

수치해석을 통한 Spiral 형상 화학 반응기의 열전달 특성

정영국, 이진규, 이주한, 서태범*

인하대학교 기계공학과 대학원, *인하대학교 기계공학과

Heat Transfer Characteristic of the Spiral Type Solar Chemical Reactor

Young-Guk Jung, Jin-Gyu Lee, Ju-Han Lee, Tae-Beom Seo**

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University, Inchoen 402-751, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Inchoen 402-751, Korea

(Received June 5, 2009; revision received December 2, 2009)

ABSTRACT: The purpose of the research is to develop the high performance solar chemical reactor for producing hydrogen using steam reforming reaction of methane. A specific shape chemical reactor is suggested : spiral type reactor. The reactor is installed on the dish-type solar thermal system of Inha University. The temperatures, CH₄ conversion rates, and H₂ proportion are measured. At specific condition, CH₄ conversion rates of the spiral type reactor are about 91%, and H₂ proportion are about 66%. The spiral type reactor gives reasonably good performance without any problems caused by highly concentrated solar radiation.

Key words: Solar chemical reactor(태양열 화학반응기), Spiral type reactor(나선형 반응기), Methane steam reforming(메탄의 수증기 개질), Solar radiation(태양 복사)

기 호 설 명

- \dot{Q}_{cv} : 검사체적에서의 열전달률 [W]
- \dot{Q}_{wrra} : 반응기 내부로 유입되는 열전달률 [W]
- \dot{Q}_{loss} : 반응기 외부로 유출되는 열전달률 [W]
- n_{CH_4} : 메탄 연료의 몰 수
- \bar{h}_f : 유입가스의 생성엔탈피 [kJ/kg]
- $\Delta \bar{h}$: 유입가스의 비엔탈피 변화값 [kJ/kg]

1. 서 론

에너지는 국가의 산업과 경제를 발전시키는데 있어 절대적인 요소이다. 현재 사용되고 있는 에너

지 중에 석유, 석탄, 천연가스 등과 같은 화석연료는 사용 후 재생이 불가능하고 매장량이 한정되어 있으며 연소 시 발생하는 각종 공해물질로 인해 환경문제를 야기시킨다. 따라서 에너지 자원이 부족한 우리나라에서의 신재생에너지 기술 개발은 우선적으로 다루어져야 할 연구 분야이다.

태양열을 이용한 발전 시스템은 화석연료를 대체할 신재생에너지 중에서도 가장 경쟁력이 있는 분야로 기대되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 태양열 발전 시스템을 활용하는 방법으로서 가장 주목을 받는 것이 바로 수소에너지의 생산이며, 현재 생산되는 수소 대부분이 메탄-수증기 개질 방식을 택하고 있다.⁽²⁾ 메탄가스의 수증기 개질 반응은 1000 K 이상에서 90% 이상의 전환이 이루어진다. 태양열을 이용해서 1000 K 이상의 온도를 충당할 경우, 기존의 화석연료를 이용할 때 보다 약 20% 정도의 CO₂ 배출을 감소시킬 수 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 수소 생산을 위한 태양열 화학

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7327; fax: +82-32-873-7327

E-mail address: seotb@inha.ac.kr

반응기를 개발하는 것을 목적으로 하고 있으며, 그 중에서도 Spiral 형상의 태양열 화학 반응기 내부에 대한 열전달 특성을 분석했다.

Muir et al.⁽⁴⁾은 Parabolic solar concentrator에 위치한 매우 큰 규모의 반응기(CAESAR)를 시험 가동하여 메탄의 CO₂ 개질 반응을 분석했다. 이 반응기의 촉매 흡수기는 Rh 촉매가 코팅된 다층의 알루미늄이 설치되었다. 메탄 전환율은 최고 70%까지 확인됐으며, 다공성 매트릭스와 촉매의 분해·침식의 원인이 Sintering⁽⁵⁾에 의한 것으로 보고되었다. Worner and Tamme⁽⁵⁾의 연구에서는 알루미늄과 SiC로 만들어진 세라믹 폼에 담지된 Rh 촉매로 태양열 반응기를 이용하였다. 이 반응기는 절대압력 3.5 atm에서 973~1173 K의 온도조건으로 운전되었다. Moeller et al.⁽⁶⁾은 촉매가 담지된 세라믹 폼에 직접 태양열이 방사되는 반응기를 운용하였고, 태양열이 400 kW 주입되어 9 atm, 1098 K의 조건에서 반응기가 운전되었다.

