

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.702

## 외부 유동 해석에 대한 오픈 소스 코드, OpenFOAM의 검증

김태우\*, 오세종\*\*, 이관중\*\*\*

## Verification of the Open Source Code, OpenFOAM to the External Flows

Taewoo Kim\*, Sejong Oh\*\* and Kwanjung Yee\*\*\*

## ABSTRACT

This paper aims to verify the applicability of OpenFOAM, the widely recognized open source CFD code, to external flows commonly found in aeronautical problems. To this end, several representative flow cases are selected first from subsonic to supersonic flow fields. Then, the computational results obtained from OpenFOAM are systematically compared against available data from experiments and other numerical codes. It was found that the strength and location of shock are well predicted and the effects of boundary conditions on the computed results are reviewed. Subsonic flow with massive separation is selected to validate the prediction capability of OpenFOAM. Based on the current results, the limitation and possibility of OpenFOAM was confirmed and for future study using OpenFOAM was suggested.

## 초 록

본 연구에서는 외부유동현상 해석에 오픈 소스 기반의 전산유체역학 프로그램인 OpenFOAM의 적용가능성을 검토하였다. 이를 위해 초음속, 천음속, 아음속 유동 영역에서 각 부분에 대표적인 해석 케이스를 선정하고 OpenFOAM에서 제공하는 해석자를 사용하여 해석을 수행했으며 해석 결과를 실험 결과 및 타 전산유체역학코드와 비교하였다. 충격파가 발생하는 초음속과 천음속 영역에서 충격파 예측의 정확도를 확인할 수 있었으며 경계 조건에 따른 결과의 정확도를 비교하였다. 아음속 유동 영역에서는 큰 박리가 일어나는 해석 케이스를 선정하여 복잡한 유동장하에서 OpenFOAM의 해석 정확도를 확인하였다. 위의 연구 결과를 바탕으로 OpenFOAM의 활용가능성과 한계를 확인하였고 이를 바탕으로 향후 OpenFOAM을 기반으로 수행할 연구 내용을 제시하였다.

**Key Words** : Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Open Source CFD(오픈 소스 CFD), External Flow(외부유동), OpenFOAM(오픈폼)

## 1. 서 론

유체역학과 관련된 연구는 크게 실험적인 방법을 통한 유동 현상 관찰과 전산유체역학을 통

한 유동 현상 해석으로 구분할 수 있다. 실험적인 방법은 시험 설비 설치 및 유지, 시험 모델 제작 등에 사용되는 비용의 부담으로 인해 전산 유체역학을 통한 유동 해석이 주요한 연구 분야로 인식되고 있다. 전산유체역학을 통한 유동 해석 연구를 수행하기 위해서는 in-house 코드를 개발하여 사용하거나 상용 전산유체역학 해석 프로그램을 사용해야 한다.

In-house 코드 개발을 통한 전산유체역학 연구는 자신의 연구 분야에 적용하기에 적절한 해석

† 2011년 6월 3일 접수 ~ 2011년 7월 21일 심사완료

\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과

\*\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\*\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

교신저자, E-mail : daedalus@pusan.ac.kr

부산광역시 금정구 장전동 산 30

기법을 사용하기 때문에 높은 정확도를 가지며 개발자에 의한 수정이 용이하다. 그렇지만 in-house 해석 코드를 개발하기 위해서 필요한 시간과 노력이 상당하며 개발자 이외의 연구자가 사용하기에는 상당한 노하우가 개발자에 의해 전수되어야 한다. 상용 전산유체역학 해석 프로그램을 사용하는 경우는 해석 코드를 개발해야 하는 시간과 노력을 절약할 수 있으며 문서화된 매뉴얼 및 프로그램 관련회사의 교육 등을 통한 사용방법 학습이 용이하다. 그러나 상용 전산유체역학 해석 프로그램의 경우에는 코드의 수정이 불가능하며 초기 구매 비용과 유지보수 비용이 비싸며 대용량 계산을 위한 병렬화의 경우 해석 프로세서마다 별도의 라이선스비용을 지불해야 하는 문제점이 있다.

오픈 소스 기반의 전산유체역학 코드는 소스 코드를 공유하여 전산유체역학 코드 개발에 경험이 있는 연구자들이 참여하게 함으로써 코드가 빠른 시간내에 진보할 수 있도록 하는 장점을 취하면서 비용이 들지 않는 공개 프로그램을 지향함으로써 라이선스 비용이 필요한 상용 전산유체역학 해석 코드의 단점을 보완한다. 이와 같은 오픈 소스 전산유체역학 프로그램은 오픈 소스 프로그램 커뮤니티등에 많이 공개되어 있는데 그 중 대표적인 프로그램이 바로 OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)이다[1].

OpenFOAM을 활용한 연구는 워크샵과 학회 등의 다양한 경로를 통해 활발하게 진행되고 있으나 국내에서는 초기 도입 단계로 관련 연구가 부족한 상황이다. 대표적인 국외 연구로는 Tandem으로 배열된 실린더의 유동과 소음에 관한 Doolan의 연구[2], MHD 해석 모듈을 OpenFOAM과 결합하여 해석을 수행한 Xisto의 연구[3], 최적 설계 방법중의 하나인 adjoint 기법을 OpenFOAM과 결합하여 최적 설계를 수행한 연구[4,5], 차량의 외부 유동에 관한 해석적 연구를 OpenFOAM을 활용하여 수행한 Islam의 연구[6]가 있다. 국내에서는 OpenFOAM에 관한 개략적인 내용을 리뷰 형태로 수행한 박준권의 연구[7]가 있다. 지금까지의 대부분의 연구는 주로 내부 유동 부분에 중점을 두고 있었으며 외부 유동의 경우 주로 아음속 영역에서 연구를 수행하였다.

