

글 ■ 맹 주 성 부문위원장(한양대학교 교수)
e-mail ■ jsmaeng@hanyang.ac.kr

환경유체역학

과학기술 발전으로 인한 풍요로운 생활의 이면에는 과도한 에너지원의 사용으로 인한 환경파괴 문제가 도시라고 있다. 21세기에서 인류가 지속 가능한 성장을 하기 위해서는 환경과 생태계의 보호가 필수적이며, 환경관련 기술은 공공복리 차원뿐 아니라 경제적 파급효과가 큰 중요한 기술이다. 환경기술(ET)은 소위 6T 기술로 분류되어 정부에서도 대규모의 연구지원이 이루어지고 있다. 환경기술은 크게 나누어 대기와 관련된 문제, 바다를 포함한 수자원에 관련된 문제, 그리고 토양과 관련된 문제로 대별할 수 있다. 이중에 두 가지인 물과 공기는 유체이므로 유체역학의 지식과 연구결과는 환경관련 연구에서 가장 중요한 문제해결의 기반을 제공한다.

2002년도에 기계학회 논문집 및 KSME International Journal에 환경유체공학과 관련된 논문은 모두 24편이 발표되었다. 환경유체공학의 범주에는 환경오염물질의 배출저감에 관한 연구로부터 배출된 물질의 확산에 관한 연구에까지 주로 환경문제와 관련이 있는 유체역학적 제반 문제가 포함된다. 또한 환경관련기술에 사용되는 기계의 설계나 제작에 유체역학적 지식이 사용되었을 경우에도 환경유체역학에 포함시킬 수 있다.

대한기계학회논문집에서 발표된 논문을 분석해 보면, 대기오염물질의 발생원인과 저감기술에 관한 연구가 압도적으로 많이 수행되었다. 이는 자동차 산업 특히 디젤엔진의 배기가스에 대한 환

경 규제치를 충족시키는 기술의 개발 수요가 많아졌음을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 먼저 오염물질 발생원인 규명에 대한 연구로는 스월유동이 직분식 디젤엔진 내의 Soot 분포에 미치는 영향, 부분적 예혼합화염제어에 의한 연소 라디칼 및 NOx 배출물 특성, 산화제 제어 확산화염의 화염구조 및 NO 생성 특성에 관한 수치해석적 연구, 에틸렌/프로판 대항류 확산화염에서 PAH와 매연의 생성특성, 고온배기가스의 산소농도가 비예혼합화염의 NOx 발생에 미치는 영향, CH4-공기 동축제트 화염의 NOx 배출특성에 관한 수치 및 실험적 연구가 수행되었다.

이러한 오염물질들을 제거하거나 저감하는 연구로는 직접분사식 디젤기관에서 EGBE 첨가에 의한 배기가스 배출 특성과 분석에 관한 실험적 연구, 비열플라즈마와 라디칼을 이용한 디젤엔진의 매연 및 NO제거 특성, 직접분사식 디젤기관에서 MTBE 함유율 변화에 의한 배출가스 특성, 판-판 형 또는 판-판 형 전국에 인가된 AC 전기장이 에틸렌 정상 확산 화염 Soot 입자 배출에 미치는 영향, 대항분출화염의 분산화학반응 화염구조와 NOx 저감기구, 주 보기용 4행정 대형 디젤엔진의 IMO 운전모드에 따른 배기 배출 특성에 관한 연구가 진행되었다.

지난 번 대구지하철 참사에서 보았듯이 터널 내부의 화재는 엄청난 재앙을 몰고 온다. 우리나라의 대도시에서 운영되고 있는 지하철 등 각종 터널에서의 환기문제는 설계 단계에서부터 충분한 유체역학적 연구가 수행되어야 하며, 재난 방



지 차원에서도 엄밀한 분석과 실험이 수행되어야 한다. 이와 관련된 환경유체역학 연구로는 터널 환기제어를 위한 차종별 오염물 배출량 추정, 실내공간에서 화재 발생위치에 따른 연기거동에 대한 실험연구, 자연 배기 터널에서의 연기 거동에 관한 연구가 수행되었다.

대기환경과 관련된 연구로는 대기의 난류 특성과 건물이나 공장지대의 풍환경 측정 및 예측관련 연구가 수행되었다. 건물주위의 풍환경 관련 연구로는 두꺼운 난류경계층에 놓인 직사각형 프리즘 주위의 유동구조, 직사각형 프리즘 주위의 유동구조에 대한 경계층 두께의 영향에 관한 연구가 수행되었다. 대기의 난류 특성에 관한 연구로는 중립 대기 상태에서 이상 난류유동에 관한 수치적 연구가 수행되었다. 수질환경관련 연구로는 정수장내 염소요구량 자동결정시스템 연구가 발표되었다.

우리 학회가 출판하고 있는 국제학술지인 KSME International Journal에도 환경유체관련 논문이 다섯 편 발표되었다. 그중 세 편은 환경오염입자의 발생원인과 저감에 관한 연구였으며, 구체적인 제목은 다음과 같다.

- Numerical Modeling for Combustion and Soot Formation Processes in Turbulent Diffusion Flames
- Effects of Gas Composition on the Performance and Emissions of Compressed Natural Gas Engines
- A Study on the Characteristics of Soot Formation and Oxidization in Free Fuel Droplet Array

나머지는 유동층을 이용한 폐기물 분리장치에 관한 연구와 화재 발생시 발생위치에 따른 연기 거동에 관한 연구로 구체적인 논문제목은 각각 다음과 같다.

