

〈 논문 〉

메탄/공기 다중 제트 예혼합 화염에서의 유동과 연소특성

김영수[†] · 이대래* · 하만영** · 장영준** · 전충환** · 조승완** · 강길영** · 유재현**

(2007년 2월 2일 접수, 2007년 5월 18일 심사완료)

Flow and Combustion Characteristic in an Array of Multiple Pre-Mixed Methane/Air Flame Jets

Young Su Kim, Dae Rae Lee, Man Yeong Ha, Young June Chang, Chung Hwan Jeon, Seung Wan Cho, Kil Young Kang and Jae Hyun Yu

Key Words : Combustion Characteristic(연소 특성), Multiple Flame Jets(다중 분류 화염), Interaction (상호 간섭), Slot-to-slot Spacing(분류 간 간격)

Abstract

This study was conducted to investigate the flow and combustion characteristic of the experimental burner which was manufactured for the reflection of the oven and broil burner features. As slot shape, spacing between slots, and slot arrangement of the exit area which emits the mixing gas are different in case of oven burners and broil burners, the purpose of this study is to know the affection of the flame interaction and combustion characteristic according to the change of shape factors such as slot shape, slot arrangement, and slot-to-slot spacing. With no relation of the slot shape, as the spacing between slots became narrow, the occurrence of a lift-flame was delayed. So the combustion was possible in the leaner region, but the appearance of yellow-tip became a little fast. Slit slot port had the broadest operating range among the other slot shapes. Specially, from the side of lift-flame, as the jet that spreads downstream in the longitudinal slot was nearly circular just a few slot lengths away from the orifice, slot-to-slot spacing of the Slit port was closer than the other ports. These results could be expected through the computer numerical method and had a good agreement. As the spacing between slots increased, in case of Slit and Mix port, NOx emission rate was constant or decreased, but the NOx emission of Hole port was increased. CO emission rate of Slit and Hole port was increased as the slot-to-slot spacing was broadened.

기호설명

c_p : 비열 [kJ/kg · K] (Specific heat)
 CP : 결합점 [mm] (Combined point)
 D_e : 유효 직경 [mm] (Effective diameter)

h : 슬롯 높이 [mm] (Slot height)
 H : 포트로부터 높이 [mm] (Height from the port)
 H_v : 고위발열량 [kcal/Nm³] (Higher heating value)
 l : 축 방향 위치 [mm] (Radial position)
 m_w : 물 질량 [kg] (Mass of the water)
 MP : 합체점 (Merging point)
 M.W : 몰 무게 (Molecular weight)

† 책임저자, 회원, LG전자 DAC 연구소
 E-mail : ys4877@lge.com
 TEL : (055)260-3833 FAX : (055)268-4702

* 회원, LG전자 DAC 연구소
 ** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| N | : 몰 수 [Kmol] (Number of moles) |
| ppm | : Part per million |
| Q | : Flow rate [m^3/s] |
| S | : Spacing between slots [mm] |
| T.D.R | : 전환비 (Turn-down ratio) |
| T.I | : 공급 열량 [slpm] (Thermal input) |
| V | : 속도 [m/s] (Velocity) |
| W | : 슬릿 폭 [mm] (Slit width) |
| x | : 이산화탄소 원자수 (Number of carbon atoms) |
| y | : 수소 원자수 (Number of hydrogen atoms) |
| γ | : 질량 분율 (Mass fraction) |
| λ | : 과잉 산소비 (Excess air ratio) |
| Φ | : 당량비 (Equivalence ratio) |
| χ | : 몰 분율 (Mole fraction) |

1. 서 론

가정용 가전제품, 특히 주방용 제품이 새로운 ‘블루 오션(blue ocean)’으로 떠오르면서 국내·외 많은 기업들이 이에 대한 관심이 커져가고 있다. 그 중에서 특히 가스오븐레인지(gas oven range)에 대한 국내 수요는 주방 문화가 서구화됨에 따라 그 양이 점점 증가하고 있다. 1990년대 중반 15만대 정도 보급되었던 가스오븐레인지는 올해 약 25만대의 판매를 예상하고 있다. 또한 스마트 홈(smart home) 시대의 도래와 신축 아파트 입주자를 대상으로 한 빌트인(built-in) 방식의 보급률로 가스오븐레인지 시장은 더욱 확대될 것으로 기대하고 있다.

이렇게 가스오븐레인지의 뚜렷한 성장에도 불구하고 실제 가스오븐레인지 설계에서 핵심이 되는 다중 제트 버너에 관한 정보는 부족한 현실이다. 다중 제트 버너는 국소적인 열점(hot spot)의 발생을 피하면서 열전달을 증가시킬 수 있는 방법으로 최근 그 이용이 증가하고 있다. 이러한 방법을 위해서는 슬롯의 배열과 형상에 관한 연구가 절실하다.^(7,8) 특히 슬롯 형상 요소 중에 슬롯 사이 간격은 화염의 간섭에 직접적인 영향을 미치고 버너의 성능에 그대로 반영됨에도 불구하고 아직까지 이에 대한 실질적인 연구는 이루어

지지 않았다.

현재 상용중인 오븐레인지의 버너들의 슬롯 형상은 크게 원(hole), 사각 slit, 혼합(원과 사각형상이 혼합)형상이 주를 이룬다. 오븐레인지에서 버너는 하나의 파이프를 통해 나오는 예혼합 형태의 혼합기체가 양 옆에 있는 슬롯의 구멍들을 통해 혼합기체가 분류되면서 연소된다. 버너의 역할에 따라 보통 오븐 버너(oven burner)와 브로일 버너(broil burner)로 나누어지며 음식을 조리하는 방식에 차이가 있다.

