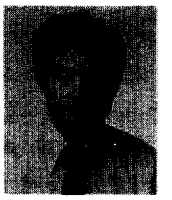
반응성 유동계측에 있어서 재래방법의 복합적용에 관하여

신 현 동
한국과학기술원 기계공학과 교수



● 1947년생
● 연소공학을 전공하였으며, 열전달, 이동현상론 및 열역학에 관심이 있다.

1. 머 리 말

반응성 유체 유동장에서 정의되는 물리량의 계측방법을 하나하나 소개하는 것이 아니라 반응성 유동에서 계측되어야 할 물리량에 대한 개관과 아울러 그 사용범위가 매우 제한적인 종래의 계측방법을 복합 적용함으로써 연소장의 서술이 어느 정도 가능함을 제시하고, 나아가서 이와 같은 연구의 활성화에 조금이나마 도움이 되었으면 하는 것이다.

2. 반응성 유동에서 계측되어야 할 물리량

열 유체분야에서 물리적 현상(physical phenomena)이란 구성하고 있는 원자 또는 분자의 운동에 의하여 거시적으로 나타난 결과를 총칭하는 것이다. 실제적으로 열전도 현상을 고려해 보자. 분자운동론에 의하면 서로 다른 에너지 레벨을 갖고 있는 국소평형에 도달되어 있는 미세 조사체적(control volume)이 서로 인접해 있을 경우, 분자들의 충돌이 있게 마련이고 이때 에너지의 이동이 일어난다고 설명된다. 열전도 속도(rate process)는 당연히 단위시간당 일어나는 충돌횟수로 결정되게 된다. 한편, 연속체역학에서는 열전도란 직접적으로 정의되지 않았으나, 잡고 있는 조사체적으로의 열유속(heat flux)이 우선 정의되며 이 열유속은 인접 조사체적으로부터 접촉 전열과정 즉, 열전도에 의하여 설명이 될 수 있는 것이다.

그런데 열전도 현상에 관한 연구는 당연히 그 원인인 분자운동의 기술로부터 이루어져야 하나 현실은 그렇지 못하다. 그 이유로는 각 분자의 운동을 전부 기술하는 것이 불가능하며 설령 가능하다 해도 이들의 거시적 운동을 각 분자운동의 결집으로 설명하는 것은 거의 불가능할 것이다. 따라서 우회적인 접근방법이긴 하지만, 분자운동론에 의한 열전도 모델을 설정하고 이때 열전도 계수가 정의되게 되며, 이 물리량과 온도구배와의 곱으로 조사 체적으로의 열유속을 얻게 된다. 계측의 입장에서 보면, 분자운동의 엄밀한 계측과 이들의 통계적 거동을 거시적인 현상론과 결부시키는 것이 가장 이상적이라고 사료된다. 그러나 다루고 있는 계가 연속체일 경우는 확립되어 있는 지배방정식을 쓰지 않을 수 없으며, 이들 방정식의 해를 실제에 적용할 때에는 결국 초기조건 또는 경계조건에 의하여 각 현상론을 얻어낼 수 밖에 없을 것이다.

연소와 같은 발열반응을 동반하는 반응성 유체유동의 특성은 수종류의 분자들이 화학반응에 의하여 그 숫자가 증감하면서 고정좌표계에 대하여 상대적으로 이동하는 연속체로 볼 수 있다. 동일한 분자집단의 운동을 통계평균적으

로 기술하는 데는 Navier-Stokes 방정식이 잘 알려져 있으며, 이와 비슷한 방법으로 반응성유동을 기술하자는 것이 "Aerothermochemistry"의 분야이다. 반응성 유동에서 정의되는 물리량은 주로 질량중심속도(mass average velocity)를 정의함으로써 파생되는 것과 국소평형 가정에 의하여 정의되는 열역학적 함수들이다. 반응성 유동내의 물리량계측의 목적은 첫째, 거시적 관측결과와 해석에 도입된 모델의 검증을 위한 것과 둘째, 반응과 유동과의 상호관계 규명 그리고 셋째, 관측되는 시간의존형 현상(점화, blow-off 등)의 이해 및 제어로 요약할 수 있다. 레이저를 이용한 계측기술의 발달에 힘입어 종래에는 불가능하였던 물리량을 검출하려는 노력이 매우 활발히 진행되고 있다. 분자집단의 운동을 측정할 뿐 아니라 화학반응의 중간생성물의 측정까지도 가능해지고 있는 실정이다. 이들 연구의 가장 가까운 목표는 시간 분해능이 높은 연소장의 표현에 있는 것으로 사료된다. 즉, 반응계의 정확한 기술과 유동과의 상호관계를 규명하는 것이다.

