

비예혼합 역류화염에서 열전대 측정을 적용하기 위한 복사보정에 관한 연구

오을권* · 허준영** · 차경옥***

A Study On the Radiation Corrections Applied to Thermocouple Measurements in Non-premixed Counterflow Flames

Y-K OH* · J-Y Huh** · K-O Cha***

Key words : Radiation correction method(복사보정법), Heat flux(열유속), Transient effects(전이효과), Convection heat transfer coefficient(대류열전달계수), Laser doppler velocimetry(LDV, 레이저 도플러 속도계)

Abstract

The temperature field of a counterflow non-premixed flame is investigated using thermocouples of two sizes. A thermal balance is performed on the thermocouple in order to calculate the magnitude of the radiation corrections involved. Both the thermocouple wire and bead are separately considered to be the relevant thermal surface to which convective heat transfer takes place, and from which radiation losses occur. The flame is also simulated by using a detailed chemical kinetic mechanism in a previously developed computer code. The local thermo-physical properties of the gas mixture, required to calculate the corrections, are determined both from the simulation, and by approximating the properties of the mixture as those of molecular nitrogen at the measured temperatures. It is concluded that the thermocouple wire is the appropriate thermal surface to which radiation corrections apply, in the absence of information about the gas mixture, its properties can be reasonably approximated by those of nitrogen (N_2), and the radiation corrections are very sensitive to misalignments in the temperature and velocity fields.

1. 서 론

예혼합되지 않는 화염에서 열전대 측정을 적용하기 위한 복사보정 방법은 이미 오래 전부터 연구

되어 왔다.^{1,2)} 그러나, 이 방법은 제한되어지는 몇 가지의 수정되는 부분이 있었지만,^{3,4)} 기초적인 방법에는 변화가 없었다.⁵⁾

열전대의 와이어 혹은 비드에 따른 길이 크기 D

* 조선대학교 기계공학부
** 트렉셀대학교 기계공학과
*** 명지대학교 기계공학부

의 비교평가와 이들 내부에서 발생하는 유동장 및 온도장에 관한 문제는 대단히 중요하다. 또한 서로 다른 크기의 비드(bead) 지름^{6,7)}에 의해서 정의될 수 있는 것과 마찬가지로 하나의 크기가 열전대 와이어의 지름에 기초하여 정의될 수 있다.⁸⁾ 즉 와이어가 원통모양인 반면에 비드는 원통모양⁹⁾ 또는 구모양¹⁰⁾으로 근사화 될 수 있다. 이러한 길이크기는 대류열전달이 발생하는 지배표면에 의존하며, 열적인 형상에 따르고 있다. 만약 열전대가 균일한 유동인 국부의 등온표면상에 위치하고 있다면, 열플럭스는 전체 와이어에서 균일하게 대류를 이루고 있을 것이다. 이러한 순간에서 비드의 면적은 전체 와이어로부터 적절한 제어체적의 작은 부분을 구성하며 알맞는 길이의 크기로 와이어의 직경을 얻어야 할 것이다.

비드의 직경은 와이어의 직경보다 대략 50%정도 더 크다. 그 이유는 주어진 측정에 대한 화염과 열전대가 정상상태 조건하에 의한 것으로서, 특히 전이효과도 무시할 수 있다. 최대 온도의 위치부근에서 Nusselt 수는 실제적으로 변하지 않는다. 따라서 작은 길이의 크기(비드 직경 또는 와이어 직경과 일치하는)상에서 열전달은 상대적으로 균일하다. 부가적으로 화염에 있어서 어떤 위치인 0.03mm(즉, 와이어와 비드 직경사이의 차이)상에서 발생하는 온도구배는 작아진다. 비드와 와이어사이의 작은 온도구배에 대한 열전대에서 큰 열전도성은 국부의 표면온도로부터의 차이를 매끄럽게 하는데 또한 도움을 줄 것이다.

그러나, 만약 열전대가 온도와 속도구배를 반으로 나누어진 위치에 주어진다면, 와이어에 따른 대류열전달은 불균일하게 되지만, 열전대를 통한 전도는 중요하게 되어진다. 열전대의 검출접합부인 비드는 열전대 질량의 초과와 비교했을 때 명확한 온도에 상응할 것이다. 그러므로 이런 경우에 있어서 열적인 평형이 수행될 수 있는 적절한 열전대의 구성은 비드라고 예상할 수 있다.

그리고, 반대 덕트로부터 축대칭 비예혼합된 역류 화염은 서로를 향하여 연료와 산화물을 유동시킴으로써 정체유동이 형성되며, 비예혼합 화염은 화학량적인 위치에서 대체적으로 등온표면 가까이에서 이루어진다. 비록 반경의 스칼라 불균일성

이 역류화염에서 존재할 수 있을지라도 축방향의 유동(스칼라 분포)은 축대칭에 대한 적은 길이에 서는 균일하다.¹¹⁾ 그러므로 축대칭에 수직 평면을 이루는 평행한 열전대에 대한 적절한 열적표면은 전체 와이어의 표면이 된다.

아마도 역류하는 비예혼합의 화염온도를 측정하기 위한 방법은 비관입 장치를 사용하지만, 그러나 이것은 항상 가능한 것은 아니다. 그러므로 이러한 연구에서 독특한 화염은 역류하는 비예혼합된 화염으로부터 복사보정을 할 수 있도록 접근하는 것이 일반적이다.

