

## 슬릿버너에서 형상변화가 연소특성 및 배기배출물에 미치는 영향

김태우\* · 조승완\* · 장영준\*\* · 전충환†

### The study of combustion characteristics and emissions with the variation of design factor on slit gas burner

Tae Woo Kim, Seung Wan Cho, Young June Chang and Chung Hwan Jeon

#### ABSTRACT

In this study, the combustion characteristics were investigated with the variation of design factors on multiple slit gas burner. The design factors consist of slit height, width, spacing, and inner length. The combustion characteristics were made analysis of the CO emission and NOx emission by using CO analyzer and NOx analyzer. The lower perimeter to area and the narrow spacing extends the lift-flame limit. The CO emission increases with the increasing perimeter to area ratio at the same condition. The NOx emission is found to be less significant with the port perimeter to area ratio. The flame interference might highly depend on the spacing and port perimeter to area ratio, and it also affects the burner performance.

**Key Words** : Multiple slit burner(다중슬릿버너), Flame interference(화염 간섭), Port perimeter to area ratio(포트둘레에 대한 면적비), Port spacing(포트간격), Inner length(내부 길이)

#### 기 호 설 명

$\Phi$  : 당량비(equivalence ratio)

P.T.A : 포트둘레에 대한 면적비  
(port perimeter to area ratio)

#### 1. 서 론

현재 다중슬릿가스버너(multiple slit gas burner)는 전 세계적으로 산업현장에서 뿐만 아니라 일반 가정에서도 널리 적용되고 있다. 따라서 국소적인 열점(hot spot)의 발생을 피하면서 열전달 향상과 동시에 저 배기배출물을 만족시킬 수 있는 슬릿의 배열과 형상에 대한 연구가 절실하다. 하지만 다중슬릿버너에 있어서 이에 대한

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소  
E-mail : [chjeon@pusan.ac.kr](mailto:chjeon@pusan.ac.kr)  
Tel : (051)510-3051 Fax : (051)582-9818  
\* 부산대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술 연구소

국, 내외적으로 연구 및 관련 자료는 극히 드문 실정이다.<sup>(7, 8)</sup> 특히 버너 형상 요소 중에서 슬릿의 간격(slit spacing)은 화염의 간섭에 직접적인 영향을 미치며 이는 버너의 성능에도 그대로 반영됨에도 불구하고 아직까지 실질적인 많은 연구가 이루어지지 않고 있다.

현재 가정용 가스버너의 대부분은 전형적인 부분 예혼합 분젠 버너 형태이다. 기본적으로 부분 예혼합 버너는 노즐로부터 분사되는 가스의 높은 분사속도와 주위 공기와의 속도차에 의하여 주위공기가 흡입되게 된다.<sup>(2)</sup>

최근 환경보호의 중요성에 대한 관심의 증가 때문에 가정용 가스버너의 사용에 따른 실내 공기 오염에 대한 관심도 더불어 증가하고 있다. 산업용 가스버너에 있어서 더 높은 효율의 요구와 엄격해지는 배기가스 기준에의 충족은 끊임없는 연소 연구와 개발을 부추겼다. 그래서 더 높은 연소효율과 낮은 배기가스를 충족시키기 위한 연구가 여러 나라의 연구소와 관련회사, 그리고 대학 등에서 진행되어 왔다.<sup>(1)</sup>

이러한 선행 연구 중에 버너의 형상이 배기가스에 영향을 미치는 요소 중의 하나라는 것이 밝혀졌고, 부분적으로 이에 대한 실험이 수행되었다.<sup>(1)</sup> 버너 형상 설계에 있어서의 주요목적은 (1) 적절한 연료와 공기의 공급 (2) 점화와 화염 조절의 용이함 (3) 화염의 형상과 화염 구조의 안정성이다.<sup>(4)</sup> 이러한 목적을 이루기 위해서는 버너에서의 형상과 작동에 대한 이해가 필수적이며, 그래서 Rosita Junus 등<sup>(1)</sup>은 슬릿 가스버너에서의 배기가스에 미치는 형상 요소들의 영향에 대하여 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 이들의 실험에서 사용한 형상 요소들은 캡 재질(cap material), 캡 모양(cap shape), 캡 치수(cap dimension), 캡 질량(cap mass), 캡 수명(cap age), 포트의 위치(location on cooktop), 받침대 높이(grate height), 포트 모양, 그리고 포트 슬릿 간격 등이다. 그들은 공급열량, 둘레에 대한 면적비(perimeter to area ratio), 포트 슬릿간격, 포트 크기, 포트 모양, 2차 공기(central secondary aeration), 화염 삽입(flame insert)이 배기가스에 많은 영향을 미친다고 보고하였고, 슬릿형 포트(slit port)가 원형포트(circular port)에 비해 배기 배출물이 좀 더 낮게 배출된다고 보고하였다.<sup>(1)</sup>

