

에너지 및 동력공학 부문

이 글에서는 2003년도 에너지 및 동력공학 분야의 주요 연구 동향을 요약하여 소개한다. 내연기관, 가스터빈 및 증기터빈, 열병합 및 복합발전, 보일러 및 발전설비, 소각로, 연소기기, 원자력 에너지, 공기 조화 등 각 세부분야에 있어서 심도 있는 연구 및 기술개발이 폭넓게 이루어졌으며, 각 세부분야별 연구 동향을 소개하면 다음과 같다.

글 · 권 오 철 부문위원장

[한국수력원자력(주), 발전본부장]

e-mail · ockwon@khnp.co.kr

내연기관

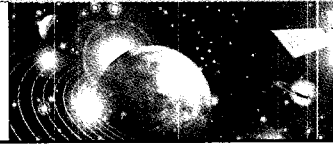
최근 자동차 엔진에는 단순한 고출력뿐만 아니라 배기가스 규제와 안전에 관한 사항을 동시에 요구하고 있다. 특히 범세계적인 지구온난화 대책회의를 통해 지구온난화의 주요 요인인 CO₂ 배출 가스의 감축이 규제되고 있으며, 또한 에너지 고갈에 대한 우려가 심화됨에 따라 연비 향상을 위한 연구가 진행되고 있다.

2003년도에 발표된 내연기관 분야에 대한 연구들을 살펴보면 연비 향상 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(DISI : Direct Injection Spark Ignition), 커먼 레일식(CRDI : Common-Rail Direct Injection) 초고압 디젤엔진 그리고 가변밸브타이밍(VVT : Variable Valve Timing) 엔진 기술로 구분되며, 새로운 동력시스템은 기존의 엔진시스템과 전기자동차를 결합한 하이브리드 자동차(HEV : 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 흡기관 분사 방식에서 연료를 직접 연소실로 분사하는 방식으로 변환한 저연비, 고효율의 엔진으로서 연구 분야는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 직분식 가솔린 엔진의 성능은 분무 특성에 많은 영향을 받기 때문에 가시화 엔진과 여러가지 광계측 기술을 이용하여 흡기행정 분사와 압축 말에 분사하였을 경우의 분무의 거동을 연구하는 분야이다. 구체적으로 한양대학교에서

는 Mie 산란 방법과 엔트로피 해석 방법을 이용하여 혼합연료비에 따른 분무 균질도 특성에 관한 연구와 PIV와 엔트로피 해석을 이용하여 DISI엔진 내 분무 및 유동 특성 해석에 관한 연구를 수행하였으며, 부산대학교에서는 직접분사식 가솔린 엔진에서 분사시기와 흡입유동이 실린더 내 연료의 거동에 미치는 영향에 대한 연구와 LIEF 기술을 이용한 피스톤 캐비티 직경에 따른 연료의 액 기상 거동에 관한 연구를 수행하였고, 한국과학기술원에서는 분할 분사의 효과에 대해 연구하였다. 이 외에도 전북대학교에서는 공압 선화 분사기의 분무 영역별 분무 특성에 대하여 연구를 하였으며 서울대학교에서는 연소실 벽면의 액막 거동 분석 등에 관한 연구를 수행하였다. 둘째, 직접분사식 가솔린 엔진의 연소는 성층 연소를 주로 사용하므로 점화 플러그 주변의 농후한 혼합기를 이루기 위한 연구가 진행되었다. 고등기술연구원에서 흡기과급이 성층화 연소에 미치는 영향과 명지대학교에서는 연료를 압축 말에 분사하여 성층화 연소 및 안정화에 관한 내용의 연구가 진행되었고, 연세대학교에서는 직접분사식 가솔린엔진 배출가스 중 비열 플라즈마와 촉매시스템을 이용한 NO_x 저감에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 마지막으로, 수치해석을 통한 DISI엔진의 분무 및 연소를 예측하는 연구가 진행되었다. 부산대학교에서 다양한 분위기 압력에서 DISI 분무 해석을 위한 혼합 분열모델에 대한 연구와 혼합 모델을 이용하여 분무를 예측하는 연구가 수행되었으며, 울산대학교에서는 외류 분사노즐에 의한 비증발 분무의 가시화 및 수치해석이 수행되었고, 서울대학교에서는 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 한양대학교와 국민대학교에서는 분사압력과 분사시기의 제어에 따른 엔진의 출력 및 배기 성능 특성과 가시화엔진을 이용한 Soot 및 화염 특성에 관한 연구들이 수행되고 있으며, 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 한양대학교에서 노즐 형상에 따른 커먼레일 인젝터의 분사율 특성에 관한 연구가 수행되었으며, 한국과학기술원에서는 커먼레일 시스템의 비 증발 디젤 분무에서 분사율과 주변유체 유입에 관한 연구가 수행되었다. 또한 전남대학교에서는 커먼레일 인젝터를 이용한 DME 연료의 분사가 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 규명하는 연구가 수행되었으며, 성균관대학교에서는 경유와 물의 혼합연료의 연소 특성에 관한 연구가 수행되었고, 커먼레일을 이용한 새로운 연소방식인 균일 예혼합 압축착화(homogeneous charge compression ignition) 엔진에 대한 연구도 활발히 수행되었다. 구체적으로 한양대학교에서는 저압 커먼레일 인젝터를 이용하여 분무특성 및 연소특성에 관하여 연구를 수행하였으며, 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, 현대 오토넷과 템스에서는 커먼레일용 인젝터와 피에

조 인젝터 구동회로 및 압력제어기 개발에 관한 연구를 수행하였다. 이 외에도 성균관대학교에서는 극초압 디젤분무 특성 해석을 위한 단발분사장치의 개발에 관한 연구가 수행되었다.

