
OpenFOAM GPU 가속화

-차세대 CFD 방법론과 2025 기술 동향 -

2025. 12. 11

- CPU 중심 계산에서 네이티브 GPU 아키텍처로의 여정
 - 2010s CPU 중심의 대규모 MPI 병렬계산에 의존하고 대규모 메모리 대역폭의 한계 직면
 - 2018 : CUDA/AmgX 도입으로 솔버 가속 시작
 - **2024** : PETc/AmgX 등 외부 라이브러리를 활용하여 선형솔버 부분만 가속.

PCIe 병목존재

- **2026+** : 매트릭스 조합부터 솔버까지 GPU 내 처리,
Native 지원 강화로 병목현상 제거 및 성능 극대화



2010s

CPU 시대

대규모 MPI 병렬 의존.
메모리 대역폭 한계.



2018

초기 오프로딩

CUDA/AmgX 도입.
솔버 가속 시작.



2024

하이브리드 표준

PETSc/AmgX 통합.
HPC 시스템 표준화.



2026+

네이티브 미래

C++ std::par 포팅.
조립(Assembly) GPU화.

- 복잡한 매트릭스 조립은 CPU가 담당하고 계산 집약적인 계산은 GPU가 처리함

- 대역폭 차이 : CPU-GPU간의 데이터 전송 (PCIe 대역폭) 병목 현상

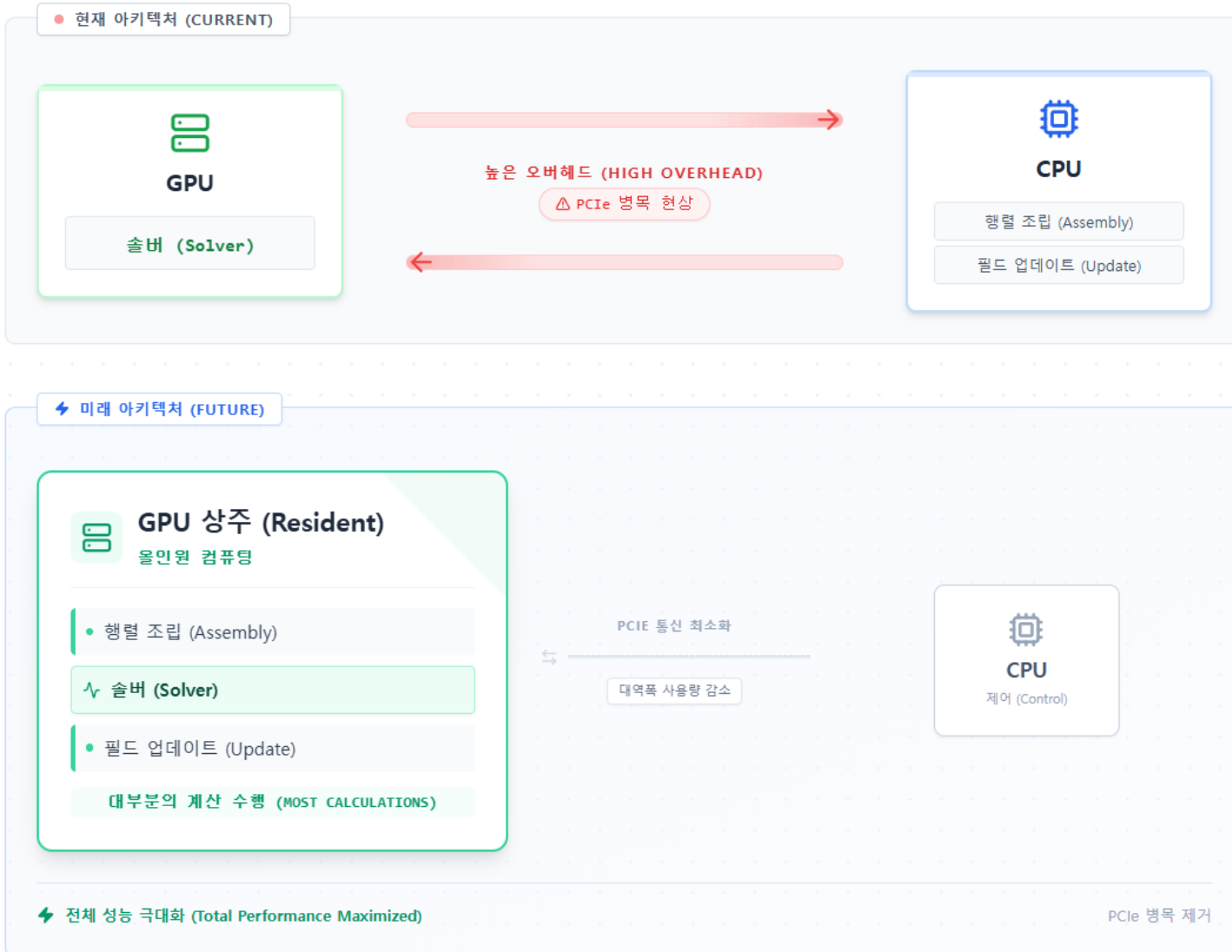
(PCI e 128GB/s vs HBM3 3TB/s)

