

## 에너지 및 동력공학 부문

이 글에서는 2004년도 에너지 및 동력공학 분야의 주요 연구동향을 요약하여 소개한다. 내연기관, 가스터빈 및 증기터빈, 열병합 및 복합발전, 보일러 및 발전설비, 소각로, 연소기기, 원자력 에너지, 공기조화 등 각 세부분야에 있어서 심도 있는 연구 및 기술개발이 폭넓게 이루어졌으며, 각 세부분야별 연구 동향을 소개하면 다음과 같다.

우 종 천 부문회장[한국동서발전(주), 기술본부장]

e-mail : woojch@ewp.co.kr

### 내연기관

최근 자동차 엔진에는 단순한 고출력뿐만 아니라 배기가스 규제와 안전에 관한 사항을 동시에 요구하고 있다. 특히 범세계적인 지구 온난화 대책회의를 통해 지구 온난화의 주요 요인인 CO<sub>2</sub> 배출 가스의 감축이 규제화되고 있으며, 또한 에너지 고갈에 대한 우려가 심화됨에 따라 연비 향상을 위한 연구가 진행되고 있다.

2004년도에 발표된 내연기관 분야에 대한 연구들을 살펴보면 연비향상 및 환경보전의 측면에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있으며, 이러한 연구들은 기존의 동력시스템을 발전시킨 기술과 새로운 동력시스템을 개발하는 것으로 크게 구분할 수 있다. 기존의 동력시스템을 발전시킨 기술에는 직접분사식 가솔린 엔진(direct injection spark ignition), 커먼레일식(common-rail direct injection) 초고압 디젤엔진 그리고 가변밸브타이밍(variable valve timing) 엔진 기술로 구분되며, 새로운 동력시스템은 기존의 엔진시스템과 전기자동차를 결합한 하이브리드 자동차(hybrid electro vehicle)와 연료전지(fuel cell)를 이용한 연료전지 전기 자동차로 구별할 수 있으며 각각에 대하여 발표된 연구를 세부 분야별로 정리하면 다음과 같다.

직접분사식 가솔린(DISI) 엔진은 기존의 흡기 분사 방식에서 연료를 직접 연소실로 분사하는 방식으로 변경시킨 저연비, 고효율 엔진으로서, 연구 분야는 크게 세 가지로 나누어 진행되고 있다. 첫째, 직분

식 가솔린 엔진의 성능은 분무 특성에 많은 영향을 받기 때문에 가시화 엔진과 여러 가지 광계측 기술을 이용하여 흡기행정 분사와 압축 말에 분사하였을 경우의 분무의 거동과 혼합기 분포 특성을 연구하는 분야이다. 구체적으로 한양대학교에서는 Mie 산란 방법과 엔트로피 해석 방법을 이용하여 혼합연료비에 따른 분무 균질도 특성에 관한 연구와 DPIV와 엔트로피 해석을 이용하여 DISI엔진 내 분무 및 유동 특성 해석에 관한 연구를 수행하였으며, 기상과 액상을 분리 계측방법인 LIEF를 이용하여 압축 행정 말기의 기상의 분포를 정량화하였다. 성층 연소 특성을 정량화하기 위하여 정적 연소기 내에서 주변 온도와 압력 및 점화시기 변화에 따른 성층화 특성을 분석하였으며, 정량적으로 성층 정도를 나타내는 지표를 설정하였다. 국민대학교에서는 스파크 점화 기관의 냉시동시 배기 밸브 타이밍과 점화시기 변화에 따른 배기가스의 온도변화에 관한 연구가 수행되고 있으며, 한국과학기술원은 흡기 밸브 개폐시기 변화와 배기 스로틀이 잔류가스율과 배기가스 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 라디칼 유도 착화 엔진의 최적 부실설계 및 성능개선에 관한 연구는 동아대학교에서 연구가 진행되고 있다. 둘째, 직접분사식 가솔린 엔진의 연소는 성층 연소를 주로 사용하므로 점화플러그 주변의 농후한 혼합기를 이루기 위한 연구가 진행되었다. 고등기술연구원에서 흡기 과급이 성층화 연소에 미치는 영향과 명지대학교에서는 연료를 압축 말에 분사하여 성층화 연소 및 안정화에 관한 내용의 연구가 진행되었고, 연세대학교에서는 직접분사식

가솔린엔진 배출가스 중 비열플라즈마와 촉매시스템을 이용한 NOx 저감에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 한양대학교에서는 압축비 변화와 흡기 온도 변화에 따른 가솔린 성층 연소를 통한 자기착화 방식(auto controlled ignition)을 통하여 연소 특성 및 배기 특성을 분석하였다. 마지막으로, 수치해석을 통한 DISI엔진의 분무 및 연소를 예측하는 연구가 진행되었다. 부산대학교에서 다양한 분위기 압력에서 DISI 분무 해석을 위한 혼합 분열모델에 대한 연구와 혼합모델을 이용하여 분무의 예측하는 연구가 수행되었으며, 서울대학교와 포항공대에서는 직접분사식 가솔린 엔진의 성층화 연소 모델을 개발하는 연구가 수행되었다.

