

열공학-새로운 기술과 핵심적 현상

부 준 홍

한국항공대학 기계공학과 교수



●1956년생.
●열전달을 전공하였으며, 히트파이프의 해석과 응용, 열교환기, 다공질 매체에서의 전달현상, 제트 추진기관 수치해석 등에 관심이 있다.

1. 머리말

미국기계학회(ASME)에서 연례적으로 개최하는 동계 학술회의(winter annual meeting, 이하 WAM으로 표기)가 1991년에는 제112차로서 Georgia 주의 Atlanta에서 있었다. 6일간 약 40개국에서 연인원 3천명 정도(추산)의 규모였으며, 기계공학의 각 분야에서 동시에 많은 기술분과(technical session)가 진행되는 빠듯한 일정이었다. 국내에서도 이 회의에 참가해 본 사람이 많고, 아직 소규모이지만 몇 년 전부터는 WAM 동안 하루는 미국내 한국인 과학기술자들의 저녁식사 모임이 이루어지고 있는 정도이므로, 더 이상의 외곽적인 묘사는 불필요할 것이다.

필자는 열전달 부문(HTD)에서 논문⁽¹⁾을 발표했고, 관심있는 몇 개의 분과발표장을 참관하여 최근의 연구 및 개발 동향을 파악할 수 있는 기회를 가질 수 있었다. 국제학회에 몇 번의 참가 경험이 있고 해서 새로운 품물에 대한 흥분이나 감격 같은 것은 별로 없었는데도, 이번 회의에서는 실제로 기대 이상의 많은 자극을 받았다. 이 글을 기고하게 된 동기는 전공분야의 세부 지식을 거론하자는 것도 아니고 기행문을 쓰자는 것은 더욱 아니다. 본문에 요약하는 바 혼자서 간직하기에는 아쉬운 사실들을 관심있는 사람들과 공유하고 자료화하고자

해서이다.

2. 열공학의 신기술과 핵심 현상

이 내용은 1991 WAM의 HT-8B분과에서 있었던 "Thermal Engineering : Emerging Technologies and Critical Phenomena"라는 제하의 패널(panel)에서 다룬 내용을 요약한 것이다. 가능한 한 필자의 주관을 배제하고 자료⁽²⁾에 나타난 사실을 번역 요약하므로 다소 어색한 면이 있을 터이나, 이는 독자들의 양해를 바란다. 이 글의 동기는 미국인들의 이러한 노력을 보고 우리의 현실과 입장을 재조명할 수 있는 기회가 되었으면 하는 것이다. 그들의 구체적 현실과 우리와는 상당한 차이가 있음이 사실이나, 적어도 우리의 연구와 개발에 필요한 방향 설정에 도움이 될 수 있을 것으로 믿는다. 이 패널은 미국인의 입장에서 국제적 기술선진국으로서의 위치를 고수하려는 노력의 표현이라고 생각되며, 어쩌면 기술민족주의의 한 예라고도 할 수 있을 것이다. 그런데도 이 패널은 어느 누구나 방청하고 질문할 수 있는 공개적 분위기에서 진행되는데서 대국의 일면을 볼 수 있었다. 입주의 여지 없이 들어찬 사람들의 분위기는 매우 진지했고 예리한 질의응답도 있었다. 패널에서의 발표자는 열공학 분야에서 매우 저명한 인사들로, 일리노이대 시카고의 Hartnett, J.P.

미시간주립대의 Lloyd, J.R. 미해군대학원의 Kelleher, M.D. 펜실베니아주립대의 Jacobs, H.R. 일리노이대 Urbana의 Buckius, 버클리대의 Greif, R. 노틀담 대학의 Yang K.T. 교수 등이었다.

2.1 배경

유체의 흐름과 열 및 질량의 전달을 다루는 열공학(thermal engineering)은 미국내 산업의 장래에 결정적으로 중요하다. 예를 들어 에너지를 효율적으로 다룰 수 있는 동력장치의 설계 개선, 핵발전소의 안정성 향상, 그리고 고도화된 전산 및 정보 시스템의 개발 등은 열공학분야에서의 적극적인 연구 여하에 그 성공이 달려 있다. 만일 미국이 세계시장에서(현재 혹은 과거와 같은) 경쟁력있는 위치를 유지하려면 열공학분야에서 핵심분야의 연구, 개발 및 설계요구 등에 적합한 자금 지원을 해야 함은 불가결한 일이다.