가스오븐레인지 버너에서 중요한 설계 기술은 오븐 버너 내에서의 안정성을 확립할 수 있는 기술과 에너지 문제로 고민하고 있는 현시대에 필연적으로 고려해야 하는 에너지 효율의 향상에 관한 기술, 그리고 최근 가장 큰 문제로 인식되는 배기가스 절감 기술이라 할 수 있다.⁽¹⁾ 위의 기술을 위해 필요한 조건은 가스의 종류, 공급 압력, 연소량 및 연소부의 길이 등이며, 이에 따라 노즐 직경, 관경, 슬롯(slot) 직경, 슬롯 간격, 슬롯 수 등을 조정하여 버너를 설계해야 한다.

에너지 문제와 환경 문제가 사회의 관심 문제로 대두되면서, 에너지를 창출하는 연소에 있어 연료의 효율과 배기가스 절감에 관한 연구는 끊임없이 진행되어 왔다. 이에 세계 각국의 연구소, 학교, 관계기관들은 더 높은 효율과 낮은 배기배출물을 충족하기 위한 개발에 총력을 기울이고 있다. 이러한 연구 중에 버너의 형상이 부분 예혼합 가정용 가스버너에서 배기가스에 영향을 미치는 요소 중에 하나라는 것이 밝혀졌고, 부분적으로 이에 대한 실험이 진행되어왔다.⁽²⁾ 버너 형상 설계에 있어서의 주요 목적은 적절한 연료와 공기의 공급, 점화와 화염 조절의 용이함, 화염의 형상과 화염 구조의 안정성이라⁽⁶⁾ 밝히고 있으며, 이러한 목적을 이루기 위해서는 버너에서의 형상과 작동에 대한 이해가 필수적이다. 그래서 R. Junus 등은 가정용 가스버너에서의 배기가스에 미치는 형상 요소들의 영향에 대하여 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 포트 둘레에 대한 면적비, 슬롯 사이 간격이나 포트 모양이 배기가스에 많은 영향을 미친다고 보고하였고 슬릿형 슬롯(slot type slot)이 원형 슬롯(hole type slot)보다 적은 양의 배기가스를 배출한다고 하였다.⁽³⁾

Erik C 등은 파이프 내 찢어진(slotted) 부분으로 분출되는 속도의 분포와 유동 모양을 조사하

였다. 제트 간의 혼합은 예리한 코너가 있는 오리피스(orifice)에서 더욱 활발하며, 이로 인해 사각 모양의 오리피스에 분출되는 유체 유동의 단면적은 원형 모양에 가까운 형태를 가진다고 하였다.⁽¹⁸⁾

A.A. Mostafa 등은 세 개의 사각 모양의 제트에서 나오는 유체의 난류 구조에 대해 실험적인 연구와 수치적인 연구를 동시에 수행했다. 제트가 분출되는 부분의 폭과 제트가 분출되는 방향의 거리비로 합체점(merging point)이 일어나는 시점을 설명하고 제트의 형상과 제트 사이의 간격이 제트간의 상호 유동에 중요함을 설명했다.⁽¹⁹⁾

H.R.N. Jones는 화염의 안정성이 버너의 형상뿐만 아니라 일차공기(primary aeration)와 공급 열량에 의해서도 크게 영향을 받는다고 밝혔으며, 이를 연소 다이어그램에서 공급 열량에 대한 일차공기로서 안정성의 한계를 보여주었다.⁽¹⁾

Stubington⁽⁶⁾ 등은 uni-burner를 통한 실험을 통하여 가정용 가스버너에서 공급되어지는 열량이 많아질수록 질소산화물은 많이 배출되었지만, 일산화질소에서 이산화질소로의 화학변화는 오히려 적은 양의 열량 공급 시 더 많이 발생한다고 하였으며, 그러한 현상은 이 조건에서의 탄화수소와 일산화탄소가 일산화질소에서 이산화질소로의 변화를 촉진시키기 때문이라고 하였다.

가정용 가스버너에서의 구체적인 규제치는 질소산화물의 경우 아직 제시되어 있지 않지만, 일산화탄소는 다른 나라의 경우 오래전부터 규제를 해오고 있다. 한 예로 호주의 가스협회(AGA; Australian Gas Association)에서는 CO/CO₂의 비가 0.01보다 작아야한다는 규제를 적용하고 있다.⁽⁴⁾

앞서 언급한 것과 같이, 가정용 가스오븐레인지에 사용되는 버너의 설계에 있어 추구되는 궁극적인 목표는 고효율, 배기가스 배출 절감 및 안정성 확보가 될 것이다. 이런 목표를 위해서 버너의 최적화된 설계를 위해서는 어떤 요소가 버너의 성능에 영향을 미치는지에 대한 연구가 선행되어야 한다.

이에 따라 본 연구의 목적은 시중에 판매되는 가스오븐레인지의 버너 형상을 기준으로 버너 슬롯의 형상, 슬롯 사이의 간격, 슬롯 배열 변화를 나타낼 수 있는 실험용 버너를 제작하여 형상 요소의 변화에 따른 연소 특성과 배기배출물과 운

전영역을 살펴 보고 포트에 따른 화염 간섭이 이들에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하여 가스오븐레인지의 버너를 위한 다중 슬롯 버너의 설계에 있어 기초 자료를 마련하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험용 버너 (Experimental burner)

본 연구를 수행하기 위한 실제 가스오븐레인지에서 사용되는 오븐버너와 브로일버너의 형상을 변형시켜 포트를 교체할 수 있는 방식으로 제작한 실험용 버너를 사용하였다.

Fig. 1은 제작된 버너 형상을 나타내고 Fig. 2는 본 실험에 사용된 포트의 모든 종류를 나타내고 있다. 이 포트들이 Fig. 1(a)에 보이는 버너 상부에 결합되면서 형상 요소에 따른 다중 제트 버너의 연소특성을 살펴보았다.