이와 같은 고온 태양열 반응기를 이용한 화학반응의 응용에 있어서 보다 깊이 고려되어야 할 점은 열효율을 높이는 것과 화학반응을 위한 최적화된 반응기의 설계 기술을 정립하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 상용 전산유체역학 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 Spiral 형상의 화학 반응기에 대한 수치해석을 실시하였다. 이를 통해 반응기 내부에서의 복사 열유속 분포 해석 기법을 연구하고, 복사·대류·전도 열손실의 해석 기법을 정립하여 열손실을 최소화했다. 또한 실제 Dish형 집열기에 반응기를 설치하여 메탄가스의 수증기 개질 반응 실험을 수행했다. 이를 기초로 화학반응에 적합한 최적의 반응기를 설계할 수 있는 기법을 개발하고, 성능실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 태양열 집광 시스템

메탄-수증기 개질 반응기의 요구조건을 충족하는 반응기를 설계하기 위하여 반응기 내부의 온도를 측정하여 화학 반응에 적합한 온도 분포를 가질 수 있도록 실험 장치를 설치하였다.

본 연구에서 사용된 집시형(Dish-type) 고온 태양열 시스템은 Fig. 1과 같고, 태양열 집열기의 총

용량은 5kWth이다.

또한 전체 시스템은 Fig. 2와 같이 구성하였다. 실험에 요구되는 정확한 범위의 메탄의 제어를 위하여 MFC(KITS-C-130, MFC for Methane)를 이용하여 메탄의 입력 양을 제어하였다. 사용범위는 0~0.85 g/sec의 유량범위를 지니고 공급압력은 4 bar이며 허용오차는 ±1%이다. 또한 전기적으로 개폐를 제어할 수 있는 솔레노이드 밸브를 통하여, 메탄가스와 질소가스가 각각의 파이프에서 이송되어 하나의 Y-type 배관에 연결될 수 있도록 실험 장비를 구성하였다.

본 연구에 의해 진행되는 실험은 유량의 변화에 따른 수소 생성율을 비교할 수 있도록 다양한 값의 유량을 충족시키는 수증기의 공급 방법이 요구되었다. 또한 태양열 집열기의 특성상 고정된 장비가 아니라 시간에 따라 움직이는 구동부를 동반하는 실험 장비이므로 구동 시에도 정확한 유량의 공급을 해주어야 한다. 따라서 넓은

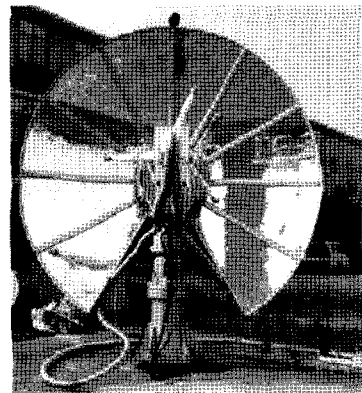


Fig. 1 Dish type solar collector.

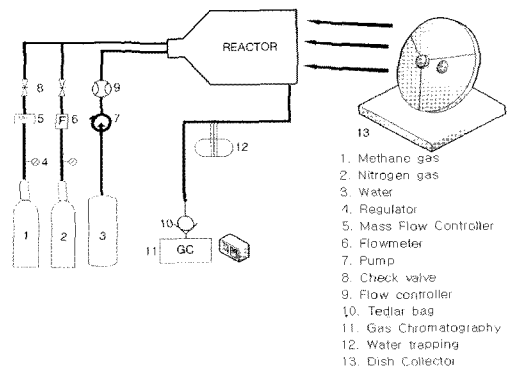


Fig. 2 A schematic diagram of reacting system.

범위의 유량을 제어할 수 있는 정밀한 펌프가 요구되고, 실시간으로 유량을 인디케이터에 표시해주며 안정적인 토출압에서 작동하는 펌프를 선정하였다. 사용된 펌프의 성능은 Table 1과 같다.

2.2 반응기 형상

2.2.1 외부 형상

Fig. 3은 태양열 화학반응기 외부 형상이다. 반응기의 외부 재질은 고온에 견딜 수 있는 SUS 304로 제작했으며 반응기의 입구는 Flux mapping 실험을 통하여 태양 복사열을 90%이상을 흡수할 수 있도록 100 mm로 정하였다.

Flux mapping 시스템을 구성하기 위하여 집열기의 중심으로부터 2m인 초점거리에 Fig. 4와 같은 수냉식 반사 타겟을 설치하였다. 또한 반사 타겟으로부터 약 1.2m 전방에 CCD 카메라를 설치하였다.