이러한 관심들을 인식하여 미국기계학회(ASME)와 미국화학학회(AIChE)의 지도부는 미국과학재단(NSF)에 열공학에서 국가의 산업경쟁력을 획기적으로 향상시킬 수 있기 때문에 상당한 발전이 요구되는 핵심적 분야를 정의하기 위한 연구 수행을 건의하였다. 이러한 배경에 의해 NSF는 “열공학: 기술과 핵심적 현상”이라는 제하의 범국가적 워크샵(workshop)을 지원하였다. 1991년 4월 19일부터 21일까지 시카고에서 열렸던 이 워크샵의 목적은 두 가지이다. 첫째로 국가의 미래 경제력에 영향을 주는 주요 기술 분야를 파악하는 것과, 둘째로 국가의 경제 산업적 생산성을 증진시키는데 가장 큰 잠재력을 갖고 있는 열공학에서의 구체적 연구분야를 파악하는 것이다.

2.2 주요기술분야

이 계획의 첫단계로서 열공학 종사자들에게 예비조사가 수행되었다. 여론조사의 결과 주요 과제들은 다음의 기술분야에 있다고 나타났다.

○항공우주(aerospace)

- 생체공학 및 생체기술(bioengineering and biotechnology)
- 에너지(energy)
- 열교환기(heat exchangers)
- 환경(environment)
- 디지털 데이터 처리(digital data processing)
- 제작과 재료가공(manufacturing and material processing)

이 목록이 타 조직 및 기관(국내 및 국제)에서 조사한 바 비교 대상이 되는 “경제적 성장과 경쟁력 강화를 위한 핵심기술”이라는 목록과 일치하고 있다는 것은 놀랍지 않은 일이다. 여타의 조직과 기관이란 미국 상공부(Department of Commerce), 일본 국제통상산업(Japan's Ministry of International Trade and Industry), 유럽공동체(European Community), 그리고 워싱턴 D.C.에 근거를 둔 경쟁력 위원회(Council on Competitiveness) 등이다.

이러한 공감대의 관점에서 연구, 개발 및 설계(RD and D) 분야에서의 발전을 요구하는 핵심기술 분야에 대해서는 국내 및 국제적으로 광범하게 일치된 결론을 보고 있다고 할 수 있다. 만일 미국이 고급 기술제품의 생산에서 세계적 지도자라는 위치를 유지하기 위해서는 바로 이러한 분야에 연구계획을 강화하고 재조명해야 할 것이다. 예비조사 후, 위에 언급한 각 기술분야는 미국의 산업체, 국가 연구소 그리고 주요 대학에서 선발된 부문별 지도자들에게 위임되었다. 이 부문별 지도자들은 국내에서 저명한 전문가들을 선발하여 팀을 구성하였다. 그리고 이 팀들은 전 국가적으로 그들의 동료들과 긴밀한 협조하에 각 기술 분야에 관련된 열공학의 주요 과제들을 확인하는 예비보고서를 만들었다. 이 시점에서 시카고에서 대규모의 워크샵이 개최되어 특정 기술들에 대한 예비보고서를 분석 평가하고 확충하였다. 이 주요 분야들에 대한 요약은 이 글의 2.4 절에 놓았다.

2.3 Cross-Cutting Technical Issues

워크샵에서 미국 경제의 미래에 지대한 중요성을 가지는 기술분야를 확인하는 보고서를 완성할 즈음에 참가자들은 핵심적인 cross-cutting 주제를 결정하는 본 작업에 들어갔다. Cross-cutting 주제란 그 지식의 증진이 (선정된) 7개 기술 분야에 모두 영향을 주는 주요 연구 분야로 정의된다. 오랜 토의 끝에 아래의 6개 주제 분야가 확인되었다.

- 계면현상 (interfacial phenomena)
- 측정과 실험장치 (measurements and instrumentation)
- 신소재 (advanced materials)
- 차원적 극한 (dimensional extremes) (nano와 micro기술 포함)
- 결합 시스템 (coupled system)
- 모델링과 모사 (modeling and simulation)

위의 주제들이 각 주요 기술분야와 관련된 구체적 예를 논의하면 다음과 같다.

(1) 계면현상

1개 이상의 상(phase)을 포함하거나 1개 이상의 요소를 포함하는 계(system)는 상간 혹은 요소간의 계면을 갖는다. 그러한 계들의 성능을 예측할 수 있는 우리의 능력은 매우 제한되어 있다. 이러한 계의 거동에 대한 지식이 증진된다면 보다 높은 효율의 에너지 발생장치, 열교환기 설계의 개선, 그리고 보다 안전한 핵반응로 제작 등의 결과를 가져올 수 있을 것이다. 비등 및 응축 시스템을 이용하여 보다 높은 열전달 성능을 얻을 수 있거나, 금속간 열접속 저항을 최소화할 수 있다면 보다 소형이면서도 고성능의 디지털 데이터 처리장치를 개발할 수 있다. 제작과 재료가공 과정은 금속, 플라스틱, 세라믹, 복합재료 등의 용해, 주조, 그리고 가공 등을 포함하므로 여기서도 계면효과는 매우 중요하다. 따라서 계면현상을 포함하는 다상시스템(multiphase system)에 대한 지식의 증진은 모두 주요 기술 분야에 파급될 수 있음이 분명하다.

