

Source 공개 코드 OpenFOAM에 대한 리뷰

박준권,¹ 강관형^{*2}

REVIEW ON OPENFOAM — AN OPEN SOURCE SOFTWARE

J.K. Park¹ and K.H. Kang^{*2}

Recently, several open source codes for computational fluid dynamics (CFD) have been introduced and are spreading fast. Our group has chosen the OpenFOAM as a platform to develop our own in-house code. In this brief review, we would like to share the information on the codes and what we have experienced so far. We introduce several features of OpenFOAM, which include the performance compared with commercial packages, estimation for current user population, and our own prospect for future improvement in performance and growth in user population. In addition, we briefly introduce our experience gained in embedding the level set method into the OpenFOAM.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 오픈폼(OpenFOAM), 오픈 소스 소프트웨어(Open Source Software), 레벨셋(Level Set Method)

1. 서 론

오늘날 오픈 소스 소프트웨어(open source software)는 컴퓨터를 사용하는 한 어디에나 존재한다. 가젯에 심어져 있는 프로그램부터 운영체제인 리눅스(linux), 웹서버 아파치(apache), 웹 브라우저 모질라 파이어폭스(mozilla firefox)에 이르기까지 다양한 형태의 오픈 소스가 개발되었고 널리 사용되고 있다. 오픈 소스 소프트웨어라는 명칭은 1998년에 처음 제시되었으나, 유사한 개념의 프로그램들은 이미 1990년대 초반부터 존재하였다[1,2]. 이러한 프로그램들의 특성을 나타내는 여러 사용 허가가 있는데 그중 GNU 일반 공중 사용 허가서(GNU, general public license)가 대표적이다. GNU 일반 공중 사용 허가서는 자유 소프트웨어 재단에서 공표한 자유 소프트웨어 라이선스로써 소스 코드의 무상 공개와 사용자가 이를 자유롭게 변경할 수 있는 것을 골자로 한다[3].

전산유체역학 분야에서는 통상 Fluent[4], CFX[5] 등의 상

용 전산유체역학 패키지를 사용하거나 혹은 각 연구소에서 직접 개발한 in-house 코드를 사용해 왔다. 2001년 미국의 에너지 기술 연구소(national energy technology laboratory)에서는 자체적으로 개발한 MFIX의 소스를 공개하였으며, 2004년 OpenCFD사에서 OpenFOAM[6]을 오픈 소스 소프트웨어로 전환하여 소스를 무상 공개하는 등 근래에 들어서 전산유체역학 분야에서도 오픈 소스 소프트웨어가 등장하게 되었다.

OpenFOAM은 모든 코드를 공개하기 때문에 사용자는 기존 코드를 자유롭게 수정할 수 있는 유연성을 갖게 된다. 이러한 유연성을 활용하기 위하여 본 연구그룹은 최근 전산유체역학 해석을 위한 플랫폼으로써 OpenFOAM을 선택하였으며, 여기에 레벨셋 기법(level set method)을 추가하여 자유계면 문제를 해석할 수 있는 기반을 마련하였다. 이를 통해서 전기습윤 문제에서 액적이 바닥면과 접하는 접촉선에 생성되는 접촉각에 대한 모델을 임의로 설정할 수 있었으며, 이러한 접촉각 모델을 구현할 수 있는 독자적인 알고리즘을 개발할 수 있었다[7].

저자들은 본 리뷰를 통하여 최근 국내외적으로 많은 주목을 받고 있는 OpenFOAM을 본 그룹에서 플랫폼으로 선택하는 과정에서 축적한 경험과 파악한 사실을 여러 연구자들과 공유하고자 한다. 다만, 일반적인 수치해석 전반에 대한 저자들의 지식 및 이해의 깊이의 한계로 인하여 본 리뷰에서는

접수일: 2010년 6월 11일, 수정일: 2010년 8월 25일,

게재확정일: 2010년 8월 27일.

1 정희원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

2 정희원, 포항공과대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: khkang@postech.ac.kr

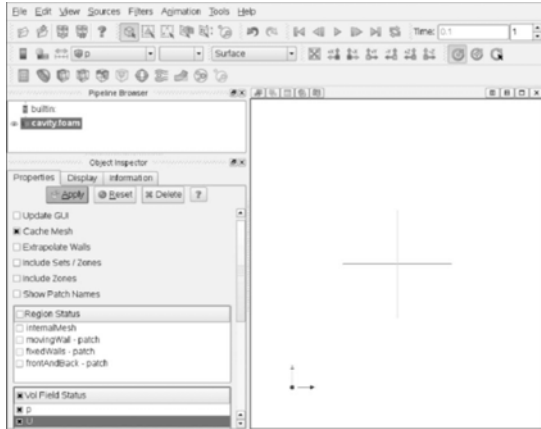


Fig. 1 ParaView

각 상황에 따른 이산화기법이나 격자 생성 등과 같은 전산유체역학을 이루는 각 요소별로 엄밀한 평가를 수행하지는 못했고, 사용자 또는 개발자 입장에서 바라본 OpenFOAM이 갖는 전반적인 특징을 위주로 다소 일반적인 내용들을 소개하는데 제한을 두고 있음을 먼저 밝힌다. 본 논문의 2장에서는 OpenFOAM의 주요 특징들을 살펴보고, 3장에서는 상용 프로그램과의 경쟁력, 지속적인 발전 가능성에 대한 전망, 사용자 층과 같은 OpenFOAM의 외부 고려요소들에 대해서 살펴볼 것이다. 그리고 4장에서는 본 연구그룹에서 레벨셋 기법을 OpenFOAM에 적용하면서 축적한 경험을 소개할 것이다.

