

# 열공학부문

유재석 · 부문화장(아주대학교, 교수)

\_e-mail : jyoo@ajou.ac.kr

이 글에서는 대류 및 물질전달, 복사 열전달, 공정열공학, 환경 및 공해, 냉동 및 저온공학, 연소공학, 마이크로 열공학, 수소 및 연료전지, 열기기 및 열교환기, 열시스템 제어 및 계측, 열역학 및 열물성 등 열공학 분야의 2007년도 한 해 동안의 연구 동향에 대해 소개한다.

## 대류 및 물질전달

열 및 물질 전달 분야에서는 마이크로 채널의 열전달, 증발기의 착상, 2개 실린더의 유동 및 열전달, 지열원을 이용한 냉난방 시스템에 관한 연구 등이 있었다.

마이크로 채널에 대한 연구는 2006년에 이어 2007년에도 꾸준히 이루어졌다. 이는 컴퓨터 산업의 발달로 중앙처리장치 내 칩의 집적화, 연료전지의 개발, 고효율 고집적 열교환기의 필요성에 의한 것으로 보인다. 연구결과물들을 살펴보면, 단일 유로에 대한 전산해석, 다 채널 유로에 대한 열전달 연구, 채널 내의 상변화에 대한 열전달 등 다양한 연구가 이루어졌다. 마이크로 채널 뿐만 아니라 마이크로 냉각기, 마이크로핀 등 MEMS와 관련된 연구가 많이 발표되었다.

증발기의 착상에 대한 연구는 냉동공조 기기에 관련한 연구가 주를 이루었다. 기존 증발기에 대한 착상뿐만 아니라, 냉난방 기능이 동시에 수행할 수 있는 에너지 절약형 열펌프의 착상에 대한 연구가 진행되었다. 착상이나 제상은 냉동공조 기기의 성능에 큰 영향을 미치는 요소이므로, 이러한 연구는 매우 중요하다.

2개의 실린더 연구는 열교환기의 관군, 원자로 등 관련분야의 기초연구 자료로 중요성을 띠고 있다. 2개의 실린더 유동은 후류의 간섭작용에 의해 결정지어지는데 이때의 유동현상 특성 및 열전달에 대한 연구가 진행되었다. 2개 실린더 사이의 거리와 배열 형태에 따른 유동현상 및 열전달계수에 대한 연구가 이루어졌다.

지열원을 이용한 냉난방시스템

에 관한 연구를 살펴보면 전산해석과 열저항-열용량법(thermal resistance capacitance method)을 사용하여, 냉난방 부하의 해석과 함께 히트펌프 시스템의 효율을 계산하였다. 이와 같이 냉난방 부하의 예측은 지열원을 이용한 냉난방 시스템의 초기 설치비용이 매우 높기 때문에 중요하다.

이 외에도 경사제트에 따른 충돌제트에서의 열/물질전달, 고선회 터빈의 동익 팁 표면에서의 열전달, 나노 유체에서의 열전달 현상, 액적의 증발 현상 등에 관한 연구가 진행되었다.

(하만영, 부산대학교)

## 복사 열전달

복사 열전달은 전달 매개체를 필요로 하는 전도 및 대류 열전

달과는 달리 전달 매개체가 없는 진공을 통해서도 전달될 수가 있다. 이러한 복사 열전달은 전자파(electromagnetic wave)의 형태로 전달되며 진공 속에서는 전달 저항이 없이 쉽게 한쪽 표면에서 다른 쪽 표면으로 전달된다(표면복사; surface radiation). 반면에 전자파의 진로 상에 참여 매체(participating media)가 존재할 경우 복사열의 전달은 장애를 받게 되어 매체에 흡수되거나 또는 전달 방향이 바뀌는 산란을 겪게 된다(체적복사; volumetric radiation). 이러한 참여매체의 복사 특성은 파장에 따라 매우 민감하게 변하며(non-gray) 또한 방향에 대하여도 비등방적으로 전달(anisotropic transfer)하는 특성을 보인다. 복사 열전달은 고온에서 매우 중요한 열전달 방식(보일러, 산업용로, 로켓엔진, 가스터빈, 자동차용 엔진 등)이며, 이외에도 위성을 이용한 자원 탐사 및 극저온 기기의 보온 등 낮은 온도에서도 복사 열전달을 중요하게 고려해야 한다.

2007년도에 발표된 복사 열전달 관련 논문들 중에는 체적복사에 대한 해석 기법의 정확도 비교 연구, 비회색(nongray) 가스 복사를 고려한 연구, 복사 역해석 방법(inverse radiation problem)에 대한 연구, 열역학적 밸런스에 관한 연구, 실제장치의 설계 및 해석에 응용된 복사 열전

달 해법 연구, 복사열전달을 측정하는 연구 등이 있었다.

이러한 2007년도 발표 논문들의 내용을 간략하게 살펴보면 다음과 같다. 고체 추진 로켓의 배기 플룸 내에 알루미늄 입자를 분사시킨 경우의 열복사를 예측하는 기법 중 형상계수를 이용한 방법을 Space Shuttle의 SRB(Solid Rocket Booster)에 적용하였고 이 결과를 Monte Carlo Method결과와 비교분석한 연구가 진행되었다. 가열로 내의 스킵드 구조물(Skid button + Skid pipe)에 의한 복사차단 효과를 고려한 기체 열복사 해석을 통하여 가열로 각 위치에서 슬랩으로 유입되는 열유속을 계산하고, 이를 경계조건으로 사용하여 슬랩 내부 온도분포를 예측하는 연구 결과도 발표되었다. 복잡한 지배방정식을 가지는 역복사 문제를 기존의 유전 알고리즘보다 효율적으로 해석하기 위하여 RPO 알고리즘에 기반을 둔 반발 입자 군집 최적화(Repulsive Particle Swarm Optimization; RPSO) 알고리즘을 2차원 비직교 형상에서의 역복사 해석에 적용하여 성능 검토 연구, RPSO 알고리즘을 이용한 온도 측정값으로부터 벽면 방사율 추정 연구 및 복사 열손실이 수소 확산화염의 소멸 현상에 미치는 효과를 수치해석적으로 연구가 진행된 결과들도 발표되었다. 산림지형에서 유동과 온도의 변화

는 복사에너지의 영향이 지배적이며, 숲과 대기의 모델을 이용한 수치해석을 수행하여 산림지형 경사면에서의 유동형태 및 온도 변화를 예측하는 연구도 수행된 바 있다. 전기 용해로 설계 시 요구되는 최적화를 구현하기 위하여 용해로 내에서 지배적인 열복사에 대한 열전달 해석 연구가 있었다. 또한 복사관(Radiant tube) 및 열처리로의 해석 모델을 이용하여 복사관 내의 연료유량, 재료의 체류시간 및 두께 변화에 따른 열처리로 내부 판의 온도 분포를 예측하기 위한 수치해석을 수행하여 기존의 실험 결과와 비교분석한 결과가 발표된 바 있다. 그리고 실린더형 고온 태양열 흡수기 모델을 대상으로 강제 대류식 열 이송 방법과 히트파이프식 열이송방법의 열전달 특성을 비교 분석한 결과도 발표되었다. 세라믹 화이버 매트를 이용한 표면 화염버너를 대상으로 열용량과 초기공급압력의 변화에 따른 배기 배출물의 특성 파악 및 복사강도를 측정된 결과가 발표되었다. 두 종류의 다른 세라믹 화이버 매트(Non-perforated & Perforated)가 설치된 표면 화염버너에 대하여 열용량 및 당량비에 따른 연소 특성 및 복사강도를 측정된 결과가 발표되었으며, 다공성 세라믹 매트를 이용한 복사 버너에서 열용량과 공기 과잉을 변화에 따른 화학발광(chemiluminescence) 배출특성 및 배기배