- Triboelectrostatic Separation System for Separation of PVC and PS Materials Using

Fluidized Bed Tribocharger

- A Study on Smoke Movement in Room Fires with Various Pool Fire Location [김경천, 부산대학교]

고속 액류 중에서 불가피하게 발생하는 캐비테이션은 복잡계의 유동현상이며, 유체기계의 신뢰성에 크게 좌우하는 특이한 현상이다. 유체기계가 고속화되어감에 따라, 부재의 손상, 진동, 소음 등 캐비테이션현상에 관계되는 다양한 문제가 발생되고 있다. 따라서 캐비테이션 이상현상의 예측법과 방지법의 확립이, 제조자는 물론 사용자에게 있어서도 지극히 중요한 공통과제가 되고 있는 만큼 지난 해에도 많은 연구가 이루어졌다. 전체적으로 보아, 캐비테이션의 발생형태에 대한 초생(inception)양식, 와류, 교란(disturbance), 핵 등의 지배요인의 영향에 대한 기초 연구가 꾸준히 이루어졌고, 액체 로켓의 터보펌프에서 발생하는 비정상 캐비테이션 유동현상과 같은 거시적인 유동구조나, 불안정현상의 해명, 침식에 관한 공학적 연구가 비교적 많이 수행되었다.

실험적 방법에 의한 연구로서는, 캐비테이션의 손상, 침식(erosion)에 관한 연구 성과가 많이 보고 되었고, 초고속사진에 의한 캐비테이션유동의 관찰 및 PIV를 이용한 초생조건(위치, 시간)의 확인과 보이드물(void fraction)의 정량적 평가방법 등이 제안되었다. 특히, 캐비테이션 기포가 붕괴할 때 발생하는 압력파와 마이크로 제트는 부재에 반복 작용함으로써 표면에 손상을 일으키고, 유체기계의 성능저하, 부재의 결손, 진동 등을 유발하는 악 영향을 미치지만, 거꾸로 이와 같은 충격력을 샷피닝(shot peening)과 같이 금속재료의 표면개질에 유효하게 이용하고자 하는 연구사례가 많이 발표되었다. ASTM에서 규격화한 캐비테이션 분류(jet)식 시험법에 근거한 손상실험 및 손

상의 정량적 예측법이 제안 되었고, 침식에 미치는 인자(액체인자, 유동인자, 재료인자)의 영향을 체계적으로 조사하여 침식 마모의 메커니즘을 규명하고자 하는 유체-재료 연성계의 학제적 연구도 시도되었다. 또한, 축류 수력터빈 날개의 임계 캐비테이션 특성의 예측, 터보펌프 인두셔의 캐비테이션 불안정성, 선회 캐비테이션(rotating cavitation)현상에 관한 연구가 이루어져, 재사용형 우주수송시스템이 검토되고 있는 현재 주목되고 있으며, 생체공학, 의료공학 분야에서는 심장 좌심 보조용 마이크로 혈액펌프에서 일어나는 캐비테이션현상에 대한 검토와 고찰 등이 이루어졌다.

한편, 실험으로는 얻을 수 없는 캐비테이션 유동의 정보를 수치해석에 의하여 얻고자 하는 시도가 현재 많은 발전을 보이고 있다. 그간 컴퓨터 환경의 비약적인 향상과 CFD 기술의 급속한 발달로 캐비테이션유동 예측기술의 향상에도 진전을 가져왔다. 그러나 아직도 풀어야 할 지배방정식의 확립에 관한 커다란 문제를 안고 있다. Re-entrant jet, 와류의 생성과 방출, 상변화, 유체의 과도(transient) 현상, 난류현상 등 다양한 복잡요인에 의하여 구성되는 캐비테이션 유동은 고속 gas-liquid two-phase flow이므로 이들을 수치계산에 의하여 해석하기란 쉽지 않다. 따라서 이들을 표현하기 위한 캐비테이션의 수리 및 물리모델의 연구가 지속적으로 이루어졌다. 현재까지 제안된 수리모델 중에서는, 캐비티(cavity) 내부의 다중 스케일 구조를 반영하여 마이크로 기포입자군으로써 캐비테이션을 다루는 기포 모델과, 격자스케일 이하의 구조를 평균화하여 기액 이상 혼합 밀도로서 나타내는 균질 유체모델이 주류를 이루고 있으나, 계산상 편리함 때문에 기포 모델보다는 균질모델에 의한 해석의 예가 많이 눈에 띄었다. 계산 방법에 있어서는 아직도 거시적인 단상류를 기술하는 Navier-Stokes방정식을 베이스로 한 해석기법이 대부분을 차지하고 있고, 극 저마하수의 단상액체와 압축성효과가 현저한 캐비티

가 공존하고 있는 유동장을 어떻게 계산할 것인가가 계산 모델링의 초점이 되고 있다. 비압축성 유동의 어프로치로 설치각이 큰 축류펌프 익렬 및 벤츨리관 내부의 비정상유동 거동의 상세가 보고 된 반면, 압축성 해법에 preconditioning을 가하여 캐비테이션의 정상/비정상 특성, 기포의 붕괴현상과 충격력의 예측, 열역학적 효과에 관한 연구가 수행되었다. 또한, 혼합 밀도의 시간변화율을 증기압과 압력차로 관계 지은 미분형 모델에, 증발과 응축을 고려한 상변화 모델 등의 물리모델의 연구, 액체-증기계와 액체-증기-비응축 가스계의 비교연구와 Erosion Model에 관한 연구가 이루어졌다. 그러나 이와 같은 모델에 의한 수치해석은 아직 기초적인 유동장애의 적용이 대부분이고, 공학적으로 흥미있는 넓은 범위에서의 검증은 앞으로의 과제가 되고 있다.