- 포맷변환 : OpenFOAM(LDU포맷) ↔ GPU (CSR 포맷) 변환 비용 발생

- 잔여 부하 : 매트릭스 조립은 CPU 담당



- GPU 내 모든 과정 처리하고 CPU 최소화



• 각 라이브러리 장점 및 단점

- AmgX Wrapper가 최고의 성능을 보이거나 NVIDIA(CUDA)에 종속됨
- PETSc4FOAM은 범용성은 좋으나 복잡한 설정 문제 발생
- RapidCFD는 오래된 버전 기반으로 최신 업데이트 적용이 어려움
- KEYSIGHT-OpenFOAM은 아직 개발 단계이나 GPU에서 해석이 되어 장기적으로 좋은 선택

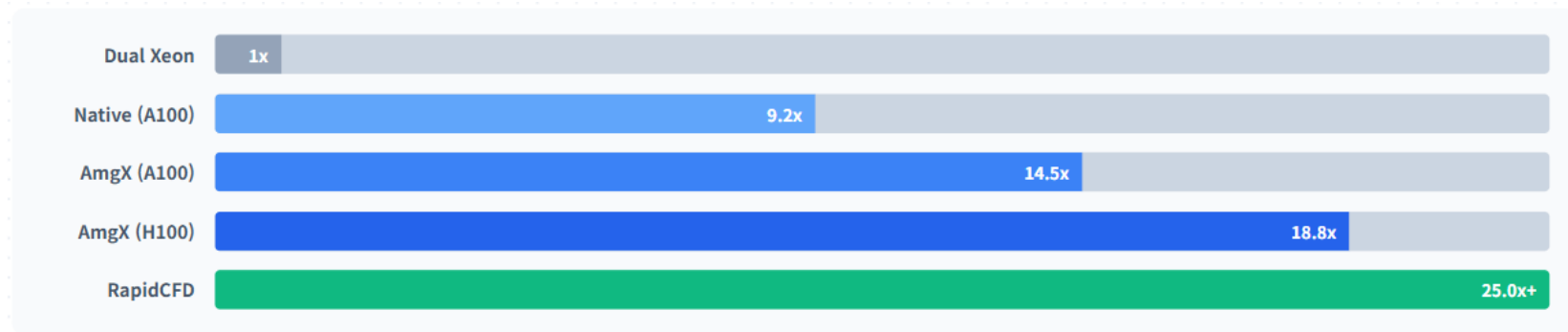
라이브러리	개발 주체	장점	단점
PETSc4FOAM	Argonne 연구소	벤더 중립적(AMD/NVIDIA), 높은 유연성	복잡한 설정, 약간의 오버헤드 존재
AmgX Wrapper	NVIDIA / 커뮤니티	NVIDIA GPU 에서 최고성능 , 최적화된 AMG	NVIDIA 하드웨어 전용(CUDA 종속)
Native(v2412)	KEYSIGHT-OpenFoam	내장형, 외부 의존성 없음, 장기 지원보장	아직 발전단계, 지원되는 솔버가 제한적임
RapidCFD	커뮤니티 포크	전체 GPU 내 해석, 가장 빠른 해석 속도	오래된 버전(v2.3) 기반 , 유지보수 어려움

- **motorBike 예제 2천만개 셀에서의 속도 비교**

- AmgX Wrapper가 최고의 성능
- KEYSIGHT-OpenFOAM(Native)은 아직 개발 단계
- RapidCFD 전체 GPU 내 해석, 가장 빠른 해석 속도

➔ 장기적으로 매트릭스 조합부터 솔버까지 GPU 내 처리,

Native 지원 강화로 병목현상 제거 및 성능 극대화 필요



- GPU 내 인터커넥트 대역폭이 병렬 효율에 미치는 영향

- 지연 시간이 선형솔버 성능을 좌우함
- PCIe의 한계 : 4 GPU 이상 연결시 대역폭 포화 → 병렬 효율이 50% 수준까지 급락
- NVLink의 이점 : 저지연 인터커넥트로 병목 해소

→ 8 GPU 이산에서도 선형에 가까운 확장성 유지