국내외의 선행 연구에서 항공우주 분야에서 주로 발생하는 외부 유동 영역에 대한 OpenFOAM의 적용 연구가 미비하다고 판단되어 본 연구에서는 외부 유동 현상과 관련된 몇가지 연구 케이스에 대해 OpenFOAM을 통한 전산유체역학적 연구를 수행하여 아음속, 천음속, 초음속

속도의 외부 유동 영역에서의 OpenFOAM의 적용 가능성에 대해 고찰하였다. 아음속 영역에 대한 해석 케이스로는 헬리콥터의 동체에 대한 해석을 수행하였고, 천음속 영역의 해석을 위해 2차원 RAE2822 에어포일과 3차원 OneraM6 wing에 대한 해석을 수행하였다. 초음속 영역의 해석을 위해 2차원 Oblique shock 케이스와 2차원 Shock Wave Boundary Layer Interaction 케이스를 선택하여 정성적인 비교를 수행하였다. 각각의 유동 영역에 맞는 해석을 수행하기 위해 현재 배포되는 OpenFOAM 코드의 기본 해석자들을 사용하였으며 계산 케이스에 적절한 해석이 수행되도록 부분적으로 코드를 수정하였다. 후처리는 되도록 OpenFOAM에서 제공하는 후처리 툴인 paraView를 사용하여 수행하였으며 별도의 처리가 필요한 그림의 경우에는 다른 후처리 프로그램을 사용하였다.

## II. 본 론

### 2.1 OpenFOAM 개요

OpenFOAM은 Weller와 Jasak 등의 연구[8]를 바탕으로 LINUX OS하에서 C++ 언어 기반으로 개발되었으며 객체지향방식으로 전산유체역학 scheme 및 mesh tool, solver들이 개발되어 있다[9]. OpenFOAM은 1980년대의 영국의 Imperial College에서 시작되었으며 초기 개발 목표는 당시의 해석 코드보다 유연하고 강력한 해석 프로그램을 개발하는 것이었다. 실제 FOAM이란 명칭으로 영국의 Nabla사에서 2004년도까지 판매되어지다 2004년도부터 OpenCFD사에서 OpenFOAM이라는 명칭의 오픈 소스 코드로 배포를 시작하였다. 현재 배포되는 버전에는 adaptive meshing 기법 기반의 격자 생성 도구와 오픈 소스 기반의 post-processing 프로그램인 paraView를 포함한 후처리 도구가 포함되어 있다. 이와는 별도로 개발자 네트워크에서 배포되어지는 별도의 OpenFOAM 버전이 존재하고 있으며 개발자 네트워크의 OpenFOAM의 경우 다양한 기여자들에 의해 빠르게 소스 코드의 진보가 이루어지고 있다.

객체지향방식으로 개발된 OpenFOAM은 기본적으로 유한체적기법으로 유동현상을 해석한다. 예를 들어 식 1과 같은 해석하고자 하는 식이 있을 경우에는 Table 1과 같이 코딩하여 실행한다[10].

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \phi U - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p \quad (1)$$

Table 1. OpenFOAM에서 수식 코딩법

```

solve
(
    fvm::ddt(rho, U)
    + fvm::div(phi, U)
    - fvm::laplacian(mu, U)
    ==
    - fvc::grad(p)
);

```

OpenFOAM에는 현재까지 유저들이 개발한 압축성, 비압축성, 다상유동, 연소와 열전달등과 관련된 해석자들이 포함되어 있다. 이런 해석자들을 활용하여 계산을 수행하려면 Fig. 1과 같은 케이스 디렉토리를 구성해야 한다. system 디렉토리는 계산의 반복 횟수나 결과의 파일 출력 제어, 결과 출력 라이브러리 제어등을 수행하는 controlDict 파일과 수식의 항의 차분법에 대해 지정할 수 있는 fvSchemes 파일, 필드값의 계산을 위한 계산 방법을 지정하는 fvSolution 파일로 구성되어 있다. constant 디렉토리에는 격자 파일을 저장하는 하위 디렉토리들과 계산을 위해 사용하는 물질의 특성치를 지정하는 파일, 난류 모델에 대해 정의하는 파일들로 구성되어 있다. time 디렉토리는 controlDict에서 지정한 시간 간격에 따라 결과 파일을 출력하게 되며 0 time 디렉토리에는 각 필드값들의 초기값과 경계조건을 설정하게 된다.

