

## 연료 공급 및 S/C비에 따른 평판형 STR 반응기 성능 평가

김현주\*, 허수빈<sup>†</sup>, 박재민\*, 윤봉석\*, 이도형\*\*

\*부경대학교 대학원 에너지시스템 공학과, \*\*부경대학교 기계공학부

### The Performance Evaluation of Plate Type STR Reactor with Variation of S/C Ratio and Fuel Supply

HUNJU KIM\*, SUBIN HEO<sup>†</sup>, JAEMIN PARK\*, BONGSEOK YOON\*, DOHYUNG LEE\*\*

\*Dept. of Energy System Engineering, Grad. School of Pukyong National Univ.,  
San 100 Yongdang-dong Nam-gu, Busan 608-739, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ., San 100 Yongdang-dong Nam-gu,  
Busan 608-739, Korea

#### ABSTRACT

According to the propagation of fuel cell system, the importance of that system efficiency is being magnified. Thus, the efficiency improvement of reformer which is the important factor of fuel cell system will be required. This study has been experimentally performed to evaluate the performance of plate type STR reactor. At first, we changed fuel flow rate (2, 3 and 4 l/min) in burner, and then we measured a proportion of hydrogen in produced gas through the STR reactor by G.C for evaluating the performance of plate type STR reactor in various fuel supply conditions. And we changed S/C ratio (2 and 4) and measured a proportion of hydrogen in produced gas through the STR reactor. As a result, condition at fuel flow rate 2 and 3 l/min could not be supplied amount of heat for STR sufficiently. Condition at fuel flow rate 4 l/min could supply a heat excessively. And condition at S/C ratio 2, reaction occurred insufficiency. But condition at S/C ratio 4 was excess. From above, we found the optimum conditions that were fuel rate 3.5 l/min and S/C ratio 3.

**KEY WORDS** : STR(수증기 개질 반응), S/C ratio(스팀카본비), Plate type STR reactor(평판형 수증기 개질기), Combustor(연소기), G.C(가스크로마토그래피)

#### Nomenclature

*LPM* : supply rate, l/min

*T* : temperature, °C

*s* : time, sec

*RT* : represented time, min

#### 1. 서 론

근대 산업혁명 이후, 외연기관 및 내연기관의 발명에 따라 화석연료의 사용에 의한 환경오염이 중

<sup>†</sup>Corresponding author : hsbins@pknu.ac.kr

[ 접수일 : 2011.2.1 수정일 : 2011.4.4 게재확정일 : 2011.4.22 ]

요한 사회적 문제로 대두되고 있다. 또한 제한된 자원인 화석연료의 고가가 심각한 사회적 문제로 떠오면서 친환경 동력원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 연료전지는 수소의 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지변환기구로서 효율이 높고, 배출물이 순수한 물이기 때문에 오염물질을 발생시키지 않는 장점이 있다. 이러한 연료전지의 상용화를 위해서는 수소의 안정적인 공급이 필요한데, 수소 생산 및 공급을 위한 시설을 구축하기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요하다. 이러한 문제점의 대안으로 탄화수소 연료를 직접 개질하여 사용하는 방법이 널리 쓰이고 있다.

현재 탄화수소에서 수소를 얻는 방법으로 널리 쓰이는 수증기 개질(steam reforming : STR)반응은 운전 시에 기동시간이 길어서 빠른 기동을 필요로 하는 곳에는 적합지 못한 결점을 가지고 있으나<sup>1)</sup> 수소의 생산량이 상대적으로 많고 안정적인 운전이 가능하기 때문에 연료전지시스템에서도 널리 사용되고 있다<sup>2)</sup>.

