

고온용 연료전지 미반응 가스를 이용한 촉매연소-개질 통합 반응기의 성능 비교

강태규*, 성해정**, 이상민***[†], 안국영***, 김용모*

*한양대학교 대학원, **과학기술연합대학원대학교, ***한국기계연구원

Performance Comparison of Integrated Reactor with Steam Reforming and Catalytic Combustion using Anode Off-Gas for High Temperature Fuel Cells

TAEGYU GHANG*, HAEJUNG SUNG**, SANGMIN LEE***[†], KOOKYOUNG AHN***, YONGMO KIM*

*Department of Mechanical Mechanical Engineering, Hanyang Univ., 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**Department of Mechanical Mechanical Engineering, Univ. of Science & Technology, 176 Gajung-dong, 217 Gajungro Yuseong-gu, Daejeon, Korea

***Environment and Energy Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT

The reaction characteristics of an integrated reactor with steam reformer and catalytic combustor using anode offgas for high temperature fuel cells such as MCFC and SOFC have been experimentally investigated in the present study. The coupled reactor had a coaxial cylindrical shape, and the inner and the outer tube was packed with combustion catalysts and reforming catalysts, respectively. Thus, the endothermic steam reforming could proceed by absorbing heat from catalytic combustion of anode offgas. Results show that increasing inlet temperature and decreasing excess air ratio increased the reformer temperature, which led to the increase in H₂ yield. The reforming performance for SOFC conditions was better than that for MCFC conditions since the composition of flammable components became smaller for MCFC cases. Measured reformate composition under various test conditions correlated well with thermal equilibrium composition.

KEY WORDS : Catalytic combustion(촉매연소), Steam reforming(개질반응), MCFC(용융탄산염연료전지), SOFC(고체산화물연료전지), Integrated reactor(통합반응기)

1. 서 론

화석 에너지의 수요량은 지속적으로 증가하나

화석 에너지에 기반한 자원은 한계를 보이고 있다. 따라서 화석 연료 고갈에 대비해 신에너지의 탐사, 발굴, 개발 연구가 신재생 에너지라는 명목 하에 활발히 진행되고 있다. 하지만 가까운 미래에는 신재생 에너지 시대로의 완벽한 전환은 어려울 것으로

[†]Corresponding author : victlee@kimm.re.kr

[접수일 : 2011.11.30 수정일 : 2011.12.12 게재확정일 : 2011.12.27]

예상된다¹⁾. 그러므로 현 시점에서는 화석 연료의 효과적인 이용과 절약 및 환경오염 절감의 관점에서 수소를 이용한 소규모 분산발전용 연료전지 시스템이 기대된다²⁾. 그 중 발전용 연료전지로 주목 받는 것으로는 MCFC와 SOFC를 들 수 있으며, 이것들은 고온에서 작동하기 때문에 사용 연료에 유연성을 갖는 장점이 있다³⁻⁴⁾.

연료전지의 주연료인 수소는 개질기(reformer)를 통해서 공급되며, 이것은 정치 발전용 연료전지인 MCFC와 SOFC 시스템의 주요 구성품 중 하나이다. 연료전지의 핵심 연료인 수소는 부분 산화(POX: partial oxidation)반응, 자열 개질(ATR: auto-thermal reforming)반응 및 메탄의 수증기 개질반응(steam methane reforming) 등에 의해서 생산되고 있다. 이 방식은 전술한 두 가지 공정에 비하여 수증기 개질반응이 수소의 생산량이 많고 개질 효율이 높다고 알려져 있다⁵⁾. 그러나 수증기 개질법은 반응 평형(정상)상태에 도달하는 속도가 느리며 촉매를 피독시키는 CO가 발생하고, 강력한 흡열 반응이기 때문에 외부에서 많은 열을 공급해주어야 한다. 이렇듯 수증기 개질법을 이용하여 수소를 생산 할 경우, 흡열반응에 필요한 열공급 문제에 관한 연구사례들이 많이 발표되었다⁶⁻⁸⁾.

Hori 등⁶⁾에 의하면 원자력 발전 시 발생하는 중온의 열을 수증기 개질의 열원으로 공급이 가능하다고 보고 하였다. Park 등⁵⁾은 반응기에 대한 전산 해석을 통해 반응기에 공급되는 열량에 따라서 개질 효율이 크게 좌우된다는 결론을 도출하였다. 또한, He 등⁷⁾은 MCFC의 미반응 가스에서 수분을 제거한 후에 일반 연소를 통해 개질기의 열원으로 공급할 수 있음을 제안하였다. 개질기 내의 입구 온도 조건보다는 압력 조건에 더 민감하게 변화할 수 있다고 결론지었다.

또한 Pfeifer 등⁸⁾에 의하면 전기 히터를 메탄올의-수증기 개질법에 적용 시, 개질 반응에 소요되는 시동 시간이 단축될 수 있다고 제안하였다.