예)

- 항공우주 : 미소 중력하의 비등 및 응축, 응고-용해 열저장 시스템.
 - 생체공학 : 미립자 음식의 계속공정 동안의 다상전이(고체-액체). 생체계의 계면에서 변화나 손상을 유발하는 메카니즘.
 - 에너지 : 증기발생, 지열열전달, 유동층(fluidized bed)의 순환.
 - 열교환기 : 복잡한 기하형상의 통로내 액체-증기(다상)유동, 열교환기의 오염(fouling)과 관련한 화학 및 전이현상, 고체-유체 및 액체-증기 계면에서 분자차원의 전이현상.
 - 환경 : 식물에서의 증발-발산(evapo-transpiration), salt-fingering.
 - 디지털 자료처리 : 3차원 구조물에서의 상변화, 액체 비등, 경부하하(lightlyloaded) 계면에서의 접촉저항.
 - 제작 및 재료가공 : 레이저 절단중의 용해/증발, 공구-공작물 계면에서의 마찰가열.
- (2) 측정 및 실험장치

제어분야를 포함하여 측정과 실험방법은 여기서 언급하는 모든 기술적 분야에서 매우 중요하다. 우주 탐사 위성은 악조건하에서 작동할 수 있는 설계를 요하며, 생체공학 분야에서는 비침투용 장치, 또는 침투용 장치라면 최소화된 것을 필요로 한다. 열교환기를 포함한 에너지 관련 장치에서는 다상 유동계의 거동을 관측하고 측정할 수 있는 기술을 요한다. 지구의 온난화현상(global warming)에 대한 정보를 획득하기 위해서는 지구의 온도 변화를 관측할 수 있는 전세계적 측정 시스템을 필요로 한다. 온도의 측정과 제어는 제조 및 재료가공 산업에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 측정과 실험장치는 모든 기술 분과에서 가장 중요한 것 중 하나일 뿐 아니라 모든 cross-cutting 분야에서도 그 영향은 지대하다. 예를 들어, 새로운 실험 측정의 결과로 계면현상에 관한 많은 발전이 이루어질 것이다. 더구나 새로운 해석적 모델은 바로 실험적 근거에 의해 인정될 수도 혹은 배제될 수도 있는 것이다.

예)

- 항공우주 : 제한된 접근방도와 악조건을 고려해 설계된 기구. 측정에 대한 실험방법의 영향을 최소화하는 문제.
- 생체공학 : 생체재료 처리과정의 감지와 제어(약제, 식량 등). 위험한 환경 조건의 감지. 온도, 농도, 열플럭스의 측정과 제어를 위한 진보된 실험방법.
- 에너지 : 열물성치, 기체-액체 시스템에서의 기공률(void fraction)과 속도 슬립(slip).
- 열교환기 : 복잡한 유동통로 내 2상(액-기) 대류현상을 규명하기 위한 진보된 실험방법. 마이크로스케일(microscale)의 실험방법 및 이 스케일의 열 및 질량 전달현상을 실험적으로 규명하는데 쓸 수 있는 마이크로센서.
- 환경 : 흙에서의 온도, 습도 및 열플럭스의 측정. 심해에서 온도, 화학 및 순환의 측정. 구름의 복사성질.
- 디지털 자료처리 : 박막(thin film)과 플라스틱 물질의 열-기계적 성질.
- 제작 및 재료가공 : 고정밀도 기계가공에서의 감지와 제어를 위한 온도측정.

(3) 신소재

특수한 열적 성질을 가지는 최신 재료의 개발은 모든 주요 기술 분야의 장래에 매우 중대한 역할을 한다. 특수한 내열 세라믹 타일과 금속구조 복합재료는 항공산업의 발전을 위해 필수적이다. 고온, 고열전도성 플라스틱은 보다 고성능이며 경제적인 열교환기는 물론 산업용로(furnace)의 개발에 공헌할 수 있을 것이다. 한편, 기존의 냉매를 대체할 수 있는 것으로 비오염성, 비부식성이면서 환경적으로 무해한 합성유체(synthetic fluids)가 요구되고 있다. 초전도성 재료의 발전은 전력산업과 디지털 자료 처리장치에 획기적인 효과를 줄 것이다. 신소재의 개발에는 열공학 이외의 분야를 필요로 한다는 것은 기지의 사실이다. 그러나 그러한 재료의 열적성질이 국가 공업의 장래에 결정적으로 중요하다는 것 또한 분명한 사실이

다.