현재 OpenFOAM 설치시 배포되는 다양한 tutorial을 통해 OpenFOAM에서 사용할 수 있는 경계조건, 차분기법, 해석자들을 경험할 수 있다. 제공되는 표준 해석자로는 압축성 유동 해석자로서 PISO 알고리즘 기반의 해석자들인 rhoPisoFoam와 sonicFoam, central-upwind 기반의 density based 해석자인 rhoCentralFoam, SIMPLE 알고리즘 기반의 정상상태 해석자인 rhoSimpleFoam 등을 제공하고 있으며 비압축성 유동 해석자로는 기본 해석자인 icoFoam, PISO 알고리즘 기반의 해석자인 pisoFoam, SIMPLE 알고리즘 기반의 해석자인 simpleFoam 등이 있다. 그 외의 다양한 물리 현상에 적용하기 위해 개발된 해석자들을 제공한다. 또한, OpenFOAM은 고정값 조건인 Dirichet 방식과 고정기울기 조건인 Neumann 방식을 기본으로 한 다양한 경계 조건들을 제공한다. 헬기나 터빈등 격자의 움직임이 있는 해석의 경우 Actuator 경계 조건을 삽입하여 계산하거나 움직이는 격자계에서 해석이 가능하도록 개발된 해석

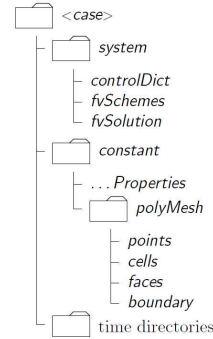


Fig. 1. 케이스 디렉토리 구성[9]

자를 사용하여 물리적 현상을 묘사할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

OpenFOAM은 비정렬격자 기반의 유한체적기법으로 개발되어 있으며 이 때문에 3차 이상의 고차 공간 차분법의 적용에 어려움이 존재한다. 외부 유동 문제를 적용하는데 있어 characteristic 경계 조건의 개발이 되어 있지 않아 해석 도메인의 외부 경계면이 물체에서 어느 정도 거리를 유지하도록 해야 하는 문제가 있었으며, 항공분야에서 주로 사용되는 모든 원시 원소를 시간에 대한 내재적 방식(Implicit)으로 계산을 수행하는 방법이 프로그램 내부의 한계로 인해 제한되고 있다. 현재 이를 해결하기 위한 연구가 OpenFOAM 사용자 그룹과 개인 연구자들을 통해 진행되고 있다. 또한, OpenFOAM은 복잡한 형식의 C++ 언어를 사용하기 때문에 내부의 소스 코드를 수정하기 위해서는 개발자가 어느 정도 C++ 언어에 숙달되어 있어야 한다.

그 외의 자세한 해석자나 경계조건, 해석 기법은 OpenFOAM에서 제공되는 User Guide[9]와 Programing Guide[10]를 통해 알아볼 수 있으며 다양한 온라인 커뮤니티들[1,11]에서 관련 자료를 확인할 수 있다.

## 2.2 초음속 외부 유동 문제 적용

초음속 영역의 해석 케이스는 2차원 Wedge 형상을 이용한 경사충격파 문제와 2차원 층류 영역에서의 SWBLI(shock wave/boundary layer interaction) 문제로 선정하였다. 초음속 유동의 경우 압축성 효과가 지배적이고 이로 인한 충격파의 예측이 공간 차분 기법마다 다르게 나타난다. 경사충격파 문제를 통해서 각 해석자들의 충격파 예측의 정확도를 알아보고자 한다. SWBLI 문제를 통해서 초음속 영역에서 경계층의 예측과 유도되는 충격파와 경계층에 의해 생기는 상

호 간섭현상 예측에 대한 정성적인 평가를 하고자 한다.

**2.2.1 2차원 경사충격파 해석**

초음속 경사충격파 해석 케이스는 NASA에서 운용하고 있는 NPARC Alliance Validation Archive 웹페이지에서 참고하였다[12]. 해석 조건은 Table 2와 같다.

이 케이스를 해석하기 위해서 OpenFOAM에서 제공하는 표준 압축성 해석자들 중에서 비정상 유동 해석이 가능하며 해석 방식에 따른 정확도의 비교를 위해서 rhoPisoFoam과 sonicFoam, rhoCentralFoam을 사용하였다. rhoPisoFoam과 sonicFoam의 경우는 압축성 유동에 맞도록 개량된 PISO 알고리즘을 바탕으로 하여 개발되었으며 rhoPisoFoam의 경우 enthalpy를 기반으로 에너지식을 해석하며 sonicFoam의 경우 내부에너지를 기반으로 에너지식의 해석을 수행한다. 두 해석자 모두 층류 및 난류 해석을 위해서 필요한 모듈을 포함하고 있다. rhoCentralFoam의 경우 central-upwind 기법 기반의 Density-based compressible flow 해석자로서 점성 유동 해석에서는 층류에 대한 해석만이 가능하다.

해석에 사용된 공간차분법은 rhoPisoFoam과 sonicFoam의 경우 vanLeer 제한자법을 사용하였고 rhoCentralFoam의 경우는 Kurganov & Tadmor의 central-upwind 기법에 vanLeer 제한자를 적용하도록 입력파일을 구성하였다. 시간차분법으로는 내재적 Euler 기법을 사용하였는데 빠르게 정상해를 구하기 위해 Table 3에서와 같이 CoEuler를 시간차분법의 파라미터로 입력 파일에 지정하여 속도와 밀도에 의한 국소 시간전진법(local time stepping)을 사용하였다. 위의 사용된 기법들은 OpenFOAM에서 제공되는 것들로서 기법 사용을 위해서는 fvSchemes 파일에 원하는 기법을 Table 3와 같이 표시한다. 비점성 유동 해석을 통한 충격파의 예측의 정확도를 비교하기 위해 유동의 점성 계수값을 0으로 하여 Euler 계산을 수행하였다. 이외의 OpenFOAM 구동을 위한 자세한 사용법은 OpenFOAM User Guide[9]를 확인하여 필요한 부분의 정보를 획득할 수 있다.