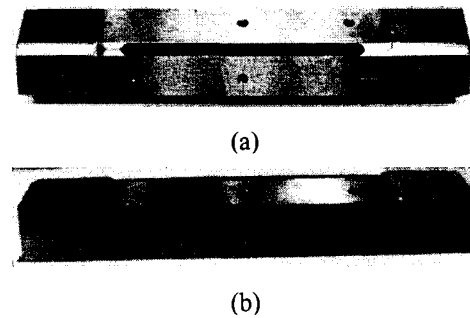


Fig. 1 Photographs of experimental burner (a) Front view (b) Side view



Fig. 2 Photographs of the ports

본 실험에 사용된 포트는 원형모양의 슬롯 5개, 사각모양의 슬롯 5개, 원형과 사각모양이 혼합된 슬롯 5개로 이루어진다. 각 각의 모양에 대해 슬롯 사이의 간격(slot-to-slot spacing)을 다르게 하여 특성을 파악하였고 혼합기체가 분출되는 측면적은 동일시하였다.

Table 1은 슬롯 사이의 간격과 유효 직경(effective diameter)을 이용하여 본 연구에 사용된 포트의 조건을 나타내었다.

현재 상용중인 가스오븐레인지에서 연료가 공급되는 방식은 노즐로부터 나오는 가스의 높은 분사속도와 주위 공기사이의 속도 차에 의하여 주위 공기가 빨려 들어가는 경우의 부분 예혼합 성격을 띠지만, 이와 같은 경우에 있어서는 당량비의 조절이 힘들므로 이를 용이케 하기 위하여 본 실험에서는 예혼합 챔버를 만들어 사용하였다. 예혼합 챔버에서는 공기와 가스의 혼합이 보다 잘 이루어지게 하기위해서 가스를 양쪽으로 공급하고 공기를 챔버의 접선방향으로 공급하였다.

공기와 연료의 유량을 조절하기 위해서 MFC(mass flow controller, LOKAS사) 장치를 사용하였다. 연소기에 공급되는 공기는 압축기를 사용하여 45m의 고압호스를 통하여 연소기의 예혼합 챔버로 공급되어진다. 고압호스 사이에 실리카겔(silicagel)을 사용하여 공기의 수분을 제거하였다.

Table 1 Sort of port type

| Slot type | S/De | Remarks |
|----------------|------------|-----------------------------|
| Hole | 2.2 - 3.15 | Total exit area is constant |
| Mix(Hole+Slit) | 2 - 2.42 | |
| Slit | 1.7 - 2.36 | |

Table 2 Experimental condition

| Parameters | Experimental condition |
|------------------------------|----------------------------|
| Fuel | CH ₄ |
| Equivalence ratio [ϕ] | 2 |
| S / De | 1.7 - 3.15 |
| Port type | Hole, Slit, Mix(Hole+Slit) |
| Fuel supplying rate [slpm] | 0.4, 0.8, 1.2 |

연료는 분석의 용이함을 위하여 순도 99.9%의 메탄을 사용하였고 배기가스를 포집하기 위하여 ANSI 규격에 따라 제작한 후드를 사용하여 가스 분석기를 통해 배기배출물을 측정하였다.

Table 2는 실험용 버너를 이용해 실험한 조건을 보여주고 있으며 Fig. 3은 전체 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 연구 결과의 이해를 돕기 위해 실험을 위한 포트들에 대한 명칭의 정의를 Fig. 4와 같이 정의했다. 버너의 상부에 결합되어 교체되는 부분을 포트라 명하였고 포트 안에 원과 사각 모양으로 혼합 기체가 분출되는 부분을 슬롯(slot), 원 모양을 Hole, 사각 모양을 Slit이라 정의했다. 그리고 슬롯의 중심과 중심 사이의 거리를 Spacing이라 했다. 그리하여 Hole만으로 이루어진 포트, Slit으로만 이루어진 포트, 그리고 Hole과 Slit이 혼합되어 있는 포트(본 연구에서 Mix포트라 명함) 이와 같이 3가지의 형태의 포트로 크게 나눌 수 있다. 앞에서 언급한 실험 장치를 이용해 안전 운전 영역, 배기배출물을 측정하고 상용프로그램인 Fluent를 이용하여 운전 영역 평가에 대한 근거를 제시하였다.

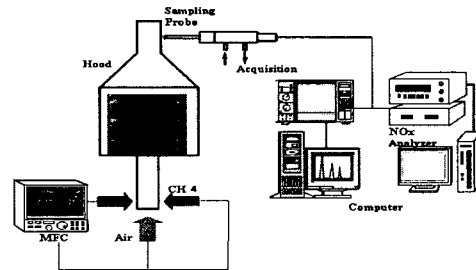


Fig 3 Schematic diagram of experimental setup

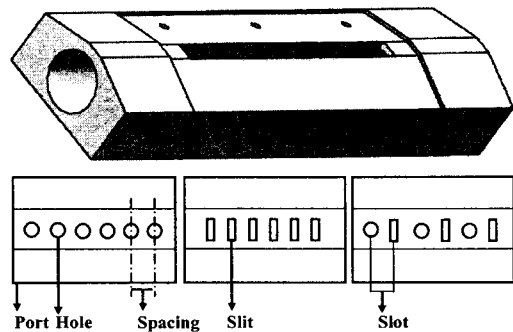
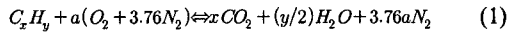


Fig. 4 Definition of the experimental port

2.2 실험 방법

2.2.1 당량비 제어

당량비를 결정하는 이론 화학 평형식과 분자량, 온도에 따른 밀도, 점성계수의 변화 등을 살펴 적절한 당량비를 구한다. 탄화 수소계 연료의 이론 화학 평형식은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾



여기서, a는 $a = x + y/4$ 와 같은 관계를 가진다. 위의 식에서 평형식을 세울 수 있고, 이에 따라 생성물과 반응 공기의 몰(mole)수가 주어진다. 본 연구에 사용되어진 가스는 메탄으로 그 조성은 CH₄ 99.9%이고, 고위발열량은 55260kJ/kg이다. 위의 관계로 a와 x, y는 x=1, y=4, a=2임을 알 수 있다. 또한 공기는 평균적으로 산소 1몰과 질소 3.76몰로 이루어져 있기 때문에 메탄 1몰에 대한 공기의 필요 몰수는 2×4.76인 9.52로 나타낼 수 있다.