개질 반응기는 형태에 따라 원통형과 평판형으로 구분된다. 현재 연료전지시스템에 사용되는 개질 반응기는 주로 원통형 개질기로써<sup>3-6)</sup> 제작과정이 복잡하고, 공간 활용도가 불리하며, 버너를 중심으로 한 원주방향으로 각 반응기가 적층되므로 유지 및 보수에도 불리하다. 평판형 개질 반응기는 현재 열효율의 개선이 필요하지만 상대적으로 위의 결점은 개선될 수 있다. 하지만 국내에서는 평판형 개질 반응기에 대한 연구 및 개발이 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 자체 개발한 1kW급 평판형 STR 반응기에 대하여 연소기의 연료량을 변화시켜 반응기 분위기 온도를 살펴보고, 각각의 조건에서 S/C비를 변화시켜 수소개질 성능을 평가하여, 평판형 개질 반응시스템 개발을 위한 기초를 확립하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험실에서 개발한 평판형 STR반응기를 나타내었다. 본 연구에 사용된 실험장치는 랩

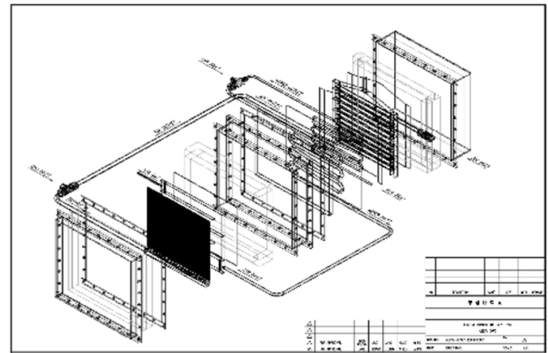


Fig. 1 The 3D sketch of steam reforming reactor - isometric view

뷰(lab-view)프로그램을 통하여 코딩된 제어프로그램을 통하여 반응기 초기화 및 개질 반응에 필요한 각종 가스공급과 온도제어가 가능하도록 제작되어 있다. 이러한 전체 실험을 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 제어 프로그램은 PC를 통하여 구동되며, 구동과 동시에 PC에 각 부분의 공급 유량 및 온도가 자동으로 기록된다. 각 부분에 공급되는 가스의 유량을 컨트롤 패널을 이용, MFC(mass flow controller) 및 솔레노이드 밸브를 통하여 공급된다. 이러한 컨트롤 패널의 형태를 Fig. 3에 나타내었다.

개질 반응기의 초기화 및 냉각을 위해 공급되는 수소 및 질소는 20LPM급의 MFC를 통하여 공급되며, 연소기 공급용 공기는 컴프레서에서 압축되어 100LPM급 MFC를 통하여 연소기로 공급된다. 연

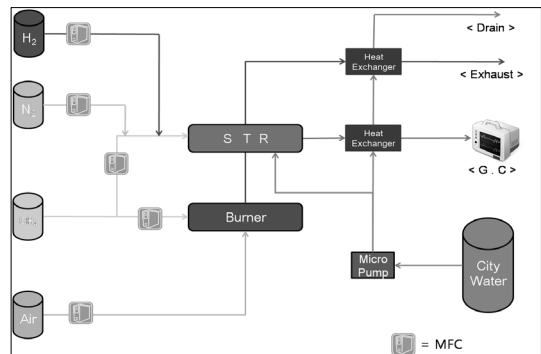


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

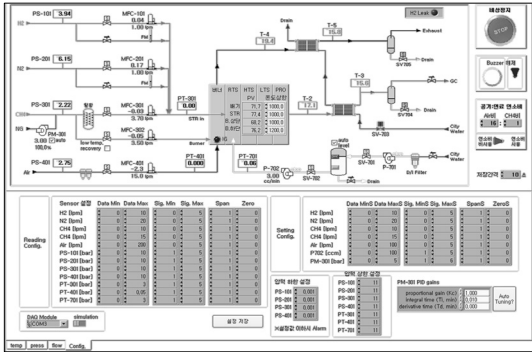


Fig. 3 Panel of system control

소기 및 수증기 개질 반응기에 필요한 연료는 순수 메탄이 아닌 도시가스가 부스팅 펌프를 이용하여 약 3bar 까지 가압 후 20LPM급 MFC를 통하여 연소기 및 개질 반응기에 공급하게 된다.

개질 반응기에 공급되는 도시가스의 경우, 부취제인 황이 포함되어 있기 때문에 촉매 피독을 방지하기 위하여 탈황기를 거친 후에 공급된다.

개질 반응기로 공급되는 수증기는 상수도로부터 공급된 물을 탈이온화 과정을 거쳐 탱크에 저장한 후 마이크로펌프를 이용하여 열교환기에 공급, 증기화 시켜 개질 반응기로 공급한다.