출특성을 비교한 실험 결과도 발표되었다. (김태국, 중앙대학교)

## 공정열공학

2007년도에 대한기계학회논문집 B 권에 게재된 논문들 중 공정열역학 분야로 분류 가능한 논문의 수가 다른 분야에 비해 적은 것이 특징이다. 해당분야 논문들을 살펴보면 유사한 논문들을 주제별로 분류를 하는 것이 큰 의미가 없을 정도로 다양한 주제를 다루고 있다. 해당 논문에 대한 내용을 간략하게 살펴보면, 반응로 형상에 따른 주기적으로 배열된 패턴위의 GaN 성장 특성에 대한 연구가 발표되었다. 이 연구에서는 반응로 규모 모델에서 반응물질의 속도, 열적 대류현상 및 화학 반응을 고려한 모델해석을 수행하여 GaN 증착률을 예측하고 다양한 반응로 형상에 대해 균일한 증착을 위한 열적 조건을 제시했으며, 또한 표면해석을 위한 시뮬레이터를 사용하여 시적인 패턴의 형상 및 구조의 영향을 검토하여 패턴 위에 형성되는 GaN층의 정량적인 두께 및 형상에 대하여 연구하였고, 특히 결정성장의 품질에 결정적인 영향을 주는 반응로 형태, 패턴의 형상, 주기성 및 유동 조건에 대한 정량적 분석을 수행하는 연구가 발표되었다. 한편 자기영동을 이용한 자성입자 분리 마이크로칩 제작 및 성능평가에 대한 연구에서

는 마이크로채널 하부에 열을 발생시키지 않고도 자성입자의 부착이 가능한 마이크로 영구자석을 도금 기술을 이용하여 집적화하고 채널 내부에 형성되는 일정한 자기력과 유체 흐름에 의해 자성입자에 가해지는 유체력의 크기 차이를 조절하여 흘러가는 자성입자의 탈부착이 가능한 자성입자 분리 칩을 제작하고, 그 성능을 실험 및 수치 해석을 통해 평가한 결과가 발표되었다. 흡착/축매 공정개선을 위한 사이클론 내 유동특성 및 활성화탄 체류시간 산정을 위한 연구에서는 사이클론에 활성화탄이 주입된 경우에 사이클론 내에서 연소가스와 활성화탄 입자의 유동 특성을 분석하였으며, 사이클론 내 연소가스와 활성화탄 입자의 체류시간을 산정하는 연구가 발표되었다. 한편 또 다른 연구에서는 연소 배출가스의 유입방식에 따른 백필터를 활용한 다이옥신과 NOx를 동시에 제거할 수 있는 흡착/축매 통합공정 시스템 개발과 관련된 연구 결과가 제시되었다. 클린룸 제조공정에서 수율개선을 위한 입자오염제어 방법과 관련된 연구에서는 반도체 제조라인에 비해 청정도가 낮고 다소 단순한 제조라인에서 공정분할평가법과 성분분석법을 이용하여 불량원인을 분석하고 입자오염제어에 대한 결과를 평가하는 연구가 제시되었다. 한편 GlidArc 플라즈마를 이용한 메탄의 개질 특성 및 수

소 생산에 있어서 저온 플라즈마를 이용하여 낮은 전력을 소비하고 방전 영역을 최대화하기 위해 부채꼴 타입의 전극을 갖는 개질기를 설계하였고, 또한 촉매 반응기와 연계하여 메탄으로부터 수소를 생산하는 최적 조건에 관한 연구를 수행한 논문이 발표되었다. 열 잉크젯 프린터헤드의 채널간 간섭현상의 모델링을 연구함에 있어서 복수의 채널 분사성능에 채널간 구동 시간간격이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 돛트헤드의 열 개의 채널에 대해 액적 분사 가시화 실험을 수행하고, 집중질량 유동 모델 결과와 비교하였으며, 상호간섭 저감설계의 일환으로 유로구조 중 입구 직경을 선정하는 방법을 제시하는 결과를 발표하였다. 2007년도에는 적은 수의 논문들이 공정열역학 분야에서 발표되었지만 차후에는 많은 논문들이 투고되기를 바란다. (김우승, 한양대학교)

## 환경 및 공해

환경공학 및 환경정책 전문가들의 역할이 사회적인 이슈를 제공하여 많은 사람들의 관심을 불러들이는 것이라면 기계공학자들의 역할은 환경 오염원을 감지하고(sensing) 제거하는(control) 하드웨어 및 시스템을 설계하고 제작하는 일이다. 여기에 나아가 평가 및 표준화 기준을 정함은 매우 중요한 기계공학 분야이다.

환경 오염원으로는 NOx, SOx, VOC, 악취 등의 가스상 물질과 분진, 매연, 바이오에어로졸(박테리아, 포자류 등)의 입자상 물질이 있다. 이들 오염원과 관계되는 기계 시스템으로는 자동차, 연소기, 소각로 등과 같은 에너지 변환 시스템, 냉장고, 에어컨, 공기청정기, 환기유닛과 같은 가전 및 공조설비, 그리고 반도체 공정 반응로, 정보기기 등의 정밀기기 등 다양하다. 이와 같이 21세기 환경 및 공해 문제를 해결하기 위한 기계공학적인 접근 방식은 최근 기계공학에서 접근할 수 있는 요소기술이나 시스템 기술이 기존의 설비 측면뿐 아니라 환경/에너지기술(ET), 바이오기술(BT), 나노기술(NT)이 결합되는 새로운 형태로도 나타나고 있다.

다음에는 대한기계학회뿐 아니라 설비공학회, 연소학회, 자동차공학회, 폐기물학회, 대기환경학회, 실내환경학회, 입자에어로졸학회 등 다수의 유관학회에서 활동한 이 분야 국내 기계공학 연구자들의 연구동향을 크게 1) 청정·연소기술 및 연소 배출 물질 평가/제어 기술, 2) 실내 공기질 및 환기기술, 3) 환경처리기술 및 오염제어기술 등의 관점에서 살펴보았으며 관련 대형 사업 등을 소개한다.

### 1) 청정 연소기술 및 연소 배출 물질 평가/제어 기술: 자동차 관련

최근 경유 자동차에서 다량으로 배출되는 입자상 물질(PM; Particulate Matter)이 발암물질로 알려짐에 따라 자동차 배기가스에 대한 인식이 달라지고 있다. 자동차에서 배출되는 PM은 대기중으로 확산, 이동하여 물리화학적 반응을 통해 대기환경에 영향을 미치고, 대기 중 체류하는 극미세입자는 인체의 호흡기를 통해 폐로 침투하여 질병을 유발할 수 있다. 그러므로 자동차에서 배출되는 PM을 효과적으로 규제하고 관리하기 위해서는 PM 현상을 정확히 규명하고, 이러한 기초 연구를 바탕으로 대기오염의 기여도 평가, 인체 위해성 평가, PM 측정방법의 표준화 기술을 개발하여야 할 것이다.