특히 본 연구에서는 역류하는 화염으로부터 공기의 메틸염화물과 메탄의 등가 혼합물을 연소시키는 비예혼합의 화염온도장을 조사하고자 하는 것이며, 이것은 최근에 상세한 화학적 운동 메카니즘의 형태에서 화학적인 연소를 확인하기 위하여 화염을 모델링하는데 있어서 중요성이 증대하기 때문이다.

2. 관련 이론의 해석

2.1 열전대 평형

보정의 크기를 계산하기 위한 열전대는 열적 정상상태조건하에서 유지되어야만이 열전달이 적용된다. 이러한 대류 열전달과 복사 열전달에 기초한 평형은 다음과 같은 관계식으로 나타내어진다. 즉,

$$h(T_g - T_t) = \sigma \epsilon (T_t^4 - T_\infty^4) \quad (1)$$

위 식에서, h 는 대류 열전달계수를 나타내고, T_g 는 가스온도, T_t 는 측정된 열전대 온도, T_∞ 는 주위 온도, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, 그리고 ϵ 은 코팅의 방사율을 제시하고 있다. 대류 열전달계수는 Nusselt 수, 즉 $h = (\lambda Nu_D)/D$ 와 관계된다. 여기서 D 는 열전대와 관련된 특성길이의 크기를 나타낸다.

2.2 대류열전달의 상관관계

유동 파라미터에서 Nusselt수와 관련되고 있는 경험적인 상관관계수들을 이용하면 쉽게 얻을 수 있다. 예를 들어 와이어에서 열전달이 고려될 경우

다음과 같은 Nusselt수에 대한 작용관계가 적절할 것이다.⁹⁾ 즉,

$$Nu_D = 0.75 Re^{0.4} Pr^{0.37} \quad (2)$$

위 식에서 Re 와 Pr 은 각각 국부 Reynolds수와 Prandtl수이며, 여기서 $Re = \frac{\rho V_g D}{\mu}$ 이고, $Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$ 이다. 또한 이들 관계에서 부호 ρ 는 가스밀도를 나타내고, V_g 는 축방향 역류가스속도, μ 는 동점성 계수, D 는 와이어의 직경, 그리고 C_p 는 열용량을 나타낸다. 같은 방법으로 구 (sphere) 모양에 대한 근사화는 비드로부터 열전달을 고려한다면, 다음과 같은 관계식에서 대류열전달계수가 얻어진다.^{9,10)} 즉,

$$Nu_D = Re Pr \left[\left(\frac{2.2}{Re} \right) + \left(\frac{0.48}{Re^{0.45}} \right) \right] \quad (3)$$

또한 위의 이런 경험적인 관계식들을 약간 변형시켜서 이용할 수 있을 것이다.⁹⁾

그러나, 식(2)와 식(3)에 내재된 오차는 화염에서 측정된 온도로부터 복사에 대한 상관관계를 포함한 어떤 다른 불확실성보다는 한층 더 낮을 것이다.

2.3 열전대의 복사보정 방법

비에혼합한 역류화염에서 복사보정은 다음과 같은 방법⁴⁾으로 이루어진다. 즉 동일물질로 코팅된 두 가지의 열전대를 가지고 같은 위치에서 측정함에 의해 적용시켜 왔다.⁷⁾ 따라서 두 열전대의 온도 $T_{t,1}$ 과 $T_{t,2}$ 는 식(1)에 의하여 측정되므로 이것을 다음과 같은 식에 적용할 수 있다.

$$\left(\frac{h_1}{h_2} \right) \left[\frac{(T_g - T_{t,1})}{(T_g - T_{t,2})} \right] = \left[\frac{(T_{t,1}^4 - T_\infty^4)}{(T_{t,2}^4 - T_\infty^4)} \right] \quad (4)$$

만약 와이어 표면이 적당한 열적평형이라면, 주어진 위치에서 두 개의 대류열전달계수 h_1 과 h_2 가 두 와이어의 직경을 포함하는 계수 $f(D_1, D_2)$ 에 관계된다. 즉,

$$f(D_1, D_2) = \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.6}$$

위 식에서와 같이 열전달계수가 열전대의 직경과 비교해서 커야만 한다는 것이 인식되어 진다.⁹⁾ 반면에 국부속도와 스칼라 분포는 교란(섭동)이 된다. 이러한 조건은 예리한 온도구배를 포함하고 이것들이 가시적인 화염두께가 1 mm 정도이기 때문에 역류비에혼합된 화염에 적용될 때 특히 심각하다.

서로 다른 직경을 갖춘 두 가지의 열전대를 사용하는 것과 연관된 문제는 화염의 위치가 이들 각각에 의해 다른 방법으로 섭동된다는 것이다. 예를 들어, 가시화의 화염위치에 대한 섭동은 열전대 비드의 직경이라는 것이 나중에 나타내는 것을 알 수가 있다.¹²⁾ 그러므로 보정된 온도는 특별히 중요한 곳인 최대 화염온도의 부근에서 정확히 보정에 대한 평가를 하기란 쉽지가 않다.