Fig. 5는 CCD 카메라를 통하여 얻어진 집광 플

럭스의 이미지를 IDL언어(Interactive Data Language)를 이용하여 분석, 실행하는 모습이다. 이러한 방법으로 Radiometer에 의해 집광되는 태양열의 Intensity를 측정하는 것이다.

Fig. 6은 반응기 입구 표면에 집광되는 플럭스 분포를 측정하여 나타낸 그래프이다. 전체적으로 초점이 상당 부분 한 곳으로 모이는 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 보이고 있다. 측정된 일사량은 706 W/m^2 이고 최대 집광플럭스는 0.406 MW/m^2 이다.

Fig. 7은 초점지역 플럭스 분포의 중심에서부터 형성되는 총에너지의 비율을 나타낸 그림이며, 이러한 결과를 바탕으로 초점에 설치하는 반응기의 크기를 결정할 수 있다.

Table 1 Performance of a pump

Specifications	
Flow rate	0.16 L/min to 500 mL/min
Dispensing volume	0.01 mL to 9.99 L
Speed	0.01 rpm to 100.0 rpm
Communication	RS 485
Power	AC 100~240 V 10% 50/60 Hz
Operating condition	Temperature 0 to 40 °C
Dimensions(L×W×H)	292×185×180 mm
Drive Weight	3.8 kg



Fig. 3 Solar Chemical Reactor.

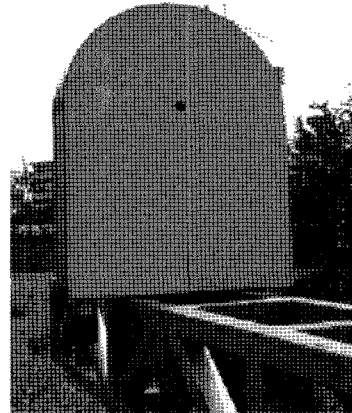


Fig. 4 Target with cooling system.

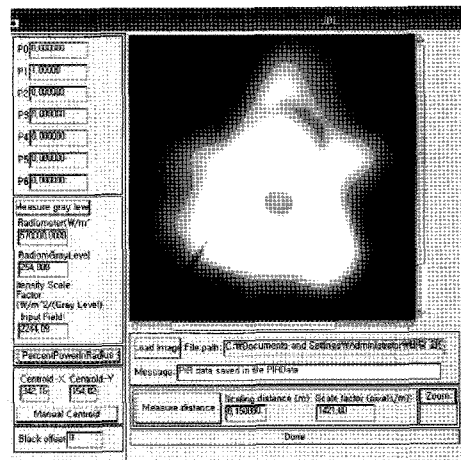


Fig. 5 IDL for image analysis.

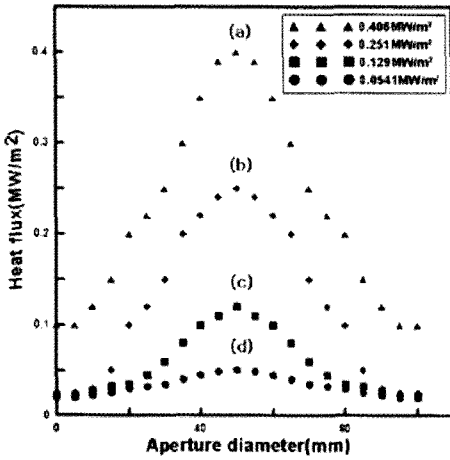


Fig. 6 Distribution of the heat flux image on the aperture.

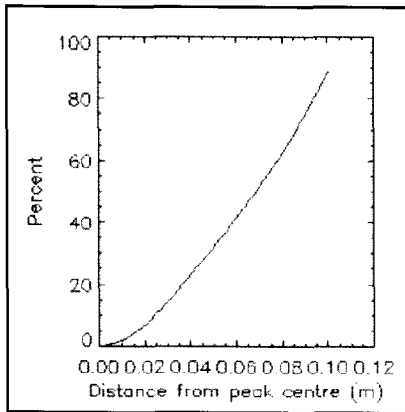


Fig. 7 Total energy percentage within radius for focal point flux distribution.

2.2.2 내부 형상

Fig. 8은 본 연구의 주요부인 반응기의 내부 형상을 나타냈다. Fig. 8(a)는 나선형의 구조를 가지는 Spiral 형상 반응기의 중심축을 기준으로 45° 방향 횡단면을 나타냈고, Fig. 8(b)는 반응기의 좌측면도를 나타냈다.

