

유체공학부문

성 형 진 · 부문의장(KAIST, 교수)

_e-mail : hjsung@kaist.ac.kr

이 글에서는 유체기계, 난류, 전산유체역학, 다상유동, 마이크로/나노 유체역학, 생체유동, 환경유체역학, 유동제어 및 계측, 캐비테이션, 압축성유동 등 유체공학 분야의 2007년도 한 해 동안의 연구 동향에 대해 소개한다.

유체기계

다음의 내용은 2008년 유체기계저널 제11권, 제1호에 특집기사로 발표된 펌프 및 수차, 송풍기 및 환기시스템, 압축기, 가스/스팀터빈, 배관설비, 환경기계, 회전체동역학 등 7개 분과의 연감을 발췌하여 요약 정리한 내용이다.

펌프 및 수차 분야 연구 동향

세계 펌프시장은 2008년도에 450억 달러를 넘을 것으로 예상되고 있으며, 펌프의 수요증가로 인해 일본, 미국, 독일, 영국 등과 같은 기술 선진국이 오래전부터 다양한 종류의 펌프 기술을 축적해 오고 있고 전체 시장의 70% 이상을 차지하고 있다. 2007년도에도 펌프와 관련된 연

구가 국내에서는 활발히 진행되었으며, 많은 연구 결과들이 학회의 논문집이나 각종 학술발표회를 통해 발표되었다. 한편, 수차에 관한 연구는 국내에서는 아직 활발하게 연구되고 있지 않은 상황이다.

2007년 국내 펌프 및 수차 분야의 연구동향을 파악하기 위하여, 대한기계학회의 논문집, 춘계 학술대회 논문집, 추계학술대회 논문집과 유체기계공업학회의 유체기계저널, 유체기계연구개발발표회 논문집 등을 대상으로 살펴 보았다. 동 분야의 논문수는 유체기계연구개발발표회 논문집에서 15편, 유체기계저널에서 10편, 춘·추계학술대회 논문집에서 3편 등 총 28편이었다. 한편 총 28편의 논문 중 펌프 관련이 24

편, 수차관련이 4편이었다. 펌프 및 수차분야의 논문들을 내용별로 분류하고, 그 연구 동향을 분석하였다.

국내의 로켓용 펌프에 관한 연구개발은 초기에 로템을 중심으로 몇 개의 연구기관과 기업들이 공동으로 수행하였으며, 현재는 한국항공우주연구원, 한국기계연구원, ROTEM 및 서울대학교 등에서 로켓용 펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 로켓용 펌프 내부의 인두서에 집중하여 흡입성능연구 및 수치해석 연구가 많이 수행되었다.

원심펌프는 19세기 개발되어 현재까지 꾸준히 연구 및 개발이 이루어지고 있으며 배수용, 상하수도용, 광산용, 화학공업용 등 산업체에서 사용하고 있는 펌프

중 가장 많이 사용되고 있다. 이에 따라 현재 연구자들은 실험과 해석적 연구를 통해서 높은 효율의 펌프를 얻기 위한 노력을 끊임없이 하고 있다.

마이크로 장치들은 각종 기체의 샘플을 채취하기 위해서 저진공 또는 고진공 상태를 필요로 하며, 기존의 진공펌프는 필요한 유량에 비해 크기가 과대하기 때문에 일반적인 펌프를 대신한 새로운 형태의 마이크로 진공펌프가 요구된다. 마이크로 펌프는 운동방식 및 구조와 구동방식에 따라 여러 가지 종류가 있는데, 최근에는 제작 공정이 간단하고 응답성이 빠른 압전형 마이크로 펌프가 많이 연구되고 있다.

송풍기 분야 연구 동향

2007년도 유체기계 저널에 발표된 논문은 총 6편으로 양적으로는 1편이 줄었으나 논문을 내용에 따라 분류하면 에어컨 실외기용 프로펠러 팬의 기술개발, 시스템 전자냉각팬의 선정 및 소음 평가방법, 쓰레기 관로이송시스템의 관로 압력강하 평가, 최적화 기법을 이용한 축류형 송풍기 개발에 관한연구, 고압 대풍 4단 블로워의 설계 및 제작에 관한 연구, 반도체 공장 Toxic 라인에 사용되는 FRP 팬 임펠러의 부식 대체방법에 관한 연구 등 팬과 송풍기와 관련된 다양한 분야에서 심도 있는 연구 및 기술 개발에 질적으로 많은 노력이 있었음

을 알 수 있었다.

먼저, 2007년도에 발표된 총 6편의 논문들은 가정용 에어컨의 실외기용 프로펠러 팬의 기술개발, 시스템 전자냉각 팬의 선정 및 소음 평가방법, 쓰레기 관로이송시스템 관로에서의 압력강하 평가방법, 축류형 송풍기의 최적화 설계기법, 고압 4단 블로워의 설계 및 제작기법, FRP 팬 임펠러의 내부식 대체방법 제안에 대한 연구 내용을 포함하고 있다. 대표적인 3편의 논문을 요약해 보았다.

양상호 등에 의해 발표된 “에어컨 실외기용 프로펠러 팬의 기술개발”은 3차원 설계 방법의 하나인 유선곡률법에 주안점을 두고 에어컨 실외기의 프로펠러 팬을 개발한 것이 특징이다. 이찬 등에 의해 발표된 “시스템 전자냉각 팬의 선정 및 소음 평가방법”은 전자부품의 발열 문제가 매우 심각한 상황임을 고려하여 전자 부품, 기기 및 시스템의 냉각을 위한 팬의 선정 및 소음 평가기법을 연구한 논문이다. 장춘만 등에 의해 발표된 “쓰레기 관로이송 시스템의 관로 압력강하 평가”는 건물 내부 또는 외부에 설치된 쓰레기 투입구로 투입된 쓰레기를 지하로 연결된 매설 관로를 이용하여 자동으로 수거하는 방식에 대한 관로 압력강하 평가를 연구한 논문으로, 최근 우리나라에서도 대형 아파트단지나 신축건물 등을 대상으로 적용이

확대되고 있는데 반해 국내에서는 이에 대한 정확한 설계기준이 없어 각 건물 특성에 맞는 설계가 불가능하였으나 쓰레기 관로이송 시스템을 대상으로 쓰레기를 투입한 관로 내의 압력강하를 평가하기 위한 가이드라인을 제시한 논문이다. 이상과 같이 2007년 한 해도 국내 송풍기 분야 연구의 수준과 깊이가 설계, 해석은 물론 현장사례를 중심으로 한 분야에 있어서 한층 더 심화되었음을 알 수 있다.

압축기 분야 연구 동향

2007년 한 해 국내에서 발표된 압축기 관련 논문을 유체기계저널(KFMA), 대한기계학회논문집(KSME) 및 대한설비공학회 논문집(SAREK)과 각각의 학술대회 논문집을 중심으로 간단히 정리해 보았다. 2007년에는 전년도에 발표된 27편의 논문 대비 약 89%에 불과한 24편의 논문이 발표되었는데, 터보형 압축기 58.4%, 로터리 압축기 16.6%, 스크롤 및 왕복동 압축기가 각각 12.5% 씩 발표된 분포를 보였다.

압축기 형식에 따라 발표 학술지가 구분되는 양상을 보여주고 있는데, 터보형 압축기는 100% 모두가 대한설비공학회를 제외한 두 학회를 통해 발표되었으며, 이와 대조적으로 용적형 압축기는 2편을 제외하고는 나머지 8편 모두(80%)가 대한설비공학회에서 발표되었다. 이러한 경향은 최근

몇 년 동안 동일하게 나타나고 있는데, 이것은 유체기계학회 및 대한기계학회에서는 발전용 가스 터빈 또는 추진용 가스 터빈 등과 같은 터보기계용 압축기들이 주 관심 대상인 반면, 대한설비공학회의 경우에는 냉방 시스템, 에너지 공급원 등과 같은 설비에 적용 되는 압축기에 관심이 집중되고 있음을 알 수 있다.

지난해에서는 발표된 논문들 대부분이 최적 설계 기술과 이를 위한 성능파라미터 연구들이 주류를 이루었는데, 2008년도에는 세계적인 추세에 따라 기존 설계 기술을 한 단계 더 끌어올리기 위한 비정상 또는 탈설계 분야에 대한 첨단연구들이 보다 활발하게 진행되길 기대한다.

가스·스팀터빈 분야 연구 동향

최근에는 분산발전에 대한 관심이 고조되면서 이에 적합한 동력원으로 고려되고 있는 마이크로 터빈 및 이의 응용시스템에 대한 연구개발이 선진국에서뿐만 아니라 국내에서도 활발히 수행되고 있다. 마이크로 터빈은 중대형 가스 터빈에 비해 개발기간이 짧고 개발비 규모가 작아 세계시장에서도 경쟁력 있는 상품이 될 수 있으며, 터보기기 공력설계, 공기 베어링, 내열코팅 등의 관련 핵심기술들은 항공기의 보조동력 장치 및 ECS 등의 개발에 직접적으로 적용되기 때문에 기술파급 효과가 매우 크다.

현재 국내에서는 5MW급 소형 열병합발전용 가스 터빈 개발 사업의 본격적 진행 및 2006년도부터 착수된 한국형헬기개발사업 등에 힘입어 가스 터빈엔진, 보조동력장치, 마이크로터빈의 개발과 관련된 산·학·연 공동연구가 활발히 진행되고 있다. 이 같은 움직임은 그 동안 시장성 및 독자모델 개발 당위성을 이유로 주춤했던 중대형 발전용 가스 터빈 및 항공용 가스 터빈 관련 연구의 활성화를 가져올 것으로 기대된다.

2007년도 가스/스팀 터빈 분야의 주요 연구동향을 유관학회의 논문집 및 학술대회에 발표된 논문을 중심으로 살펴본다. 연구 동향 분석에 필요한 자료는 유체기계저널, 대한기계학회논문집B, 설비공학논문집에 게재된 가스/스팀 터빈 관련 논문과, 대한기계학회, 대한설비공학회의 유체기계공업학회의 학술대회에서 발표된 논문을 토대로 살펴보았으며, 2007년 가스/스팀터빈 분야의 연구는 양적으로 전년에 비해 비교적 적은 수의 논문이 발표되었으며 연구의 다양성 측면에서도 예년에 비해 크게 변동이 없었던 것으로 평가된다. 가스 터빈/스팀 터빈 관련 연구에 대한 기업과 정부의 관심이 아쉬운 시점이다.