통상적으로 개질기에서 생산된 개질 가스는 수소가 농후한 상태에서 연료전지에 공급된다. 이 개질 가스는 발전용 연료전지인 MCFC 또는 SOFC

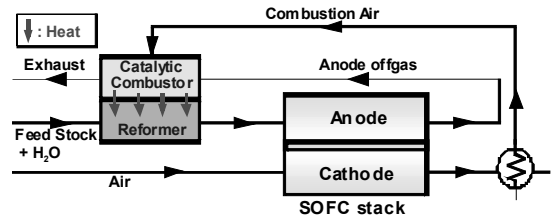


Fig. 1 Schematic diagram for the application of a coupled reactor in SOFC system

의 화학반응 특성 및 전력 부하에 따라서 완전히 소모되지 못하고 연료극 외부로 배출된다. 이러한 기체를 연료극 미반응가스라고 하며, 이 기체 혼합물에는 가연성 성분인 H_2 , CO , CH_4 가 연료전지의 출구온도에서 평형상태로 존재하게 된다. 본 연구에서 사용한 촉매 연소기-개질기 통합 반응기는 Fig. 1에서 보듯이 연료극 미반응 가스를 촉매 연소를 통해 연소시키며 이때 발생한 열을 개질기의 흡열 반응에 필요한 열로 이용하고자 하는 개념이다. 형식에 차이는 있으나 이와 같은 통합형 반응기에 대해서 많은 연구자들에 의해 실험적, 해석적으로 연구되어 오고 있다⁹⁻¹²⁾.

Ramaswamy 등⁹⁾은 발열과 흡열반응이 직접 연동된 단열 팩베드형 반응기에서의 정상상태 및 동적거동을 연구하였다. 그들은 1차원 균질 플러그모델을 이용하여 반응기의 특성을 해석하였는데 획득된 전환율의 관점에서 병류 열교환기 형식의 반응기와 비교하였다. 그러나 양측 반응에 사용된 열원의 가스의 정체에 대해서는 특별한 언급을 하지 않고 있다.

Kirillov 등¹⁰⁾은 모노리스(monolith)에 대해서 열적으로 연동된 2차원 모델을 수치적으로 개발하였다. 수소를 포함한 연료전지의 연료극 미반응 가스를 흡열 반응을 위한 열원으로 이용하였다. 그러나 연소에 대한 연료로는 수소만 계산 및 실험에서 사용하였다.

Mei 등¹¹⁾은 연소반응과 개질반응이 연동된 동심원관으로 구성된 금속 모노리스 반응기를 제안하였다. 입구속도, 가스조성 및 온도와 같은 작동조건을

변경하며 수치적으로 연구하였다. 외부 공간에는 개질반응이, 내부 관에는 연소가 발생하는 병행류 흐름에 대해서 연구하였다.

한편, 지금까지 언급한 모든 연구에서는 흡열 반응을 위해 공급할 열원으로 연료전지에서 발생하는 연료극 미반응 가스를 사용한 것이 아니라, 메탄, 또는 수소 만이 고려되었기 때문에 실제 통합형 반응기의 거동을 모사하기에 미흡한 점이 있었다.

본 연구에서는 고온 발전용 연료전지 시스템의 연료극 미반응 가스를 연료로 하는 촉매연소기에서 발생하는 열을 수증기 개질기의 열원으로 사용하는 통합형 반응기에 대한 실험을 수행하였고, 실험결과로부터 통합 반응기의 연료전지 외부 개질기로서의 활용 가능성을 파악하고자 하였다. 또한 MCFC 및 SOFC의 연료극 미반응 가스의 두 가지 가스 조성에 대해 실험을 수행하여 각각의 경우 반응기 성능 비교를 수행하였다. 이렇게 도출된 결과는 촉매 연소-개질반응이 복합된 통합형 반응기에서 연소 반응에 따른 개질성능을 예측할 수 있는 기초 데이터로 활용할 수 있으며, 통합 반응기 설계 자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 실험 장치

2.1 촉매연소-개질 통합 반응기 구조

본 연구에 사용한 촉매 연소기-개질기 통합 반응기의 반경 방향과 축 방향 단면도는 Fig. 2에 나타내었다¹⁾. 내부에는 연료전지 미반응 가스를 촉매 연소할 연소 영역이 구비되고, 외부에는 탄화수소를 수소로 변환시킬 개질 영역으로 나누어져 있다. 연소 영역은 내경 40mm에 두께 2mm의 디멘존을 가지며, 개질 영역은 내경 80mm 있다. 축방향의 길이는 약 270mm이며, 개질 외부 영역에는 열손실을 방지하기 위하여 단열 처리를 하였다. 연소 영역에서 발생한 열이 개질 영역에 원활히 전달되도록 하기 위하여 핀(fin)을 삽입하였다. 핀은 연소 영역에 6개, 개질 영역에 12개를 삽입하였으며, 각각의 핀은 표면적 증가를 위해 표면에 홈을 제작하였다. 또

