

## 수증기 개질 반응기의 효율 향상을 위한 버너 구조 연구

성 봉현<sup>1)</sup>, 한 재찬<sup>2)</sup>, 신 장식<sup>1)</sup>, 이 승영<sup>1)</sup>, 양 혜경<sup>1)</sup>, 신 석재<sup>1)</sup>, 박 종원<sup>2)</sup>, 김 두훈<sup>1)</sup>

### A Study on the Burner Structure for Efficient Improvement of Steam Reforming

Bonghyun Sung, Jaechan Han, Jangsik Shin, Seungyoung Lee, Hyekyong Yang, Seockjae Shin, Jongwon Park, DooHoon Kim

**Key words** : burner structure(버너 구조), burner head(버너 헤드), steam reforming(수증기 개질)

**Abstract** : 가정용 연료전지 수소 공급용 연료변환 장치는 LNG, LPG를 이용하여 수소를 제조하는 수증기 개질과 제조된 합성가스의 정제공정으로 저온/고온 전이 반응 및 선택적 산화 반응을 포함하게 된다. 이중 전체 연료변환 장치 효율은 공정중의 유일한 흡열 반응인 수증기 개질 반응기 구조와 반응열 공급용 버너에 의해 결정된다. 반응열 공급용 버너의 형식, 구조 등의 변수를 통해 본 연구진에 의해 개발된 반응구조의 최적 열원 공급 방식을 산출하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 원통형 개질 반응기에 적용 가능한 버너의 구조, 토출 각도, 토출구의 수 등의 버너 설계 변수가 버너의 성능의 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 연구에 사용된 버너는 적용 연료의 혼합 특성을 증가시키기 위해 혼합공간을 충분히 유지 하였으며, 버너의 구조와 연소용 기체의 토출각 및 토출구의 위치 변화를 통한 불꽃의 형태를 변화시켜 반응기 내의 온도 분포 특성을 비교 분석하였으며, 분석 결과에 의해 원통형 개질 반응기에서 최대 효율을 가지는 버너의 구조로부터 수증기 개질 반응을 평가하였다.

#### Nomenclature

SR : steam reforming  
A/F : air-fuel ratio  
MFC : mass flow meter

#### 1. 서 론

고유가 시대에 발맞추어 에너지 절약과 환경 문제를 해결하기 위한 해결방안의 하나로 대체 에너지에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그 중 에서 수소는 무한정 사용 할 수 있는 에너지원으로 전 우주의 70% 이상이 수소로 구성되어 있고 1차 에너지원이 아니라 전기와 같은 2차 에너지원이며, 전기보다 생산, 저장, 운반, 활용방법이 다양하다. 수소는 화석연료( $(CH_x)_n$ )나 물( $H_2O$ )의 형태로 존재하고 있으며, 생산을 위해서는 에너지 공급이 필요하다. 화학연료의 열분해는  $CO_2$ 가 발생되고 물의 열화학 분해는  $800^\circ C$  이상의 열이 필요하며, 물의 전기분해는 생산 효율이 낮

다.<sup>(3)</sup> 수소 생산의 에너지원으로 분류하면 신재생 에너지를 이용하여 생산하는 청정 수소와 기존의 화석연료를 개질하여 사용하는 개질 수소로 나눌 수 있으며, 현재의 기술력이나 제조 효율적인 측면에서 보면 후자의 연구 개발에 주력하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 가정용 연료전지에 적용 가능한 천연가스 수증기 개질기의 열원 공급원인 버너의 성능 최적화 및 공급 연료를 저감시켜 연료 전지 전체 효율을 상승시키기 위한 장치를 설계, 제작 하였으며, 실험을 통한 결과를 토대로 가정용 연료전지의 효율을 극대화 시킬 수 있는 버너 개발의 기초자료로 활용하였다.<sup>(1)</sup>

1) 유니슨 기술연구소 에너지구조연구부 수소연료전지팀  
E-mail : bonghyun75@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3449 Fax : (041)552-7416  
2) RTI 엔지니어링 기술연구소  
E-mail : goldwater@rtieng.com  
Tel : (031)455-8861 Fax : (031)455-8863