수도권 대기환경개선 특별법에서는 자동차 배출을 줄이기 위하여 저공해 자동차 구매비율을 의무화하고, 배출가스 보증기간이 지난 중, 대형 경유 자동차의 배출가스 검사를 강화하여 불합격한 경우 배출가스 저감장치 부착, 저공해엔진으로 개조, 폐차 등의 조치를 취하도록 하고 있다. 저공해 자동차는 (1) 전기 자동차 등 오염물질을 배출하지 않는 자동차를 1종, (2) 가스 자동차 및 하이브리드 전기 자동차 중 오염물질 배출량이 차기 제작차 배출허용기준을 만족하는 자동차를 2종, (3) 휘발유, 경유 자동차 중 차기 제작차 배출허용기준을 만족하는 자동차와 가스 자동차 중

질소산화물을 일정 비율 이상 저감시킨 자동차를 3종으로 구분하고 있다. 이와 관련하여 새로운 규제에 대비하여 배출가스 저감 장치의 성능을 평가할 수 있는 기술이 개발되어야 하고, 특히 극미세입자의 개수농도 검사장치가 필요할 것으로 예상된다. 현재 대도시 대기오염의 주원인이 경유 자동차로부터 배출되는 매연과 PM임을 고려할 때, PM의 생성 메커니즘 분석 및 측정방법의 확립을 통한 PM 저감기술 개발은 매우 중요하다. 이러한 PM 측정 및 저감기술은 디젤엔진만이 가지고 있는 문제인데, 상대적으로 우수한 열효율과 연비(CO<sub>2</sub>저감) 특성을 가지는 디젤엔진의 장래와 관련하여 이 문제점은 반드시 해결되어야 한다. 이와 관련하여 미래형자동차 배기가스 제로화 기술 개발 사업과 무·저공해 자동차 사업이 진행 중에 있다.

또한 친환경 자동차에 대한 수요의 증가로 인해 하이브리드 자동차와 수소 자동차 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하이브리드 자동차의 경우 내연기관 엔진과 전기모터를 동시에 사용하는 차량 시스템으로 높은 연비를 달성할 수 있어 친환경 자동차로 각광받고 있으며, 일본 도요타 자동차 등에서 기술을 선도하고 있다. 수소 자동차의 경우, 수소를 연료로 사용하기 때문에 배기가스 문제로부터 자유로울 수 있는 미래형 자동차로 기

대를 받으며 전 세계적으로 연구가 진행 중에 있다. 수소 자동차는 크게 내연기관과 동일한 원리로 수소를 직접 연소하는 방식과 연료전지를 이용하여 전기 모터를 구동하는 방식의 수소 자동차가 연구되고 있다. 수소 자동차에 관한 연구와 함께 수소를 공급할 수 있는 수소 충전소 관련 연구도 진행되고 있으며, 국내에서는 현대자동차 남양연구소, 한국에너지기술연구원, 한국가스공사, 연세대학교 등에 수소 충전소가 설치되어 관련 연구를 수행 중에 있다.

2008년 한국자동차공학회 학술대회 발표를 보면 친환경 자동차와 관련하여 구체적으로 다음과 같은 다양한 연구가 진행되고 있다.

- 디젤엔진의 NOx 저감을 위한 SCR DeNOx 촉매의 정상 및 비정상 성능해석
- 디젤여과필터에서 퇴적되는 입자상 물질의 퇴적량 예측
- LNT의 기하학적 형상이 NOx 전환 효율에 미치는 영향에 대한 수치적 연구
- SI 엔진의 에탄올 연료(E100)의 연소 및 배기특성에 관한 연구
- 하이브리드용 가솔린 엔진에서 최적 EGR적용에 따른 성능 및 배출가스 특성 분석
- 배기시스템의 성능개선을 위한 배기공동파이프 연구
- 연료전지자동차용 고압수소저

장시스템의 신뢰성 평가에 대한 연구

- 고분자전해질형 연료전지의 CO<sub>2</sub> 공급에 따른 성능변화 측정
- 하이브리드 연비 해석을 위한 최적화 기법
- 하이브리드 자동차의 시스템 출력 시험방법에 대한 연구

### 2) 실내 공기질 및 환기기술

다중이용시설 등의 실내공기질 관리법이 시행된 이후, 포름알데히드(HCHO), VOC, 나노-PM, 바이오에어로졸 등에 대한 일반인들의 관심이 증가되었고 학계에서는 실내 공기질의 관심에 부합하여 정밀측정 및 환기 기술과 관련된 연구가 많이 진행되었다. 이와 관련하여 미래도시의 웰빙을 위한 실내공기질 관리기술 개발 사업과 저에너지 친환경 공동주택 연구단 등의 국책 사업이 진행 중에 있으며, 2008년도, 환경부 지원 하에 다음과 같은 연구 과제가 수행 중에 있다.

- 실내 초미세입자 발생원, 배출량 평가 및 관리방안 수립
  - 실내(공공화장실 등) 악취물질 제거용 맞춤형 복합필터 및 소형 필터유닛 개발
  - 고효율 광촉매 나노 복합 코팅소재 및 응용기술 개발
  - 나노섬유 플로킹 기술을 이용한 캐빈 에어 복합필터 개발
- 또한, 2007년도 한국실내환경학회 학술대회 발표를 보면 다음

과 같은 다양한 연구 활동이 있었다.

- 생태건축자재의 자연적인 휘발성 유기화합물 성분 비교 연구
- 환경모니터링을 위한 MEMS 기반 집적형 입자감지칩
- 미생물 배양조건에 노출된 필터의 가스방출 현상 연구
- 생활공간 식물 투입률에 따른 포름알데히드 제거 효율
- 자연환기용 정전필터와 프리필터의 입자상 오염물질 저감 특성
- 거주시간 증가에 따른 공동주택 실내오염도 변화 추이

### 3) 환경처리기술 및 오염제어기술

여러 환경문제 중 폐기물 처리 등 우리 생활 주변의 문제와 더불어, 대기오염이 원인이 되는 오존층 파괴, 지구 온난화, 산성비 등의 여러 부분에 영향을 미친다. 현재 우리나라는 경제의 급성장으로 대기오염 양상도 과거의 아황산가스와 일산화탄소 오염에서 광화학스모그, 오존, 미세먼지, 유해 대기오염물질 발생 등 형태가 빠르게 변하고 있으며, 중국 등 인접국가의 급격한 산업화 추세에 따라, 산성비 원인물질 등 국경 간 오염물질의 이동이 증가되고 기후변화, 오존층 파괴 등, 전 세계적으로 대기오염에 대한 위기意識이 고조되고 있다. 국내에서는 대기오염의 주원인으로 주목 받고 있는 입자상 물질과 기체상

오염 물질을 저감시키기 위한 연구가 활발해지고 있다. 또한 공기 중 미세 입자에 대한 분석 기술에 대한 연구가 있었다.

2008년 대기환경/폐기물처리 부문과 관련된 연구는 다음과 같다.

- 청정연소용 대용량 무탈진 심층여과 카트리지와 개선형 여과장치 상용화 개발
- 소규모 영세 VOCs 배출시설에 적용 가능한 저비용·고효율 VOCs 회수장치 개발
- 반도체 배출가스 처리용 2단 전기 패킹 스크러버 시스템 개발
- 고품연료(RDF)의 원료기준 및 연소시설 운전지침 마련 연구
- 폐석탄회를 재활용한 혼합형 혼합재 및 골재 개발

또한, 2008년에는 환경부 Eco-Star 사업의 일환으로 폐자원 에너지화 및 non-CO<sub>2</sub> 온실가스 사업단이 발족되어 에너지 전환 가능성이 높은 유기성 폐기물, 바이오매스 및 가연성 폐기물 등을 대상으로 열전환 공정을 개발·적용하여 경제성 있는 친환경 에너지를 확보하고, 메탄, N<sub>2</sub>O 및 불소화합물 등 온실가스를 배출하는 시설을 대상으로 효율적인 저감 기술을 개발·적용하여 국내 온실가스를 저감함과 동시에 CDM 사업화를 도모하는 것을 목표로 연구가 진행 중에 있으며, 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

1. 유기성 폐기물 기술 개발

2. 바이오매스 폐기물 기술 개발
3. 가연성 폐기물 연료화 및 열활용 기술 개발
4. non-CO<sub>2</sub> 온실가스 저감 기술 개발

(황정호, 연세대학교)