한편, H.R.N. Jones는 화염의 안정성이 버너의 형상뿐만 아니라 1차 공기(primary aeration)와 공급열량에 의하여 크게 영향을 받는다고 밝혔으며, 이를 연소 다이어그램에서 공급열량에 대한 1차 공기로서 안정성의 한계를 보여주었다.<sup>(2)</sup>

가스버너에 있어서의 화염 불안정성에 대한 대표적인 현상들은 부상화염(lift-flame), 역화(flashback), 휘염(yellow flame) 등이 있다. 부상

화염은 일정양의 이상의 공기가 공급되었을 때 발생하며, 역화는 버너포트로 화염이 전파되는 것으로 정의하며 이는 주로 화염 속도가 가스와 공기의 혼합기의 속도보다 빠를 때 발생하게 된다. 또한 휘염은 가스의 열분해가 매연 입자를 생성하기 때문에 매우 적은 공기가 공급될 때 발생하게 된다.<sup>(3)</sup>

현재 가정용 가스버너에서 배기가스 중 주로 규제 대상이 되는 것은 일산화탄소(CO)이지만 최근에는 질소산화물(NOx), 특히 이산화질소(NO<sub>2</sub>)가 인체에 미치는 악영향이 보고되면서 이에 대한 관심도 증가되고 있다. NOx의 경우 아직은 전 세계적으로 구체적인 규제치가 제시되어 있지 않지만, CO는 다른 나라의 경우 그 규제치를 명시하고 있다. 한 예로 호주의 가스협회(AGA; Australian Gas Association)에서는 CO/CO<sub>2</sub>의 비가 0.01보다 작아야한다는 규제를 적용하고 있다.<sup>(5)</sup>

슬릿 가스버너에서 생성되는 질소산화물의 주요 메커니즘은 프롬프트(prompt)와 열적(thermal) NOx 메커니즘이며, 특히 부분 예혼합화염에서는 프롬프트 메커니즘이 중요하게 여겨진다. 또한, 연소 불안정으로 인하여 발생하는 일산화탄소는 일산화질소에서 이산화질소로의 변환에 영향을 미치는 것으로 선행연구에서 관찰되었다.<sup>(6)</sup>

이상과 같은 맥락에서 본 연구의 목적은 버너의 형상 변화, 특히 포트슬릿의 간격과 슬릿의 크기, 그리고 내부길이에 따른 화염의 간섭 등이 배기가스와 화염의 안정성에 미치는 영향과 상호 관련성에 대해 규명하는 것이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 버너의 개략도는 Fig. 1과 같다. 먼저 버너는 당량비의 조절을 쉽게 하기 위해 예혼합 챔버와 질량유량계를 사용하였다. 예혼합 챔버의 출구 노즐(Nozzle)의 직경은 10 mm이며, 최종 출구부인 버너의 슬릿부에서 슬릿의 전체 개수는 5개이다.

실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 2와 같으며, CO와 NOx의 배기가스는 후드의 상단부에 장착되어있는 샘플링 프루브(Sampling probe)로 배기가스를 샘플링하여 각각 CO 분석기와 NOx 분석기를 통해 측정된다. 버너 바닥면으로부터 후드 하단부까지의 높이는 미국표준규격(ANSI; American National Standards Institute, ANSI)에 따라서 화염이 후드에 의해 영향을 받지 않는 최소한의 높이로 선정하였다.