## 2. 실험

### 2.1 버너 Test용 반응기 구성

Fig. 1과 같은 형태의 버너 Test용 반응기를 설계 제작하였다. 버너 설계 변수에 대한 영향을 조사하기 위하여 반응기와 버너 Module를 완전히 분리할 수 있도록 구성하였으며, 버너 Module 상의 Head 교체를 용이하게 하기 위해 체결형으로 구성하였다. 반응물에 의한 열손실을 최소화 하기 위해 내부의 배가스를 이용한 예열구간을 설계 구성하였으며, 추가적으로 반응기 외부 벽면의 발열을 이용한 예열구간을 추가 구성하였다.



Fig. 1. Reactor for Burner Test.

### 2.2 버너 Head의 제작

연소기는 연소 방식에 따라 크게 두가지(예혼합연소, 확산연소)로 나뉘어지며, 외부 공기유입이 필요한 확산연소는 반응기 구조상 적용에 어려움이 많아 좁은 연소 공간에서 완전 연소가 가능한 예혼합연소를 본 연구에서 채택하였다. 예혼합연소에는 공기의 유입 양에 따라 전1차식, 분젠식, 세미분젠식 화염으로 구분되며, 본 연구에서는 화염온도가 950℃로 수증기 개질 반응(SR)의 반응 온도(800℃)와 유사한 전1차식을 이용하여 버너를 구성하였다(분젠식: 1300℃, 세미분젠식: 1000℃).<sup>(2)</sup> 본 실험에서 사용한 버너 Head의 구조는 사선형(A), 사선/수직형(B), 수직형(C)의 3가지 형태로 실험하였으며, 모델 A는 연소실 기준 수직 방향에서 약 60° 기울여서 연소 연료를 토출하도록 하였고, 모델 B는 A와 마찬가지로 연료 토출각을 주었으나 토출량은 A의 절반만 토출하고 나머지는 연소실의 수직 방향으로 토출하도록 구성하였다. 모델 C는 토출구 전체가 연소실의 수직으로 되어 있으며, Head 노출면적이 A, B에 비해 약 1.2배 크게 제작되었다.

### 2.3 버너 성능 평가 시스템 구성

전체 연료변환 장치의 효율은 전체 공정중 유일한 흡열 반응인 수증기 개질 반응기 구조와 반응열 공급용 버너에 의해 결정된다. 이중 반응열 공급용 버너의 형식, 구조 등 설계 변수의 영향을 조사하여 최적의 열원 공급 방법을 산출하고자 하였다.

동일한 실험조건을 만들기 위하여 National Instrument사의 장비(cFP-2120, cFP-TC-120, cFP-AI-112, cFP-AO-210, cFP-RLY-425, PS-5)를 이용하여 MFC 및 Igniter를 자동제어 하였으며, 결과를 분석하기 위하여 LabVIEW 프로그램을 이용하

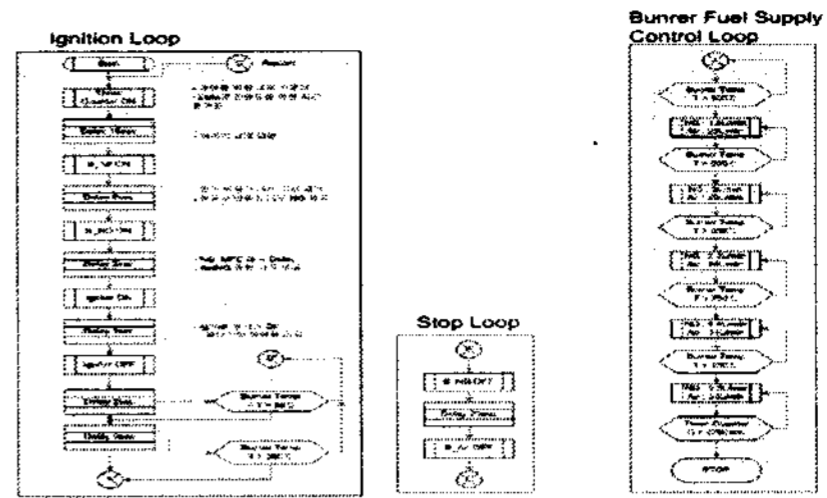


Fig. 2. Control Algorithm of Burner Module.