이와 같이, 캐비테이션 유동의 연구는, 이제 새로운 계측기술과 실험방법의 발전으로 마이크로적인 연구가 가능하게 되었고, 이로써 캐비테이션의 물리적 해명은 물론, 적절한 물리, 수리모델의 구축에도 기여하게 되었다. 또한, 복잡한 기액 혼합류를 위한 CFD 기술은, 수치해법, 모델링, 시뮬레이션 등에 많은 성과를 가져옴으로써 캐비테이션 유동의 거동을 이해하는 데에 유력한 수단이 되어가고 있다. 최근 Pasadena에서 개최된 제 4회 캐비테이션 국제심포지엄에서 발표된 연구 성과를 살펴보다라도, 제3회 Grenoble대회에 비하여 유동해석에 관한 논문이 증가 되었고, 실험과 수치시뮬레이션의 양면에서 유동을 해석하고자 하는 새로운 어프로치도 선을 보여 수치해석에의 비중이 점점 늘고 있음을 실감할 수 있다(발표원문은 모두 <http://cav2001.caltech.edu>에서 다운로드 할 수 있으므로(일부는 2002년 JSME International Journal vol. 45B, No. 3 참조), 독자 스스로 개관적인 평가가 가능하다). 금년 11월 일본 Osaka에서 개최되는 제5회 대회(<http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav2003/>)에서는, 지금까지 제



안된 캐비테이션 모델과 계산방법 및 계산코드의 유효성을 검증하는 포럼이 마련되어 있고, 캐비테이션 소음, 터보펌프에서의 캐비테이션에 의한 비정상현상을 논의하는 장이 마련되는 등, 각종 고도화된 수치예측법이 소개될 것으로 기대를 모으고 있다. [신병록, 토호쿠대학교]

생체유체

생체유체는 혈류역학, 인공장기, 유동가시화 및 생체유변학 등의 분야로서 유체공학 분야와 관련되어 국내외적으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 최근의 융합 기술(fusion technology) 등의 강조와 함께 국가과학기술위원회가 완성한 국가기술지도(NTRM : National Technological Roadmap)에서도 생체유체와 관련한 바이오 인공장기, 고정밀·고성능 생체계측, Bio-LOC, 현장검사(POC) 기기 등의 생명·보건분야 및 정보 통신 분야에 걸쳐 국가과학기술 개발과제로 제시되었다. 생체유체와 관련된 국내의 연구는 대략 54편 정도이며, 이는 전년에 비해 두 배 정도 증가한 것이다. 분야별로는 혈류역학 분야가 가장 많은 28편이고, 인공장기 분야에는 11편, 유동가시화 분야에는 일곱 편, 생체유변학 분야에는 여덟 편이 발표되었다. 발표 학회별로는 대한기계학회에서 10편, 대한의용생체공학회에서 15편, 순환기질환의 공학회에서 17편, 한국유체공학회에서 12편 등이 논문집 및 학술회의를 통해 발표되었다. 물론, 간접적으로 연관된 논문을 포함하면 이보다 상당히 많은 수의 논문들이 포함될 것이다.

먼저, 혈류역학 부문에서는 혈관 내의 유동에 대하여 3차원 유동해석 기법을 이용하여 혈류유동의 특성을 연구한 논문이 주를 이루었다. 특히, 기존의 정상유동 위주의 해석으로부터 실제 현상을 묘사한 맥동유동에 대한 연구로 발전하였으며, 혈액의 점도에 대한 모델링도 기존의 뉴턴유체 가정으로부터 비뉴턴성 유체를 묘사할 수 있

는 Casson model 또는 수정된 Carreau 모델 등을 도입하는 추세를 보였다. 기존의 혈류 역학부문에서 가장 어려운 부분이라고 여겨진 FS(Fluid-Structure Interaction) 해석기술의 발달로 혈관의 탄성(compliance)이 고려된 맥동 혈액유동의 해석이 가능해져 실제 혈관유동에 거의 근접한 해석이 가능해지고 있다. 한편, 이러한 혈류역학적 접근을 통해 혈관내피세포와의 상호 간섭에 대한 연구가 주목된다. 이는 퇴행성 동맥경화와 같은 심혈관 질환 발생에 대한 여러가지 가설들에 대하여 유체역학적으로 계산된 혈관 내의 전단응력이 혈관내피세포에 미치는 영향을 해석한 것이다. 현재, 심혈관 질환 및 암 발생의 열쇠를 가지고 있는 것으로 여겨지는 혈관내피세포에 대한 연구가 의학 및 생명과학분야에서 활발히 연구중이어서 이 분야에 대한 생체유체분야의 연구가 더욱 활성화될 것으로 전망된다. 한편, 이러한 혈류역학에 대한 공학적 접근이 임상의학과 연계되어 진행되고 있어서 매우 고무적이라 할 수 있다. 즉, 혈관수술에 적용되는 Bypass방식 및 Stent Graft가 혈관에 미치는 영향, 수술시 카테터 삽입 등에 의한 영향 등을 혈류역학적 측면에서 분석하여 최적화된 형상 및 새로운 수술기법을 개발하는 등의 연구가 이루어졌다. 또한, 혈류역학의 새로운 시도 중에서도, 심혈관 유동을 전기적 회로에서의 전류가 지니는 유사성을 이용하여 모델링하는 기법이 도입되고 있어 관련분야에 큰 반향을 불러오고 있다.