다음으로 열효율이 높은 디젤 엔진에 대한 연구도 많이 수행되고 있다. 커먼레일식 디젤(CRDI) 엔진은 초고압의 전자제어에 의한 분사가 가능해진 기술로서 국민대학교에서는 분사압력과 분사시기의 제어에 따른 엔진의 출력 및 배기 성능 특성과 가시화엔진을 이용한 Soot 및 화염 특성에 관한 연구들이 수행되고 있으며, 한양대학교에서는 커먼레일식 디젤 노즐의 분사각도 변화에 따른 엔진의 출력과 배기 성능 특성 및 가시화 엔진 내에서의 기존 방식의 연소 특성과 예혼합 압축착화(HCCI) 연소 특성을 비교 분석하였다. 한국과학기술원에서는 분사형태의 변화가 HSDI 디젤엔진의 배기 특성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 현대자동차에서는 커먼레일 엔진에 적합한 연소실 형상과 흡기 포트 형상 그리고 흡배기 밸브의 위치 및 형태에 관한 수치해석 및 시험 개발 등의 연구와 커먼레일 인젝터의 분사특성 해석을 이용한 HSDI 디젤 엔진의 연소 해석을 수행하였고, 커먼레일 디젤엔진에서 성능의 향상 및 배출가스의 저감을 위해 국민대학교와 동아대학교에서는 Hot 및 Cooled-EGR을 적용하여 연구를 수행하였으며, 서울대학교에서는 인젝터 노즐의 변경과 VGT 적용이 커먼레일 엔진에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 건국대학교에서는 커먼레일 디젤엔진에서 후 분사 변화가 배출가스 성분 및 온도 변화에 미치는 영향에 대한 실험적인 연구가 진행되었으며, 분사율에 관한 연구는 한양대학교에

서 노즐형상에 따른 커먼레일 인젝터의 분사율 특성에 관한 연구가 수행되었다. 이 외에도 한국과학기술원에서는 커먼레일 시스템의 분사기 형상이 예혼합 압축착화 엔진 연소에 미치는 영향을 분석하였으며, DME연료를 이용한 디젤 기관에서의 성능 및 배기 특성을 분석하였다. 또한 전남대학교에서는 커먼레일 인젝터를 이용한 DME 연료의 분사가 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 규명하는 연구가 수행되었으며, 성균관대학교에서는 경유와 물의 혼합연료의 연소특성에 관한 연구가 수행되었다. 커먼레일을 이용한 새로운 연소방식인 균일 예혼합 압축착화(homogeneous charge compression ignition) 엔진에 대한 연구도 활발히 수행되었다. 구체적으로 한양대학교에서는 고압 커먼레일 인젝터를 이용하여 분무특성 및 연소특성에 관한 실험적 연구 및 상용 코드인 vectis를 이용하여 혼합기 분포 특성을 수치적으로 연구를 수행하였다. 한국과학기술원은 고압 커먼레일 인젝터를 이용하여 예혼합 압축착화 엔진의 Two-stage 디젤 연료 분사법에 따른 연소 및 배기 특성에 관하여 연구를 수행하였다. 또한 한양대학교에서는 가시화 및 수치해석을 통하여 커먼레일 인젝터의 연료 미립화 및 분무 특성에 대하여 연구하였고, 디젤용 커먼레일 피에조 인젝터의 분사율 추정 및 연료의 분사 특성 및 분무 거동에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 자동차 부품연구원에서도 균일 예혼합 연소를 적용하여 커먼레일 엔진의 연소 및 배기 특성에 관한 연구를 수행하였다. 한편, 자동차 부품 회사인 현대 오토넷과 템스에서 커먼레일용 인젝터와 피에조 인젝터 구동회로 및 압력제어기 개발에 관한 연구를 수행하였으며, 성균관대학교에서는 극초압 디젤분무특성 해석을 위한 단발 분사장치의 개발에 관해 연구가 수행되었다.

기존의 엔진 시스템과 새로운 동력시스템을 결합한 하이브리드 전기 자동차(HEV)에 대한 연구에는, 먼저 엔진은 발전기를 회전시켜 모터를 구동하는 방식인 시리즈 형태(series type)와 엔진과 모터를 병렬로 연결하여 엔진과 모터가 동시에 조합되어 차량을 구동하는 병렬형(parallel type)으로 나뉘어 연구가 진행되었으며, 구체적으로 현대자동차에

서는 직렬형 하이브리드 버스에서 보조 동력장치의 고효율 작동을 위한 제어 알고리즘에 관해 연구가 진행되었고, 서울대학교에서는 특정 주행 사이클과 임의의 주행 사이클에 대하여 병렬형 하이브리드 차량의 용량 매칭 기법과 연비 및 배기가스 성능 향상을 위한 주행 전략과 다이내믹 프로그램을 이용한 HEV의 최적 연비 비교에 대해 연구하였을 뿐만 아니라 다구찌 방법을 이용한 하이브리드 차량의 SOC 유지전략의 최적화에 관한 연구가 수행되었다. 이 외에도 성균관대학교에서는 병렬형 하이브리드 전지자동차의 엔진/모터/배터리 용량 및 운전 최적화에 관한 연구와 하이브리드 DCT 차량의 성능 시뮬레이션과 동력단절 해석 및 울트라 커패시터를 이용한 연료전지 하이브리드 차량의 성능 시뮬레이터를 개발 중에 있다. 또한 에너지기술연구원에서는 주행 조건이 하이브리드 자동차의 연비에 미치는 영향과 운전조건에 따른 제어특성을 연구하였고, 서울대학교에서는 주변장치를 포함한 상압형과 가압형 고분자 전해질형 연료전지 시스템의 성능에 관하여 연구가 수행되고 있으며, 차량의 운전 전략 및 성능 시뮬레이터 개발에 박차를 가하고 있다. 한양대학교에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 다중 동력 시스템에 대한 용량 최적화에 관한 연구가 수행되고 있다.