유동장 및 열전달 해석에 관한 연구는 예년과 비슷한 경향을 보였고, 전체적으로는 실험 및 해석이 실제상황을 모사하는 환경에서 수행되는 경향을 볼 수 있었

다. 가스 터빈 엔진에 관련된 연구는 예년과 비교할 때 개발과 직접적 관련이 있는 연구들도 다수 발견되었으며 운전 및 성능평가에 관한 연구들은 예년과 유사한 수준으로 수행되었다.

본격적으로 진행되고 있는 소형 열병합 발전용 가스 터빈 사업 및 한국형헬기개발사업 등에 힘입어 올해부터 엔진개발 관련 연구들의 성과물들이 나오기 시작해 내년부터는 보다 많고 심도 있는 연구 성과물이 나올 것으로 기대해 본다.

배관설비(유량계) 분야 연구 동향

유량계는 일반산업, 석유, 화학, 조선, 의학, 식품, 철강, 반도체 등 여러 분야에 다양한 용도로 사용되어지고 있다. 뿐만 아니라 유량계산업은 현장산업에서 없어서는 안 되는 중요한 부분이다. 현재 새로운 기술을 바탕으로 신제품들이 속속 선보이고 있다. 그중 몇 가지 예를 들어 보면 다음과 같다.

소방용 면적식 유량계는 유동의 영향을 받지 않기 때문에 유체흐름에 관계없이 수직 및 수평으로 자유롭게 측정할 수 있다. 비교적 유동률이 큰 소방용으로 측정할 경우에는 Orifice의 차압 출구 위치에 by-pass관으로 연결하는 일명 분류식이라 하는 by-pass형 소방용 면적식 유량계를 사용한다. Orifice에 의한 차압으로 가변적 면적에 따른 직

독식으로서 측정하는 면적식 유량의 값이 일정하며, Flot의 hunting없이 측정이 가능한 장점을 가지고 있지만 차압식 유량계의 특성을 동시에 가지고 있어 일정한 직관부를 필요로 하고 있다. 전자유량계의 경우 저전력형과 이를 활용한 유량측정 시스템으로 2선식 전자유량계들이 선보이고 있고, 전자유량계에서 두드러진 현상은 필드버스 기술을 탑재한 스마트 유량계와 이렇지 않은 일반 전자유량계의 비율이 생산량 기준으로 약 50%대로 거의 대등한 수준에 이르러 향후 더욱 큰 비율로 스마트유량계가 보편화 될 것으로 여겨진다. 매년 성장되는 시장규모에 맞춰 장기적인 계획을 잡고 새로운 신기술 개발의 창출을 통하여 국·내외 시장에서도 경쟁력을 갖출 수 있을 것이다. 주변 정보화 기술과의 응용과 주변기술의 개발로 인한 신기술을 바탕으로 향후 유량계의 시장 점유율이 크게 향상될 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 새로운 기술로 인한 신제품도 출현도 기대된다.

회전체 동역학 및 트라이볼로지 요소의 연구 동향

2007년도 국내의 회전체 동역학 분야 및 회전기 트라이볼로지 요소(베어링/실/멤퍼)의 주요 연구동향을 요약하여 소개한다. 예년과 같이 국내의 산업전반에 걸쳐 사용되고 있는 유체 기계가

운대 펌프, 압축기, 터빈 등 산업 현장과 연계된 연구개발과제 및 기초 연구과제들이 수행되면서 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있다.

회전체 시스템의 동역학적 해석 연구로는 최근 회전기기의 성능 및 효율 향상을 위해 회전기기의 고속화에 관한 연구 및 개발이 많이 이루어지고 있다. 이러한 경향과 함께 회전기기의 고속화에 따른 안정성 향상 및 시스템의 효율증가를 위한 회전체 시스템의 동역학적 연구에 관한 관심도 높아지고 있다.

저널 베어링은 산업의 발달과 더불어 각종기기 장치의 다기능화와 소형화, 집적화로 회전기계의 효율이 증대되고 있으며, 고속 스피들에 대한 필요성이 점차 커지면서, 베어링과 관련된 진동문제가 고속 회전 기계에서 빈번히 발생하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위한 다각적인 방법이 제안되고 연구가 수행되었다.

고압용 터보펌프 등의 회전기기 시스템에서 작동유체의 누설량을 최소화하기 위하여 사용되는 실은 누설 특성을 향상시키고 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되었다.

멤퍼는 다양한 분야에서 기존 시스템의 성능을 향상시키기 위해 MR유체를 사용한 응용장치를 적용하는 연구가 수행되고 있다.

2007년도 회전체 동역학 분야의 연구는 과거의 연구 방향에

크게 벗어나지는 않는 예년에 비슷한 수준이며, 특히 고성능, 고효율의 터보 기기를 위한 신뢰성에 대한 연구가 베어링, 실 등의 회전기 요소에 많은 부분을 차지하고 있는 외국의 연구 현상과는 다소 다른 모습을 띄고 있지만 국내 기술 수준의 향상을 고려할 때 향후 이 분야에 대한 보다 많은 연구가 기대된다.

(윤준용, 한양대학교)

난 류

공학 문제에서 발생하는 열유동은 대부분 난류이고 오랜 시간 동안 많은 연구자들이 연구를 수행해 왔음에도 불구하고 해석의 어려움으로 인하여 난류 분야의 연구는 그 진척도가 더디며 또한 매우 흥미로운 연구 분야다. 최근 컴퓨터 하드웨어의 비약적인 발전과 병렬 컴퓨팅 등의 고속 컴퓨팅 방법 및 수치기법의 발전으로 과거에 다루지 못하였던 많은 문제들을 수치해석 방법을 통하여 해석하고 있다. 실험적 방법도 PIV, PTV 등으로 대변되는 여러 실험 장비의 발달로 점차 예전의 한계를 넘어선 연구가 많이 수행되고 있다. 특히 최근 고유가 시대를 맞이하여 에너지 효율을 높이는 분야와 환경의 중요성과 이에 대한 관심이 높아짐에 따라 이에 큰 관련이 있는 난류 연구 또한 그 중요성이 점차 커지고 있다. 2007년에는 국·영문논문

집과 춘추계학술대회를 통하여 난류에 관한 많은 연구 결과가 발표되었으며, 이들 지난 연구 동향을 살펴보고 정리하는 것은 앞으로의 연구 방향 설정에 매우 도움이 되리라 사료된다. 따라서 2007년 대한기계학회논문집 B권과 Journal of Mechanical Science and Technology에 소개된 난류 관련 연구를 중심으로 정리하고, 각 분야별 연구 동향을 소개하고자 한다.

직접 수치 모사

최근 컴퓨터 하드웨어의 비약적인 발전과 병렬컴퓨팅 기법의 개발, 새로운 계산 알고리즘의 개발로 인하여 가장 많은 발전을 보이고 있는 분야가 DNS(직접수치모사; Direct Numerical simulation)라 할 수 있다. 예전에는 컴퓨터 하드웨어의 한계로 인하여 간단한 기하학적 형상에서 낮은 레이놀즈수에만 적용할 수 있었지만, 컴퓨터 하드웨어와 계산 기법의 발전으로 인하여 레이놀즈수의 범위와 적용 대상도 점차 확대되고 있는 추세이다. DNS는 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석하여 난류 유동장에 대한 정확하고 상세한 정보를 얻을 수 있기 때문에 난류의 물리적 현상을 이해하는 데 매우 도움이 되는 기법이다. 2007년에는 채널유동에서의 난류에 관한 연구, 원형실린더 후류의 천이지연과 유동공진에 관한 연구, 난류

유동과 함께 수반되는 난류 열/물질전달에 관한 연구 등이 보고되었다.

큰 에디 모사

컴퓨터 하드웨어의 제약으로 인하여 큰 스케일은 직접해석하고 작은 스케일의 난류에 대해서는 모델링하여 해석하는 기법이 LES(큰 에디 모사; Large Eddy Simulation)이다. 이 방법은 직접 수치 모사보다 정확도는 다소 떨어지지만, 비용과 시간 면에서 효율적이며 기존의 RANS를 바탕으로 한 수치해석에 비해서 비정상 유동에 대한 상세한 유동장 정보를 얻을 수 있는 장점이 있어서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다. LES를 이용하여 다양한 응용분야에 적용한 논문들이 발표되었는데, 희박연소 가스 터빈에서의 연소 동역학 연구, 평균 풍속 및 난류 예측을 위한 도심지 모델 연구, 건물군 주위 유동해석 연구, 난류경계층 형성에 관한 연구, 실린더 주변의 횡유동에 대한 연구, 난류 소음의 효율적 전산해석 연구, 터널화재 유동 전산모사 연구 등이 소개되었다.

난류 모델링

난류모델링을 이용한 전산열유체 해석은 DNS와 LES에 비해 높은 레이놀즈수의 영역에서 보다 빠르고 효율적인 계산 수행이 가능하기 때문에 공학적 문제를 해결하기 위하여 매우 적절한 방

법이다. 현장에서 발생하는 난류는 높은 레이놀즈수를 형성하고 있기 때문에 RANS를 이용한 해석이 유용하게 사용되고 있다. 많은 응용분야에서 RANS를 바탕으로 하여 $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST 모델 등을 난류 유동장 및 함께 발생하는 열전달의 해석에 적용한 연구들이 많이 발표되었다. 송풍기 블레이드의 다중목적함수 최적화 연구, 발전소용 고압 바이패스 밸브의 유동해석, 전차포 소음 저감을 위한 배플형 소음기 수치해석, 터널화재 유동 전산모사 연구 등 다양한 연구들이 발표되었다.