코팅을 하지 않은 열전대는 촉매 재결합열을 고려하면 역류하는 비에혼합된 화염으로부터 온도를 측정하는데 사용할 수 있으며¹³⁾, 또한 반경방향 재결합과 복사손실이 높은 팽창율에서 서로 보정하며, 반면에 낮은 팽창율에서는 반경방향농도가 감소하기 때문에 복사손실이 지배한다는 결론을 얻고 있다.¹³⁾

3. 실험 및 해석 방법

3.1 실험장치 및 방법

Fig.1은 역류 버너의 개략도이다. 본 연구에서는 메탄 또는 메틸염화물과 공기가 혼합을 이루는 예혼합 연소의 역류화염, 메탄과 메틸염화물의 질량비에 따른 예혼합 연소의 역류화염, 간단히 메틸염화물과 공기만으로 이루어진 혼합물의 예혼합 연소 역류화염 등에 관하여 실험을 수행하였다. 예혼합 연소의 역류화염은 버너에 의해서 발생되도록 하였다. 연소 생성물은 간단한 흡입을 사용해서 추출할 수 있으며, 버너는 동일 환상류 수냉 열교환기로 둘러싸이게 하였으며, 덕트를 통한 환기구를 설치하였다. 역류버너는 특별히 내경 25.4mm인 두 개가 서로 마주보는 덕트로 구성하였고, 그 사이에

14mm의 공간을 두고 떨어져 있다. 버너에서 발생한 화염은 두 개의 덕트¹⁴⁾로 둘러싸인 둥근 모양의 부분에서 질소 커튼의 작용으로 인해 주위의 방해물로부터 고립되도록 하였다. 버너의 장치부품들은 수평계를 사용하여 조립하였으며, 같은 방법으로 덕트들은 모두 중력방향과 평행하게 하여 동일한 대칭축으로 설치하였다. 버너 장치부품들은 운동 조정장치로 제어가 가능하도록 x-y-z 병진 운동 장치를 설치하였다. 덕트의 출구 직경은 25.4mm이지만, 일정한 유동장에 대한 효과적인 직경은 훨씬 더 작다.¹⁵⁾ 이러한 유동에 대한 분석적인 해석들은 단지 정체면의 중간에서 유동의 필수적인 특징을 획득한다. Rolon과 그 외의 연구에 의한 실험적 데이터는¹¹⁾ 이 범위가 대략 덕트 직경의 반인 약 12mm에 부합된다고 되어있다. 차수 단위가 큰 분리거리를 얻기 위해서 분석적인 유동 해석¹⁶⁾에 대응하고 있는 정확한 속도를 제공해야 한다고 알려져 있으며 그 덕트는 14mm 정도로 분리된다.

전체 버너의 장치부품들은 메틸염화물의 연소로 발생하는 부식작용을 최소화하기 위해서 스테인리스강으로 제작하였다. 실험실 작업 공간 내

HCl의 확산은 동일 환상류로 작동하는 간단한 흡입을 추가 사용해서 방지하며, shop vacuum cleaner를 사용하므로 역류덕트의 외벽에서 약 30cm 정도 떨어져있고, 이들의 배출 역시 설치된 덕트에 의한 통풍구로 배출하였다.

가스들은 AGA가스에서 얻어졌으며, 그리고 메틸염화물(계기도 99.5%), 메탄(화학적 순도 99.7%), 압축공기로 구성되었다. 화염으로 둘러싸인 가스막은 공업용 질소로 이루어져 있다. 기체 반응 혼합물은 메탄, 메틸염화물, 공기를 각각 측정하기 위하여 개별적인 유량계(Fisher & Porter Rotameter)를 설치한 가스 취급 장치(Gas-handling System)를 가지고 측정하였다. 이때 유량계를 통과한 유량의 출구압력은 10psig로 일정하게 유지시켰으며, 유량계는 출구의 압력에서 습도계를 가지고 최고 0.68 m³ / hr의 성능으로 보정을 하였다. 물론 유동율은 적절한 압력보정에 사용될 수 있으며, 대기압하에서 유량계의 출구 흐름에 속하기도 한다. 이와 같은 유량계는 메탄을 측정하는데 사용하며, 대기압하에서 공기의 흐름에도 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 적절한 밀도보정에도 응용할 수가 있다.

가스의 상반응물 측정에서 사용한 각각의 유량계들에 대한 출력은 각각의 덕트에 이상적인 체적 유량을 공급하는 두 개의 이상적인 유량계들을 통하여 혼합이 이루어지며, 또한 동일하게 측정되었다. 상온 즉 대략 300° K와 대기압하에 버너로 들어가는 기체의 반응물들은 이동용 프로판 토치를 이용하여 점화시켰다.

화염에서 속도 프로파일은 LDV를 사용하여 만들었다. LDV는 속도의 두성분을 동시에 측정할 수 있으며, 레이저 출력은 457~514.5nm의 주파수 범위로 작동하는 100~500nW Ar-ion 레이저이다. 레이저 광선의 지름은 0.82mm이며, 발산은 0.78mrad이다. 원하는 위치에 초점을 모으기 위하여 광섬유 케이블로 조합한 렌즈와 빔분할기(Beam splitter)를 통과시켰다.

