# 오픈 소스 CFD 코드를 이용한 차세대 고속열차 공력 해석

김 병 윤[1], 길 재 흥[2], 권 혁 빈[3]

# Aerodynamic Simulation of Korea next generation high speed train using open source CFD code

B.Y. Kim, J.H. Gill and H.B. Kwon

*CFD simulation is widely used in various industries, universities and research centers. In Korea most of the researchers use foreign commercial S/W packages especially in industries. But commercial CFD packages have some problems as limit to source code and very high license fee. So from several years ago open source CFD code has been widely spread as an alternative. But in Korea there are a few users of open source code. Insufficiency of performance validation as for accuracy, robustness, convenience and parallel speed-up is important obstacles of open source code. So we tested some validation cases as to incompressible external aerodynamics and internal flows and now are doing compressible flows. As the first stage of compressible flow validation, we simulated Korea next generation high speed train(HEMU). It's running condition is 400km/hr and maximum Mach number reaches up to 0.4. With the high speed train we tested accuracy, robustness and parallel performance of open source CFD code OpenFOAM. Because there isn't experimental data we compared results with widely used commercial code. When use 1st order upwind scheme aerodynamic forces are very similar to commercial code. But using 2nd order upwind scheme there was some discrepancy. The reason of the difference is not clear yet. Mesh manipulation, domain decomposition, post-processing and robustness are satisfactory. Paralle lperformance is similar to commercial code.*

**Keywords**: 전산유체역학(CFD), 오픈 소스(Open Source), 철도차량(train), 차세대 고속열차(HEMU)

## 1. 서 론

전산유체역학은 학계와 연구소뿐 아니라 다양한 산업분야의 산업체에서 활용되고 있으며 적용 분야는 점점 확대되고 있다. 현재 대부분의 산업체에서는 외국의 상용 프로그램을 사용하고 있다. 이들 상용 프로그램은 뛰어난 성능에도 불구하고 사용자가 코드에 접근할 수 없기 때문에 자신의 연구분야에 맞게 코드를 수정하거나 개발하는 것이 불가능하다. 또한 높은 라이선스 비용은 산업체에서 전산유체역학의 활용을 제한하고 있다. 상용 코드의 이와 같은 문제점을 극복하고자 유럽을 중심으로 오픈폼(OpenFOAM)과 같은 오픈 소스 코드의 사용이 점점 확대되고 있으나 아직 국내에서는 활발히 사용되지 못하고 있다.

오픈 소스 코드가 활발히 사용되고 있지 못하고 있는 중요한 원인은 코드의 기능에 대한 검증작업들이 아직 충분히 이루어지지 못하고 있기 때문으로 생각된다. 우선 검증되어야 할 것들은 결과의 정확성, 복잡한 형상의 문제에서 안정된 수렴성, 병렬연산 성능 등이다. 이런 문제를 해결하기 위해 당사에서는 단계적으로 여러 가지 문제들에 대한 검증 작업을 수행하고 있다. 자동차 외부유동 해석을 통해 비압축성 유동에 관한 성능 검증을 수행했으며 그 후속 작업으로 압축성유동에 대한 검증 작업을 수행하고 있다. 그 첫 단계로 아음속 영역의 압축성유동에 대한 검증을 수행하였으며 검증 대상으로 마하수가 최고 0.4 정도인 차세대 고속열차를 선택하였다.

차세대 고속열차의 공력 특성에 대한 연구는 한국철도기술연구원에서 수행하고 있다. 본 연구는 차량의 공력 특성이 아니라 오픈폼이라는 코드의 성능에 대한 검증에 목적이 있다. 이에 따라 차량의 복잡한 형상을 어느 정도 단순화 시킨 모델을 사용하여 결과의 정확성과 병렬연산의 성능 등을 검토하였다. 사전에 RAE2822 에어포일에 대하여 같은 속도 조건에 대한 테스트를 수행하여 계산 조건을 검증하였다. 차세대 고속열차의 공력 특성에 대한 실험 결과는 아직 없기 때문에 계산 결과는 현재 국내에서 공력해석 용으로 많이 사용되는

1 (주) 넥스트폼, bykim@nextfoam.co.kr
2 (주) 넥스트이엔에스, jhgill@nens.co.kr
3 한국철도기술연구원, hbkwon@krri.re.kr

상용코드인 Ansys Inc.의 Fluent 코드의 결과와 비교하였다.