실험적 연구

실험적 연구는 수치적 연구에서 얻을 수 있는 다양한 정보를 얻을 수 없었으나, 실험 장비의 비약적인 발전으로 인하여 그 한계를 뛰어넘을 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 또한 현장에서 발생하는 문제에 대한 직접적인 실험을 통하여 그 신뢰성을 담보할 수 있는 등 실험적 연구가 갖고 있는 고유한 장점이 있기 때문에 꾸준히 연구 결과가 발표되고 있다. 실험적 연구에서 열선, 5공 튜브, 액정, 마이크로 폰, PIV, PTV 등 다양한 장비가 이용되었다. 고속카메라를 이용한 디젤엔진내의 화염 가시화 화염의 온도 및 매연 측정, 원주상으로 배열된 다중 원형 제트의 유동 특성 연구, 축방향 홀이 있는 Taylor-Couette 유동 연구, 리블렛이

경계층의 자유류 팁 볼텍스에 미치는 영향, 원형단면 U-벤드에서 hot-wire를 이용한 난류 유동 연구, 터빈 블레이드에서의 열/물질 전달 특성 연구, 담플 크기에 따른 유동 특성 변화 연구 등 다양한 분야에서의 실험적 연구 결과가 보고되었다.

실질적인 응용 연구

고유가 시대를 극복하기 위한 난류 관련 연구들과 난류가 포함된 환경 관련 연구 등이 활발하게 발표되었다. 이러한 연구 결과들은 난류에 대한 지식을 바탕으로 시스템에서의 주요 설계 변수를 확인하고 시스템의 성능 개선을 시도하는 연구들이었다. 이들 연구에서 실험적인 연구와 직접 제작한 프로그램을 이용한 수치 해석 연구를 수행한 것도 있으나, 춘·추계학술대회를 통해서 다양한 응용분야에 대하여 상용 CFD 패키지를 이용한 수치 해석 결과를 보고하였다. 또한, 실험적인 연구로 수치해석 결과를 보완, 검증한 연구들도 많이 발표되었다. 구체적으로는 디젤 엔진에서의 화염의 온도와 매연 측정에 관한 연구, 전차포에서 배플형 소음기 연구, 국소환경의 청정도 평가 및 예측에 관한 연구, BLDC 모터의 열유동 해석, 저마하수 난류 소음 해석 등 많은 연구 결과들이 발표되었다.

(리광훈, 서울시립대학교)

전산유체역학

2007년도에도 전산유체역학을 이용한 다양한 논문들이 발표되었다. 발표된 논문은 주로 기 개발된 수치기법을 활용하거나 상용코드를 활용하여 열전달, 물질 전달 및 유동장과 관련된 물리적인 현상을 규명하고자 한 논문들이 다수를 이룬다. 한편으로, 미세 유체역학과 관련된 분야에서는 코드의 개발과 연계된 논문들도 발표되었다. 본 연감에서는 지난 1년간 대한기계학회논문집과 Journal of Mechanical Science and Technology에 수록된 전산유체역학 관련 논문들 중에서 빈도가 높은 주제 순으로 정리하고자 한다.

가상 경계법

가상 경계법(Immersed Boundary Method)을 이용한 열 전달 및 유동장 해석 관련 논문들이 2007년에 여러 연구자들에 의해서 수행되었다. 가상 경계법의 특성에 의하여 매우 다양한 분야에서의 응용이 수치실험으로 수행되었다. 사각형 공동 내부에 존재하는 원형실린더 주위의 자연대류 해석, 진동하는 두 개의 실린더 주위의 유동해석 및 고정된 두 개의 실린더 주위의 유동 특성 및 각각의 실린더에 작용하는 유체력이 매우 다양한 실린더의 배치 조건에 대하여 수행되었다. 더 나아가 가상경계조건은 단

일 날개 짓 주위의 유동해석에도 적용되어 새의 날개 짓에서 양력의 발생원인을 규명하고, 이를 통하여 공중 정지 mechanism을 규명하는 데 활용되었다. 또한, 가상 경계법을 Lattice Boltzmann Method와 연계하여 물고기의 추진운동을 해석하여 레이놀즈 수 및 운동 주기 및 진폭이 추진력에 미치는 효과를 연구한 논문도 흥미로운 주제이다. 또한, 곡선경계처리법(Curved Moving Boundary Treatment)을 Lattice Boltzmann Method에 연계하는 기법을 이용하는 물체 주위의 점착조건에 적용하려는 시도가 있었다.

다상 유동 해석

고물보가 부착된 선체 주위의 유동해석 및 자유표면 해석을 위하여 대류항은 CIP(Constrained Interpolated Profile)으로 처리하고 자유표면의 거동은 level set 방법으로 해석한 연구가 있었다. 또한, 액적 생성 현상 및 액적의 거동을 Lattice Boltzmann Method를 이용하여 해석하여, 제한된 표면장력의 범위 내에서 액적 생성 현상을 성공적으로 재현한 연구가 있었다. 한편, 다상 유동의 해석에서 표면장력이 우세할 때 나타나는 parasitic current를 제거할 수 있는 효과적인 방안으로 고차의 level contour 재구성 방법이 제안되었다. 이 방법은 적당한

격자해상도만을 가지고 표면장력이 우세한 다상 유동의 해석을 안정적으로 수행할 수 있음을 보였다.

마이크로 유동해석

마이크로 유동의 해석에서 Monte-Carlo simulation을 이용하여 마이크로 채널에서의 전기 역학과 유전영동현상을 예측할 수 있는 해석 프로그램의 개발이 보고되었다. 이 결과는 칩 상에서 샘플 전 처리를 효과적으로 수행하는 기술에 적용 가능할 것으로 기대된다. 또한 입자 유동의 제어에 기반하여 칩 상에서 유전율이 다른 입자들을 쉽게 분리하는 곳에 응용이 가능하다고 보고되었다. 또한 기존의 Lattice Boltzmann Method를 확장하여 열전달 문제에 대한 해석이 가능한 열 격자 볼츠만 모델에 대한 연구가 이루어졌다. 비평형 1차 외삽 경계조건을 사용하여 자연 대류 문제를 해석하였고 열 유동 문제에 접근하기 용이하도록 기존에 제안된 경계조건을 수정하여 수치실험을 하는 연구를 수행하였다.

형상 최적설계

이 밖에 크리킹 모델 또는 신경회로망 기법을 이용한 형상최적 설계에 대한 연구들이 수행되었다. 제안된 형상최적 설계 기법들은 액체 금속 원자로 봉다발의 설계 및 마이크로 채널의 열흡수

장치 형상 등의 최적설계에 활용되었다. 연구 결과에 따르면 크리킹 모델에 의한 목적함수 값의 예측이 Navier-Stokes 방정식으로 계산된 값에 매우 근접하여 대리 모델에 의한 최적점의 예측이 성공임을 보였다. 최적 설계에 도입에 따라 계산시간과 비용의 면에서 효과적이고 경제적으로 최적형상을 얻을 수 있음을 보였다.

그 밖에 다음과 같은 추가적인 주제들에 대하여 수치해석적인 연구가 수행되었다.

- (1) 직접 수치 모사(direct numerical simulation)를 이용하여 원형실린더 후류의 천이지연과 유동공진에 대한 연구가 수행되었다.
- (2) 유동장은 비압축성 LES로 해석하고 소음장은 선형화된 섭동압축방정식(linearized perturbed compressible equation)으로 해석한 하이브리드 기법이 저 마하 수 난류소음의 예측을 위해 제시되었다.
- (3) 역복사 해석(inverse radiation analysis)을 위하여 미지 설계변수의 탐색 효율을 향상시키는 반발입자 군집 최적화(repulsive particle swarm optimization) 기법을 고안하여 해석하는 방법이 제안되었다.
- (4) 원형 경계를 가지는 유도장의 해석에서 나타나는 특이

성(singularity)의 문제를 피하고자 국소조화함수(local harmonic function)를 함수의 미분 및 내삽에 적용하는 방안이 제시되었다.

- (5) 연소 현상의 해석에 있어서 수치확산현상에 대한 연구 결과가 보고되었다.

마지막으로 상용코드를 활용하여 바이오 및 전자장비 냉각 및 구동과 관련된 다양한 문제들의 해석이 수행되었다.

- (1) 열원이 존재하는 전자시스템의 히트 싱크 또는 히트파이프 열교환기를 이용한 냉각 해석을 상용코드를 사용하여 수행하여, 실험결과와 비교하여 적절한 예측성능을 보임을 확인한 연구들이 있었다. 또한, 단일 마이크로 채널 내의 단면 가열조건의 열전달 특성에 대한 연구를 복합열전달 해석을 통하여 수행한 연구도 수행되었다.
- (2) 피에조 잉크젯 헤드 내의 잉크의 음향파 전파와 이로 인한 노즐간 상호 간섭현상에 대해 수치해석을 수행하였으며, 수치해석을 피에조 헤드의 효과적인 성능개선에 활용하고자 하였다.
- (3) 약물이 코팅된 스텐트로부터 방출되는 약물의 분포와 벽전단 응력을 해석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 스텐트의 크기에 따라 축소 스

텐트와 확장 스텐트의 경우로 나누어 혈관 내 유동 특성이 어떻게 변하는지 조사하고, 혈관에 삽입된 스텐트 크기가 혈관 내에서 약물 농도 분포뿐 아니라 혈류의 유동특성에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

(최형권, 서울산업대학교)

다상유동

2007년도 다상유동 분야의 연구논문은 대한기계학회논문집 및 JMST에 28여 편이 게재되었다. 주제별로 보면 액체의 미립화 및 분무특성에 대한 논문이 13편으로 가장 많았고, 단일 액적의 거동, 잉크젯 관련 액적거동, 기포 관련 이상유동, 원자력 발전 관련 이상유동 등에 대한 논문이 발표되었다. 여기에는 다른 분야에서 별도로 취급하는 입자의 거동, 냉동 관련 다수의 논문이 포함되지 않았다.