인공장기 분야는 최근 몇 년간 수행하여온 국책 프로젝트와 연관되어 각 세부 부품에 대한 특성연구들이 발표되었다. 인공 심장에 대한 부분이 주를 이루었으며, 인공심장 내부 유동해석 및 인공심장 내 밸브에 따른 유동, 인공 심장 판막의 운동에 따른 유동 등이 연구 발표되었다. 인공심장의 구동 방식으로 자기부상형 베인리스 원심혈액펌프와 축류형 혈액펌프가 소개되었고, 국내의 독자적 모델인 박동형 인공심장에 대해서도

정리된 연구가 발표되었다. 이와 관련되어 박동식 심폐보조기 개발에 대한 연구가 발표되었으며 이식형 인공 폐에 대한 유동특성, 뇌 선트 밸브의 유동특성에 대한 논문 등이 발표되었다.

생체유동가시화 분야에서는 주로 PIV를 이용한 가시화 연구가 주를 이루며, 미소 유로에서의 혈액 유동, 인공심장용 인공판막의 맥동유동에 대한 가시화 연구를 비롯하여 호흡기 계통의 내부 유동을 가시화한 연구가 발표되었다. 특히, 주목되는 것은 X-ray 영상기법을 이용한 생체 내부의 유동가시화 연구가 발표되어서 관련 분야에 큰 관심을 불러 모으기도 하였다. 그밖에 생체유변학 분야에는 혈액점도를 측정할 수 있는 일회용 점도계 개발에 대한 연구가 발표되었으며, 혈액 점도에 가장 큰 영향 인자이며, 심혈관 질환의 증상과도 연관되는 혈구의 응집 및 혈구 변형성을 측정하거나 또는 점도와의 관련 특성 연구 등이 발표되었다. 또한, 인공 장기와 관련하여 혈구의 손상 및 용혈에 대한 연구도 소개되었다. 이러한 혈액유변학은 기존 진단검사학과 더불어 혈액점도가 심혈관 질환과의 상관성에 대한 연구가 추후 이루어져 임상연구단계를 거쳐 기존의 혈액검사 항목에 새로이 추가되어 질환의 조기진단에도 적용될 것으로 전망된다. [신세현, 경북대학교]

유동제어 및 계측 연구현황

유동제어 분야는 LES와 DNS와 같은 수치해석 기법을 이용한 연구가 두드러졌으며, 미세 유동 관련 실험적 연구도 증가 추세를 보여주고 있다. 능동적 유동제어기법으로는 회전, 음향여기, 초음파 가진, 이온풍, Blowing 및 Suction, 전자기장 등이 활용되었다. 주기적으로 회전하는 원주나 굽은 난류채널의 유동제어에 관한 연구가 수행되었으며, 음향여기나 이온풍으로 원주 후류와 후향단 난류박리 재부착 유동을 제어하였다. 준 최적

피드백 제어를 이용한 원관 내부 유동의 제어와 초음파 가진을 이용한 난류효과 향상 연구가 수행되었다. 이밖에 수평 가진을 받는 용기 내부 유동에 대한 해석과 가열에 기인한 비정상 유동에 대한 연구도 발표되었다. 또 다른 유동제어기법으로 전자기력이 자성유체에 미치는 영향과 전기장이 미세 액적이나 전해질 유동에 미치는 영향에 관한 연구도 보고 되었다.

수동적 유동제어로 Micro-riblet을 이용한 물체의 저항 감소, 표면조도가 사각덕트 표면 마찰에 미치는 영향, 자율제어봉을 이용한 원주후류 제어, 공동을 이용한 마찰력 감소, 폴리머 첨가제와 미소기포 주입이 마찰력 감소에 미치는 영향에 관한 연구 등이 보고 되었다. 이밖에, 톱니형 판이 부착된 원주 후류의 유동특성에 관한 연구와 주기적 와류 내부에 놓인 익형 주위의 비정상 전이경계층에 관한 연구 등이 수행되었다. 고속 충돌제트 유동을 제어하기 위한 노즐 형상의 변화, 제어용 Rod의 설치와 Swirl 효과 등에 대한 연구 결과도 발표되었다.

유동계측 분야에 있어서는 새로운 측정기술의 개발과 함께 복잡한 유동구조를 밝히는 등 많은 발전이 있었다. 특히, 전년도에 비해 PIV/PTV 속도장 측정기법의 개발과 관련 응용연구가 크게 늘었다. 새롭게 소개된 PIV/PTV 속도장 측정기법으로는 Micro PIV, Miniature PIV, Stereoscopic PIV/PTV, 다중 평면 stereoscopic PIV, 3-D PTV, 3-D Volume PIV 등이 있으며, 3차원 속도장 측정 쪽으로 점차 무게가 옮겨가고 있다. 그리고 wavelet 디지털 영상처리 기법을 이용한 응집구조 해석기법과 영상처리에 기초한 입자직경 측정기법도 발표되었다. 이밖에 5공 튜브를 이용한 3차원 유동 측정과 아세톤을 이용한 공연비 측정기술 등이 보고되었다.