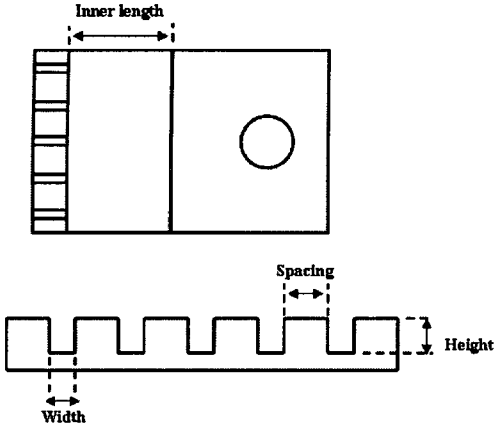


Fig. 1 Schematic diagram of burner

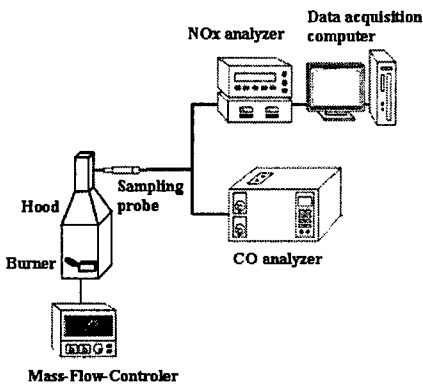


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

2.2 실험 조건

실험에 사용된 연료는 산업 현장 및 가정에서 사용되어지고 있는 액화천연가스(LNG)의 조성 대부분을 차지하는 주성분인 메탄(99.95% CH<sub>4</sub>)을 사용하였다. 또한 연료량은 질량유량계(MFC)로, 공기량은 층류 유량계(LFM)로써 제어하였다.

부상화염 한계(lift-flame limit)는 연료량을 1.0[slpm]으로 고정한 상태에서 공기량을 서서히 증가시키면서, 휘염 한계(yellow tip limit)는 연료량을 1.0[slpm]으로 고정한 상태에서 공기량을 서서히 감소시키면서 측정하였다.

슬릿의 크기와 간격의 영향을 알아보기 위한 실험은 모두 연료량을 1.0[slpm]로 고정한 상태에서 27개의 모든 슬릿의 경우에 있어 안정한 당량비의 영역에서 수행되었다. Table 1에 상세한 슬릿의 실험조건을 나타내었다.

Table 1 Slit conditions

Parameter	Range
P.T.A	1.0 ~ 1.83
Width	1.5, 2, 3
Height	4, 5, 6
Spacing	6, 8, 10
Inner length	10, 15, 20

2.3 실험 변수의 정의

포트 둘레에 대한 면적비(P.T.A)는 슬릿의 높이와 폭으로 계산한 둘레에 대한 넓이의 비(ratio)이며, 슬릿 간격은 슬릿과 슬릿사이의 간격을 의미한다.

부상화염 한계는 연료량을 고정한 상태에서 공기량을 증가시키면서 5개의 슬릿 중 하나라도 부상화염이 발생하는 시점으로 선정하였으며, 휘염 한계는 연료량을 고정한 상태에서 공기량을 줄이면서 주요 측정대상인 가운데 3개의 슬릿에서의 화염에서 휘염이 모두 발생하는 시점으로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 포트둘레에 대한 면적비와 안정 영역(stable range)

Fig. 3은 포트둘레에 대한 면적비의 증가에 따른 부상화염 한계를 나타내고 있다. 모든 포트간격에 있어서 포트둘레에 대한 면적비가 증가할수록 부상화염이 높은 당량비 조건에서도 발생함을 확인할 수가 있었다. 특히 동일한 폭을 가진 슬릿에서는 슬릿의 높이가 높아질수록 부상화염의 발생시점이 늦어지며, 동일한 높이를 가진 슬릿에서는 슬릿의 폭이 증가할수록 부상화염의 발생이 지연됨을 확인할 수가 있었다. 따라서 슬릿의 폭이나 높이 중 하나가 결정되었을 경우, 나머지 하나의 변수는 그 길이가 길어질수록 넓은 화염의 안정 영역을 확보할 수 있다는 것을 알 수가 있었다. 이는 화염이 접촉할 수 있는 면적이 보염 역할을 해주기 때문인 것으로 사료된다.