반응성 유동의 특징은 연소반응에 의하여 분자의 이산, 집합 그리고 또 하나의 분자의 생성이 이루어지며, 이는 시공간적으로 변하게 된다. 즉, Euler적으로 계측하였을 때 밀도의 변화가 매우 크다고 볼 수 있다. 그리고 불균일한 분자군의 에너지 레벨도 서로 다르기 때문에 밀도의 정보와 온도의 정보가 반응성 유동을 연속체로 다룰 경우, 일반 유체역학의 종속변수에 더하지 않으면 안된다.

일반적으로 주어진 반응성 유동장의 장소에서 어떤 성질(밀도, 온도 그리고 속도)의 유체가 지나가는가에 대한 정보가 필요하게 되며, 연구목적에 따라서는 이들 물리량의 제1차 모멘트 또는 제2차 모멘트를 알아야 할 경우가 있다. 반응성유동이 균일장(homogeneous)일 경우 계측되어야 할 물리량이란 위에서 언급하였듯이 밀도장의 시공간적 분포 그리고 이들의 운동량(유속) 그리고 온도로 요약할 수 있다. 그리고 불균일(heterogeneous) 연소장일 경우에는 상(phase)에 대한 정보도 필요하겠다. 연구의 효율적 수행을 위하여 재래 계측기술의 복합적용예를 몇 가지 소개한다.

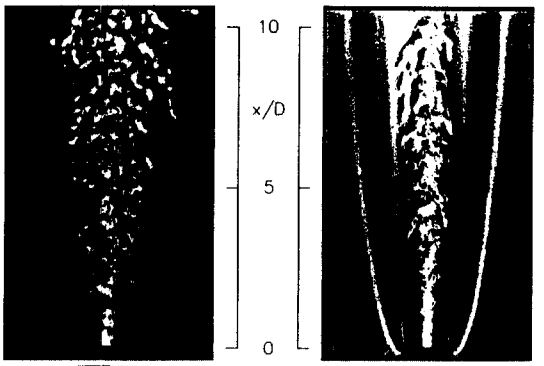
3. 재래식 계측 방법의 복합 응용예

3.1 화염 구조의 가시화[1]

연소장 연구에 있어서 밀도의 공간 분포에 관한 정보를 얻는게 무엇보다 중요하다. 밀도의 변화를 초래하는 원인으로서는 동종의 분자일 경우 온도에 의한 것과 연소 반응에 의한 기존 분자 반응물의 와해와 새로운 분자(생성물)의 생성에 의한 것을 들 수 있다. 즉, 주로 반응이 활발히 일어나는 반응대, 생성물의 흐름, 반응 물질의 유동 등을 시간, 장소 분해능을 높인 계측이 연소 연구에 필요로 하게 된다.