3가지 해석자와 exact solution의 값을 비교하여 해석의 정확도를 확인하여 보았다. Fig. 2에서는 충격파 예측의 정확도를 정성적으로 확인할 수 있도록 압력비에 대한 결과를 전 계산 영역에서 나타낸 결과이며 그림상의 선은 exact solution으로 계산한 경사충격파각을 표시한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 충격파 예측이 각

각의 해석자에 따라 약간 다르게 나타는 것을 확인할 수 있는데 충격파각의 예측을 통해서 정확도를 정성적으로 비교하면, rhoCentralFoam, rhoPisoFoam,

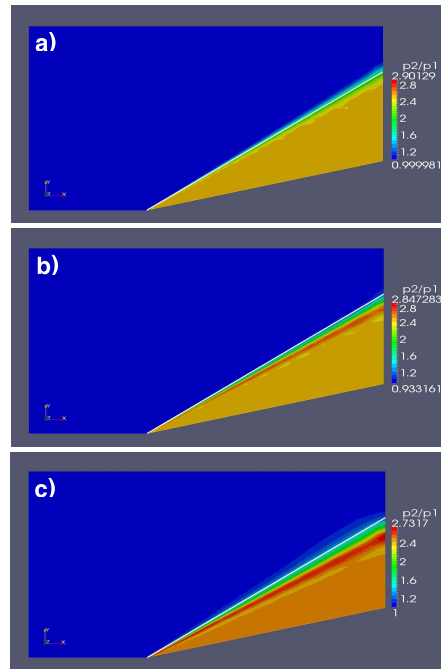
**Table 2. 경사충격파 해석 조건**

Mach	Pressure	Temperature	Wedge half-angle
2.5	14.7 psia	520 R	15 degree

**Table 3. fvSchemes 파일에서 기법 지정**

```

ddtSchemes
{
    default CoEuler phi rho 0.2;
}
divSchemes
{
    default none;
    div(phi,U) Gauss vanLeerV 1;
    div(phi,p) Gauss vanLeer 1;
    div(phi,h) Gauss vanLeer 1;
    div((muEff*dev2(grad(U).T()))) Gauss linear;
}
    
```



**Fig. 2. 2차원 썩기에서 경사충격파에 의한 압력비 결과. 위에서부터 a)rhoCentralFoam, b)rhoPisoFoam, c)sonicFoam 결과**

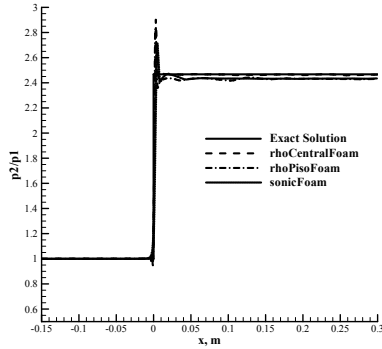


Fig. 3. 벽면에서의 압력비 비교 결과

sonicFoam 순서대로 비교적 정확한 결과를 나타내고 있다. 이는 rhoCentralFoam은 density-based 해석자로서 압축성 유동에서 정확한 결과를 획득할 수 있었으며 rhoPisoFoam과 같이 enthalpy기반의 에너지 항 계산이 sonicFoam의 내부 에너지 기반의 에너지 항 계산보다 현재의 해석 케이스에서 비교적 정확한 결과를 도출한다고 판단하였다. Fig. 3은 아랫면에서의 압력비를 exact solution의 결과와 비교한 결과이다.

Fig. 3의 결과에서 보듯이 rhoCentralFoam의 해석 결과가 해의 진동이 비교적 적고 충격파 이후의 압력비도 exact solution과 비교적 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 타 해석자들의 경우에는 비교적 진동이 크게 나타나고 있을 것을 볼 수 있는데 특히 충격파 이후의 압력비가 exact solution 보다 약간 작게 예측되는 것을 알 수 있다. 경사충격파 이후의 진동은 NASA의 연구 [12]에서도 확인할 수 있는데 이번 해석 케이스에서는 제한자를 사용하여 해의 불안정성을 감소하고자 하였으나 PISO 알고리즘을 사용하면서 생기는 불안정성으로 인해 충격파 이후의 진동이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 이번 케이스에서 보듯이 충격파만의 해석의 경우에는 rhoCentralFoam을 통한 해석 결과가 비교적 정확함을 확인 할 수 있었다.

2.2.2 2차원 충격파/경계층 상호 작용 해석

충격파/경계층 상호 작용(shock wave/ boundary layer interaction, SWBLI) 문제의 경우는 김규홍의 연구[13]에서와 같이 전산유체역학의 공간차분법의 정확도를 정성적으로 평가하는 부분에서 많이 사용되기 때문에 OpenFOAM의 충격파 예측의 정확도를 정성적으로 측정하기 위해서 해석 케이스로 선정하였다. SWBLI 해석의 경우 충격파와 경계층이 만나는 부분에서 복잡한 유동 형상이

Table 4. SWBLI 해석 조건

Mach No.	2.15
Reynolds No.	$1 \times 10^5$
Interaction length	$8 \times 10^{-2}$ m
Pressure	101325 pa
Temperature	293 K
Incident Shock Ang.	30.8°