이론 공연비(Stoichiometric air-fuel ratio)의 정의는 이론적으로 모두 연소할 수 있는 공기와 연료의 질량비로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (2)$$

여기서 공기와 연료의 질량은 각각 몰수와 원자량(MW: Molecular Weight)의 곱으로 나타낼 수 있다. 당량비란 실제 공연비와 이론 공연비의 비로 정의되며, 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (3)$$

여기서 $\phi < 1$ 일 경우는 이론 혼합비보다 실제로 공기가 많이 포함된 경우로 "희박(lean)" 이라 하고, $\phi > 1$ 일 경우는 이론 혼합비보다 실제로 공기가 적게 포함된 경우로 "과농(rich)" 이라 한다. 당량비는 연소속도, 화염 안정성, 배기배출물 등에 직접적으로 영향을 미치는 요소로써 연소 현상을 파악 할 수 있는 가장 중요한 인자이다.

위에서 이론적으로 당량비에 따른 공기와 가스의 유량을 구하여 안전 운전 영역을 평가하기 위하여 MFC를 이용하여 공기와 가스의 양을 조절하였다.

2.2.2 배기배출물 측정

배기가스 중의 NO_x 농도와 CO의 농도를 측정하기 위해서 A&D사의 A&D 9000 series gas analyze system을 이용하여 배기가스 분석을 수행

하였다. 배기가스를 포집하기 위하여 후드를 ANSI 규격에 따라 제작하였으며, 후드의 상단에 샘플링 프루브를 꽂았다. 스테인리스 샘플링 프루브는 프루브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다. 본 실험에서 가스 분석기는 5분의 안정화 시간을 통하여 얻어진 배기가스를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 운전 영역(operating range)

다른 실험에 앞서 우선적으로 수행되어야 하는 것은 모든 포트에 대한 운전 영역 평가이다. 운전 영역은 기본적으로 휘염이나 부상화염이 발생하지 않는 안정한 영역을 칭하며, 본 실험에서는 이를 확인하기 위하여 각 포트에 대해 공급 열량을 변화시켜가면서 휘염과 부상화염이 발생하기 시작하는 당량비를 측정하여 과잉 산소비로 나타내었다. 휘염이 상대적으로 농후한 당량비에서 발생하고, 부상화염이 상대적으로 희박한 당량비에서 발생할수록 버너의 안전 운전 영역은 넓어져서 안정한 화염을 구현할 수 있는 최소 연료의 유량에 대한 최대 연료의 유량비인 전환비(turn-down ratio)가 커지게 된다. 휘염한계(yellow tipping limit)는 연료를 고정시킨 상태에서 공기의 양을 줄여가면서 포트 둘레의 모든 화염들의 끝에서 휘염 선단이 발생하는 시점을 말하며, 부상화염한계(lift-flame limit)는 연료를 고정시킨 상태에서 공기의 양을 늘여가면서 포트 둘레의 화염 중 어느 하나라도 포트에서 불려져 나가면서 화염의 부상이 발생하는 시점이다.^(4,15) 본 연구에서는 전체 화염 중 3개의 슬롯에서 화염이 부상하기 시작하는 시점을 부상화염이 발생하는 시점이라 정하였고 휘염의 경우 각 각의 슬롯에서 분출되는 화염이 하나로 합쳐져 그 끝단에서 황염이 나타날 때를 휘염이 발생하는 시점으로 선택하였다. 연료의 유량을 0.4[slpm], 0.8[slpm], 1.2[slpm]로 변화하면서 모든 포트에 대해 안전 운전 영역을 평가하였다.

3.1.1 슬롯 사이의 간격 변화에 따른 운전영역

Fig. 5는 Slit형태의 포트에서 S/De에 따른 부상화염 한계와 휘염 선단 한계를 보여 주고 있다. 유효 직경은 동일한 상태에서 슬롯 사이의 간격

이 작아짐에 따라, 즉 S/D_e 수가 작아 질 때, 더욱 희박(lean)한 영역에서도 부상 화염이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 그러한 조건에서 상대적으로 농후(rich)하지 않은 영역에서 휘염이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 슬롯 사이의 거리가 가까워질수록 각 각의 슬롯에서 분출되는 화염 간의 상호작용이 활발하게 일어나고 이로 인한 보염 효과가 강해지기 때문이다. 반면 휘염 발생 측면에 있어서는 슬롯 사이의 간격이 작아지면서 화염 사이에서 화염이 확보할 수 있는 공기의 양이 작아지고 이로 인해 휘염이 희박한 영역에서 발생하는 것을 확인할 수 있다 또한 유량이 증가함에 따라 전체적인 혼합 기체의 속도 증가로 인해 부상 화염 시점이 빨라져 운전 영역은 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 유량 증가로 인한 포트의 혼합 기체 출구부의 속도 증가로 인하여 발생하는 것으로 사료된다. 위의 결과는 다른 포트, Hole 형태의 포트와 Mix 형태의 포트에서도 같은 결과를 나타내었다.

위의 결과를 통해 슬롯 사이의 간격 변화와 유량에 따라 부상화염 시점과 휘염 발생 시점이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 부상 화염의 경우, 슬롯 사이 간격과 유량의 변화에 따라 많은 영향을 받았으나 휘염의 경우 그 영향이 다소 미비함을 알 수 있었다.

