

유체공학 부문

이 글에서는 2004년도 유체공학 분야의 주요 연구동향을 난류, 전산유체공학, 다상유동, 마이크로 유체역학, 생체유동, 나노유체, 유동소음, 압축성 유동 그리고 캐비테이션 및 마모 등으로 나누어 소개한다.

서용권 부문회장(동아대학교, 교수)

e-mail : yksuh@mail.donga.ac.kr

난류

난류유동은 다양한 유체공학의 응용문제에서 발생하게 되나, 그 해석상의 어려움으로 지속적인 연구가 필요한 부분이라고 하겠다. 특히 난류의 발생, 성장, 소멸 및 그 역학적 영향 등을 제대로 파악하게 된다면 다양한 유동제어 기법을 통해 획기적인 이득을 얻을 수 있기 때문에 수치해석적, 실험적 및 이론적 방법을 통한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 2004년에도 난류유동에 관한 많은 연구결과들이 학계에 보고되었는데, 난류연구는 그 특성 상, 여러 학제간 분야들과 긴밀하게 관련되는 경우가 많기 때문에 물리적 특성에 대한 지식을 바탕으로 하여 좀더 복잡한 시스템에 대한 해석 및 이를 제어하기 위한 시도가 진행되고 있다고 하겠다. 특히, 최근에는 세계적으로 관심을 끌고 있는 환경문제와 관련하여, 환경유체 분야에도 난류해석을 고려한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 유동장에서 발생하는 소음의 제어를 위한 연구, 난류 연소 문제를 해결하기 위한 방법론 개발, 스포츠 유체역학에의 응용 등 난류연구의 영역이 점차 현실적 공학 문제로 확장되어 실생활에 직접적으로 응용될 수 있도록 함으로써 학계의 많은 관심을 받고 있다. 난류연구는 그 성격상 유체공학 전 분야에 걸쳐 긴밀한 상호관계를 갖기 때문에 타 분야와 중복되는 영역이 많으나, 다음과 같이 세분화해볼 수 있는데, 최근에 널리 사용되고 있는 PIV/PTV를 이용한 유동가시화 기법이나, 난류 연소 및 난류 유동장에서 발생하는 유동소음에 관한 연구 등은 별도의 분야로

다루어지므로 이를 제외한 각 분야에서 진행되고 있는 연구들의 동향을 간단히 요약하면 다음과 같다.

난류현상의 물리적 이해를 위한 기초연구

컴퓨팅 파워의 비약적인 발전과 더불어 가장 연구가 진행되고 있는 부분이라고 할 수 있다. 난류현상의 물리적 특성을 파악하기 위해서는 유동장의 상세한 정보가 필요하게 되는데, 직접수치모사의 방법을 통해 유동장에 존재하는 모든 스케일의 유동을 해상함으로써 유동장의 자세한 정보를 얻을 수 있다. 장애물 주위의 와구조 형성과정에 관한 수치적 연구, 난류경계층의 3차원 헤어핀 다발 구조에 대한 실험적 연구, 선형 압축기 익렬에서 발생하는 익단 누설 와류 내의 레이놀즈 응력 분포, 이산 wavelet 변환을 이용한 3차원 등방성 난류속도장의 응집구조 추출, 유체의 물성치 변화를 고려한 수직원형관 내 고온기체유동에 관한 직접수치모사, 직접수치모사를 이용한 수직 원형관 내 초임계압 유체의 난류열전달 특성연구, 2개의 구를 지나는 유동에 대한 수치해석적 연구, 거친 벽 위에 형성된 난류경계층의 직접수치모사 등에 대한 결과들이 발표되었는데, 난류의 물리적 특성을 다양한 측면에서 살펴본 연구들이라고 할 수 있다.

난류제어

난류연구의 궁극적인 목적은 난류 유동장을 효과적으로 제어하기 위해서 필요한 난류의 물리적 현상에 대한 이해를 높이는 것이라고 할 수 있는데, 제어

분야는 다양한 응용문제에서 의 중요성으로 인해 많은 사람들의 관심을 받고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 난류 연구의 어려움으로 인해 실용적인 적용이 가능한 결과의 도출까지는 지속적인 노력이 필요하다 하겠다. FR 유체에 대한 직접수치해석, 분할편을 이용한 원형 단면 실린더의 유동제어, 전자기력을 이용한 마찰저항 감소 등에 대한 연구가 보고되었다.

대외류모사

직접수치모사 기법이 갖는 단점은 해석에 필요한 비용이 매우 높다는 것인데, 그와 같은 단점을 보완하면서도 현실적인 공학 문제를 다루기 위해서 사용되고 있는 대외류모사 기법은 그 적용범위가 계속 확대되고 있다. 안쪽 실린더가 회전하는 동심 환형관 내 난류유동의 대형화모사, 벽분사가 있는 채널에서의 난류유동장/온도장 해석, 비균질 필터를 사용한 난류채널유동의 LES, LES 기법의 필터링 작업에 관한 고찰, 횡방향 슬릿을 통한 주기적인 흡입/분사가 존재하는 난류경계층 유동의 대형 와모사 등에 관한 연구 들이 보고되었는데, 기존의 RANS모델에 비해 유동장의 정보를 상세하게 얻을 수 있는 장점을 갖고 있으므로 앞으로도 다양한 유동장의 해석에 좋은 해석도구로 활용될 것으로 기대된다.

난류모델링

공학 문제의 해결에 필수불가결한 난류모델링의 개발은 기존 모델의 성능을 확장하여, 여러 가지 다양한 종류의 유동에 적용되고 있는데, 타원방정식에 의한 벽면 부근의 난류열유속 모형화, 초임계 상태 이산화탄소의 2차모멘트 난류모형 적용에 따른 난류 열전달 해석, 2-D URANS에 의한 원형 실린더 주위의 비정상 유동 수치해석 등의 접근 방법들이 보고되었다.

환경난류

난류경계층 유동에서 입자의 확산과 스핀에 관한 연구, 안정적으로 성층화된 난류의 벽 근처 거동에 관한 연구, 등방성난류의 가속도 intermitency에

대한 연구, 입자가 포함된 유체의 유동특성에 대한 직접수치해석 등이 진행되고 있는데, 그 응용 대상의 중요성으로 볼 때, 앞으로 더 활발히 연구가 진행될 것으로 기대된다. 고효율과 저공해 엔진의 개발에 관한 연구는 꾸준히 계속되고 있다. [나양, 건국대학교]

전산유체공학

전산유체역학은 실험유체역학과 더불어 유체역학을 연구하는 중요한 수단으로서 최근 컴퓨터의 발달로 인해 매우 널리 사용되고 있다. 2004년 한 해 동안 전산유체역학 분야에서 행해진 연구동향을 살펴보고자 한다. 전산유체역학의 범위를 비교적 넓게 정의하여 이에 관련되어 발표된 논문을 살펴보면 기계학회 논문집 B권에 36편, KSME International Journal에 40편, 그리고 작년에 개최된 제3회 한국유체공학학술대회에 31편 등 총 107편이 발표되었다. 이 보고서에서는 다소 중복이 되긴 하나 위 107편의 논문의 분석을 통해 연구동향을 살펴보고자 한다.

조사된 논문의 주제를 분석하여 주로 다루어진 전산유체역학 분야를 살펴보면, (1) 수치알고리즘 개발, (2) 층류/난류의 직접수치모사, (3) 난류의 대외류모사, (4) 난류모델의 개발 및 적용, (5) 상용패키지를 이용한 응용연구 및 (6) 기타 주제 등으로 분류할 수 있다. 각 분야별로 동향을 살펴보면 다음과 같다.