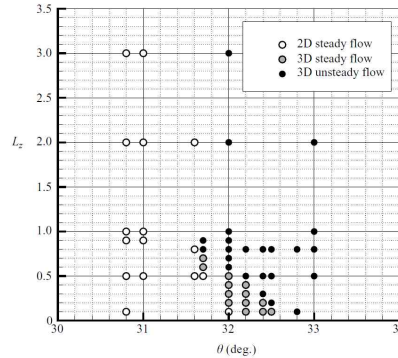


Fig. 4. 평판 폭과 입력 충격파 각도에 따른 계산 도메인의 구성[14]

관찰되어지는데 이를 2차원 수치해석문제로 정확히 해석하기 위해서는 2차원 문제로 가정할 수 있도록 문제의 조건을 구성해야 한다. Fig. 4는 J. Robinet의 연구[14]에서 입력 충격파의 각도와 평판 폭의 길이에 따른 해석 가능 모델을 도표로 정리한 내용이다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 입력 충격파 각이 30.8° 일 경우에는 2차원 문제로 고려할 수 있기 때문에 해석 케이스의 입력 충격파 각도를 Table 4와 같이 지정하여 계산을 수행하였다.

SWBLI 문제 해석을 위해서는 경계층과 입사 충격파의 상호 작용을 예측해야 하며 이를 위해서는 Navier-Stokes 해석을 수행해야 한다. 주어진 Reynolds 수를 기반으로 점성 계수 값을 입력하여 평판위에서의 경계층을 해석을 수행하였는데 rhoCentralFoam의 경우 난류 모듈을 포함하고 있지 않기 때문에 모든 해석자에서 경계층은 층류유동으로 해석하였다. 경사충격파의 입력을 위해서 초기 경계값을 경사충격파의 입사가 일어나는 지점을 기준으로 미리 계산한 압력비와 속도비를 각각 고정하여 입사되는 충격파를 구현하였다. 이번 계산을 위해서는 앞서서 수행한 경사충격파 예측에서 비교적 정확한 결과를 획득한

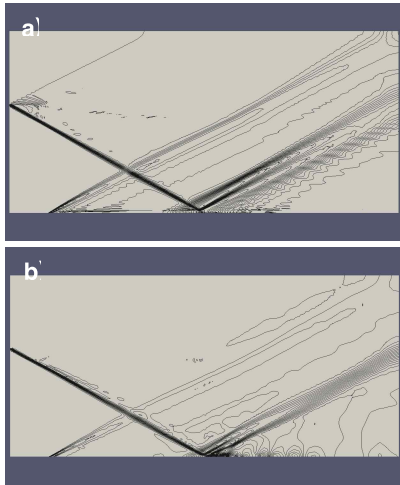


Fig. 5. SWBLI 해석 압력 분포 결과. a)rhoCentralFoam, b)rhoPisoFoam

rhoCentralFoam과 rhoPisoFoam 압축성 유동 해석자를 사용하였다.

Fig. 5는 해석된 결과의 압력 분포 등고선을 나타낸 그림이다. 두 해석자에서 입구 경계에서의 유입경사충격파가 발생하는 것을 확인할 수 있으며 평판 앞전에서도 약한 경사충격파를 관찰할 수 있었다. 또한, 경계층과 입사경사충격파의 상호작용이 발생하는 지점에서의 유동의 압력값 변화가 유사한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 rhoCentralFoam의 경우 충격파의 예측은 비교적 정확하게 되는 것 같으나 충격파 이후에 유동장의 압력값 진동이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 다른 해석자의 경우 경계층/충격파 상호 작용 지점 이후의 경계층영역에서 불안정한 유동 흐름이 관측되었다. 이는 실제로 초음속 유동에서 충격파가 나타난 이후는 난류 유동 현상이 나타나나 현재 해석에서는 난류에 의한 영향을 고려하지 않고 층류로 가정하여 계산을 수행하였기 때문에 이와 같은 현상이 나타난 것으로 생각된다.

### 2.3 천음속 외부 유동 문제 적용

천음속 영역에서의 2차원 에어포일이나 날개의 해석은 국소충격파가 발생하는 복잡한 유동의 해석이기 때문에 계산 영역의 경계 조건에 대한 테스트를 수행하기에 적절한 문제이다. 현재 OpenFOAM에는 다양한 종류의 경계 조건을 설정할 수 있으며 천음속 영역에 적절한 계산영역 외곽쪽 경계 조건은 Table 5와 같다. 물체 표면에서의 경계조건은 속도의 경우 Navier-Stokes

Table 5. 계산영역 외곽에서의 경계조건

Velocity	Freestream (fs)
Pressure	Freestream (fs)
	FreestreamPressure (fp)
	waveTransmissive (wt)
Temperature	Freestream (fs)

해석의 경우 fixedValue로, Euler 계산의 경우 slip 조건을 부여하였으며 압력과 온도의 경계 조건의 경우에는 zeroGradient 조건을 부여하였다.

Freestream(fs) 경계 조건은 계산 영역 안쪽으로 속도 벡터가 나타나면 fixedValue 조건으로 계산 영역 바깥쪽으로 나타나면 zeroGradient 조건으로 지정된다. 이 경우는 주로 속도나 온도값이 고정 경계 값을 사용할 때 유용한 경계 조건이다. 압력 조건의 경우 fs 조건 외에 FreestreamPressure(fp)와 waveTranmissive(wt) 조건이 더 포함된다. fp 조건의 경우 경계 조건에서의 속도에 맞추어 압력이 계산되어 지정되게 되어 있으며 wt 조건은 외곽 경계 영역에서 사용자가 지정한 거리만큼 떨어진 곳에 고정 값을 가지는 경계 조건이 있다고 가정하여 계산하는 방식이다. 현재 OpenFOAM에는 외부 유동에서 사용되는 characteristic 경계 조건은 포함되어 있지 않다. 현재의 OpenFOAM 버전에서는 wt 조건의 경우 CoEuler와 같은 시간차분 파라미터의 지원을 하지 않고 있으나 본 연구에서는 소스 코드 수정을 통하여 CoEuler와 같은 시간차분 파라미터에서도 작동이 가능하도록 하였다.