물에 대한 수증기로의 전환 및 수증기와 메탄의 반응효율을 높이기 위해 반응경로의 설계와 형상에 대한 최적설계를 했다.

메탄의 효율적인 전환율을 고려하여 Fig. 9와 같이 반응기의 길이를 103 mm로 제작하였다. 800 K 이상의 반응기 내부 온도 조건을 만족시킬 때, 메탄의 전환이 활발하게 이루어지므로⁽⁷⁾ 수치해

석을 통해 적합한 반응기의 길이를 결정하였다. 또한 반응기 내부 Spiral 단면의 두께는 SUS 재질로서 제작 가능한 최소 두께의 여건을 고려하여 반응기 내부로 유입되는 기체의 부피를 최대한 확보할 수 있는 3.013 mm로 결정하였다.

반응기 Inlet은 자유로운 기체의 확산을 위하여 Spiral 내부 진행 방향과 수직인 곳에 위치시켰으며, Outlet은 고온의 온도분포를 보이는 중앙부 중에서도 1000 K 이상의 온도를 나타내는 깊이를 고려하여 반응기 내부에 삽입되었다. 1000 K 미만의 온도를 나타내는 Outlet 부분에서 발생하는 C의 침적 방지를 위해 반응기 내부로 삽입되는 Outlet의 깊이를 고려하였다.⁽⁷⁾

Spiral 형태로 고안된 반응기의 내부 형상은 나선형의 유로를 따라 혼합물이 경로를 진행하면서 Heat flux를 받게 된다. Heat flux에 의해 스팀과 메탄의 혼합물은 Spiral 반응기의 내부로 갈수록 높은 열을 받게 되며 출구에서 최고온도에 이르게 된다.

또한 Spiral 형상 반응기는 고온에 대한 내구성이 뛰어나고 제작이 용이하며, 압력 손실이 매우 낮은 특성을 지녀 고온에서 많은 양의 메탄과 수증기의 투입 및 수소 생산이 가능하다.

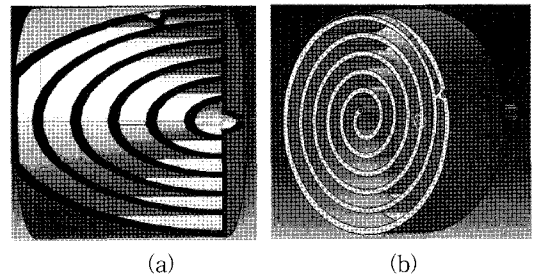


Fig. 8 Internal shape of the reactor.

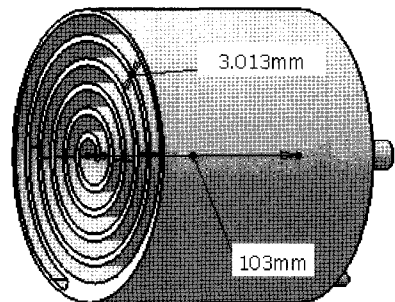


Fig. 9 Dimension of the reactor.

3. 실험 방법

3.1 온도 측정 방법

본 실험은 메탄-수증기 개질 반응기의 요구조건을 충족하는 반응기를 설계하기 위하여 반응기 내부의 열전달 특성을 확인하였다. 실제 반응물을 주입하기 전 질소가스(Research Purity 99.99%)를 반응기 내부로 주입하여 내부의 산소 및 기타 기체성분을 제거하였고, 반응기내 반응물의 거주시간을 향상시키기 위하여 유로 방향을 나선형으로 제작하였다.

Fig. 10에서 보는바와 같이, 반응기 내부의 온도를 측정하기 위하여 K-type 열전대(Model: TT-30 OMEGA Co.)를 설치하였다. 측 방향을 두 개로 설정하여 반응기 내부의 전 범위에 걸친 온도 분포를 얻기 위하여 후면부에서 열전대를 삽입하였다. 그리고 각 포인트마다 2cm의 간격을 주어서 반응기 내부의 전 범위를 측정하였다. 또한 하루의 일사량 측정이 시스템의 성능에 미치는 영향이 크기 때문에 직달 일사량계를 정남쪽에 위치시켜, 일출 시간부터 일몰 시간까지의 일사량을 측정했다. 데이터의 수집은 데이터로거(Model: 34970A)와 모듈(Model: 34901A 20channel multiplexer)를 사용하였다.