2. OpenFOAM 특성

OpenFOAM은 영국의 OpenCFD사에서 개발한 전산유체역학 프로그램이다. 처음에는 FOAM(field operation and manipulation)이란 이름으로 유료로 배포되었으나, 2004년 OpenFOAM이란 이름으로 오픈 소스 소프트웨어로 변경되어 무상으로 배포되었다. OpenFOAM은 GNU 일반 공중 사용 허가서의 정책을 따르며, 개발사인 OpenCFD사는 계약을 통해 각각의 경우에 대한 맞춤형 개발과 지원, 교육 등을 통해 수익을 창출하고 있다. 즉, 기존 OpenFOAM을 바탕으로 계약자가 요구하는 새로운 기능을 추가하거나 전체 프로그램을 새로 개발하기도 하며, 또는 계약자가 기존에 사용하던 in-house 코드를 OpenFOAM으로 변환해 주는 등의 용역을 통해 수익을 얻는다.

OpenFOAM은 각종 프로그래밍에서 가장 널리 쓰이고 있는 프로그램 언어 중의 하나인 C++을 기반으로 프로그래밍되었다. 소프트웨어를 단일 프로그램으로 작성하게 될 경우 보통 프로그램 내의 전역 변수(global variable)들은 이들을 접

근하는 함수들에 의해서 다루어지는데, 각각 다른 기능을 하는 함수들이 추가되고 프로그램의 규모가 커질수록 잠재적으로 새로운 버그가 발생할 가능성이 커진다. 반면 C++은 객체 지향 프로그래밍(object-oriented programming)으로 복잡한 연산 및 데이터를 분할하여 처리하는 방식을 취한다. 클래스라는 독립된 데이터 타입에 객체를 정의하며, 이러한 독립된 객체들로 하여금 문제를 풀게 한다. C++은 이러한 클래스들을 조합하여 복잡한 문제를 다루게 되며, 이를 통해 대규모 프로그램을 개발할 때 단일 프로그램으로 작성하는 것에 비해 버그가 발생할 가능성이 적다[8].

OpenFOAM의 핵심적인 장점 중 하나가 지배방정식을 사용자가 자유롭게 구성할 수 있으며, 그 형식이 편미분방정식과 유사하여 사용자가 내부적인 문법을 알지 못해도 직관적으로 사용할 수 있다는 점이다. 한 예로 다음의 편미분방정식을 OpenFOAM 상에서 표현하면 다음과 같다.

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

solve

(

fvm::ddt(rho,U)

+ fvm::div(phi,U)

- fvm::laplacian(mu,U)

==

- fvc::grad(p)

);

대개의 상용 전산유체역학 프로그램들은 solver와 더불어 격자 생성 프로그램과 후처리 프로그램을 모두 묶어서 패키지로 제공한다. 하지만 OpenFOAM을 개발한 OpenCFD사의 경우에는 solver만을 개발하였다. OpenFOAM에서 기본적으로 제공되는 격자 생성 프로그램은 GUI(graphical user interface) 없는 문자열 기반의 프로그램이며 기본적인 형상 이외의 복잡한 형상에는 대응하기 다소 불편하다. 그 대신 Fluent 등의 다른 프로그램을 통해서 생성된 격자를 입력받을 수 있다. 후처리 프로그램 또한 마찬가지이다. OpenFOAM 전용의 후처리 프로그램을 개발하는 대신 OpenFOAM의 계산 결과를 ParaView[9], EnSight[10] 등의 프로그램을 통해서 후처리가 가능하도록 파일 형식의 변환을 지원해주며, 그 중에서 기본적으로 제공하는 ParaView는 그 자체가 또한 오픈 소스 소프트웨어이기도 하다(Fig. 1). OpenFOAM[6]과 ParaView[9]는 참고 문헌에 명시한 각각의 홈페이지를 통해 다운받을 수 있으며, ParaView는 OpenFOAM 홈페이지에서도 제공하고 있다.