이와 같이 내연기관 분야에 대한 2004년의 연구들은 기존의 동력시스템을 고효율 친환경의 시스템으로 개발하는 연구와 연료전지와 같이 새로운 동력기술에 대한 연구들이 활발하게 수행되었다. [이기형, 한양대학교]

## 가스터빈 및 증기터빈

발전용 가스터빈 및 증기터빈 설비는 현재 국내 발전설비의 높은 비율을 차지하고 있으며, 지속적으로 설비용량이 증가되고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 가스터빈 및 증기터빈에 대한 연구로는 압축공기를 이용하여 고온의 연소가스로부터 부품요소를 보호하는 연구들과 열병합 및 하이브리드 시스템을 이용한 효율 향상에 대한 연구들이 지속적으로 수행되고 있으며, 대기환경 규제치 강화로 인

해 유해가스 배출량을 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이와 더불어 가스터빈 및 증기터빈의 운전 성능을 평가하고 저하시키는 요인을 찾아내 개선하는 연구들이 주로 이루어지고 있다.

가스터빈의 효율을 향상시키기 위한 연구로 베인 및 블레이드에 대한 연구들이 진행되었다. 그 중 하나로 냉각유체가 지나가는 베인 및 터빈 블레이드 내 유로에서 열전달을 향상시키기 위한 연구로 사각 또는 반원 형상의 요철이 설치된 채널 내부의 유동 및 열전달을 LES(Large Eddy Simulation)로 수치 해석하여, 압력강하 및 열전달을 비교하였다. 또한 다양한 강제대류 냉각방법 중 충돌제트 냉각기법에 대한 연구로 곡면에서의 배열 충돌제트에 의한 국소 열전달 특성을 고찰한 연구를 진행하였으며, 평면과 곡면에서의 열전달 특성과 비교하였다. 또 다른 연구로는 실제 가스터빈의 표면은 막냉각을 위한 많은 홀을 가지고 있는데, 홀들로 인한 내부관에서의 영향을 관측하기 위해 유로 내 유출홀을 형성하여 그 영향을 알아본 연구가 수행되었다. 그 결과, 냉각 유체는 표면에 충돌하여 유출홀 근방에서 높은 열전달 분포가 나타나는 것을 보였다.

가스터빈 블레이드 표면에 대한 열부하 파악 및 냉각기술의 기초 자료를 얻기 위한 연구들도 수행되었는데, 특히 회전각이 큰 터빈 동익에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 끝벽으로 인한 누설유동에 영향을 알아보기 위해 나프탈렌 승화법을 이용해 복잡한 유동에 의한 블레이드 압력면과 흡입면에서의 열전달 특성과 함께, 난류강도가 증가하였을 때 작은 와류들이 증가하여 흡입면의 열전달이 증가한다고 보고하였다.

가스터빈 연소실에 대한 연구로는 연소시 발생하는 연소진동 및 역화가 운전 신뢰성을 떨어트리고 연소실 부품을 손상시키기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 진행되었다. 연소기의 작동조건에서 고주파 연소 불안정을 해결하여 안정한 성능을 발휘하기 위해 가스터빈 연소실 내 음향장을 해석하는 연구를 진행하여 불균일한 열분포 및 진동을 측정 개선하는 연구가 진행되었다.

이 밖에 GE 7FA 가스터빈의 성능 개선을 위한 연



구로 서인천 가스터빈 성능개선에 적용한 사례를 통한 질소산화물의 획기적인 저감과 수익증대 효과에 대하여 보고하였다. 가스터빈의 효율을 높이기 위한 연구로 가스터빈/연료전지 혼합형 발전 시스템에서 가스터빈 출구의 고온 가스를 열교환기(recuperator)를 이용하여 연료전지로 공급되는 압축 공기를 예열하는 연구가 진행되었다. 특히 열교환기 내에서의 압력 손실과 열교환 효율은 시스템 전체 효율에 큰 영향을 미치므로 낮은 압력 손실과 높은 열교환 효율을 얻기 위한 연구도 많이 진행되었다.

증기터빈에 대한 연구로는 국내 원자력 및 화력발전소의 직렬연결 터빈 형식을 사용하는 증기터빈 내 터빈축 밀봉부와 케이싱 내부 각 단의 틈새 크기가 터빈 효율에 크게 영향을 미치게 된다. 또한 이러한 틈새의 불균일로 인해 운전 중의 진동, 이상음과 터빈 효율에 영향을 미치게 된다. 따라서 이에 대한 연구로는 수평형 직렬연결 발전용 증기터빈의 좌우 틈새 분포를 연구하여 마찰 손상을 최소화하기 위한 틈새 측정 및 조정 방법에 대하여 정비관리 측면에서 이루어졌다. 더 나아가 고정형 및 가변형 증기 패키징 설치 전후에 터빈 성능시험을 통해 터빈 효율을 비교, 검토하여 터빈 효율을 분석, 에너지 효율을 평가하는 연구도 진행되었다.