3.1.2 슬롯 형상에 따른 운전영역

Fig. 6은 슬롯 모양에 따른 운전 영역을 나타내고 있다. 모든 포트에서 슬롯 사이의 거리는 동일하다. 그래프 상에서 S/D_e 수가 적은 것이 Slit 형상 포트이고 차례로 Mix 형상 포트, Hole 형상 포트 순이다. 결과에서 보는 바와 같이, Slit 형태 포트가 다른 두 포트에 비해 넓은 운전 영역을 확보하는 것을 볼 수 있다. Slit 포트가 다른 두 포트보다 넓은 운전 영역을 확보할 수 있는 이유는 포트로부터 분출되는 혼합기체의 유동으로 확인할 수 있다. 1998년 Erik C. Panzer 등의 논문에서 파이프 관을 따라 찢어진 부분으로 분출되는 혼합 기체의 유동은 분출되는 면의 형상이 사각일 때, 혼합기체가 분출된 후 원의 형태의 유동을 가진다고 하였다. 이런 결과는 슬롯 사이의 간격이 같다고 하였을 때, Slit 형태의 포트가 다른 두 포트보다 실제적으로 보다 가까운 간격을 가지는 것과 같은 결과를 가져 온다고 할 수 있

다. 이로 인하여 Slit 포트의 화염의 상호 작용이 다른 두 포트보다 활발하며 부상 화염이 보다 희박한 영역에서 발생한다.

Fig. 7은 전체 슬릿에서 S/D_e 에 따른 과잉 산소비를 나타내고 있다. S/D_e 수가 커짐에 따라 부상 화염은 보다 농후한 영역에서 발생하며, S/D_e 수와 부상화염 한계를 과잉 산소비 사이에 상관 관계가 있음을 보여준다. 휘염의 발생에 있어서 S/D_e 수와 휘염 발생 한계 시점관에 관계를 나타내고 있으나, 부상화염에 비해 그다지 큰 경향은 나타나지 않았다.

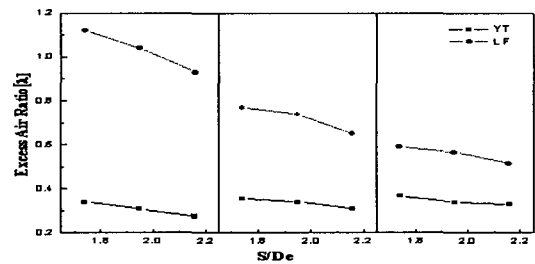


Fig. 5 Lift-flame and yellow-tip limit of the experimental burner by the change of spacing between slots in the Slit type port

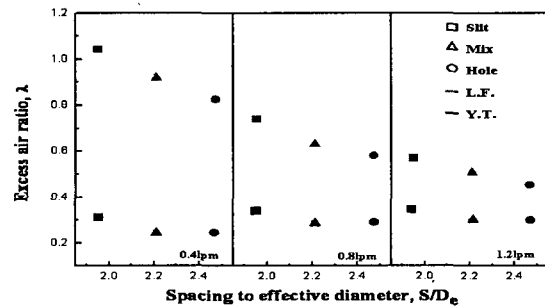


Fig. 6 Lift-flame and yellow-tip limit of the experimental burner by the change of slot shape

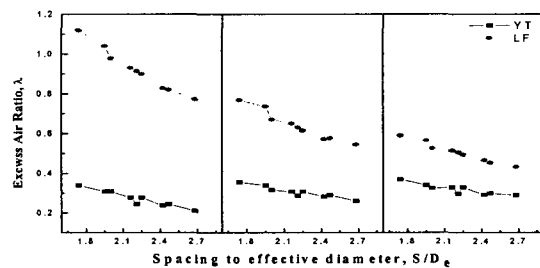


Fig. 7 Lift-flame and yellow-tip limit by the change of S/D_e number

3.2 배기배출물

본 실험에서의 조건은 연료를 0.4 [slpm], 0.8 [slpm], 1.2 [slpm]으로 변화하고 당량비는 2로 고정한 상태에서 모든 슬롯에 대하여 배기배출물-일산화탄소(CO)와 질소산화물(NOx)을 측정하였다.

3.2.1 슬롯사이의 간격 변화에 따른 일산화탄소 농도 분포

Fig. 8은 슬롯 간격 변화에 따른 일산화탄소 농도 분포를 나타내고 있다. (a)부터 (c)순으로 Slit 포트, Hole 포트, Mix 포트의 CO 농도 분포를 나타낸다.

Slit 형태의 포트와 Hole 형태의 포트에서는 간격이 증가함에 따라 일산화탄소의 배출량은 증가함을 나타내었다. 이는 혼합 기체가 분출되는 슬롯의 간격이 멀어지면서 화염 간의 간섭이 줄어들고 이로 인해 화염이 불안정해지기 쉽기 때문일 것으로 생각된다. 이것을 배출량 관점에서 살펴보면, Slit 형태의 포트가 간격이 증가하는 동안 그 배출량의 증가가 Hole 형태 포트보다 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 유체가 유출되는 부분이 Hole 형태와 같이 부드러운 면을 가질 때, 화염이 순간적으로 분출 슬롯으로부터 부상하는 경우가 발생하기 쉽기 때문이다.⁽²⁾ 이런 요인이 화염을 더욱 불안정하게 만들고 일산화탄소 배출을 증가시킨다고 할 수 있다.

반면 Fig. 8의 (c)Mix형 포트에서 볼 수 있듯이, 일산화탄소 배출량은 다른 두 포트와는 다르게 대체로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 슬롯 간의 간격이 넓어짐에 따라 각 화염이 취할 수 있는 공기량이 증가하므로 완전연소 할 수 있는 확률이 많아 졌다고 볼 수 있다. 위의 두 슬롯과 상반된 결과를 보이는 것은 비록 실험 조건이 포트의 간격을 변화시킨 것이라 해도 포트의 형상 변화가 포트의 간격 외에도 다른 변수로 작용하고 있음을 보여주고 있으며, 형상에 따라 간격의 변화가 미치는 영향이 다르다는 것을 나타내고 있다.