화염에는 유체화된 Bed Seeder를 통하여 각각의 덕트 내 가스유동을 흐르게하며 MgO입자(ACS)를 뿌렸다. 물론 화염은 푸른색으로 일정하지만 추가된 MgO입자는 화염에서 노르스름한 색

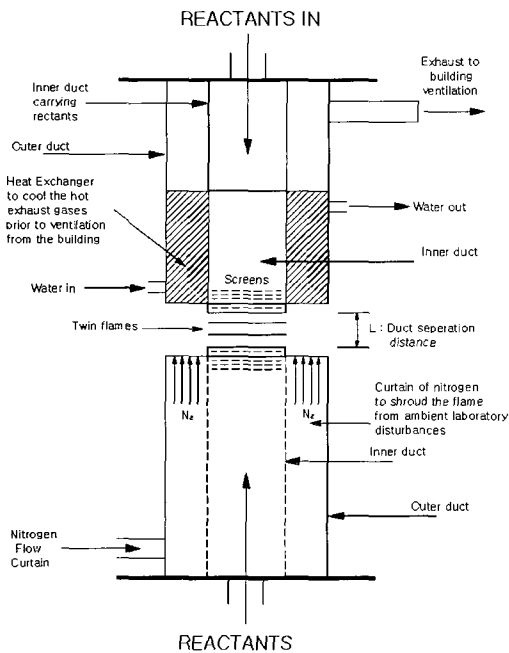


Fig. 1 Schematic diagram of the counterflow burner

깔을 띠고 있었다. 대체적으로 이 실험에서 동일하게 발생된 예혼합 되지않은 역류화염은 더욱 높은 염소의 부가 레벨에서 소멸상태에 근접할 때까지 거의 일정하게 노란색을 띠고 있다.¹⁵⁾ 따라서 화염은 소멸에 가까워지며 매우 어두운 파란색으로 되어 거의 빛을 발하지 않으므로, 다른 방해물 받지 않고 속도를 측정하는 것이 화염의 존재를 확인하기 위한 유일한 방법이라고 예측된다. 이 측정은 유동이 정상상태라는 것, 즉 입자 실험에서 주어진 LDV 데이터에서 진동이 명백하게 없다는 것을 나타내며, 유동은 층류이며, 측정된 난류의 강도는 거의 0.06과 같은 값을 갖는다.

역류 버너의 실험장치는 역류하는 흐름동안 가스 유량을 조절하기 위해 사용된다. 모든 가스들은 실내온도와 대기압력에서 역류를 시작한다. 따라서 실험에서는 속도 프로파일은 같은 LDV 장치¹⁶⁾를 사용해서 측정된다. 화염이 시작되는 조건에서 이들은 파란색을 띠고 있다. 온도는 백금-백금·로듐(Rh 10%, Pt 90%) 열전대를 사용해서 측정하였다. 두 개의 열전대가 사용되는데 하나는 와이어 지름이 0.0762mm이고, 또 다른 하나는 0.127mm이다. 비예혼합 화염으로부터 열전대는 보통 화염에서 손쉽게 발생하는 반응의 촉매작용을 막기 위하여 코팅한 것이다.¹⁸⁾ 열전대 코팅은 그 자체가 오랫동안 지속되고 있는 관심원이다.^{18~20)} 두 개의 열전대는 촉매작용효과를 막기위하여 이트륨(yttrium) 산화물의 얇은 막으로 코팅되며, 코팅된 와이어 지름은 각각 0.7874mm와 0.1321mm이다. 보다 두꺼운 코팅은 벗겨지기 쉽기 때문에 얇게 코팅하는 것이 매우 중요하다.¹⁹⁾ 두 경우에서 비드의 지름은 와이어의 지름보다 대략 50% 더 크며, 이것은 작은 열전대와 큰 열전대에 대하여 각각 0.1168mm와 0.1956mm이다.

열전대 신호는 증폭되어진 후에 컴퓨터에 연결된 데이터 획득시스템에 의해 저장되어 해석되어진다. 열전대의 도선(lead)은 바깥 지름이 1.5875mm인 세라믹 튜브 안에 넣어진다. 관에 의한 교란을 최소화하기 위하여 열전대의 비드는 관 축을 따라서 끝 쪽으로 적어도 5mm 정도가 내밀어지도록 하여야 안전하게 된다. 역류하는 흐름에서, 열전대의 비드는 세라믹 관이 축에 직각으로

놓이도록 하고 대칭축으로 이루게하여 실험을 하였다. 이러한 방법에서 열전대 장치부 들은 열전도 손실을 최소화 할 수 있도록 하였으며, 화염등온선을 따라 정렬하였다.