3.2 성능 분석 방법

수소를 생산하기 위한 메탄-수증기 개질 반응 실험은 유입되는 메탄과 수증기의 유량 비율에 변화를 주어 포집한 가스를 GC(Gas Chromatography)기기를 사용하여 메탄의 전환율과 수소의 생성율을 산출하였다.

수소의 생성율을 구할 때 쓰인 식은 다음과 같다.

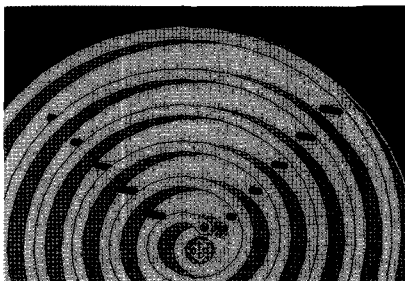


Fig. 10 Thermocouple position.

$$H_2 \text{ 생성율} = \frac{(\text{생성된 } H_2 \text{ 몰수})/3}{\text{공급된 } CH_4 \text{ 몰수}} \quad (1)$$

또한, 반응기 내부로 유입되는 유량은 에너지 평형식을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{Q}_{irra} - \dot{Q}_{loss} \quad (2)$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{n_{CH_4}} = \sum_P (n_e (\bar{h}_f^o + \Delta \bar{h}))_e - \sum_R n_i (\bar{h}_f^o + \Delta \bar{h})_i \quad (3)$$

Table 2는 Spiral 형상 반응기에 투입된 메탄 가스와 수증기의 몰 비에 따른 유량조건을 나타냈다. 실험에서 설정된 메탄의 유량(0.0025 mole/sec)은 반복적인 실험을 통해 결정된 본 반응기에서 전환시킬 수 있는 메탄의 최대량이다. 메탄과 수증기의 투입 비율은 1:1~1:3의 범위를 설정하였는데 이는 투입된 메탄과 수증기가 모두 반응할 수 있는 최소 비율인 1:1에서부터 기준국·내외 연구결과⁽⁷⁾들이 보여주고 있는 실질적으로 화학반응 효율이 가장 높은 1:3의 비율까지 실험조건에 포함하기 위함이다.

Table 3은 반응기 내부 열전달의 불확실성을 측정된 결과이다. Kline and McClintock에 의해 제안된 방법을 사용했으며,⁽⁸⁾ 1.5% 미만의 불확실성 결과를 확인했다.

Table 2 Flux condition of reactant

	CH ₄ : H ₂ O mole ratio	mole/sec	g/sec	l/sec
CH ₄		0.0025	0.04	0.056
H ₂ O	1 : 1	0.0025	0.045	0.056
H ₂ O	1 : 2	0.005	0.09	0.112
H ₂ O	1 : 3	0.0075	0.135	0.168

Table 3 Measure parameters and their uncertainties

Parameter	Uncertainty
Temperature(°C)	0.1
Mass flow rate(kg/s)	0.2%
Heat flux(kW/m ²)	1.1~1.5%

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석 결과

4.1.1 대류·복사 해석

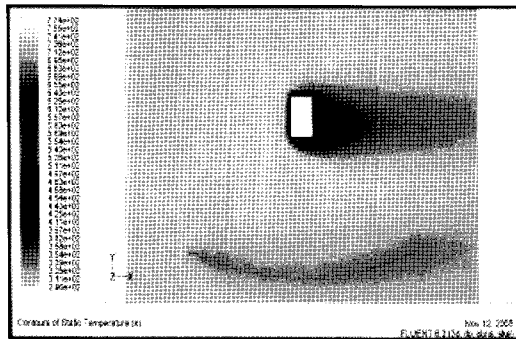
Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 각각 단순형상 반응기와 집열 시스템의 대류해석과 복사해석 결과이다.

대류 및 복사 열전달 해석에서 온도장을 지배하는 에너지 보존식은 아래 식(4), 식(5)를 이용하였다.

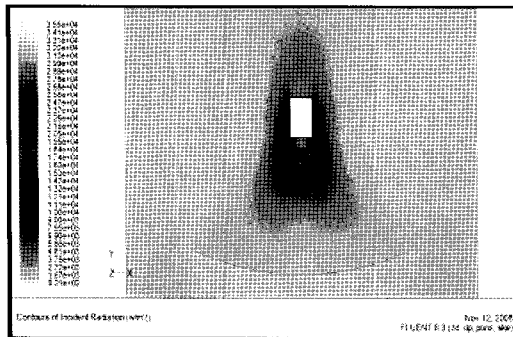
$$\rho C_P \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_f \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

여기서 C_P 는 공기의 정압비열을 나타내며, k_f 는 공기의 열전도율을 나타낸다.

$$\frac{dI(s, \omega)}{ds} = -(a + \sigma_s) I(s, \omega) + a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I^{\infty}(s, \omega) \Phi d\omega \quad (5)$$



(a)



(b)

Fig. 11 Result of convection/radiation analysis.