개질 반응기 내부, 연소기 상·하부, 연소기 배기관, 생성 가스 유로에는 각각 K-type 열전대가 설치되어 있으며, 각 부분에 대한 온도 및 공급 유량은 컨트롤 패널을 통하여 실시간으로 모니터링이 가능하다. 생성된 개질 가스는 Y사의 가스크로마토그래피(autochro-3000)를 이용하여 분석하였으며, 표준가스 측정 후, 그 측정값을 기준으로 각 조건에 대한 생성가스의 성분 분포를 측정하였다.

## 2.2 실험 조건

본 실험에서는 연소기 공급 열량 및 S/C 비에 따른 개질 반응 생성가스의 성분 분포를 측정하여 평판형 개질 반응기의 성능을 평가하였다. 연소기 공급 열량, 즉 연소기 공급 연료량을 변화시켰을 경우와 개질 반응기 내 수증기량 변화 즉, S/C 비를 변

Table 1 Experimental conditions

Case name	Heating value	Steam supply rate
Case 1	2 l /min	9.07cc/min (S/C ratio = 3)
Case 2	3 l /min	
Case 3	4 l /min	
Case 4	3.5 l /min	9.07cc/min (S/C ratio = 3)
Case 5		6.05cc/min (S/C ratio = 2)
Case 6		12.09cc/min (S/C ratio = 4)

화시켰을 경우 2가지로 실험을 진행하였다. Table 1에 각각의 실험조건을 나타내었다. Case 1에서 case 3까지는 S/C 비가 고정된 상태에서 연소기에 공급된 연료량을 변화시킨 것으로, 이론적으로 개선되어진 개질 반응기내 도시가스 투입량 3.7l/min, 일반적으로 적당하다고 여겨지는 S/C 비가 3일 때 연소기 공급 연료량을 2, 3, 4l/min으로 증가 시키며 생성 가스의 성분 분포를 측정하였다. Case 4에서 case 6은 각 S/C 비에 대한 수증기 투입량을 변화시킨 것으로, 앞의 연료 공급량 실험에서 최적의 연소 조건을 선정 후, 각 조건의 증기량을 투입하여 생성 가스의 성분 분포를 측정하였다.

## 2.3 실험 방법

실험은 개질반응기의 초기화 및 예열과정을 거친 후 앞에서 밝히 조건들을 적용하였다. 반응기내 도시가스 투입량은 연소기 점화 및 예열 과정 이후 10분내 반응기 내부 온도 변화량 5°C 이내 일 때, 1l/min 씩 단계적으로 투입하여 목표치까지 투입하였다. 투입 수증기량 역시 위와 마찬가지로 조건하에서 목표량까지 1cc 씩 단계적으로 투입하였다. 이 때 연소기 측의 공기비는 21배로 고정 하였다. 위에서 밝힌바와 같이 각 부분의 투입 유량 및 온도는 자동으로 기록되며, 반응기를 거침 생성 가스는 수냉식 열교환기를 거쳐 가스크로마토그래피로 투입된다. 측정은 앞에서와 마찬가지로 조건에 맞는 유량 투입 후, 10분내 반응기 내부 온도 변화량 5°C 이내 일

Table 2 Percentage of each component at standard gas

Component	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
Percentage (%)	75.11	1.01	14.9	8.98

때 그 생성 가스를 가스크로마토 그래피를 이용하여 측정하였다. 각 조건 별로 안정화이후 10분 간격으로 3회 측정 하였으며, 그 평균값을 조건의 대표값으로 선정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 표준가스 측정

본격적인 실험에 앞서, 실험 후 판단기준을 선정하기 위하여 표준가스를 가스크로마토 그래피를 이용하여 측정하였다. 표준가스의 성분 분포는 Table 2에 나타난 바와 같다. 가스크로마토 그래피에 의하여 측정된 값을 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 이러한 값을 기준으로 앞으로 측정할 생성 가스의 성분 분포를 계산하였다. 기체의 분자량에 따라, 첫 번째 피크는 수소이며, 두 번째는 메탄, 세 번째는 일산화탄소, 네 번째는 이산화탄소이다. 맨 처음 피크와 일산화탄소와 이산화탄소 사이에 위치한 피크는 가스크로마토그래피 작동 시 샘플 가스 유입 및 유로 전환