여 온도, 유량등의 Data를 수집할 수 있었다. Fig. 2는 버너 Module 제어를 위한 알고리즘을 보여주고 있다. 다양한 버너 Head 구조의 성능을 조사하기 위해 외부 변수를 최대한 삭제시켰으며, Start-up 시간을 이용한 성능을 비교하기 위해 내부 카운터를 이용하여 동일한 조건에서 점화 및 열량 공급이 이루어지게 하였다. 안전한 실험을 위해 점화 루프에서는 버너 Module 상태점검을 통하여 각 장치의 준비상태를 점검 하였으며, 불안전 상태로 점화 실패시 자동으로 LNG공급을 차단하며 공기는 계속적으로 공급되어 반응기 내부의 남아있는 LNG를 제거, 재점화시 폭발현상이 발생하지 않도록 프로그램 하였다. Fig. 3은 버너 Module의 제어 화면을 나타낸 것으로 National Instrument사의 LabVIEW로 프로그래밍 하였으며, 초기 기본 설정을 한 후에 Start 버튼만으로 점화, 공급 열량 조절, 비상정지 등을 제어하고 반응기의 현재 온도 분포, 전체 온도 분포, 연료 공급 상태 등을 한 화면에 표현함으로써 운전자의 작동 실수, 데이터 분실 등의 오류를 하지 않도록 구성하였다.

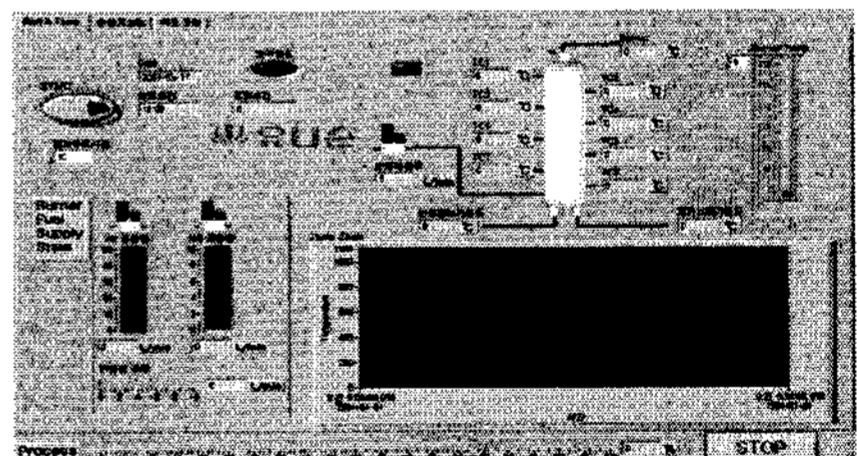


Fig. 3. Control Display of Burner Module.

## 3. 결과

버너 Test Module은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 연소부, 반응물 전처리부, 반응물 후처리부, 반응부, 제어부로 구성된다. 연소 연료로는 LNG (90.42vol.% CH<sub>4</sub>, 5.89vol.% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and 2.35vol.% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 사용하였으며, 연소부의 조건에 따라 버너 전단에 설치되어 있는 예혼합기로 LNG와 공기를 MFC와 프로그램 제어를 통해 자동 조절 공급한 후 연소시켜 반응열을 공급하였다. 본 연구에서는 반응부에 필요한 열량공급을 확인하고자 버너

Head의 구조와 구조 변화에 따른 열량공급의 특성을 파악하여 반응부의 Start-up 시간을 단축하고 소모 연료를 감소시키고자 하였다.