## 2. 오픈폼 개요

오픈폼은 영국의 OpenCFD Ltd.가 상표권을 갖고 있는 오픈 소스 코드로 라이선스 정책은 GNU GPL(General Public License)을 사용한다. H. Jasak 박사와 H. Weller 박사가 개발하여 소스 코드를 공개하였으며 현재 OpenCFD Ltd.의 OpenFOAM 1.7.1 버전과 Wikki Ltd.의 OpenFOAM 1.6 버전, OpenFOAM Extend Project 팀의 OpenFOAM 1.6-ext 버전이 최신 버전이다.(1)

오픈폼은 장(Field) 해석을 위한 소스코드와 함께 어플리케이션(Application)이라 부르는 실행파일을 함께 제공한다. 어플리케이션은 솔버(solver)와 유틸리티(utility)로 구분되며 솔버는 전산유체역학과 같은 특정 문제를 풀 수 있도록 미리 만들어진 실행파일이며, 어플리케이션은 격자의 생성 데이터 형식의 변환 등을 위한 실행파일이다. 솔버는 압축성, 비압축성, 다상유동, 화학반응, 전자기장, 구조해석 등 다양한 분야에 대해 제공되고 있으며 사용자 필요에 따라 소스코드를 이용해 사용자가 솔버를 직접 만들 수 있다.

현재 버전에서 압축성 유동해석을 위한 솔버는 11개 정도가 제공되고 있으며 본 연구에서는 정상상태 저속 압축성 유동해석을 위한 솔버인 rhoSimpleFoam을 사용하였다.(2)

## 3. 모델링 및 계산 격자

### 3.1 모델링

본 연구의 대상은 아음속 압축성유동 특성을 갖는 차세대 고속열차 이다. 차세대 고속열차의 최고속도는 400km/hr로 마하수 0.3 정도의 속도에서 운행되며 최고 유속이 0.4 정도가 되는 영역이 존재한다.

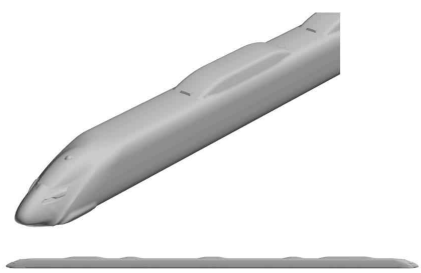

Fig. 1 Geometry of HEMU model

철도차량은 차량 전두부, 객차, 차량연결부, 팬터그래프, 대차부 등이 존재하여 매우 복잡한 형상이다. 본 연구에서는 차량연결부와 대차부를 생략하였고 팬터그래프 하우징은 완전히 밀폐된 것으로 단순화하였다. 전체 열차 길이는 149m이며 Fig. 1 에 해석용 모델의 형상을 나타내었다. 유동의 입출구는 열차길이의 2.5배 거리에 있으며 원방 경계는 열차의 길이만큼의 거리에 있다.

### 3.2 계산 격자

Fig. 2 에 본 연구에 사용된 계산 격자를 나타내었다. 차량 표면의 격자는 삼각형 격자가 사용되었다. 형상의 변화가 적은 옆면이나 바닥 면 등은 150mm의 일정한 크기를 유지하고 있다. 전두부의 스포일러 부근에서는 10mm까지 작아지도록 하였으며 인접한 격자와의 크기 차이가 20%를 넘지 않도록 제작되었다. 차량 표면에서의 경계층을 모사할 수 있도록 열차 표면에서 프리즘 격자를 사용하였다. 표준벽함수를 사용하기 위해 표면에서 첫 번째 격자의 높이는 2mm 정도가 되며 프리즘 격자는 10층이다. 프리즘 격자 외부는 사면체 격자를 사용했으며 대칭조건을 사용하여 절반만 모델링 하였고 전체 계산 격자는 370만개 정도 이다. 이 격자는 한국철도기술연구원의 차세대 고속열차 터널 주행 3차원 공력 영향 해석 연구에 사용된 격자이다.(3) 격자의 최대 종횡비(aspect ratio)는 70 정도이며 최대 skewness는 0.87 정도이다.