이와 같이 가스터빈 및 증기터빈의 연구 경향은 가스터빈의 경우엔 터빈 블레이드의 개선된 냉각기술에 관한 다수의 연구들이 지속적으로 이루어지고 있으며, 이와 더불어 정비기술과 관련된 연구도 진행되고 있음을 알 수 있다. 증기터빈의 경우에는 산업체를 중심으로 성능평가 및 터빈 효율 증대에 대한 연구들이 진행되고 있어, 향후에도 이 분야에 대한 연구는 꾸준히 이루어질 것이다. [조형희, 연세대학교]

### 보일러 및 발전설비

최근 산업용 보일러를 비롯한 에너지 발생기기에 대한 대기환경 규격이 강화됨에 따라 에너지 사용 효율의 극대화 및 환경 친화적, 고효율 발전 방식의 도입 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 보일러 운전의 최적화를 통해 오염물질의 방출을 줄이고 보일러

의 수명을 연장시키기 위한 연구가 주로 진행되었다. 또한 국내외 전력 시장의 경쟁체제 하에서 경쟁력 확보를 위한 발전 원가 절감이 큰 관심의 대상이 되었으며, 이를 도모하기 위해 발전설비의 최적 운전성능 유지를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 보일러 운전의 자동제어를 통해 기존에 운영되는 보일러의 운전 조건이 항상 최적의 상태를 유지하도록 하여 전반적인 성능을 향상과 더불어 부품의 수명을 연장시키려는 연구 역시 진행되었다.

전통적인 관심사인 최상의 연소 조건을 유지함과 동시에 에너지 효율을 극대화하고 오염물질 배출을 최소화하기 위해 노 내의 질소산화물, 미연분의 분포감시, 이상 연소 검출 등의 실시간 분석처리 및 연소 상태의 정량화를 위한 실시간 화염감시 시스템의 개발에 대한 연구가 진행되었으며, 또한 기존에 많은 연구가 이루어지던 배기가스 재순환(FGR)을 보일러에 적용하여 재순환율의 변화가 배기 배출물에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. FGR 시스템 동력 플랜트 보일러의 성능과 재순환 배기가 배출물에 미치는 영향에 대한 연구 분야에서는 동력플랜트용 보일러에 FGR시스템을 설치하여 보일러 부하, FGR률 및 OFA(Over Fire Air)댐퍼개도를 파라미터로 설정하여 FGR률을 증가시켜 운전하는 경우, 증발률에 대한 연료소비율, NOx·CO·매연 배출물에 미치는 재순환 배기의 영향을 조사하여 보일러의 배기 배출물 및 성능 특성을 파악하는 연구가 진행되었다.

배열회수보일러(HRSG)에 관한 연구에는 전력 생산 후 배출되는 고온 배기가스를 HRSG로 통과시켜 열교환을 통한하여 전력을 생산하고 또 이렇게 발전된 증기는 프로세스용 또는 기타 방면으로 활용하는 방안에 대하여 지속적으로 진행되었다. 배열회수보일러의 설계수명해석에 대한 연구에서는 배열회수보일러의 설계단계에서 건전성 및 요구수명을 만족할 수 있도록 접근적인 방법의 연구가 수행되었다.

발전소 보일러의 효율 및 열전달에 관한 연구에서는, 현재 plant 효율을 높이기 위한 방안으로 사용되는 보일러 내부 연소과정에서 보일러 효율에 영향을 미치는 요소 즉 연료 중 수분손실, 미연탄소분,

방열량, 공기 중 습분에 의한 영향 등의 여러 인자들이 있지만 궁극적으로 효율을 높이기 위하여 노 내에서의 완전연소와 이 과정에서 발생하는 연소열을 보일러 튜브로의 전달이 관심영역으로 작용한다. 따라서 Plant 성능시험과 보일러 내 연소가스로부터 보일러 튜브로의 대류, 복사, 전도 등의 열전달 양을 측정하여 보일러의 열적분포를 해석하는 연구가 수행되었다.

한편 화력발전소에 사용되는 미분기의 성능 해석을 위하여 미분도(fineness) 분포가 미연탄소분과 NOx 발생에 미치는 영향을 실증모델(pilot scale model) 및 낙하식 튜브 전기로(drop tube furnace)를 이용한 실험이 진행되었다. 또한 연소 개선방법을 통한 배기가스의 개선에 질소산화물 저감에는 한계가 있으므로, 연소 후 탈진설비(SCR)에 촉매환원법을 이용하여 NOx 배출을 줄이는 연구도 보고되었다. [조형희, 연세대학교]

## 소각로

소각로 관련 학회인 한국폐기물학회, 대한환경공학회, 대한기계학회, 한국 열분해 응용공학회, 한국 화학공학회 등에서 여러 논문 발표행사를 거행하였으며, 최근에 이 분야에 관한 논문은 발표 숫자 및 질적인 측면에서 증가하고 있다. 학술발표 내용으로는 유기성 자원화, 소각/열분해, 매립, 관리/정책, 무기성 자원화, 토양오염분과와 기타 등으로 나눌 수 있었으며, 이 글에서는 학회 중심으로 지난 한 해 동안 소개된 폐기물의 소각기술 개발 내용을 요약하여 소개한다.