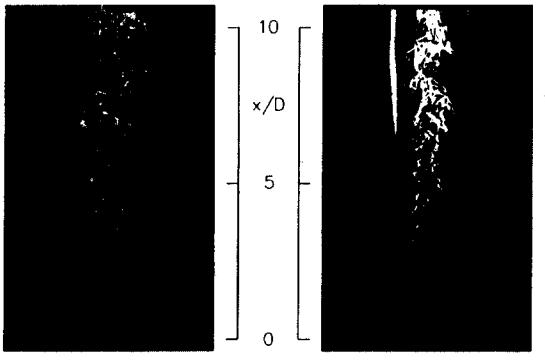
화염 구조의 연구에 있어서 사용되고 있는 가시화 방법으로는 직접 촬영법, schlieren, shadowgraphy 그리고 mie scattering image 방법 등이 있는데, 이런 방법들이 각각 독립적으로 또는 동시적으로 사용될 수 있다. 화염의 직접 촬영을 통해서는 가시화염면(visible flame front)을 관찰할 수 있으나 내부 구조에 관한 정보를 얻을 수 없다. schlieren은 밀도의 일차 구배에 의한 적분된 상을 나타내며, 이로부터 화염 내부의 구조를 어느 정도는 알 수 있으나 화염면에 관한 직접적인 정보는 제공되지 않는다. shadowgraphy는 밀도의 이차 구배에 의한 적분된 상을 그리고 mie scattering 방법은 연료 제트의 내부 구조를 이해하는데 많은 도움을 준다. 특히, laser sheet를 이용해서 얻어진 것은 적분 결과가 아닌 2차원 정보를 제공한다. 또한, seeding material로 $TiCl_4$를 택하여 연료측의 $TiCl_4$ vapor와 연소생성물의 수증기가 반응을 하여 생기는 TiO_2 입자는 연료와 생성물의 경계 부분에서 발생되므로 연료 제트에서의 혼합 기구(mixing mechanism)을 이해하는데 도움이 된다.

공기의 동축류(coaxial flow)를 갖는 확산자유제트화염(free jet diffusion flame)의 구조를 조사하기 위해 직접 촬영법, shadowgraph 그리고 mie scattering image 방법들을 동시에 사용한 예를 소개한다. 프로판 연료에는 $TiCl_4$를 포함하고 있고 shadowrgraph는 발광 시간이 3μsec인 xenon램프를 광원으로 하여 double path 방법을 사용하고 청염의 상을 명확하게 하기 위하여 광원 앞에는 녹색 필터를 부착한다. shadowgraph는 beam splitter를 통해서 들어오는 화염 자체의 상을 갖는 직접 사진과 동조시켰다. 그림 1은 프로판제트화염의 shadowgraph이며 내부 연료 제트의 경계와 외부 schlieren 경계를 갖는 구조를 보여주며 cold 상태의 결과도 같이 제시하였다. 화염 영역은 내부 경계면과 외부 경계면 사이에 존재하며 각각의 면은 분리되어 있다. 위 실험의 mie scattering 사진은 그림 2에 나타나 있다. 연료에 주입된 $TiCl_4$ vapor는 연소 생성물 중의 H_2O와 반응하여 TiO_2 입자화되어 있으며, 이것에 의해 연료 제트의 경계에서 이루어지는



(a) 등온 분류 (b) 분류확산화염

그림 1 직접사진과 Shadowgraphs와의 복합사진



(a) 등온분류 (b) 분류확산화염

그림 2 레이저 광단면에서의 Mie 산란 사진

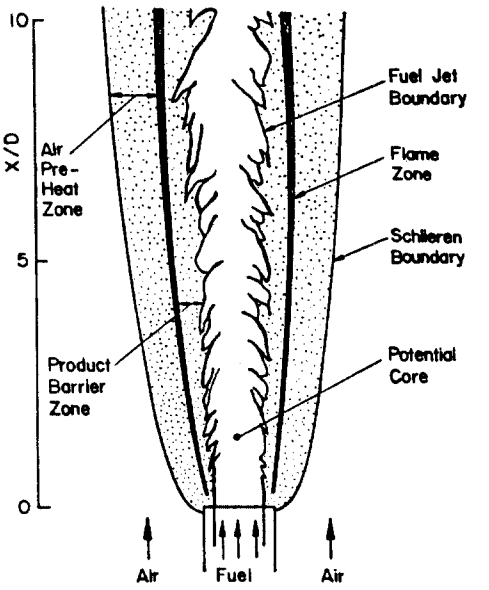


그림 3 난류확산 화염의 도식적 구조

그림 4 그림 1(b)의 화상처리 결과 예

생성물과의 혼합 특성을 설명해주고 있다. 그리고 사진에서 화염면 내부에 potential core와 연료 제트 내에 TiO_2가 도달할 수 없는 연료 덩어리가 존재함을 알 수 있다(그림3 참조).