또한 동일한 포트둘레에 대한 면적비에서는 대체적으로 슬릿 간격이 클수록 부상화염이 쉽게 발생함을 확인할 수가 있는데, 이는 슬릿의 간격

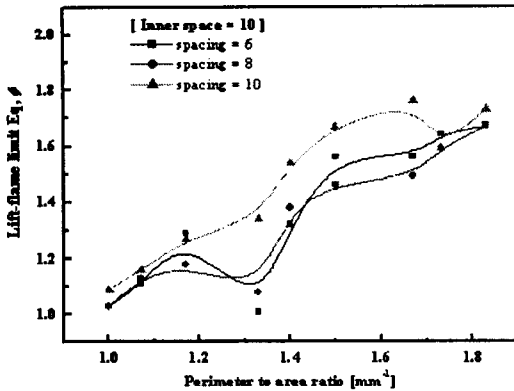


Fig. 3 Effect of perimeter area ratio on lift-flame limit

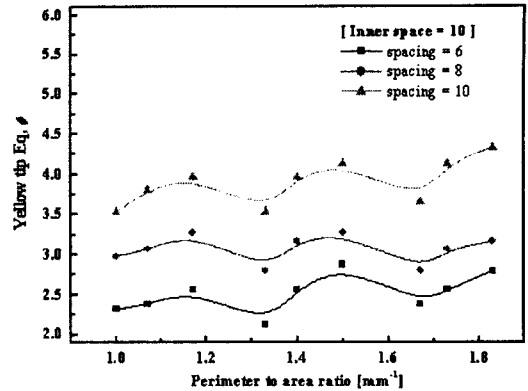
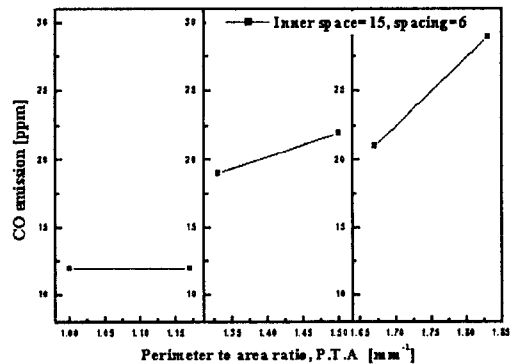


Fig. 4 Effect of perimeter area ratio on yellow tip limit

이 넓어짐에 따른 화염간의 간섭이 적어 보염 역할을 해주기가 힘들기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 내부길이가 증가할수록 동일한 조건에서 부상화염이 조금 더 낮은 당량비에서 발생하였으나 그 영향은 미미하였다.

Fig. 4는 포트둘레에 대한 면적비의 증가에 따른 휘염이 발생하는 당량비에 대한 영향을 나타내고 있다. 동일한 폭을 가진 슬릿에서는 슬릿의 높이가 높아질수록 휘염의 발생시점이 빨라지며, 동일한 높이를 가진 슬릿에서는 슬릿의 폭에 따라 일정한 경향을 보이지 않았고, 그 영향도 매우 작음을 알 수가 있다. 이로써 휘염발생 지연으로 인한 좀 더 넓은 안정영역의 확보를 위해서는 슬릿의 높이가 매우 중요한 요소임을 확인할 수가 있었다. 또한 동일한 포트둘레에 대한 면적비에서는 슬릿 간격이 클수록 휘염이 높은 당량비에서 발생함을 확인할 수가 있는데, 이는 슬릿의 간격이 넓어짐에 따른 화염간의 간섭이 적어지기 때문에 화염 주위의 공기가 화염을 안정화시키기 때문인 것으로 사료된다.

그림에서와 같이 슬릿의 간격이 넓어질수록 발생하는 CO의 양은 약간 줄어들음을 확인할 수가 있다. 이는 슬릿의 간격이 충분할 시에 화염간의 간섭이 적어져서 각 대상 화염이 공기와 충분한 접촉을 통하여 안정화되므로 불완전 연소로 인해 발생되어지는 CO의 양이 줄어드는 것으로 사료된다.