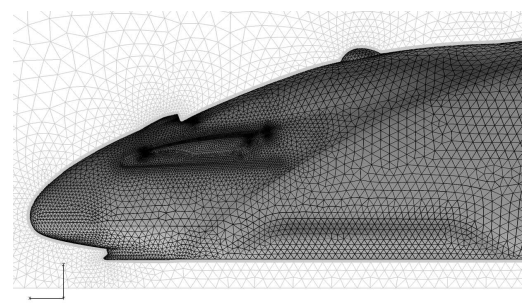

Fig. 2 Computational grid

## 4. 경계조건 및 수치해석 기법

유동의 입구는 일정 질량유량 조건(flowRateInletVelocity), 등온조건을 사용하였으며 출구는 일정 압력 조건을 사용하였다. 바닥면은 열차의 주행조건과 같은 속도로 움직이며 원방 경계는 대칭경계조건을 사용하였다. 공기의 밀도는 이상기체 방정식을 사용하였으며 점성계수는 상수로 주었다. 솔버는 OpenFOAM 1.6-ext 버전의 rhoSimpleFoam을 사용하였으며 상세한 설정은 Table. 1 에 나타내었다.

정상상태에 대한 계산이며 이산화기법은 1차 upwind (Gauss upwind)와 2차 upwind(Gauss linearUpwind) 두 가지 조

건에 대해 계산하였다. 난류모델은 standard k-epsilon 모델과 표준벽함수를 사용하였다.

Table. 1 Numerical scheme

| | Solver | Smoother (preconditioner) |
|---|---|---|
| p | GAMG | GaussSeidel |
| U | smoothSolver | GaussSeidel |
| h | PBiCG | (DILU) |
| k | smoothSolver | GaussSeidel |
| epsilon | smoothSolver | GaussSeidel |

## 5. 결 과

### 5.1 2차원 에어포일 테스트 결과

RAE2822 에어포일의 격자는 Fig. 3 에 나타나 있다. 사각형 경계층 격자와 삼각형 원방격자로 구성되어 있으며 전체 격자수는 35,892개이다.

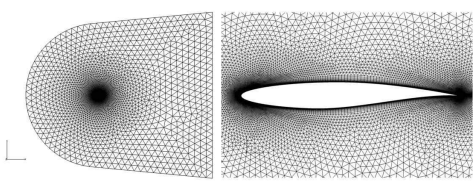

Fig. 3 Grid of RAE2822 airfoil

Fig. 4 에 오픈폼의 수렴과정을 나타내었다. 매우 안정되게 계산이 되는 것을 확인할 수 있다. 계산결과를 Table. 2 에 나타내었다. 양력은 매우 잘 일치하는 결과를 보인다. 저항은 StarCCM+와는 2% 정도의 차이를 보이고 Fluent와는 압력저항에서 차이를 보이고 있다.

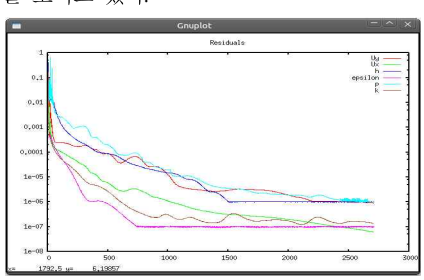


Fig. 4. Residual history of Openfoam

### 5.2 차세대 고속열차 계산 결과

계산의 초기 단계에서 안정성을 위해 완화계수를 낮은 값으로 설정한 다음 어느 정도 안정화 된 후 다시 완화계수를 늘려 주고 계산하였을 때 안정되게 수렴된 해를 얻을 수 있었다. Fig. 5 에 마하수 분포를 나타내었다.