수치알고리즘 개발

최근 새롭게 적용범위가 넓어져가고 있는 가상경계법의 개선이나 적용을 다루는 연구들이 수행되고 있으며 인접한 세 실린더 주위의 층류유동, 비관성좌표계로의 적용이나 난류모델과의 결합 및 비정상적으로 운동하는 물체주위의 유동에의 적용 등의 시도가 이루어지고 있다. 또한 입자와법의 반원형 실린더 초기후류모사 및 급출발하는 타원형 실린더 주위 유동에의 적용에 관한 연구가 수행되었다. 한편으로는 상변화를 동반하는 기포거동의 수치모사를 위한 레벨셋방법의 개발 및 비정규격자에서의 적용에 관한 연

구결과가 발표되었다. 그 밖에도 비정렬 격자계에서 LU_SGS 기법의 안정화에 관한 연구와 예조건화된 오일러 방정식의 수렴특성 및 웨이브렛을 이용한 데이터 압축에 관한 연구가 수행되었다. 전산유체역학 분야 중에서 꾸준히 연구량이 유지되는 분야라 할 수 있다.

직접수치모사

직접수치모사를 이용한 연구는 난류경계층 내의 unsteady forcing에 대한 해석, 비뉴턴 유체의 채널유동, 구 후류에 미치는 밀도성층화의 영향, 장애물 주위의 와유동, 물성치 변화를 고려한 수직원형관 내 고온기체유동, 원형 실린더 주위의 2차원 층류유동 등에 대하여 주로 수행되었다. 직접수치모사의 정확도와 관련하여 시간적분 알고리즘의 개선 등에 관한 연구도 아울러 수행되었다.

대와류모사

많은 상용패키지에서 제공하는 대와류모사기법은 아직까지는 아격자모델에 대한 충분한 평가가 부족한 이유로 널리 사용되고 있지 않은 실정이다. 동심원과 내 난류유동, 강한 벽분사가 있는 채널 내 난류유동 및 온도장의 해석, 실린더 주위의 유동에 적용되었으며, 비균질 필터를 이용한 채널유동의 수치모사, 동적혼성 모델을 이용한 채널의 온도장 해석 등 아격자모델의 개선과 관련된 대와류모사 연구결과가 보고되었다. 점차 가속화되는 컴퓨터의 발달과 병렬프로그래밍 기법의 발전으로 인해 아격자모델에 대한 충분한 검증이 따를 경우 기존의 RANS에 기반한 난류모델을 대체할 것으로 기대한다.

난류모델의 개발 및 적용

RANS에 기반한 난류모델은 벽 근처에서의 불확실성을 어느 정도 보완한 $v2f$ 모델의 사용이 점차 보편화되어가고 있음을 확인할 수 있다. 타원 미분방정식에 의한 새로운 벽 근처 난류열유속모델의 제시로 이어지고 있으며, 2-D URANS에 의한 원형 실린더 주위의 비정상 유동 수치해석 등의 연구결과를 발견할 수 있다. 또한, 또 다른 난류모델로서 라그랑

지안 확률밀도함수 모델이 점차 사용범위를 넓혀가고 있다. 난류연소의 해석을 위한 라그랑지안 확률밀도함수 모델의 적용, 유체입자의 확산을 위한 라그랑지안 스토캐스틱 모델의 적용 등의 연구가 수행되었다. 대와류모사나 난류모델에 관련된 연구결과에 대한 보다 자세한 동향은 난류부문 동향보고서에서 찾을 수 있다.

상용패키지를 이용한 응용연구

최근 들어 상용패키지에 의존하여 여러 가지 공학적 문제의 해결에 적용하는 예가 점차 늘고 있다. 통계적으로 전산유체역학에 관련된 논문 중 약 20%의 논문이 상용패키지를 이용한 응용연구라 할 수 있다. 특히, 문제의 기하학적 형상이 복잡하여 격자의 생성이 필요한 경우 널리 사용되고 있다. 사용되는 패키지는 Fluent, CFX, STAR-CD, CFD-ACE 등이며 주로 열전달을 포함한 최적설계의 수단으로 사용되며 이 외에도 여기에서 열거할 수 없을 만큼 다양한 응용문제에 적용되고 있다. 주로 사용되는 난류모델은 k-ε 모델이며 대와류모사 옵션이 추가된 패키지도 제공되고 있다.

이 외에도 최근 들어 병렬프로그래밍을 이용한 대규모 계산이 보편화되면서 병렬프로그래밍 최적화 기법의 개발이나 클러스터 구축 및 MPI 기법의 적용에 대한 연구결과가 발표되었다. 그리드 컴퓨팅에 대한 인식이 점차 확산되어나가면서 이 분야에 대한 투자나 연구가 따를 것으로 기대해볼 수 있다. 또한 연소실 내에서의 설계조건에 따른 어쿠스틱 특성과 컴프레서 블레이드에서 발생하는 소음특성에 대한 수치예측을 다룬 논문도 발표되었다. 특이한 점은 최근에 많은 관심의 대상이 되어왔던 마이크로 플루이드스 관련 미세채널 내의 유동에 대한 수치적 해석 관련 논문을 거의 찾아볼 수 없었다는 점이다. 아직까지 이렇다 할 연구결과가 도출되지 않거나 또는 일시적인 2004년만의 특징이라고 추정해볼 뿐이다. 그리고 한 가지 언급해야할 점은 본 보고서에서 분석 대상으로 삼은 논문들은 주로 기계학회와 한국유체공학술대회에서 발표된 논문들로서 압축성 유동에 대한 수치해석 논문들은 포함하지 않았다는 것이다.

이에 대한 동향은 압축성 유동 부문에서 찾아볼 수 있다.

결론적으로, 전산유체역학 분야의 최근 동향 분석을 통해서 아직까지도 전통적인 분야인 수치알고리즘의 개발이나 층류/난류의 수치해석 등에 대한 꾸준한 연구가 지속되고 있고 아울러 패키지를 이용한 응용연구 또한 매우 활발히 수행되고 있음을 확인할 수 있다. 국내의 연구진의 풀이 그리 넓지 못한 상황에서 비교적 다양한 분야에서 나름대로 꾸준한 연구가 진행되고 있긴 하나 여러 가지 국내의 현실적인 연구여건이 열악하여 국제적인 경쟁력을 갖춘 연구 결과가 부족한 것이 아쉬운 점으로 남는다. [이창훈, 연세대학교]

다상유동

2004년도 다상유동 분야의 연구논문은 대한기계학회 논문집 및 KSME International Journal에 21여 편이 게재되었다. 주제별로 보면 액체의 미립화 및 분무특성에 대한 논문이 15편으로 가장 많았고, 액적 및 기포의 거동, 응고 및 용융 현상 등에 대한 논문이 발표되었다. 여기에는 다른 분야에서 별도로 취급하는 입자의 거동, 비등 및 응축 현상에 대한 다수의 논문이 포함되지 않았다.

