

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.6.641

ISSN 1226-4881

운전조건 변경에 따른 통합형 촉매연소-개질반응기의 열적 거동 및 반응 특성§

강태규* · 이상민**† · 안국영** · 김용모*

*한양대학교 기계공학과, **한국기계연구원 신재생청정시스템 연구실

Thermal Behaviors and Reaction Characteristics of an Integrated Reactor with Catalytic Combustion-Reforming According to Operation Conditions

Tae Gyu Ghang*, Sang Min Lee**†, Kook Young Ahn** and Yong mo Kim*

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

** Korea Institute of Machinery and Materials.

(Received June 7, 2010 ; Revised March 16, 2011 ; Accepted March 28, 2011)

Key Words : Steam Reforming(수증기개질), Catalytic Combustion(촉매연소), S/C(Steam-to-Carbon ratio 수증기/탄소의 몰비)

초록: 고온 발전용 연료전지인 MCFC의 연료극에서 방출되는 미반응 가스를 촉매연소의 열원으로 사용하고, 촉매연소 반응에 의해 발생한 열을 개질 반응에 필요한 공급열로 이용하는 통합형 촉매연소-개질 반응기에 있어서 MCFC의 운전 조건 변경에 따른 반응기의 열적 거동과 반응 특성을 실험적으로 연구하였다. 특히, 연료극에서 연료 이용률을 변동될 때 슬립가스의 조성이 바뀌는 것을 고려하여 촉매연소 측에 공급해줄 혼합가스의 조성을 실험조건으로 설정하였다. 또한 개질측에서는 S/C(수증기/탄소)의 비를 운전조건의 변동 조건으로 설정하였다. 실험적으로 얻어진 데이터는 보다 현실적인 통합형 촉매연소-개질반응기를 설계하고 제작하는데 필요한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: Off-gases emitted from the anode of a molten carbonate fuel cell (MCFC) at high temperatures for power generation are used as fuel in catalytic combustion. The heat generated in the catalytic combustor is utilized as the heat for the endothermic reaction required for steam reforming. Among the various operational conditions of the integrated reactor, we varied the inlet gas compositions of the catalytic combustor according to fuel utilization in the MCFC and the ratio of steam to carbon in the reformer. Subsequently, the thermal behaviors and reaction characteristics of the integrated reactor were investigated experimentally. The fundamental data from this experimental study will be useful for the design and fabrication of a more practical integrated reactor in the future.

1. 서론

인류의 지속가능한 발전을 위해서 새로운 에너지원에 대한 기대가 그 어느 시기 보다 큰 것 같다. 특히 대체에너지로 각광 받는 수소에 대한 관심은 하루가 다르게 커지고 있으나, 지구상에 풍부한 물로부터 직접 수소를 제조, 이용, 저장,

분배에 따르는 인프라는 현재 까지 갖추어지지 않고 있어, 수소경제로 완전히 진입하는 데는 많은 노력이 필요할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 현재의 과학기술 수준에서는 화석연료로부터 수소를 좀 더 용이하고 직접적으로 추출하여 이용하는 다양한 방법들이 연구되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

특히 이러한 방법들 중 수소를 이용하는 발전 시스템으로 고온 발전용 연료전지(fuel cell) 시스템이 대두되었다. 연료전지는 수소를 연료로 공급받아 전기화학반응에 의해 전력을 생산하므로 기존의 발전시스템에서 제기되어 오던 대기오염 문제도 동시에 해결할 수 있어, 미래의 분산발전

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부분 춘계학술대회(2010. 5. 28., 한국과학기술회관) 발표논문임

* First Author, navier68@naver.com

† Corresponding Author, victlee@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

형 산업을 주도할 대안으로 에너지 활용도가 높은 기술로 제안된다.⁽⁵⁾

수소를 이용하는 발전시스템으로서 Fig. 1은 고온 발전용 연료전지의 하나인 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell) 발전시스템을 개략적으로 나타낸 것이다. 특히 이 그림에 본 연구에서 관심을 가지는 통합형 촉매연소-개질기의 열전달 과정을 정성적으로 도시하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 MCFC에 다량의 수소를 공급하기 위한 외부 개질시스템에서 개질기(reformer)는 시스템을 구성하는 주요 장치중 하나이다. 또한 수소를 얻어내는 개질반응 자체가 많은 열이 필요한 흡열반응(endothermic reaction)이므로 발전시스템 내/외부로부터 열원으로 사용될 별도의 퍼실리티가 반드시 마련되어야 한다.