천음속 영역 해석 케이스는 RAE2822 에어포일과 OneraM6 날개로 두 케이스 모두 NPARC Alliance Validation Archive 웹페이지에서 참고하였다[12]. 천음속 영역에서의 해석자는 난류 모델의 사용이 가능하면서 비교적 정확한 결과의 획득이 가능한 rhoPisoFoam 압축성 유동 해석자를 사용하였다.

#### 2.3.1 RAE2822 에어포일 해석

RAE2822 에어포일 해석 케이스는 2차원 해석이며 Table 5에서 제시한 외곽 경계 조건에 대한 비교 검증을 수행하였다. 공간차분은 vanLeer 제한자 기법을 사용하였으며 시간차분법으로는 내재적 Euler 기법을 사용하였는데 빠르게 정상해를 구하기 위해 Table 3에서와 같이 CoEuler를 시간차분법의 파라미터로 입력 파일에 지정하여



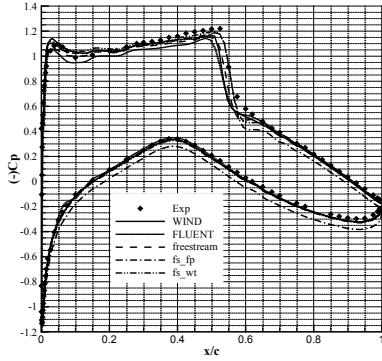


Fig. 6. RAE2822 익형 표면 압력 계수

속도와 밀도에 의한 국소 시간전진법(local time stepping)을 사용하였다. 난류 모델은 Spalart-Allmaras 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 6에는 RAE2822 에어포일 해석 결과인  $C_p$  그래프를 실험 및 NASA의 연구, FLUENT 해석 결과와 같이 비교하여 나타내었다. 결과 그림에서 확인할 수 있듯이 경계 조건 처리에 따라 결과에 약간의 차이를 확인할 수 있었다. 하지만 대부분의 경계 조건에서 실험치와 비교적 정확한 결과를 획득할 수 있었으며, 상용툴인 FLUENT와의 비교하였을 때 OpenFOAM의 해석자가 비교적 정확하게 충격파를 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 앞선 해석 케이스에서 확인할 수 있었던 충격파 이후의 진동이 약하게 나타나는 것도 확인할 수 있었다.

2.3.2 OneraM6 3차원 날개 해석

천음속의 유동 영역에서 OneraM6 날개 해석을 통해 OpenFOAM의 비정렬 격자 해석 정확도를 평가하고자 하였다. 이를 위해 실험 결과와 NASA에서 개발한 전산유체역학 코드(WIND)의 결과와 비교하였다. 이 해석을 위해서 공간차분은 Minmod 제한자 기법을 사용하였으며 시간차분법으로는 내재적 Euler 기법을 사용하였는데 빠르게 정상해를 구하기 위해 Table 3에서와 같

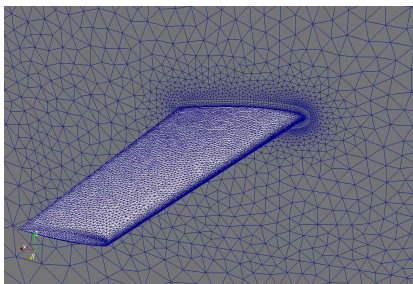


Fig. 7. Onera M6 wing Grid

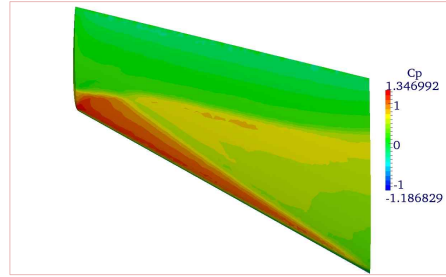


Fig. 8. Onera M6 날개 윗면의 Cp 분포

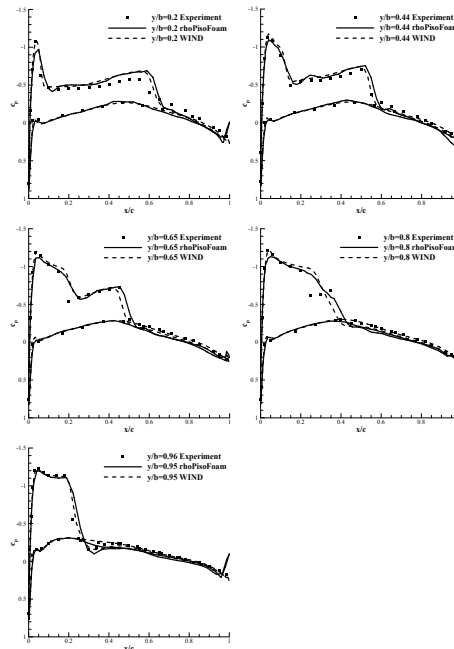


Fig. 9. Onera M6 스펠 길이 방향으로의 날개 윗면의 Cp 그래프

이 CoEuler를 시간차분법의 파라미터로 입력 파일에 지정하여 속도와 밀도에 의한 국소 시간전진법(local time stepping)을 사용하였다. 난류 모델은 Spalart-Allmaras 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 7은 해석에 사용한 격자를 나타낸 그림이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 OneraM6 날개의  $C_p$ 를 나타낸 그림이다. Fig. 8은 날개 윗면에서의  $C_p$ 값을 나타낸 것이고 Fig. 9는 익근에서부터 정의된 스펠길이 방향으로 날개 표면 단면의  $C_p$ 값을 그래프로 나타낸 결과이다.