액체의 미립화 및 분무특성에 대한 연구는 가솔린 직접분사식(GDI)엔진과 디젤엔진의 연료분사에 관련하여 주로 이루어졌다. 액적의 분포 및 거동특성을 위상도플러 기법, LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence) 기법 등을 사용하여 측정 또는 가시화하는 실험적인 연구와 오일러리안-라그랑지안 수치방법에 기반을 둔 KIVA 코드에 액적의 분열에 대한 모델을

결합한 수치적인 연구가 수행되어 예전과 유사한 연구경향을 나타내었다. GDI 분무 관련된 연구로는 액적의 분열특성을 모사하는 LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모델, TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델을 개선한 APTAB(Aerody-namically Progressed TAB) 모델과 액적-벽면 충돌모델로 Gosman 모델을 사용하여 분무의 벽면 캐비티 각에 따른 충돌 과정을 해석한 연구가 보고되었다. 또한, GDI 엔진 외에 다양한 엔진 연소 시스템에 적합한 선회분무에 대한 기초연구로서 경사노즐과 기존 노즐의 내부 압력분포, 미립화 특성, 속도분포를 비교 분석한 실험적 연구, 벽면유도방식 및 균일 혼합연소에 이용되는 팬형 분무의 주변조건에 따른 입자분포 및 연소특성 변화에 대한 실험적 연구 등이 발표되었다.

디젤분무 관련된 연구로는 증발을 포함하는 연료의 액상과 기상을 동시 분리계측이 가능한 엑시플렉스 형광법을 사용하여 연료의 임계조건을 고려한 분사압력, 주위가스 밀도 및 온도가 액상분무의 선단도달거리에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, 수정된 TAB 모델과 DVM(Discrete Vortex Method)을 결합한 모델을 이용하여 분무구조를 해석한 연구 등이 발표되었다. 또한, 노즐 오리피스 형상 및 노즐 형

상비가 디젤연료와 바이오디젤 연료의 노즐 오리피스 내부에서 캐비테이션 생성 및 성장, 외부 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, HC를 환원제로 이용하는 DeNOx 촉매용 인젝터의 분무 발달과정을 가시화하고 미립화 특성을 분석한 연구 등이 보고되었다.

이외에 액체를 미립화하여 고온의 물체를 냉각시키는 분무냉각기술 개발과 관련하여 액적의 유량밀도와 분무냉각 막비등 열전달의 상관관계를 규명한 연구, 전기력에 의해 액체를 미세한 액적들로 분열시키는 정전분무 관련하여 고유량 정전분무를 발생시킬 수 있는 홈노즐을 고집적화하고 작동유량을 극대화할 수 있는 다중 홈노즐 정전분무 장치를 개발한 연구, 분무특성의 규명에 필요한 측정기술 개발과 관련하여 입자의 크기와 3차원 속도측정이 가능한 홀로그래픽 입자 진단 시스템을 개발하고 분무특성 측정에 적합한 연구 등이 발표되었다.

또한, 단일 액적의 거동에 대한 논문이 2편 발표되었다. 소수성 표면 위에서 액적의 증발에 대한 실험 및 모델링에 기초하여 접촉각의 차이는 액적의 형상과 증발률을 결정하는 중요한 인자임을 제시한 연구, 고온 알루미늄 표면에 부착된 액적에 의한 증발냉각을 실험적으로 분석하고 실험 데이터를 이용하여 표면온도 및 열

유속을 inverse method로 추정된 연구가 보고되었다. 이외에 마이크로 채널 내에 형성되는 모세관에서의 계면 및 증발현상 관련하여 마이크로 영상 입자 유속계(Micro-PIV) 장치를 사용하여 메니스커스 주변의 유동을 가시화하고 채널 단면의 형상과 증발을 간의 관계를 규명한 연구가 발표되었다.

잉크젯 프린팅과 관련된 액적 거동에 대한 논문이 3편 보고되었다. 피에조 잉크젯 헤드 내의 잉크의 음향파 전파와 이로 인한 채널간 상호 간섭현상에 대한 일차원적인 좁은 갭(Narrow gap) 이론 및 Flow3D의 압축성 모델과 상경계면 추적법인 VOF(Volume of Fluid) 방법에 기초한 수치적 연구, 열 잉크젯 헤드의 채널간 간섭현상에 대해 집중질량 열 모델을 이용하여 프린터 헤드의 과열특성을 예측하고 적외선 센서를 이용한 온도측정실험과 비교한 연구, 전도성 잉크를 사용한 그라비아 인쇄와 관련하여 프린팅 롤러 위의 액막 두께를 예측하기 위해 잉크에 부분적으로 잠겨 회전하는 롤러 위에서의 액막 특성에 대한 PLIC(Piecewise Linear Interface Calculations) VOF 방법에 기초한 수치적 연구 등이 발표되었다.

또한, 기포거동과 관련하여 다양한 주제에 대한 논문이 5편 보고되었다. 미세 캐비티에서의 단

일 기포생성에 대한 실험을 통해 미세입자의 충전이 기포 발생 과열도를 낮출 수 있음을 보여준 연구, 기포율(void fraction)이 상대적으로 낮은 기포류(bubbly flow)에 있어서 단일 카메라를 이용하여 3차원 기포의 크기와 형상, 기포율을 측정하는 방법을 개발하고 다수의 기포가 자유상승하는 유동장에 적용한 연구, 다중 노즐로부터 발생하는 기포류를 이용하여 높은 점성계수 값을 가지는 유체를 혼합하는 교반기 내부의 유동장을 PIV 기법으로 정량적으로 가시화한 연구, 정수장 탁도계의 개발과 관련하여 버블트랩 내부 유동장을 가시화하고 버블트랩 내부의 기포의 거동과 소멸 메커니즘을 DPM(Discrete Phase Model)모델을 이용하여 해석한 연구, 유체 압력이 증기의 압력보다 낮아지게 될 때 발생하는 공동현상(cavitation)에 대하여 압력 기반 알고리즘과 Kunz의 상수송 방정식 모델을 결합하여 2차원 수중의 주위의 비정상 공동현상을 해석한 연구 등이 발표되었다.

원자력 발전과 관련된 논문이 2편 발표되었다. 원자로 용기 외벽냉각 시 원자로 외벽과 단열재 사이에서 형성되는 자연순환 유동을 평가하기 위해 1차원 이상 유동에 대한 실험과 해석을 수행한 연구가 보고되었다. 또한, 유체흐름에 의해 유체와 접하는 탄소강이나 저합금강 배관 및 기기

의 두께가 감소되는 감육현상(wall thinning)과 관련하여 급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체감육 현상을 실험 및 수치적으로 분석한 연구가 수행되었다.

이외에 액적거동에 대한 새로운 해석방법으로 자유에너지 기반의 LBM(Lattice Boltzmann Method)가 개발되어 cross-junction 마이크로채널에서의 액적형성을 수치적으로 모사한 연구, 이상유동 모델을 적용하여 협착된 혈관에서의 유동특성을 이론적으로 해석하려는 연구 등이 주목할 만하다.

(손기헌, 서강대학교)

마이크로/나노 유체역학

최근 초소형 기전장치를 제작하는 MEMS/NEMS 기술이 발전함에 따라, 이를 공학 및 자연과학 분야에 활용하기 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 마이크로/나노 유체역학(Micro-and nanofluidics)은 밀리미터 단위보다 작은 길이 스케일을 가지는 유체유동을 다루는 학문으로 초소형 장치 및 유로에서 이루어지는 유체유동의 해석 및 제어를 그 대상으로 한다. 이를 반영하듯이 2007년도에도 대한기계학회 논문집과 Journal of Mechanical Science and Technology(JMST)에는 마이크로/나노 유체역학에 관련된 논문의 게재

가 계속적으로 증가하였으며, 또한 그 연구 분야도 다양해져 앞으로 이 분야의 발전이 기대된다. 2007년도 대한기계학회논문집과 JMST에 소개된 연구 동향을 각 분야별로 소개하고자 한다.

마이크로 채널 유동

한양대 송시문 연구팀은 자동화된 격자 생성법, 전기장과 유동장을 분리하여 풀이하는 수학적 모델과 몬테-카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 이용한 프로그램을 자체 개발하여 마이크로 채널 내의 전기역학(electrokinesis)과 유전영동(dielectrophoresis) 현상을 수치적으로 모사하였다(국문 4월호). 서울대 유정열 연구팀은 단일 카메라를 이용한 입자 추적 유속계(PTV; Particle Tracking Velocimetry)-LIF 기법을 마이크로 스케일 유동에 적용하여 속도장과 온도장을 동시 측정하였다. 이 기법을 이용하여 형광 입자가 포함된 영상과 형광 염료의 영상을 분리할 수 있었으며, 각각의 영상에 PTV와 LIF를 수행함으로써 속도장과 온도장을 동시 측정할 수 있었다(국문 7월호). 인하대 김광용 연구팀은 삼차원 Navier-Stokes 방정식과 대리 모델(surrogate model)을 바탕으로 한 최적화기법을 이용하여 마이크로 채널 열 흡수장치의 열저항을 최소화하기 위한 채널의 단면형상을 최적화하였다(국

문 9월호). 포항공대 김무환 연구팀은 사각 마이크로채널에서의 복합 열전달(conjugate heat transfer)을 수치적으로 해석하였다. 단면 일정 가열조건에서의 각 채널벽에서의 서로 다른 열손실 해석하였으며, 효율단면 교정인자(effective area correction factor)를 제안하였다(국문 12월호). 동아대 허형석 연구팀은 ITO(Indium Tin Oxide) 전극(electrode)쌍을 이용하여 마이크로채널 내부의 교류 전기삼투 유동(AC electroosmosis flow)을 실험적으로 연구하였다. Micro-PTV를 이용하여 전극주위의 유속을 측정하였으며, 유동이 전극의 모서리로부터 채널벽적으로 발달함을 확인하였다(영문 12월호). 고려대 이규정 연구팀은 마이크로 채널 내의 완전히 발달한 층류의 점성소산(viscous dissipation) 효과를 에너지보존 법칙(energy conservation law)으로부터 간단한 식을 유도하여 이론적으로 설명하였다. 열 유속, 유동 속도, 작동 온도, 채널 크기, 유체의 종류에 따른 점성소산의 영향을 평가하였다(영문 12월호). 포항공대 김무환 연구팀은 마이크로채널 비등(flow boiling)에 의해 신장되는 기포의 거동을 연구하였다. 신장되는 기포의 거동과 이들의 비등에 대한 영향을 수치 및 실험적으로 연구하였다. 기포의 성장은 증기와 채널벽 사이의 얇은 액체막의