상술한 바와 같이 OpenFOAM은 solver의 개발에만 집중하였으며, 그 결과 현재 OpenFOAM은 다양한 표준 solver들을 제공하고 있다. 비압축성 유동(incompressible flows)을 비롯하여 압축성 유동(compressible flows), 다상 유동(multiphase flows), 난류 유동(direct numerical simulation and large eddy simulation), 연소(combustion), 열전달(heat transfer), 전자기(electromagnetics), 고체 역학(solid dynamics), 재정(finance) 등에 이르는 다양한 분야를 아우르고 있다. 이를 바탕으로 사용자는 원하는 물리 현상을 표현하기 위하여 여러 solver들을 조합해서 사용하거나 또는 기존의 solver를 수정하여 각 상황에 맞는 새로운 solver를 개발할 수 있다. 이와 관련된 예로 난류 모델링[11-14], 자동차 유체역학[15-19], 선박 유체역학[20,21], 엔진 및 연소[22,23], 터보기계[24-27], 다상 유동[28-33], 유체-구조 연성 해석[34,35], 열전달[36,37] 등 폭 넓은 분야에서 OpenFOAM을 활용한 연구가 근래에 빠르게 확대되고 있다.

OpenFOAM은 유닉스(unix)와 리눅스 환경에서만 실행이 가능하다. 마이크로 소프트사의 윈도우와 호환이 안 된다는 점은 사용자의 편의성 측면에서는 단점이나, 안정성 측면에서는 유닉스와 리눅스가 윈도우 계열보다 뛰어나다고 알려져 있다. 또한 병렬 연산(parallel computing)을 지원하기 때문에 이를 이용하여 대용량 계산을 수행할 수 있다[38].

OpenFOAM은 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 지배방정식을 이산화하며, 항상 삼차원 공간 영역을 사용한다. 삼차원을 이루는 세 축 중에서 한 축 방향의 격자를 한 개만 두고, 양면에 특수한 경계조건을 부여함으로써 이차원 계산 또한 모사할 수 있다[6].

3. OpenFOAM 외부 고려요소

3.1 상용 전산유체역학 프로그램과의 경쟁력

OpenFOAM이 등장한 2004년부터 점차 사용자층을 늘려가고 있는 근래에 이르기까지, 전산유체역학 분야에서는 이미 Fluent, CFX 등의 다양한 상용 전산유체역학 프로그램들이 널리 쓰이고 있었다. 본 장에서는 OpenFOAM이 상용 프로그램들에 비해 어떤 경쟁력을 가지고 있는지를 살펴 본다.

OpenFOAM이 가지는 가장 큰 장점은 solver에 대한 자유도라 할 수 있다. 2장에서 상술한 바와 같이 OpenFOAM은 다양한 물리 현상에 대한 solver들을 이미 내장하고 있을 뿐 아니라, 사용자가 자유롭게 solver를 수정하거나 혹은 새로운 solver를 생성할 수 있다. 근래 일부 상용 프로그램들도 사용자가 지배방정식을 수정할 수 있게 하는 등 사용자의 자유도를 확장하기 위해 노력하고 있으나, 그 자유도의 정도에 있어서 아직 OpenFOAM에 미치지 못한다.

반면 OpenFOAM의 단점은 상용 프로그램 대비 낮은 편의성이다. 상용 전산유체역학 프로그램들은 격자 생성부터 계산, 후처리에 이르기까지 버튼 몇 개를 누르는 조작만으로 구현되도록 관련 GUI를 높은 수준까지 개발하였으며, 이를 통해 전산유체역학에 대한 깊은 이해가 없는 사용자라도 제한적인 경우에 대해서는 수치해석을 수행하는 것이 가능해졌다. 이에 반해 OpenFOAM은 GUI 없이 모든 작업이 문자열 기반으로 이루어져 있어서 상용 프로그램에 비해서 다소 불편하다. 또한 solver를 수정하는 경우에는 OpenFOAM의 내부 문법을 이해해야 하며 수정한 코드에 대해 직접 디버깅을 해야 하는 부담이 있는데 이는 새로운 사용자들에게 큰 진입장벽으로 작용하고 있다[39].

한편 상용 전산유체역학 프로그램들과 OpenFOAM 간의 성능을 비교하기 위해서는 정확도 및 연산 속도를 비교해 볼 수 있다. 하지만 정확도 및 연산 속도의 비교는 그리 단순하지 않다. 전산유체역학 프로그램의 정확도와 연산 속도는 사용된 이산화 방식에 크게 좌우되며, 상황에 따른 적절한 이산화 방식 또한 다르기 때문이다. 난류와 자유계면 해석을 비롯한 몇몇 분야에서 상용 프로그램인 Fluent와 OpenFOAM의 정확도와 연산속도를 비교하였으며, 각 경우마다 결과는 다소 다르지만 대체로 OpenFOAM은 Fluent와 유사한 수준의 정확도와 연산 속도를 나타낸다고 보고하고 있다[38,40-42]. 하지만, 아직은 상용 프로그램과 OpenFOAM과의 비교 연구가 충분치 않아서 일반적인 판단을 내리기는 어렵다. 한편, OpenFOAM은 지배 방정식의 각 항목마다 다양한 이산화 방식을 선택할 수 있도록 지원하고 있다. 따라서 OpenFOAM을 사용할 경우, 이산화 방식만 적절히 선택한다면 높은 정확도와 빠른 연산 속도를 얻을 수 있을 것이다. 그리고 오픈 소스의 특성 상 많은 사람들에게 의해서 검토되기 때문에 잠재적인 오류들 또한 교정될 가능성이 크다. OpenFOAM의 정확도와 관련된 또 다른 예로 최근 Audi에서 자동차의 공력저항을 예측하기 위하여 OpenFOAM을 기반으로 전용 프로그램을 개발하였으며, 프로그램 검증을 위하여 여러 자동차 모델에 대해 적용하여 수치해석한 결과와 풍동에서의 실험 결과를 비교하였는데 실험과 수치해석이 상당히 잘 일치하였다[15,16].