친 환경적인 소각로 건설을 목적으로 생활 폐기물을 소각로에서 처리할 경우, 직접 소각시키는 방법에서 발생하는 다이옥신과 같은 유해물질의 양을 줄이기 위하여, 열분해 방식의 기술개발 연구결과가 한국 기계연구원, 서울시립대, 영엔지니어링과 전주대, 대우건설 등에서 발표되고 많은 호응과 비중이 높은 편이었다. 이와 같이 열분해 방식이 도입된 이유로서는 열에 의한 고분자류의 분해 속도가 빠르기 때문에 소각과정에서 이를 제대로 제어하지 못해 유해물질

발생을 억제하지 못한다는 점에 있으며, 한편으로는 고열량 고분자 폐기물의 열처리하는 과정에서 나오는 높은 열을 보다 효과적으로 많이 회수하는 것도 하나의 목적이 되고 있다. 소각장까지 고려한 열분해 응용기술은 독일, 일본 등에서 집중적으로 개발되고 있으며, 국내 기업 등과 합작, 기술제휴 등을 통해 소각로를 건설하고 있는 실정이다.

한국열분해응용공학회에서 집중적으로 발표되고 있으나, 아직 국내에서는 아직 활발한 연구가 진행되지 못한 상황에서 국내 생활폐기물 특성에 맞추어, 가동 그레이트방식의 열분해로에서 설정온도에 따라 형성되는 열분해로의 내부 온도와 생성물 내의 미연분 및 중금속 성분을 분석한 연구 결과 등이 한국기계연구원, 연세대, 서울시립대, 인천시립대 등에서 연구 되고 있다. 일괄 투입 열분해 가스화 폐기물 건류가스화 소각장치는 긴세이 코리아 등에서 열분해를 위해서는 400°C~500°C에서 탄화가 잘 이뤄지고, 고온에서는 가스화현상이 나타나며, 열분해 과정 중 중금속 성분은 폐기물 상태에서와 거의 동등하며, 납의 경우 열분해 온도 범위에서 상당한 범위의 온도 의존성이 나타나는 것으로 효성에바라(주) 등에서 소개하였다.

(주)고려자동화 등을 중심으로 폐기물 고체연료(RDF)의 유동층 연소특성 실험 및 연소시 Cl 배출 거동 특성 연구가 실험실 규모로 하여 연구가 초기 단계에서 진행되어, 최적 연소조건 도출을 위한 RDF의 투입량과 공기 공급량의 설정, RDF량에 따른 Ca(OH)<sub>2</sub>량의 변화에 따른 비산재에 함유되어 있는 Cl의 함량을 측정한 내용이 소개되어 생활 폐기물의 RDF최적 연소 방안이 한국기계연구원, 호서대, 연세대 등에서 연구되고 있다.

유기성 슬러지의 해양 투기 및 직매립이 법률로서 금지됨에 따라 최근 중요성이 급증하고 있는 슬러지 분야 연구로는 하수 종말 처리시설과 공단 폐수 종말 처리시설 그리고 1종 폐수 업소에서 다량 배출됨에 따라, 유기성 슬러지를 환경적으로 무해화 처리 후 잔류물의 재활용 등의 기술이 요청되고 있는 가운데 단기적으로는 소각처리 및 연료화, 퇴비화, 건축재료의 재활용에 관한 연구가 충남대, 부경대, 영남대,

한국건설기술연구원 등에서 이루어지고 있다. 하수 슬러지를 고온 용융시켜 불연물은 재활용이 가능한 슬래그로 전환하고 가연분은 고온에서 소각하여 무해화시키는 용융로를 활용하여 하수 슬러지를 안정적인 슬래그화를 위한 신뢰성 제고에 관한 연구가 삼성엔지니어링, 포스코건설 등에서 이루어지고 있다. 또한 슬러지의 유동층 소각기술연구에서 연소 운전 시 슬러지의 투입률과 함수율은 소각특성에 미치는 영향 등에 대해 부경대, 한국에너지기술연구원 등에서 연구 중이며, 폐기물 소각로 연구는 선진국과의 격차를 줄여가면서 국내의 독자적인 모델과 상용화 설계기술의 확보를 통해 자체기술의 시기가 다가오고 있음을 예상할 수 있다. [정진도, 호서대학교]

### 원자력 에너지

원자력 에너지 분야에서는 원자력 발전소의 안정성을 확보하고 신뢰성 향상시키기 위한 기술개발과 함께 효율성, 이용률을 높이기 위한 연구들이 2004년 한 해에도 지속적으로 이루어졌다.

열전달 성능을 향상시키기 위한 방법으로 냉각수의 흐름방향을 조절하고 혼합할 수 있도록 곡선형의 지지 격자판 형상을 사용하거나, 지지격자에 부착되는 혼합날개는 부수로 내에 와류(vortex flow)를 발생시켜 유동 혼합을 촉진하는 역할을 하며 혼합날개의 모양, 각도, 크기 및 위치에 관한 연구가 수행되었다. 원자력 발전소에서 사용되고 있는 상변화용 핀튜브형 열교환기나 1차 기기냉각수 열교환기에 대한 성능평가에 대한 연구가 수행되었으며 또한 열교환기에서 생성된 습윤을 제거시키는 습분 분리기와 증기건조기에서의 유동해석을 통하여 습분 제거 성능을 조사하는 연구도 함께 수행되었다.

APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 원자로 공동에서 냉각수의 장기 열 수력거동에 대한 연구의 일환으로서 RELAP5/MOD3 전산코드를 사용하여 원자로공동에서 이상(two phase) 자연순환(natural circulation) 유동에 대한 1차원 예비해석을 수행한 연구도 보고되었다. 그리고 R-134a 유체를 활용하여 아직까지 연구되지 않은 임

계압력 근처 조건에서 환형관 채널에 대한 CHF 실험과 압력전이 실험을 수행하고, 임계압력 근처에서의 CHF 현상과 초임계 압력 조건에서 아임계로 압력이 천이 될 때에 환형관 채널의 열전달 거동을 조사하는 연구도 수행되었다.

증기 폭발은 원자로의 중대사고 연구에서 중요한 쟁점 중의 하나로 이에 대한 실험적, 해석적 연구들이 수행되었다. 용융물 성분의 변화가 자발적인 증기 폭발 발생에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 있었다. TROI-28 실험부터 TROI-32 실험을 수행하면서 증기 폭발의 기폭성은 단일물질인 zirconia에서 제일 크고, 공융점이 있는 70:30 코륨(Corium)에서 중간이고, 그 외 mushy zone이 존재하는 다른 성분비의 코륨에서 제일 약하게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 압력용기 내에 노심, 증기발생기, 주 냉각재 펌프, 가압기와 제어봉을 설치한 소위 일체형원자로로써 주기기간(integral reactor)에 대형배관이 없어서 대형냉각재 상실사고를 근원적으로 방지하여 안전성을 개선시킨 SMART 원자로에 적용되는 주계통의 열수력 특성과 새로운 개념의 안전계통 설계를 실험으로 실증하기 위하여 종합 실증 실험장치를 제작하여 SMART-P를 축소 모의한 실험장치를 활용 주계통 및 안전계통의 열수력 특성에 관한 실험 결과를 분석하는 연구도 보고되었다.

그 밖에 원자로용기의 건전성을 평가하기 위해 기존 결정론적 파괴해석에서 균열의 크기와 형상 및 재료 특성의 변화와 같은 불확실성을 고려하지 못하는 점을 보완하고자 확률론적인 방법을 도입하여 가압 열 충격에 의한 원자로용기의 건전성을 평가하는 연구도 수행되었다.

이와 같이 원자력 에너지 관련 분야에서는 주요 설비에 대한 안정성과 신뢰성 및 냉각 성능 향상을 위한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다. [조형희, 연세대학교]

### 열병합 및 복합발전

국내 발전용량의 상당 부분은 원자력 발전에 의해

서 생산되고 있지만 최근 들어 분산발전 개념의 확대와 청정발전에 대한 사회적인 관심으로 인하여 복합화력발전에 대한 관심이 증대되고 있는 상황이다. 복합발전에서는 두 가지 서로 다른 발전 방식이 병행되어 사용되고 수요에 따라 가변적으로 운영되고 있기 때문에 항상 최적의 운전 조건을 유지하는 것이 매우 중요하다. 따라서 복합 열병합 발전의 효율을 극대화하기 위해 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 연료소모량을 각 구성부의 성능 변수 함수로 표현하고, 이를 이용한 수치 해석을 통하여 주어진 전력 및 열부하 조건에서의 최소 연료 소모량을 갖는 시스템 최적 운전 조건을 찾기 위한 연구들이 수행되었다.

2004년 한 해에 분산형 발전 및 열병합 복합발전의 차세대 발전 시스템으로 주목 받고 있는 연료전지에 대한 연구가 다수 수행되었다. 원통형 고체산화물 연료전지(SOFC)와 마이크로 가스터빈(MGT) 하이브리드 시스템의 성능해석으로 Quasi-2D model을 이용한 결과, 고체산화물 연료전지와 마이크로 가스터빈의 성능을 계산하는데 Quasi-2D model이 Lumped model에 비해 적합하다는 것을 발표하였다. 또한 하이브리드 시스템에서 연료전지 입출구 온도차와 연료전지 작동온도를 고려하여 다양한 셀 입구 예열 방법에 따른 성능해석에 관한 연구도 수행되었다. 셀에서 반응하는 연료량이 많은 내부 개질 시스템일수록 그리고 셀입출구 온도차가 큰 시스템일수록 시스템의 성능이 높아짐을 보고하였다.

이외에도 간략화된 저항 네트워크 모델을 이용하여 연료극지지 평판형 SOFC 내의 전기 및 물질전달을 해석한 연구도 수행되어 접속자(interconnect)의 기하형상에 따른 연료전지의 성능변화에 대한 결과가 보고되었다. 그리고 SOFC의 부하변동에 따른 동적 성능 특성을 수치적인 모사기법을 이용한 해석적인 연구도 수행되어 부하변동에 따른 초기에는 전압이 급격히 증가한 후, 시간이 지남에 따라 부하이동과 온도 등의 영향으로 정상상태에 도달함을 발표하였다.