### 냉동 및 저온공학

최근 냉동 및 저온공학 분야의 연구들은 대한기계학회논문집보다는 주로 대한설비공학회논문집과 한국초전도저온공학회논문집에서 많이 찾아볼 수 있는데, 먼저 상온 냉동 분야에서의 연구 동향은 다음과 같다. 멀티에어컨처럼 시스템형 냉동 공조시스템에 대한 연구가 지속적이며, 이산화탄소를 비롯한 대체 냉매를 이용한 냉동 및 열펌프 사이클, R-134a를 대체할 자동차용 냉동 사이클에 적용되는 냉매에 대한 연구, 가연성 냉매의 특성 연구, 열전모듈 냉방기 등이다. 또한 순수 냉동과 관련된 연구는 아니지만, 냉각을 위한 히트 파이프 또는 열사이폰에 대한 연구도 꾸준히 이루어지고 있다. 특히 신냉매를 사용하는 냉동 사이클에서는, 사이클 효율 계산과 최적 시스템 구성에 필수적인 열교환기 설계 기본 자료로서 응축 열전달계수를 연구가 이루어졌으며, 초임계 사이클인 이산화탄소 냉동 사이클에서는 내부 열교환기 및 팽창기를 적용하여 효율 증가를 이룬 연구가 흥미로운 결과를 도출하

였다. 한편, 국제적인 연구 동향을 보면, 가연성 냉매이지만 비교적 낮은 GWP를 갖는 R-152a, 고압 사이클이지만 최근에 활발한 연구가 이루어지고 있는 이산화탄소, 화학 업체 회사들이 새로운 냉매로서 제안한 HFO-1234yf 등이 차세대 자동차용 냉매로서 치열한 경쟁을 벌이고 있고, 이를 위한 새로운 압축기, 열교환기에 대한 연구도 중요한 내용이다. 현재 에너지원의 수요 문제가 국가의 가장 중요한 정책 중의 하나가 되고, 고유가 시대에 절실한 에너지 시스템의 효율 향상이 기대되면서, 국내에서도 액화 천연가스(LNG)에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이는 단지 저가로서 액화 천연가스의 공급망을 확보하는 것뿐만 아니라, 전체 LNG 가치 체인(value chain)에 대한 관심을 의미한다. 예로서 LNG 운송선에서 발생하는 BOG(Boil-off Gas) 재액화 장치에 대한 연구, LNG의 냉열 엑서지 이용 연구가 이미 이루어졌으며, LNG 액화 가스 플랜트에 대한 연구 개발 의지와 노력도 두드러지고 있다. 대부분의 LNG 액화 가스 플랜트는 혼합 냉매 사이클을 이용하고 있는데, 이 경우에 질소와 4가지 혹은 그 이상의 탄화수소를 적절한 비율로 섞어서, 혼합냉매로서 사용하는 J-T 극저온 냉각 기술이 다시 중요한 관심사가 되고 있다. 다성분의 혼합냉매 냉동사이클에서는

각 냉매 성분의 비등점 차이에 따라서 열역학적 물성치에 대한 예측도 간단하지 않지만, 다양한 저온에서 발생하는 액체-기체의 상분리, 상변화와 냉매 성분 변화가 수반된 열교환기에 대한 적절한 설계 등도 복잡하기 때문에 대개 실험적인 방법과 현장 경험에 의하여 냉동 시스템의 구성이 이루어진 경우가 많은데, 좀더 나은 열역학 및 이동 현상 모델링과 열전달 기초 실험 데이터를 통하여 향후 흥미로운 연구 성과가 도출될 것으로 기대된다.

저온공학 분야에서 연구되는 최근의 특징은, 첫째 고온 초전도 시스템의 응용과 관련하여 20-30K용의 고효율, 60-70K용의 대용량 극저온 냉동기 개발이 있고, 둘째 상용화에 중점을 둔 고온 초전도 시스템의 효율적 냉각 방법에 대한 연구, 셋째 스텔링, 맥동관 냉동기, 소형 J-T 냉동기의 다양화, 모델링과 기본 현상 규명 연구가 있다. 고온 초전도 시스템의 진정한 상용화는 극저온 냉각기 또는 저온 유체 관리 시스템과 밀접한 관계가 있고, 또한 저온 냉각 장치가 전체 초전도 응용장치 시스템의 신뢰성을 좌우할 수도 있기 때문에, 저온 냉각 장치는 전체 초전도 응용장치 시스템에서 매우 중요한 부분이다. 초전도 시스템의 냉동 및 냉각 관련 연구는 국내에서 21세기 프론티어 사업을 통해서 주로 이루어졌지만, 이외에도 고온 초

전도 코일 에너지 저장 장치, 초전도 플라이휠 에너지 저장 장치 및 고온 초전도 케이블 연구개발 프로그램을 통해서, 1세대 고온 초전도 도체인 BSCCO ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Can}_{1-x}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ) 또는 2세대 고온 초전도 도체인 YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-n}$ )를 위한 냉각 연구가 활발하다. 상용화 고온 초전도 시스템의 대용량 극저온 냉동기로서 후보가 될 수 있는 것은, 질소 및 네온을 사용한 역브레이튼 냉동기, 고효율 재생기를 사용하는 스텔링 냉동기, 스텔링형 맥동관 냉동기가 가장 먼저 생각되고 있는데, 스텔링 냉동기는 가장 완숙한 기술로서 일부는 이미 상업화되었다. 이외에도 혼합냉매를 사용하는 J-T 냉동기의 경우에는 기계적인 팽창기를 사용하지 않으므로, 60-70K 용으로는 기존의 질소 중심 냉매에 네온 또는 헬륨을 첨가하여 상용화할 경우, 저가의 극저온 냉동기로서 높은 가치가 있다고 본다. 다만 이러한 냉동기를 설계, 제작하는 데에는 오일 분리 압축기와 고효율 열교환기의 이용이 필수적이다. 맥동관 냉동기에 대한 연구는 아직도 꾸준한 추세이며, 두드러진 연구 내용으로서는, 저온 진공 펌프용 2단 맥동관 냉동기의 개발, 복열기(recuperator)를 사용하는 탠덤형 2단 맥동관 냉동기, 선형 압축기의 동특성을 고려한 스텔링형 맥동관 냉동기의 설계, 100Hz 이상의

고주파 작동형 맥동관 냉동기가 주목된다. J-T 냉동기 분야는 전통적으로 소형 및 쾌속 냉각을 목적으로 하는 군사용 고압 아르곤 가스 사용 냉동기, 극저온 수술기구용 냉각기가 있고, 앞에서도 언급하였듯이, LNG 생산 플랜트에서 시발된 혼합 냉매 냉동 방식에서는 그 효율을 높이기 위하여 공정과 냉매 조성의 변화, 그리고 보텍스 튜브 및 이젝터를 사용한 팽창 방식을 포함하여 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 이러한 극저온 J-T 냉동기는 열교환기에서 발생하는 압력 손실에 의한 엔트로피 생성도 전체 시스템의 효율 저하에 적지 않은 영향을 미치기 때문에, 냉동 시스템의 최적 설계 시에 이를 심도있게 고려하여야 한다. 극저온 냉동 및 냉각 분야에 대한 연구는 초전도 시스템의 상용화, KSLV(Korea Space Launch Vehicle)-1 액체연료 추진 로켓 개발, KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research), LNG 가스 플랜트 사업과 관련하여, 현재 어느 때보다도 더욱 국내에서 관심이 집중되고 있으므로, 다양한 방향으로 기초에서 응용까지 더 많은 연구 개발과 응용이 기대되고 있다.