상술한 바와 같이 OpenFOAM과 상용 전산유체역학 프로그램들은 각기 두드러진 특징들을 갖고 있다. 따라서 서로 경쟁하는 것이 아닌 각기 다른 사용자층을 가지고 있다고도 볼 수 있다. 상용 프로그램들은 대다수의 일반 사용자들을 대상으로 한다면 OpenFOAM은 자신만의 독자적인 solver를 구축하려는 개발자들을 대상으로 한다. 자신만의 solver를 개발하기 위해서 매번 전산유체역학 프로그램 전체를 스스로 개발해야 한다면 개발자의 부담이 너무 커지게 된다. OpenFOAM은 다양한 분야의 표준 solver들을 제공하며 모든 코드를 공

개하기 때문에, 개발자는 기존 코드를 활용함으로써 이러한 부담을 덜고 자신의 고유한 분야에서의 코드 개발에만 역량을 집중할 수 있게 된다. 이러한 OpenFOAM의 특수성들이 OpenFOAM이 거대한 상용 프로그램들 사이에서도 살아남을 수 있는 경쟁력을 이루고 있다.

3.2 지속적인 발전 가능성

전산유체역학 분야는 계산의 정확도와 연산 속도를 향상시키고 새로운 물리현상을 표현하기 위해 이산화 방식의 개선 또는 새로운 기법의 개발 등 각 요소별로 끊임없이 발전하고 있다. OpenFOAM 또한 관련 기술의 발전과 더불어 지속적으로 업데이트 되어야 한다. 이러한 지속적인 유지, 발전의 주체는 우선 개발사인 OpenCFD사를 들 수 있다. OpenCFD사에서는 2004년 OpenFOAM의 출시 이후에 2009년 1.6 버전에 이르기까지 매년 지속적인 업그레이드를 진행해 왔다. 하지만 OpenCFD사는 OpenFOAM을 무상으로 배포하고 있기 때문에 거대한 상용 전산유체역학 회사들에 비해서는 상대적으로 수익이 적을 것이고, 개발인력 또한 소수일 것으로 예상된다. 그러나 OpenCFD사는 상술한 바와 같이 solver의 개발에만 회사의 역량을 집중함으로써 그러한 단점을 최소화하고 있다. 또한 OpenFOAM은 사용자들이 개발에 기여하는 바를 무시할 수 없다. 오픈 소스의 특성상 OpenFOAM의 사용자는 대개 단순한 사용자가 아닌 각각의 분야에서의 전문가로서 독자적인 solver를 개발하려는 사람이 많다. 따라서 이들 개개인이 축적한 개발 과정의 노하우 및 그 결과물들은 매우 다양한 분야를 아우를 것이며, 이런 부분의 OpenFOAM 개발에 대한 직접적인 또는 간접적인 기여도는 OpenFOAM만의 큰 경쟁력이 될 수 있다.

한편 OpenFOAM을 숙달하기 위해서는 상대적으로 상당한 시간과 노력이 소요되므로 향후에 새로운 오픈 소스 소프트웨어에 의해 OpenFOAM이 대체될 가능성을 살펴볼 필요가 있다. 그러나 여기에 대한 가능성은 희박해 보인다. 우선 OpenFOAM은 이미 정확도나 연산 속도, 다양한 분야의 표준 solver 구축 등 이미 상당히 높은 수준을 달성한 상태이다. Gel 등[43]이 현재 쓰이고 있는 오픈 소스 전산유체역학 프로그램들인 OpenFOAM, Trilinos, SAMRAI, OVERTURE, PETSc, AMROC, ROCCOM을 다양한 물리 현상의 표현, 수치적 기법, 프로그램 유지 및 보수성, 프로그램의 공개 정도라는 기준으로 각각 비교, 평가하였으며, 그 결과 OpenFOAM이 가장 뛰어나다고 결론지었다. 그리고 오픈 소스의 특성상 문제점이나 새로운 요구가 있다면 OpenFOAM을 바탕으로 일부를 수정할 수 있기 때문에 처음부터 새로운 프로그램을 만들어서 대체할 필요는 없다. 이러한 측면은 운영체제에 있어서 오픈 소스 소프트웨어인 리눅스가 도중에 사라지지 않고 수십년에 걸쳐

개선되어 온 것을 통해서도 짐작할 수 있다.