가변 밸브 타이밍(VVT) 엔진은 전자제어와 유압제어 및 소재 기술의 개발로 많은 연구가 진행되었다. 구체적인 연구는 현대자동차에서 저속 및 고속영역에서 성능 향상을 위한 두 단계의 VVT기술에 관한 연구와 모토닉에서 camless 밸브 기구, electro-magnetic 및 electro-hydraulic을 이용한 가변 밸브 타이밍 엔진에 관한 연구가 진행되었다. 또한 가변 밸브 타이밍을 이용하여 성균관대학교에서 아트킨슨 사이클의 고폽창법의 연구와 국민대학교에서의 배기 밸브 타이밍 변화가 스파크 점화기관의 냉시동 운전 에 미치는 영향에 대하여 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 현대자동차에서는 직렬형 하이브리드 버스에서 보조 동력장치의 고효율 작동을 위한 제어 알고리즘에 관해 연구가 진행되었고, 서울대학교에서는 특정 주행 사이클과 임의의 주행 사이클에서 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. 또한 에너지기술연구원에서는 운전 조건에 따른 제어특성을 연구하였고, 인제대학교에서는 전기식 제동장치의 해석 및 최적화에 관한 연구가 수행되었으며, 한양대학교에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 다중 동력 시스템에 대한 용량 최적화에 관한 연구가 수행되었고 성균관대학교에서는 하이브리드 자동차의 가,감속 페달 입력 HIL 시뮬레이터를 개발하였고, 계명대학교에서는 대형 자동차 하이브리드 구동 시스템의 회로구성과 특성 해석에 관하여 연구하였다.



최근 각광을 받고 있는 새로운 동력시스템인 연료 전지 분야는 친환경적이며, 고효율의 동력원으로서 2003년도 연구 현황은 서울대학교에서 CFD를 이용하여 평판형 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석하는 기초 분야의 연구와 상압 용융탄산염 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템의 성능을 해석하는 연구 및 주변 장치를 고려한 자동차용 고분자 전해질형 연료전지 시스템 성능 시뮬레이션에 관한 연구가 진행되었으며, 또한 성균관대학교에서는 연료전지 하이브리드 차량의 성능 시뮬레이터 개발 및 성능 해석 그리고 열역학적 특성을 고려한 연료 전지 차량의 성능해석에 관한 연구가 수행되었다. 이 외에도 연료전지 차량의 수소연료를 공급하는 시스템에 관한 연구는 미리 충전한 수소를 저장탱크로 사용하는 방법과 메탄올과 같은 연료를 차에 탑재하여 직접 수소를 제조하여 이용하는 방법이 연구되었다.

이와 같이 내연기관 분야에 대한 2003년의 연구들은 기존의 동력시스템을 고효율 친환경의 시스템으로 개발하는 연구와 연료전지와 같이 새로운 동력 기술에 대한 연구들이 활발하게 수행되어졌다. [이기형, 한양대학교]

가스터빈 및 증기터빈

최근 들어 항공기용 엔진이나 대형 발전 시스템 등에 한정적으로 사용되던 가스터빈은 높은 효율의 복합화력 발전뿐만 아니라 단위 건물의 열병합 발전, 하이브리드 시스템 등으로 그 활용 범위가 점차 넓어지고 있다. 이러한 추세에 따라 2003년에도 2002년 연구들의 연장선상으로 가스터빈의 효율 향상을 위해 고온의 연소가스로부터 터빈 블레이드를 보호하기 위해 개선된 냉각기법 연구들이 지속적으로 수행되었으며, 기존의 사용되고 있는 가스터빈에 대한 유지 및 보수와 관련된 연구들도 이루어졌다. 증기터빈의 경우에는 차세대 초초임계압 발전에 대한 관심이 증대됨에 따라 초초임계 증기터빈에 대한 새로운 기술 동향들도 많이 보고 되었다.

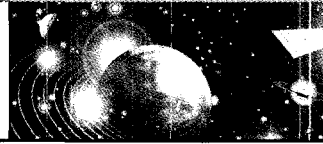
냉각유체가 지나가는 터빈 블레이드 내부관에서 열전달을 향상시키기 위한 연구로 실제 가스터빈이 작동하는 환경에 상응하는 다양한 회전수를 갖는 블레

이드 내부관의 열전달 특성에 대한 연구들이 많이 수행되었다. 열전달 향상을 위해 터빈 블레이드의 내부관에 적용되는 다양한 요철배열 및 내부관 종횡비에 따른 내부관의 국소적인 열전달 결과들이 보고되었다. 내부관 종횡비 및 요철배열에 따른 내부관 열전달의 분포를 살펴보면 요철에 의한 유동, 곡관부에 의한 디와류 그리고 회전에 의한 코리올리력의 상호작용에 의해 국소적인 영역에서 상이하게 나타나고 있으나, 전체적인 열전달 특징은 유사한 것으로 보고 되었으며, 내부관의 회전수가 증가될수록 요철에 의한 열전달 촉진 효과보다 회전에 의한 효과가 우세하다는 결과도 발표되었다. 또한 내부관이 정지된 경우를 모사하여 뼈기형 단락요철이 설치된 내부관의 종횡비 변화에 대한 영향을 고찰한 연구결과도 보고 되었다.