3.2 열역학 및 전이의 물성

가스온도 T_g 를 결정하기 위하여 먼저 레이놀드수(Re), 프란틀수 (Pr)와 그 결과로부터 열전달계수(h)를 계산할 수 있도록 역류화염의 모든 지점에서 국부의 열물성치들을 결정해야만 한다. 이러한 물성치들도 두 가지 방법에 의해 얻어진다. 즉, 첫째는 자세한 수치 시뮬레이션을 통해 화염구조를 계산함에 의한 것이고, 두 번째는 모든 지점에서의 가스물질들을 분자질소의 물성치들에 근사화시켜 가정함으로써²¹⁾ 식(1)에서 요구되는 이트륨(yttrium) 산화물의 방사성 값(=0.33)을 얻는다.^{22, 23)}

3.3 수치 시뮬레이션

비예혼합 화염연소의 구조는 메틸염화물의 양과 등가물이며, 공기에서 메탄은 이전에 개발된 해석코드²⁴⁾를 사용하여 역류화염에서 수치적으로 시뮬레이션하는 것이다. 사용된 화학적 요소^{25, 26)}를 결합시키므로 자세한 메카니즘을 나타내게 한다.¹⁶⁾ 따라서, 이 요소는 358개의 요소들의 정방향 반응과 역방향 반응을 포함하며, 불활성으로 작용하는 질소를 포함하여 38개의 기체 상을 포함함으로써 열물리학적 데이터베이스^{16, 17)}가 시뮬레이션에 사용된다.

시뮬레이션에서 경계조건은 전위유동에 근거한 가정을 포함하고 있다. 그러므로, 이들 결과들²⁷⁾의 양상에서 시뮬레이션은 낮은 변형률에서만 정확하다. 보다 높은 변형률 값에서 즉, 높은 덕트 출구 속도에서 유동에 포함된 운동에너지는 더욱 높아지며, 그러므로 플러그 유동 경계조건이 더욱 정당하다. 따라서 후에 확인된 것처럼, 화염에 기인하여 발생하는 역류의 팽창속도는 시뮬레이션에 의해 잘 예측된다. 이와 같은 목적은 고온 팽창영역에서 전이특성들을 얻는 것이기 때문에 적용된 경계조건으로부터 시뮬레이션된 화염소멸의 감도에 대한 연구는 본 연구의 범위를 넘어서게 된다. 따라서 이런 계획은 메틸염화물-공기혼합물^{16, 17)}을 태

우는 동안 늘어나지 않는 예혼합화염의 화염속도와 역류하는 비예혼합의 메틸염화물-메탄공기 및 메틸염화물-공기화염)의 소멸조건을 예측하는데 성공적으로 사용되어 왔다.¹⁵⁾

아울러 이와 같은 실험적인 결과들은 시뮬레이션된 화염속도 프로파일들이 정확하다는 것을 나타내는 것이다. 또한 이 결과들은 열방출이 정확하게 모델화 되어져야만 한다는 것을 나타내고, 관련 실험의 시뮬레이션이 잘 일치한다는 것을 나타낸다. 그러므로 수치 시뮬레이션의 계산목적은 전이한 데이터를 생성시키는 것뿐만 아니라 보정을 비교할 수 있는 정확한 온도 프로파일을 얻는 것이다.

4. 실험결과 및 검토

먼저 두 개의 열전대 방법은 원통형 비드에 대한 복사보정 상관관계인 방정식(2)를 사용하고, 방정

식(4)에 적용하였다. 물론 다른 측정에 의해서 도입된 열물성치들의 경향을 제외시켰다. Fig.2는 두 개의 열전대에서 얻어진 온도 프로파일을 나타낸 것이다. 두 프로파일은 지름이 큰 열전대로부터 나타난 커다란 손실(오차)을 나타내고 있지만, 대부분의 경향에서 많은 유사점을 보이고 있다. 각 열전대에서 방해되는 성질에 기인한 섭동은 고온 영역에서 차이를 가지고 있다. 이와 같이 Fig.2에 나타나 있는 것과 같이 보정된 온도 프로파일의 복사 보정에 기인한 오차는 여러번의 반복 실험에서도 항상 나타나고 있다. 그러므로 이 방법은 교정에 대한 약간의 보정이 도입되지 않는다면 믿을 수 없는 데이터를 나타내게 된다. 그러나, 이 방법은 화염이 대체로 더 안정되고 덜 섭동되기 쉽기 때문에 액체 합동(pool)에 역행하여⁷⁾ 유동하는 산화제에 의하여 확립된 역류화염에서 훨씬 더 정확하다.

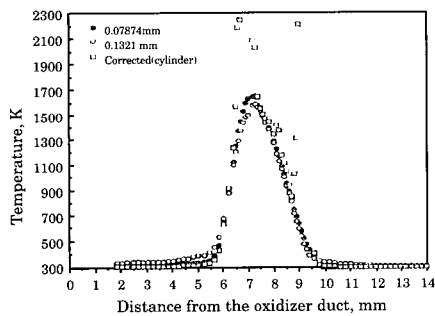


Fig. 2 Radiation-corrected temperature profiles obtained employing the two thermocouple method

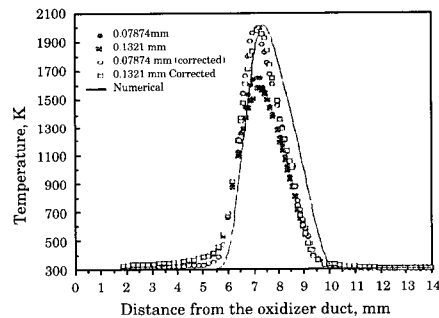


Fig. 4 Radiation-corrected temperature profiles obtained employing the cylindrical correlation