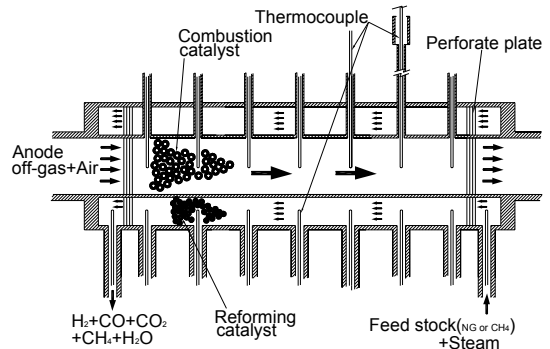


Fig. 2 Cross-sectional diagram of a integrated reactor¹⁾

한 열전달 효과가 최대로 일어나게 하기 위하여 연소 가스 및 개질 가스의 공급은 대향류로 하였다.

입구측과 출구측에는 공통적으로 다공관을 설치하여 연소측 및 개질측에 흐르는 가스가 채널링 없이 균일한 가스 흐름이 되도록 유도하였다^{1,13)}. 이 다공관은 이전의 연구에서 이미 제안된 것을 적용한 것으로 본 연구의 반응기에서 안정적인 동작조건을 위하여 입구가스 흐름의 균일성이 확보하고자 하였다. 연소 가스 및 개질가스가 반응 영역 내에서 이동할 때의 온도 변화를 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 열전대를 연소 영역과 개질 영역에 7개씩 설치하였다. 열전대는 축방향으로 일정간격으로, 반경 반향으로는 중심에 위치 되도록 설치하였으며, 외경 1.6mm의 K타입 열전대를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 연소 촉매의 경우에는 팔라듐과 백금(Pd/Pt)을 기본으로 한 외경 5mm 실린더 형태의 펠렛 촉매를 사용하였고, 개질 촉매로는 저온에서 활성이 우수하다고 알려진 루세늄(Ru)을 기본으로 한 외경 3mm 구형 촉매를 사용하였다.

2.2 실험 장치 구성

실험 장치 개략적 구성은 Fig. 3에 나타내었다. 연료전지의 연료로 사용되는 개질 영역의 가스는 물과 수증기로 구성되고, 연료전지 미반응 가스가 공급되는 연소 영역의 가스는 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 그리고 수증기의 혼합물로 구성된

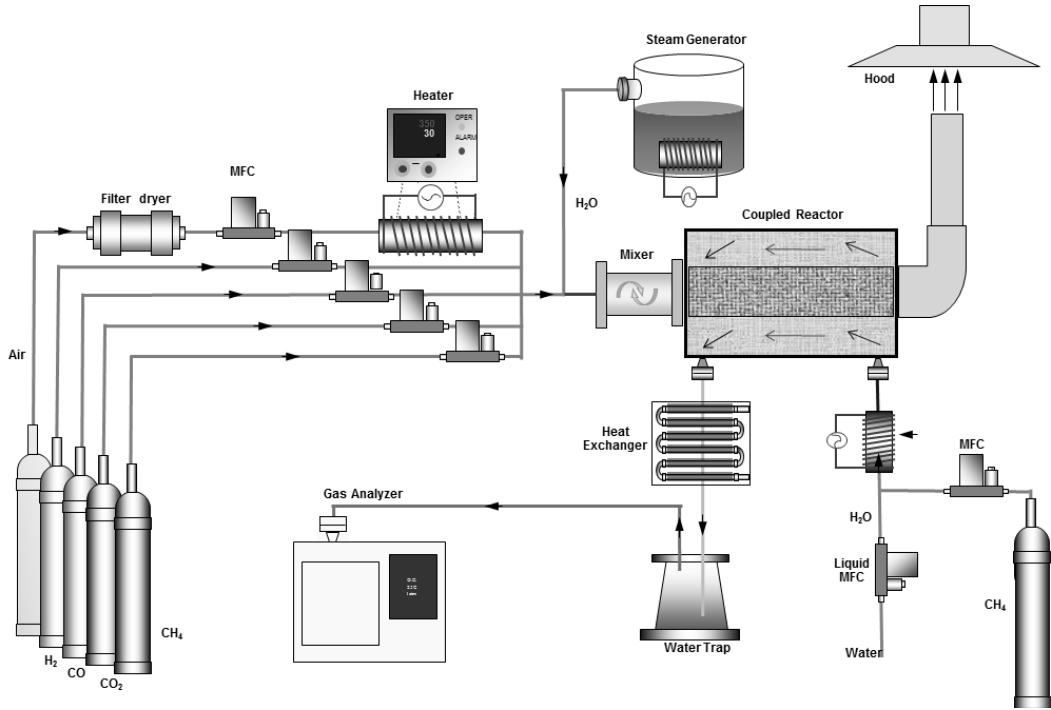


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

다. 연소 영역의 가스 혼합물은 실제 연료전지에서 발생하는 미반응 가스가 아닌 연료전지에서 열역학적으로 발생하는 미반응 가스를 계산하여 모사하였으며, 개질 영역은 연료전지 1kW에 필요한 연료량을 열역학적으로 계산하여 공급하였다. 개질 및 연소 영역의 가스 공급은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 공급하였다.