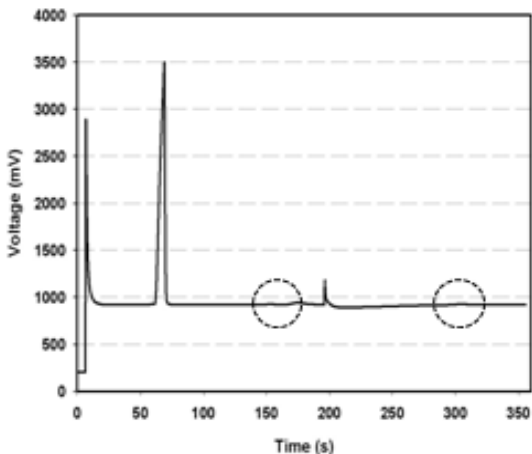


Fig. 4 Gas chromatography at standard gas

Standard gas

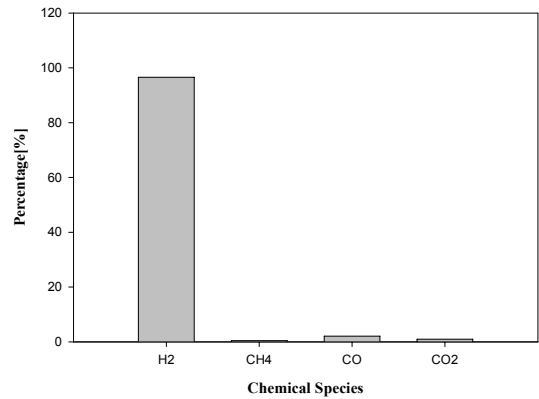


Fig. 5 concentration of chemical species of standard gas

을 위한 밸브 동작에 의한 피크이다.

#### 3.2 연소기 연료 공급량 변화에 따른 생성 가스 성분 분포

Fig. 6, Fig. 7에 case 1에서 가스 측정시 각 부분별 온도 변화 및 가스크로마토 그래피에 의해 측정된 각 농도%를 나타내었다. 세 번의 실험을 통해 측정된 값의 평균값과 표준가스를 기준으로 계산한 case 1에서의 생성 가스 성분 분포를 나타낸 것이다. Ni

Case 1

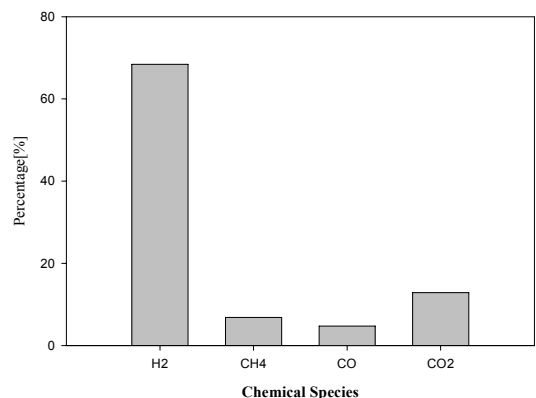


Fig. 6 concentration of chemical species of case 1

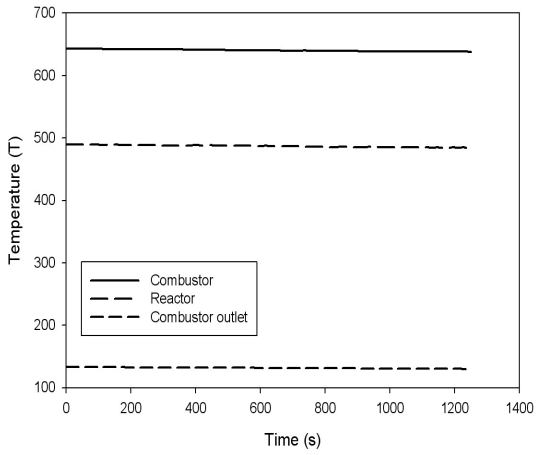


Fig. 7 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 1)