- I : Energy flux per unit area normal to ray, per unit solid angle
- a, σ_s : Absorption and scattering coefficients respectively
- σ : Stefan-Boltzman constant ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)
- Φ : Scattering phase function

또한 대류 및 복사 열전달 해석에 사용된 경계 조건은 Table 4와 같다.

대류 열전달 해석을 통해 반응기 외부에서의 열손실을 계산할 수 있으며, 복사 열전달 해석을 통해 반사판과 반응기 사이의 형상계수를 계산할 수 있다.

따라서 대류해석 결과는 반응기 설계 시 단열재의 두께 및 위치 등에 대한 설계 자료를 제공할 수 있는 모델이며, 이와 함께 단순형상 반응기에 대해 복사해석을 수행하여 반응기의 복사손실 등의 설계 데이터를 제공할 수 있는 모델을 제안하고자 했다.

4.1.2 Spiral 형상 반응기 해석

Fig. 12는 반응기 전면부에 대한 온도분포 수

Table 4 Boundary Conditions

Mass and Momentum	No slip wall
Wall Roughness	Smooth wall
Heat Trans. Coeff	$50 \text{ W/m}^2 \text{K}^{-1}$
Outside Temperature	25°C
Thermal Radiation	Opaque
Emissivity	1
Diffuse Fraction	1

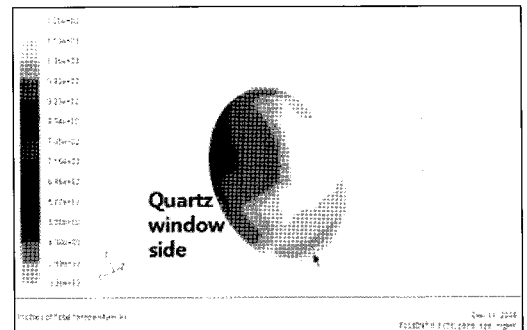


Fig. 12 Temperature distribution of spiral type reactor.

치해석 결과를 나타냈고, Fig. 13은 실제 실험에 사용된 Spiral 형상 반응기의 전면부 모습이다. 수치해석 결과를 보면 그림 상에서 좌측과 우측의 온도차가 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 14에서와 같이 상대적으로 온도가 낮은 메탄과 수증기의 혼합가스가 반응기 Inlet을 통해 투입되면서 quartz window에 부딪히게 되고, 접촉 부분이 온도차에 의해 국부적으로 냉각되기 때문이다. 이와 같은 quartz window 상에서의 불균일한 온도 분포는 Fig. 13과 같이 window의 crack이 발생하는 주요한 원인으로 보인다.

메탄-수증기 개질 반응에서 반응물의 온도분포와 메탄-수증기의 혼합정도를 파악하는 것은 반응 효율에 영향을 주는 주요인이 된다. Fig. 12의 온도분포를 보면 반응기 전면 및 외부에서는 1200 K 이상의 높은 온도분포를 나타내고 있다. 또한 Fig. 15의 유동분포에 따른 수치해석 결과를 보면 반응물이 매우 복잡한 유로를 거치고 있음을 볼 수



Fig. 13 Damaged quartz window.