통상적으로 MCFC의 연료극(anode)에서는 연료전지 특성상 공급된 연료가 모두 반응하지 못하고 슬립(slip)되게 된다. 이때 스택(stack)자체의 연료이용률을 감안하면 미반응 슬립가스를 이용하여 외부개질에 필요한 열원으로 사용할 방안을 Fig. 1과 같이 생각할 수 있게 된다. 즉, 연료극에서 배출되는 미반응 슬립가스는 상대적으로 저발열량의 가연성 가스혼합물이므로 일반적인 연소를 이용하는 것 보다는 연소촉매를 이용하여 연소시킴으로서 열을 추출하는 것이 바람직하다.^(2,4,6) 또한 MCFC 스택의 공기극(cathode)에서는 지속적으로 CO₂를 공급 받아야 되는데, 촉매연소 반응을 거친 연소측 배기가스는 MCFC의 공기극에 재공급될 수 있다.

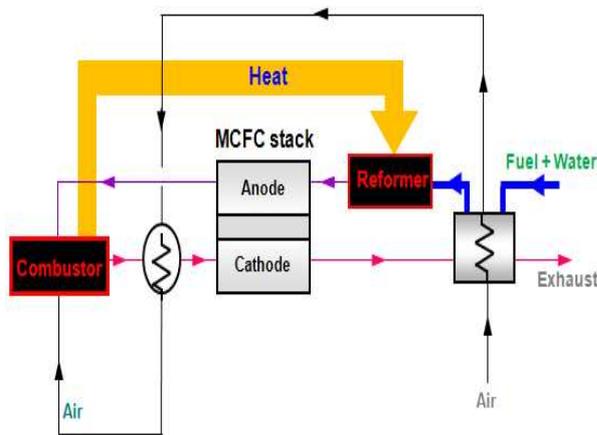


Fig. 1 Schematic diagram of a MCFC power generating system

촉매연소반응과 개질반응이 통합된 반응기에서 에너지효율을 증대시킨다는 관점에서 열교환기형 2중 원형관을 이용하여 고온 유체로부터 저온 유체로 열전달을 증진시키는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.^(4,6) 그 양측 유체는 단상과 2상인 경우가 있으며, 각 경우에 열전달의 증진은 유동의 방향 변화, 관의 인공적 거칠기(흰, 리브, 주름 등)를 부착하는 방법 등이 이용되고 있으며, Ghang 등은 홈이 파인 흰(fins)을 부착한 2중 동심관 반응기를 제작하여 실험한 연구 결과를 발표하였다.⁽⁶⁾ 한편, 본 연구에서 유동방향에 따른 통합형 촉매연소-개질반응기의 성능 결과는 Ghang 등이 제시한 이전 연구결과를 참조하였다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 Fig. 1에서 보는 MCFC 발전시스템의 외부개질형 촉매연소-개질반응이 통합된 2중 동심관 반응기에 있어서 시스템 전체적인 운전조건 변화에 관심을 갖고, 반응기의 성능을 파악하고자 하였다. 특히, MCFC용 외부 개질기는 연료전지 스택의 연료극에는 수소를, 공기극에는 CO₂를 공급하는 역할을 담당해야 할 뿐만 아니라 저 발열량의 연료극 배가스를 개질 반응의 열원으로 사용하기 때문에 발전 부하의 변화에 빠르게 대응할 수 있어야 한다.⁽²⁾ 또한 연소측과 개질측간에 열전달이 잘 이루어지는 구조로 소형이면서 간단해야 좋을 것이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 촉매연소-개질 통합형 반응기가 MCFC와 연동된 경우, 전체시스템에서 부하 변화에 대한 반응기의 열적거동과 반응특성을 실험적으로 밝혀 설계 자료로 확보하고자 하였다.