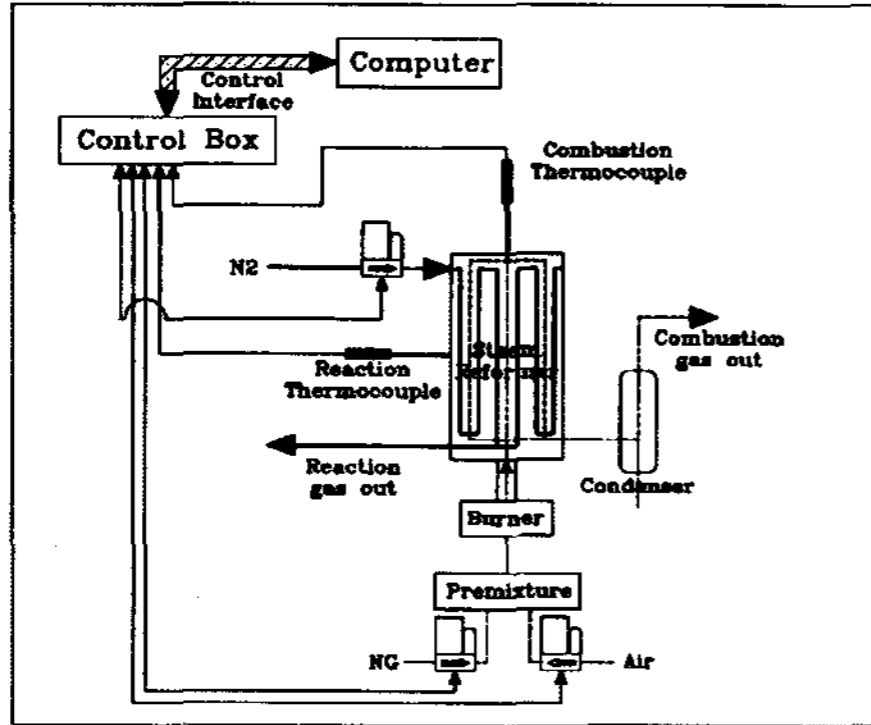


Fig. 4. Schematic Diagram of Burner Module.

### 3.1 버너 Head 모델별 연소 Test

Fig. 4와 같이 버너 Head 모델별 기본 열량 공급 형태를 보기 위해 반응기 상부 즉, 배기가스가 돌아나가는 지점과 배기가스가 외부로 배기되는 지점에 열전대를 설치하였다. 화염의 영향을 받지 않고 예열 구간의 영향을 주는 배기가스 온도를 측정하기 위해 반응기 상단에서 51mm 하부 지점 온도를 이용 연료 공급의 기준으로 하였고, 예열 구간을 통과한 배기가스의 온도를 통하여 반응열의 열전달 성능을 예측 가능하다.

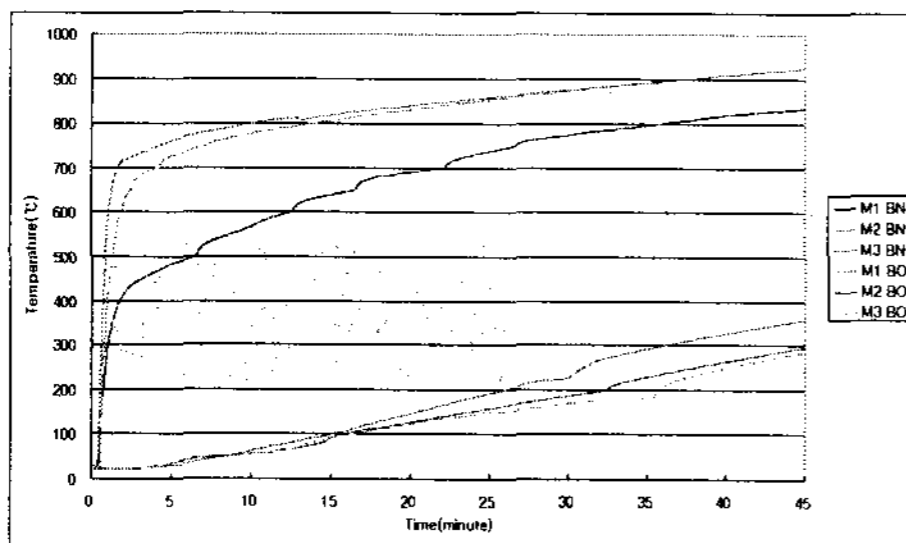
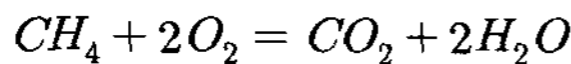


Fig. 5. Combustion Temperature Distribution property with Burner Model.