(정상권, KAIST)

## 연소공학

지난 한 해 동안에 발표된 논

문 중 엔진연소 분야를 포함하여 연소공학 분야로 분류되는 논문은 대한기계학회논문집 B권에 23편과 Journal of Mechanical Science and Technology(KSME Int. J.)에 7편으로 총 30편이 발표되었다. 대한기계학회논문집의 경우 2006년 27권에 비해 다소 감소하였으며, KSME Int. J.의 경우에도 2006년 16편에 비해 현저히 감소하였다. 이들 논문들은 분야별로 엔진연소 관련 분야 총 12편, 연소 불안정성 총 5편, 유해물질 발생특성 및 저감법에 대한 연구 총 4편, 소형 연소기, 가스 개질 및 촉매연소 등 신연소법에 대한 연구 총 9편이 발표되었다. 각 연구 분야별로 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

디젤 엔진에 관련된 연구로, 엔진 내부의 화염 온도와 매연의 정보를 이색법을 사용하여 규명한 연구, 연료의 임계조건을 고려한 분사압력, 주위가스온도 등의 분사조건이 액상분무거동에 미치는 연구, 분사운동량을 변수로 하여 분무선단도달거리를 예측하는 분무모델 개발에 관한 연구, 엔진 내에서 가스상 탄소분자의 상변화에 의해 형성되는 soot 생성 모델을 KIVA code에 구현하여 엔진내부에서 soot 생성 특성을 이론적으로 고찰한 연구가 보고되어 있다. 가솔린 엔진에 관련된 연구로, 예연소실을 갖는 점화플러그를 사용한 경우의 연소특성 개

선에 관한 연구, LPG엔진에서의 LPG연료의 조성비가 개별적인 HC 배출특성 및 시동성에 미치는 연구, 압축착화엔진(HCCI)에서 LPG-DME 연료의 분사시기에 따른 연소특성 및 배출물 특성에 관한 연구, DME를 사용한 HCCI 엔진에서 흡기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 연소특성에 미치는 연구, HCCI 엔진의 분사각 및 분사시기에 따른 분무 및 연소특성에 대한 연구, 경사노즐 선회분사기에 의한 가솔린의 미립화 특성 및 분무내부 압력분포에 관한 연구, 벽면 캐비티 각에 따른 GDI 분무의 벽면과의 충돌 과정에 대한 수치적 연구 등 가솔린엔진의 신연소법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. 이외에도 2륜 자동차의 촉매변환기 내의 온도변화 및 light-off에 관한 연구가 보고되어 있다.

다음에 연소불안정에 대한 연구로 가스터빈, 보일러 등의 실용 연소기를 대상으로 연소실내 압력변동이 공급연료의 당량비 변동에 미치는 연구 2편, 회박 예혼합 가스터빈에서의 압축성 연소장 해석을 통한 연소불안정성 메커니즘에 대한 연구, 가스오븐 레인지 버너에서 버너 형상요소가 연소특성에 미치는 연구, 액체 로켓엔진에서 기-액 다중(gas-liquid scheme) 인젝터에 의한 음향파 감쇄법에 대한 연구 등이 보고되어 있다. 이 연소불안정 분야에서는 다양한 연소기를 대상

으로 연소장과 음향장과의 상호작용에 의한 연소 불안정성에 대한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다.

다음에 오염물질 저감에 대한 연구로, FGR 시스템 보일러에서 재순환율이 배기 배출물에 미치는 영향에 관한 연구, 예혼합 화염의 하류영역에서 열전달에 따른 NO<sub>x</sub> 배출특성에 관한 연구, 다공성 세라믹 매트를 이용한 복사버너에서 열용량 및 공기 과잉률 변화에 따른 배기 배출특성에 대한 연구, DME/air 비예혼합 화염의 반응기구 분석 및 NO<sub>x</sub> 배출특성에 대한 연구 등이 보고되어 있다.

이외에, 소형 연소장치에 대한 연구로, 마이크로 사이클론 연소기의 혼합 및 유동특성에 대한 수치 해석적 연구, 대항류 채널 소형 열재생 연소기의 화염안정 특성에 관한 실험적 연구가 보고되어 있다. 그리고 연료전지용 개질기에서 고순도 수소생산을 위하여 일산화탄소 농도를 저감하기 위한 전이반응에 대한 연구, 수소-탄화수소 혼합연료에 대한 연구로 메탄-공기 확산화염에서 H<sub>2</sub>와 H의 선호확산이 화염구조 및 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 미치는 연구 2편이 보고되어 있다. 그리고 일반적인 액적발생장치와는 달리 흡노즐을 이용한 정전분무 확산 연소 시스템의 개발 및 연소특성 연구, 또 액체로켓엔진의 터보펌프 시스템을 구동하기 위한 고엔



탈피 가스발생기에서의 연료과잉 조건의 Kerosene/LOX 연소 비평형 반응기구에 대한 연구가 보고되어 있다. 이와 같이 2007년도에는 다양한 연소 시스템에서의 신연소법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다.

(이창언, 인하대학교)

## 마이크로 열공학

근래 정보기술(IT), 바이오기술(BT)과 더불어 나노기술(NT)과 에너지기술(ET)이 학문적 산업적으로 중요한 분야로 대두되면서 마이크로 열공학에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있다. 마이크로 전자장비의 혁신과 더불어 시작되어, 마이크로 에너지 시스템, 반도체장비설계, 전자장비냉각, MEMS, NEMS, 마이크로 생명공학 및 환경공학 등 그 적용 영역도 급격히 확장되는 추세이다. 마이크로 열공학은 (1) 연속체와 국소 열역학적 평형이 성립하지 않는 미세 시스템에서 에너지와 물질의 전달현상을 규명하기 위한 미세열전달(microscale heat transfer)분야, (2) MEMS, NEMS 요소로서 센서/구동기(actuator)/냉각장치/동력 발생장치 등 마이크로 열시스템에 관한 시스템/요소기술 분야, (3) 반도체 장비, 미세가공기술 등 마이크로/나노스케일 재료가공과 관련된 마이크로 열공정기술(micro thermal processing

technology)분야, (4) 마이크로 생명공학 및 환경 공학 관련 분야 등으로 크게 분류할 수 있다.

2007년도 마이크로 열공학 분야의 국내 연구동향을 분석해 보면 대한기계학회논문집과 Journal of Mechanical Science and Technology에 전체적으로 약 20여 편의 논문이 발표되어 작년과 유사한 수준임을 알 수 있다. 단, 마이크로 열공학 분야에서 다학제, 다분야 간 융합현상이 뚜렷이 나타나고 있어 마이크로 열공학과 간접적으로 관련된 논문의 수는 이보다 훨씬 많은 것으로 추정된다. 발표된 논문들 중 마이크로 열공학 분야와 직접 관련된 논문들을 분석하면 나노유체의 열유동 해석 및 열물성 분석, 나노입자의 열전달 연구, 마이크로 채널 내 열유동 해석, 초소형 열센서 설계, 마이크로 열교환기 등으로 크게 분류할 수 있다.

2007년도의 연구동향 중 두드러진 점은 나노유체와 관련해서 매우 활발한 연구가 이루어졌다는 것이다. 나노유체의 열유동 해석에 관하여 알루미늄 나노유체의 유동 및 대류 열전달 특성을 밝히는 연구가 이루어졌으며, 나노유체에 잠긴 가는 열선 주위의 자연대류 및 열전도 현상에 대한 연구가 수행되었다. 그리고 나노유체를 이용하여 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O시스템의 bubble absorption 및 열전달 성능을 향상시키는 공정에 관한 연구가 수행되었다. 나노

유체의 풀비등 시 임계열유속에 관한 연구에서는 나노유체를 이용한 임계열유속 증진 기작을 규명하였다. 탄소 나노튜브를 이용한 풀 비등 열전달 특성에 관한 연구 결과가 발표되었고, 미세 입자로 이루어진 공동에서 열적 기포 형성 과정을 분석한 결과도 소개되었다. 이들 연구들은 나노유체의 첨가나 나노스케일 표면 처리를 통해 열전달 특성을 향상시킬 수 있음을 보였으며, 주로 실험적 방법을 통해 그 물리적 기작을 분석하였다. 그리고 나노유체의 열물성 측정기술과 관련하여, 열전도율의 온도 의존성 평가를 위한 비정상열선법의 시험방법에 대한 연구가 수행되었다. 나노기술이 환경공학에 적용되어 나노스케일 입자로 인한 오염 감지, 제어의 중요성이 부각되는 가운데, 나노스케일 매연 입자에 레이저를 조사할 때 발생하는 열 및 물질 전달 현상의 모델링 및 수치해석 연구도 발표되었다.