2. 실험장치 구성

본 연구의 실험장치 구성에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 촉매연소-개질반응이 동시에 발생하는 통합형 반응기는 2중 동심관 반응기로서 이것은 이전에 발표된 논문에서와 같은 형상의 것을 이용하였다.⁽⁶⁾ Fig. 3에서 반응기의 내부 원통의 내경은 약 40mm이고 관의 두께는 4mm, 외부 원통의 내경은 약 80mm이며, 총 길이는 약 30cm이다. 2중 동심관의 내부 원통에는 평균직경 5mm인 팔라듐(Pd)계 연소촉매를 빈공간 없이 완전히 충전하였다. 이렇게 한 이유는 촉매성능을 공간속도 기준(18000hr⁻¹)으로 하였기 때문으로 본

연구에서는 실험조건에 따라서 공간속도는 7000~18000hr⁻¹이다. 또한 개질층에는 니켈(Ni)계를 기반으로 한 평균직경 3mm인 구형 개질촉매를 충전하였으며, 일반적으로 개질반응에서 널리 통용되는 공간속도 값인 1000hr⁻¹을 기준하였고 본 실험에서는 유량에 따라서 800~1400hr⁻¹까지 변화된다.

내부원통에서의 연소반응온도와 환상공간에서의 개질반응온도를 측정하기 위하여 반응기의 축방향(유동방향)으로 각각 7개의 K형 열전대를 중심부까지 관통하여 삽입하여 길이방향 온도변화를 측정할 수 있도록 반응기를 제작하였다. 또한 반응기 입구 전 약 40cm 지점에 MCFC의 연료극에서 배출되는 가스가 섞이는 가스혼합부를 구성하였다.

Xu 등⁽⁸⁾에 따르면, 수증기 개질반응에서의 평형 조성은 반응관계식 (1), (2)로 주어질 수 있다고 하였다.

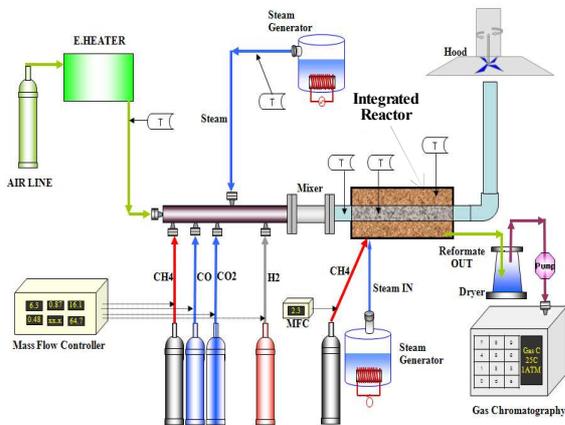
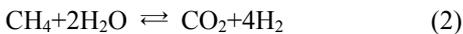
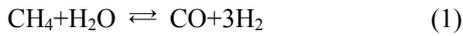


Fig. 2 Experimental apparatus for performance evaluation of integrated reactor⁽⁶⁾

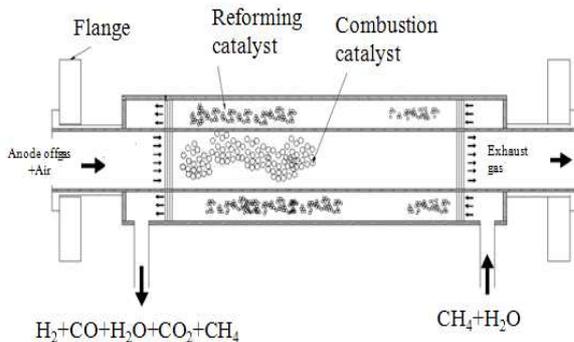


Fig. 3 Section view of Integrated Reactor

개질기에서의 S/C비 변동과 개질반응 온도에 따라서, 개질된 가스의 성분이 식 (1), (2)에서 제시한 조성외에도 이산화탄소, 미반응 메탄 및 수증기의 5가지 주성분으로 이루어 진다.^(2,4,5)

MCFC의 연료극에서 전기화학 반응에 참여하지 못하고 슬립되는 가스는 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄 및 스팀으로서, 본 실험적 연구에서는 MCFC를 직접 운용한 것이 아니기 때문에 MCFC에서 배출되는 혼합 가스는 종류별로 준비하여 질량유량계(mass flow controller)를 이용하여 가스 혼합부로 공급된다. 이때 각 가스별 농도는 99.99% 이상의 고순도 가스를 이용하였고, MCFC의 운전 조건 변경에 따른 가스 체적유량을 실험 조건별로 공급한다.

촉매연소에 필요한 공기는 외부에 마련된 전기히터에 의해서 촉매연소를 개시하는데 필요한 최소한의 온도로 가열되어 가연성 슬립 가스혼합물과 혼합부에서 섞이고 촉매연소기 입구 전단에 마련된 나선형 가스믹서(static mixer)를 거쳐 혼합이 더욱 균질하게 된 후, 2중 동심관 반응기의 중심부에 위치한 촉매연소기로 공급되게 된다.