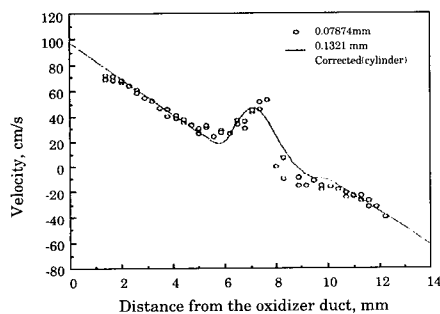


Fig. 3 Comparison between the measured and simulated velocity profiles

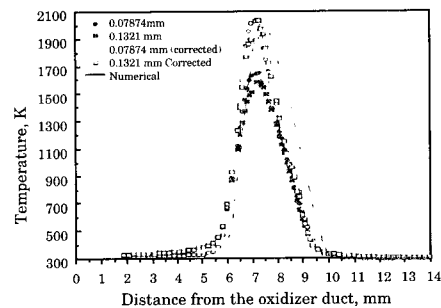


Fig. 5 Radiation-corrected temperature profiles obtained employing the cylindrical correlation

Fig.3에서는 실험에 의하여 측정된 속도 프로파일과 시뮬레이션한 속도 프로파일을 비교한 것이다. 중간부분의 데이터가 약간 상이함을 나타내고는 있지만 어느 정도로 측정값과 계산값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이들은 화염에 대한 열방출 프로파일의 예측이 실험에서 열방출 프로파일에 상응한다는 것을 의미하며, 따라서 연료와 산화제 소비율, 그리고 질소의 확산이 좋은 모델화 되고 있다.

두 개의 열전대를 분리하여 방정식(2)에 의한 원통모양의 상관관계를 사용하여야 하지만, 만약 방정식(1)이 적용된다면 Fig.2에 나타난 것보다 더 나은 결과들이 얻어진다. 먼저 Re 와 Pr 을 결정하기 위한 것은 상세한 시뮬레이션으로부터 얻어진 가스 혼합물의 열역학 및 전이 물성들을 사용하는 것이다. 이 경우의 측정과 보정을 시뮬레이션한 온도 프로파일을 Fig.4에 나타내었다. 두 보정된 프로파일은 거의 잘 일치되고 있음을 알 수가 있다.

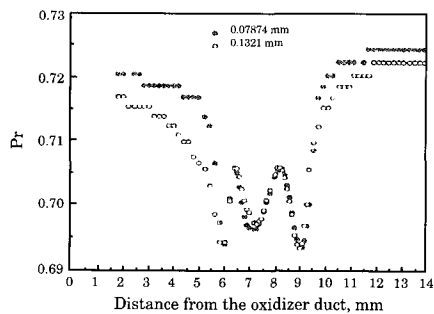


Fig. 6 Prandtl number profiles corresponding to the two measured thermocouple temperature

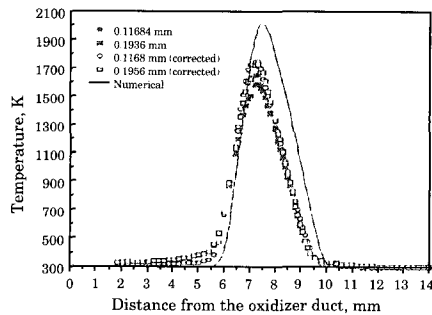


Fig. 7 Radiation-corrected temperature obtained employing the spherical (bead) correlation

보정된 온도는 최대 온도의 위치와 프로파일 형태의 관계에서 예측과 잘 일치하고 있다. 이것은 측정하고 예측된 속도 프로파일에서 일치가 열방출과 관련해서 정확하게 똑같이 주어진다 것을 의미하기 때문에 예측되어진 것이다. 만일 측정된 온도를 활용해서 계산된 분자 질소의 물성들이 평가되었다면 두 개의 보정된 프로파일은 똑같이 잘 일치할 것이다. 그러나 이런 경우 Fig.5에 보여진 것처럼 시뮬레이션과 보정된 프로파일 사이에 약간의 불일치가 있다. Fig.6은 가스 혼합물의 물성들이 두 개의 열전대 온도로부터 분자 질소의 물성들에 의해 근사화 될 때 영역에서 Prandtl수의 프로파일을 나타낸 것이다. 이 프로파일의 차이는 Prandtl수들이 두 개의 다른 온도에서 계산되기 때문에 발생한다. 두 개의 Prandtl수의 프로파일에서 차이는 크지 않지만 복사보정이 가장 요구되는 위치로서, 즉 산화물 덩트로부터 6~9mm 떨어진 영역에서는 실제로 나타나지 않는다.

다음으로 방정식(3)로부터 구 모양의 모델화된 열전대 비드 대한 보정을 한 것이다. 적절한 열전달 표면을 구성하고 있는 열전대 비드로 가정하고 복사보정을 얻기 위하여 적용한 것이다. Fig.7은 양측 열전대에서 측정된 온도에 따른 복사보정 온도 프로파일을 나타낸 것이다. 보정의 크기는 Fig.4에서 표시한 것처럼 원통 보정을 사용하여 얻어진 것보다 상당히 적다. 여러 가지 보정법에서 얻어진 최대 화염온도가 측정되므로 복사보정 값에 대한 것을 Table 1에 나타내었다. 또한 열물성들이 결정됨에도 불구하고, 만약 두 개의 열전대

Table 1. Measured and radiation-corrected maximum flame temperature obtained with the various method. (predicted temperature is 2015 K)

Case	Thermocouple properties of the gas mixture	Temperature, K	
		Wire diameter	
		0.07874 mm	0.1321 mm
Measured	-	1651	1580
Cylinder	Simulated	2003	1996
	Of N_2	2032	2033
Sphere	Simulated	1758	1725
	Of N_2	1749	1727

방법이 방정식(4)에 사용될 경우 불만족스러운 결과들이 얻어질 것이다.