실험에 적용한 공연비(A/F)는 점화 시점에는 12:1로 안전한 점화를 지향하였으면 750°C 이상에서의 공연비는 13.5:1로 완전 연소 및 최대 반응 열량을 공급하였다. 동일한 조건에서 연소실 및 배기가스 온도를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

모델별 열량 공급 형태를 측정하기 위해 측정시간, 연료공급량, 측정위치 등을 고정한 동일한 조건에서 자동 연료공급으로 연소실의 온도를 1sec 간격으로 45분간 측정하였다. 측정결과 연소실의

열량 공급 성능은 버너 Head 종류 중에서 모델 C가 전체 운전 시간 대비 온도 상승폭이 가장 높았다. 버너 모델별 열량 공급 성능을 비교한 결과 Table 1에 나타난 것과 같다. 시간과 온도 모두 모델 C의 성능이 가장 우수하다는 결론을 얻을 수 있었다.

Table 1 Calorie supply efficiency comparison

| 모델 | 초기 5분간의 온도변화 $\Delta T$ (°C) | 연소실 온도 700°C 도달시간(분) |
|----|------------------------------|----------------------|
| A  | 454.69                       | 22.12(1328sec)       |
| B  | 703.78                       | 4.40(253sec)         |
| C  | 738.86                       | 1.63(99sec)          |

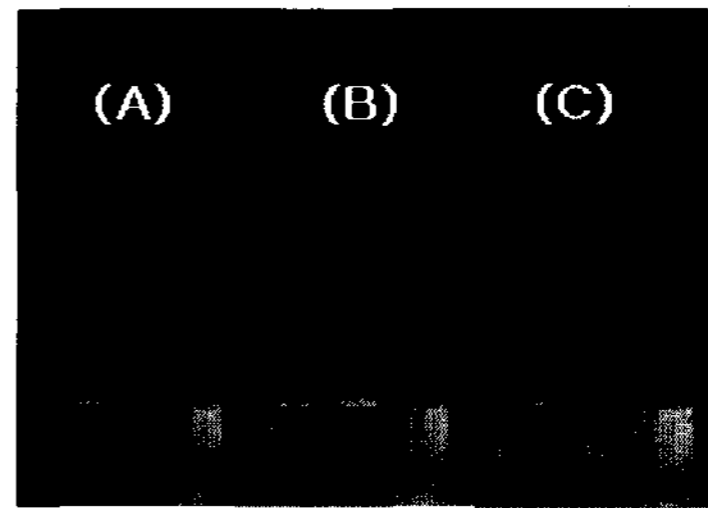


Fig. 6. Flame Shape with Burner model.

### 3.2 버너 Head 모델별 반응부 온도 변화

버너 Test Module 제작은 현재 가장 활발하게 연구중인 가정용 1kW급 개질기를 모델 기준으로 설계하였다. 1kW급 개질기의 충전되는 촉매를 대신하여 촉매의 열전달 효과를 고려하기 위해 알루미나 담체(Aluminium Oxide, Ganule. KanTO Chem. size:2~4mm)를 충전 하였으며, 반응물의 유체 온도를 측정하기 위하여  $N_2$ : 2L/min를 공급하였다. 실제 반응 구간에는 일정 간격으로 총 8개의 온도를 측정하였다.