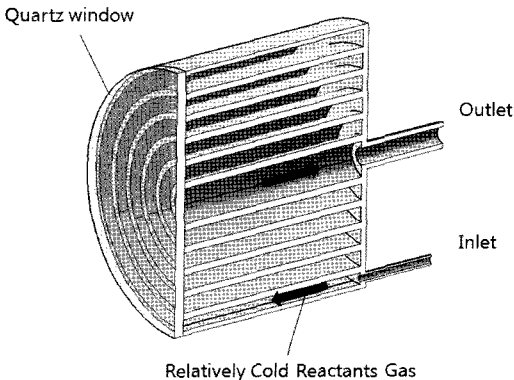
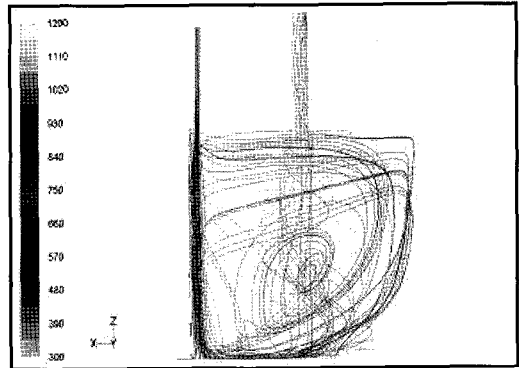
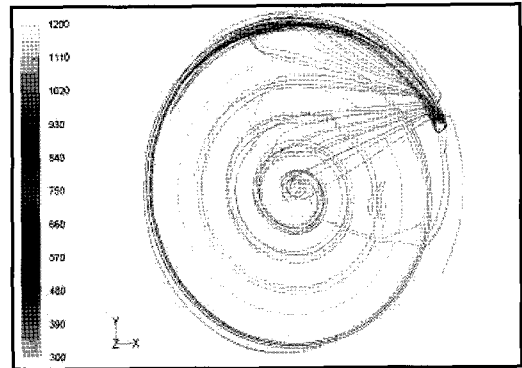


Fig. 14 Sectional diagram of spiral type reactor.



(a)



(b)

Fig. 15 Stream line colored by temperature.

있다. 결과적으로 Spiral 형상 반응기가 반응에 필요한 높은 온도와 적합한 혼합 특성을 지니고 있음을 보여준다.

4.2 실험 결과

4.2.1 반응기 내부의 온도분포

Fig. 16은 시간에 따른 일사량과 Spiral 형상 반응기 내부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 일사량이 800 W/m^2 이상 측정되는 청명한 날씨에서 실험을 수행하였다. 반응기 내부에 있는 총 20개의 온도 측정 포인트 중에서 고온, 중온, 저온으로 구분하여 3개의 대표온도를 그래프로 나타내었다. 온도가 가장 높게 측정되는 포인트가 반응기 전면부 온도이며 $900 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상 측정되는 것을 알 수 있다.

이는 전면부에서 반응에 필요한 온도가 유지됨으로서 반응이 전면부에서 활성화된 것이라고 예

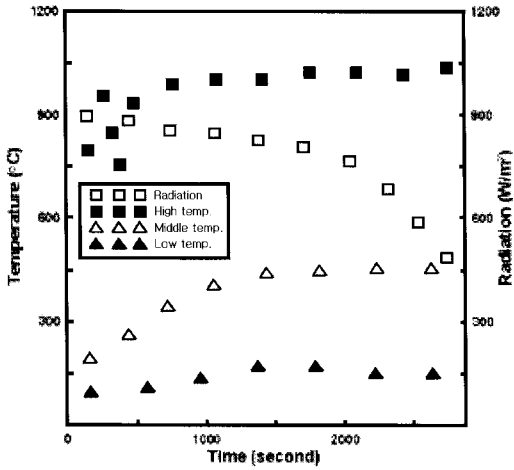


Fig. 16 Temperature distribution in radiation.

상된다. 반응기의 중앙부가 다른 위치보다 온도가 높는데 이는 Flux mapping 실험을 통해 검증된 바와 같이 중앙부에서 반경방향으로 갈수록 입사되는 태양열이 가우시안 분포를 띄기 때문이다. 또한 시간에 따른 일사량의 분포가 증감을 보이며 우하향하고 있음을 볼 수 있는데 그 이유는 구름으로 인한 태양복사의 산란으로 인한 국부적인 일사량의 증감과 시간에 따른 태양고도의 변화 때문이다. 일사량이 감소하더라도 반응기 내부의 온도가 일정하게 유지된다. 그 이유는 반응기 내부의 온도가 태양 복사열에 의해 상승함에 따른 단열 효과에 의해서 내부 온도가 일정시간 동안 유지되기 때문이다.

실험을 수행하는 동안 고온부의 온도가 1000℃ 이상 유지됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 고온 태양열 기술이 수소생산을 위한 메탄-수증기 개질, 물 분해 수소생산 등에 적합한 기술임을 보여준다.

4.2.2 수소 생성율에 따른 성능 분석

Fig. 17은 각각의 유량비에 따른 메탄과 수소의 전환율 및 배출가스 내의 수소 분포를 나타냈다. 반응결과를 보면 투입비율 1:1~1:3 모두 CH₄ Conversion이 90% 이상으로 이론값(100%)에 근접한 결과를 보여준다. 생성가스 내 수소 비율은 46~66%로서 1:3에서 보여주는 66%의 값은 이론값(72%)과 비교적 근접한 결과를 보여주고 있다.