Fig.8은 가스 혼합물의 열물성들이 측정된 온도에서 질소분자들이라고 가정할 경우 두 개의 열전대에 대응하고 있는 계산된 Nusselt수의 프로파일을 나타낸 것이다. 이 결과들은 원형 및 구형의 상호관계 모두에 대하여 상응을 한다. 정체 평면에서 Reynolds수는 방정식(2)에 의하면 0이기 때문에, 원통형의 상호관계인 경우에 있어서 원통모양으로부터 대류 열전달은 전혀 내포하지 않으면 Nusselt수 또한 0이다. 그러므로 방정식(2)를 적용할 경우 이러한 위치는 무시가 된다. 대류 열전달 계수에서의 불연속성은 측정된 온도가 약 450K일 때 9mm지점에서 발생한다. 탄화수소연료-공기의 비예혼합된 역류화염에 내포된 화학량론에 따라서 온도지점의 피크 위치 혹은 화학량론의 표면은 일반적으로 산화물 표면 속에 잘 입증되어지며 정

체 평면으로부터 멀어진다.

구형 모양의 상호관계인 경우 대류 열전달계수는 Fig.9에 나타낸 것처럼 원통 모양의 상호관계에 의해 얻어진 것보다 훨씬 더 크다. 따라서 열전달 계수에 반비례하는 복사보정의 크기는 열평형이 열전대 비드에 적용될 때 더욱 낮아진다. Reynolds수가 정체평면 부근의 높은 온도영역에서 떨어질지라도, 대류 열전달계수의 값은 실제로 Prandtl수의 증가에 의하여 증가하므로, 열전도계수의 값은 온도상승에 따라서 증가한다. 원통형 계수인 경우 열물성에 의한 열전달계수의 크기에 따라서 증가하는 정체평면의 부근으로부터 무시할 수 있는 속도(낮은 Re)에 의해 압도된다. 계산을 할 수 없는 즉, 화학적 운동 메카니즘이 사용될 수 없는 연료에 대하여 질소(공기)의 열물성은 혼합물의 물성 대신에 충당이 될 수 있다.

방정식(2)와 방정식(3)의 적용은 보정이 Reynolds수와 열물성 등에 의하기 때문에 온도와 속도 프로파일의 정확한 일치에 의존한다. 위의 중요한 오차는 실험적인 오차에 따라 다른 프로파일에 대한 하나의 프로파일이 이동을 함으로서 발생할 수 있다. 그 오차들은 정체평면 근처의 열전달 계수 값에서 대단히 민감한 속도에 의한 구배가 있기 때문에 만약 원통 모양의 상호관계가 적용된다면 더욱 클 것이다. 이 경우에 대하여 오차들은 열전달계수 값이 먼저 정체평면에 접근함으로써 감소하고 그리고 나서 증가하기 때문에 비선형적이다. 만약 Fig.3에서 속도 프로파일이 임의적으로 산화물 덕트를 향해 이동하거나 또는 멀어진다면 복사보정의 크기에서는 중요한 차이를 조정해야 한다. 또한, Fig.3, Fig.8, Fig.9에서 거리에 따른 데이터를 비교하다 보면 8~9mm 부분의 데이터가 이상한 결과를 보이고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 온도 측정에서 불확실성의 크기가 주로 열전대로 인한 섭동과 온도장 및 속도장 사이의 불일치에 기인한 것과 주로 일치한다. 전형적인 계산은 이러한 불확실성이 아주 클 수 있다는 것이며, 이것은 온도 위치피크에서 ± 50 K 정도를 나타낸다. 그러나, 측정을 하는데 있어서 주의를 해야하며, 실제적인 불확실성은 보다 적은 크기일 것이라고 예측된다.

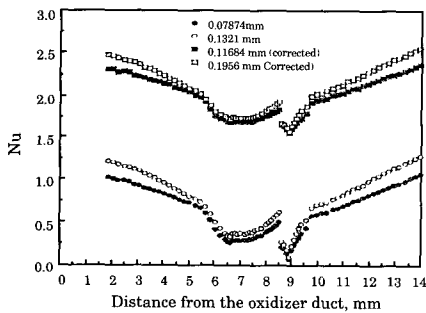


Fig. 8 Nusselt number profiles corresponding to the two thermocouple

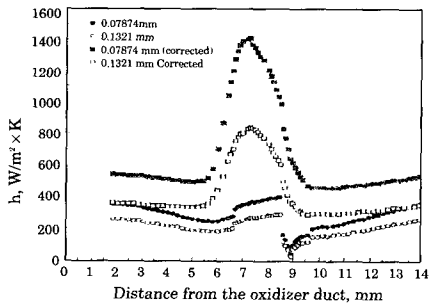


Fig. 9 Convective heat transfer coefficient profiles corresponding to the two thermocouple

5. 결 론

역류화염에 대한 본 연구에서의 결과는 다음과 같이, 공기에서 메탄과 메틸염화물의 등가물의 혼합물을 연소시킴에 의해 입증되어지는 역류하는 비예혼합 화염으로부터의 온도장에 대한 결과가 나타나게 된다.