Fig. 8에서 보듯이 날개 윗면에서 충격파의 형상이 NASA의 연구[12]와 유사함을 확인할 수 있었다. Fig. 9에서 스펠 방향의 단면별로 표면의  $C_p$ 값을 실험치와 NASA의 연구결과와 비교했을

때 OpenFOAM 해석자의 충격파 예측이 비교적 정확하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 이번 해석 케이스에서도 충격파 이후의 압력값의 진동을 확인할 수 있었다. 스패의 80% 지점에서 실험결과값과 전산유체역학코드의 결과인 NASA의 연구 결과 및 OpenFOAM의 결과를 비교하면 충격파의 형태가 다른 것을 알 수 있다. 이는 날개위에서 발생한 램다형 충격파를 전산유체역학 코드가 제대로 예측하지 못한 결과라고 할 수 있다. 그러나 NASA의 연구 결과와 OpenFOAM의 연구 결과가 서로 비슷한 것으로 보아 전산유체역학 코드와의 비교에서는 신뢰할 수 있는 결과를 도출하였다고 판단하였다. 현재  $C_p$  값을 결과에서 날개 끝단에서 약간의 불안정성을 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 비정렬 격자의 특성상 날개 끝단에서의 격자의 skewness가 다소 좋지 않아 발생하는 문제로 생각된다.

### 2.4 아음속 영역에서의 OpenFOAM 활용

아음속 유동 영역은 고속의 항공기나 회전기를 제외한 거의 대부분의 유체 문제를 포함하고 있다. 실제 몇가지 복잡한 유동을 제외한 대부분의 유체역학 문제는 아음속 유동 영역에서 일어나고 있으며 특히 형상의 변화가 큰 물체의 경우 아음속 영역에서 박리등의 복잡한 유동 변화를 보이게 된다. 본 연구에서는 형상 변화가 큰 ROBIN 형상의 동체해석을 통해 복잡한 유동 영역 하에서 OpenFOAM의 해석 정확도를 확인하고자 한다.

#### 2.4.1 ROBIN 동체 해석

ROBIN 형상에 대한 실험적 연구[15]와 이재원의 수치해석적 연구[16]등 많은 연구 문헌이 존재한다. 본 연구에서는 로터의 영향을 고려하지 않고 자유류의 속도 영향만을 고려하여 동체에서 관찰되는 압력값을 실험결과와 타 전산유체역학 코드 결과와 비교하였다. 해석자는 비압축성 유동 해석자중 PISO 알고리즘 기반의 pisoFoam 해석자를 사용하였다. 공간차분법은 vanLeer 제한자 기법을 사용하였으며 시간차분법으로는 내재적 Euler 기법을 사용하였는데 빠르게 정상해를 구하기 위해 Table 3에서와 같이 CoEuler를 시간차분법의 파라미터로 입력 파일에 지정하여 속도와 밀도에 의한 국소 시간전진법(local time stepping)을 사용하였다. 난류 모델은 Spalart-Allmaras 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

ROBIN 동체의  $C_p$  해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 동체 위의 파이런의 앞전 부분에서 큰

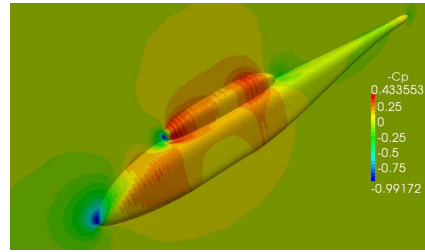


Fig. 10. ROBIN 동체의  $C_p$  분포

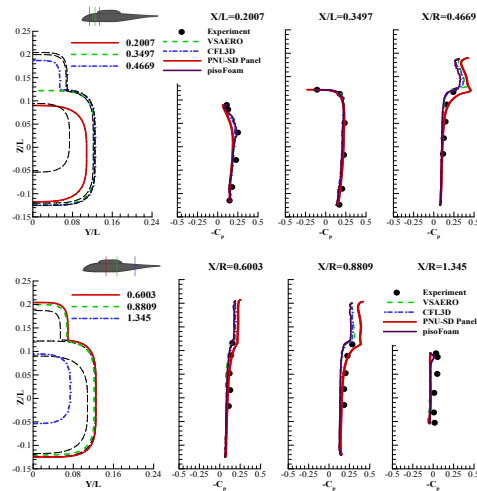


Fig. 11. ROBIN 동체에서 X 방향 단면의  $C_p$  분포

박리에 의한 강한 회전 흐름이 생기게 되며 이를 Fig. 10에서 확인할 수 있었다. 또한, 파이런 뒤쪽 부분에서도 이런 박리가 발생하는 현상도 확인할 수 있었다. Fig. 11은 동체 앞부분에서 섹션을 나누어 실험치 및 타 전산유체역학 코드와 비교한 그림이다. 이 그림에서 OpenFOAM의 결과와 실험 결과 및 타 전산유체역학 코드와 비교했을 때 비교적 정확한 결과를 예측함을 확인할 수 있었다. 또한, 파이런의 시작부분에서 동체의 뒤쪽 부분까지 강한 난류의 영향을 받는 부분에서 포텐셜 유동 기반의 타 전산유체역학 코드의 결과보다 실험 결과 및 Navier-Stokes 기반의 타 전산유체역학 코드의 결과와 비교적 정확하게 일치함을 알 수 있었다.