예)

- 항공우주 : 고온 작동엔진과 구조물을 위한 세라믹과 금속구조 복합재료. 흑연-구리 방열체(radiators).
- 생체공학 : 의료기구 및 보철도구용 생체조화성 재료
- 에너지 : 고온 산업용로, 극저온용 열교환기
- 열교환기 : 열교환기 및 열전달 시스템용 세라믹 복합재료 및 고전도성 플라스틱 등 고온재료. 불활성이면서 고전도성 재료 도장(coatings), 단열 또는 모세관 특성을 위한 특수 마이크로 구조물로 된 재료.
- 환경 : CFC 대체 냉매, 대체연료의 개발.
- 디지털 자료처리 : 조절가능한 열팽창 피복재. 저가의 유전성 액체.
- 제작 및 재료가공 : 용접가능한 열소성체, 기계가공 가능한 금속구조 복합재.

(4) 차원적 극한의 문제

기술의 영역은 계속 변화하고 있다. 예를 들어 우주여행과 같은 새로운 공학적 문제는 점차 거대한 계를 다루는 한편, 특수한 의료기기나 마이크로 컴퓨터와 같은 것은 점차 초소형의 크기로 생산되고 있다. 진보된 동력장치는 보다 고온 및 고압하에서의 작동조건을 고려하여 설계되고 있는 반면, 어떤 공학적 장치는 외계의 절대진공 환경을 다루어야 하기도 한다. 나노(nano) 그리고 마이크로(micro) 기술은 특히 디지털 자료처리에 있어 중요하다. 게다가, 이제는 초정밀 가공기술을 사용하여 마이크로미터 스케일의 정확도를 가지는 표면을 가공하는 것이 가능하다. 우주에서의 응용을 위한 미소중력하에서의 열전달 성능은 우주비행체와 탐사위성의 설계에 중요한 사항이다. 지구상 기후변화를 모델링하려는 시도에는 분명히 대규모의 대기-대양-대륙의 경계면들을 포함해야 한다. 삼림과 식물의 역할은 물론 대양과 구름의 행동까지도 포함된다. 분명히 우리가 갖고 있는 기술의 경계는 모든 기술적 분야에서 확대되고 있다.

- 예)
- 항공우주 : 온도 0.1~5000K, 우주의 고진공 상태에서부터 1000atm의 압력, 수백 mph로부터 마하수 25까지 속도 범위의 환경 매개변수.
 - 생체공학 : 암성종양의 과온치료가 마이크로 이하 크기에서 발생하는 현상에 의존함. 침투효과를 줄이기 위한 실험장치의 소규모화.
 - 에너지 : 수동형 핵반응로와 같은 대형 시스템 내의 자연대류. 외계에의 응용을 위한 미소 중력하의 열전달.
 - 열교환기 : 극소 시스템의 성능 예측을 위한 기존 열 및 질량전달의 이론적 구성의 연장.
 - 환경 : 대양의 순환, 대양-구름-표면의 상호작용(지구상의 변화).
 - 디지털 자료처리 : 광전자적 시스템의 마이크로 차원 변위.
 - 제작 및 재료가공 : 마이크로 일렉트로닉 접합.

(5) 결합 시스템

공학적 시스템에서 온도변화의 존재는 그 계에서 응력수준의 변동, 생물학적 성질의 변화 그리고 광학적 성질의 변화 등 다른 중요한 결과를 초래할 수 있다. 어떤 경우에는 온도변화에 대한 피이드백 효과도 있다. 거의 모든 주요 기술 분야에서 열응력은 특히 중요하다. 특히 화학반응로에서의 열 및 질량의 동시전달 그리고 에너지 발생장치에서의 연소현상은 도전적 과제이다. 지난 수십 년 동안 생성된 거대한 양의 화학적 폐기물을 처리하는 데도 폐류(waste stream)의 생물열적 처리는 매우 중요하다. 모든 주요 분야에서 발전을 이루기 위해 열공학은 반드시 이러한 결합시스템들에 대한 고려를 해야한다.

- 예)
- 항공우주 : 열적 처리과정과 관련한 기계적 응력.
 - 생체공학 : 생물학적 계에 대한 온도의 영

- 향, 레이저-조직 간의 상호작용. 응고조건 하에서 물과 한냉보호성 화합물질과의 복합된 전이현상.
- 에너지 : 노(furnace) 내부에서의 복합된 전도, 대류 및 복사현상. 바이오매스(biomass) 에너지 변환 과정.
- 열교환기 : 화학반응로와 상변화 열교환기 내 열-질량 동시전달. 온도차가 크고 일정 시간 동안 시동과 정지 회수가 많은 열교환기에서의 열응력.
- 환경 : 구름 생성의 기구
- 디지털 자료처리 : 플라스틱 패키지, 피복재 및 접착제의 열-기계적 현상. 정보저장에서의 열광학(thermo-optics).
- 제작 및 재료가공 : 레이저 가공중 세라믹의 열응력 거동.