연소 영역의 공기는 필터 및 드라이어를 거쳐 수분이 제거된 건공기를 펌핑하여 사용하며, 이산화탄소와 혼합하여 전기 히터를 이용하여 가열한 후 반응기에 공급하였다. 연소측 수증기는 전기 히터를 설치하여 물을 가열한 후 수증기 상태로 공급하였다. 또한 모든 기체는 연소 영역에 공급되기 전에 잘 섞이도록 하기 위하여 반응기 입구 부근에 믹서를 통한 혼합 영역을 설치하였다. 개질 영역은 기체 MFC와 액체 MFC를 사용하여 물과 메탄이 혼합된 후에, 증발부에서 전기 히터를 통해 기체 상태가 되도록 가열하였다.

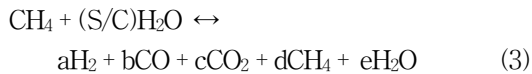
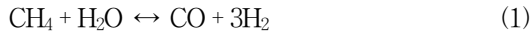
가스 분석은 열교환기를 거쳐 수분을 응축, 제거한 후에 가스 크로마토그래피에 공급하여 농도 분석을 하였다. 가스 크로마토그래피는 Agilent 사의 7890A 모델을 사용하였으며, 개질 가스의 농도 분석을 위하여 TCD(thermal conductivity detector) 방식을 사용하는 Supelco 사의 CARBOXEN 1000 모델을 이용하였다.

2.3 실험 조건 설정

본 연구에서 MCFC와 SOFC의 목표 전력은 1kW로 가정하였다. 이 때 연료전지에 공급되어야 하는 연료 공급량은 개질기로부터 공급받아야 하는 수소와 이산화탄소의 혼합량이며, 전기화학적으로 구하였다. 개질기에서의 수증기/탄소 비는 3.0, 최고온도는 650°C와 700°C라고 각각 가정한 후에 배출되는 개질 가스의 양을 결정하였다.

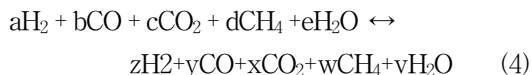
일반적으로 메탄-수증기 개질 반응에서의 평형

조성은 Xu 등¹⁴⁾에 의해 연구되었고, 아래의 관계식 (1), (2)로 제안되었다. 이를 참조하여 본 연구에서는 개질 반응의 생성물이 식 (3)과 같이 형성된다고 가정하였다.



여기서 S/C는 수증기/탄소 비를 나타낸다. 전술한 바와 같이, 저온형 연료전지에서 촉매를 피독시키 것으로 알려진 일산화탄소는 고온형 연료전지인 MCFC와 SOFC에서 연료로 사용될 수 있다. 그러므로 수성-가스 전이 반응은 고려되지 않았고, 개질 후에 생성된 개질 가스는 MCFC와 SOFC의 연료극으로 공급된다. 개질기에서 생산된 수소와 일산화탄소량의 합과 1kW의 전력을 생산하기 위해 필요 연료량의 비교를 통해, 개질기로 공급될 메탄과 수증기의 양을 계산할 수 있다.

연료전지에서는 연료전지의 종류, 전기화학반응의 메커니즘 및 연료 이용율(fuel utilization; u_f)에 따라 연료극 미반응 가스의 연료 성분과 불활성 성분이 달라지게 된다. 그러므로 연료극 입구와 출구에서의 반응은 다음의 식 (4)와 같다고 가정하였다. 화학당량 계수 $z \sim v$ 는 연료전지의 종류와 반응온도를 고려하여 열역학적으로 계산할 수 있다.



이 가스 혼합물 중에서 수소와 일산화탄소는 연료 이용률 만큼 반응을 하며, 나머지 가스들은 반응되지 않고 배출된다. 위의 식 (4)에서 결정된 혼합가스 성분의 조성은 다시 연료전지의 반응 온도와

Table 1 Gas compositions for coupled reactor in the standard conditions

Reformer inlet(slpn)		
	MCFC	SOFC
CH ₄	4.62	4.62
H ₂ O	13.85	13.85
Combustor inlet(slpn)		
H ₂	5.63	6.77
CO	2.06	0.93
CO ₂	13.30	3.68
CH ₄ (ppm)	58.7	20.9
H ₂ O	12.86	12.02
Air	44.86	64.18