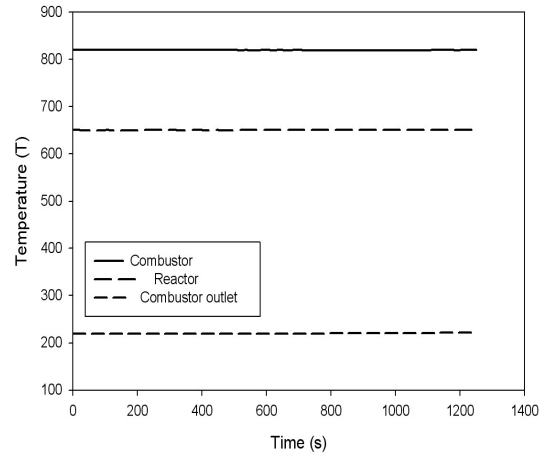


Fig. 9 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 2)

계열 촉매의 적정 운전 온도는 700~800°C이다<sup>5)</sup>. 하지만 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 개질 반응기 내부 온도는 약 490°C 내외로서, 적절한 개질 반응이 일어나지 못하리란 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 이는 2ℓ/min의 연료공급량은 현 개질 반응기에 대하여 열량이 부족하다고 사료된다. 이러한 부분은 생성 가스의 성분 분포에서도 잘 나타나고 있는데, 일반적으로 사용 되고 있는 수증기 개질 반응기의 수소 분포는 75% 이상 인데 반하여, 연료 공급량 2ℓ/min일

때의 수소 분포는 68.44%로써 상당히 낮은 수소 분포이다. 또한 미반응 메탄의 분포가 6.8%나 되기 때문에 효율적 부분에서도 좋지 않다. 이러한 낮은 수소 분포와 높은 미반응 메탄 분포는 뒤 쪽의 반응기에도 악영향을 미칠 수 있기 때문에 연료 공급량 2ℓ/min은 적절하지 못한 연료 공급량으로 판단된다.

Fig. 8에 case 2에서 가스크로마토그래피 측정값을 나타 내었다. 그래프 상으로도 미 반응 메탄의 분포가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 하지만

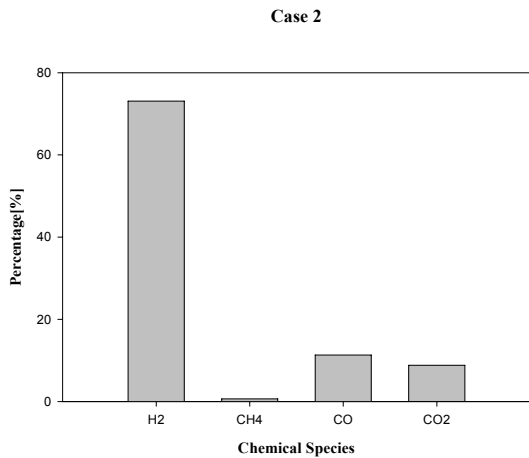


Fig. 8 concentration of chemical species of case 2

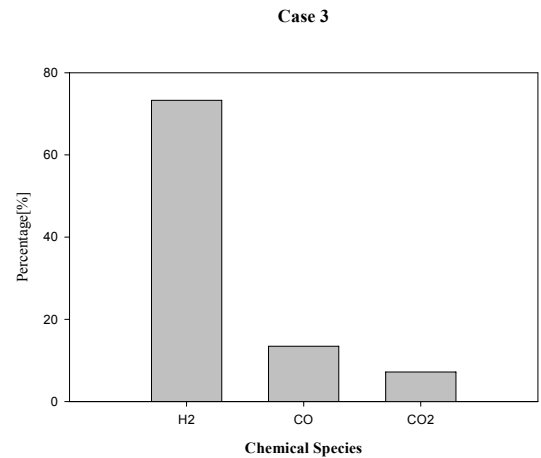


Fig. 10 concentration of chemical species of case 3

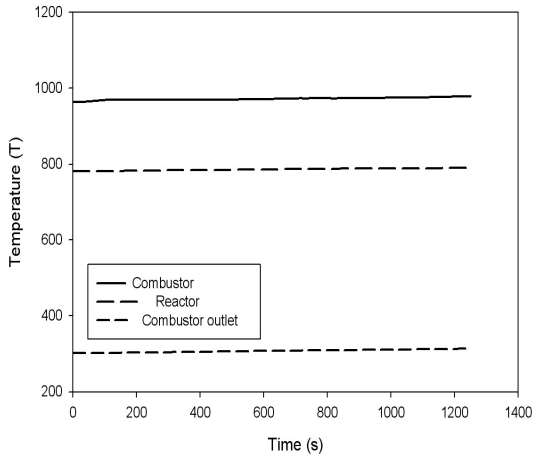


Fig. 11 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 3)