3.3 사용자층

OpenFOAM은 2004년 공개된 이후 지속적으로 사용자층을 확대하여 왔다. OpenFOAM을 개발한 OpenCFD사가 영국회사인 만큼 주로 유럽 지역을 중심으로 관련 활동이 전개되고 있다. 2006년부터 매년 OpenFOAM 워크샵이 개최되고 있는데 이때 사용자 교육 또한 이루어지고 있으며, 2007년부터는 매년 국제 학술대회(open source cfd international conference)가 개최되고 있다. 이 외에도 온라인 상의 포럼을 통한 토론 및 정보교환이 이루어지고 있다[39]. OpenFOAM을 사용한 SCI 논문들 또한 점차 증가하고 있다. ScienceDirect[44]을 통해 OpenFOAM이란 검색어로 총 65편의 논문이 검색되었으며, 그 중 2006년 7편, 2007년 2편, 2008년 14편, 2009년 25편, 2010년 4월말 현재까지 17편으로 근래에 빠르게 증가하고 있다.

한편 국내에서의 OpenFOAM 관련 사용자층은 아직 미미하다. 본 연구 그룹외에 서울대학교 조선해양공학과 이신형 교수 그룹을 포함한 소수의 연구그룹이 OpenFOAM을 도입하기 위한 작업을 진행 중이거나 혹은 초기 단계에 머물러 있고, 현재까지 OpenFOAM을 사용하여 얻어진 연구 결과가 출판된 적은 없는 것으로 알고 있다.

4. 레벨셋 기법의 적용

4.1 레벨셋 기법

OpenFOAM의 표준 solver인 interFoam을 기반으로 유체의 유동을 해석하였으며, 레벨셋 기법을 추가하여 자유계면을 추적하였다. 레벨셋 기법은 무차원 레벨셋 함수(ϕ)의 등고선을 추적하여 유체의 계면을 모사하는 방법이다. 본 연구그룹에서는 Olsson 등[45]이 제안한 보존(conservative) 레벨셋 기법을 사용하여 질량 손실에 대한 문제를 최소화하며 레벨셋 함수를 이송하고(식 (2)) 초기화하였다(식 (3)).

$$\phi_t + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\phi_\tau + \nabla \cdot (\phi(1-\phi)\mathbf{n} - \gamma \nabla \phi) = 0 \quad (3)$$

위의 식에서 γ 은 초기화 관련 변수이며, 계면 두께의 절반에 해당한다. OpenFOAM에서는 다음과 같이 표현한다.

```

solve
(
    fvm::ddt(lsf)

```

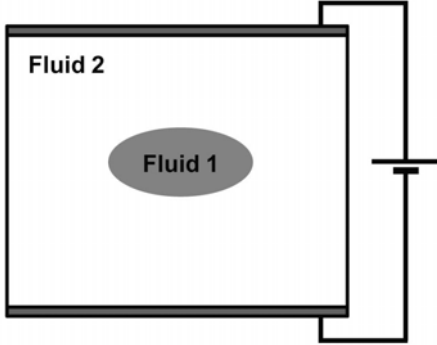


Fig. 2 Droplet deformation under DC electric field

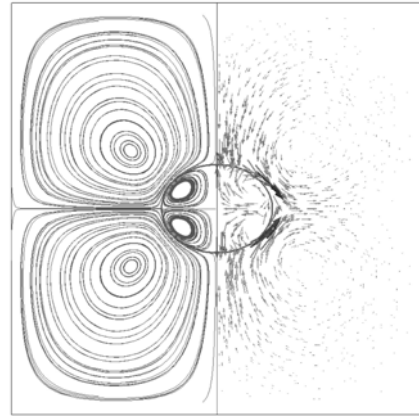


Fig. 4 Flow velocity around the droplet

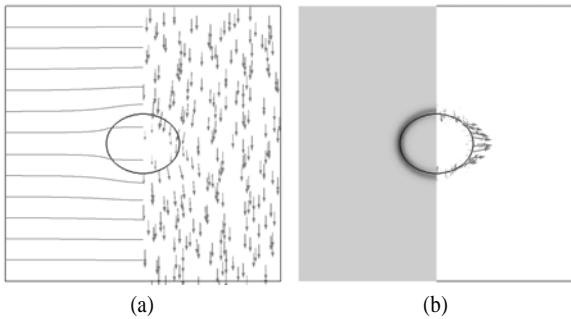


Fig. 3 (a) Electric field and (b) Electrical force around the droplet

```

==
-(fvc::div(lsf*U))
);
lsf
+=
tau*( fvc::div( -lsf*(1-lsf)*n)
+ gamma*fvc::laplacian(lsf)
);
    
```

4.2 직류 전기장 하의 액적의 변형 해석

Fig. 2에 도시된 바와 같이, 직류 전기장 하에서의 액적의 변형에 대해 해석하였으며, 이는 박준권 등[46]이 발표한 내용 중 일부이다. 두 유체가 접하고 있고 상이한 전기전도도 (σ)와 유전율(ε)을 갖는 상황에서 외부에서 전기장을 인가하면 액적 주변의 전기장이 왜곡되고 두 유체 사이의 계면에 전기력이 발생한다. 이러한 전기력은 액적을 변형시키게 되는데 물성의 비율에 따라서 전기장과 수평한 방향으로 늘어나기도 하고 수직향 방향으로 늘어나기도 한다. 계산 영역은 이차원 축대칭이며 80×160의 등간격 격자로 이산화되었다. 액적의 초기 반지름은 1 mm이며 계산 영역은 4 mm×8 mm이다. 우선 leaky dielectric model[47]을 통해 액적 주변의 전기장