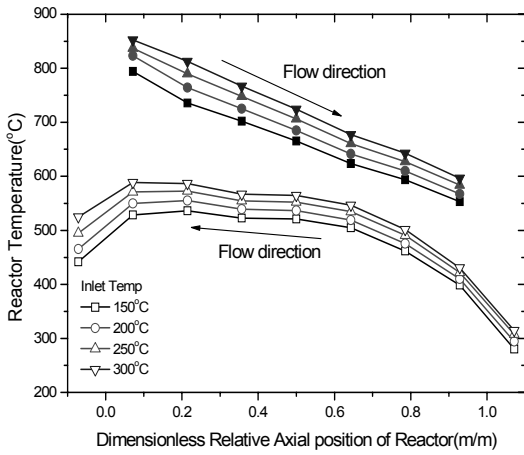
압력 하에 화학적 평형을 이루게 되고, 최종적으로 촉매 연소기의 사용 연료가 된다.

촉매연소기에서 연소 반응을 통해 생성된 열은 개질기에 공급이 되며, 이때 외부 공기를 이용하여 미반응 가스를 연소시킨다. 연료극 미반응 가스를 연소하기 위해 공급된 공기량(과잉 공급 공기비, λ)은 실험 시 촉매 내구성을 고려하여 기준점을 결정하였다. 이때 연료극 미반응 가스중에 포함된 가연성 성분 (H₂/CO/CH₄)을 완전 연소시키는데 필요한 화학당량적 공기량에 대한 이온 공급공기량의 비를 λ 로 표현하였다.

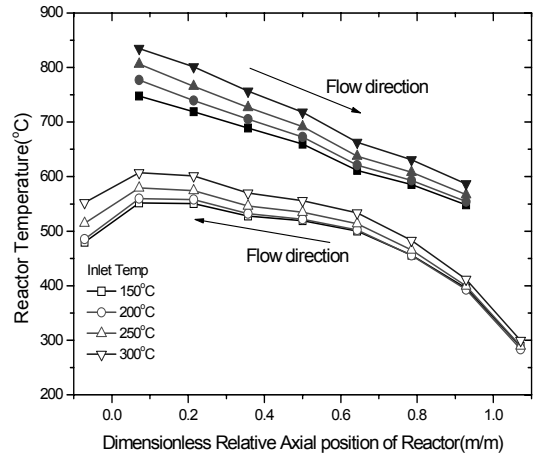
이러한 절차에 따라 구해진 기본 실험 조건과 실험 유량은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Standard operating conditions for coupled reactor at MCFC and SOFC

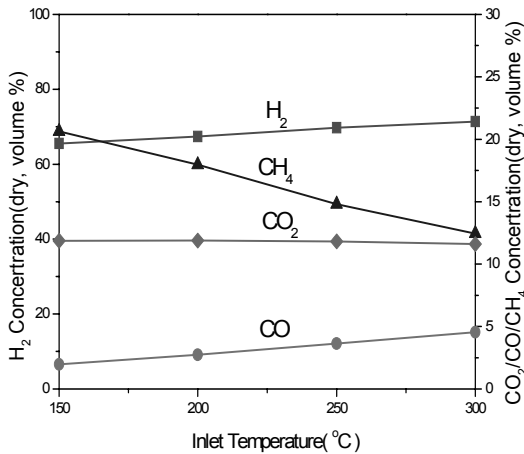
Operating parameters	MCFC	SOFC
Inlet temperature(°C)	300	300
Fuel utilization(% , u_f)	60	60
Steam to carbon ratio(S/C)	3	3
Excess air ratio(λ)	2.5	3.5



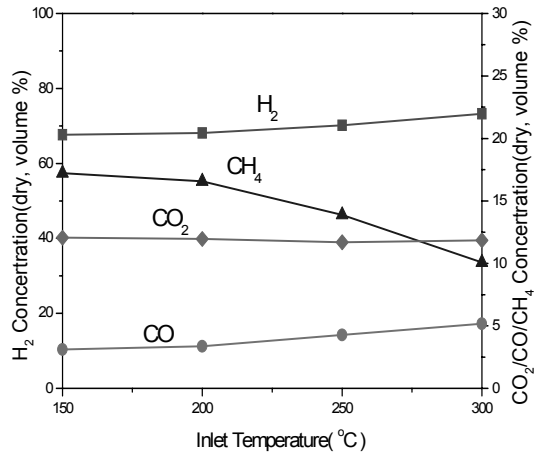
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 4 Performance data for the integrated reactor with respect to inlet temperature for MCFC conditions: (a) temperature profile and (b) reformate composition

Fig. 5 Performance data for the integrated reactor with respect to inlet temperature for SOFC conditions: (a) temperature profile and (b) reformate composition

3. 결과 및 토의

3.1 입구 온도의 영향

MCFC와 SOFC 스택에서 발생하는 연료전지 미반응 가스의 온도는 650~800°C의 온도 범위를 갖는다. 이 연료전지 미반응 가스는 공기와 함께 섞여 촉매 연소기로 들어가게 된다.