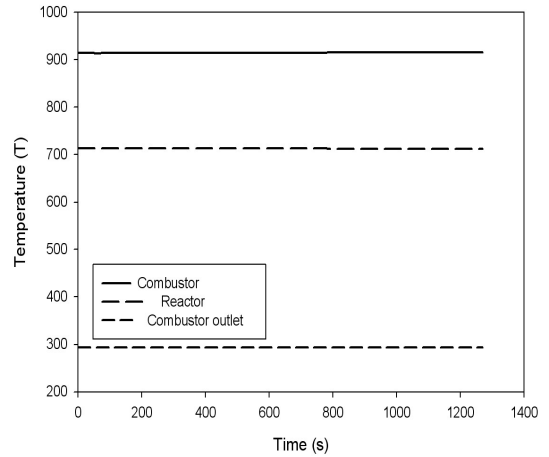


Fig. 12 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 4)

Fig. 9에 나타난 반응기 내부 온도가 650°C 가량으로 나타나는 것으로 미루어 역시나 충분한 개질 반응은 일어나지 못할 것임을 예측할 수 있다. 앞에서의 예측과 마찬가지로 Fig. 8에 보여진 것처럼, 미반응 메탄의 분포는 상당히 줄어들었지만, 수소의 분포가 요구되는 분포보다 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 아직 공급 열량이 부족하기 때문이라고 사료된다.

Case 3의 경우, Fig. 10에서 보여진 것처럼 가스 크로마토그래피의 측정범위를 벗어나 측정되지 않았다. 또한 수소의 분포는 비슷한 수준을 유지하지만 일산화탄소의 분포가 증가한 것으로 미루어 활발한 개질반응이 일어나는 것을 짐작할 수 있다. Fig. 11과 같이 반응기 내부 온도가 약 30분간 10°C 가량 증가하였으며 지속적인 상승곡선을 그렸다. 이는 과도한 열량이 반응기로 공급되어 흡열 반응 용량을 초과하여 나타나는 현상이라 생각된다. 하지만 미반응 메탄이 크게 감소하였음에도 불구하고 수소의 분포가 앞의 경우와 크게 차이를 보이지 않는 것으로 미루어 볼 때, 과도한 열량이 공급되어 생산된 수소가 다시 산화 반응을 일으켜 수소의 분포가 공급되는 열량에 비하여 적은 것이라 생각된다.

위와 같은 결과로부터, 최적의 열량 공급 조건을 찾기 위하여 3ℓ/min과 4ℓ/min사이 값인 3.5ℓ/min의

연료를 연소기에 공급하여 같은 방법으로 생성 가스의 성분 분포를 측정하였다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 반응기 내부 온도가 710°C 부근의 적정 온도를 유지하고 있으며, Fig. 13에서 나타난 것처럼 미반응 메탄이 소량 분포하지만 앞의 case 3에 비하여 소폭이지만 수소의 분포가 상승한 것을 알 수가 있다. 이는 상당히 바람직한 결과라 여겨지며, 3.5ℓ/min의 연소기 연료 공급량이 본 실험에 사용된 개질 반응기의 최적 연료 공급량이라 생각된다.