(6) 모델링과 모사

모델링과 모사는 슈퍼컴퓨터와 최신의 실험 방법을 이용하여 발전중인 기술 분야에서 점차 중요한 역할을 할 것이다. 항공우주분야에서는 실험 비용이 과도하게 들기 때문에 제한되어 있는 경우에 이용 가능한 전산유체역학 모델을 검증할 것이 필요하다. 컴퓨터 모사는 난류유동 혹은 다상유동시스템과 같은 복잡한 과정에 대한 직관적 지식을 구비할 수 있는 능력을 제공한다. 그러나 그 모사과정은 물리적 과정의 본질을 흐리지 않도록 주의가 필요하다. 에너지와 열전달 시스템에서의 설계, 디지털 자료처리장치와 재료가공장치의 설계 개선을 위해서는 모델링과 모사의 발전이 동반되어야 한다.

- 예)
- 항공우주 : 실험이 매우 제한되고 고가일 때 전산유체역학 모델의 검증.
 - 생체공학 : 식량과 생명기술적 처리과정에서 반응류의 모델링. 인체내부의 생체열과 질량 전달의 모델링.
- 응고와 용해에 대한 세포 및 조직의 반응
- 에너지 : 다상/다요소 시스템 모델링 일반.
- 논 스케일시스템 컴퓨터 모사.

- 열교환기 : 열교환기 성능에 대한 시간변화 모델과 최신 시스템 모사 모델을 이용하여 시스템 관점에서 열교환기의 설계를 최적화하는 방법.
- 환경 : 지구 경계층 난류 기구, 대양의 생물지구화학(biogeochemistry), 기후 모델링, 플룸(plume)의 이송과 분산.
- 디지털 자료처리 : 정보저장기기/장치의 열구조적 설계방법, 복잡한 기하학적 형상내 흐름의 관리.
- 제작 및 재료가공 : 용접조(weld pool) 역학의 모델링.

2.4 주요 기술분야 요약

(1) 항공우주

미국의 항공우주산업은 고성능 항공기, 우주 탐사, 기상위성 그리고 군사적 응용에 있어 선도적 위치를 유지하고 있다. 그것만으로도 매년 1천억 불을 벌고 있다. 시장의 우월성을 유지하기 위해 항공우주 개발의 전 분야에서 계속적인 발전이 필수적이다. 현재의 성능한계를 확장시켜 보다 심각한 환경 조건에서 보다 빠른 속도로 작동할 수 있어야 한다. 열공학은 이러한 노력에 결정적 역할을 해야 한다. 기초 연구의 필요성은 다음과 같은 것들을 포함한다. 즉, 최신의 엔진과 구조물에 사용될 새로운 고온재료(세라믹과 금속복합재료), 유체역학과 열전달의 모든 면에서의 이해의 증진(예로서, 미소 중력장 및 여타 극한 환경하에서의 비등과 응축), 그리고 고가의 실제 시험을 대체할 수 있는 진보된 전산유체 및 열전달 모델들이다.

(2) 생체공학 및 생물학적 기술

생체공학과 생물학적 기술은 농업의 향상, 건강의 증진 그리고 보다 깨끗한 환경을 위해 기본적인 생물학적 시스템에 초점을 둔다. 이 분야의 중요성을 판단하려면 미국의 식량산업이 연간 3천억 불 규모라는 사실에 주목해야 한다. 게다가 생체 기술은 새롭게 성장하는 산업으로서 암, 심장병, 화상, AIDS의 백신,

말라리아, 간염 등의 향상된 치료법을 제공하고 있다. 진보된 보철기구와 인공기관은 일상 생활의 질에 공헌하는 생체기술의 다른 예이다.

이러한 연구는 분야를 초월하는 협력을 요하며, 열공학은 물론 이의 주요소가 된다. 열응력에 대한 곡식의 저항력을 증대시킴으로써 수확을 늘리는 방법, 그리고 식량을 가공하고 보존하는 보다 나은 방법 등에도 연구의 여지가 있다. 의학적 측면으로 필요한 연구비가 확충된다면 암의 열치료 방법 향상 그리고 AIDS, 심장병 및 화상 등을 치료하는데 보다 효과적인 방법 등을 개발하는 것을 기대할 수 있다. 환경보호 분야에서는 거대한 지상의 공해문제를 해결하는 효과적이고 경제적인 방법으로서 생물학적 처리가 상당한 가망성을 보이고 있다.