Table. 2 forces of 2D airfoil

| solver | press. Drag | visco. Drag | total Drag | press. Lift | visco. Lift | Total Lift |
|---|---|---|---|---|---|---|
| OF | 36.67 | 49.95 | 86.61 | 1548.9 | 0.42 | 1549.3 |
| FL | 40.29 | 50.04 | 90.32 | 1540.5 | 0.39 | 1540.9 |
| CCM | 37.66 | 50.65 | 88.30 | 1540.7 | 0.43 | 1549.3 |

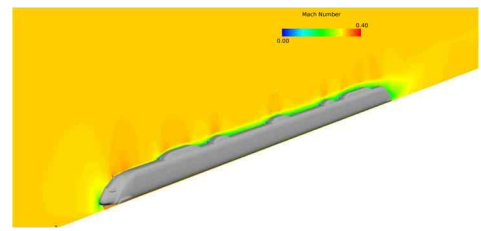


Fig. 5 Mach number distribution of HEMU

2차 upwind 이산화 기법을 사용할 때 안정성의 문제로 우선 1차 upwind 이산화 기법을 사용하여 해를 수렴 시킨 다음 운동량 방정식을 2차 upwind 기법으로 바꾸어 계산하였다. 1차와 2차 이산화 기법 각각에 대해 오픈폼의 계산 결과를 Fluent의 계산 결과와 비교하였다.

Fig. 6 에 1차와 2차 이산화 기법을 사용하였을 때의 저항값을 비교하여 나타내었다. 1차 이산화 기법을 사용하였을 때 오픈폼은 Fluent의 결과와 1% 이내의 오차 범위에서 같은 결과를 보여주고 있다. 그러나 2차 이산화 기법을 사용한 경우 점성저항과 압력저항 모두에서 차이가 나타나 전체 저항은 4% 정도의 차이를 나타내고 있다. 철도차량에서 양력은 저항에 비해 상대적으로 매우 작은 값을 갖는데 양력의 결과도 저항의 결과와 같이 1차 이산화 기법은 매우 잘 일치하지만 2차 이산화 기법을 사용할 때는 저항과 비슷한 수준의 차이를 나타내었다.

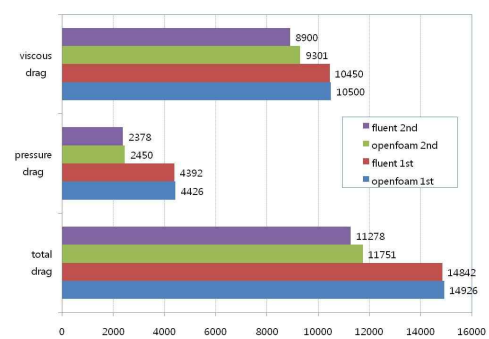


Fig. 6 Drag of Openfoam & Fluent

2차 이산화 기법을 사용할 때 나타나는 결과의 차이는 아직 명확히 밝히지 못하였다. Fluent와 같은 상용코드의 내부

알고리즘에 대해 정확히 알 수 없기 때문에 기법상의 차이를 명확히 밝히기는 어려워 보인다. 추후 실험결과가 있는 문제에 대해 두 코드를 비교하고 오픈폼의 알고리즘에 대한 명확한 분석을 통해 원인을 밝히도록 하겠다.

현재 병렬연산은 대부분의 전산유체해석에 필수적으로 사용되고 있어 격자 분할의 편의성, 병렬연산의 효율성은 매우 중요한 문제이다. 오픈폼은 병렬연산을 위한 격자 분할 방식으로 simple, hierachical, scotch, metic, manual 등의 방식을 제공한다. 본 연구에서는 metis 방식을[4] 사용하였으며 분할할 영역의 개수만 지정해 주고 decomposePar 유틸리티를 사용하면 자동으로 격자를 분할해 준다. 격자를 분할하는데 사용되는 시간은 상용 프로그램과 큰 차이는 없었다. 병렬연산 테스트는 16 core 까지 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7 과 같다.

테스트에 사용한 장비는 각 노드마다 intel i7 4core CPU 하나가 있는 클러스터로 노드당 메모리는 6기가바이트이며 기가비트 네트워크를 사용한다.