증발현상에 따라 좌우됨을 확인하였다.(영문 11월호)

마이크로 혼합

한양대 이도형 연구팀은 PDMS Y-채널 마이크로믹서를 제작하고 레이저 유도 형광(LIF; Laser Induced Fluorescence) 공초점 현미경(confocal microscope)을 이용하여 마이크로 혼합기의 혼합효율을 정량적으로 계산하였다. 마이크로믹서의 제작과 실험을 통하여 수치적 기법으로 최적화된 형상의 혼합 성능을 비교/검증하였다(국문 2월호). 인하대 김광용 연구팀은 마이크로 채널의 한 면이 헤링본(herringbone) 형태인 미세 혼합기의 형상을 최적화하여 혼합성능을 증진시키기 위한 방법에 대해 연구하였다. 삼차원 Navier-Stokes 방정식과 크리깅 모델(Kriging model)을 최적화기법으로 사용하였고 유로높이에 대한 홈의 깊이 비 및 홈의 각도 등 두 가지 기하학적 변수를 설계변수로 사용하였다(국문 8월호). 동아대 서용권 연구팀은 교차된 배플(baffle)이 주기적으로 천장과 바닥 벽에 부착되어 있는 상대적으로 간단한 형태의 마이크로채널 혼합기 대하여 실험 및 수치적 연구를 수행하였다. 이러한 마이크로 채널 혼합기를 이용하여 매우 낮은 층류유동영역에서 무질서한 외란을 발생시켜 효과적인 혼합을 얻을 수 있

음을 확인하였다.(영문 3월호)

마이크로 액적

서울대 유정열 연구팀은 다양한 소수성(hydrophobic) 표면 위에서 액적의 형상에 따른 증발 현상을 연구하였다. 또한 액적의 증발을 확산 현상의 관점에서 Fick's law에 따라 액적의 전체 증발량을 표면과 가장자리 부로 나누어 각각의 증발 효과를 고려한 새로운 모델을 제안하여 기하 형상으로부터 증발률을 계산하였다.(국문 6월호)

모세관 현상

서울대 유정열 연구팀은 마이크로 채널의 단면 형상이 채널 내 유체의 증발에 미치는 영향을 알아보기 위하여 원형 채널, 정사각형 채널, 직사각형 채널을 이용하여 메니스커스(meniscus) 형상, 증발률 변화, 메니스커스 주변의 유동현상 등을 마이크로 영상 입자 유속계(micro-PIV)를 이용하여 관찰하였다.(국문 4월호)

나노유체

항공대 장석필 연구팀은 물에 알루미나 나노입자를 분산시킨(nanoparticles suspended in water) 나노유체를 사용하여 원형관에서의 압력강하(pressure drop) 특성 및 대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. Einstein 모델을 적용하여 해석적으로 얻은 계산결과를 실

험결과와 비교하였다(국문 1월호). 경기대 이신표 연구팀은 비정상열선법(transient hot-wire method)을 이용하여 나노유체의 열전도를 측정하였다. 또한, 물-나노유체의 온도의존성(temperature dependence)을 실험적으로 확인하였다(국문 4월호). 또한, 본 연구팀은 자연대류(natural convection)현상에 의한 나노유체의 열전도율 특성을 실험적으로 연구하였다(국문 9월호). 포항공대 김무환 연구팀은 산화 나노입자를 가진 나노유체의 대기 중 풀비등(pool boiling) 임계열유속(CHF; Critical Heat Flux) 증가현상을 해석하기 위하여 두 단계의 실험적 연구를 순차적으로 수행하였다. 첫째로 나노유체의 풀비등 실험을 수행하였으며, 다음으로 비등실험 동안 발생하는 나노입자 표면흡착(nanoparticle surface deposition)에 의한 표면 특성의 변화를 분석하고 임계열유속 결과와 연관시켜 비교 분석하였다.(국문 11월호)

랩온어칩(lab-on-a-chip)

부산대 고정상 연구팀은 생체 시료를 선택적으로 분리(separation)하기 위해 사용되고 있는 자성입자(magnetic bead)를 제어할 수 있는 미세유체시스템을 개발하였다. 영구자석에 의한 자기력과 유체 흐름으로 얻어진 유체력의 차를 이용하여 자성입

자를 선택적으로 분리하였다.(국문 4월호)

잉크젯 프린팅

삼성종합기술원 이유섭 연구팀은 압전(piezo) 헤드 내의 잉크의 음향파(acoustic wave) 전파와 이로 인한 채널간 상호 간섭현상에 대해 이론 및 수치해석을 수행하였다. 좁은 갭(narrow gap) 이론을 적용하여 수치적으로 해석하고, 실리콘 미세 가공 방법으로 제작된 압전 잉크젯 헤드로 채널간 간섭현상 역제를 통한 잉크 토출 직진성 향상을 확인하였다(국문 1월호). 또한 본 연구팀은 열 잉크젯 헤드의 채널간 간섭현상을 예측할 수 있는 집중질량 모델(lumped modeling)을 제안하고, 이를 이용하여 헤드의 과열 특성을 예측하였고, 잉크의 메니스커스(meniscus)가 진동하는 현상을 예측하였으며, 채널간 구동 시간 간격이 액적의 분사의 불안정성에 미치는 영향을 관찰하였다.(국문 2월호)

(김선민, 인하대학교)

생체유동

생체유동은 무기한 세월을 지나는 동안 자연 환경에 최적화된 동식물을 연구하여 공학 문제의 해결책을 모색하는 생체 모방 분야와 생명체 내의 유동현상을 규명하는 분야로 구분할 수 있다. 상어 피부 형상이나 선인장의 형

상이 유동 저항 감소에 끼치는 영향 등을 연구하는 것은 생체 모방 분야이며, 혈액 유동과 호흡기 유동을 직접적으로 관찰하고 연구하는 것은 후자에 속한다. 대한기계학회 학술지에 2007년에 게재된 생체 유동과 관련된 논문은 Journal of Mechanical Science and Technology에 국내 3편, 국외 1편이 있었으며, 모두 수치해석에 관한 논문이다. 여기서는 이 4편의 논문을 정리하여 소개하고자 한다.

삼성전기의 김창성 연구원은 MRI(Magnetic Resonance Image)와 CFD를 이용하여 인간 뇌에서 혈류의 자기조절작용 대한 모델을 개발하였다. 자기조절작용을 이해하기 위해 뇌의 기저에 있는 6각형으로 이어진 대뇌동맥고리(Circle of Willis) 형상을 MRI를 이용하여 구현한 후, 비정상상태 3차원 Navier-Stokes 방정식을 parallel computer를 이용하여 풀어내었다. 그 결과 비정상적 혈관 구조와 뇌 속의 혈류 자기조절작용 사이의 상관관계를 제시하였다.(JMST, V21, No.3)

인하대 이우식 연구팀은 동맥경화가 일어난 혈관 내의 유동에 대한 2상, 비선형 모델을 제시함과 더불어 맥동 및 협착 효과에 대해서 논의하였다. 비뉴턴유체인 혈액 유동의 중앙 부분은 Herschel-Belkley 유체로 가정하고 외곽 부분은 뉴턴 유체인

혈장만으로 이루어졌다고 가정한 후, perturbation method를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 저자는 협착이 증가함에 따라 중앙부분의 반경과 유동 저항이 증가되는 결과를 제시하였다.(JMST, V21, No.4)

서울대 유정열 연구팀은 세포로 인한 질환과 관계된 수송현상에 대한 review논문을 게재하였다. 한국에서 순환기 질환은 암 다음으로 높은 사망률을 보인데, 이 중 죽상동맥경화증(atherosclerosis)의 특징은 낮은 벽 전단응력에 의해 내피 세포가 변형되는 장소에서 자주 발생한다는 것이다. 이 논문에서는 CFD와 의학에서 사용되는 imaging 기술들이 순환기 질환의 진단과 치료에 어떻게 기여할 수 있는지 보여주고 있다. 아울러, 인간 세포 조직 혹은 박테리아가 주변 유체 환경에 어떻게 반응하는지를 연구하는데 마이크로 광학 기술과 미세유동학이 어떻게 기여하고 있는지 소개하고 있다.(JMST, V21, No.11)

홍콩과 중국의 연구팀은 인공심장에서 비정상상태 유동과 횡경막의 운동에 대해 수치해석을 수행하여 다음의 결과를 제시하였다. 심장 확장기에서는 횡경막은 수축되어 측면에 두 개의 큰 함몰 영역과 등근 부분에 한 개의 작은 함몰 영역을 형성한다. 이 때 vortex들이 blood chamber에 생성된다. 심장 수

축기에서는 횡경막은 확장되고 혈액을 출구로 밀어낸다. 벽 전단 응력분포는 횡경막의 운동과 유동장에 강하게 의존한다.(JMST, V21, No.11)

(송시문, 한양대학교)

환경유체역학

환경유체역학 분야는 유체역학 분야 중 대기나 실내의 환경 관련 유동에 관한 실험적, 수치적 연구를 통칭하며 국내의 유체역학 전공자 중에서 이 분야에서 활발하게 연구를 진행하고 있는 연구인력은 상대적으로 많지 않은 편이다. 2007년도에 춘·추계 학술대회 그리고 대한기계학회논문집 B권, JMST에 발표된 논문 중 환경유체분야로 파악할 수 있는 논문은 다섯 편에 불과하다. 간단히 이 다섯 편에 대해서 소개하고자 한다. 크게 실내의 환경 관련된 유동으로 터널 내에서 발생 가능한 화재에 의한 유동에 대한 연구와 클린룸 내부에서의 공기청정도에 대한 연구결과와 대기에서의 유동을 다룬 산림지형에서의 자연유동, 도시형 장애물 주위의 유동에 대한 논문들로 구분할 수 있다.