기존의 막냉각과 충돌제트 냉각기술을 접목한 복합 냉각기술의 하나인 충돌제트/유출냉각기법에 대한 연구들도 수행되었다. 실제 가스터빈에 적용이 가능한 충돌제트/유출냉각에서는 횡방향 유동이 발생되고, 이러한 횡방향 유동은 낮은 열전달 영역을 형성시키게 된다. 따라서 횡방향 유동으로 야기되는 단점을 극복하고자 충돌제트/유출냉각에 다양한 요철을 설치한 연구들이 수행되어 횡방향 유동에 의한 충돌제트가 쓸려 가는 현상을 감소시켜 보다 높은 냉각성능을 얻는 것으로 보고 되었다.

전체적인 가스터빈 블레이드 표면에 대한 열부하 파악 및 냉각기술의 기초자료를 얻기 위한 연구들도 수행되었다. 발전용 가스터빈 1단 블레이드의 팁 간극을 모사하여 팁 간극으로 야기되는 누설유동과 블레이드 사이의 통로를 지나가는 복잡한 유동에 의한 블레이드 압력면과 흡입면 전체 영역에 대한 열전달 계수 측정결과가 보고되었다. 또한 항공용 터빈 블레이드의 팁과 그 주변에서의 열전달 계수를 구하기 위해 감온성 액적 기법을 이용한 실험도 수행되어 팁 간극의 증가에 따라 팁과 슈라우드에서의 열전달 계수가 증가된다는 결과와 함께 블레이드 팁 형상에 따른 열전달 특성에 대한 결과도 발표되었다.

가스터빈 블레이드에 대한 개별적인 냉각 기술들에 관한 연구 이외에도 기존 가스터빈의 정비기술 관련 연구들도 수행되었다. 현재 발전회사에서 운용 중인 7FA/FA+급 1단 블레이드를 위한 새로운 다양화된



정비기법을 적용한 결과, 1단 블레이드의 2차 재생시 재생수율을 70% 정도 높일 수 있는 것으로 보고 되었다. 또한 니켈기 초합금으로 제조된 가스터빈의 회전익과 고정익류의 재생공정에 있어서 필수적인 열처리 기술에 대한 기초연구들도 수행되어 그 결과가 발표되었다.

초초임계압 화력발전(ultra-supercritical Power Plant)에 대한 관심이 증대되어 2003년에는 초초임계 증기터빈에 대한 기술 동향 및 구체적인 기술방안에 대한 정보 교류가 학술대회를 통해 활발하게 이루어졌다. 차세대 발전기술의 하나인 초초임계 증기터빈 개발에 대한 외국의 연구사례들이 소개되었으며, 성능 향상을 위해 진보된 선회단 및 유로 설계를 통한 증기터빈의 효율 개선과 함께 초초임계 증기 조건으로 인한 증기터빈의 신뢰성 향상을 위한 개선된 터빈 냉각유로 설계나 새로운 고온용 강에 대한 지속적인 연구의 필요성이 다수의 강연 및 논문들에서 보고되었다.

앞서 기술한 바와 같이 가스터빈의 경우, 가스터빈 블레이드의 개선된 냉각기술에 관한 다수의 연구들이 지속적으로 이루어지고 있으며, 이와 더불어 가스터빈 블레이드의 정비기술과 관련된 연구도 진행되고 있음을 알 수 있다. 증기터빈의 경우에는 한국전력과 산업체를 중심으로 초초임계압 화력발전에 대한 연구들이 진행되고 있어, 향후에도 이 분야에 대한 관심은 더욱 고조될 것으로 기대된다. [조형희, 연세대학교]

열병합 및 복합발전

작년 한 해에도 열병합 및 복합발전의 연구경향을 살펴보면 국내 열병합 및 복합화력 발전소 설비의 최적관리와 온라인 실시간 운전 성능 감시시스템 등을 도입해 발전 효율을 최적화 하고, 환경 친화적 고효율 발전 방식을 도입해 기존에 운영되고 있는 발전소의 운영에 적용하려는 노력이 활발히 진행되었다.

복합 발전 시스템은 가압된 보일러 내에서 연료를 연소시켜 보일러에서의 연소열을 회수, 증기터빈을 구동하기 위한 증기를 생산하고, 보일러에서 배출되는 고압의 연소 가스로 함유된 분진을 제거한 후 가스터빈 구동에 사용하여 전력을 생산하는 고효율 발전

방식이다. 또한 보일러 전력 수요의 감소에 따라 보일러에서 생산되는 연소열을 이용 열에너지를 생산 할 수 있어 전력 및 열에너지의 수요에 따라 가변적으로 운영이 가능하여 분산형 발전 방식에 적합하다고 알려져 있다. 복합 발전에서는 두 가지 서로 다른 발전 방식이 병행되어 사용되고 수요에 따라 가변적으로 운영 되고 있기 때문에 항상 최적의 운전 조건을 유지 하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 발전소의 운전성능 및 설비의 이상 유무를 온라인으로 상시 감시하는 시스템을 구축하여 최적의 운전 상태를 유지하려는 연구가 진행되었으며, 가스터빈 열병합 복합화력 발전에서 연료 소모를 최소화하기 위한 운전 조건을 단기적인 부하의 변동에 따라 찾아내려는 연구가 이루어졌다.