액체의 미립화 및 분무특성에 대한 연구는 가솔린 직접분사식(GDI)엔진과 디젤엔진의 연료분사 외에 분무액적을 이용한 냉각, 폐기물 처리, 화염의 소화, 미세가공의 에칭공정 등 적용분야가 다양화 되는 경향이 두드러졌다. 엔진의 연료분사와 직접 관련된 연구는 주로 액적의 분포 및 거동특성을 위상도플러 기법, LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence) 기법 등을 사용하여 측정 또는 가시화하고 오일러리안-라그랑지안 수치방법에 기반을 둔 KIVA 코드를 이용한 수치결과와 비교하는 방법으로 수행되었다. 이러한 액적분무의 수치해석에서는 액적의 분열 또는 변형에 대한 모델의 정확성이 중요하며 분무조건에 따라 모델을 선택적으로 적용 또는 개선하려는 노력이 지속적으로 이루어졌다. GDI 분무 관련된 연구로는 온도 조건에 따른 분무거동 및

증발특성을 규명하기 위해 LISA (Linearized Instability Sheet Atomization) 모델, TAB(Taylor Analogy Breakup)모델을 개선한 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB) 모델 등의 액적 분열모델과 증발모델을 이용하여 얻은 수치결과와 Exiplex 형광법을 이용한 실험 데이터와 비교 분석한 연구, 액적분열의 다른 모델로서 LISA 모델과 DDB(Drop Deformation and Breakup) 모델을 적용한 수치결과와 위상도플러에 의한 실험결과와 비교한 연구 등이 발표되었다. 디젤분무 관련된 연구로는 분사압력이 400bar에서 800bar으로 고압일 때 증발을 포함하는 분무특성에 대해 LIEF 방법을 이용한 측정결과와 수정된 TAB 모델을 이용한 수치결과를 비교한 연구가 수행되었다. 또한, 가스터빈에 사용되는 스웰 인젝터의 분무특성에 대한 연구가 이루어졌으며, 저온영역에서 액적 분포는 고온영역의 경우와 달리 표면장력보다 동점성계수에 의해 결정된다는 결과가 얻어졌다. 액체의 미립화 관련해서는 연료분사에 주로 사용되는 공기-액체 2유체 분무방식 외에 비전도성 액체연료인 디젤에 전하를 공급할 수 있는 전기수력학적 분무장치를 구성하여 유량, 공급전압, 전극 간 거리에 따른 미립화 특성에 대한 연구가 수행되었다. 한편, 분무특성의 규명에 필수적인 액적의 크기와 속도를 정확하게 측정하는 기법 개발의 일환으로 짧은 간격으로 발생된 펄스에 의한 이중노출, 단일 프레임 이미지를 이용하여 액적의 크기와 위치를 측정하는 광학적 이미징 방법이 제시되기도 하였다.

분무액적을 이용한 고온 강판 냉각방법으로 냉각수만을 고압으로 분사하는 방법 외에 물과 공기를 혼합하여 분무하는 방법에 대한 실험적인 연구가 막비등 영역에서 수행되어 물-공기 혼합분무가 열유속을 60%까지 향상할 수 있음이 보고되었다. 또한, 액적과 벽면 사이의 충돌현상에 대해 Level Set 방법을 이용하여 액적의 복잡한 거동과 이에 동반되는 냉각특성을 수치적으로 해석한 연구가 수행되었으며, 열전달량을 결정하는 최대 액막 퍼짐반경에 대한 기존의 모델식에 표면장력의 효과를 보정하여 마이크로

액적의 범위까지 적용되는 식이 제시되었다. 분무를 이용한 폐기 식물성기름 처리와 관련하여 노즐 출구의 직경을 크게 할 수 있는 기체주입 분무특성에 대한 연구가 이루어져 공기/액체 비율에 따른 액적의 속도, 분무각 등 미립화 및 분무특성에 대한 결과가 발표되었다. 이외에 개방된 공간에서 액체연료에 의한 Pool 화염을 소화하는 방법으로 분무수의 분무 특성을 이용하는 연구가 수행되었으며, 분무수에 의한 소화 메커니즘은 산소차폐에 의한 것보다 화염과 연료표면의 온도하강에 의해 결정된다는 결과가 보고되었다.

액적분무의 또 다른 응용분야로서 포토에칭 기술을 이용한 초정밀 미세가공의 습식 에칭공정에 대한 연구논문이 5편 발표되었다. 액적의 속도, 크기, 충격력, 물성치, 노즐 내부의 스웰러각과 스웰실 형상 비 변화 등의 분무조건과 에칭특성간의 상관관계를 규명하는 연구가 단일노즐뿐만 아니라 이중노즐에 대해 수행되어 에칭특성을 예측하고 향상시킬 수 있는 기본 자료가 제공되었다.

자유표면 또는 상경계면을 포함하는 다상유동의 수치해석적인 연구에서 상경계면을 해의 일부로서 구하는 수치기법으로 VOF(Volume of Fluid) 방법이 주로 사용되었으며, VOF 방법을 개선하려는 연구 또한 지속적으로 이루어졌다. 상변화를 동반하는 주조공정에 적용하기 위해 VOF 방법과 등가비열법을 결합한 수치기법을 원통좌표계로 확장한 연구, 자유표면의 정확한 계산을 위해 VOF 방법을 형상충전 기법 및 격자세분화 기법과 결합하고 사면체의 3차원 검사체적에 적용한 연구 등이 발표되었다. 또한, PLIC(Piecewise Linear Interface Calculation) VOF 방법과 엔탈피법을 결합하여 저밀도에너지 레이저 용접공정에서 발생하는 용융풀의 자유표면 거동과 자유표면의 거동이 용융풀의 크기에 미치는 영향을 고찰하는 연구가 수행되었다.

액적 및 기포의 거동에 대한 새로운 연구경향은 바이오 분야, 마이크로 냉각장치, 마이크로 유체 구동 등 마이크로 응용분야와 관련된 연구가 활발하게 진행되었다는 점이다. 바이오 분야의 마이크로 믹서와 관련하여 폭이 인 Y형 마이크로채널에서의 액적 형

성과정을 가시화하고 직경의 형광입자를 이용한 Micro-PIV 측정을 통해 액적 주변의 유동특성을 분석한 연구가 발표되었다. 또한, 초소형 전자장치의 고발열 문제를 해결하는 마이크로 증발기 개발과 관련하여 미세관에서의 기포성장 에 대한 수치해석이 상변화를 고려한 Level Set 방법을 이용하여 수행되었으며, 관의 크기, 접촉각에 따른 기포성장 및 열 유속 특성에 대한 결과가 얻어졌다. 마이크로 채널내의 유체 구동 메커니즘 개발과 관련하여 온도에 따른 표면장력 변화를 이용하여 내경이 인 미세관내에서의 액체 슬러그를 이송하는 메커니즘에 대한 연구도 발표되었다. [손기헌, 서강대학교]

마이크로 유체역학

내연기관 마이크로 유체역학(microfluidics)은 최근 MEMS(Micro-Electro-Mechanical-System) 산업의 발달과 더불어 복잡한 미소 형상 내부의 유동 현상 규명을 위한 중요한 분야로 부각되고 있다. 마이크로 유체역학은 임상 진단, 생체 의학 연구, 화학 분석, 잉크젯 인쇄와 같은 분야에서 응용되는 마이크로 유체 시스템(microfluidic system)과 이러한 마이크로 유체 시스템에서 극미량 유체 흐름의 반응, 혼합, 펌핑, 모니터링 또는 센싱을 제어하는 마이크로 유체기기(microfluidic device)를 연구 개발하는 분야를 모두 포함한다. 마이크로 유체역학은 다양한 분야와 관련되어 연구가 진행되고 있는데 특히 LOC(Lab-on-a-Chip), SOP(System-on-Package), -TAS(Micro Total Analysis System) 등 Bio-MEMS 관련 분야는 향후 거대한 산업 및 시장을 창출해 낼 것으로 예상되고 있으므로 최근 국내외에서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

2004년도 대한기계학회논문집과 KSME International Journal에는 마이크로 유체역학과 관련이 있는 논문이 모두 12편이 게재되었는데 마이크로 채널을 통해 흐르는 유동의 측정 기술에 관한 논문이 4편, 마이크로 스케일 분무 및 마이크로 극성 유체를 연구한 논문이 2편, 마이크로 믹서,

펌프 및 Actuator 개발을 위한 유동 해석과 관련된 논문이 3편, 그리고 마이크로 열교환기 및 추력기 관련 논문이 3편 게재되었다. 마이크로 유체역학은 간접적으로도 그 응용 분야가 광범위하므로 간접적으로 관련된 논문까지 조사하면 이보다 상당히 많은 수의 논문들이 포함될 것으로 예상된다.