앞서 기술한 바와 같이 발전용 연료전지로 고체산화물 연료전지(SOFC) 대한 높은 관심과 함께 실험

적인 연구보다는 수치적인 모델링을 통한 해석이 주로 이루어졌다. [조형희, 연세대학교]

## 연소기기

연소기기는 공업 및 보일러 등에 사용되는 버너와 가스터빈 연소기 등으로 구분할 수 있으며, 에너지절약 및 저공해 연소기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 특히 최근에는 기후협약에 따른 온실가스 저감과 관련된 연소기술에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 2004년 한 해에는 이와 같은 저공해 연소기술과 관련하여 대한기계학회논문집에 6편, 자동차공학회논문집에 6편, 연소학회지에 4편 등 총 26여 편의 논문이 발표되었다.

저 NOx 연소 기술로서 다양한 저공해 연소기의 개발이 진행 중이며, 그 방법으로는 다단 연소(staged combustion), 가변형상(variable geometry), 희박 예혼합 예증발 연소(lean premixed prevaporized combustion), 농후 급냉각 희박연소(rich quick quench lean burn combustion), 촉매연소(catalytic combustion), 진동 연소, SCR, SNCR, 플라즈마 탈질 기술 등이 있다. 희박 예혼합연소 방법은 초기에 연소용 공기를 가연 하한계에 가깝게 연료와 다량의 공기를 예혼합하여 연소시켜 주연소 영역의 온도를 낮춤으로서 NOx를 저감시킨다. 과농 희박연소는 이와 반대로 주연소 영역에 연소용 공기를 가연 상한계에 가깝게 공급하여 연료 과농상태로 연소시켜 화염온도를 저하시키고 그 후류 쪽에 공기를 다량으로 공급하여 희박연소시켜 고온영역을 가능한 축소함으로써 NOx를 저감하는 방법이다. 촉매연소는 화염이 없는 연소이며 일반적인 혼합기의 가연한계 이하의 온도에서 연료의 산화반응이 일어나도록 하여 NOx를 저감하는 방법이다.

한국기계연구원에서는 희박 예혼합 방식을 채택하여 다양한 형상의 예혼합기와 당량비에 따른 배기가스 실험을 수행하였다. 여수대학교에서 실험한 진동 연소는 연료노즐에 근접하여 유로면적의 제어가 가능한 밸브를 설치하고 연료유량을 주기적으로 제어

함으로써 연료제트의 축방향 연료농도를 농후-희박 상태로 반복하도록 하여 연소로 내의 화염을 주기적으로 변화시켜 화염온도를 낮추어 NOx를 저감하고 연소장 내부의 유동변화를 심화시킴으로써 열전달효과를 높여 연료의 경제성도 향상시킬 수 있다. 한국에너지기술연구원과 경북대는 NOx 저감을 위해 고효율의 연료 분사 노즐 개발 연구를 수행하였다. 동아대에서는 가솔린 엔진의 실린더 주실 상부에 별도의 부실을 설치하여 주실 내 희박 혼합기의 연소를 개선하는 라디칼 유도분사 기술을 개발하고 있다. 이는 부실에서 생성된 연소물질을 주실의 예혼합기에 분출하여 급격히 연소시키는 것으로서 주실로 분출된 고온의 연소물질은 활성물질인 각종 라디칼을 다량 포함하고 에너지 밀도가 높아 예혼합기의 착화성을 증대시킬 뿐 아니라 분출가스에 의한 주실 내의 유동을 유발하여 초기화 염면을 확장시킴으로써 희박예혼합기의 급속연소를 가능하게 하여 미연탄화수소의 발생을 억제한다. 기계연구원과 한양대는 산소부화연소에 있어서 CO<sub>2</sub>를 산화제에 첨가하여 화염 온도 조절과 산화제 유속을 제어하는 연구를 통하여 CO와 NOx를 제어하는 실험을 수행하였다.

가장 대표되는 배가스 처리기술은 선택적 촉매 환원법(SCR : Selective catalytic reduction)으로 NH<sub>3</sub> 등의 환원제를 사용하여 NOx를 N<sub>2</sub>로 환원하는 기술이다. SCR법은 신뢰성이 높고 정화효율이 높아 상업적 질소 산화물 처리기술로 발전하였으나 촉매의 효율을 높이기 위해 촉매가 요구하는 일정 범위의 온도를 유지해야하므로 낮아진 배가스의 온도를 다시 높여야하고 환원제인 NH<sub>3</sub>가 slip될 우려가 있다. 한국에너지기술연구원에서는 플라즈마/촉매 복합 다단 반응기를 통해 이러한 문제를 해결하려 하였다. 저온 플라즈마를 이용한 배가스 처리기술은 가스상의 물질을 이온화된 원자 또는 원자단 상태로 만들어 화학 반응을 촉진하는 원리를 이용하여 배가스 중의 유해가스를 제거하는 기술으로써 초기 투자비용이 적고, 기존의 설비 규모나 공정에 크게 영향을 주지 않는 장점이 있다.

화염에서 생성되는 매연의 전개과정은 연료의 열분해, PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)

의 생성, 초기 매연 입자의 생성, 성장, 탄소화 과정(carbonaceous process), 산화까지 복잡한 물리, 화학적 과정들을 거친다. 이러한 성장 과정을 연구하기 위해 한국과학기술원에서는 역 확산화염에서의 매연 입자 생성을 실험적으로 연구하였으며, 부산대에서는 TIRE-LII(Time-Resolved Laser-Induced Incandescence) 기법을 이용하여 매연 입자 크기를 측정하였고 질소 첨가와 예열 온도가 매연 입자 생성에 미치는 영향을 조사하였다.