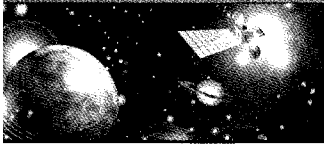
작년 한 해에는 예년에 비해 가스터빈과 스팀터빈으로 이루어진 열병합 복합 발전시스템의 운전 성능을 개선하여 효율을 높이려는 연구는 감소한 반면, 기존의 열기관들에 비하여 효율이 높고, 규모가 작아 분산형 발전 및 열병합 복합발전의 차세대 발전 시스템으로 주목 받고 있는 연료전지에 대한 연구가 크게 증가하였다. 특히 연료전지 자체의 성능해석과 설계에 대한 연구가 상당히 구체적으로 이루어지고 있는 것으로 나타났다.

다단 고체 산화물 연료 전지에 대하여 스택(stack)의 구성을 변경시켜 가며, 이에 따른 열역학 적인 성능 해석이 이루어졌으며, 유동 해석을 이용한 성능 특성에 대한 분석도 수행되었다. 또한 연료전지 스택에 대한 구조 해석을 통하여 단위체적당 전력 밀도를 높이기 위한 위상최적설계로 이루어졌다.

고체 산화물 연료전지에 대해서는 연료전지 자체의 구조에 대한 구체적인 연구가 이루어진 반면, 상대적으로 오래 전부터 연구되어 오던 상압 용융 탄산염 연료전지에 대한 연구는 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템의 성능설계에 대한 연구가 진행되었다. [조형희, 연세대학교]

보일러 및 발전설비

최근 산업용 보일러를 비롯한 에너지 발생기에 대한 대기환경 규격이 강화됨에 따라 에너지 사용 효



율의 극대화와 환경 친화적 고효율 발전방식의 도입 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 보일러 운전의 최적화를 통해 오염물질의 방출을 줄이고 보일러의 전반적인 성능향상과 함께 부품 수명을 연장하기 위한 연구들이 많이 진행되었으며, 국내의 전력 시장의 경쟁체제 하에서 경쟁력 확보를 위한 발전 원가절감을 도모하기 위해 발전설비의 최적 운전성능 유지를 위한 노력도 활발히 진행되었다. 이러한 보일러 및 발전 설비에 대해 수행된 연구들을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

전통적인 관심사인 최상의 연소 조건을 유지하여 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, 기존에 많은 연구가 이루어지던 배기가스 재순환(FGR)을 보일러에 적용하여 FGR률의 변화가 배기 배출물에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. 또한 석탄화력 보일러에서 연소가스 중 회분에 의한 열전달 감소를 방지하기 위해 보일러 전열면에 설치되어 수동으로 가동되던 슈트 블로워의 운전조건을 최적화시키는 알고리즘을 이용하여 효율을 증가시키려는 연구도 발표되었다.

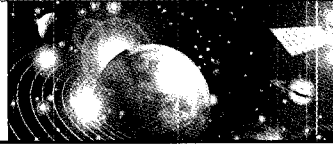
앞서 기술한 실험적인 연구 이외에도 보일러의 연소해석을 통해 얻어진 결과를 보일러 화로해석 및 성능 해석에 사용하기 위해 해석적인 결과를 연료량 결정과 보일러 성능 개선 등에 대한 정량, 정성적인 분석에 활용할 수 있는지에 대한 평가도 이루어졌다. 보일러 운전의 최적화를 통한 성능향상을 위한 연구 이외에도 발전용으로 사용되는 대용량 보일러의 주증기 튜브의 과열을 방지하여 수명을 연장하기 위한 연구가 수행되었다. 발전용 보일러의 부속설비 중 교체가 가장 빈번하게 이루어지는 설비는 주증기 튜브의 3차 또는 최종단 열교환부이다. 이는 가혹한 운전 조건과 더불어 운전조건과 연료조건에 따라 고온부가 이동하는 현상이 나타나기 때문에 손상위치를 예측하기 어렵다. 따라서 불균일한 연소가스 열분포하에서 튜브 재질의 온도를 균일하게 유지하도록 증기유량 제어를 통하여 증기 튜브의 수명을 연장하였다. 자연순환식 보일러에서 운전 조건의 교량은 수위의 스웰현상이

일어나고 이때의 수위는 실제 대상계 내부 보유 수량과는 반대 경향의 변화를 보여, 기존의 제어방식의 비효율적인 응답을 유도하게 된다. 이를 방지하기 위하여 단순화된 수위 거동 모델을 구성하여 운전 제어 성능을 개선하려는 연구도 수행되었다. 대부분의 연구가 화력발전용 대형 보일러에 치중해 있었으나, 이외에 대체 에너지를 이용하기 위한 소형 수축열식 전기보일러에 대한 보온과 축열, 그리고 방열 성능에 대한 연구도 수행되었다.

차세대 초초임계압 석탄화력발전소에 대하여 본격적인 기술 개발 및 실증 신뢰성 평가에 대한 연구가 한국전력을 중심으로 이루어지고 있으며, 증기의 온도와 압력이 점차 높아짐에 따라 증기 배관의 파열 등을 실시간 감시하기 위해 LVDT와 Rotary encoder를 이용한 변위측정 시스템 개발에 대한 연구결과도 발표되었다.