Fig. 4(a)는 MCFC 조건에서 촉매 연소기 입구 온도에 따른 촉매 연소기와 개질기의 온도 분포를

나타내고, Fig. 4(b)는 촉매 연소기 입구 온도에 따른 개질 성능을 나타낸다. Fig. 5는 SOFC 조건에서의 온도 분포와 개질 성능을 나타낸다.

한편, 연소 촉매의 사용 최고온도가 너무 높게 되면 활성점의 열화 및 소결 등에 따른 촉매 내구성이 저하되기 때문에 최고 사용 온도를 가능한 900°C가 넘지 않도록 하는 것이 좋다. 이를 위하여 촉매연소기 입구 공기량을 조절하여 촉매 연소기의 입구 부근의 반응 온도가 900°C를 넘지 않도록 조절하였다.

그 결과 Fig. 4와 Fig. 5는 MCFC 조건에서는 과잉 공기비 2.5에서, SOFC 조건에서는 과잉 공기비 3.5 가 이 반응기에 적정 수준임을 확인하였고, 각 조건의 기준점에서의 공기비로 선정 하였다.

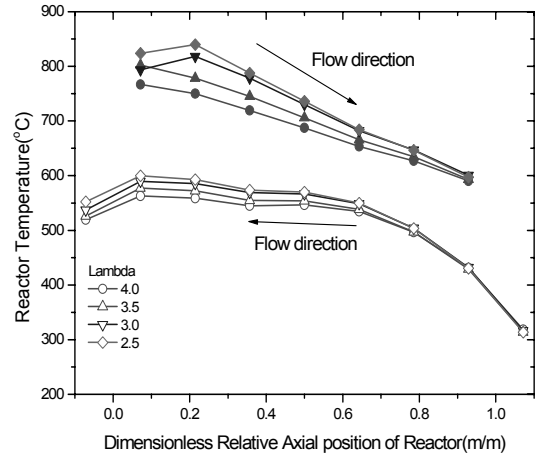
Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 MCFC의 경우에는 연소기 입구 조건이 150°C에서 300°C로 증가함에 따라 연소측 최고 온도가 794°C에서 852°C로 증가하였고, 개질측 최고온도는 528°C에서 589°C로 증가하였다. 반응기의 전영역에서 입구온도의 증가에 따라 거의 일정한 간격을 두고 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 4(b)에서 나타났듯이 입구 온도에 따라 개질조성은 입구온도에 따라 선형적으로 증가 혹은 감소하는 경향을 보였다. 수소수율은 65.5%에서 71.4%로 증가하였고, 메탄 농도는 20.6%에서 12.5%로 감소하였다.

Fig. 5(a)에서 보듯이 SOFC의 경우에도 입구온도의 증가에 따라 연소기와 개질기의 온도가 단계적으로 증가하는 경향을 나타내었다. SOFC의 경우에는 연소기 입구 조건이 150°C에서 300°C로 증가함에 따라 연소측 최고 온도가 747°C에서 835°C로 증가하였고, 개질측 최고온도는 551°C에서 607°C로 증가하였다. 이때 연소측 최고온도와 개질측 최고온도의 차이가 평균 210°C 가량으로 나타났으며, 이는 MCFC의 경우 평균온도 차이값인 260°C에 비하여 많이 감소하였다. MCFC의 최고온도가 더 높음에도 불구하고, 개질온도는 SOFC가 더 높게 나타났으며, 이는 전체 유량이 더 많아서 개질 측으로 더 많은 열을 전달하였기 때문으로 판단된다.

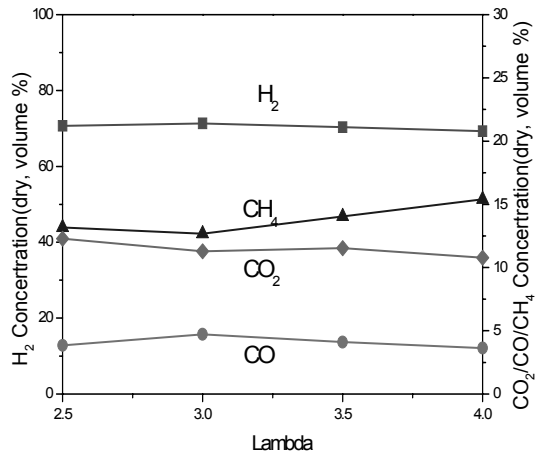
Fig. 5(b)에서 나타나듯이 수소수율은 67.6%에서 73.2%로 증가하였고, 메탄 농도는 17.2%에서 10.0%로 감소하였다. 이는 앞서 언급한바와 같이 SOFC의 경우 개질측 최고온도가 증가함으로써 개질 성능이 향상되었기 때문이다.