### III. 결론

본 연구에서는 오픈 소스 기반의 전산유체역학 해석 프로그램인 OpenFOAM을 사용하여 대표적인 외부 유동 현상에 대한 해석을 수행하였다. 초음속과 천음속 유동 해석에서는 해석자에



따라 충격파의 예측의 정확도가 약간의 차이를 보이나 대부분의 해석자에서 실험 결과와 타 전산유체역학 프로그램과 비교하여 신뢰할만한 결과를 획득할 수 있었다. 그러나 충격파 이후의 수치적 불안정성에 의한 해의 진동값이 나타나고 강한 충격파가 발생하는 경우에는 해의 진동이 비교적 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 아음속 유동에서 큰 박리가 일어나는 유동의 경우에는 실험 결과와 타 전산유체역학 프로그램의 결과와 비교하였을 때, 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있음을 확인하였으며 특히 박리 이후에서의 유동 현상도 비교적 잘 해석하고 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 오픈 소스 기반의 전산유체역학 프로그램이 외부 유동 영역에서도 신뢰성 있는 결과를 출력하고 있음을 알 수 있었으며 다양한 해석자와 경계 조건을 가지고 있으므로 앞으로 전산유체역학에서의 오픈 소스 코드의 활용가능성이 크다고 예상하였다. 앞으로의 연구 진행 방향은 OpenFOAM의 경우 소스 코드가 공개되어 있어 초음속, 천음속 영역의 외부 유동에서 정확한 결과를 얻기 위한 공간차분기법의 개선이나 난류 모델 적용이 가능한 density-based 압축성 유동 해석 개발, 압축성 경계 조건의 추가, 회전하는 로터의 영향을 고려하기 위한 압력 판 경계 조건 개발 등의 연구를 진행할 예정이며 아음속 유동 영역에서도 전산유체해석이 필요한 다양한 해석 분야에 적용하여 지속적인 코드 개선 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- 1) OpenWiki Web Site, "http://openfoamwiki.net/index.php/Main\_Page".
- 2) Doolan, Con J., "Flow and Noise Simulation of the NASA Tandem Cylinder Experiment using OpenFOAM", *15<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeracoustics Conference*, AIAA, Miami, Florida, U.S.A., 2009. 5.
- 3) Xisto, C. M., Jose C. Pascoa, J. C., Paulo J. Oliveira, P. J., and Nicolini, D. A., "Implementation of A 3D Compressible MHD Solver Able to Model Transonic Flows", *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010. 6.

- 4) Othmer, C., and Villiers, E., "Implementation of a Continuous Adjoint for Topology Optimization of Ducted Flows", *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, AIAA, Miami, Florida, U.S.A., 2007. 6.
- 5) Petropoulou, S., "Industrial Optimisation Solutions Based on OpenFOAM Technology", *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010. 6.
- 6) Islam, AG M., Decker, F., Villiers, E., Jackson, A., Gines, J., Grahs, T., Gitt-Gehrke A., and Comas i Font, J., "Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development", *SAE World Congress & Exhibition*, SAE, Detroit, MI, U.S.A. 2009. 4.
- 7) 박준권, 강관형, "Source 공개 코드 OpenFOAM에 대한 리뷰", *한국전산유체공학회지*, 15권 3호, 2010. 9., pp. 46-53.
- 8) Weller, H.G., Tabor G., Jasak, H., and Fureby, C., "A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics using Object-Oriented Techniques", *Computers in Physics*, Vol. 12. No. 6, 1998, pp. 620-631.
- 9) OpenCFD, *OpenFOAM User Guide Version 1.7.1*, OpenCFD, 2010. 8.
- 10) OpenCFD, *OpenFOAM Programmer's Guide Version 1.7.1*, OpenCFD, 2010. 8.
- 11) CFD online Web Site, "http://www.cfd-online.com/".
- 12) NPARC Alliance Verification and Validation Archive Web Site, "http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/archive.html".
- 13) 김규홍, 이정일, 김종암, 노오현, "새로운 다차원 고차 내삽기법 개발", *한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집*, 2000. 4., pp. 335-338.
- 14) Robinet, J., "Bifurcations in Shock-Wave/Laminar-Boundary-Layer Interaction: Global Instability Approach", *Journal of Fluid Mechanics*, 579, 2007, pp. 85-112.
- 15) Freeman, Carl E., and Mineck, Raymond E., "Fuselage Measurements of a Helicopter Wind-Tunnel Model with a 3.15-Meter Diameter Single Rotor", *NASA Technical Memorandum 80051*, 1979.
- 16) 이준배, 서진우, 이재원, 이관중, 오세종, "향상된 자유후류 기법을 이용한 비정상 로터-동체 상호작용 시뮬레이션", *한국항공우주학회지*, 38권 7호 2010.7., pp. 629-636.