간접수명 평가법을 이용하여 중유 발전소의 재열증기관 균열과 수직배관의 처짐현상에 대한 원인을 분석하고 향후 보수 후 운전시 건전성을 평가하고자 하는 연구도 이루어졌다. 또한, 스팀터빈 플랜트의 시스템 구성요소들의 엔트로피 생성량을 MOPSA (MODIFIED Productive Structure Analysis) 방법을 이용한 엑서지 해석을 통해 계산하여 구성기기들의 효율과 열역학적인 성능을 예측하고, 이를 열경제학적으로 해석하여, 단가 및 비가역성에 의한 경제적 손실을 구하여 복잡한 열시스템의 작동 및 최적화 설계를 위한 수단이 제공되었다.

기존의 보일러 및 발전 설비의 운영을 최적화하기 위한 연구들 이외에도 차세대 에너지원으로 각광 받고 있는 연료전지를 이용하여 분산형 발전시스템을 구축하기 위한 기초 연구도 수행되었다. 국내 공동주택을 대상으로 기존의 독립적으로 공급되는 전력, 열, 가스계통 등으로 인한 시설비나 수송손실 등을 개선하기 위하여 단지나 건물에서 독자적으로 열 및 전기를 생산하여 공급하는 방식인 분산형 에너지 공급 시스템에 대하여 연료전지를 에너지원으로 설정하여 분석모델을 개발하기 위한 연구가 이루어졌다. 기존의 화석연료를 대체하기 위해 태양열과 풍력을 이용한 발전 시스템에 대한 논문도 각각 1편씩 발표되었다. 분할형 집광기를 이용한 스텔링엔진 발전시스템을 설



계하고 이에 대한 성능을 예측하여 장래의 에너지 부족 및 환경보전 등의 문제에 대처하고자 하였으며, 풍력을 이용한 발전의 경우, 기존의 상용화 되어 있는 수십 미터에 이르는 로터 블레이드보다 가볍고 우수한 성능의 로터 블레이드 설계를 위한 수치해석적 연구도 수행되었다. [조형희, 연세대학교]

소각로

폐기물 문제를 해결하는 데 가장 중요한 것은 발생량을 줄이는 것이다. 즉 발생억제, 감량, 재이용, 재활용, 에너지 회수를 포괄하는 개념으로 하여 매립이나 소각을 통해 최종적으로 안전하게 처리해야 한다.

우리나라는 1986년에 폐기물관리법이 제정되면서 관리체계가 일원화됐고, 다시 재활용의 활성화와 폐기물 처리시설 설치 촉진에 관련된 법이 별도로 제정되면서 세분화, 전문화가 되었다. 우리나라의 생활폐기물 소각시설은 1986년 80톤/일 규모로 준공한 서울 목동소각장을 본격적인 시설로 시작해서 대구 성서, 안양 평촌, 부산 대대, 창원, 서울 상계 외 대형소각시설 보급이 활성화되어 기술적으로 많이 향상되어 왔다. 1997년 7월 다이옥신 규제 관련 법이 추가되면서 오염물질을 최소화시키고 완전연소의 운전 개념이 실제로 정착하게 되었다.

스토카 소각기술은 우리나라가 외국기술을 도입하여 건설한 지 20년 가까이 됐고 선진국은 100년의 역사를 가지고 있으며, 처리 대상 폐기물 특성에 따라서 생활폐기물은 스토카식이 우리나라를 포함한 전 세계의 설치 가동 실적의 95% 이상을 차지하고 있다.

스토카식의 특징은 폐기물 성상 변화에 대응 적응력이 뛰어나 소용량(50톤/일) 시설로부터 대용량(500톤/일) 시설까지 정상 가동되는 기종으로서 폐기물을 선별, 파쇄 등의 별도의 전처리가 필요 없으며, 불연물이 포함되는 일괄투입소각(mass burning)방식으로 적합하여 많이 채택하고 있다. 부지가 협소하고 환경관리가 뛰어난 스위스나 일본이 전체 폐기물 발생량의 80%를 소각하고 있는 것은 기존 소각방식의 안정성을 입증하고 있는 것이다.

최근 유럽을 중심으로 열분해 용융기술을 개발하여 열분해 열처리 후 발생하는 소각재를 1,300~1,500°C

정도로 용융하여 소각재를 재활용하도록 하고 있으며, 공기 중의 산소에 의한 연소방식인 소각기술에 비해 저산소 분위기의 열분해 기술은 다이옥신 생성을 억제하는 기술로 소개되고 있다.

스토카 기술은 50톤/일 이상 규모로 국내에 이미 33개 소각장에서 현재 가동 중에 있어 기술입증이 되었고, 열분해 용융기술은 국내에 아직 가동되는 곳이 없어 단시간의 외국시설 견학 정도만으로 파악하고는 있는 수준이며, 그 특징은 다음과 같이 알려지고 있다.