생체공학에서 필수적인 기초연구분야는 생체 유체역학, 다공질 매체내의 유동, 비 뉴턴 유체, 새로운 실험장치의 개발, 응고 및 해빙 조건하의 세포, 조직 및 기관의 거동 등을 들 수 있다.

(3) 에너지

미국은 세계에서 가장 큰 에너지 소비국으로 주거용, 상업용, 산업 및 운송용으로 연간 5천억 불 이상을 소모하고 있다. 이중 지대한 양이 국가의 석유 및 석탄 생산산업에 관련되며, 이들은 연간 약 2천억 불을 생산한다. 에너지 산업의 치면적 현실을 알 수 있는 사실은 미국이 국가경제에 수급하는 석유의 약 반에 달하는 300억 불 어치를 수입한다는 것이다. 이러한 의존성으로 인해 미국은 세계석유 무역의 분열에 취약하다.

수입 석유에의 의존성을 감소시켜야 함은 지상의 과제이다. 더욱이 에너지 발생 및 사용의 모든 면에서 효율을 증가시켜 중요한 자원을 보존하고 환경 악화를 최소화할 것이 필요하다. 이러한 목적을 이루기 위해서는 새로운 동력장치와 대체 운송용 연료에 관한 연구로부터 시작하여 열에너지 공학의 발전이 필수적이다. 예를 들어 초전도성의 궤도에서 운전되는 자기

부상열차는 300 내지 500마일 범위의 거리를 이동하는데 획기적인 장점이 있다. 청정한 석탄기술, 안전하고 경제적인 원자력 발전소 설계, 폐열회수 장치, 그리고 수요측 관리 향상 등은 모두 계속적인 열공학의 연구 개발 노력을 요구하고 있다. 이러한 분야의 하나로서 재래식 증기 원동기 설계, 원자력 발전소 그리고 최신의 유동층 기술 등에서 볼 수 있듯이 다상 유동에 관한 이해의 증진은 연구수요 대상의 최우선이다.

(4) 열교환기

열교환기는 에너지산업, 석유화학산업, 가공산업 그리고 식품산업 등 열에너지가 작동유체를 출입하는 모든 기술분야에 걸쳐 사용된다. 이 산업 분야의 연간 생산 회계는 1천억 불 단위이다. 열교환기 분야의 혁신적 발전은 에너지, 항공우주 그리고 전자업계 등에 직접적 영향을 줄 것이다. 또한, 열교환기 성능의 향상은 무역수지를 향상시킴으로써 국가의 국제 경쟁력을 증진시킬 것이다. 열공학 분야에서의 연구과제 대상으로는 다상유동시스템의 심도 있는 이해, 오염과 부식을 최소화할 수 있는 새로운 기법과 재료, 마이크로 기술에서의 발전을 수용할 수 있는 발전된 설계방식 등을 들 수 있다. 학교, 국립연구소 그리고 산업체 간의 잘 조화된 협동 연구를 통해 노력을 경주해야만 열교환기 분야에서 경쟁력을 유지하는 것을 보장할 수 있을 것이다.

(5) 환경

환경산업의 역사는 상대적으로 짧다. 그러나 환경에 대한 관심은 미국경제의 미래에 영향을 줄 수 있는 가장 큰 구속 인자 중 하나다. 그러므로 이 분야는 주요 국제 산업으로 성장할 것이 기대된다. 이러한 가능성의 증거로서 청정공기법(clean air act)과 지구의 온난화현상에 대한 관심의 증대를 들 수 있다. 지대해지고 있는 이 분야의 중요성을 가늠할 수 있는 사실로 무기시설의 환경소거를 위해서는 1천억 불 이상의 비용과 수십 년 동안의 노력이 들 것이라는 미국 에너지부(D.O.E.)의 보고서 내

용에서도 찾을 수 있다.

이러한 배경에 비추어 볼 때 집중적 연구개발은 수천의 일자리와 수십 억 불의 회계를 창출할 수 있는 미국 국적의 국제 환경 산업의 발전을 가속시킬 것이다. 이런 노력들은 대학, 산업체 및 연구소의 현존하는 능력에서 시작하여 건강한 국가환경에 공헌할 것이다. 초기연구와 개발은 구름의 열적 거동, 대양의 열질량 전달, 그리고 대기-대양-대륙의 전이현상을 포함한 지구규모의 열적 현상에 초점을 두어야 한다.

이러한 연구는 실험과 모델링을 모두 포함해야 한다. 게다가 다공질 매체에서의 열적 과정에 대한 이해의 증진은 국내 핵무기 폐기문제와 고급의 상용 핵폐기물 문제에 매우 중요하다. 미국을 환경산업의 선두위치에 유지시키기 위해서는 열공학 연구진으로 주도하는 분야를 초월한 집중적 연구가 요구된다.