터널 내에서의 화재에 의한 유동연구는 CFD 코드를 이용한 수치적 연구로서 가장 널리 사용되는 FDS 코드(Fire Dynamics Simulator, NIST 개발)와 Smartfire code(Greenwitch

대학 개발)를 비교 사용하여 사용된 난류모델의 차이에 따른 수치 해석의 차이를 연구하였다. FDS는 대와류모사(Large Eddy Simulation)을 채택하였고 Smartfire는 k-난류 모델을 사용하고 있다. 실험자료와 비교수행한 결과 역기류가 있는 지역은 LES를 채택한 FDS가 그리고 벽 근처에서는 k-모델을 채택한 Smartfire가 더 정확하게 예측하는 것으로 밝혀졌다. 격자의 크기 변화에 따른 예측결과는 격자가 작을수록 FDS에 의한 예측이 더 큰 오차를 보이고 있었다. 따라서 보다 엄밀한 분석이 필요함을 언급하고 논문은 마무리되어 있다.

국소환경시스템 내에서의 유동에 대한 연구는 노광기(exposure equipment)를 대상으로 급배기의 위치 및 유량 등의 변화에 따른 입자농도실험을 수행하였고 동일한 구조에 대한 3차원 기류나 공기나이에 대한 CFD를 수행하였다. 이를 통해 흡배기의 위치나 유량을 변화시켰을 때 오염도의 평가 및 예측을 수행할 수 있는 방법을 제안하였고 실험결과와 CFD 결과의 비교를 통해 제안한 방법에 대한 적용가능성을 검증하였다. 수치해석은 k-난류모델을 사용한 STAR-CD를 이용하여 수행하였다. 결론적으로 본 연구를 통해서 제안하고 있는 국소평균공기연령을 이용하면 CFD 계산만을 통해서도 개선후의 효과를 판단할 수 있어서 비

용의 절감을 기대할 수 있다고 보고하고 있다.

산림지역에서의 자연유동에 대한 연구는 경사진 산 근처에서 자연대류에 의한 상승 및 하강기류의 발생을 상용코드인 Fluent를 이용하여 수치모사한 연구이다. 경사면에 대한 유동과 온도를 수치모사하였으며 생태계 신진대사, 국지적인 기후예측모델, 이산화탄소 및 오염물질의 이동과 확산예측 등 다양한 분야에 이용될 수 있음을 보고하고 있다. 숲의 모델로서 잎이나 줄기의 영향은 항력항을 추가하여 모델하였고 부력효과는 부시네스크 모델을 사용하였다. 낮과 밤의 에너지원으로는 복사에너지를 기초로 하여 에너지 생성/손실로 모델하여 비정상 과정을 수치모사하였다. 실험결과와의 비교를 통해 예측의 정확도를 검증하였으며 이러한 연구의 최초시도의 의미에 무게를 두고 결론을 짓고 있다.

마지막으로 도심지 확산모델 평가에 대한 연구는 균질한 도시 모형에 대해서 풍동실험과 LES에 의한 수치실험을 수행하고 도심확산모델에 의한 예측결과와 비교를 통해 확산모델을 평가하는 연구이다. 풍동실험은 대형풍동에서 건물모형 주위의 풍속 및 난류 성분을 hotwire를 이용하여 측정하였고, 수치모형은 FDS를 이용하여 건물모형 주위의 3차원 유동을 수치모사하였다. 확산모델은 Hanna & Britter 모델

을 포함하여 서너 가지의 모델을 적용하여 canopy layer 내부의 속도나 난류 그리고 윗부분의 평균풍속 등을 예측하고 있으며 측정이나 수치모사 결과와의 비교를 통해 모델의 성능을 조사하였으며, 큰 오차를 보이는 바닥 마찰 속도에 대해서는 정확한 예측기법의 개발 필요성을 제시하고 있다.

이와 같이 환경유체 분야에서는 그리 많은 연구결과가 발표되고 있지는 않지만 실내의 유동이나 대기의 유동에 대한 실험적, 수치적 연구가 꾸준히 진행되고 있음을 알 수 있다.

(이창훈, 연세대학교)

유동제어 및 계측

유동제어

표 1은 유동제어 관련 논문발표 현황을 나타낸다. 유동제어 관련 연구논문은 지난 해보다 많이 줄었다. 정통산업분야에 편향된 성과를 내고 있다. Micro레벨에서의 유동제어 관련논문은 1편, Nano와 Bio분야는 각각 1편씩 발표되었다. 능동적 유동제어 관련 연구는 1건이었으며 수동적 유동제어와 관련한 논문이 8건이었다. 이는 유체기기의 성능향상과 관련된 내용들이 대부분임을 의미한다.

능동적 유동제어 관련연구는 알루미늄 나노분말을 유체에 직접 투입하여 나노분말의 전자기력으로 유동을 제어하고자 하는 시

표 1 유동제어 관련 논문 발표 현황

대분류	중분류	소분류	총발표 논문수	전통 산업분야	Micro 분야	Nano 분야	Bio 분야	비고 (PIV여부)
유동 제어	능동적 제어	기계적 외력 제어	-	-	-	-	-	-
		초음파, 음향력 제어	-	-	-	-	-	-
		전자기력 제어	1	-	-	1	-	-
		유체력 제어 (suction, injection, etc.)	-	-	-	-	-	-
		기타 외력 제어	-	-	-	-	-	-
	수동적 제어	부가설치물 제어	4	4	-	-	-	-
		자체 형상 변경 제어	3	2	-	-	1	-
		기타 외력 제어	2	1	1	-	-	-
	합 계			10	7	1	1	1

도였다. 지난해에 비하면 유동제어 관련 논문이 현저하게 줄었다.

수동적 유동제어 관련내용은 유동장을 형성하는 물체 자체의 형상을 변경하거나 제어장치를 고정적으로 설치하여 유동을 제어하는 경우에 해당하며, 전통산업분야에서 와발생 구조를 가지는 노즐(vortex tube)을 사용함으로써 충돌냉각성능을 향상시킨 연구가 1건, 가스터빈 열전달향상을 위하여 요철물을 이용한 연구가 2건, 스마트무인기의 고양력 발생을 위하여 와발생 기구(vortex generator)를 이용한 연구가 1건, 다중노즐 버퍼링(buffering)에 의한 유동혼합을 향상시키는 연구가 1건, 가스오븐 레인지의 버너의 다중제트에 의한 유동 및 연소특성을 제어한 연구가 1건, 수소첨가에 의한 메탄-공기 확산화염 구조를 제어한 연구가 1건, 노즐오리피스 형상에 따른 바이오디젤 연료의 노즐내

부 외부유동특성 연구가 1건이었다. 또한 마이크로 분야와 관련하여 자기영동(magnetophoretic) 유동을 이용한 자성입자를 분리하는 칩(chip) 개발에 관한 연구가 1건이었다.

유동계측

표 2는 유동계측과 관련한 논문발표 현황을 나타낸다. 계측법 개발 관련 논문은 3편이었으며 이들 중 2편이 전통산업분야에 관한 것들이었고 1편이 Micro분야였다. 계측법 개발과 관련해서는 지난해에 비해 현저하게 줄었다. 계측법 응용 관련 논문은 총 44편이었으며 이들 중 2차원적인 단순 가시화와 관련한 논문은 총 10편이었으며 2차원 PIV측정과 관련하여서는 2편이었고 3차원 PIV측정에 관한 논문은 없었다. 한편, 기타 물리량 측정에 있어서는 연소 관련 내용이 많았다.

PIV기법 및 유동가시화 응용과 관련한 연구로 전통산업분야에서는 축방향 흡이 있는 Taylor-Couette유동의 2차원 PIV에 의한 측정해석 연구가 1건, 인젝터에서 분사되는 연료분무 현상을 담은 고속카메라영상을 모사라인 스캔이미지화 함으로써 분무특성을 파악하는 연구가 1건, 미세액적의 형상을 가시화함으로써 액적의 형상과 증발과의 상관관계를 파악하는 연구가 2건, 고유량 정전분무를 위한 다중 흡 노즐의 유동특성 조사를 위한 단순 가시화 연구가 1건, 다중노즐 버퍼링(buffering)에 의한 유동특성에 관한 연구가 1건, 회전원주의 마그너스효과(Magnus Effect)에 관한 연구를 단순 가시화기법으로 해석한 사례가 1건, 온도변화에 따른 액정판의 컬러 정보 변화로부터 2차원 온도장을 측정하는 기법에서의 컬러변화 지연특성과 관련한 연구가 1건 있었다.

표 2 유동계측 관련 논문 발표 현황

대분류	중분류	소분류	차원 분류	총발표 논문수	1차원 (논문)	Micro 분야	Nano 분야	Bio 분야	신재생에너지 분야	비고 (PIV여부)	
유동 계측	계측법 개발 및 (응용) 법	PIV 관련 측정법	2차원	14	9(2)	4(1)	-	1	-	2	
			PIV관련	-	-	-	-	-	-	-	
		속도 계측	1차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			2차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			3차원	-	-	-	-	-	-	-	-
		압력 계측	1차원	5	5	-	-	-	-	-	-
			2차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			3차원	-	-	-	-	-	-	-	-
		밀도 계측	1차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			2차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			3차원	-	-	-	-	-	-	-	-
		온도 계측	1차원	12	8	2	2	-	-	-	-
			2차원	-	-	-	-	-	-	-	-
			3차원	-	-	-	-	-	-	-	-
		기타 물리량 계측	1차원	14	가스크래마토 그래피: 3 PDA: 3 전기전도도: 1 NOx분석계: 1	MEMS 질량유량: 1	-wire법: 1	-	X선회절: 1 가스크래마토 그래피: 3	-	
			2차원	1	나프탈렌법: 1	-	-	-	-	-	
			3차원	-	-	-	-	-	-	-	
		합 계			46	31(2)	7(1)	3	1	4	2

※괄호 밖은 계측법 응용 논문수를, 괄호 안은 계측법 개발 관련 논문수를 뜻함.