3.2.2 슬롯 사이의 간격 변화에 따른 질소산화물의 농도 분포

Fig. 9는 슬롯 간격 변화에 따른 질소 산화물의 농도 분포를 나타내고 있다. (a)부터 (c)순으로

Slit 형태와 Mix 형태에서 포트에서는 슬롯 사이의 간격이 넓어짐에 따라, 질소산화물의 배출량이 일정하거나 약간 감소하는 것을 보여주고 있다. 이는 선행연구⁽²⁾에서 사각 형태의 포트는 간격에 영향을 거의 받지 않고 약간 감소하는 것을 보이거나 실험 오차 범위에 든다는 연구 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

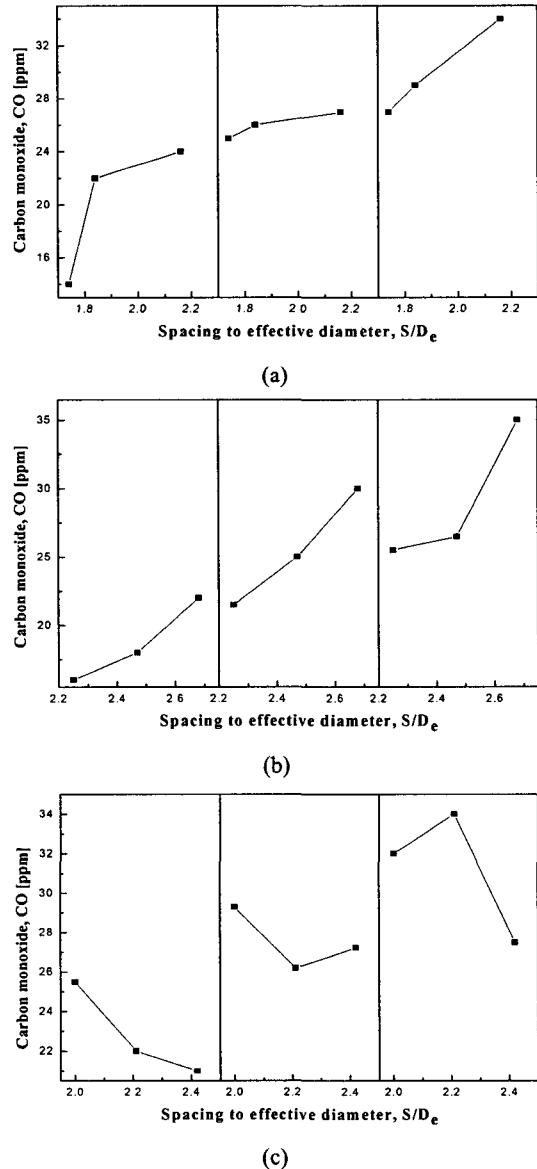


Fig. 8 CO concentrations by the change of spacing between slots (a) Slit (b) Hole, and (c) Mix

이런 원인은 슬릿 간의 간격이 좁을 시에 화염 간의 간섭으로 인하여 주위 화염으로 열을 전달하여 상대적으로 온도가 높아지면서 열적 메카니즘에 의하여 더 많은 질소산화물을 생성하는 것으로 사료된다. 반면, Hole 형태의 포트의 경우, 그 배출량이 증가하였다. 또한 공급 열량이 증가함에 따라 배출되는 질소산화물의 양은 증가함을 알 수 있다. 이는 증가하는 공급 열량에 의한 상대적으로 큰 화염으로부터 더 많은 질소산화물이 발생되기 때문으로 사료된다.

3.3 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 다중 분류 화염 유동 분석

다중 분류 화염 내에서의 유동 특성을 파악하기 위해 상용 유동 해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 슬릿 사이의 간격, 슬릿 형상 변화에 따른 특징을 살펴보고 운전 영역에서 나왔던 결과와 비교해 보았다.

유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존 법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분 방정식이다. 그리고 운동량 해석을 위해 난류 유동 해석을 위한 방정식을 포함하였다.

다중 슬릿 버너에서 분출되는 예혼합 기체들은 분류간의 간섭으로 인해 서로 혼합되어 하나의 분류처럼 나타나는 현상이 보인다. 다중 슬릿 버너의 포트들을 대표적인 이중자유제트의 형태 중 하나인 언벨틸레이티드 제트(unventilated jets) 유동으로 가정해 보면, 각 포트마다 가지는 합체점(merging point, MP)과 결합점(combined point, CP)이 다르게 나타나게 된다. 혼합기체가 슬롯을 통해 분출되면서 제트와 제트 사이에 중심선상에서 정체영역이 형성된다. 정체 영역 내부에 정체점인 합체점이 존재하고, 속도는 영이다. 결합점은 대칭면을 따라 최대의 속도가 나타나는 지점을 말하며, 또한 유동직각 방향으로 유동을 나누었을 때 대칭면에서 최고 속도가 나타나는 지점이기도 하다. 이 때 합체점과 결합점 사이의 영역을 합체영역이라 부르며 제트간의 상호간섭 효과가 최대이기 때문에 혼합특성이 강하게 나타난다. 결합점 이후의 영역은 결합영역이라 부르며, 여러 개의 유동이 하나의 유동 특성을 띄는 영역이다.⁽¹⁹⁾ 본 연구에서는 시뮬레이션의 결과로 합체점(MP)과 결합점(CP)을 파악하여 포트 형상 변

화에 따른 유동 변화를 비교해 보고 실험으로 구했던 운전 안전 영역에 대한 의미를 부여 했다. Fig.9 에서 볼 수 있듯 MP와 CP 사이의 구간은 두개의 제트 기동이 하나로 합쳐지는 구간으로 표에서 x축 방향으로 MP와 CP의 거리가 줄어드는 것은 제트유동의 혼합이 활발히 일어나기 때문이다.