서울대학교에서는 버너나 가스터빈에서의 연소 효율을 높이기 위해 고온 공기 혹은 상승된 온도 환경에서 연소를 연구하고 있으며 특히 연소 시스템의 안정과 관련한 화염 안정성에 관한 연구를 수행하고 있다. 난류 부상화염에 관한 연구는 상온에서 다양한 가스 연료에 대해서 노즐 직경 변화, 연료 희석, 동축류 속도 변화 등의 효과를 고려하여 연구를 진행하고 있다. [민경덕, 서울대학교]

## 공기조화

2004년 한 해에도 공기조화 연구 분야에서는 삶의 쾌적감을 증대시키기 위한 실내 환경 구현과 에너지 절약을 목적으로 다양한 연구들이 수행되었다.

환기가 고려되어야 하는 학교 교실에 냉방을 위해 4way 에어컨이 설치되는 경우, 수치적 방법을 이용하여 냉기의 토출 각도에 따른 기류분포성능지표(ADPI)와 온열쾌적지표(PMV)를 분석한 연구가 수행되었다. 그 결과, 공조기의 토출각도가 커질수록 토출기류의 영향으로 인하여 재실영역에서의 온도 균일도가 떨어지는 특성을 보이며 또한 ADPI와 PMV의 분포의 정성적인 경향은 매우 비슷함을 보고하였다. 또한 냉동 컨테이너선의 환기 배관형상에 따른 냉각성능을 향상시키면서, 원가 절약에 기여할 수 있는 방안에 대한 연구도 이루어졌다. 모형실험을 통하여 냉동 컨테이너선의 3종류의 배관 형상에 따른 냉동 컨테이너선의 냉각 성능을 평가하고자 1/30 축적 모형을 이용한 온도 측정 및 유동 가시화 실험을 통해 공기 배출방식과 공기 흡입방식에 따라 냉각 성능이 큰 차이가 나타남을 보였다.



또한 열펌프(heat pump)에 관한 다양한 연구가 이루어 졌는데, 그 중의 하나로 지열원을 이용한 열펌프에 관한 연구로 지열원 수축형식 냉난방 설비에 대해 실증적인 실험이 수행되었다. 실험결과, 설비는 한전에서 요구하는 방열성능, 축열이용율, 축열조 단열기준, 총괄에너지 이용효율 및 안정성, 신뢰성 시험에 안정기준을 모두 충족함을 보고하였다.

친환경적인 연구의 일환으로 이산화탄소를 냉매로 사용하는 내부열교환기가 부착된 열펌프 시스템에 대하여 팽창밸브 개도, 압축기 속도, 냉매 충전량 등의 제어변수의 변화에 따른 시스템의 성능을 고찰하고 이를 시뮬레이션을 통한 검증에 관한 실험적인 연구가 수행되었다. 난방조건에서 냉매 충전량이 성능계수에 미치는 영향은 미비하였으나, 난방조건에서는 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 결국 계절에 따른 시스템 부하를 맞추기 위하여 계절별로 다른 냉매 충전량 제어로직의 적용이 필요함을 보고하였다. 또한 자동차의 동절기 난방 성능의 개선

을 위해 냉각수를 열원으로 하는 열펌프 시스템을 구성하여 단품시험을 통해 용량을 설계하여 시스템 시험과 실차 시험을 통해 기존 차량의 난방시스템과 난방성능을 비교한 연구도 이루어졌다.

그 밖에도 물-공기 직접접촉식 공기조화장치에 대해 열 및 물질전달 모델을 적용하여 공기조화장치의 출구상태를 예측하고, 여러 가지 작동변수가 성능에 미치는 평가하였다. 그 결과, 노즐에서 분무되는 냉각수 유량이 증가할수록, 냉각수 온도가 낮아질수록 공기조화장치 출구에서 공기온도와 습도비가 감소되며 물의 온도와 유량이 증가할수록 공기온도와 습도비가 증가됨을 발표하였다.

앞서 기술한 바와 같이 온도, 습도, 환기, 청정, 기류 등이 종합적으로 조절 가능한 환경을 만들며, 동시에 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위한 공기조화 연구는 지속적으로 이루어질 것으로 기대된다. [조희희, 연세대학교]

## 기계용어해설

### 오류역전파신경망(Backpropagation Neural Network)

신경망은 생물학적 뉴런(neuron)을 모델링한 유닛(unit)들과 그 유닛 사이의 가중치 연결들로 이루어지며 각 신경망 모델에 따라 다양한 구조와 독특한 학습 규칙을 갖는다. 각 신경망은 계층별로 그룹화된 뉴런들의 집합으로 구성되어 있다. 이는 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)의 세 계층으로 이루어져 있으며 은닉층의 수는 문제의 비선형성이나 설계변수의 수에 따라 다양하게 사용될 수 있다. 처리 노드(node)가 많기 때문에 시스템의 부분적인 결함을 갖고 있더라도 전체 시스템은 안정적으로 동작할 수 있는 것이 신경망의 장점이다. 그러나 문제에 적합한 신경망을 구성하기 위해서는 내부의 가중치를 적절히 조절해 주어야 한다. 이 때 오류역전파신경망(BPN)은 실제 시험값과 학습을 통한 출력값의 오차를 최소화시키도록 내부의 가중치를 최적화시키는 방법으로 사용된다.