속도장 측정기법을 이용한 응용 연구로 다양한 형상의 실린더 근접후류, 경계층 유동, 직사각 프리즘 상면 유동, 부력 제트, 충돌제트, 진동하는



캔티레버 주위 유동, 파형관 및 교반기 내부 유동, 후향단 유동, 곡관 및 분기관 내부 유동 등이 수행되었다. 그리고 축류팬, 임펠러 혹은 프로펠러와 같은 유체기계 내부 유동의 해석에는 위상 평균기법이 적용되었다. 선미주위 유동, 선박 프로펠러 주위 유동과 자유표면 주위 유동과 같은 수리학 연구도 수행되었다. 이밖에, 가솔린 엔진 내부 유동 및 가솔린 분무특성 연구, 인공 판막 주위 유동 등 다양한 연구에 속도장 측정기법이 응용되었다. 산업현장 열유동 문제로 냉장고, 청소기와 압축기 내부유동, 실내기에 기인한 실내 냉기유동 등 가전제품 관련 연구가 많이 수행되었으며, 공장 내부 환기유동 개선을 위한 풍공학 연구도 보고 되었다.

또한 BT/NT 기술에 대한 관심 증가로 인해 MEMS 기술을 이용한 미세 유체기기의 중요도가 증대되어 미세 구조물 내부 흐름의 유동특성을 규명하는 연구가 제법 많이 수행되었다. 직사각형 미세 채널이나 T형 미세 분기관 내부 유동에 대한 micro-PIV 속도장 측정, 사다리꼴 미세 채널이나 모세관 내부 기액 상호 마찰에 대한 연구, Langmuir 미끄럼 모형을 이용한 수치해석 연구 등이 수행되었으며, 마이크로 리블렛과 마이크로 액추에이터 구동에 관한 연구도 소개되었다. 이 밖에 혈류 맥동 유동이나 적조 플랑크톤의 밀도와 확산을 연구한 내용도 발표되었다.

압력계측과 관련하여 Luminescence Quenching에 기초한 PSP 압력장 측정기술과 압력 감지방식으로 혈액의 정도를 측정하는 정도계에 관한 연구가 수행되었으며, 홀로그래픽 측정기법을 이용한 분무특성에 대한 연구와 함께 전자유량계의 개발과 관련한 논문이 몇 편 발표되었다. 그리고 온도장과 대류 열전달계수를 동시에 측정하는 감온성 액정(TLC)기법이 소개되고, 나프탈렌 승화법으로 열 및 물질 전달계수를 측정하는 방법이 소개되었다. LIF 온도장 측정기법을 PIV 속도장 측정기법과 결합하여 비등은 대류유동과 부력제

트의 온도장과 속도장을 동시에 측정한 연구도 수행되었으며, 광열변위법에 의한 열확산 계수 측정법이 발표되었다.

최근 몇 년간의 연구경향에서 볼 수 있듯이 고해상도 CCD 카메라와 고속카메라 같은 광기술의 급속한 발전과 컴퓨터 성능의 향상 등에 기인하여 디지털 화상처리를 이용한 광계측 기술은 향후 유체문제의 규명 및 진단에 있어서 강력한 계측방법이 될 것으로 예상된다. [이상준, 포항공과대학교]

지난 2002년에 보고된 난류유동에 관한 연구들은 수치해석, 실험적 및 이론적 방법을 통해 다양하게 수행되었다. 난류연구는 여러 학제간 연구들과 긴밀하게 관련되는 부분이 많기 때문에 그 중요성이 계속적으로 증대되고 있으며, 난류의 물리적 특성을 파악하고 제어하여, 이를 실제의 공학 문제에 효과적으로 적용하기 위한 노력이 활발히 진행 중이다. 최근에 많이 사용되고 있는 PIV/PTV를 이용한 실험적 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. 난류연구의 성격상 유체공학 전 분야에 걸쳐 긴밀한 상호관계를 갖기 때문에 타 분야와 중복되는 영역이 많으나, 다음과 같이 세분화해 볼 수 있다.

- (1) 난류현상의 물리적 이해를 위한 기초연구
- (2) 복잡한 형상에서의 난류유동 해석
- (3) 난류유동 제어
- (4) 대외류모사
- (5) 난류모델링
- (6) 환경난류

난류현상의 물리적 이해를 위한 기초연구

직접수치모사의 방법을 주로 이용하여 유동장에 존재하는 모든 스케일의 유동을 해상하거나, PIV/PTV를 이용한 실험적 방법을 통해 얻은 데이터를 분석하여 난류의 물리적 특성을 파악한다. 벽면 근처에서 발생하는 난류경계층 및 전단 유동의 해석에 관한 많은 논문들이 발표되었으며, 주기적으로 회전하는 원형 실린더 주위의 유동 특성, 화학반응이 있는 난류경계층과 충격파의 상호작용에 대한 수치해석, 초기 조건 변화에 따른 횡단류 제트 유동의 전단층와류 거동 특성, 직사각형 프리즘 주위의 유동구조에 대한 경계층 두께의 영향, 채널에서의 자기유체의 난류유동에 관한 연구 등 난류 구조에 대한 이해를 높이는 결과들이 많이 발표되었다.