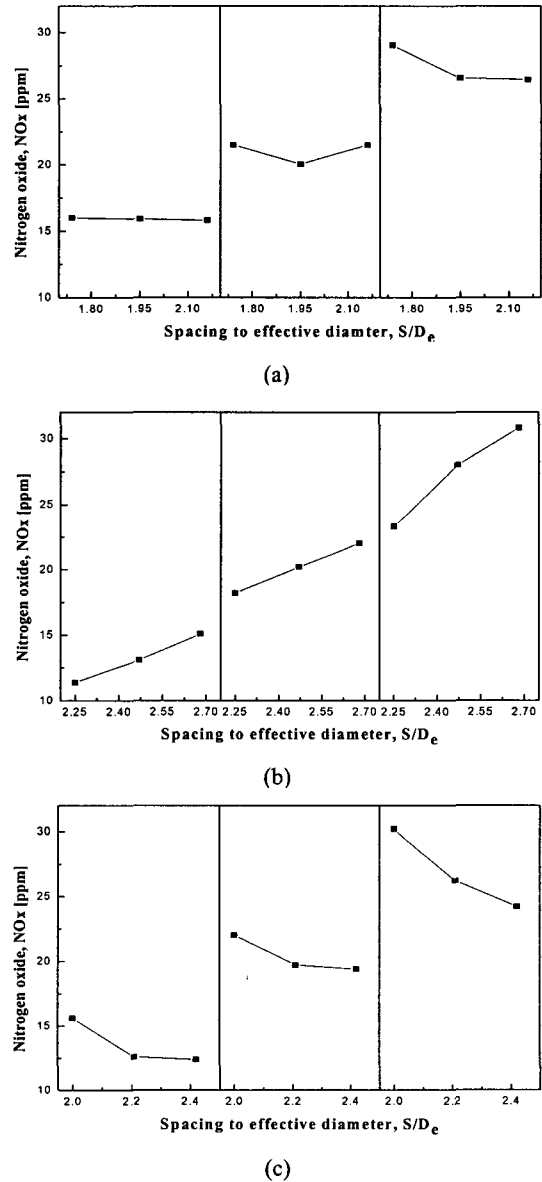


Fig. 9 NOx concentrations by the change of the spacing between slots (a)Slit, (b) Hole, and (c) Mix

실제 실험에 사용된 버너를 모델링하여 Slit 형태의 포트의 크기와 슬롯 사이의 간격의 변화에 따른 유동 특성을 파악했고 슬롯 형상 변화에 따른 유동을 파악하기 위해 Hole 형태와 Mix 형태의 포트를 모델링하였다. 해석을 위해 짜여진 격자는 약 35만개이며, 해석 시간 절약을 위해 symmetry를 이용해 geometry를 형성하였다. 입구 부분에서 연료 유량은 0.8[slpm], 당량비 2의 조건으로 실험을 수행하였다.

시뮬레이션 결과에서 버너 후류로부터 혼합 기체가 분출되는 방향으로 1-D 속도를 분석하여 슬롯 사이에서 유동의 간섭으로 인해 역순환이 일어나는 지점, 유동의 정체 영역이 형성되는 합체점을 파악하였고, 각각의 화염이 하나의 화염으로 나타나기 시작하는 결합점을 분석하였다.

Fig. 11은 Slit 형태의 포트에서 슬롯 사이의 간격 변화에 따른 합체점과 결합점을 보여 준다. 슬롯 간격이 멀어짐에 따라 합체점과 결합점이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 합체점 이후 두 제트간에 활발한 혼합이 이루어짐을 미루어 볼 때, 간격이 멀어질수록 유동 간의 간섭이 적다는 것을 알 수 있다. 또한 결합점이 낮게 나타나므로 간격이 좁은 곳에서 보다 희박한 영역에서 연소가 이루어 질 수 있으나, 덜 농후한 영역에서 휘염이 발생할 수 있다는 것을 짐작할 수 있다. 표에서 S/D_e 가 가장 작은 것은 실제로 사각형 slit인데 원형과 혼합형 slit에 비해 유속이 빠르고 spacing이 작기 때문에 합체점이 빨리 형성되고 혼합작용이 강하기 때문에 결합점도 빨리 형성되어 합체점과 결합점 사이의 구간이 가장 작음을 볼 수 있다.

Fig. 12는 Slit, Hole, Mix 형태의 포트에 대한 MP와 CP를 비교한 그래프이다. Slit 형태의 포트가 다른 두 포트에 비해 MP와 CP가 빨리 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 언급한 것과 같이 사각 형태 slit이 유속이 빠르고, 상대적으로 슬롯 사이의 간격인 spacing이 작기 때문인 것으로 사료된다. 이런 사각형태 slit의 유동특성으로 인해 앞서 운전 안정영역이 넓고, 배기배출물 특성이 좋다고 유추해 볼 수 있다.

이와 같이 모든 시뮬레이션 결과는 실험으로 평가한 운전 안전 영역과 아주 잘 일치함을 보이고 있다. 이런 결과를 통해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각각의 포트 조건의 유동 특성에 대한 경향을 분석할 수 있음을 알 수 있다.