마이크로 분야에서는 LIF공초점 현미경을 이용한 마이크로 믹서 내의 혼합현상해석에 관한 연구가 1건, 모세관 단면형상에 따른 미세채널 내부의 기포 주위 유동 특성(Meniscus근방 유동특성)해석에 μ PIV를 적용한 연구가 1건 있었다. 바이오분야에서는 박테리아의 주화성운동(migration)을 PTV측정으로 해석한 사례가 1건

있었다. PIV기법 개발관련 연구로 전통산업분야에서는 단일 광경로 스캐닝 PIV기법을 개발하여 유동의 횡단면(즉, XZ단면)상의 2차원 속도분포를 측정할 수 있는 연구가 1건 있었다. 마이크로 분야에서는 마이크로 채널내에 형광입자와 형광염료를 투입하여 입자위치정보와 입자밝기 정보를 이용함으로써 속도장과 온도장을

동시에 측정할 수 있는 PTV-LIF기법개발 연구가 1건 있으며 거울과 단일카메라를 이용한 스테레오 매칭기법을 이용한 이상 유동기포를 측정방법개발에 관한 연구가 1건 있었다. PIV측정법 이외의 속도측정법에 있어서는 X-probe 열선유속계에 의한 원형제트유동 특성해석 연구가 1건 있었다. 엔진 내부의 압력을 측정

한 사례가 총 5건이었다. 가솔린 엔진내의 분무압력을 피에조타입 상대압력센서를 적용한 사례가 1건, 제상용 노즐분무의 유출계수 측정에 피토관을 사용한 사례가 1건 있었으며 대부분이 압력공에 의한 압력측정에 관한 내용이었다.

온도측정과 관련해서는 전통산업분야에서는 액정판(sheet)을 이용한 열전달 표면의 온도분포 측정(2차원 온도)에 관한 연구가 1건, 디젤엔진 내 화염온도를 이색법(two-color method)으로 예측한 사례가 1건, 배기가스의 온도측정에 열전대를 사용한 사례가 2건 냉장고의 에너지 노즈(nose)부의 열전달 특성 해석에 열전대를 사용한 사례가 1건, 풀비등 열전달현상 해석에 열전대를 사용한 사례가 1건이었는데 거의가 K형 및 T형 열전대를 사용하였다. 마이크로분야에서는 미세열기포 온도측정에 열전대를 사용한 사례가 1건(K형), 마이크로 세라믹웍(wick) 기반의 loop heat pipe의 특성연구에 열전대(K형)를 사용한 사례가 1건 있었다. 나노분야에서는 나노유체에 잠긴 가는 열선주위의 자연대류 열전달 특성에 관한 연구가 4-wire법으로 적용한 사례가 1건, 나노유체의 풀비등 임계열유속 측정에 백금저항온도센서를 사용한 사례가 1건 있었다.

그 밖에 전통산업분야에서의 기타 물리량 측정과 관련하여 연

소가스 성분의 농도분석, 가스오븐레인지의 복사버너에서 발생하는 배기가스 성분의 농도분석, 액화석유-디메틸에테르의 성층혼합 착화엔진에서의 배기가스 성분의 농도분석에 가스크래마토그래피(gas chromatography)를 적용한 사례가 각각 1건씩으로 총 3건 있었다.

가솔린엔진 내부의 분무상태, 팬형분무상태, 정전분무(Electrostatic) 확산연소시스템에서의 있어서 분무상태에서의 입자크기와 속도를 위상도플러기법(PDA; Phase Doppler Anemometry)으로 측정한 사례가 각 1건씩으로 총 3건 있었다. 또한 터빈블레이드에서의 국소물질전달계수를 나프탈렌승화법으로 측정한 사례가 1건 있었다. 배기가스의 NOx를 계측하기 위하여 화학발광 NOx분석계를 적용한 사례가 1건, 전기전도도를 측정함으로써 세제의 농도를 계측한 사례가 1건 있었다.

마이크로분야에서는 MEMS기술을 이용한 질량유량센서를 적용한 사례가 1건 있었으며 나노분야에서는 나노유체의 비정상열선법을 기반한 열전도율 측정에 관한 사례가 1건 있었다. 신재생에너지 분야에서는 전자현미경(SEM)에 의한 연료전지 공기극 단면을 측정하고 다음 X선 회절측정으로 공기극 구조를 연구한 사례가 1건, GlidArc플라즈마를 이용한 메탄의 개질특성 및 수소생

산에 관한 연구, 가정용 연료전지내의 일산화탄소 저감을 위한 개질가스의 전이 반응연구 및 고체산화물 연료전지에서의 수소, 산소, 질소, 이산화탄소, 메탄 일산화탄소함량 측정연구에 가스트로마토그래피를 사용한 사례가 각 1건씩으로 총 3건이 있었다.

지난해와 다른 점

실험적 방법에 의한 유동제어 분야가 현저하게 줄었다. 이유로서는 수치계산에 의한 유동제어 관련연구 쪽으로 기울어 가고 있는 것으로 사료되었다. 이는 성능이 좋은 계산기 사용에 제약이 없어졌거나, 혹은 획기적 유동제어 개념이 새로이 나타나지 않는 한, 유동제어 실험에 있어서의 비용 및 시간적 노력을 많이 요구하게 되는 것에 대한 기대효과가 적었던 것에 기인하지 않는가 여겨진다. 한편, 계측과 관련해서는 마이크로, 바이오 분야보다는 전통산업분야와 신재생에너지(특히, 연료전지) 분야에서의 측정법의 적용사례가 많았다. 금년부터는 신재생에너지 분야를 새로이 추가하기로 하였다.

(도덕희, 한국해양대)

캐비테이션

액체를 매체로 하는 유체기계·기기에 대한 고성능·고속화가 끊임없이 요구되고 있는 가운데, 고속 수중 운동체 주변에서 발생

하는 캐비테이션을 동반하는 유동에서는 캐비테이션의 성장과 소멸 과정으로 인한 복잡하고도 강한 비정상성 때문에 유체기계의 성능저하가 초래된다. 한편 캐비테이션 기포의 붕괴로 말미암아 단시간에 수 GPa에 이르는 높은 충격압이 발생된다. 이 충격압은 보통 펌프, 하이드로 터빈의 익렬 및 프로펠러, 파이프라인 시스템, 수중 이동물체와 같은 유체기계·기기의 표면에 치명적인 손상을 입히며, 소음과 진동을 초래하여 결국 유체 고안물의 성능, 운전, 제어 등에 악영향을 미칠 뿐 아니라 일련의 캐비테이션 현상에 관계되는 다양한 문제를 야기한다. 그러나 이 충격압은 나쁜 영향이 있는 반면, 액체 속에 부유하고 있는 박테리아를 죽이고 신장결석을 분쇄하며 재료의 표면을 깨끗하게 하고 개질하는데 유효하게 활용할 수 있는 면도 있어 의학, 환경, 공학 분야에서 이를 역이용하려는 연구가 최근 몇 년 새에 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 캐비테이션은 고속유동 상태 하에 있는 유체기계·기기의 성능개선은 물론, 수명의 예측과 안전, 또는 충격파활용 기기 등의 신뢰성 확보란 관점에서 지난해에도 국내외에서 많은 연구가 이루어졌다.

2007년도 대한기계학회에서 주관한 국내 학술대회 및 논문집 B권에 캐비테이션 문제를 다룬 논문은 6편 발표되었다. 인두서

에서의 캐비테이션 억제, 노즐 오리피스에서의 캐비테이션 유동특성 및 캐비테이션 소음 예측에 관한 것이었다. 그중에서 직접 수치 모사(DNS)를 통하여 캐비테이션 소음의 예측 및 모델링에 관한 논문은 특기할 만한 것인데 이는 캐비테이션의 수치해석이라는 난과제 위에 유동소음 예측을 위한 수치해석(CAA)이라는 또 다른 난과제에 의한 연구가 시도되었기 때문이다. 이와 같은 연구는 국내외를 통틀어 보기 드문 것으로 캐비테이션 문제에 대한 관심도의 증대와 중요성이 여기에 까지 이르게 한 예라 할 수 있다.

지난해 국내 유체공학 관련 잡지에 발표된 논문의 수는 11편 정도로, 외국의 수준에는 아직 미치지 못하나 매년 발표 숫자가 늘어나고 있으며, 2007년 10월 제주에서 열린 AICFM-9(The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery) 국제회의에서는 2개의 캐비테이션 세션에서만도 12편의 논문이 발표되었다. 한편, 발표된 논문들은 인두서나 수중익, 프로펠러 주변의 캐비테이션 유동특성에 관한 연구가 대부분이지만, 소음예측 및 erosion에 관한 연구가 증가하였으며(23편중 각각 4편) 캐비테이션의 초생(inception), 제어 및 anti-cavitation 설계에 관한 것이 수행되었다. 수치계산에 의한 연구

도 부쩍 늘어 거의 절반을 차지하였으며, 수치 모델링과 같은 기초 연구도 눈에 띈다. 그러나 수치해법 및 코드 개발에 관한 연구는 캐비테이션 유동의 특수성과 복잡성 때문에 여전히 적었고, 따라서 in-house 코드보다는 상용코드를 이용한 예가 주류를 이루고 있다. 지난해 유체공학 관련 주요 국제저널에 발표된 논문의 수는 유동현상: 24편, cavitation erosion: 17편, cavitation 제어 및 재료의 표면개질: 4편 등 총 55편이 발표되었다. 또한 2005년에 조사한 연감 이후 2005~2006년 기간 동안 국내 잡지에는 총 10편(계산연구 2편)의 논문 발표가 있었으며, 국제저널에는 2005년에 108편(계산연구 25편), 2006년에 104편(계산연구 25편)의 연구 발표가 있었다. 주요 잡지별로는 ASME journal of fluids engineering에 17편, JSME: 25편, Physics of fluids: 6편, Journal of fluid mechanics와 Nature: 각 2편, Wear: 16편, Journal of materials science에 9편이 발표되었다. 또한 2006년 9월 네덜란드의 Wageningen에서 개최된 이 분야 최대 국제회의인 Cav2006 (<http://www.cav2006.com/>)에서는 모두 100편의 구두 발표가 있었는데 전통적인 bubble dynamics와 초생, 비정상성의 유체기계계의 응용 관련 외에,

cavitation peening에 의한 재료 표면의 resistance 개량, CFD에 의한 bubble 붕괴와 erosion의 관계를 규명하려는 시도가 돋보인다. 지난해 국내외에서 수행된 연구동향을 몇몇 표제로 분석하면 다음과 같다.