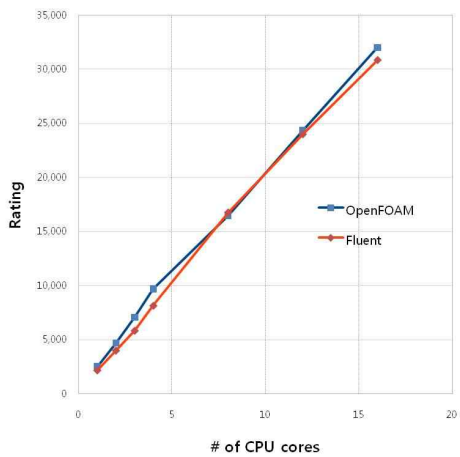


Fig. 7 Parallel performance

Fig. 7 에서 Rating은 24시간 동안 가능한 반복계산 회수를 의미한다. 코어를 4개까지 사용할 때 가속 성능(speed-up)은 매우 뛰어난 것으로 확인되었다. 그러나 4개에서 8개가 될 때 가속성능이 많이 줄어드는 현상이 나타났지만 16개 코어까지는 전반적으로 Fluent와 같은 수준의 병렬연산 성능을 나타내고 있다. 그러나 각 노드에 분산되어 있는 코어들을 어떻게 조합하느냐에 따라 오픈폼의 병렬성능은 조금씩 차이가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. Fluent 역시 그에 따라 성능의 차이를 보이고 있으나 차이의 정도는 오픈폼이 크게 나타난다.

계산이 진행되는 중에 각 코어별로 할당된 영역의 결과들을 ParaView를 통해 확인할 수 있으나, 전체 결과를 확인하기 위해서는 흩어진 영역들을 다시 모아야 하는 번거로움이 있어 상용코드에 비해 사용상에 불편함이 있다. 계산이 완료된 후에도 흩어진 영역들을 다시 모아서 후처리 작업을 해야 하는 번거로움이 있는데 본 연구에서와 같이 정상상태 문제에서는 큰 문제가 되지 않지만 비정상상태 해석의 경우 이 과정에서 상당한 시간이 소비되기 때문에 이 문제에 대한 해결 방안이 필요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

오픈 소스 CFD 코드인 오픈폼의 아음속 압축성유동에 대한 성능 검증을 실시하였다.

철도차량과 같이 형상이 복잡하고 계산영역이 매우 큰 문제에서도 프리즘과 사면체 격자를 갖는 비정렬 격자를 사용하여 안정적인 해석이 가능함을 확인할 수 있었다.

상용프로그램을 사용해서 제작된 격자의 변환, 병렬연산을 위한 계산영역 분할 등 계산 전에 필요한 작업들은 안정적으로 수행되었으며 한 번의 완화계수 조정을 통해 안정적인 수렴 특성을 확인할 수 있었다.

1차 upwind 이산화 기법을 사용하는 경우 상용코드와 1% 이내의 범위에서 같은 저항 값을 얻을 수 있었다. 그러나 2차 upwind 이산화 기법을 사용하는 경우 4% 정도 저항 값의 차이를 보이고 있다. 코드 자체의 특성인지 코드에 대한 이해의 부족 때문인지 아직 정확히 밝힐 수 없었다. 추후 실험결과가 있는 문제에 대한 검증 작업을 통해 보다 명확히 밝힐 수 있도록 하겠다.

병렬연산 성능은 상용코드와 거의 같은 수준의 결과를 확인할 수 있었으며 계산 영역의 분할도 자동으로 이루어져 산업체에서 사용하기에 큰 불편함은 없을 것으로 판단된다.

앞으로 초음속유동 영역의 압축성 유동, 다상유동, 화학반응 유동에 대한 검증 작업을 계속 진행할 계획이다

## 참고문헌

[1] http://www.extend-project.de/, http://www.openfoam.com/, http://www.wikki.co.uk/

[2] OpenCFD Ltd., OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 1.6 (2009), ppU-86

[3] 한국철도기술연구원, 차세대 고속철도 터널 주행 3차원 공력 영향 해석 보고서 (2011)

[4] G. Karypis and V. Kumar. METIS, A Software package for partitioning unstructured graphs, partitioning meshes, and computing fill-reducing orderings of sparse matrices, ver. 3.0. manual (1997)