마이크로 채널 내 유동 측정에 대해 대한기계학회 논문집에 게재된 논문들을 분석해보면 마이크로 PIV를 이용하여 마이크로 튜브/채널 내에서의 혈장 유동을 연구한 논문이 있었고, Y형 마이크로 채널에서 물/기름 2상 유동과 마이크로 분자관에서 DI water 및 알콜올 수용액의 유동 해석을 연구한 논문이 있었다. 이러한 연구에는 Micro-PIV 기법이 적용되어 미세 유체 소자 내부의 수마이크론 단위의 상세한 유속 분포 획득을 시도하였는데, 마이크로 단위의 유속 분포를 측정하기 위해서는 수백 나노미터 사이즈의 형광 입자가 필요하므로 나노 스케일 입자 거동에 대한 연구가 마이크로 유체역학 연구에 수반되어 진행되었다. 또한, 실험적 가시화 기법 개발을 위한 X-ray 미세 영상 기법에 관한 연구도 전년도에 이어 계속 수행되고 있다.

마이크로 분무에 관한 연구는 고점도 오일의 주입을 위한 비등성 분무 기술을 이용하여 수행되었는데 마이크로 스케일의 액적 거동을 분석하였다. 또한, 마이크로 극성 유체 이론을 이용하여 마이크로 스케일 Couette 유동의 분석이 이루어졌다.

기기의 크기가 마이크로 수준으로 작아지면 그동안 고려하지 않았던 각종 효과가 무시할 수 없을 정도로 증가한다. 따라서 마이크로 스케일에서의 각종 효과 및 영향을 고려한 기기의 성능 해석과 설계 기법은 매우 중요하다. 이와 관련하여 지난 2004년도 대한기계학회논문집에는 배리어가 포함된 카오스 마이크로 믹서의 개발, 한 쌍의 실린더를 가진 점성 구동 마이크로 펌프의 최적 설계, 그리고 Micro actuator의 개발 등에 대한 연구가 발표되었으며 CFD와 같은 기법에 의해 해석된 이와 같은 연구들은 앞서 언급한 각종 마이크로 유체기기에 적용될 수 있다. 또한, 마이크로 유체역학은 열전달과 연계되어 초소형 열교환기 내의 대류열전달 현상이나 마이

크로 고체 추진제 추력기 요소의 성능 평가에 대한 연구에도 적용되고 있으며 이와 관련한 다양한 연구가 진행되고 있다.

이와 같이, 마이크로 유체역학의 연구는 실험이나 계산에 의한 미소 유동 및 미소 입자의 물리적 이론 및 특성 정립, 마이크로 수준의 믹서, 펌프, actuator, 열교환기, 추력기 등의 설계 및 제작 기법 확립과 성능 향상, 그리고 열전달과 연계된 열유동과 표면력간 또는 분자간의 상호 작용 이해 등에 대해 진행되고 있으며 향후에도 보다 깊이 있는 연구가 마이크로 유체시스템 및 기기에 적용될 수 있게 수행될 것으로 기대된다. [고한서, 성균관대학교]

생체유동

생체유체는 생체내부에 순환되는 유체, 즉 혈액과 공기의 거동이 생체에 미치는 영향에 대한 연구 및 이에 관련된 생체유체 기기 등의 연구가 이 범주에 속한다. 이러한 생체유체에는 혈액을 위시로 하여, 타액(saliva), 뇨(urine), 안구액(vitreous humor), 지방질(lipid) 및 DNA 등의 역학적 및 운할 특성 등에 대한 연구와 더불어 생체시스템과의 상호 관계를 다루게 된다. 생체유체에 대한 연구 실험적 연구방법으로는 크게 in-vivo(체내) 실험적 연구와 in-vitro(체외) 연구 방법으로 대별되는데, 기계공학분야에서는 여러 가지 많은 제한 조건 때문에 주로 in-vitro 실험적 연구 형태가 주류를 이루고 있다. 그러나 유체공학만의 강점을 지니고 있는 부분, 특히 전임상 단계인 모사(phantom)실험, 전산유동해석(CFD) 등에서는 관련 분야를 선도하고 있다. 그 중에서도 최근 각광을 받고 있는 것이 마이크로채널유동을 이용한 생체계측장치 개발, 유동 가시화 및 전산해석 등이 있다.

현재 국내에서 생체유체와 관련하여 논문과 학술 발표가 다양한 학회에서 이루어지고 있다는 점이 매우 특이한 현상이면서도 한편으로는 당연하게 여겨진다. 즉, 공학과 의학이 복합적으로 연구되어야 실제적인 연구가 이루어지는 필요성을 인식하여 양 학문분야간에 학술강연과 발표가 교류되며 생체유체분

야에 대한 의학전문가의 Review가 이루어지는 것도 지난 2004년의 바람직한 현상이라고 할 수 있다. 이러한 생체유체분야는 국내에서는 우리 학회 내 유체공학부문이 이를 선도하고 있으며, 타기관으로는 순환기질환의공학회, 대한의용생체공학회, 한국유변학회 등이 있고 더 나아가서는 대한순환기학회, 대한당뇨병학회, 대한진단검사의학회 등의 다수의 의학 관련 학회를 거론할 수 있다.

혈류역학

혈류역학은 주로 전산유동해석을 이용하여 혈관 내의 혈류유동의 특성을 연구한 논문이 주를 이루었다. 전년에는 주로 협착(stenosis) 및 분지(bifurcation) 혈관 형상에 대한 혈류의 맥동 유동 특성 연구가 주를 이룬 것에 반해, 2004년에는 다양한 분야의 논문이 발표되었다.

동맥경화에 관련한 다양한 가설을 비교하며 혈류역학적으로 고찰한 연구가 기존의 관련 연구를 한번 매듭지으면서 향후 연구를 제안하였으며, 혈액의 점도변화가 관상동맥 순환에 미치는 영향에 대해서 수치적으로 연구되어 발표되었다. 또한, 동맥의 혈관 일부분이 부풀어오르며 주머니를 형성하다가 나중에 혈관이 터져 인체에 치명적인 손상을 입히는 ‘동맥류(aneurysm)’에 대한 연구가 발표되었는데, 동맥류의 역학적 특성과 혈압과의 관계, 그리고 이를 치료하는 다양한 의학적 시술 등에 대한 강연이 있었으며 그 중 하나의 치료법인 코일삽입법에 대하여 코일 위치에 따른 동맥류 내부의 혈류유동 변화를 고찰한 수치 연구가 발표되었다. 또한, 용적맥파 해석에 의한 동맥혈관의 경화도를 분석하려는 노력과 혈구의 변형성을 이용한 혈관의 경화도를 분석하려는 연구가 임상적 증례와 함께 발표되기도 하였다. 한편, 혈관질환에 대한 기존 연구를 정리하면서 향후 연구 방향을 제시하는 강연 논문이 발표되었는데, 이는 혈관질환에 대한 수많은 해결되지 않은 문제들에 대한 고찰과 함께 이들 중 상당부분이 신경세포에서 나오는 흥분성 신호임을 지적하며, 이러한 치료방법을 택하여 온 동양의학과 생체전기신호와의 혈류역학과의 과학적 접근의 필요성을 새로이 제시하였다.