1. 소각재는 바닥재와 비산재 두 가지가 있는데 일반폐기물인 바닥재를 용융하기 위해 순산소나 LNG의 보조연료를 투입하여 용융온도 1,300~1,500°C 또는 기종에 따라 2,000°C를 유지해야 하므로 유지관리비가 많이 소요된다. 또한 유지관리가 어려운 산소 제조시설을 갖춰야하는 위험성도 상존한다. (지정 폐기물인 비산재는 소각기술과 동일하게 별도의 약품 및 고화처리하고 있어 열분해 용융기술로 모두 해결되는 것은 아님)

2. 다이옥신 발생량은 소각기술의 경우 연소가스처리 이전에 1~2ng 정도가 배출되고, 연소가스 처리 후 0.05~0.01ng이 배출된다(법적 규제치는 0.1ng 이하). 한편 열분해 용융로는 연소가스 처리 이전에 발생량은 알려진 것이 없고, 기술 보유사 별로 차이는 있지만 세미나를 통해 0.05~0.001ng으로 발표되고 있다. 한편 연소가스 처리설비는 소각기술의 경우 단지 활성탄+백필터 또는 활성탄+백필터+SCR로 처리하고 있고 열분해 용융기술 경우도 소각기술과 동일한 공정으로 시설된 것이 대부분이라 소각기술보다 나은 점이 없고 기술에 따라 2중 백필터 사용으로 더욱 복잡하게 가동하고 있다.

3. 열분해의 효과를 높이기 위해 파쇄의 전처리를 필히 수행해야 한다.

4. 시설비에 대해 열분해 용융기술이 소각기술의 약 2배, 운영비가 2배 정도 소요될 것으로 대부분 전문가들은 추정 확신하고 있다.

5. 발열량은 스토카 소각 경우 4,500kcal/kg까지 처리가 가능한데 주의할 것은 일본, 프랑스, 독일, 덴마크 경우 생활폐기물 발열량이 2,000~3,000kcal/kg 범위로서 더 이상 증가되지 않고 있는데 이는 고발열



량 물질이 선별 재활용 되는데 기인하고 있어, 열분해 기술만이 고발열량 처리가 가능한 것처럼 주장하는 것은 잘못 알려진 듯 하다.

이상에서 간단히 비교하였지만 소각기술은 100년의 역사를 가지고 전처리 없이 일괄투입연소(Mass Burning)를 하며 다이옥신은 0.05~0.01ng을 보증한다. 한편 열분해 용융기술은 일본지역에서 활성화되고 있으나, 본래의 목적은 폐합성수지와 같은 고발열량의 산업폐기물용으로 적합한 것으로서 전처리가 필요하고, 다이옥신 0.05~0.001ng, 순산소나 LNG의 보조연소 외에 복잡한 연소가스처리 설비 등으로 시설비와 유지비가 높은 특징을 가지고 있어 폐기물 열처리 기술은 신뢰성, 안정성, 기술성, 경제성 등이 중요한 선정기준으로 평가돼야 한다. [정진도, 호서대학교]

원자력 에너지

원자력 에너지 분야에서는 원자력 발전소의 안정성과 신뢰도 향상 및 기술개발을 통한 효율 향상을 통하여 이용률을 높이는 것을 중점으로 연구되고 있다.

원자력 발전소의 안전성과 신뢰성 확보를 위하여 중대사고(노심용융사고)가 발생할 때, 원자로 노심이 녹아 냉각수와 반응하여 급격히 증기를 발생시키고 동시에 파괴적인 압력파가 발생하여 증기폭발이 일어날 수 있으므로 TROI 실험으로부터 냉각수의 깊이와 용융물의 성분이 증기폭발 발생에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구들이 수행되었다. 이를 통해 수심이 깊은 경우, 증기 폭발이 일어나지 않는 것을 확인하였고 zirconia 용융물을 물과 반응시킨 TROI 실험에서는 증기폭발이 일어났으나, 코륨 용융물을 반응시킨 것은 약한 stream spike가 발생하여 코륨의 기폭성이 zirconia보다 약하다고 발표하였다. 또한 원자로 냉각계통에서 냉각재의 누설이 일어나면 계통 중의 압력이 낮아지고 냉각재는 순간적으로 고온 고압의 과열 수증기로 되어 온도가 급격히 증가하여 안전성의 문제를 일으키게 된다. 이를 해결하기 위해 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)가 작동됨으로써 해소되는데, POSRV가 급개방된 경우 하류의 배관계통에서의 유동을 통해 입사 충격과의

형성을 알아보고 각 지점에 걸리는 하중을 수치해석을 통해 알아내어 설계에 필요한 데이터를 제시하는 연구가 수행되었다.

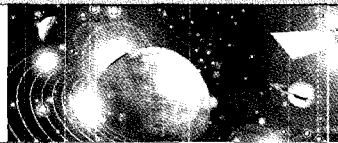
원자력 발전소에서 필요한 냉각 시스템 중 TF(Toroidal Field) 코일 구조물 냉각 튜브의 공학설계가 냉각 시나리오에 대해서 주요 설계기준들을 모두 만족하는 지를 수치적으로 검증하기 위해 열·유동해석과 냉각 튜브 주위의 열전달에 따른 헬륨의 상태변화를 계산하여 운전시 운전모드 시나리오 데이터로 활용할 수 있는 연구들이 진행되고 있다.

이 밖에도 나프탈렌 승화법을 이용하여 측정상 어려움이 있는 원자력발전소 기기의 원봉에서의 3차원 국소 열전달 측정기술을 개발하기 위한 기초 연구로 단일봉에서의 3차원 열전달 측정기술을 개발하고, Mixing Vane을 사용하여 축방향 와류를 발생시켜 이 와류에 의한 열전달 특성 및 Mixing Vane의 형상과 배열에 따른 열전달 촉진에 대해 연구가 진행되었다. 이로부터 90° Mixing Vane의 경우가 45°의 경우보다 평균 열전달 계수가 큰 값을 보인다는 것을 알아내고, 와류의 특성으로 인한 각 면에서의 열전달도 보고하였다.