수증기(steam)의 경우, 수증기 제조 장치로 물을 가열하여 촉매연소기로 들어가기 직전의 슬립가스와 가스혼합부에서 혼합시켜 촉매연소기로 공급된다. 개질층의 메탄과 스팀은 별도의 스팀 제조장치로 물을 가열하여 실험 조건 S/C비에 맞는 스팀 유량 만큼 제조한 후, 개질기 입구측에 마련된 혼합부로 공급하여 별도의 공급라인에서 나온 메탄과 섞인후 개질층의 개질촉매를 통과하도록 한다.

개질된 혼합가스는 열교환기를 거쳐서 냉각하여 수분을 응축, 제거시키고 다시 건조기(dryer)를 통과한 가스만 포집하여 가스크로마토그래피(gas chromatography) 기기인 Agilent사의 7890A 가스농도분석기를 통과시켜서 농도분석을 하였다. 잔류 메탄의 농도분석을 위하여 FID분석용 모세관으로는 J&W사의 GS-GASPRO(30m×0.32mm)를 사용하였고, 다른 성분의 가스 농도분석에 대해서는 TCD방식으로 Supelco사의 CARBOXEN1000모델을 이용하였다.

3. 실험조건 설정 및 방법

실제 MCFC와 외부 개질형 발전시스템을 하나

의 통합시스템으로 구성하였다고 가정하면, 어느 하나의 단독장치에서 운전조건이 변동하게 되면 나머지 작동 유체라인 전체에서의 가스조성과 유량을 바꾸게 되는 효과를 갖는다. 따라서 임의로 촉매연소기 또는 개질기에서 하나의 운전 조건을 고정한 상태에서 다른 관련 장치의 성능 특성을 관찰하는 것은 전체 시스템의 열적거동을 총괄적으로 파악하는데 한계가 있다고 보여진다. 이렇듯 종래의 연구는 운전조건을 하나로 고정하여 실험한 예가 발표되었다.^(2,6)

본 실험적 연구에서의 개질반응기에서는 수증기/탄소의 비가(steam to carbon : S/C ratio) 2.5, 3.0, 3.5로 변할 수 있다고 상정하였다. 따라서 개질된 수소와 일산화탄소가 공급되는 MCFC의 운전 조건은 이에 순응하여 자동으로 변하게 될 것이다. 이렇게 설정한 S/C비 변동에 따라서 수증기개질 화학반응에 따른 개질기 출구에서의 열역학적 평형상태에서의 조성량을 계산하였고, 구해진 수소성분이 농후한 가스조성이 MCFC의 연료극으로 공급된다고 볼 수 있다. 이때 MCFC 스택(stack) 내에서의 연료이용률(fuel utilization : U_f)이 50, 60, 70%로 변하는 것으로 가정하면, 연료이용률을 고려한 전기화학반응이 MCFC 스택내에서 발생하고, 반응후 남은 슬립 가스의 조성을 결정할 수 있게 된다. 이 가스 배출물이 결국 촉매연소기에서 열원으로 쓰일 가연성 가스의 주성분이 된다.

개질기출구 온도조건도 다양할 것이나 본 연구에서는 MCFC의 연료전지 반응온도가 650~680°C인 것을 고려하여 개질기출구에서의 온도는 700°C로 고정한 상태로 실험조건을 정하였다.

위와 같이 개질측에는 S/C비의 3가지 변동조건

및 이 조건에 따르는 MCFC 연료이용률 U_f 의 3가지 변동조건 조합으로 총 9가지 실험조건을 설정할 수 있었고, 시스템의 운전조건 변동에 따른 각 실험 조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 각 실험조건은 어느 하나도 고정적으로 정해지지 않음을 알 수 있다. 따라서 촉매연소기에서 최대의 열을 얻어내기 위하여 필요한 연소용 공기량도 당량비에 따라서 각 조건별로 달라지게 된다. 이 공기량 값(당량비의 역수인 λ 를 사용)은 연소촉매의 내구성 과 연소촉매의 최고 사용온도를 고려하여, 본 실험에서는 연소촉매의 최고온도가 850°C를 가능한 넘어가지 못하도록 공급 공기량을 $\lambda=1.5\sim 3.0$ 까지 조절해 가면서 실험을 행하였다. 온도의 상한선을 이렇게 설정한 이유는 이 온도값 이상에서는 Pd계열 촉매와 촉매지지체의 상변태로 인하여 표면 화학반응에 필요한 내부 표면적이 격감되어 촉매의 활성이 감소하기 때문이다.⁽⁹⁾