그래프에서 확인할 수 있듯이, 메탄의 전환율은 물 비가 증가함에 따라 순차적으로 증가하는

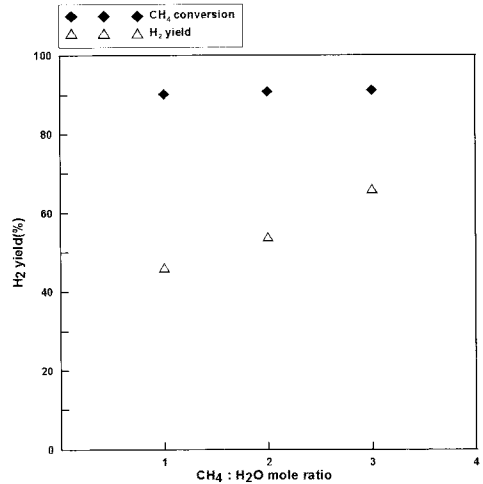


Fig. 17 CH₄ conversion(%) and H₂ proportion(%).

것을 알 수 있고, 1:3의 물 비를 가질 때 가장 큰 수소 생성율을 보여준다. 이를 통해 이론적으로 화학반응 효율이 가장 높은 1:3의 비율에서 수소 생성율이 가장 우수하다는 결과를 검증했다.

5. 결 론

본 연구에서는 반응기 내부 유로를 Spiral 형상으로 제작한 반응기를 제안하였다. 수치해석을 통해 반응기 내부의 온도·유동 분포를 알아보고, 수소 발생 정도를 파악했다. 또한 반응기 내부에 투입되는 유량은 메탄과 수증기의 조성비를 기준으로 1:1~1:3으로 나누어 실험을 진행했다. 다음은 본 연구에 대한 결론이다.

- (1) 반응기의 전면부 온도분포를 수치해석 한 결과, 좌측과 우측의 불균일한 온도분포를 확인함으로써 windows crack에 대한 원인을 밝혔다.
- (2) 수치해석 결과, 반응기 전면 및 외부에서 1200 K 이상의 고온의 온도분포를 보이므로 Spiral 형상 반응기가 메탄-수증기 개질 반응에 적합한 형상이라는 것을 밝혔다.
- (3) 실험을 수행하는 동안 Spiral 형상 반응기 내부의 고온부 온도가 1200 K 부근에서 형성된다. 이는 수치해석을 통해 확인한 반응기의 온도분포 수치가 신뢰성 있는 결과라는 것을 검증한다.
- (4) 메탄과 수증기의 투입비율을 1:3으로 했을 때, 메탄 전환율이 91.26%, 생성가스 내 수소 비

율이 66.14%을 나타낸다.

(5) 메탄과 수증기의 투입비율이 1:3일 때, 가장 높은 수소 생성율을 보여주며, 이는 화학반응 효율이 높은 1:3의 비율에서 생성가스 내 수소 비율이 가장 우수하다는 이론적인 결과를 검증한다.

참고문헌

1. Kang, Y. H., 1999, Flux Distribution of The Dish Concentrator, Journal of The Korean Solar Energy Society.
2. Hydrogen Production and Distribution, 2007, IEA Energy Technology Essentials.
3. Kodama, T., 2000, Thermochemical methane preforming using a reactive WO_3/W redox system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Energy, Vol. 20, pp. 411-425.
4. Muir, J. F., Hogan, R. E., Scocipes, R. D. and Buck, R., 1994, Solar energy, Vol. 52, pp. 467-477.
5. Worner, A., Tamme, R., 1998, catal. Today, Vol. 46, pp. 165-174.
6. Moeller, S., Buck, R., Tamme, R., Epstein, M., Libermann, D., Mery, M., Fisher, U., Rottstein, A. and Sugarman, C., 2002, In Proceedings of the 11th SolarPACES International Symposium on Concentration Solar Power and Chemical Energy Technologies, pp. 231-237.
7. Kodama, T., 2003, High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 29, pp. 567-597.
8. Kim, K. M., Nam, W. S., Han, G. Y., 2005, Study on Methane Steam Reforming utilizing Solar Concentration, Journal of The Korean Solar Energy Society, pp. 135-140.
9. Kline, S. J., McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, Mech. Eng., Vol. 75, pp. 3-9.