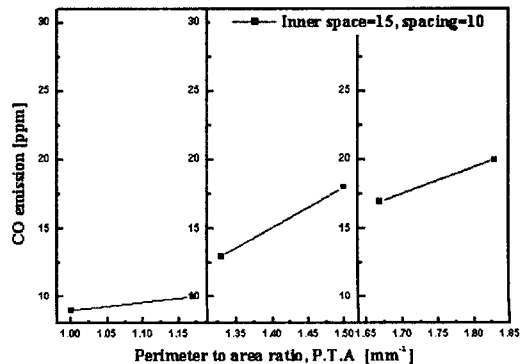


(a)

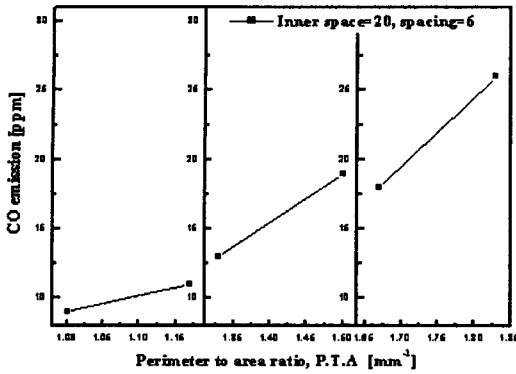
3.2 P.T.A와 CO 배기배출물

Fig. 5는 포트둘레에 대한 면적비의 증가에 따른 CO 배기가스에 대한 경향을 보여주고 있다. (a)-(c) 모두에서 슬릿의 폭을 고정한 상태에서 포트둘레에 대한 면적비가 증가할수록 방출되는 CO의 양이 많아짐을 확인할 수가 있다. 이는 결국 화염을 안정하게 만들어줄 수 있는 화염 접촉면이 적어짐에 따른 화염 불안정으로 인하여 CO가 많이 배출되는 것으로 사료된다.

(a)와 (b)의 비교를 통하여서는 슬릿간의 간격에 따른 CO의 발생량을 확인할 수가 있다.



(b)



(c)

Fig. 5 Effect of perimeter to area ratio on CO emission

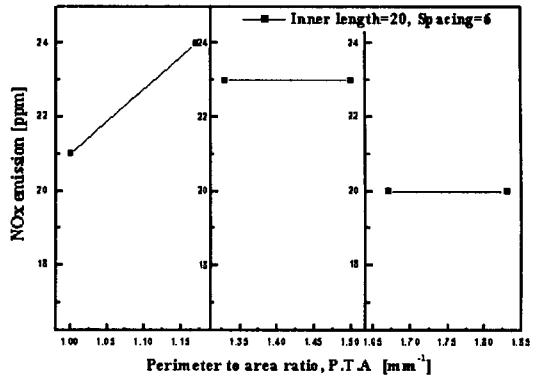
한편, (a)와 (c)의 비교를 통하여서는 내부길이에 의한 CO의 영향을 확인할 수가 있었다. 내부길이가 길어질수록 발생하는 CO의 양은 줄어드는 것을 확인할 수가 있는데, 이는 충분한 내부공간에 의하여 상대적으로 균일한 혼합기가 생성되어 안정한 화염을 구현하기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3 P.T.A 와 NOx 배기배출물

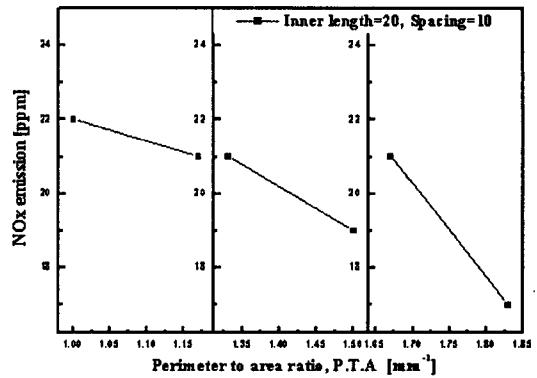
Fig. 6은 포트둘레에 대한 면적비의 증가에 따른 NOx 배기가스에 대한 경향을 보여주고 있다. (a)-(c)에서 슬릿의 폭을 고정된 상태에서 포트둘레에 대한 면적비가 증가할수록 발생하는 NOx의 양은 대체로 비슷하거나 감소하는 것을 확인할 수가 있으며, 이는 선행연구 결과<sup>(1)</sup>와도 잘 일치하였다.

(a)와 (b)의 비교를 통하여서는 동일한 내부길이 조건에서 슬릿간의 간격에 따른 NOx의 발생량을 확인할 수가 있는데 슬릿의 간격이 넓어질수록 발생하는 NOx의 양은 약간 줄어들음을 알 수가 있다. 이는 슬릿의 간격이 좁을 시에 화염간의 간섭으로 인하여 온도가 높아지면서 열적 메커니즘에 의하여 상대적으로 많은 NOx가 발생하는 것으로 사료된다.

