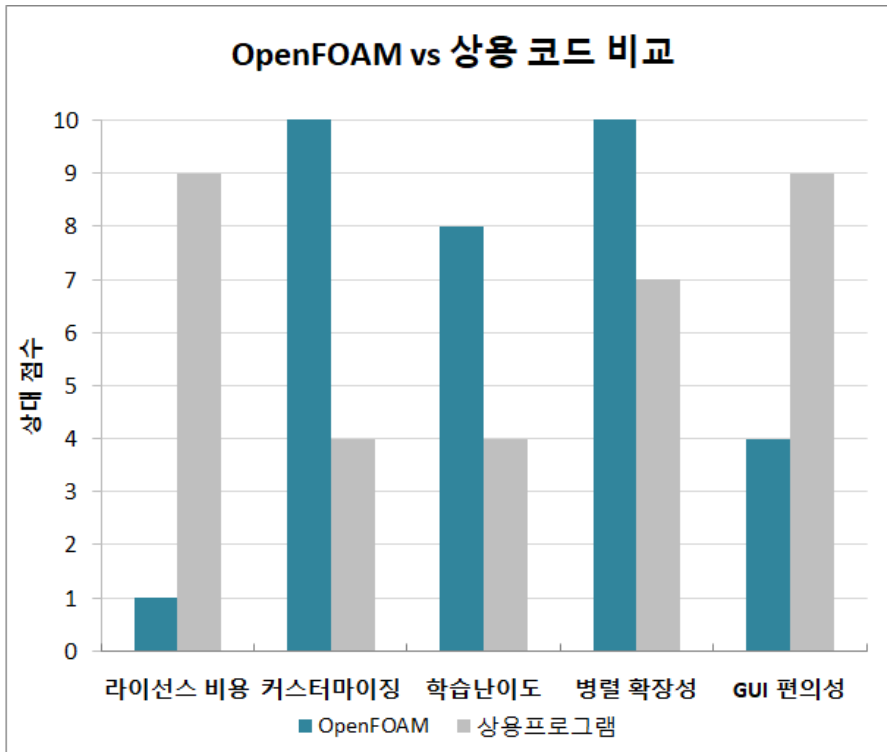
• mhdFoam 예제

- 자석 영향과 비압축성 층류 유동 해석



• 상용 소프트웨어 비교

- Ansys Maxwell이나 COMSOL 등의 상용코드와 OpenFOAM을 비교했을 때 초기 진입 장벽은 존재하지만, 비용 효율성과 사용자 코드 수정 측면에서 압도적 장점이 있음



1. 압도적인 비용 절감
 - 라이선스 비용 0\$, 코어 수 제한없는 병렬 연산가능
2. 완벽한 유연성
 - C++소스코드 공개, 새로운 물성 모델 및 경계조건 직접 코딩 가능
3. 무제한 연성해석
 - 열, 유동, 화학 솔버와 전자기 솔버의 자유로운 결합