Case 4

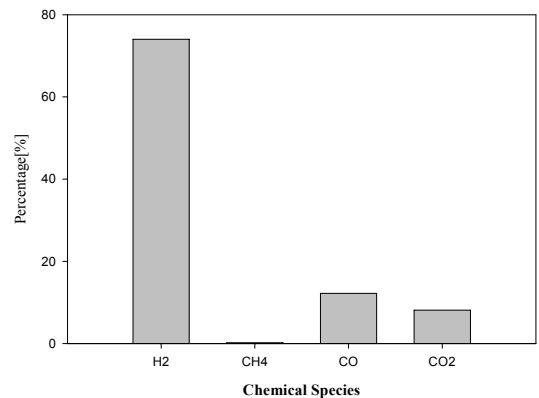


Fig. 13 concentration of chemical species of case 4

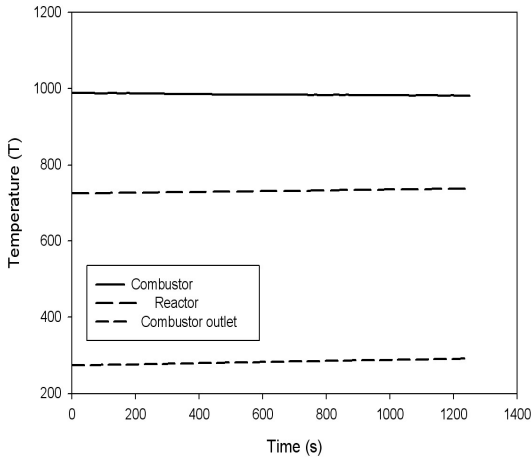


Fig. 14 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 5)

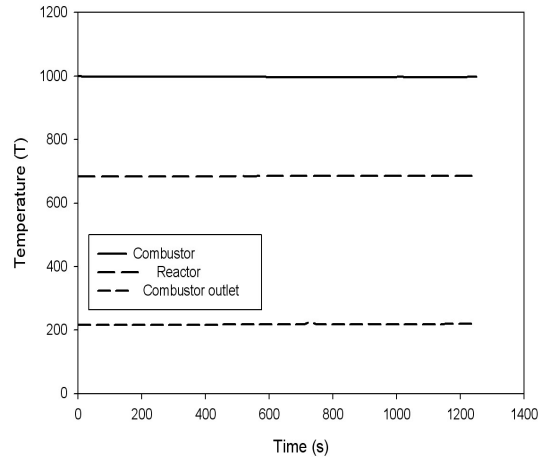


Fig. 16 Temperature profile at combustor, reactor and combustor outlet (case 6)

### 3.3 S/C비 변화에 따른 생성 가스 성분 분포

앞의 실험들에서 확인한 최적 연소기 연료 공급량인 3.5ℓ/min에 대하여 S/C 비를 각각 2, 4로 변화시키며 생성 가스의 분포를 측정하였다. Fig. 14에 나타난 것처럼 S/C비가 2일 때, 반응기 내부 온도가 지속적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 공급된 개질 연료에 비하여 수증기의 양이 모자라 개질 반응이 활발히 일어나지 못하기 때문이라 여겨지며,

이는 Fig. 15에서 나타난 것처럼 수소 분포의 감소가 잘 뒷받침하고 있다.

S/C 비를 4로 증가시킨 경우, Fig. 16에서 나타난 것처럼 반응기 내부 온도가 680°C 부근인 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 17에 나타난 바와 같이 수소의 분포 역시 S/C 비가 3일 때 보다 낮은 것을 볼 수가 있는데, 이는 S/C비가 3일 때 비하여 개질 반응이 활발히 일어나지 못하는 것을 의미하며, 반응기 내부 온도 저하는 반응에 의한 것이라기보다 과도한