3.2 과잉 공기비의 영향

MCFC, SOFC 각각의 조건에서 과잉 공기비를 2.5에서 4.0까지 변경하여 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 과잉 공기량에 따른



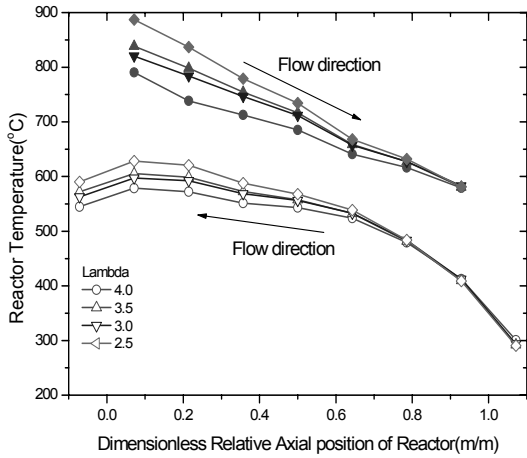
(a)



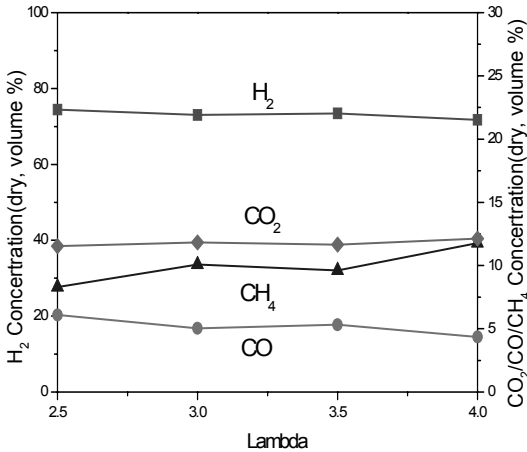
(b)

Fig. 6 Performance data for the integrated reactor with respect to excess air ratio for MCFC conditions: (a) temperature profile and (b) reformate composition

온도 변화 그래프인 Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 과잉 공기비가 증가함에 따라 연소기 입구측 온도는 감소하였다. MCFC조건에서 과잉공기비를 2.5에서 4.0으로 증가시키는 경우 연소기 최고 온도는 840°C에서 767°C로 감소하였다. 한편 연소기 출구부의 온도는 입구온도 변화 때와는 달리 온도가 수렴하는 경향을 나타내었다. 이는 과잉공기비의 변화에 따라 단열화염온도가 변하기 때문에 입구온도에서는 큰 차이가 나지만, 연소기의 연료



(a)



(b)

Fig. 7 Performance data for the integrated reactor with respect to excess air ratio for SOFC conditions: (a) temperature profile and (b) reformate composition

량의 변화는 없으므로 발열량이 차이가 나지 않기 때문이다.

개질층의 온도는 600°C에서 562°C로 감소하며, 연소기 입구온도의 변화량에 비하여 그 변화가 상대적으로 크지 않았다. 이는 과잉공기비가 큰 조건에서는 그만큼 유량이 커지기 때문에 최고온도는 감소하나 유량이 커지기 때문에 열교환 성능이 향상되기 때문이다.

Fig. 7에서 보듯이 SOFC 조건에서도 마찬가지로

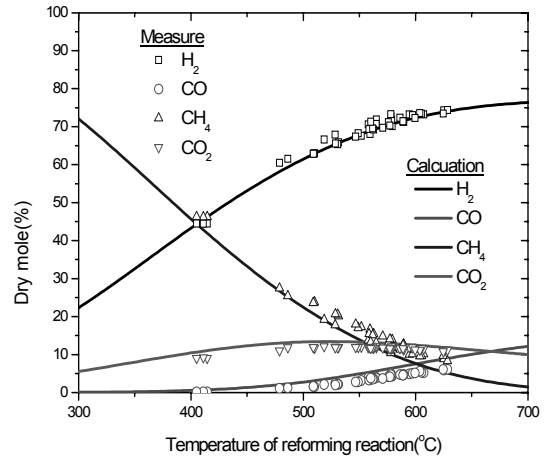


Fig. 8 Comparison of the reformate composition between experimental data (dot) and thermal equilibrium data calculated at maximum reformer temperature (line)

지로 연소기 출구온도가 수렴되는 현상과 개질층 온도차이가 줄어드는 현상이 관측되었으며, 이는 같은 이유 때문으로 보인다. MCFC 조건에 비하여 SOFC의 경우에 개질층 최고 온도 차이가 커졌는데, 이는 앞서 입구온도 변화 시와 마찬가지로 상대적으로 전체유량이 증가되기 때문으로 보인다.

Fig. 6(b)의 MCFC 조건에서 과잉공기비가 2.5에서 4.0으로 증가할 때, 수소 생성량은 69.3%에서 70.7%로 증가하였다. Fig. 7(b)의 SOFC 조건에 수소수율은 71.7%에서 74.4%로 증가하였다. 개질층 온도 변화에서 예상된 바와 같이 SOFC조건에서의 수소수율이 MCFC 조건보다 우수하며, 메탄 조성도 4~5% 가량 감소하는 경향을 나타내었다.