캐비테이션 발생기구 및 기포의 거동

Nuclei의 성장, bubble의 붕괴, ultrasonic effect, light/noise emission, 열적 효과, shock-bubble interaction 등 기포역학과 캐비테이션 발생 메커니즘에 관련된 기초연구가 수행되었다. superhigh speed 비디오카메라를 구사하여 박리점에서의 캐비테이션 초생에 관한 상세 관찰이 보고되었다. 캐비테이션의 발생을 정확히 예측할 수 있으면 캐비테이션을 방지할 수 있는 고효율 고속 액체기계를 설계 제작할 수 있다. 한편, 레이저로 발생시키는 캐비테이션 기포에 의한 drug delivery 시스템에 관한 연구보고는 생체공학의 발전과 microfluidic 기술의 실현 가능성을 열어 두었다.

캐비테이션 유동의 제현상

측정장비의 정밀화와 계산환경의 비약적인 발전으로 캐비테이션 유동의 복잡현상에 관한 연구는 점점 증가 추세를 보인다. 펌프, 하이드로 터빈 익렬, 선박용 프로펠러, 수력 밸브, 분사노즐,

오리피스, 벤츄리, 저널베어링 등에서 발생하는 캐비테이션 유동에 대한 안정·불안정 해석, 진동 해석, 정상·비정상유동, vortex shedding, breakdown, 극저온 환경하의 superfluid에 대한 유동현상, thermodynamic effect, 비정상 partial cavitation, super cavitation 유동의 동특성, sheet cavitation, vortex cavitation의 거동 등, 액체기계·기기 전반에 걸친 캐비테이션의 구조와 유동 물리, 유동현상의 해명을 위한 실험적, 수치 해석적 연구가 정력적으로 수행되었다. 특히 액체로켓 개발을 배후로 한 터보펌프 및 인두서에서의 비정상 캐비테이션 유동과 제어에 관한 연구가 꾸준히 증가세를 보이고, 고속 수중 수송체의 개발과 관련한 super cavitation 유동의 연구가 활발히 진행되었다.

캐비테이션의 수치해석

캐비테이션의 복잡 현상에 대한 올바른 이해와 유동 실험에서 부족한 상세한 정보 확보의 필요성을 배경으로 성장해 온 수치해석은 이제 보편화 되어 지난해 국내 연구의 절반을 차지하였다. 계산 환경의 향상과 해석기술의 발달, 캐비테이션 유동에 대한 공학적 관심과 캐비테이션 현상에 관계되는 다양한 문제들을 해결하려는 노력으로 연구가 활발히 진행되어, 2차원보다는 3차원 해

석이, 단상류보다는 혼상류동 해석으로의 이동이 두드러졌다. 주류를 이루고 있는 균질류 모델에 의한 다양한 캐비테이션 유동의 시뮬레이션 외에, level set법에 의한 기포의 성장, 붕괴에 관한 연구, super cavitation에 적용한 BEM해법, heterogeneous 캐비테이션에 대한 lattice Boltzmann해법, preconditioning법에 의한 저 Mach수 압축성 유동해법, acoustic cavitation의 모델링과 열역학적 상변화를 고려한 수치모델링의 연구가 눈에 띈다. 또한 LES를 이용한 cavitation 초생 예측법과 복잡 난류의 DNS해석, 난류 모델들에 의한 비교 연구, drag reduction과 영향 평가, bubble-shock-solid wall 간 섭문제 등 대형계산을 요구하는 연구보고가 있으며, cavitation noise와 acoustics 문제를 해결하려는 노력이 수년간 지속되고 있다. 특히 충격압과 cavitation erosion(침식)관계를 해명하려는 시도는 캐비테이션 관련 연구는 물론 CFD를 한 차원 높이는 결과를 가져왔다.

캐비테이션 erosion과 재료의 개질

유동 현상에 관한 연구 다음으로 많은 연구 분야가 캐비테이션 erosion과 재료의 개질에 관한 연구였다. 캐비테이션 erosion은 캐비테이션 기포가 압력이 회복하는 곳에서 기포가 붕괴, 소멸할

때 충격압이나 마이크로 제트가 발생하여 유체기기의 부재표면을 손상시키는 현상을 말한다. 이것은 유체역학과 재료강도학의 경계영역의 현상으로 통계·확률적이고도 고속 미시적인 복잡 현상으로 이론적인 해명이 곤란하여 실험적 연구가 대부분인데, 액체 기계 및 구조물에 대한 안전성 향상과 수명 연장의 중요성만큼 캐비테이션 손상과 관련된 많은 연구 발표가 있었다. 기포 붕괴 시 충격현상의 관찰, 충격압과 침식률과의 관계, 손상 메커니즘에 관한 기초연구가 보고된 반면, 온도변화와 매체에 따른 액체 파라미터의 영향, 캐비테이션에의 노출시간, 표면 거칠기, 용접과 코팅, 합금 등에 따른 캐비테이션마모와 침식에 영향을 주는 유동 및 재료인자들에 대한 각종 사례 연구와 마모 저항성 개선, 방지법에 대한 공학적 실험 연구가 많이 수행되었다. 또한, 캐비테이션 기포의 붕괴 충격력을 정량적으로 계측할 수 있는 충격력 계측 장치의 개발과 이를 위한 센서와 센서의 교정방법, 침식의 예측법, 추정법의 제안이 있었다. 캐비테이션 충격력을 계측할 수 있으면 캐비테이션 침식의 예측에 효과적이기 때문이다. 또, 아직 초보적이기는 하나 Numerical modelling of cavitation erosion, 또는 numerical investigations on development of cavitation erosion

pits과 같은 수치해석적 연구의 시도가 있었음은 특기할 만하다.

한편, 역발상적인 연구로 캐비테이션 기포의 붕괴 충격력을 재료 표면에 적절히 이용하면 내식성이 향상되고, 압축 잔류 응력을 도입함으로써 피로 강도가 향상됨이 발견되어, 쇼트 피닝과 같이 재료의 표면 개질을 위한 캐비테이션 충격력의 효과적인 이용에 관한 연구도 꾸준히 이루어지고 있다. 캐비테이션 erosion의 정량적 예측 및 표면 개질의 실용화를 위해서는 캐비테이션 충격력의 정량적인 평가가 필요하고, 따라서 충격력 계측장치의 개발에 관한 연구가 병행되었다.

(신병록, 창원대학교)

압축성유동

유체유동의 속도변화에 수반하는 밀도변화가 어느 정도 큰 경우에 유체의 압축성을 고려할 필요가 있다. 이와 같은 압축성 유동에서는, 아주 미소한 압력은 음속(speed of sound)의 속도로 유동장 내를 전파하게 되지만, 압력의 높은 부분이 발생하게 되면, 음속 이상의 속도로 전파하게 된다. 이 경우 유속이 음속에 비해 큰가 작은가에 의하여 유동장의 특성이 현저하게 달라지며, 비압축성유동에서는 밀도변화를 고려하지 않고 유동의 음속을 무한대로 정의하고 있다.

종래 이러한 압축성 유동에 관

한 연구는 고속유동을 다루는 항공우주 분야에 국한되어 왔으나, 최근 다양한 산업분야에서 응용의 폭이 넓어지고 있어, 미국, 일본 및 유럽 등지에서는 유체역학 연구자의 3 내지 4할 이상이 압축성 유동을 연구하고 있다. 외국의 경우, 압축성 유동의 연구는 크게 나누어, 충격파 동역학(shock wave dynamics) 관한 연구와 충격파 현상 자체를 이용하는 응용연구, 그리고 충격파를 수반하는 유동장에 관한 연구로 대별된다. 그러나 지난 수년 동안 국내에서 충격파 동역학, 충격파 현상의 응용연구는 거의 수행되지 않았으며, 충격파를 수반하는 고속유동에 관해서는 몇몇 대학교 및 연구소에서 수행되었다.

이들 연구는 주로 고속제트 유동에서 발생하는 충격파, 천음속 및 초음속 터빈유동 등이나 각종 유체기계에서 발생하는 충격파, 램제트(ramjet) 및 스크램제트(scramjet) 엔진흡입구(engine intake)에서 발생하는 충격파, 각종 화학반응을 수반하는 유동에서 발생하는 충격파현상, 그리고 충격성소음(impulse noise) 현상, 충격파와 와류유동의 간섭현상, 또는 각종 고속유동의 소음기 응용에 관한 연구들이 수치해석법 및 실험적으로 수행되었다.

위의 연구에서 실험적 연구는 주로 초음속 풍동이나 충격파관(shock tube)에서 발생하는 충격파 현상을 쉐리렌법(Schlieren

method) 및 섀도그래피법(Shadowgraph method)으로 유동장을 가시화하였으며, Computational Fluid Dynamics(CFD)에서는 상용의 Fluent 6, CFD Ace 그리고 Fastran 등이나 자체적으로 개발한 TVD(Total Variation Diminishing)법을 주로 적용되었다. 이러한 압축성 유동의 수치

해석은 에너지 방정식을 질량 및 운동량 보존식과 결합하여 수치적으로 해를 구하는 coupled scheme을 주로 사용하고 있으며, 최근에는 비정상 유동을 해석하기 위하여, dual time marching법을 이용하여 충격파를 수반하는 비정상 유동을 해석하고 있다.

외국의 경우, 압축성 유동에 관

한 연구는 항공우주공학, 기계공학, 토목공학, 산업공학, 지구물리학, 화학공학, 생체공학, 의학, 농학 등 다양한 분야에서 광범위하게 이루어지고 있는데 반해, 국내에서는 극히 소수의 연구소 및 대학교에서 항공우주공학 및 기계공학 관련연구를 수행하고 있는데 지나지 않는다.

(김희동, 안동대학교)