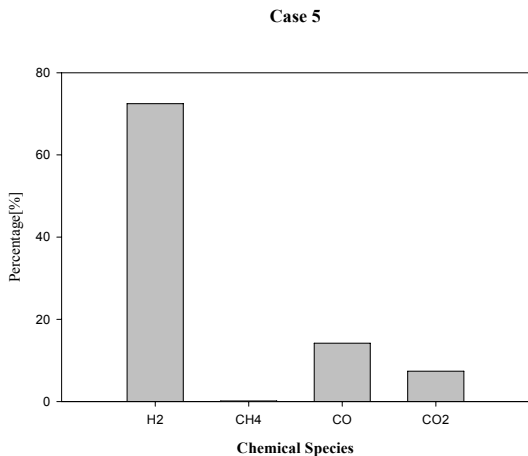


Fig. 15 concentration of chemical species of case 5

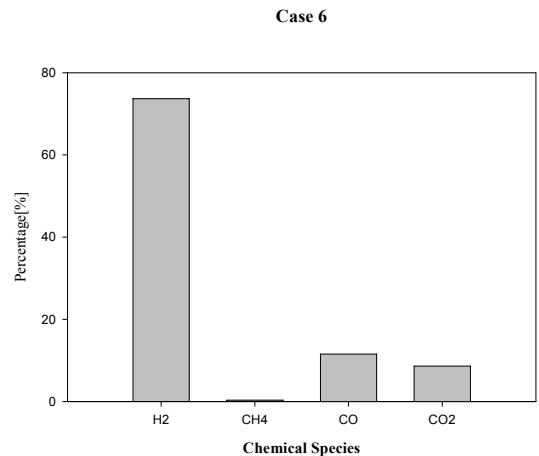


Fig. 17 concentration of chemical species of case 6

수증기 투입으로 인해 반응기 내부 냉각 효과가 나타나는 것이라 생각된다.

위와 같은 결과에 비추어 제작된 수증기 개질 반응기의 최적의 운전 조건은 연소기 연료 공급량 3.5 l/min 일 때, S/C 비 3이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 1kW급 평판형 수증기 개질 반응기의 연료 공급량 및 S/C 비에 따른 성능 특성을 평가하고, 그에 따른 기초자료를 제공하는 것이 그 목적이다. 이에 따라 연소기 연료 공급량과 S/C비를 변화시켜 각각의 경우에서의 생성 가스 성분 분포를 측정, 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연소기 연료 공급량 2l/min과 3l/min의 경우 공급 열량이 부족함을 알 수 있었다. 연소기 연료 공급량 4l/min의 경우 과도하게 열량이 공급되었으며, 최적 조건을 찾고자 3.5l/min의 연료를 공급하였을 때 반응기가 적정온도를 유지하였다.
- 2) S/C비를 변화시킨 경우, S/C비 2에서는 수증기가 부족하여 반응기 내부 온도가 증가하는 경향을 보였다.
- 3) S/C비 4에서는 수증기가 과다 공급되어 반응기 내부 온도를 감소시키며 그로인해 촉매 활성화 온도 이하로 감소, 수소 수율 감소등 악영향을 미쳤다.

위와 같은 결과에 비추어 현재 수증기 개질 반응기의 최적 운전 조건은 연소기 연료 공급량 3.5l/min, S/C 비 3이라고 생각되지만, 실제 개질 반응기의 성능을 알기 위해서는 적산계 및 농도 분석계를 통한 성능 평가가 필요하다고 생각 된다. 또한 기존 상용 반응기와 비교하여 반응기 하나에서 상대적으로 많은 열량을 소모하므로 추가 반응기 설치와 함께 설계 수정이 필요하다고 생각 된다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- 1) 서용석, 서동주, 서유탉, 윤왕래, “메탄 수증기 개질반응기에서 연소, 열전달 및 개질반응 특성 연구”, 제31회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2005, pp. 50-57.
- 2) 박준근, 이신규, 임성광, 배중면, “천연가스로부터 수소를 생산하기 위한 수증기 개질기의 작동조건과 형상에 대한 수치해석 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제1호, 2009, pp. 60-67.
- 3) 이경호, 권오채, “연료전지용 콤팩트형 개질기의 고성능화를 위한 고온 공기 연소 기술의 적용에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제16권, 제3호, 2005. 9, pp. 229-237.
- 4) 오영삼, 송택용, 백영순, 최리상, “컴팩트형 수증기 개질장치 효율분석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집(2002. 12), 제13권, 제4호, pp. 313-321.
- 5) 이명용, 이지홍, 이상석, 이진석, 이도형, “다양한 형태의 버너를 이용한 수증기개질기의 고효율화 연구”, 대한기계학회 2008년도 추계학술대회, 2008.11, pp. 2886-2791.
- 6) 최종균, 정태용, 남진현, 신동훈, “수증기-메탄 개질반응 해석모델의 비교연구”, 대한기계학회 논문집 B권, 제32권, 제7호, 2008, pp. 497-503.
- 7) 황정호, 노인규, 서동균, 신동훈, 최종균, 김형식, “고분자 전해질 막 연료전지를 위한 메탄 개질기에서 형상변화가 개질성능에 미치는 영향에 대한 연구”, 한국 수소 및 신에너지 학회 논문집 제21권, 제5호, 2010.10, pp. 364-374.