본 실험에서는 연소측과 개질측의 가스흐름은 대향류 흐름에 대해서만 실험을 진행하였는데, 그 이유는 열전달 관점에서의 이전 연구결과를 바탕으로 하여 병류흐름은 생략하였다.⁽⁶⁾

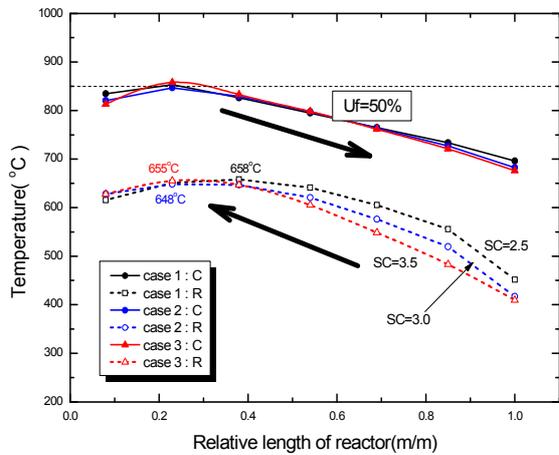
4. 결과 및 고찰

4.1 S/C의 관점에서 고찰

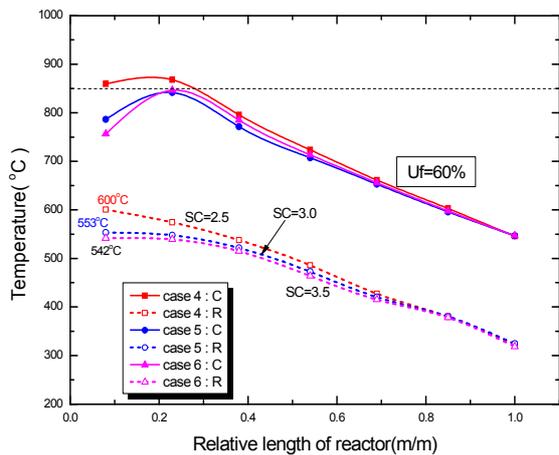
MCFC에서의 연료이용률이 50, 60, 70%로 변하고 각 개질측의 S/C비의 값을 변경시켰을 때의 복합 반응기의 열적거동 결과를 촉매연소-개질반응의 통합 2중 원형관반응기의 무차원 길이 방향에 대해서 Fig. 4에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 연료이용률이 같은 값이라고 하더라도

Table 1 Test conditions according to operational conditions in integrated reactor

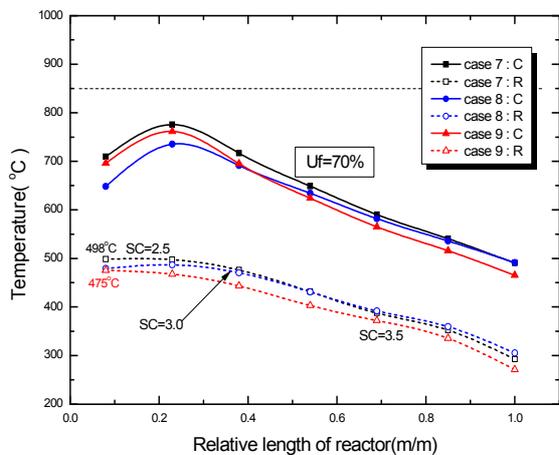
	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8	case 9
S/C	2.5	3.0	3.5	2.5	3.0	3.5	2.5	3.0	3.5
$U_f(\%)$	50			60			70		
Volume flow rate : Reformer (SLPM)									
CH ₄	5.65	5.54	5.49	4.706	4.62	4.57	4.034	3.96	3.92
H ₂ O	14.12	16.63	19.21	11.76	13.86	16.01	10.08	11.88	13.72
Volume flow rate : Catalytic Combustor (SLPM)									
H ₂	9.08	9.25	9.39	6.05	6.17	6.26	3.89	3.96	4.03
CO	1.68	1.51	1.37	1.12	1.01	0.91	0.72	0.65	0.59
CO ₂	14.46	14.63	14.77	14.12	14.24	14.33	13.88	13.96	14.02
CH ₄	0.27	0.16	0.11	0.22	0.14	0.09	0.19	0.12	0.08
H ₂ O	15.80	18.15	20.58	14.68	16.66	18.71	13.88	15.60	17.38