마이크로채널 내부의 열유동에 관한 연구도 활발하게 이루어졌다. 단일 마이크로채널의 단면 가열시 열전달 특성에 관한 수치해석 연구가 수행되었고, 마이크로채널 heat sink 설계와 관련된 연구에서는 Kriging 모델을 이용하여 미세 유로의 형상을 최적화하였다. 또한 마이크로채널 내부에서 flow boiling이 발생할 때 elongated bubble의 거동을 해석한 연구가 발표되었다. 그리

고 열구동 잉크젯 프린트헤드의 채널간 간섭현상에 관한 모델링 결과도 발표되었다. 내부에너지 비평형 1차 외삽 경계조건을 적용한 열유동 격자 볼츠만 모델에 관한 연구가 수행되었고, 상(phase)의 식별이 어려운 마이크로/나노 시스템에서의 상태 기준에 관한 연구 등 미세열전달에 관한 연구 결과들이 발표되었다.

2007년에도 마이크로 열센서/구동기 및 초소형 열시스템 분야의 연구는 꾸준히 진행되었다. 마이크로 제조기술로 제작된 박막 발열체와 열전쌍을 이용한 thermal MAFS(mass air flow sensor)의 설계를 위한 연구에서는 수치해석을 통해 가열모드에 따른 열센서의 특성을 분석하고 열소자의 최적 위치를 결정하였다. 마이크로 열전대를 이용하여 액체/기체 상의 온도를 측정하기 위한 알고리즘 개발에 관한 연구도 수행되었다. 한편, 마이크로 냉각기, 마이크로 터빈, 마이크로 발전기 등 복합적인 마이크로 열시스템을 구현하기 위한 연구 또한 지속적으로 추진되고 있다. 초소형 열교환기 분야에서는 냉매 R-22을 이용한 마이크로채널 증발기의 성능을 비교하는 연구가 수행되었다. 또한 마이크로 핀(fin)이 장착된 원관 내부의 응축열전달 연구에서는 HFC-134a에 대해 EHD(electrohydrodynamic) 유동이 열전달 및 압력강하에 미치는 영향을 실험적

으로 분석하였다. 마이크로 히트파이프 관련 연구에서는 마이크로 세라믹 Wick(wick)을 이용한 루프 히트파이프의 특성이 실험 및 시뮬레이션을 통해 규명되었다.

마이크로 열공학 분야는 정부의 지원을 받아 시작된 대형 연구 사업이 정착되고 그 성과를 내기 시작하면서 앞으로도 지속적으로 활성화 될 것으로 예상된다. 특히, 앞서 언급된 분야 이외에도 연료전지, 생체 내 열유동 현상 계측 및 온도 반응 분석 등 다양한 분야에서 더욱 활발한 연구가 기대된다.

(김동식, 포항공과대학교)

## 수소 및 연료전지

2007년은 수소연료전지 모니터링 사업과 상업화를 위한 준비가 순조롭게 진행된 해라 할 수 있다. 5월 29일 국무총리공관에서 진행된 “총리공관 가정용 연료전지 시범설치 행사”를 통해 2기의 수소연료전지(GS Fuel Cell 1기, Fuel Cell Power 1기)가 설치되었고, 이는 국산 연료전지의 기술력과 연료전지의 중요성을 홍보하고 중요한 계기가 되었다고 할 수 있다.

9월에는 GS 칼텍스의 주관 하에 연세대학교에 수소충전소가 준공되었다. 이는 국내 최초의 민간 수소스테이션으로 Naphtha를 물과 고온에서 촉매 반응시켜 수소를 생산하고, 고압으로 저장

한 뒤, 수소연료전지 자동차에 주입할 수 있게 한다. 11월에는 인천 한국가스공사 연구개발원에 천연가스를 이용한 수소충전소가 설치되었다. 천연가스와 물을 원료로 촉매 반응에 의해 생산되고 정제된 수소는 고압으로 저장된다. 이러한 수소스테이션은 특히 도시지역에 설치되어, 수소 충전과 사용의 안정성을 시민들에게 인식시키고, 수소 사용에 따른 다양한 데이터를 제공하게 된다.

현대기아자동차는 11월 중국 상하이에서 열린 국제 친환경차량 경연대회에 연료전지 차량인 투산 FCEV를 출품하여 소음, 배기, 연비, 이산화탄소 배출 평가에서 모두 최고등급을 받아 닌타, GM, 포드, 니산 등 이 출품한 11개 차종의 연료전지 차량 중 최고 성적을 거두었다. 해외에서 최초로 이루어진 투산 FCEV의 공개평가에서 우수한 성능을 선보임으로써 국내 수송용 연료전지 모니터링 사업이 순조롭게 이루어지고 있다는 평가를 내릴 수 있다.

포스코는 10월 발전용 연료전지 BOP 양산공장의 착공식을 가졌다. 2008년 중으로 50MW급 발전용 연료전지 생산 및 테스트 시설을 준공하고, 2010년까지 50MW 규모를 증설할 계획으로, 발전용 연료전지의 상업화를 앞당기는 중요한 노력으로 평가할 수 있다.

휴대용 연료전지는 국제적으로

표준화 완성을 이루고 시장진입을 위한 준비를 이루려는 계획이었으나, 상업적 생산이 이루어지지 않아, 어느 정도의 시간이 더 필요한 것으로 판단된다. 국내에서는 4월에 휴대용 연료전지의 상업화를 위한 전문가 토론회가 열려 중요한 전략 방향을 토론했다는 기회가 있었다. 토론회에서는 자동차 연료전지에 비하여 짧은 연구기간과 적은 투자에도 불구하고 단시간 내에 상업화가 될 것이라고 예측된 휴대용 연료전지는 장기적인 새로운 전략이 필요하고, 이에 따라 기초연구의 확대, 도전적인 목표와 구체적인 달성전략이 포함된 로드맵 작성이 수반되어야 한다는 의견이 도출되었다. 즉 휴대용 연료전지의 상업화를 위해서는, 정부의 투자 증대와 산업체, 학계간 긴밀한 협조에 의한 기초연구과제 및 실증사업의 수행이 절실하다 할 수 있다.

(차석원, 서울대학교)

## 열기기 및 열교환기

2007년 게재된 논문 중에서 열교환기 및 열기기 분야는 증발기 및 응축기 논문 5편, 핀-튜브 열교환기 3편, 판형 열교환기 2편, 셸-튜브 열교환기 및 기타 열교환기 논문 5편, 지중 열교환기 2편, 히트파이프 5편 등 열교환기 논문이 주를 이루었다. 기존의 증발기 및 응축기에 관한 논문뿐만 아니라, 지중 열교환기 등 다양한 열교

환기에 대한 연구가 진행되었으며, 차량용 열교환기 관련 논문도 게재되었다. 그 밖에 이상유동 및 비등관련 논문이 5편으로 가장 많았으며, 히트펌프 논문 2편 및 기타 제빙, 전자기기 냉각, 차량용 이산화탄소 시스템 및 결로 성능, 파울링 효과 관련 논문이 각 1편씩 다양한 논문이 게재되었다.