이러한 여러 가시화 방법을 동시에 사용함으로써 필요한 정보의 일괄추출이 가능하며 위 실험에 이를 적용한 결과가 그림 4이다.

3.2 맥동 반응성 유동의 계측[2]

자발적인 연소 반응을 유도하기 위하여 소위 rayleigh criterion을 만족시키는 연소장이 많이 이용되고 있다. 즉 열 발생 속도와 압력 상승 속도와의 위상이 거의 일치하도록 연소기를 설계, 사용하는 것이다. 이런 유동장에서의 대표적인 계측 방법으로는 실시간에 따른 현상 관측과 한 주기 내에서의 앙상블(ensemble) 현상 관측을 들 수 있다. 여기에서는 복합 계측에 의한 앙상블 현상 관측의 예를 소개한다.

실제 연소 시스템에서 효율적인 연소기의 연소과정 설계를 위해서는 연료 및 공기의 혼합과정과 연소과정 등의 상호관계 규명이 중요한 연구과제이다. 특히 주기적으로 반복되는 연속기구를 갖는 유동장의 특성을 파악하는 연구는 유체역학적인 측면에서 유동의 안정성(stability) 및 와유동(vortex motion)과 관련하여 수행되어 왔고, 연소공학적인 측면에서 화염특성 및 유해물질 저감에 대해 다수의 연구가 진행되어 왔다. 이러한 관점에서 본 연구실에서는 유동장 상류에서 가진이 주어지는 비예혼합화염(non-premixed)의 혼합기구에 관한 실험적 연구 및 자발맥동에 의한 연소(pulsating combustion) 실험 그리고 선회유동에서의 유동구조에 관한 연구를 수행하였다. 이들 연구는 외부에서 주어지는 강제진동에 의해서건 또는 장치의 구조상 나타나는 공진의 형태이건 간에 모두 다 음파(sound pressure wave)와 각종 물리량들 간의 복잡한 상호 관계에 의해 계측 실험의 수행이 지장을 받게 된다. 앞에서 소개한 화염의 가시화도 예외는 아니다. 비정상 유동장, 특히 주기적인 운동을 하는 반응대를 가시화하는 경우에 고속 촬영기(high speed camera or vedio camera)를 많이 사용하며 그 결과를 가지고 연속적인 현상에 대한 정성적인 정보를 용이하게 파악할 수 있다. 그러나 이를 위해서는, 가시화하고자하는 단면에서 필름의 감광에 필요한 충분한 광원이 방출되어야 하며, 시간적 흐름에 따른 현상의 정확한 이해를 위해서 빠른 속도로 회전하는 필름에 반응대의 노출시간 또는 연소 조건이 표시되어야 한다. 그러나 맥동 반응성 유동의 가시화에서 이러한 요구를 항상 만족시키기란 어려운 일이다. 이를 위해 가정에서 많이 쓰는 수동 카메라로 연소장의 시간변화특성을 조사하는 방법을 도입하여 여러 연구에 적용해 보았다.

그림 5는 선회유동에서 주기적인 변동을 갖는 PVC(processing vortex core) motion의 이해를 위해 유동장을 schlieren으로 가시화한 결과이다[4]. 현상과 위상 조건의 비교는 PVC signal과 사진기의 플래쉬 단자에서 발생하는 단락신호를 동시에 녹음하여 이를 분석하여 얻었다. 이 결과에 의해 PVC가 시간에 따라 선회기 내에서 반경의 접선 방향을 따라서 하류로 이동하며 노즐의 출구 영역에서는 축 방향에 따라 형성되는 에디(eddy)에 의해 불안정이 나타나는 것이 확인되었다.