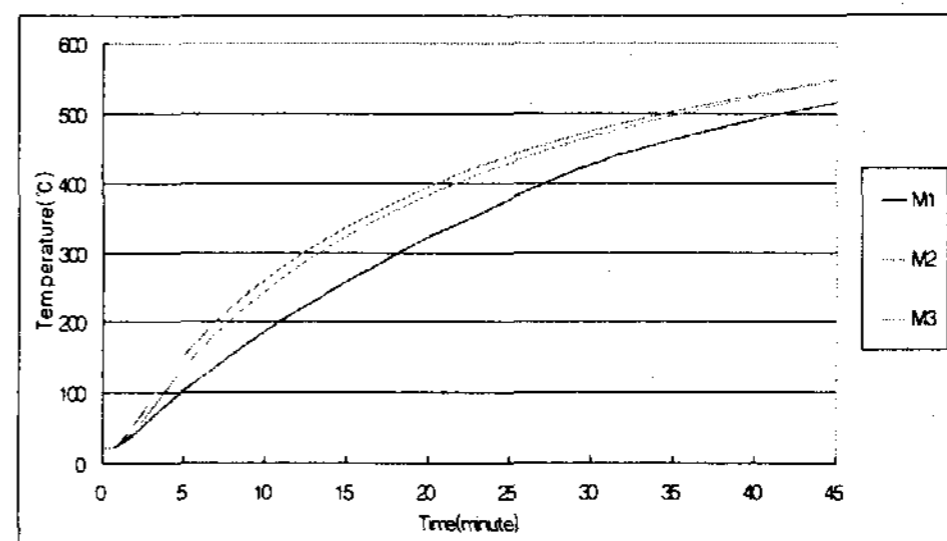


Fig. 7. Temperature Distribution property of Reaction Upside with Burner Model.

본 논문의 측정결과는 크게 상부, 하부로 나누어 비교하였다. 이는 버너 Head의 구조적 특성의 의해 불꽃의 크기가 Fig. 6의 모델 C와 같이 반

응부 중간(약150mm)까지 도달하여 A, B와 비교 대상으로는 부족하기 때문이다. 이에 반응부 측정 결과는 크게 상부(불꽃이 닿지않는 부분), 하부(불꽃이 닿는 부분)로 나누어 측정 하였다. 이를 기준으로 버너 Head 모델별 반응부 온도 변화 실험을 실시하였으며, 공급되는 연료량은 연소실 기준으로 일정 온도에 도달하면 공급 연료를 증가시키는 방식으로 구성되어 있는데, 이는 Start-up 시간과 연료 저감 효과를 동시에 보기 위함이다.

### 3.2.1 반응부 상부 온도 변화

반응부의 상부는 버너 불꽃이 직접 닿지 않는 곳으로 열량공급과 반응물의 예열 성능을 확인할 수 있는 구간이다. Fig. 7은 반응부 상부의 온도 변화를 모델별로 비교한 것으로, Table 1에서와 같이 초기 5분 후 온도 변화 폭은 모델 C가 가장 높았다.

Table 2. After starting 5 minutes period reaction change of temperature.

|    | $\Delta T(^{\circ}C)$ |        |        |
|----|-----------------------|--------|--------|
|    | A                     | B      | C      |
| 상부 | 83.6                  | 115.7  | 132.8  |
| 하부 | 89.46                 | 208.12 | 300.27 |