을 해석하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \tag{4}$$

위 식에서 ψ는 전위이다. OpenFOAM에서는 다음과 같이 표현된다.

```

solve
(
    fvm::laplacian(sigma, psi)
);
    
```

식 (4)를 해석하여 액적 주변의 전기장(E)을 구할 수 있었으며 그 결과는 Fig. 3(a)에 도시된 바와 같다. 왼쪽편의 선은 등전위선이며 화살표는 전기장을 나타낸다. 위의 전기장 분포를 바탕으로 다음 식을 통해 전기력(f_E)을 구하였다.

$$f_E = \nabla \cdot (\epsilon E)E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \epsilon \tag{5}$$

OpenFOAM에서는 다음과 같이 표현한다.

```

fE
=
fvc::laplacian(epsilon, psi)*fvc::grad(psi)
- scalar(0.5)*magSqr( -fvc::grad(psi) )*fvc::grad(epsilon);
    
```

위 식을 통해 구한 전기력의 분포는 Fig. 3(b)에 도시하였으며, 명도는 전기력의 세기를 화살표는 전기력의 세기와 방향을 나타낸다.

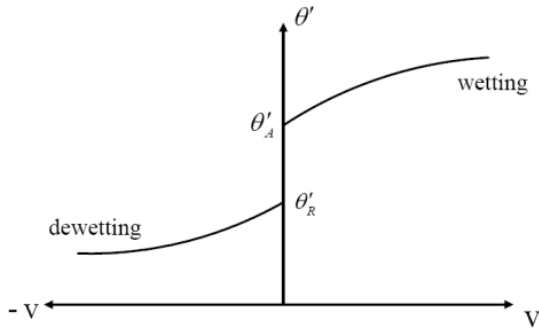


Fig. 5 Dynamic contact angle model

이와 같이 구한 전기력을 사용하여 interFoam에 내재된 PISO(pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘으로 유체 유동을 해석할 때 유체에 가해지는 체적력(body force)으로 인가하였다. 이러한 전기력은 Fig. 4에 도시된 것과 같은 유체의 유동을 생성시키며 이로 인하여 액적은 가로 방향으로 늘어난 편구(oblate spheroid)가 된다.

위와 같이 OpenFOAM 상에서 지배방정식을 수정하거나 생성하는 일은 직관적이며 간단하기 때문에 사용자가 비교적 쉽게 할 수 있다. 하지만 전체 프로그램을 개발하는 경우는 물론이거니와 프로그램의 일부만을 수정하는 경우라 하더라도 어떤 부분을 수정해야 할지 그리고 수정된 코드가 어디에 삽입되어야 할지 등을 결정해야 하고 또한 수정된 프로그램을 직접 디버깅해야 한다. 따라서 3장에서 상술한 바와 같이 OpenFOAM이 가지는 자유도를 활용하기 위해서는 결국 OpenFOAM의 내부 문법을 이해하는 것이 선결되어야 하는데, 이는 다른 상용 프로그램을 익히는 것에 비해 상당한 시간과 노력이 소요된다[39].

4.3 동적 접촉각 모델을 사용한 전기습윤 현상의 동적 거동에 대한 해석

Cahill 등[48]은 전기습윤 시의 액적의 동적 거동을 해석하였으며, 이때 상용 전산유체역학 프로그램인 COMSOL을 사용하여 고정된 접촉각 모델로 해석하였다. 그 결과 고정된 접촉각 모델의 한계로 액적은 다소 과장된 진동을 나타내었다. 본 연구 그룹에서는 OpenFOAM을 기반으로 수치해석 프로그램을 개발하였으며 접촉각 모델을 다양하게 설정함으로써 전기습윤 현상의 해석에 관한 상용 프로그램을 사용한 기존의 연구를 보다 개선할 수 있었다. Fig. 5에 도시된 바와 같은 동적 접촉각 모델을 적용하였으며, 접촉각 모델에 따른 액적의 거동을 Fig. 6에서 비교하였다. r^* 는 액적이 바닥과 접하는 반지름(r_b)을 초기 반지름($r_{b,i}$)과 평형 상태의 반지름($r_{b,i}$)를 사용