1. 복사보정이 적용될 수 있는 적절한 열표면은 만약 와이어가 역류에 의해서 국부적인 등온평면으로 향한다면 열전대 와이어라는 것이 뚜렷하다.

2. 데이터가 몇 가지 방법에서 매끄럽지 못하다면 가스역류에서 두 개의 열전대 방법에 따라 복사보정을 정확하게 평가하기가 어렵다.

3. 비록 가스온도에서 계산된 가스혼합물의 열물성들이 바람직한 것이라도, 항상 이것들을 정확하게 평가하는 것이 가능할 수는 없다. 이런 경우 만약 혼합물이 측정온도에서 질소를 구성할 수 있도록 근사화 된다면 복사보정의 타당한 평가가 이루어질 수 있다.

4. 원통 모양의 보정이 적용되는 경우에서 복사보정은 온도와 속도장의 정확한 결정에 매우 좋은 감도가 얻어진다. 이들 프로파일 사이의 어떤 불일치는 복사보정의 크기를 계산할 때 중요한 에러를 초래할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Friedman, R. Fourth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1953, pp.259-263.
2. Friedman, R. and Burke, E. J. Chemical Physics 22:824-830(1953).
3. Kaskan, W. E. Sixth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1957, pp.134-143.
4. Seshadri, K., and Rosner, D. E. AICHE J. 30: 187-196(1984).
5. Fristrom, R. M., Westenberg, A. A. Flame Structure, McGraw Hill, New York, 1965, pp.145-176.
6. Jeng, S. -M., Chen, L. -D., and Faeth, G. m. (1981). An investigation of axisymmetric buoyant diffusion flames. Technical Report NBS-GCR-82-367, National Bureau of Standard.
7. Hamins, A. and Seshadri, K., Combust. Flame 68:295-307(1987).
8. Chapman, A. J. Heat Transfer, 4th Edition, Macmillan, New York, 1984, p.292.
9. Eckert, E. R. G., and Drake, R. M. Analysis of Heat transfer, McGraw Hill, New York, 1972.
10. Kreith, F., and Bohn, M. S. Principles of Heat Transfer, 4th Edition, Harper & Row, New York, 1986, pp.360-361.
11. Rolon, J. C., Veynante, D., Martin, J. P., and Durst, F. Experiments in Fluids, 11:313-324(1991).
12. Yang, G., and Kennedy, I. M. Combust. Flame 92:187-196(1993).
13. Drake, M. C., and Blint, R. J. Combust. Flame 83:185-203(1993).
14. Puri, I. K., Ph. D. thesis, University of California, San Diego, 1987.
15. Huh, J. Y., Lee, K. Y., and Puri, I. K., The structure and extinction of nonpremixed methyl chloride and methyl chloride/methane air flames. Combust. Flame 91:46~55(1993).
16. Lee, K. Y., Yang, M. H., and Puri, I. K. Combust. Flame 92:25-34(1993).
17. Yang, M. H., and Puri, I. K. Combust. Flame 94:25-34(1993).
18. Kent, J. H. Combust. Flame 14:279-282(1970).
19. Cookson, R. A., Dunham, P. G., and Kilham, J. K. Combust. Flame 8:168-170(1964).
20. Burton, K. A., Ladoucer, H. D., and Fleming, J. W. Combust. Sci. and Tech. 81:141-145(1992).
21. Vargaftik, N. B. Handbook of Physical Properties of Gases and Liquids, 2nd Edition. Hemisphere, New York, 1975, pp.433-464.
22. Touloukian, Y. S., Dewitt, D. P., and Hertz, R. S. Thermophysical Properties of Matter. Thermal Radiative Properties-Coatings. IFT/Plenum, New York, 1972, Vol. 8, pp. 491-500.
23. Touloukian, Y. S., Editor. Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. Macmillan, New York, 1991, Vol. 4, Part 1, pp. 554-560.
24. Rogg, B. (1991). RUN-IDS: A computer program

for the simulation of one-dimensional chemically reacting flows. Technical Report CUED/A-THERMO/TR39, University of Cambridge, Department of Engineering.

25. Miller, J. A., and Bowman, C. T. Prog. Energy Combust. Sci. 15:287-338(1989).
26. Barat, R. B. Sarofim, A. F., Longwell, J. P., and Bozzelli, J. W. Combust. Sci. Tech. 74:361-378(1990).
27. Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D., and Williams, F. A. Twenty-third Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990, pp. 503.

저 자 소 개



오을권 (吳栗權)

1949년 9월9일생. 1972년 조선대학교 기계공학과 졸업. 1991년 경희대학교 대학원 졸업(박사). 현 조선대학교 기계공학부 교수.



차경옥 (車京玉)

1945년 1월4일생. 1972년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1977년 단국대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1984년 동대학원(박사). 1986년 일본 도요다대학원 연구원. 1998. 1~1999. 12 대학기계학회 사업 및 총무이사. 1999. 1~현재 한국자동차학회 부회장. 현 명지대학교 기계공학부 교수.