### 3.2.2 반응부 하부 온도 변화

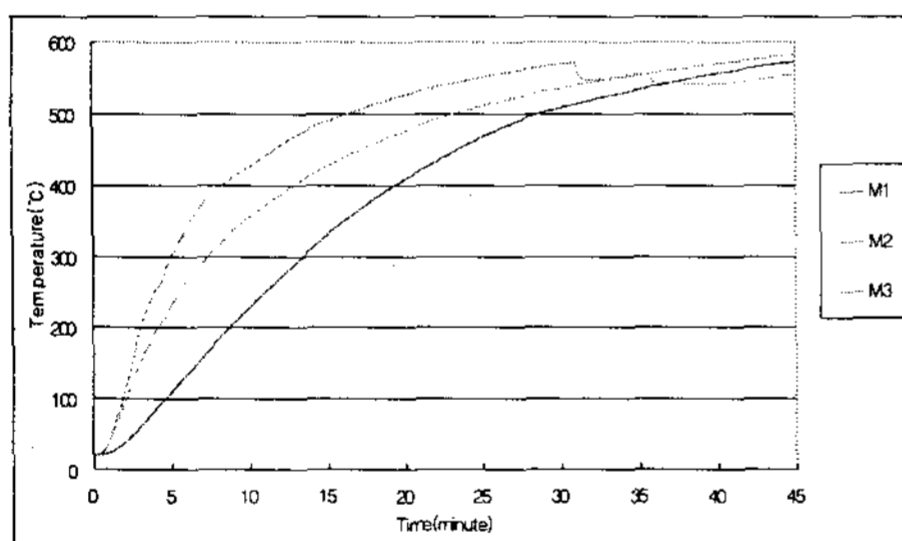


Fig. 8. Temperature Distribution property of Reaction Downside with Burner Model.

반응부의 하부층은 좁은 연소실에 버너의 불꽃이 직접 닿는 부분으로 버너 구조에 따라 연소실 및 반응부 온도 변화 폭이 Fig. 8과 Table 1과 같이 상당한 차이를 보였다. 연소실 벽면에 직접 열량을 공급하는 버너 A의 온도 변화가 높을 것으로 예측되었으나, 실제 실험에서는 (A) < (B) < (C)의 순서로서 연소 배가스를 이용하여 반응물의 예열 성능을 높이는 것이 반응부의 온도상승에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 반응기 전체 구조가 SUS계열로 연소실 벽면으로의 열전도 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Product component of steam reformer.

|         | H <sub>2</sub> | CO    | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|---------|----------------|-------|-----------------|-----------------|
| 조성비 (%) | 77.76          | 11.32 | 1.12            | 9.79            |

Table 3은 모델 C를 SR반응기에 적용, 운전한 결과로서 기존 연구<sup>(4)</sup>와 차이가 없으며 1kW급 연료전지용 개질기의 버너로 적합함을 알 수 있다.

## 4. 결론

3가지 모델의 버너 구조에 대하여 반응기 구조에 대한 열량 공급 성능과 반응기 내의 온도 분포를 통하여 1kW급 연료전지용 개질기에 적용하기 위한 최적의 버너를 개발하였으며, 연구결과를 토대로 1kW급 이상의 개질기 버너에도 적용 가능하다.

3가지 모델의 버너 가운데 연소실과 수직으로 화염을 형성하는 모델 C가 가장 높은 열량 공급 성능과 높은 온도 분포를 나타냈으며, Start-up 시간을 단축시키는 방법 또한 초기 온도 변화( $\Delta T$ )가 가장 높은 C 모델이 가장 우수하였다.

반응기의 온도 상승은 연소실의 내부 온도를 높게 유지하는 것 보다 고온의 연소 배가스 온도에 의해 반응물의 예열 성능을 높이는 것이 1.5 배 이상 높은 효과를 보였다.

또한, Start-up 시간 단축과 공급 연료의 저감을 위한 시간 비례 연료 공급 방식을 산출하였다.

## 후 기

본 연구는 산자부의 신재생에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] Jangsik Shin, Jongwon Park, Hyekyong Yang, Seungyoung Lee, Bonghyun Sung, Seockjae Shin., "Operating Characteristics of LNG burner for Steam Reforming of Natural Gas", Korean Society for New and Renewable Energy, pp. 477-480, 2006.
- [2] "연료 및 연소 관리", 에너지관리공단, 2005.
- [3] 장 종화, "수소경제와 원자력수소", 한국원자력연구소, 2007.
- [4] Yutaek Seo, Dongjoo Seo, Youngseog Seo, Hyunseog Roh, Jinhyeok Jeong, Wanglai Yoon., "Performance and Operational Characteristics of Natural Gas Fuel Processor for 1kW Class PEMFCs", Korean Society for New and Renewable Energy, pp. 17-20, 2006.