복잡한 형상에서의 난류유동 해석

복잡한 형상에서 발생하는 다양한 클래스의 난류 유동에 관한 해석은 그 필요성에도 불구하고 아직 개선의 여지가 많은 분야라고 하겠다. 총돌 슬롯제트, 맥동 유동, 후향계단 및 실린더 주위의 유동에서 발생하는 후류에 관해서 직접수치모사, 대와류모사 및 PIV에 의한 실험적 방법을 통한 연구결과들이 다양하게 보고되고 있다. 뿐만 아니라 난류박리로 인해 생성된 비정상 후류에 관한 연구, 톱니형 현이 부착된 원주의 근접후류 특성, 후류 내의 익형 위 천이경계층에 관한 연구, 연소기 내의 유동에 관한 연구 등이 지속적으로 진행되고 있다.

난류제어

항력감소를 얻기 위한 난류제어에 관한 연구는 난류의 물리적 현상에 대한 이해가 높아지면서 활발히 진행되고 있으나, 실용적으로 적용 가능한 결과의 도출까지는 지속적인 연구가 필요하다고 하겠다. 다양한 형상의 유동의 경우로 그 적용이 확대되고 있는데, 이중주파수 가진이 후향

계단 유동에 미치는 영향, 가진 펌프에 의한 난류진동 유동, 주기적 회전을 이용한 원봉 후류의 되먹임 제어, 굽은 난류채널 유동의 제어, MEMS 기술을 이용한 미소 리블렛에 의한 항력 감소, 채널 내에서의 준최적제어, 고분자 물질의 첨가에 의한 난류 항력 감소 등에 관한 연구들이 보고되고 있다.

대와류모사

현실적인 공학 문제를 다루기 위해서는 높은 레이놀즈수를 가지는 유동의 해석이 필수불가결한데, 물체의 형상이나 경계조건의 영향을 받는 큰 와류들은 직접 모사하고 보편적인 성질을 가지는 작은 와류를 모델링하는 이 방법은 그 적용 범위가 계속 확대되고 있다. 평판 사이의 정방향 실린더 주위의 유동, 급확대부를 실린더 챔버 내부의 유동 등 복잡한 형상에 적용되고 있으며, 기존의 RANS모델에 비해 여러가지 장점을 가지고 있으므로 앞으로도 다양한 유동장의 해석에 좋은 도구로 활용될 것으로 기대된다.

난류모델링

공학 문제의 해결에 필수불가결한 난류모델링의 개발은 기존 모델의 성능을 확장하여, 여러가지 다양한 종류의 유동에 적용되고 있는데, $k-\epsilon-f_{\mu}$ 모델의 확장인 비선형 난류모델을 사용한 연구, $k-\epsilon-\nu$ 모델을 이용한 총돌제트의 유동해석, 천이 경계층 유동을 예측하기 위한 $k-\epsilon$ 모델의 개발 및 하이브리드 RANS/LES 접근방법들이 보고되었다.

환경난류

아직 많은 결과들이 보고되고 있지는 않지만, 전단증진된 난류확산에 관한 연구 등 기초적인 연구가 진행되고 있으며, 그 응용 대상의 중요성으로 볼 때, 앞으로 더 많은 연구가 진행되어야 할 분야라고 할 수 있다. 동동과 전기장 내에서



의 액체입자의 거동 및 산란에 관한 연구, 혼합층 내의 입자분산에 관한 연구 등이 보고되었다.[나 양, 건국대학교]

전산유체역학

전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)은 컴퓨터를 이용하여 유동 지배방정식인 Euler 방정식, 경계층 유동방정식, Navier-Stokes 방정식 등을 푸는 방법으로써 실험에 비하여 제품의 연구개발에 소요되는 비용이나 시간을 단축할 수 있어 국내외적으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있는 분야이다. 특히, 근래에는 컴퓨터 하드웨어의 발전에 힘입어 획기적인 발전을 거듭해 오고 있으며 국내외의 유체공학관련 학술대회에서 주제별 분류상 가장 많은 논문이 매년 발표되고 있는 분야이다. 2002년도에도 수치 알고리즘 개발, 수렴가속 기법, CFD 코드개발 및 검증, CFD 응용, 최적설계연구, 병렬연산, 유동소음 해석 등의 분야에서 많은 연구가 진행되었으며 상당한 수준까지 연구진척이 있었다. 이들 연구 동향을 간단히 분석하면 다음과 같다.

수치 알고리즘 개발

수치 알고리즘 개발 분야에는 새로운 수치 알고리즘 개발의 어려운 점과 국내 연구진의 편성 특성상 이 분야에 대한 연구가 그렇게 활발하게 진행되지는 않고 있다. 국내에서는 새로운 알고리즘 개발 자체보다는 검증된 알고리즘을 이용하여 새로운 CFD 코드 개발이나 기존 코드의 성능 향상에 더욱 치중되어 있으나, 소수의 연구자에 의해 수치 알고리즘 개발이 꾸준히 진행되어 오고 있다.