이러한 맥락에서 관상동맥질환자의 누운 자세 변화가 자율신경계에 미치는 효과에 대한 연구 논문이 다른 연구자에 의하여 발표되기도 하였다. 한편, 혈전에 의하여 혈관이 막혔을 경우 혈전용해제를 분사하는데, 이러한 혈전용해제 분사속도에 따른 혈전용해 특성을 모델링하여 해석한 논문이 발표되기도 하였다.

인공장기 및 의료기기

인공장기 분야는 기 개발된 인공심장 및 관련 밸브 장치와 폐 보조장치에 대한 추가적 연구가 주를 이루었다. 특히, 기계식 인공판막 상태평가를 위한 컴퓨터 보조진단 시스템을 개발하는 연구가 발표되었으며, 박동수 변화에 따른 혈액 주머니내의 혈액유동을 수치해석하기도 하였다. 이러한 인공장기 사용에 따른 적혈구의 손상 정도를 혈구변형성과의 상관관계를 연구한 논문도 발표되어 혈구의 용혈(hemolysis) 현상을 방지하기 위한 노력을 볼 수 있다. 또한, 폐 보조장치에 대한 설계 및 해석·실험 등의 일련의 논문이 발표되면서, 인공 폐 보조장치 개발을 위한 물질전달에 대한 해석적 연구가 발표되었다.

2004년도의 생체유체 특징의 하나로서 다수의 논문이 생체계측기술이 진화하여 의료기기로의 기술로 전개되는 것을 볼 수 있다. 속도계측형 호흡기류 센서 설계, 혈압계측관련 계측장치 구현, 최소통증 채혈방법과 채혈량 분석을 통한 채혈기 개발, 현존 혈액투석기의 수치해석을 통한 혈액투석기 성능향상 연구 등이 발표되었다. 그 외에도, 주사용 미세유량 조절기 설계 및 제작, 이식형 약물주입장치 개발에 관한 연구 논문이 발표되었다.

혈액유변학

2004년에는 제 14회 국제유변학 총회(Int. Congress of Rheology)가 한국에서 개최되어 생체유변학 분야에도 다수의 논문이 발표되었다. 안구액(vitreous humor)과 타액(saliva) 등에 대해서 점탄성특성, 유흡특성 및 기계적 특성 등이 실험적으로 연구 발표되었으며, 지방질(lipid)간의 상호 간섭 및 영향을 보기위하여 vesicle을 추적입자

로 관찰한 연구도 발표되었다. 한편, Post-Genome 시대를 맞아 DNA에 관련한 유변학적 고찰 연구들이 상당수 발표되었다. 이러한 국제적 추세에 더불어 국내 연구진 또한 혈구의 변형성과 혈구 응집률 등에 대한 계측방법을 새로이 개발하여 제시하였으며 이러한 혈구 변형성과 응집률이 혈액 점도 및 혈관유동저항에 미치는 영향 등에 관한 고찰이 이루어졌다.

생체유동 가시화

생체유동 가시화 분야에서는 기 개발된 PIV 기법을 적용하여 생체유체로의 적용이 계속 이어졌다. 혈관협착 또는 죽상동맥경화증의 다발지점인 분지관(bifurcation)에서의 유동 가시화가 발표되었다. 또한, 호흡기에 관한 유동가시화 연구로서 비강(nasal cavity) 내의 공기에 대하여 주기적 유동 특성을 가시화하여 분석한 논문이 발표되었다. 한편, 기존의 형광입자를 추적하는 방식을 대신하여 방사광 X선을 이용한 미세영상기법을 개발하여 식물의 목질부 내부 수액 유동을 in-vivo 상태에서 가시화 및 계측하는 논문이 발표되어 생체 내의 유체를 직접 관찰할 수 있는 기술적 진보성을 보여주었다. 유사기술로서, 혈관 내에 인체 내에 무해한 미세기포(micro-bubble)를 주입하고 이를 추적 입자로 이용하고 초음파 영상에 PIV 알고리즘을 적용하는 기법이 소개되어 국내외적으로 큰 반향을 일으키고 있다.

한편, 의광학(medoptics)의 발달과 함께 기존의 생체유동 가시화가 점차 in-vivo 상태에서 가능하도록 하는 연구 및 기술발전이 최근 빠르게 전개되고 있다. 그 중에 하나가, OCT(Optical Coherent Tomography)와 OPS(Orthogonal Polarization Spectrum)를 이용한 가시화 기술이다. 상기 기술 모두 생체내부의 형태학적 구조를 관찰하는 광학기술로 개발되었지만, 이를 혈관에 대해 적용하면서 혈구의 유동을 계측하는 기술로 발전하게 되었다. 국내에서도 혈당을 비침습 방식인 광학적으로 측정하는 편광성 OCT 기술이 발표되었고 혈류량의 변화를 측정하는 관련 기술도 발표되었다. 이러한 의

광학 기술은 생체유동을 in-vivo 상태에서 계측할 수 있다는 점에서 그 파장이 매우 크며 향후 국내외적으로 관련 연구가 크게 각광을 받을 것으로 전망된다. [신세현, 경북대학교]

나노유체

나노유체(nanofluids)는 물, 에틸렌그리콜과 같은 전통적인 열전달 유체에 나노미터($\sim 10^{-9}$ m) 크기의 금속입자를 첨가하여 제조한 콜로이드 상태의 혼합액을 말한다. 나노유체에 관련된 연구는 최근에 활발하게 이루어지고 있으며 그 역사도 짧아서 연감으로서 지난 일년간의 성과를 기록하는 것보다는 지금까지 수행되었던 전체적인 연구의 방향을 대략적으로 정리하는 것이 의미있다고 생각된다.

미국 알곤연구소의 최용소 박사가 약 10년 전에 나노유체의 개념과 용어를 처음 사용하기 시작하였는데 연구의 제안 동기는 금속고체의 열전도율이 유체의 열전도율에 비하여 수백배 정도 높으므로 금속입자를 유체 속에 안정적으로 부유시킬 수 있다면 입자가 혼합된 나노유체의 열전도율은 대폭 향상될 것으로 기대하였던 것이다. Al_2O_3 , CuO 산화물 입자를 혼합하여 제조한 나노유체의 열전도율 측정이 약 7년 전에 최초로 시도되었으며 그 이후로 현재까지 새로운 종류의 입자를 첨가한 나노유체의 열전도율 측정이 보고되었다.

초기의 연구는 상온에서 상업적으로 구할 수 있는 여러 종류의 나노입자를 물, 에틸렌그리콜 등에 섞어서 혼합농도별로 열전도율 상승을 측정하는 것이었다. 나노유체의 열전도율 측정에는 예외없이 비정상 열점법이 사용되었다. 이 방법을 통하여 측정된 나노유체의 열전도율은 Al_2O_3 , CuO와 같은 산화물 입자를 이용한 경우 체적분율로 약 4%의 입자를 혼합한 경우 원래 유체의 열전도율 보다 약 15% 정도 상승하며, 순수금속인 Cu입자를 이용한 경우 1% 정도의 낮은 혼합분율에서 약 20%의 상승이 보고되었다. 최근에 나노입자 제조기술이 발전하면서 탄소나노튜브를 혼합입자로 사용하여 50% 이상 상승한 열전도율 결과가 발표되기도 하였다. 이상의 연구

는 모두 입자의 열전도율이 높을수록 나노유체의 열전도율 상승이 높을 것이라는 예상에 근거한 것이며 혼합농도가 높을수록 공통적으로 열전도율이 상승하였다.