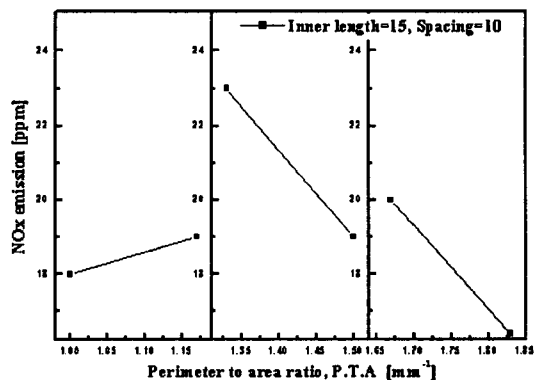
한편, (a)와 (c)의 비교를 통하여서는 내부길이에 의한 NOx의 영향을 확인할 수가 있다. 내부길이가 증가할수록 발생하는 NOx의 증가량은 미미한데, 이는 충분한 내부 공간에 의하여 상대적으로 균일한 혼합기에 의한 안정된 연소로 화염의 온도가 높아져서 열적 메커니즘에 의하여 많은 NOx가 발생하는 것으로 사료된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Effect of perimeter to area ratio on NOx emission

## 4. 결론

다중 슬릿 버너에서 버너의 형상변화에 따른 화

염 안정 영역과 배기배출물인 CO 와 NOx의 배출특성에 관한 실험적 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 포트돌레에 대한 면적비가 증가하거나 또는 동일 조건에서 슬릿의 간격이 좁아짐에 따라 높은 당량비에서도 부상화염이 발생하였다.
- [2] 휘염은 슬릿의 폭보다는 높이에 의하여 많은 영향을 받았다. 즉, 슬릿의 높이가 감소함에 따라 상대적 높은 당량비에서도 부상화염이 발생하였다. 또한 휘염의 발생은 슬릿의 간격에 큰 영향을 받았으며, 슬릿의 간격이 넓어질수록 휘염은 높은 당량비에서 발생하였다.
- [3] 포트돌레에 대한 면적비가 증가할수록 또는 슬릿의 간격이 줄어들수록 CO의 발생량은 증가하였으며, 내부길이가 길어질수록 CO의 양은 감소하였다.
- [4] 포트돌레에 대한 면적비가 증가할수록, 슬릿의 간격이 넓어질수록 NOx의 양은 약간 감소하였다. 또한 내부길이가 길어질수록 발생하는 NOx의 양은 증가하였으나, 그 영향은 상대적으로 미미했다.

## 후 기

본 연구는 "(주)LG전자"와의 산학 컨소시엄을 통해 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- [1] R. Junus, J. F. Stubington, and G. D. Sergeant, "The effects of design factors on emissions from natural gas cooktop burners," *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 45, 1994, pp.101~121.
- [2] H.R.N. Jones, "The application of combustion principles to domestic gas burner design," I British Gas/E&FN Spon, London, 1989
- [3] R. Junus, J. E. Vierkant, J. F. Stubington, G. D. Sergeant and I. Tas, "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, 1998, pp.175~184.
- [4] Yung-Chang Ko, and Ta-Hui Lin, "Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions," *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, 2003, pp.3001~3014.
- [5] J. F. Stubington, and W. Zou, "Efficient low-emission burners for natural gas domestic cooktops," *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 73, 2000, pp.35~42.
- [6] J. F. Stubington, G. Beashel, T. Murphy, R. Junus, P. J. Ashman and G. D. Sergeant, "Emissions and efficiency from production cooktop burners firing natural gas," *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 67, 1994, pp.143~155.
- [7] L. C. Kwok, C. W. Leung, and C. S. Cheung, "Heat transfer characteristics of an array of impinging pre-mixed slot flame jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, 2005, pp.1727~1738.
- [8] L. L. Dong, C. W. Leung, and C. S. Cheung, "Heat transfer of a row three butane/air flame jets impinging on a flat plate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 2003, pp.113~125.
- [1] R. Junus, J. F. Stubington, and G. D. Sergeant, "The effects of design factors on emissions from natural gas cooktop burners,"