증발기 논문으로는 공랭식 증발기 동특성 분석을 통한 전자팽창밸브 개도 제어에 따른 증발기 온도 거동 특성을 분석하여 전자팽창밸브 제어를 위한 모델을 제시하였고, 응축기 논문으로는 차량용 응축기 연구, 에어컨 응축기와 오토트랜스미션 오일 쿨러를 통합하는 최적 열교환기를 차량에 장착한 후 최적화에 관한 연구, 그리고 리시버와 건조기 일체형 응축기에 대한 이론적 해석과 성능분석을 통한 최적 튜브배열에 관한 연구 등이 수행되었다.

핀-튜브 열교환기에 관한 논문으로는, 기존의 데이터가 부족했던 습표면 조건에서의 핀 튜브 열교환기의 열전달 특성에 관한 연구가 수행되었다. 1/2/3열의 웨이브핀 열교환기와 3열 평판핀 열교환기의 열별 열전달계수 측정을 통한 핀-관 열교환기의 열별 전열특성을 고찰하는 논문과 내부에 사다리꼴 핀이 부착된 원형 관내에서 핀 높이, 핀 상부 및 하부 두께와 나선형 각을 설계변수로 하여 열전달률을 최대화하고, 마찰을 최소화하는 논문 등이

보고되었다. CFD를 통한 셸-튜브 열교환기의 설계 모델에 대한 내부 유동 현상과 열전달 특성을 고찰하고, 관 주변 유동을 활발하게 할 수 있는 Sealing strip과 같은 설계인자 변화를 통한 열전달을 향상에 관한 논문도 발표되었다. 판형열교환기에서 에틸렌글리콜 수용액의 과냉도 및 냉각속도가 연속제빙에 미치는 영향에 관한 논문이 발표되었다.

미세유동 분야에서는 기존의 핀-튜브 열교환기와 동일한 전면면적을 가진 마이크로채널 응축기를 가정용 에어컨에 적용하여 기존 핀-튜브 열교환기와 성능을 비교하였으며, 마이크로 열교환기의 최적 냉매 충전량을 10% 감소시키고, 압력 강하량을 84% 감소시켰으며, COP는 6~10% 증가하는 것으로 보고되었다.

지중 열교환기 분야에서는 성능예측에 관한 연구가 수행되었다. CFD 해석에 의한 수직형 지중 열교환기의 성능예측에 관한 논문과 수직형 U관 지중열교환기를 지열원 열펌프시스템에 적용하여 토양 그라우트, 관의 열전도율과 지열 열교환기의 길이 변화에 따른 시스템 성능 변화의 동적 시뮬레이션을 통해 지열원 열펌프 시스템의 성능을 예측할 수 있는 기법을 제시하는 논문 등이 보고되었다.

자동차용 이산화탄소 냉방시스템에서 마이크로 채널 타입의 알루미늄 열교환기를 가스쿨러와

증발기로 사용한 시스템의 성능 평가 결과가 보고되었다. 또한, 이산화탄소 초임계 시스템에서 증발기 및 가스냉각기에 관한 연구가 수행되었다. 내경 7.75mm의 수평 평활관에서 포화온도 -5~5°C, 질량유속 200~1,200 kg/m<sup>2</sup>s, 열 유속 10~100 kW/m<sup>2</sup> 실험범위 내에서 이산화탄소 증발열전달 및 압력강하에 관한 연구가 수행되었고, CO<sub>2</sub> 열펌프 시스템에서 가스 냉각기에 헬리컬 코일을 적용 코일관의 형상변화 변화에 따른 초임계 냉각 과정에서 열전달 특성에 관한 연구가 수행되었다. 코일관 형상변화에 따른 내경 및 코일 직경이 작을수록 냉각 열전달계수는 높으며, 질량유속과 냉각압력이 같을 경우 각각의 입구 압력의 유사 임계온도에서 냉각 열전달계수가 최대값을 가지는 것으로 보고되었다.

열교환기 내에서 이상유동 열전달 성능을 분석한 연구결과도 발표되었다. 수직 환상공간 내부에서 발생하는 풀 비등현상이 유입유로의 단면적 변화에 따라 이루어졌고, 유입부에서의 대류유동이 풀비등에 미치는 영향을 확인했으며 대류유동을 최대화하기 위한 최적 유입면적이 고찰되었다. 원자로의 응급상황 발생시 용기 외벽냉각 시스템에 관한 1차원 2상유동 실험과 해석이 이루어졌고, 계산된 순환유량은 실험결과와 ±15% 이내의 양호한 결

과를 도출하였다. 증발 액적이 고온표면에서 열전달 성능에 미치는 영향이 연구되었다. 표면거칠기, 액적 지름, 표면온도 등이 고려되어 증발액적의 열유량이 평가되었고, 그린함수를 이용하여 단상 구간, 핵비등 구간 그리고 필름비등 구간으로 나누어 해석되었다. 루프 히트파이프에 마이크로 세라믹 워이 사용되어 성능향상에 관한 연구가 발표되었고, 알루미늄 세라믹 워이는 다양한 냉매에 첨가되어 실험이 진행되었다. 2상유동 기포울 측정방법의 개발에 관련하여 CCD카메라를 이용한 기포율과 기포의 성장, 형상에 관한 연구가 진행되었고, 기포 유량증가가 처음에는 기포 크기와 속도를 증가시킬 수 있으나 일정수준 이상으로 발달하면 다른 기포들의 방해로 더 이상의 증가가 발생하지 못함을 확인하였다.

그 밖에도 열펌프 분야에서 연료전지 시스템의 폐열을 난방 열원으로 사용함과 동시에 전동 압축기의 구동에 기인하는 연비의 악화를 억제할 수 있는 R-134a 냉매를 이용한 연료전지 시스템에 유기적으로 통합된 열펌프 시스템의 개발에 관한 연구와 열펌프를 이용한 건조기의 개발 및 성능평가를 위한 열펌프 사이클 및 건조 과정에 대한 해석적 연구 등이 수행되었다. 제빙분야에서는 공압실린더를 이용하여 스크레이퍼를 상하 왕복 운동시켜 관벽에 생성되는 얼음을 제거하

는 방식의 제빙기를 설계 제작하여, 공압구동형 제빙기의 운전시간 변화에 따른 제빙기의 제빙특성에 관한 연구가 보고되었다. 또한, 태양열 집열용 히트파이프 열 성능, 폐열회수 환기유닛의 설치에 따른 창호의 결로 성능, 다공형 유로를 적용한 전열교환기, 다관형 순환유동층 열교환기의 성능 예측모델 등 다양한 분야의 열교환기 및 열기기에 대한 연구가 발표되었다.

(김용찬, 고려대학교)

## 열시스템 제어 및 계측

2007년도에는 제어분야 8편, 계측분야 4편의 연구결과가 발표되었다. 열시스템 제어는 제어설계의 전단계인 열시스템 동특성 해석과 이를 기반으로 한 제어 알고리즘 설계로 구성된다. 그러나 열시스템의 거동이 일반적으로 복잡한 비선형 거동을 나타내기 때문에 시스템 해석에 기반한 최적설계 자체가 불가능한 것이 현실이다. 따라서 제안될 수 있는 제어 알고리즘은 일반적으로 보편적인 PID 제어 또는 퍼지제어에 국한된다.