온도와 입자의 혼합농도가 동일한 상황에서 입자의 크기효과가 열전도율 변화에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. 입자의 크기 영향을 효과적으로 실험하기 위해서는 동일한 화학성분의 입자에 대하여 비교적 넓은 범위에서 다른 크기의 입자를 구할 수 있어야 하는데 현재의 상황에서는 Al_2O_3 입자의 경우 11nm에서 150nm 크기의 입자가 상업적으로 제조 판매되고 있다. 최근의 보고에서 물에 혼합한 Al_2O_3 입자의 경우 입자의 크기가 작을수록 동일한 혼합비율에서 열전도율 상승이 높은 것으로 보고되었다.

유체에 분산시킨 입자가 침전되지 않고 매우 긴 시간 동안에도 안정적으로 분산되어 있는 것이 나노유체의 실제 적용에서 매우 중요하다. 주어진 입자에 대하여 유체는 친수성, 소수성, 전기적 전도성 또는 전기적 절연성 등 그 성질이 매우 다양하며 이에 따라 분산특성도 매우 다르다. 분산 안정성을 위하여 입자와 유체 사이 표면 성질을 변화시키는 방법을 사용하는데 주로 계면활성제가 사용된다. 계면활성제의 사용이 입자와 유체 사이의 열저항을 증가시켜 전체적인 나노유체의 열전도율을 저하시킨다는 결과와 이와는 반대로 계면활성제가 안정된 유체 혼합물을 유지하는 데 도움을 주어 나노유체의 열전도율을 향상시켰다는 보고도 있어서 논의가 계속되고 있으며 이 분야에도 더 많은 연구가 필요하다.

온도의 상승에 따라 나노유체의 열전도율이 향상된다는 연구결과가 2년 전부터 다수의 발표되고 있다. 온도상승에 따라 유체의 브라운운동이 활발해지고 이에 따라 유체와 고체 입자 사이의 나노 대류현상이 증폭되어 이 결과가 나노유체의 열전도율 상승으로 나타난다는 것이다.

나노유체의 열전도율 상승에 대한 실험적 보고 이후에 기존의 이론으로 설명되지 않는 막대한 열전도율 상승에 대한 이론적 근거를 설명하기 위한 논문이 지난해에 많이 발표되었다. 나노유체의 열전도율에

영향을 주는 인자들이 매우 다양하고 그 각각의 효과들이 미약하므로 기존의 실험방법으로는 개별적인 효과들을 평가하는 것도 매우 어려운 일이다. 이론적 근거를 마련하기 위해서는 이들 인자들이 시험된 변화범위가 넓고 다양해야 하는데 이를 위한 체계적인 실험데이터도 부족한 실정이다. 또한 염려되는 것이 유체의 열전도율 측정에 모두 비정상 열선법을 사용하는데 이 방법은 실험자의 숙련도에 따라 평가된 열전도율에 많은 오차가 포함될 수도 있다. 따라서 단순하고 퇴보적인 방법이 될 수도 있으나 정상상태법으로 나노유체의 열전도율을 측정하는 방법도 지금까지의 실험결과들을 재확인하기 위하여 필요한 시도라고 생각된다. 또한 실제 열교환과정에 나노유체를 적용하여 성공적인 결과를 얻은 연구결과들이 많이 보고되기를 기대한다. [이신표, 경기대학교]

유동소음

2004년 유동소음 관련 연감에서는 미국 NASA 중심의 연구가 잘 기술되어 있으므로, 금년에는 주로 유럽 CEAS(Confederation of European Aerospace Societies)를 중심으로 한 공력소음 연구 동향을 분석하고자 한다.

먼저, 네덜란드 NLR 주도의 ROSAS 프로젝트에서는 ONERA의 무향풍동을 이용하여 날개 위에 달린 엔진의 소음저감효과를 데이터베이스화하며 혁신적인 항공기 형상설계를 진행하고 있다. 또한 영국의 캠브리지 대학을 중심으로 헬리콥터 로터의 충격소음에 의한 지면 소음레벨을 저감하기 위해 충격(shock) 계산을 포함한 CFD와 FW-H(Ffowcs Williams-Hwakings)방정식을 이용한 해석결과를 선형적 설계의 도구로 활용하려는 시도를 하고 있다. 또한 이론적 연구로서, 네덜란드 Twente 대학에서는 삼각형 격자를 이용한 비정렬 격자기법에 고차정확도의 불연속 Galerkin 기법(DG)을 공력소음에 적용하는 연구를 하고 있으며, 독일의 Karlsruhe 대학에서는 대와류모사법(LES)과 FW-H방정식을 이용한 터보기계 소음해석을 수행하고 있으며, 유럽연합 프로젝트 중의 하나인

‘TurboNoiseCFD’에서는 동익-정익 간섭소음의 공력음향해석(CAA) 연구가 활발하다. 또한 독일의 DLR 연구소에 의한 비행기 동체 소음의 연구로서 날개 Slat 간격에 의한 방사소음연구를 통해 10dB 저감과 동시에 날개 Slat 간격 감소를 실현하였다. 유럽의 제트공력소음분야 연구는 유럽연합의 JEAN LES 프로그램이 주도하고 있으며, 열유동 아격자모델을 이용한 LES 유동계산결과를 Kirchhoff 면적분과 Lighthill 상사식과 결합하여 매우 정확한 예측의 결과를 발표한 바 있다. 또한 연소 소음분야 연구로서 유럽연합 프로젝트인 DESIRE에서는 희박 예혼합 연소를 통한 NOx 저감과는 반대로 불가피하게 발생하는 소음레벨의 증가를 억제하기 위한 열음향 연구를 수행하고 있다.

미국 AIAA와 유럽의 CEAS는 공동 주최로 매년 공력소음(Aero-acoustics) 학술대회를 개최하고 있으며, 특히 2004년도의 주제 강연에서는 Snecma 사의 ‘Silence Program’을 맡고 있는 Eugene Kors가 ‘Silence R, Significantly Lower Community Exposure to Aircraft Noise, Halfway Towards Success’라는 주제로 발표하였으며, 특이한 내용 중 하나는 엔진 압축기 내부에 능동 정익(active stator)를 설치하여 실현한 소음저감과 관련된 것이다.

2004년도 한 해 동안 국제 학술대회 혹은 논문집에 발표된 유동소음 관련된 논문을 분야별로 분석해보면, 제트소음분야에서 142편이 발표되었으며(그 중 초음속 제트소음 연구가 37편, 아음속 제트소음 연구가 25편) 공력음향해석(CAA) 연구분야 및 웬 소음분야에 각각 90편, 61편이 발표되었다. 또한 공동소음분야에 10편, 터보기계소음분야에 12편, 에어포일 소음분야에 14편, 실린더소음분야에 2편, 그리고 경계층소음분야에 7편의 논문이 발표되었다.