3.3 개질 평형조성 비교

본 연구에 사용된 반응기의 총괄 개질 성능을 파악하고자 측정된 개질 조성을 개질기 최고 온도에서 계산한 열적 평형 조성과 비교하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 모든 조성은 수분을 제외한 수소, 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소의 부피 비율을 도시한 것이다. 여기서 실선은 개질기의 최고 온도에 따라 계산된 평형 조성에서의 수율을 나타

내고, 표식은 개질기에서의 최고 온도와 그에 상응하여 측정된 개질가스의 부피 비율을 나타낸다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 본 연구에 사용된 촉매연소기-개질기 통합 반응기에서의 측정조성이 다소 오차가 있으나 전체적으로는 계산된 평형값을 잘 추종함을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

고온 연료전지 시스템에서 연료전지 미반응 가스를 열원으로 사용하는 촉매 연소기-개질기 통합 반응기에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 연소기 입구온도의 증가와 과잉공기비의 감소는 촉매연소기 최고온도를 증가시켰으며, 촉매연소기의 온도가 높을수록 개질기 최고 온도가 증가하여 개질 성능을 향상시키는 결과를 가져왔다.
- 2) SOFC 스택에서 발생하는 미반응 가스의 연료 성분은 MCFC 스택에서 발생하는 미반응 가스에 비해 상대적으로 가연성 성분이 농후하였다. 이에 따라서 SOFC 조건에서 상대적으로 혼합기체의 유량이 증가하기 때문에 같은 촉매연소기 온도 조건에서 MCFC 조건 보다 나은 개질 성능을 나타내었다.
- 3) 본 통합 반응기에서의 실험적 결과는 개질기 최고온도에서 계산된 열역학적 평형 조성 그래프를 잘 추종하였다.

참 고 문 헌

- 1) 강태규, 유상석, 김용모, 안국영 “촉매연소를 이용한 동심 원관형 반응기 내의 수증기 개질 반응에 관한 실험적 연구” 대한기계학회 논문집 B권, 제34권 제 4호, 2010, pp. 375-381.
- 2) Kimijima, S., Kasagi, N., “Cycle analysis of micro gas turbine-molten carbonate fuel cell hybrid system”, JSME International Journal Series B, Vol. 48, No. 1, 2005, p. 65.

- 3) Larminie, J., Dicks, A., “Fuel cell systems explained”, 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2003, pp. 229-230.
- 4) Ohayre, R., Cha, S. W., Colella, W., Prinz, F. B., “Fuel cell fundamentals”, 1st ed., New York : John Wiley & Sons, 2006, pp. 244-263.
- 5) 박준근, 이신구, 임성광, 배중면, “천연가스로부터 수소를 생산하기 위한 수증기 개질기의 작동조건과 형상에 대한 수치해석 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제33권 제1호, 2009, pp. 60-67.
- 6) Hori, M., Matsui, K., Tashimo, M., Yasuda, I., “Synergistic Hydrogen Production by Nuclear-heated Steam Reforming of Fossil Fuels”, Progress in Nuclear Energy, Vol. 47, No. 1-4, 2005, pp. 519-526.
- 7) He, W., Hemmes, K., “Operating Characteristics of a Reformer for Molten-Carbonate Fuel-cell Power-generation System”, Fuel Processing Technology, No. 67, 2000, pp. 61-78.
- 8) Pfeifer, P., Schubert, K., LIAUW, M. A., Emig, G., “Electrically Heated Micro-Reactors for Methanol Reforming”, Chemical Engineering Research & Design, Vol. 81, No. 7, 2003, pp. 711-720.
- 9) Ramaswamy, R. C., Ramachandran, P. A., Dudukovic, M. P., “Coupling exothermic and endothermic reactions in adiabatic reactors”, Chemical Engineering Science, Vol. 63, 2008, pp. 1654-1677.
- 11) Kirillov, V. A., Fadeev, S. I., Kuzin, N. A., Shigarov, A. B., “Modeling of a heat-coupled catalytic reactor with co-current oxidation and conversion flows”, Chemical Engineering Journal, Vol. 134, pp. 131-137.
- 12) Mei, H., Li, C. Y., Ji, S. F., Liu, H., “Modeling of a metal monolith catalytic reactor for methane steam reforming-combustion coupling”, Chemical Engineering Science, Vol. 62, 2007, pp. 4294-4303.

- 13) Yu, S. S., Hong, D. J., Lee, Y. D., Lee, S. M., Ahn, K. Y., "Development of a catalytic combustor for a stationary fuel cell power generation system", *Renewable Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 1083-1090.
- 14) Xu, J., Froment, G. F., "Methane Steam Reforming Methanation and Water-gas Shift-1", *AIChE Journal*, Vol. 35, No. 1, 1989, pp. 88-96.