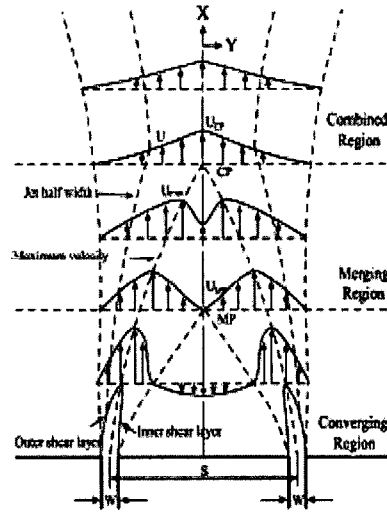


Fig. 10 Unventilated parallel jets

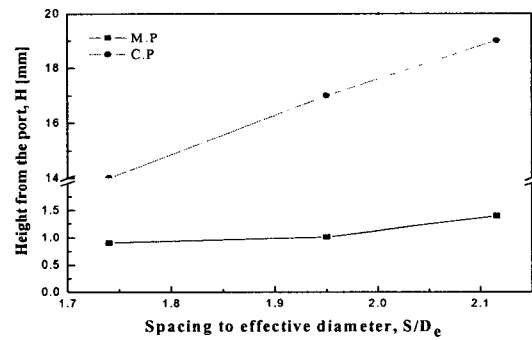


Fig. 11 M.P and C.P by the change of the spacing between slots

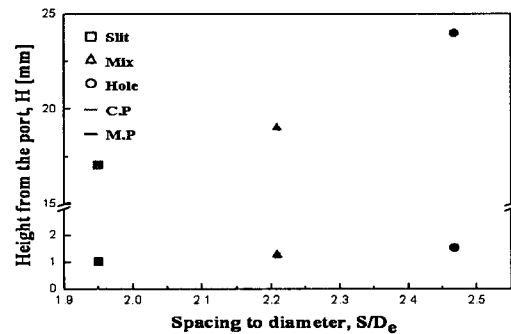


Fig. 12 M.P and C.P by the change of the slot shape

4. 결 론

본 연구에서는 가스오븐레인지 버너에서 사용되는 오븐 버너와 브로일 버너의 형상 요소가 화염의 유동과 연소 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보았다. 슬롯 간의 간격과 슬롯 형상, 그 배열의 변화에 따라 안전 운전영역과 배기 배출물을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부상화염은 슬롯 간의 간격이 넓어짐에 따라 더욱 농후한 영역에서 발생하며 슬롯 사이의 간격과 유량에 의한 속도에 많은 영향을 받는다. 반면, 휘염의 경우 슬롯 간의 간격이 넓어짐에 따라 더욱 농후한 영역에서 발생하나, 차이는 미비하며 간격이나 유량보다는 화염이 취할 수 있는 공기량에 많은 영향을 받는다.

(2) 일산화탄소의 배출량 측면에서 볼 때, Slit 포트와 Hole 포트에서는 간격이 증가함에 따라 일산화탄소 배출량은 증가했으나 Mix 포트에서는 그 양이 감소하였다.

(3) 질소산화물의 배출량 측면에서 볼 때, 슬롯 사이의 간격이 넓어짐에 따라 Slit형 포트와 Mix형 포트에서는 질소산화물의 배출량이 일정하거나 약간 감소함을 보였다.

(4) 컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과, Slit형 포트에서 슬롯 사이의 간격이 넓어짐에 따라 합체점과 결합점이 늦게 형성되었다. 또한 Slit형 포트가 다른 두 포트에 비해 합체점과 결합점이 빨리 생성되었다.

후 기

본 연구는 “LG전자”와 “2단계 BK사업”의 지원 아래 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Jones, H. R. N., 1989, “The Application of Combustion Principle to Domestic Gas Burner Design,” *IBritish Gas/E&FN Spon*, London.
- (2) Junus, R., Stubington, J. F. and Sergeant, G. D., 1994, “The Effects of Design Factors on Emissions from Natural Gas Cooktop Burners,” *International*

Journal of Environmental Studies, Vol. 45, pp. 101~121.

- (3) Junus, R., Vierkant, J. E., Stubington, J. F., Sergeant, G. D. and Tas, I., 1998, “The Effects of the Design of the Cap of a Naturally Gas-Fired Cooktop Burner on Flame Stability,” *International Journal of Energy Research*, Vol. 22, pp. 175~184.
- (4) Stubington, J. F. and Zou, W., 2000, “Efficient Low-Emission Burners for Natural Gas Domestic Cooktops,” *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 73, pp. 35~42.
- (5) Stubington, J. F., Beashel, G., Murphy, T., Junus, R., Ashman, P. J. and Sergeant, G. D., 1994, “Emissions and Efficiency from Production Cooktop Burners Firing Natural Gas,” *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 67, pp. 143~155.
- (6) Yung-Chang Ko and Ta-Hui Lin, 2003, “Emissions and Efficiency of a Domestic Gas Stove Burning Natural Gases with Various Compositions,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 3001~3014.
- (7) Kwok, L. C., Leung, C. W. and Cheung, C. S., 2005, “Heat Transfer Characteristics of an Array of Impinging Pre-Mixed Slot Flame Jets,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1727~1738.
- (8) Dong, L. L., Leung, C. W. and Cheung, C. S., 2003, “Heat Transfer of a Row Three Butane/Air Flame Jets Impinging on a Flat Plate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 113~125.
- (9) Shuhn-Shyurng Hou and Yung-Chang Ko, 2004, “Effects of Heating Height on Flame Appearance, Temperature Field and Efficiency of an Impinging Laminar Jet Flame Used in Domestic Gas Stove,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1583~1595.
- (10) Mishra, D. P., 2004, “Emission Studies of Impinging Premixed Flames,” *Fuel*, Vol. 83, pp. 1743~1748.
- (11) Dupont, V., Pourkashanian, M., Williams, A. and Woolley, R., 1992, “The Reduction of NOx Formation in Natural Gas Burner Flames,” *Fuel*,

- Vol. 72, NO. 4, pp. 497~503.
- (12) Wei-Dong Hsieh and Ta-Hui Lin, 2005, "Methane Flame Stability in a Jet Impinging onto A Wall," *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 727~739.
- (13) Stephen R. Turns, 1996, "An Introduction to Combustion," McGraw-Hill Companies.
- (14) Sogo, S. and Hase, K., 1998, "Study of Blowoff at a Multiple Slit Burner," *Annual technical report digest*, Vol. 8.
- (15) Gaydon, A. G., 1974, "The Spectroscopy of Flames," *Chapman and Hall*, London.
- (16) Stubington, J. F., Sergeant, G., Junus, R., Beashel, G., Murphy, T., Ashman, P. and Tas, I., 1995, "Methodology for the Simultaneous Measurement of Emissions and Efficiency for Natural Gas-Fired Cooktop Burners," *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 48, pp. 117~133.
- (17) Sogo, S., 1999, "Study of Blowoff at a Multiple Slit Burner (Part 2)," *Annual Technical Report Digest*, Vol. 9
- (18) Erik C. Panzer and Demetri P. Telionis, 1998, "on the Spreading of Slotted Jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18, pp. 210~219.
- (19) Mostafa, A.A., Khalifa, M.M. and Shabana, E.A., 2000, "Experimental and Numerical Investigation of Multiple Rectangular Jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 21, pp. 171~178.
- (20) Charles S. McEnally, Umit O. Koylu, Lisa D. Pfefferle and Daniel E. Rosner, 1997, "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples," *Combustion and Flame*, Vol. 109, Issue 4, pp. 701~720.