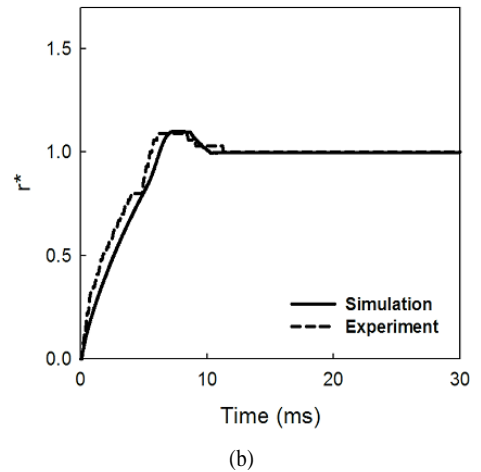
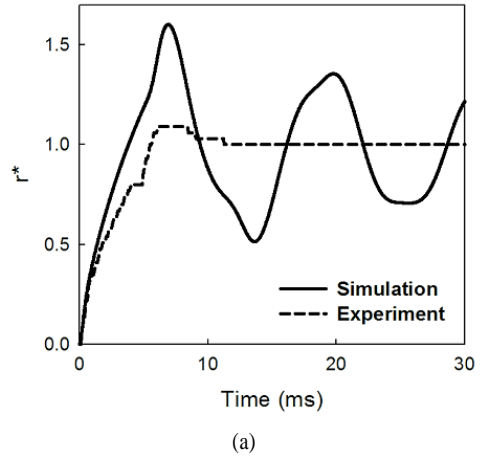


Fig. 6 Time evolution of base radius of droplet using (a) constant contact angle model and (b) dynamic contact angle model

하여 무차원화한 값이다(식 (6)). 관련된 자세한 내용은 참고 문헌 [7]에 기술되어 있다.

$$r^* = \frac{r_b - r_{b,i}}{r_{b,f} - r_{b,i}} \tag{6}$$

5. 결 론

근래 전산유체역학 분야에서는 여러 오픈 소스 소프트웨어가 등장하여 그 사용자층을 넓혀가고 있다. 본 연구그룹은 그 중 OpenFOAM을 전산유체역학 해석을 위한 플랫폼으로 선택하였고, 이를 바탕으로 독자적인 프로그램을 개발해 나가고 있다. OpenFOAM은 다양한 표준 solver들을 제공하고 있으며,

solver의 수정 및 새로운 solver의 개발이 매우 자유롭다. 이러한 유연성과 더불어 코드를 모두 공개함으로 인한 넓은 사용자층을 통한 잠재적인 오류의 교정 및 각 사용자들의 OpenFOAM의 개선에 대한 기여는 많은 상용 전산유체역학 프로그램 속에서도 살아남을 수 있는 OpenFOAM만의 경쟁력이 되었다. 또한 OpenFOAM을 기반으로 한 독자적인 solver 개발에 대한 한 예시로 본 연구그룹에서 수행한 레벨셋 기법을 이용한 자유계면 해석을 소개하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD연구센터(ERC)’의 과제료 수행된 연구임(No.2009-0083510).

참고문헌

- [1] 2008, Syamlal, M. et al., "Open-Source Software in Computational Research: a Case Study," *Modelling and simulation in engineering*, Vol.2008, pp.937542.
- [2] 2003, Fuggetta, A., "Open Source Software-An Evaluation," *The Journal of Systems and Software*, Vol.66, pp.77-90.
- [3] http://ko.wikipedia.org/wiki/GNU_GPL
- [4] FLUENT, <http://www.ansys.com>
- [5] CFX, <http://www.ansys.com>
- [6] OpenFOAM, <http://www.openfoam.com>
- [7] 2009, 박준권 외 2인, "레벨셋 기법을 이용한 전기습윤 현상의 동적 거동에 대한 해석," *한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집*, pp.84-87.
- [8] 2010, 이희범 외 2인, "OpenFOAM을 이용한 유체-구조 연성 해석," *교육과학기술부 한국연구재단 선정 우수연구센터(ERC) 2009년도 결과보고서*, pp.89-96.
- [9] ParaView, <http://www.paraview.org>
- [10] EnSight, <http://www.ensight.com>
- [11] 2009, Jarman, D. et al., "A Comparison of RANS Turbulence Models in the Prediction of Confined Turbulent Swirling Flows in Urban Drainage Flow Controls," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [12] 2009, Vincent, P.B. et al., "Detached Eddy Simulation of Swirling Flow in a Hydroturbine Draft Tube using OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [13] 2009, Sumner, J. and Masson, C., "Improving the k- ϵ Turbulence Model for Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flow," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [14] 2009, Nilsson, H. "The Dellenback Abrupt Expansion OpenFOAM Case-Study, and the kOmegaSSTF Turbulence Model," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [15] 2009, Campos, F., "Application of OpenFOAM for Automotive Aerodynamics Development," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [16] 2009, Islam, M., "Application of OpenFOAM Technology for Vehicle Aerodynamics Development," *Open Source CFD International Conference*, Barcelona, Spain.
- [17] 2009, Gagnon, L. et al., "Using OpenFOAM to Model Energy Taken from the Swirl behind a Car," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [18] 2008, Gasparini, L. et al., "Improved k- ω Turbulence Model and Application to the Computation of Flows on Simplified Car Bodies," *Third OpenFOAM Workshop*, Milan, Italy.
- [19] 2008, Moller, S. et al., "Investigation of the Flow around the Ahmed Body using RANS and URANS with Various Turbulence Models," *Third OpenFOAM Workshop*, Milan, Italy.
- [20] 2009, Paterson, E. et al., "Simulation of Wakes, Wave Impact Loads and Seakeeping using OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [21] 2009, Maki, K. and Rosemurgy, B., "Thin-Ship Theory of Wave Resistance on Finite Volume Grids," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [22] 2008, Lucchini, T. et al., "Developments in OpenFOAM for Internal Combustion Engine Simulations," *Third OpenFOAM Workshop*, Milan, Italy.
- [23] 2009, Lucchini, T. et al., "Development of OpenFOAM for the Simulation of the Combustion Process and the Exhaust-after Treatment System in Diesel Engines," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [24] 2009, Petit, O. and Nilsson, H., "The ERCOFTAC Centrifugal Pump OpenFOAM Case-Study," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [25] 2008, Beaudoin, M. and Jasak, H., "Adaptation of the General Grid Interface (GGI) for Turbomachinery Simulations with OpenFOAM," *Third OpenFOAM Workshop*, Milan, Italy.
- [26] 2009, Auvinen, M., "Flow Analysis of a Single-Blade Pump with OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal,