수렴가속 기법연구

수렴가속 분야에는 Preconditioning 방법, Multigrid 방법, Conjugate gradient 방법 등으로 크

게 나눌 수 있는데, 각 부분에서 다수의 논문이 발표되었다. 특히, Multigrid 방법은 보통 정렬격자에서 많이 사용되는 방법인데, 최근에는 비정렬 격자를 이용한 Multigrid 방법에 대한 연구가 발표되고 있으며, Conjugate Gradient 방법을 이용하여 수렴 가속시키는 GMRES(Generalized Minimum Residual)방법도 국내에 소개되었다.

CFD 코드 개발 및 검증

CFD코드 개발분야는 전혀 새로운 코드 개발보다는 기존의 코드를 다른 분야로의 응용분야의 다변화에 많은 논문이 발표되고 있으며, 수렴 가속성을 향상시키거나 수치 정확도를 향상시키는 방향으로 많은 연구가 진행되고 있다. 공간상의 정확도 분야에서는 Compact방법을 이용하여 고정도 LES 난류해석을 시도하는 연구가 발표되었다. 그리고 유동소음 분야의 전산해석을 위하여 시간.공간상에서 매우 정확한 수치해석 코드의 필요성이 대두되고 공간상에서는 Dispersion 오차나 Dissipation 오차가 없는 수치해석 알고리즘 및 코드가 필수적이므로 이 분야에 대한 연구에 국내외에서 많은 관심과 노력을 기울여 오고 있다.

CFD 응용

CFD 응용은 유체.터보기계 분야에서 꾸준히 연구발표가 되어 오고 있으며, 최근에는 풍력발전 터빈 설계에도 CFD가 응용되고 있으며, 열교환기 해석, 핵 연료 유동해석, 주방 환기해석, 냉장고 내부 열유체 유동해석, 전자레인지 환기해석, 파이프 내부 Ice Clogging해석, 자동차 전면 유리창의 서리(frost) 해빙해석, HVAC 시스템에 의한 자동차 Cabin 내부유동해석, 폴리머 첨가제 분출에 의한 마찰저항 감소해석 등이 발표되었다. 항공 우주 분야에서는 미사일 주위 초음속 및 극초음속 해석, 항공기 주위 유동해석, 헬기 로터 주위 유동해석 등에 대한 연구가 꾸준히 발표되어 오

고 있으며, 조선분야에서는 선박주위 유동의 CFD 해석은 예전부터 계속되어 오고 있는 분야이나 최근에는 잠수함, 어뢰 등의 수중 기동 물체에 대한 CFD해석이 발표되고 있다. 또한, 선박의 추진기 분야에는 전통적으로 포텐셜 코드가 적용되어 오고 있었으나, 최근의 선박 추진기에는 성능 향상을 위해 가이드 베인이 프로펠러 전방이나 후방에 위치하게 되고, 어떤 경우에는 서로 반대 방향으로 회전하는 Counter-rotating 프로펠러도 장착되는 선박이나 어뢰 등이 개발되고 있는데 이를 포텐셜 코드로 해석하기에는 불가능하거나 패널이 서로 근접하면서 생기는 Singularity 문제로 인하여 해석하기 매우 힘들므로 이를 해석하기 위해 CFD가 최근에 적용되고 있다. 그리고 프로펠러나 선박에 국부적으로 발생하는 Cavitation을 해석하기 위한 수치해석 기법도 소개되고 있다.

최적설계 및 병렬연산 연구

CFD코드와 최적설계 알고리즘을 이용하여 유동성을 최적화하는 기법에 대한 연구는 국내에서도 10여 년 동안 계속 진행되어 오고 있는 분야인데, 예전에는 Conjugate Gradient방법을 이용하는 논문들이 많이 발표되었으나, 최근에는 Adjoint방법을 이용한 항공기 날개의 최적설계에 대한 논문들이 많이 발표되고 있고 Response Surface 방법을 이용하여 제트송풍기를 설계한 논문도 발표되었다. 특히, 최근에는 최적설계방법이 Euler 방정식이나 Navier-Stokes방정식을 여러 번 반복계산하게 됨으로써 많은 계산시간을 필요하게 되어 이 계산시간을 줄이기 위해 병렬연산을 이용하는 논문들이 발표되고 있으며, 병렬연산도 CRAY등의 슈퍼컴퓨터를 이용하는 것보다 PC-Cluster를 이용하여 값싸게 병렬연산하는 방법들이 많이 시도되고 있고 좋은 결과들을 보여주고 있다. 더욱이 최근에는 국가전산망을 이용하여 대규모 병렬연산을 수행하는 GRID사업을 통하여 병렬연산 분야에 밝은 전망을 보여주고 있다.

생체유체역학 해석

최근 국내에 부쩍 생체유체역학에 대한 관심이 대두되고 있으며, 이에 대한 연구논문도 다수 발표가 되고 있다. 아직 이 분야에는 ADINA 상용코드를 이용하는 CFD해석이 주류를 이루고 있는데 이 상용코드를 이용하여 인공심장 혈류나 혈관내 판막 등의 해석이 수행된 적이 있다.