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

연소기기

연소기기는 공업로 및 보일러 등에 사용되는 버너와 가스터빈 연소기 등으로 구분할 수 있으며, 에너지 절약 및 저공해 연소기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 특히 최근에는 기후협약에 따른 온실가스 저감과 관련된 연소기술에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 연소기기에 대한 연구는 열효율 향상을 위한 새로운 연소 방식으로 산소 부화 연소 시스템에 대해 진행되었고, 고온연소로 발생하는 NOx를 저감하기 위한 기술이 여러 국책연구소와 대학에서 활발히 개발되었다. 또한 연소 진단을 위한 레이저 응용 진단 기술은 대학과 연구소에서 꾸준히 개발되고 있으며, 우주 발사체 개발 과제의 일환으로 로켓엔진에 대한



연구, 그리고 극초음속 항공기 관련 스크램 젯 엔진 개발에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

저공해 연소기술은 주로 고온연소에 의한 NOx 배출을 저감하기 위한 연소기술에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있으며, 환경규제가 강화됨에 따라 이에 대한 요구는 급속히 증가하고 있다. 저NOx 연소기술로는 농담연소, 연료 및 공기 다단연소, 재연소, 배기가스 재순환, 산소연소, 진동연소, SCR, SNCR, 그리고 플라즈마 탈질 기술 등을 들 수 있다. 2003년 한해 저공해 연소기술과 관련하여 대한기계학회논문집에 4편, 관련 학회지에 23편의 논문이 발표될 정도로 활발하게 연구되고 있는 분야다.

서울대학교와 에너지기술연구소는 NOx 생성 억제를 위해서 최근 주목받고 있는 기술인 무화염 산화반응(flameless oxidation)을 이용하여 버너 한 대로 축열 연소가 가능한 자기 축열식 버너 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 연료, 공기 다단 연소 기술로는 연세대, 한양대, 생산기술연구원에서 연구가 이루어졌다. 다단 연소 방식은 공기의 단계적 공급에 의한 연소방식(burner-induced air staging)과 연료의 단계적 공급에 의한 연소방식(burner-induced fuel staging)으로 나뉘는데, 연소 공기의 단계적 공급을 적용한 3단 연소방식의 저NOx 버너 중심으로 연구가 진행되었다. 이 외에도 기계연구원과 여러 대학에서 저NOx 연소기의 수치적, 실험적 연구가 계속되고 있다.

축매 연소는 축매 표면에서 혼합가스가 연소 반응을 일으키는 것으로 일반 화염 연소와 비교할 때, 축매 연소는 표면연소와 희박연소의 특징을 갖는다. 충분한 표면적이 주어질 경우 대상 연료와 공기의 혼합가스를 완전연소할 수 있으며, 일반 화염연소에서는 연소될 수 없는 초 희박가스를 직접 연소함으로써 상대적으로 매우 낮은 단열화염온도를 갖는다. 축매연소의 이러한 저온 연소특성은 NOx와 같이 고온 연소 생성물의 발생이 없으며, 장치의 내구성 면에서 유리하다. 축매 연소 기술로 가스터빈 연소기 관련 기술 개발은 삼성테크윈에서 진행 중이고, 이 외에도 한국과학기술원, 에너지기술연구원 등에서 꾸준히 연구를 진행하고 있다.

저공해 연소기술로 또 한 가지 주목받고 있는 부분

이 매연 저감에 관련된 기술이다. 매연 입자의 건강에 유해한 영향은 현재 여러 나라에서 사회적 문제로 대두되고 있으며, 여러가지 매연 배출원에 대한 규제들이 제시되고 있다. 이에 따라 매연 입자의 생성, 성장 그리고 산화 반응에 대한 정량적 이해와 매연 생성 및 산화 과정에 대한 연구가 진행되고 있다. 서울대에서는 매연의 전구물질(precursor)로 알려진 벤진을 비롯한 다환 방향족 탄화수소(PAH : Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)와 매연의 생성 특성을 규명하는 연구를 수행하였고, 매연 저감을 위한 후처리 장치에 대한 연구는 연세대, 서울시립대와 여러 산업체에서 연구되고 있다. 그리고 매연의 생성과 산화과정에 대한 연구도 한양대, 자동차부품연구원, 건설기술연구원, 기계연구원 등에서 활발히 진행되고 있다.

에너지 절약 및 고효율 연소기술로는 축열을 포함한 고온 공기 연소기술에 대한 연구가 수행되고 있다. 또한 온실가스 저감 및 산소부화연소(OEC : Oxygen Enriched Combustion) 기술개발이 진행되고 있다. 이 분야 역시 2003년 한국기계학회논문집에 1편, 관련 학회지에 6편의 논문이 발표되었다.

연소 공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소 농도를 높여서 연소시키는 산소부화 연소는 연소속도의 향상과 화염온도의 상승으로 열 전달이 증대되어 열 효율을 높일 수 있는 에너지 절약형 연소기술로 높은 화염온도를 얻을 수 있어 최근 산업현장에서 주물용 회전 용해로에 이용되는 등 생산원가를 절감시키고 있다. 한양대, 한국과학기술원에서는 이산화탄소가 화염에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 부산대, 상지대, 안동대, 인하대 등에서 관련 연구를 진행하였다.