(6) 고성능 디지털 데이터 처리

미국 전자 산업계는 연간 2천5백억 불의 생산을 하는데 이는 고성능 디지털 데이터 처리 장치 개발에 지속적인 성공을 하느냐에 직접적으로 의존한다. 마이크로 프로세서로부터 슈퍼 컴퓨터에 이르기까지 산업체는 새로운 제품의 가격을 인하해야 하며 혁신적인 기술을 시장에 도입하는 속도를 증가시킬 수 있어야 한다. 산업체는 이미 일본에 의해 전자제품 소비 시장을 거의 완전히 점령당한 경험을 했다. 나머지 산업도 대학, 산업체 및 국립연구소를 포함하는 추진력 있는 연구 및 개발 계획이 없이 곤경에 처해있다. 열공학 분야는 디지털 데이터 처리 분야에서 미래의 성공을 성취하기 위해 결정적인 부분을 대표한다. 왜냐하면 컴퓨터 시스템을 보다 소형화한다든가 연산속도를 증가시킬 수 있는 능력은 시스템 안에서 발생하는 열을 얼마나 효율적으로 제거할 수 있는냐에 의해 결정되기 때문이다. 냉각기술은 극저온과 다상시스템 부분의 기초 열공학적 연구에 의존할 것이다. 다른 연구 요구사항들로는 신소재의 개발(박막 및 열광학 디스크), 열응력

의 관리 그리고 새로운 CAD 접근방법의 개발이다.

(7) 제작과 재료가공

미국의 경쟁력 제고에 가장 중요한 제작 분야는 연간 생산이 1조 불로 국민총생산의 20%에 달한다. 원천금속과 제조된 금속은 이 중에서 1천억 불을 차지하며, 유리, 세라믹, 플라스틱, 신복합재료, 박막, 그리고 특수 크리스탈도 상당량을 차지한다. 이러한 모든 재료의 생산은 강철과 알루미늄의 연속주조로부터 유리의 용해와 열소성재의 사출성형(injection moulding)에 이르기까지 열가공 공정을 포함한다. 기계공작은 많은 경우 정밀가공, 연마, 절단, 레이저 절단과 드릴링과 같은 방법으로 재료를 제거하는 과정을 포함한다. 한편, 용접, 접합, 접착 등에 의한 금속의 연결도 제조업체에서 자주 대하게 되는 과정이다. 이러한 모든 형상변화 과정은 피작업물의 열적 경험에 민감하다. 모든 산업에서 대하게 되는 다상의 열 및 질량 전달 과정에 대한 지식의 증진을 통해 생산성을 높이고 생산가를 감소시킬 수 있는 것이다. 재료의 생산과 제조에서 온도와 열응력의 측정 및 제어도 역시 대단히 중요하다. 다상시스템, 온도 및 응력측정을 위한 실험장치, 그리고 제어장치의 개발 등에 대한 기초연구는 제작 및 재료가공 산업을 발전 시키는데 있어서 핵심 요소이다.

3. 열역학의 새로운 교육방법

위 1항의 번역된 내용 이외에 특기할 사항은 열공학에서 가장 중요한 열역학의 교육방법에 컴퓨터를 이용하는 방법들이 연구되어 발표되고 있다는 것이다.⁽³⁾ 급속하게 보급된 퍼스널 컴퓨터는 사실상 공학에서 필수 도구가 되었고, 이에 따른 산업체, 연구소, 대학원 등의 관련 업무 및 연구 형태의 변화가 열역학에서도 학부 교육방법의 개혁을 요구하고 있다. 대표적인 예로 수많은 여러 교과서의 부록에 있는 수증기표, 냉매표, 공기표 등 표(table)의

전산화이다. 이들은 이미 한 장의 디스켓에 수식화된 상태로 들어 있어, 학생들이 수없이 부록의 표를 넘겨가며 손이나 계산기를 사용해서 틀렸을지도 모르는 채 시간과 노력을 소모하는 수고를 할 필요가 없다. 내삽법을 이용해야 구할 수 있던 경우는 물론 시행착오법으로 풀어야 하는 균일상태-균일유동(USUF)의 경우도 용이하게 다룰 수 있다. 기본 교육에서는 방법을 이해하는 과정을 중시해야 한다는 면에서 PC를 이용하는 새로운 경향에 반대 의견도 있기는 하지만, 보다 더 많은 시간을 계산 과정보다는 물리적 현상의 이해와 여러 경우의 비교를 통한 전반적 경향의 파악 등에 활용하는 것이 더 바람직한 교육효과라는 사고가 지배적이다.