상용코드 이용

수년째 상용코드를 이용하여 유동해석을 하는 연구가 산업체나 연구소, 학계에서 계속 증가하고 있는 추세인데, 국내에서는 Fluent, Star-CD, CFD-ACE, CFX-TASCflow, Fine/Turbo, Flow-3D, KIVA 등이 유체.터보기계의 유동해석에 대한 사례가 많이 발표되었으며 그 외에도 일반적인 내.외부 열유체 유동에 많이 이용되어 오고 있다.[박원규, 부산대학교]

유체 기계

2002년 한 해 동안에도 유체기계 전반에 걸쳐서 많은 연구 활동이 있었다. 유체기계에 관한 연구 동향은 크게 압축기, 가스 및 스팀터빈, 펌프, 송풍기 분야로 대별할 수 있으며, 각 분야에 관한 연구들도 축류와 원심, 실험과 계산 등으로 세분할 수 있다.

압축기

터빈과 함께 유체기계의 가장 중요한 부분을 차지하는 만큼 다수의 연구 결과들이 발표되었다. 먼저 원심 압축기와 관련해서는 디퓨저와 관한 많은 연구 결과들이 보인다. 원심압축기 베인 디퓨저에서의 선회실속 특성을 연구한 것과 가변 디퓨저를 장착한 원심 압축기 불안정성에 관한 실험적 연구가 있으며, 또한 원심 압축기 채널 디퓨저에 대한 성능 예측을 위한 연구도 수행되었다. 이런 디퓨저에 관한 연구외에 입구 안내깃



(Inlet Guide Vane-IGV)의 영향으로 인한 원심 압축기 성능 특성에 대한 실험적인 연구도 진행되었다. 스크류 압축기 분야에서는 스크류 공기 압축기의 성능을 해석한 연구뿐만 아니라 성능을 시뮬레이션한 연구도 있다. 이밖에도 이단 압축기의 동역학적 설계 및 운전 특성에 관한 논문도 발표되었다.

가스 및 스팀터빈 분야

터빈에 관한 많은 논문들이 지난 한 해 동안 발표되어, 활발한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다. 가스터빈 설계에 관해서는 삼중압 열회수 증기발생기와 증기터빈 시스템의 열설계 해석, 가스터빈의 설계 성능과 부분부하 성능 사이의 상관관계 분석, 관류형 증기발생기를 사용한 복합발전용 초임계압 하부시스템의 성능 설계해석 등을 수행한 연구들이 있다. 세분하여 축류터빈 분야에서는 터빈 로터의 팁 간극이 터빈 성능에 미치는 영향에 대하여 수치해석적으로 접근한 방법이 있으며, 특히 실(seal) 간극으로 인한 축가진력을 예측한 연구 결과가 발표되어 주목을 받았다. 3차원 축류형 터빈에서는 입사각의 영향에 관하여는 실험적으로 접근하였고, 2차원 축류형 터빈에서는 손실을 줄이기 위한 블레이드 형상에 관심을 가진 연구가 수행되었다. 터빈 블레이드에 관해서는 터빈 입구 온도가 높기 때문에 냉각과 열전달 문제에 주로 관심을 보였다. 터빈 블레이드 형상 곡면에서의 막냉각 효율 특성에 관한 연구, 큰 회전각을 가지는 터빈 블레이드 표면에서 나프탈렌 승화법을 이용한 열전달계수 측정에 관한 연구 등이 수행되었고 회전하는 터빈 블레이드 내부 이차냉각유로에서 엇갈린 요철과 평행요철이 열/물질전달에 미치는 영향을 다룬 것도 있다.

펌프

펌프 분야에서는 과거에 비해 수치 해석적으로 많은 연구 성과들이 있었다. 이런 연구 결과들 중에서 몇 가지 예를 들면, 액체로켓용 터보펌프 성능예측에 대한 연구와 산화제 터보펌프의 구조 강도 및 진동 안전성에 관한 연구를 들 수 있다. 이밖에도 터보펌프용 연료펌프의 평균유선 성능 해석에 관한 연구도 있다. 특히 축류펌프에 관해서는 수치 모사를 통한 이중원호 익렬의 성능 예측과 유전적 최적화 기법을 이용한 축류 펌프의 설계가 수행되었다. 펌프 내부의 부품들에 대한 연구로는 인두서에 관한 것으로 터보펌프 인두서의 유동 및 성능에 대한 연구, 터보펌프 인두서의 흡입성능에 대한 직경과 회전속도의 영향에 관한 연구, 펌프 인두서의 캐비테이션 모드 분석에 관한 연구 등이 진행되었다. 반면에 임펠러에 대한 것으로는 원심 펌프 임펠러의 출구에서 유동을 측정하는 것이 있다.

송풍기

축류팬과 원심팬으로 나누어 보면, 먼저 축류팬에서는 비정상 압력측정을 통한 축류팬 유동특성에 관한 연구, 엇회전식 축류팬의 공력 특성에 관한 실험적 연구, 축류팬 후류의 유동을 Stereoscopic PIV 기법을 이용해 측정하는 연구 등이 있다. 원심팬에 관한 연구로는 터보팬의 비정상 유동장 및 공력소음을 해석한 것이 있다. 이외에도 점성 계산을 사용해서 작은 프로펠러 팬에서 유동과 성능 특성을 수치 해석하기도 했다.

이뿐만 아니라 유량계 및 밸브에 대한 연구나 회전체 동역학 분야에 대한 연구 결과도 발표되어 전반적으로 유체기계 전 분야에서 많은 연구 성과들이 있었다.[송성진, 서울대학교]