국내 유동소음 관련 발표 논문집으로는 KSME Int’ J, 대한기계학회논문집(B), 한국소음진동공학회, 유체기계저널, 한국음향학회지 등이 있으며, 2004년도에는 KSME Int’ J에 6편, 대한기계학회논문집(B)에 2편, 한국소음진동공학회 논문집에

6편, 유체기계저널에 2편, 음향학회지에 2편이 각각 발표되었다. 특히, 대한기계학회논문집(B)와 KSME Int’ J에는 최근 로켓엔진 연소기 혹은 소형위성발사체 개발사업의 결과로서 로켓엔진 내 열음향의 영향 및 연소불안정성을 극복하기 위한 선형 음향해석과 연소기 내부 챔버 설계의 결과를 기술하는 논문들이 주로 발표되었으며, 가전제품 중 유동소음의 문제가 가장 심각한 진공청소기의 저소음 임펠러설계 및 입구유로부 개선과 관련된 연구결과가 발표된 바 있다. 그 밖에 터보기계 원심압축기 공력소음 해석 및 저소음설계, 평면 충돌제트 소음특성, 엔진 흡기계 밸브소음, 공동유동소음, 자동차 냉각팬 소음 등이 한국소음진동공학회 논문집에 그리고 전자렌지 시로코팬 소음 및 터보냉동기 소음특성 연구결과가 유체기계저널에 발표되었다. 국내의 유동소음 분야 연구는 가전, 디스플레이 부문, 일반 차량 및 승용차 부문, 설비/시설 부문, 항공분야 등의 산업체와 우주 발사체, 수중물수체 등 국책사업 그리고 주거 환경 관련 발주 사업 등에서 지속적으로 증가해 오고 있으며, 2005년도에도 국내외적으로 활발한 연구발표가 예상된다. [이승배, 인하대학교]

압축성 유동

유체유동의 속도변화에 수반하는 밀도변화가 어느 정도 큰 경우에 유체의 압축성이 유동장에 큰 영향을 미치게 된다. 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 달라지게 되며, 대개의 경우 유동장은 비정상성(unsteadiness)이 지배적으로 된다. 일반적으로 비압축성유동에서는 압력의 고저에 관계없이, 유동의 음속은 무한대로 정의하고 있다.

우리의 일상생활이 시간에 의하여 지배되는 것과 같이, 생활 주변에서 발생하는 각종 사회 현상도 압축성 유동법칙을 잘 따르고 있음을 자주 경험하게 된다. 예를 들어, 우리의 일상생활이 각종 정보나 소문

의 전파속도와 물류의 이동속도, 즉 두 가지의 속도에 의하여 지배된다는 관점에서부터, 압축성 유동의 법칙과 매우 흡사하다. 그러나 압축성 유체공학에서 발생하는 유동현상은 비경험적인 요소가 많을 뿐만 아니라, 국내에서는 비압축성 유체공학의 교육에 비하여 압축성 유체공학의 교육에 대한 관심은 매우 적다.

외국의 경우, 압축성 유동의 연구는 크게 나누어, 충격파 동역학(shock wave dynamics) 관한 연구와 충격파현상을 이용하는 응용연구, 그리고 충격파를 수반하는 유동장에 관한 연구로 대별된다. 그러나 지난 수년 동안 국내에서 충격파 동역학, 충격파현상의 응용연구는 거의 수행되지 않았으며, 충격파를 수반하는 고속유동에 관해서는 몇몇 대학교 및 연구소에서 수행되었다.

이들 연구는 주로 고속제트 유동에서 발생하는 충격파, 각종 유체기계에서 발생하는 충격파, 램제트(ramjet) 및 스크램제트(scramjet) 엔진흡입구(engine intake)에서 발생하는 충격파, 각종 화학반응을 수반하는 유동에서 발생하는 충격파현상, 그리고 충격성소음(impulsive 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 충격파현상을 쉐리렌법(Schlieren method) 및 샤도우그라피법(Shadowgraph method)으로 유동장을 가시화하였으며, Computational Fluid Dynamics(CFD)에서는 상용의 Fluent 6나 자체적으로 개발한 TVD(Total Variation Diminishing)법을 주로 적용되었다. 또 질량유량의 계측을 위한 임계노즐 유동과 관련하여, 고속 내부유동 특유의 현상인 초킹현상(choking phenomenon)에 관한 연구가 일부 대학교 및 연구소에서 수행되었다.

외국의 경우, 압축성 유동에 관한 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 관련 연구를 수행하고 있는데 지나지 않는다.

국내에서 수행되고 있는 비압축성 유동관련 연구개발 및 기술개발의 수준은 미국, 유럽, 일본 등의 선진국 수준에 이르러 있음을 필자는 과거 수년간 국제학술회의 참가 경험으로 알 수 있었다. 그러나 압축성 유체공학 관련 연구개발 수준은 유감스럽기도 매우 저조하다. 따라서 이 분야에 관한 국내 연구자들의 깊은 관심이 요구된다. 다행스럽게도 유체공학에서 처음으로 압축성유동분야가 대한기계학회의 연감에 수록되게 되어, 향후 이 분야에 관하여 연구의 활성화가 되었으면 하는 바람이다.

이 글에서는 지난해 국내에서 수행되었던 압축성 유동 및 충격파현상에 관한 연구의 동향을 소개하였다. 보다 구체적인 내용에 대해서는 국제학술회의 및 국내학술회의 심포지움 논문집 그리고 관련 논문집을 참조하기 바란다. [김희동, 안동대학교]

캐비테이션 및 마모

과학기술 발전의 가속화와 함께 유체기계 및 기기에 대한 신뢰성, 적합성, 다양성의 향상이 끊임없이 요구되고 있다. 특히 액체를 매체로 하는 터보기계 및 추진 기계에 있어서는 고속화되어 감에 따라 캐비테이션 발생의 가능성이 증대되고 있으며, 이로 인해 기계에 대한 캐비테이션 침식과 진동 및 소음 등 캐비테이션현상에 관계되는 다양한 문제가 발생되고 있다. 캐비테이션 침식, 마모 등 이른바 캐비테이션 손상은 유체와 재료간의 복잡 연성계의 문제이기도 하여 학제적인 관점에서 그 접근이 요구되고 있으며, 최근 발달된 계측기술 또는 컴퓨터에 의한 유동해석 기술(CFD기술)의 도입을 바탕으로 손상 예측 정확도에 대한 비약적인 향상을 요구하고 있다. 캐비테이션 유동의 올바른 이해와 이상현상의 예측방법, 방지법의 확립이 설계자, 제조자는 물론 사용자에 있어서도 지극히 중요한 공통과제라는 인식하에 지난해에도 국내외에서 많은 연구가 이루어졌다.

2004년도 대한기계학회에서 주관한 국내 학술

대회에서는 캐비테이션 문제를 다룬 논문이 5편 발표되었으며, 지난 3월 하순 제주도에서 개최된 6차 KSME-JSME 유체공학회의에서는 7편의 논문이 발표되었다. 지난해 국내 유체공학 관련 잡지에 발표된 논문의 수는 10편 정도로, 정력적으로 수행되고 있는 외국의 수준에는 아직 미치지 못하나 매년 발표 숫자가 느는 것은, 국내에서도 캐비테이션 관련 문제에 대한 관심이 높아지고 있음을 의미한다. 특히, 유체기계의 설계·개발·제조에 직접 관여 하거나 사용하고 있는 연구자, 기술자들을 대상으로 기획된 '부식과 마모 강습회'가 관련 학회에서 개최되었고, 캐비테이션 손상의 메커니즘과 사고, 방지 대책에 대한 구체적인 사례가 소개된 것은 특기할 만한 사항이며, 캐비테이션 문제에 대한 중요성과 관심도의 증대를 입증하는 예라 할 수 있다. 한편, 발표된 논문들은 터보펌프나 프로펠러 주변의 캐비테이션 유동특성에 관한 실험적 연구가 대부분이지만, 캐비테이션의 가감, 제어 및 소음예측에 관한 연구도 수행되었다. 수치계산에 의한 연구는 비교적 적었고, 복잡계에 대한 수치해법 및 코드 개발의 곤란 때문에 in-house 코드 보다는 상용코드를 이용한 예가 주류를 이루고 있다. 지난해 국내외에서 수행된 연구동향을 몇몇 표제어로 분석하면 다음과 같다.