최근에 와서 한국항공우주연구원에서 수행한 액체로켓 개발사업(KSR-III)과 관련하여 액체로켓의 성능과 연소불안정, 그리고 극저온 추진체에 대한 실험 및 해석적 연구가 국가출연 연구기관과 대학 연구실을 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 앞으로 우주발사체 사업(KSLV-I)과 관련하여 이 분야에 대한 연구는 향후 10년 내에 현저하게 증가할 것으로 예상된다. 또한 마하 6 이상의 높은 비행속도를 갖는 차세대 비행체 개발을 위해 초음속 공기 흡입 기관으로 스크램 젯 엔진이 차세대 엔진으로 연구되고 있다. 이와 관련하여 한국항공우주연구원에서 활발한 연구가



이뤄지고 있고, 서울대학교에서는 연소기의 수치적 연구가 진행되고 있다. [민경덕, 서울대학교]

공기조화

산업 발전으로 인하여 생활수준이 향상되면서 환경에 대해 깊은 관심을 가지게 되고 소비자의 요구 수준은 계속해서 증가하고 있어 그 중요성이 커지고 있다. 삶의 쾌적감을 증대시키기 위해서 단순한 온도 조절 뿐 아니라 온도, 습도, 기류, 방사열 등이 종합적으로 조절 가능한 환경을 만드는 것이 중요하다. 또한 에너지 소비가 증대하면서 환경 및 에너지 문제가 대두되고 있어, 쾌적 설계된 공조기기 개발이 많이 이루어지고 있다.

이러한 연구들 중 난방용 천장형 실내기가 사용되는 학교 교실과 같은 큰 실내 공간에서의 온열 쾌적감을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다. 이 연구는 더운 기류가 재실자의 머리 부위에 집중되거나 발 부위가 차가운 현상을 해결하고자 1/10의 크기로 축소된 모형을 만들어 천장형 실내기로부터 토출된 기류를 PIV로 가시화하여 그 특성을 파악하고, 토출 각도와 제어 알고리즘에 따른 최적 조건을 선정하였다. 각도를 30°로 하였을 때, 재흡입을 방지하며 거주자의 머리 부분에 기류가 집중되는 현상을 방지할 수 있었고, 온도장을 가시화한 결과로부터 바닥면의 온도 분포가 균일한 것을 파악하였다. 또한 평행한 두 베인을 교대로 여닫는 제어를 적용했을 때 고른 분포를 보인다고 발표하였다.

공조기의 냉난방 성능 및 에너지 소비효율(EER) 향상을 위한 연구들도 진행되었다. 새로운 용량 가변 방식인 디지털 스크롤 압축기를 채용한 4방향 천정 부착형 카세트 타입의 시스템 에어컨의 냉난방 성능 및 EER을 냉난방 표준조건 및 난방저온 조건 하에서 조사한 결과, 표준조건에서의 냉난방 운전 모드에서 EER은 거의 일정하였으며 냉방과 난방 능력은 크게 향상되었다고 보고 되었다. 또한, 압축기 부하가 큰

영역에서도 EER 감소가 뚜렷하지 않았으며, 난방저온 성능을 향상시키기 위해 보조히터를 가동할 경우에 우수한 난방능력을 제공하였다고 발표하였다.

건물의 에너지 절약을 위하여 건물의 밀폐도가 증가함에 따라 건축자재나 공조설비 등에서 발생하는 오염물질이 증가하고, 자동차의 매연이나 공장굴뚝에서 나오는 배기가스 등으로 인해 실내 공기가 악화되고 있어, 공기청정기를 사용하여 입자를 제거하고 있다. 이에 대한 연구로 기존에 사용되던 하전부의 형상이 Wire To Plate(WTP) 방식과 새로운 Needle To Plate(NTP) 방식에 대해서 전압, 코로나 와이어의 극성, needle의 수에 따른 오존 및 NOx 발생량 등을 비교, 분석하였다. 이 결과에 따르면 needle수가 증가함에 따라 코로나 전류가 증가하고, WTP 방식은 음코로나에서, NTP 방식은 양코로나에서 오존의 발생량이 많이 나타나며, NOx는 오존발생량이 클수록 발생량이 증가한다고 보고하였다.

이 밖에도 유해가스 처리를 위해서 상압 저온플라즈마 기술 중 하나인 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 플라즈마를 이용해서 입자상 및 가스상 오염 물질에 대한 동시 저감을 목표로 기초연구인 입자 하전장치의 성능평가를 실험적으로 수행하고, DBD 플라즈마를 통해 생성되는 잔류 오존을 제거하기 위해 MnO₂ 촉매 또는 활성탄 층을 설치하여 시간에 따른 제거 성능을 평가하였다. 이를 통해 DBD를 이용한 2단형 전기집진기의 입경 1μm 이하의 집진효율이 약 85% 이상 되며, MnO₂ 촉매와 활성탄을 이용한 방법이 열제거 방법보다 오존제거 성능이 약 60% 정도 높았다고 발표하였다.

공기조화에 대한 연구들은 앞서 기술한 바와 같이 온도, 습도, 기류, 방사열 등이 종합적으로 조절 가능한 환경을 만들며, 환경 및 에너지 문제를 해결하면서 쾌적한 환경을 위한 공조기기 개발이 많이 이루어지고 있으며 향후에도 더욱 많은 연구가 진행될 것으로 기대된다. [조형희, 연세대학교]