이번 WAM에서 의자가 부족해 서서 듣는 청중까지도 꼭 찬 분과중 하나가 이러한 논의와 발표가 진행되는 장소였다. 물론 발표자가 저명한 학자들이었다는 사실도 작용했을 것이다. 오래 전부터 이 분야의 작업을 해왔던 위스컨신대의 Klein 교수는 Equation Solving Tools를 도입한 열공학 교과과정의 개혁을 주제로 했고, 미시간대의 Sonntag 교수는 해리가 있는 연소물의 화학 평형식을 다루기 위한 퓨터 프로그램을 발표했다. 한편, 펜실베이니아대의 Lebedzinski 교수는 최근의 범용 프로그램인 Mathematica를 이용한 열역학 교육방법을 제시했다.

이 외에도 다수의 논문이 열역학 및 열전달 관련 문제를 PC 또는 워크스테이션을 이용해 다루는 것을 주제로 했다.⁽⁴⁾ 국내 대학의 컴퓨터 보급 현황이 미국과는 큰 차이가 있지만 우리가 경쟁하고자 하는 상대국이 이렇게 노력하고 있다는 사실을 고려하여 조속히 시설확보와 교육내용에 반영할 수 있어야 할 것이다.

4. 그밖의 얘기

WAM에서의 성과중 하나는 만난 사람들과, 나눈 이야기일 것이다. 우선 필자가 관심을 갖

는 전열관(heat pipe) 분야에서 매우 활발한 연구를 하는 텍사스 A&M의 Peterson 교수와 Wright State의 Faghri 교수를 만나 서로의 관심사를 얘기할 수 있었다. Peterson 교수는 필자가 WAM에 제출한 논문 심사자 중 한 사람으로서 많은 관심을 보였으며, 그와 같은 학교에 있는 Ken Kim(김경덕) 교수와 만나도록 추천해 주었다. 또 필자의 은사인 Georgia Tech의 Hartley 교수와 Black 교수를 만나 환담했고, 그들이 공동 집필한 열역학 책 최신판⁽⁶⁾을 선사 받았다.

미국에서 활동중인 한국 분들로 Drexel 대의 조영일 교수, JPL의 광역연 박사, Illinois(시카고)의 최경진 박사, Illinois(Urbana)의 김경석 교수, UNLV의 임우순 교수, NASA의 광도찬 박사 등을 뵈고 로비와 식당에서 반갑게 얘기를 나누었다. 조영일 교수는 non-Newtonian 유체 및 biofluid에 매우 활발한 연구 활동을 하고 있으며, 광역연 박사는 superfluid, flame propagation 등 최근 부각된 다양한 주제에 개발한 실험을 통해 많은 활동을 하고 있다. 사실 두 분의 "전공 분야도 중요하지만 주류가 어디로 가고 있는지 알기 위해서는 다른 분과 발표보다는 이 패널에 가보라."는 권유로 함께 가본 덕에 나로서는 값진 자료를 얻었으며, 이 분들에게 진심으로 감사한다.

한편, 서로 일정에 쫓기느라 자리를 오래 같이 하지 못했지만, 논문 발표차 오셨던 중앙대의 광호영 교수님, 인하대의 김재도 교수, 그리고 ASME의 한국지부 correspondent로서 학회 동향 분석차 오셨던 동아대의 권순석 교수님과도 뵈 수 있어 반가웠다.

끝으로 이 학회 참석을 지원해 준 한국과학기술재단과 한국항공대학에 감사를 드리며 자료 번역에 도움을 주신 유상신 교수님께도 감사한다. 필자가 WAM을 통해 구비한 자료 목록은 후기한다.^(1~7)

참고문헌

- (1) Boo, J.H. and Hartley, J.G., 1991, "A Thermal Analysis of Heat Pipe Shell-Fin Structures Subject to Uneven Radiation," Presented at the ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA.
- (2) Hartnett, J.P., 1991, Thermal Engineering: Emerging Technologies and Critical Phenomena, Panel Handout, HT-8B Session, ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA.
- (3) Thermodynamics and Energy Systems-Fundamentals, Education and Computer Aided Analysis, 1991, ASME AES-Vol. 24.
- (4) Computational Techniques and Numerical Heat Transfer on PC's and Workstation, 1991, ASME AD-Vol. 2, HTD-Vol. 185.
- (5) Black, W.Z. and Hartley, J.G., 1991, Thermodynamics, 2nd ed., Harper Collins.
- (6) Heat Pump Design, Analysis and Application, 1991, ASME AES-Vol. 26.
- (7) Advances in Heat Exchanger Design, Radiation and Combustion, 1991, ASME HTD-Vol.182. 