그림 6은 헬름홀쯔형 맥동 연소기의 작동구조를 파악하기 위해서 연소실을 가시화한 것이다. 이 실험에서도 앞의 경우와 마찬가지로 현상의 시간 분해를 위한 외부 기준 신호, 예를 들면, sine 함수형태의 가진신호가 없으므로

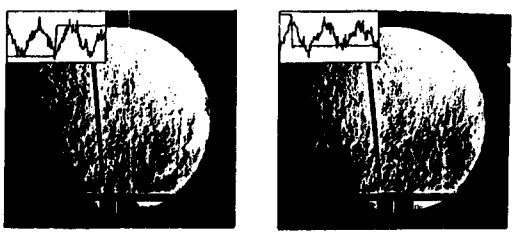


그림 5 열선유속계의 신호와 동조된 선회제트의 Schlieren 사진

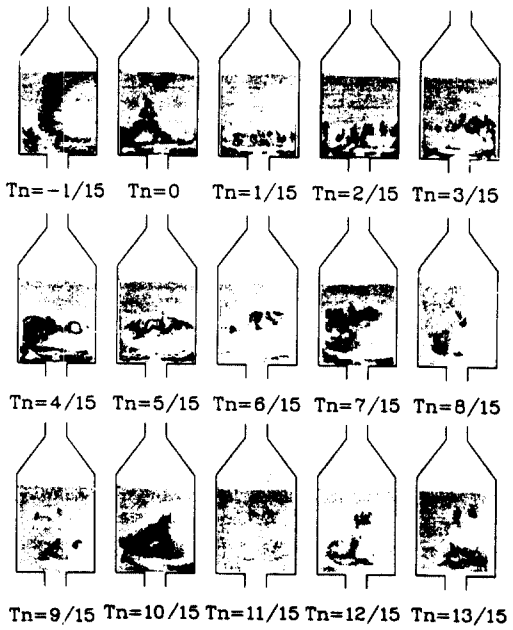


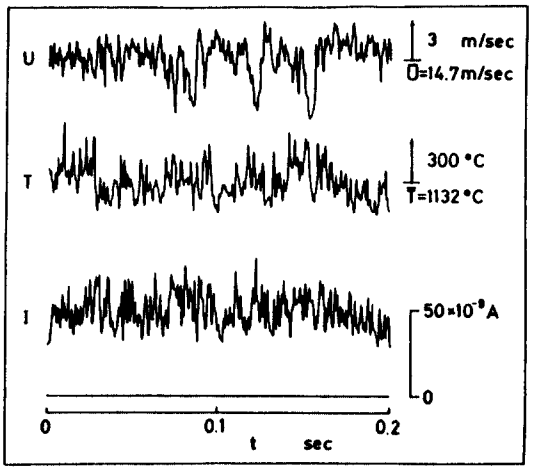
그림 6 맥동 연소기의 위상별 직접사진
(Tn=0는 압력신호가 상방향으로 제로라인과 교차되는 순간을 뜻한다.)

장치의 구조상 나타나는 압력파로 이를 대용하게 된다. 이 가시화 결과에 의해 기존에 논쟁의 대상이 되어온 착화원과 한 주기 동안의 화염 거동에 대한 해답을 쉽게 얻을 수 있었다.

이러한 가시화 방법에 의한 결과를 주기적 현상의 해석에 사용하기 위해서는 사진기 셔터 속도가 중요한 인자가 된다. 시판되고 있는 사진기에서는 최대 8000분의 1초까지 촬영이 가능하며 이것은 200내지 300Hz의 주파수를 갖는 연소현상을 설명하기에 충분하며 광원을 적절하게 조절하는 경우에는 이보다 훨씬 변동이 심한 연소장의 가시화에서도 좋은 결과를 얻을 수 있다.