캐비테이션 발생기구

Nuclei size의 분포, 열적 효과, 액체의 화학적 성질이 inception에 미치는 영향 등, 캐비테이션 발생 메커니즘에 관한 기초연구가 꾸준히 이루어졌고, 기포거동, 붕괴, 빛의 산란장도 실험, vortex inception noise의 관찰등 기포역학과 관련된 연구가 수행되었다. 또한, optical probe를 이용한 void fraction 측정 연구가 보고되었는데, 이는 void fraction의 공간분포에 대한 정량적 평가 방법의 구체화뿐 아니라, 캐비테이션 손상의 예측 및 수치모형의 개발에도 영향 주는 바 크다.

유동현상

전체적으로 보아, 지난해 가장 많이 발표된 논문은 캐비테이션 유동현상에 관한 것이었다. 펌프, 수

력터빈, 선박용 프로펠러 익과 익렬, 버터플라이 밸브, 수력 ball valve, 분사노즐, 벤츨리, 저널베어링 등에서 발생하는 캐비테이션 유동에 대한 안정·불안정 해석, 정상·비정상유동, 극저온 환경하의 superfluid에 대한 유동현상, 비정상 부분 캐비테이션, jet-cavitation, super cavitation 유동의 동특성, traveling cavitation의 거동, 가시화 등, 유체기기 전반에 걸친 캐비테이션의 구조와 유동물리, 유동현상의 해명을 위한 실험적, 수치 해석적 연구가 정력적으로 수행되었다. 또한, 가청음, 소음에 의한 캐비테이션 및 캐비테이션 현상의 검출, 캐비테이션 기포의 진동과 맥동, 캐비테이션 제어방법이 소개되었고, cavitation breakdown, lock-in, 상호간섭과 같은 전형적인 비정상 현상의 조사 연구보고가 있다. Micro-channel에서의 cavitation inception, 기포거동과 cavitation 유동현상의 관찰 등도 눈에 띄었다.

한편, 최근 우주산업의 치열한 국제경쟁과 고 신뢰성 액체로켓 개발의 필요성 극대화와 관련하여, 터보펌프 및 인듀서에서의 비정상 캐비테이션 유동에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 예를 들면, (1) 입구 편류가 인듀서 캐비테이션 불안정성과 날개 응력 변동에 미치는 영향, (2) 인듀서의 입구 케이싱형상, 익단형상이 비정상 캐비테이션의 발생 및 역류에 미치는 영향, (3) Rotating choke in cavitating turbopump inducer, (4) 인듀서의 익각과 진동 캐비테이션에 관한 실험적 연구, (5) Cavitation interaction between inducer and impeller와 같은 연구로, 터보기계에 있어서는 이 분야에 적용된 예가 가장 많았다.

캐비테이션의 수리모델 및 수치해석

실험 연구만으로는 부족한 캐비테이션 복잡 유동의 상세한 정보를 수치해석으로 구하고자하는 연구가 '90년대 초에 시작된 이래 10여 년간 꾸준히 지속되고 있다. 계산 환경의 향상과 보편화, CFD기술의 발달, 캐비테이션 유동에 대한 공학적 관심과 연구의 필요성 등을 배경으로 연구가 활발히 진행되어, 2차원 연구에서 3차원으로, 단상류 유동에서 기-액

혼상류 유동으로, 비압축성 유동해석에서 균질류 모델에 의한 매우 낮은 레이놀즈수 압축성 유동해석으로의 전환과, 상변화를 고려한 수치모델의 연구가 눈에 띈다. 또한 주류를 이루고 있던 Navier-Stokes의 차분해석에서 경계요소법이나 level set 법에 의한 시도와, 비정상 유동의 안정·고속해법, 극저온 펌프 캐비테이션의 수치모델, Rayleigh-Plesset식과 압력항의 고찰에 관한 연구도 보고되었다.

캐비테이션 Noise와 Acoustic

Cavitation noise와 acoustic 문제에 있어서는 캐비테이션 기포의 역할, nucleus emission, bubble에 기인하는 noise emission, cavitation noise spectrum에 관한 실험적 연구, noise에 의한 cavitation의 검출법이 소개되었다. 한편, 유체기계에서의 소음감소와 예측에 관한 연구도 시도 되었는데, 구체적인 예를 들면 다음과 같다.

- (1) Inlet geometry and back pressure on cavitation and noise reduction in high pressure nozzle,
- (2) Tip vortex cavitation inception 근방에서의 extreme bubble deformation에 의한 noise,
- (3) Numerical prediction of the blade rate noise induced by marine propellers.

캐비테이션 마모와 침식

고속 환경하에서 운전되고 있는 액체기계 및 구조

물에 대한 안전성 향상과 수명 연장의 중요성만큼 캐비테이션 손상과 관련된 많은 연구 발표가 있었다. 기포 붕괴시 cavitation erosion의 광학적 관찰 등 손상 메커니즘에 관한 기초연구가 보고된 반면, 예를 들면, 탄성에너지, 경도, 금속 부재의 조직, 결정구조, 가공 경화성, 기기의 형상, 코팅 조도 등 캐비테이션 마모와 침식에 영향을 주는 유동 및 재료인자들에 대한 각종 파라메트릭 연구와 마모 저항성 개선, 방지법에 대한 공학적 실험 연구가 많이 수행되었다. 또한, 합금재의 변형에너지와 침식과의 관계, 캐비테이션 마모 저항과 탄성변형 에너지와의 관계, cavitation과 deformation의 관계, erosion과 corrosion의 거동, 펌프재료의 캐비테이션 마모와 슬러리 마모의 비교, 압력용기 내의 캐비테이션 손상 사례연구 등, 캐비테이션 침식 거동의 정식화와 캐비테이션 마모 기구의 database 구축을 위한 연구가 다수 보고 되었으며, 캐비테이션 마모 예측법, 추정법의 제안이 있었다. 그러나 캐비테이션 손상 문제는 유체와 재료의 경계영역의 현상이기 때문에 신뢰성 높은 추정법의 확립에는 아직도 해결해야 할 과제가 산적해 있고, 따라서 학·연·산 공동으로 해결해 나가는 것이 바람직하다는 인식이 공감대를 형성하고 있다. 한편, 캐비테이션을 이용한 재료의 표면개질, cloud cavitation의 붕괴현상을 이용한 결석파쇄 등, 지엽적이기는 하나 캐비테이션의 유효 이용에 관한 연구도 꾸준히 발표되었다. [신병록, 창원대학교]

기계용어해설

냉시동(Cold Start)

냉시동은 보통 겨울철과 같은 저온상태에서 차량의 시동을 켜는 경우를 이야기하기도 하나, FTP와 같은 모드 시험시 차량이 대기온도와 같은 상태에서 시동되어 예열이 충분히 이루어지지 않은 상태를 의미하는 용어로 쓰이기도 한다. 가솔린엔진의 경우 두 경우 모두 안정된 시동성 확보를 위해 연료의 농후한 공급이 ECU로부터 이루어지며, 이 때문에 시동시 HC성분의 배출이 증가한다. 또한 촉매의 예열에도 시간이 필요하기 때문에 냉시동 기간에는 상당한 수준의 배기가스 배출이 일어나며, 이 양은 모드주행시 배출되는 배기가스 총량의 상당 부분을 차지하므로, 냉시동의 시동안정성 및 배기가스 저감은 매우 중요한 이슈 중 하나라고 볼 수 있다.