제어분야의 시스템은 이산화탄소 열펌프 3편, 연료전지 1편, 보일러 1편, 열전소자 이용 항온 제어 1편, 태양열 냉난방 1편, 열성형용 히터 1편이다. 화염 래디컬 계측을 이용한 보일러의 실시간 능동 제어 시스템(추성호, 이충

환, 신명철, 김세원) 연구에서 래디컬 강도와 보일러 부하의 상관관계를 실험적으로 연구하였으나 제어를 위한 동특성 모델링을 위해서는 추가 연구가 필요하다. 김민수 등은 2편의 자동차용 이산화탄소 냉매 냉동기 연구를 통해 동특성 시험을 하고 Ziegler-Nichols 튜닝기법으로 설계한 PI [비례-적분]제어기 성능이 타당함을 실험결과로 제시하였다. 가변속 이산화탄소 열펌프의 난방성능 특성에 관한 실험적 연구(조홍현, 이호성, 장용희, 김용찬)에서는 COP 극대화를 위한 전자팽창밸브(EEV) 개도와 인버터 주파수의 상관관계를 실험적으로 규명하였고 외기온도가 미치는 영향도 시험하였다. 이러한 결과는 시스템 제어를 위한 전달함수 모델링에 활용될 수 있다. 연료전지-태양전지 하이브리드 자동차에 대한 제어전략 및 특성평가(안효정, 지현진, 배종면, 차석원)의 연구에서는 자동차 요구출력에 대하여 2차전지 충전상태를 고려하여 연료전지 ON/OFF 제어전략을 수립하기 위하여 MATLAB/Simulink를 활용하였다. 열전소자를 이용한 정밀 항온 유지 장치에 관한 실험 및 시뮬레이션 연구(박경서 등)에서는 열전소자를 부착한 공기냉각 채널에서의 온도제어 및 핀 냉각 성능을 연구하였다. 온도제어는 PID 제어기를 시행착오 방식으로 튜닝하였으며  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 제어정밀도를

얻었다고 보고하고 있다. 실내 설정온도에 따른 태양열 냉난방 시스템의 동적 거동 해석(장환영, 이상범, 정경택, 서정세) 연구에서는 축열조 크기가 난방부하 공급용 태양열 의존율에 미치는 영향을 연구하였다. 열성형 과정에서 반응면 기법을 이용한 히터의 비정상 최적제어에 관한 연구(리진철, 허광수, 설승윤)에서는 ABS 수지 양면에 설치된 히터들의 입열량을 조절하여 균일온도 분포를 유지하는 것이며 전산해석에 의한 계산이고 피드백 제어가 아닌 오픈루프 형식이라 실용화를 위해서는 온도측정 및 피드백 제어방법 연구가 필요하다.

계측분야에서는 온도장 측정 2편과 질량유량 측정 2편의 연구가 있었다. 마이크로 스케일 유동에서 particle tracking velocimetry(PTV)을 이용하여 속도장을 측정하고 laser induced fluorescence(LIF)를 이용하여 온도장을 동시에 측정하였다(이범준, 진송완, 김영원, 유정열). Nano porous 박막에 형광 염료를 입히고 epifluorescence microscope을 이용하여 온도장을 측정하는 연구결과가 발표되었다(오영수, 백인기, 전필수, 김현정, 유재석). 박병규, 이준식 등은 2편의 연구결과에서 silicon-nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )박막에 히터와 서모파일이 설치된 열식 질량유량 센서를 설계하고 수치해석을 통해 주기 발열파형과 유속 간의

상관관계를 연구하였다.

(신영기, 세종대학교)

## 열역학 및 열물성

2007년 열역학 분야에서는 열시스템 연구가 수행되었으며, 열물성 분야에서는 나노스케일에서의 상태기준과 상태량 연구 외에도 상태방정식 연구가 진행되었다.

열역학 분야에서는 환경문제에 대한 지속적인 관심의 일환으로서 이산화탄소 냉방시스템과 열펌프, 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템, 마이크로 가스터빈 등 열시스템에 대한 연구가 수행되었다. 환경친화적인 자연냉매인 이산화탄소를 사용하는 자동차용 냉난방 시스템을 이산화탄소 압축기와 마이크로 채널 타입의 가스쿨러 및 증발기, 팽창 장치 등 고압 구성 요소들을 적용하여 구축하였으며, 정상상태 및 동적 특성을 살펴보고 그 결과를 분석함으로써 향후 자동차용 이산화탄소 냉난방 시스템을 설계, 제작하는데 유용한 정보를 제공하였다. 공기 대 공기 방식의 이산화탄소 열펌프에 대하여 전자팽창장치(EEV)를 적용한 경우 냉매 충전량, 압축기 회전수, EEV 개도에 따른 난방성능 등 사이클의 특성을 연구 고찰함으로써 난방성능과 신뢰성 향상을 위한 기초 자료를 제공하였다. 저공해, 고효율 발전 시스템으로서 개발이 이루어지고 있는 연료전지/가스터빈

하이브리드 시스템에 대한 현실적인 제약을 고려하여, 기 제작된 가스터빈을 그대로 사용하여 구성한 시스템에 대하여 연료전지 설계 조건에 따른 성능을 분석하고, 압축기의 작동점 변화를 고려하여 설계 특성의 상이점과 성능을 비교하여 연료전지 설계온도에 따라 다양하게 설계점이 결정됨을 보였으며 높은 효율의 시스템을 설계하기 위해서는 연료전지 및 기타 구성품의 압력손실을 최소화해야 함을 보였다. 다양한 적용분야에서 미래 동력원으로 빠르게 주목받고 있는 연료전지 중 하나인 고체산화물 연료전지(SOFC)와 가스터빈(GT)으로 구성된 하이브리드 동력 시스템을 해석한 결과를 제시하고 연료전지의 작동 압력을 상압과 고압으로 달리하여 에너지 분석과 엑서지 분석을 수행하였으며, 고압 시스템의 효율이 좋음을 파악하였다. 분산발전 시스템으로서 기술성숙도와 환경친화성을 고려하여 가능성 있는 후보로 주목받고 있는 마이크로 가스터빈(MGT) 시스템의

엔진 성능과 부품 특성을, 각종 성능 변수 값을 측정하고 성능데이터와 모의실험 결과를 최적화하여, 분석 추정하였다.

열물성 분야에서는 나노유체의 열전도율과 나노스케일 계의 상태기준에 관한 연구가 이루어졌으며, 이산화탄소의 상태방정식이 연구되었다. 기본유체에 나노입자를 첨가하여 열전달 효율을 높이고자 제안된 나노유체에 대하여 자연대류 열전달 성능과 열전도율 사이의 관계를, 동일하게 제작된 두개의 자연대류 실험장치를 이용하여 연구하여 나노유체의 자연대류 열전달 성능이 나노유체의 열전도율 증가에 강한 의존성이 있음과 체적분율에 따라 나노유체의 점도가 급격히 증가함을 보였다. 금속입자의 혼합 농도 증가에 따라 나노유체의 열전도율이 증가하지만 연구자에 따라 결과가 다른 불일치 문제와 유체 열전도율 측정 방법에 따른 열전도율의 온도 의존성이 상이한 문제를 해결하기 위해 비정상열선법 등 측정 장치와 방법을 체계

적으로 비교하고 검증하였다. 나노스케일 계를 구성하는 분자간의 포텐셜에너지(inter-molecular potential energy) 평가 방법이 고체의 변형 정도나 계산계의 상을 명확히 구분할 수 있는 기준으로 사용될 수 있는지를 확인하기 위한 연구가 수행되었다. 이 방법은 계를 구성하는 입자들의 열적 진동과는 무관하게 변형된 분자들의 확인이 가능하므로 전산모의실험 시 계의 온도 제어에 관한 제약조건으로부터 자유로운 장점이 있다. 한편, 오존층 파괴 문제를 해결하기 위한 대안으로 주목을 받고 있는 자연냉매 중 하나인 이산화탄소에 대한 기존의 상태방정식은 정확하나 매우 복잡하므로, 항수가 적고 간단한 지수함수가 들어있는 새로운 단순 상태방정식이 제안되었으며, 실험데이터와 두 상태방정식을 비교하여 새로운 상태방정식이 임계 영역에서 더 정확함을 보였다.

(박경근, 국민대학교)