3.3 온도, 이온 농도 그리고 속도의 동시 측정[3]

물리량의 장소에 따른 구배를 아는 것은 매우 중요하다. 특히 이들이 고려하고 있는 물리량의 확산과정과 관계가 있으므로 장소에 따른 물리량 계측은 모델링 과정에서 빼놓을 수 없는 요소이다. 등온, 단일성분 유체유동과 달리 반응성 유체 유동에서는 한 종류의 계측으로 프로브를 지나간 유체의 모든 정보를 알 수는 없다. 예를 들어 유속만 계측하였을 경우, 밀도의 정보가 없으므로 질량 유속의 정보를 얻을 수 없다. 즉, 반드시 농도와 속도의 정보를 동시에 얻지 않으면 안된다. 최근 레이저를 이용한 계측 기술의 발달로 이와 같은 물리량들을 동시에 계측할 수 있는 방법들이 다수 개발되고 있다. 이들 복합 계측의 개요는 기준의 레이저 광선에 대한 분자들의 산란 특성이 분



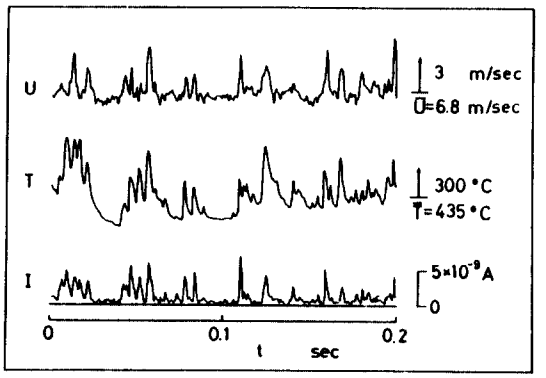


그림 7 속도, 온도 그리고 이온농도 변동의 동시신호의 예

자의 종류와 에너지 레벨에 따라 다름을 이용하고, 아울러 Mie 산란에 의한 유속 측정도 동시에 실시한다는 것이다. 그러나 이런 복합계측 방법들이 아직 실험실에서 손쉽게 적용되지는 못한다. 경제적인 이유를 우선 들 수 있겠으나 그 방법 자체가 일반적인 연소장에는 여러 계측상 제한을 수반하기 때문이다.

그림 7은 난류 확산 화염의 유동장 구조를 알기 위하여 유속, 온도 그리고 이온 농도의 계측을 시간 분해능을 높여 수행한 결과이다. 온도는 선경이 25.4μm인 Pt-Pt/Rh13% 열전대와 전기적 출력 보상회로를 이용하여 얻었으며, 유속은 레이저 도플러 유속계 그리고 이온 농도에 해당하는 전류는 22.5V 전압이 걸린 langumir 프로브에 의해 얻어졌다. 각 측정 프로브는 될 수 있는 한 가깝게 위치시켰으며, 유속 측정용 입자가 다른 프로브에 부착되기 전에 측정하기 위하여 비교적 짧은 시간에 계측을 수행하였다.

4. 맺음말

일반성이 없는 내용을 기술하게 되어 버렸다. 반응성 유동의 연구에 있어서는 단유동 등 온유동 보다는 많은 계측정보가 필요함은 누구나 알고 있으며, 경제적인 궁여지책으로 종래에 많이 쓰여 오던 계측방법을 복합하여 각 계측방법이 갖고 있는 한계성을 극복함과 동시에 반응성 유동의 여러 가지 정보를 얻을 수 있다는 지극히 당연한 결과제시와 몇 가지 방안을 제안하게 되었으니 말이다.

단, 분자 레벨의 계측기술의 개발과 아울러 복합계측의 시스템화도 이에 못지 않게 중요함을 지적하고 싶고 이런 류의 아이디어가 서로 교환될 수 있는 계기가 되기를 고대한다.

참고 문헌

(1) Kim, S.J., Han, Y.S. and Shin, H.D., 1988, "Behavior of Reaction Zone in Propane-Air Turbulent Diffusion Flames", Joint International Conference(Australia/New Zealand and Japanese), Sydney.

(2) Keel, S.K. and Shin, H.D., 1991, "A Study of Operating Characteristics of a Helmholtz-Type Pulsating Combustor", J. of the Institute of Energy, 64, pp.99~106.

(3) Takagi, T. Shin, H.D. and Ishio, A., 1980, "Properties of Turbulence in Turbulent Diffusion Flames", Combustion and Flame, 37, p. 136.

(4) Hiratu, M. and Kasagi, N., 1988, "Transport Phenomena in Turbulent Flows" Hemispher pub. Corp., p. 863.