- Canada.
- [27] 2008, Mangani, L. and Bianchini, C., "External and Internal Heat Transfer in Turbomachinery Applications," *Third OpenFOAM Workshop*, Milan, Italy.
- [28] 2008, Costa, A.B. and Cooks, R.G., "Simulated Splashes: Elucidating the Mechanism of Desorption Electrospray Ionization Mass Spectrometry," *Chem. Phys. Lett.*, Vol.464, pp.1-8.
- [29] 2009, Saha, A.A. and Mitra, S.K., "Effect of Dynamic Contact Angle in a Volume of Fluid (VOF) Model for a Microfluidic Capillary Flow," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol.339, pp.461-480.
- [30] 2009, Rusche, H., "Metallurgical Process Simulations using OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [31] 2009, Drobyshvskii, N. and Mukin, R.V., "Modeling of Aerosol Deposition using the Diffusion-Inertia Model in OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [32] 2009, McIntyre, S.M. et al., "Comparison of Interface Capturing Methods using OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [33] 2009, Jacobsen, F., "Application of OpenFOAM for Designing Hydraulic Water Structures," *Open Source CFD International Conference*, Barcelona, Spain.
- [34] 2007, Jasak, H. et al., "OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations," *International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics IUC*, Dubrovnik, Croatia.
- [35] 2009, Olivier, M. and Dumas, G., "Non-Linear Aeroelasticity for Nano-Air-Vehicles Applications using OpenFOAM," *Fourth OpenFOAM Workshop*, Montreal, Canada.
- [36] 2009, Amouzandeh, A. et al., "Development of a Computational-Fluid-Dynamics Tool to Predict the Thermal Load of Structures in Case of Fire," *Open Source CFD International Conference*, Barcelona, Spain.
- [37] 2009, Turnow, J. et al., "LES of Vortex Formation in a Spherical Dimple and Genetic Optimization of Heat Transfer Surfaces," *Open Source CFD International Conference*, Barcelona, Spain.
- [38] 2009, Ambrosino, F. and Funel, A., "OpenFOAM and Fluent Features in CFD Simulations on CRESCO High Power Computing System," *Final Workshop of Grid Projects, PON RICERCA 2000-2006, AVVISO 1575*, Catania, Italy.
- [39] 2009, Sasongko, N.A. and Arif, M.F., "Open Source Computational Fluid Dynamic: Challenges and its Future," *Global Conference on Open Source*, Jakarta, Indonesia.
- [40] 2008, Karvinen, A. and Ahlstedt, H., "Comparison of Turbulence Models in Case of Three-Dimensional Diffuser," *Open Source CFD International Conference*, Berlin, Germany.
- [41] 2009, Muntean, S. et al., "3D Numerical Analysis of the Unsteady Turbulent Swirling Flow in a Conical Diffuser using Fluent and OpenFOAM," *3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and System*, Brno, Czech Republic.
- [42] 2009, Horvath, A. et al., "CFD Simulation of Bubble Columns using the VOF Model: Comparison of Commercial and Open Source Solvers with an Experiment," *Chemical Engineering Transactions*, Vol.18, pp.605-610.
- [43] 2007, Gel, A. et al., "Comparison of Frameworks for a Next-Generation Multiphase Flow Solver, MFIX: a Group Decision-Making Exercise," *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Vol.19, pp.609-624.
- [44] ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com>
- [45] 2007, Olsson, E. et al., "A Conservative Level Set Method for Two Phase Flow II," *J. Comput. Phys.*, Vol.225, pp.785-807.
- [46] 2009, 박준권 외 2인, "레벨셋 기법의 물성 보간 방법에 대한 고찰," *한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집*, pp.283-289.
- [47] 1966, Taylor, G., "Studies in Electrohydrodynamics I. The Circulation Produced in a Drop by an Electric Field," *Proc. of Royal Society of London, Series A*, pp.159-166.
- [48] 2008, Cahill, B.P. et al., "A Dynamic Electrowetting Simulation Using the Level-set Method," *Proc. of the COMSOL Conference*.