(a) Case 1~3 ($U_f = 50\%$)



(b) Case 4~6 ($U_f = 60\%$)



(c) Case 7~9 ($U_f = 70\%$)

Fig. 4 Temperature profile of integrated reactor according to test conditions(C: combustor, R : reformer)

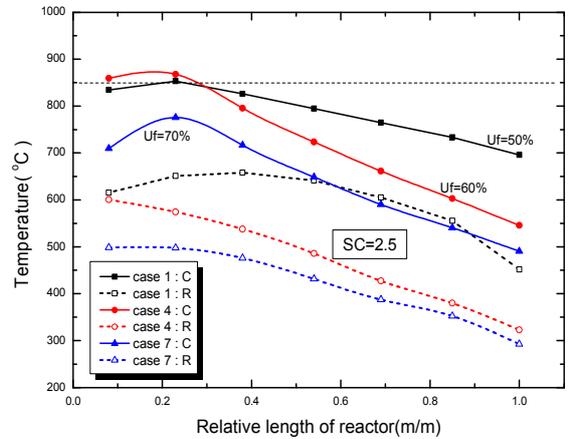
MCFC에서 배출되는 슬립가스의 유량이 다르기 때문에 촉매연소기로 들어가는 가스량에 약간의 차이가 있으나 정성적 비교는 가능하다고 판단된다. 즉, Fig. 4에서 연소측 온도분포인 (a) case 1~3 : C는 거의 같은 양상을 띠고 있다. 반면에 개질측 온도분포인 case 1~3 : R은 S/C 비에 따라서 개질반응 최고온도 지점이 개질기 입구측에서 부터 무차원 상대길이로 조금씩 달라진다. 즉 case 1에서는 개질기 입구로 부터 약 69% 되는 하류 지점에서 최고온도 658°C, case 2와 3은 약 85% 되는 하류지점에서 각각 648°C와 655°C를 얻었다. 따라서 이 지점에서 개질측의 수소생산 능력이 최대가 된다고 판단된다. 또한 개질측 온도가 최대가 된 이후 하류로 진행할수록 오히려 개질측 온도가 약간 감소하는 것을 Fig. 4에서 볼 수 있는데, 이는 촉매연소 반응이 연소기 입구에 가까운 약 25%내의 지점에서 최대온도에 도달하는 것과 무관하지 않다. 즉, 본 실험에서는 촉매연소측 온도가 850°C를 넘지 않도록 연소공기량을 조절하면서 적정 공기량을 찾고자 하였다. 이때, 촉매연소기 입구 근방 25% 내에서 연료 이용률에 관계없이 촉매연소측에서는 최대 반응온도에 도달함을 Fig. 4(a)~(c)에서 공히 확인 할 수 있다. 또한, 개질측에서는 최대온도에 도달한 후 개질된 가스의 비열이 상대적으로 작아져서 열을 더 전달 받지 못하는 것과 흡열반응이 종결되어 온도가 하강하는 것, 개질측 유량조건이 case 4~9의 실험조건 보다 상대적으로 큰 것 그리고 연소측에서는 최고온도를 향해서 반응이 진행되는 온도 상승구간에 있다는 사실이 복합적으로 작용한 결과라고 사료된다.

Fig. 4(b), (c)의 결과는 MCFC에서의 연료이용률을 증가시킨 경우로서, 결국 MCFC의 연료극에서 배출되어 촉매연소기에서 사용될 가연성 연료성분이 줄어든 경우로서 수소를 대푯값으로 예로 들면, Fig. 4(a)의 유량조건 대비 평균 67%, 43%에 해당되는 조건이다. 따라서 연소촉매층의 온도는 공기량을 줄여가면서 조절하여 최고(850°C)로 끌어올린다고 하더라도, 절대적인 유량 자체가 줄어들기 때문에 개질측에 공급해 줄 수 있는 열량 자체가 적어지므로 개질측 온도가 Fig. 4(a)의 경우보다 현저히 떨어짐을 볼 수 있다. 특히 Fig. 4(b)의 경우는 거의 개질기 출구단까지 온도가 상승하는데, 이는 개질측의 상대적인 유량이 줄어

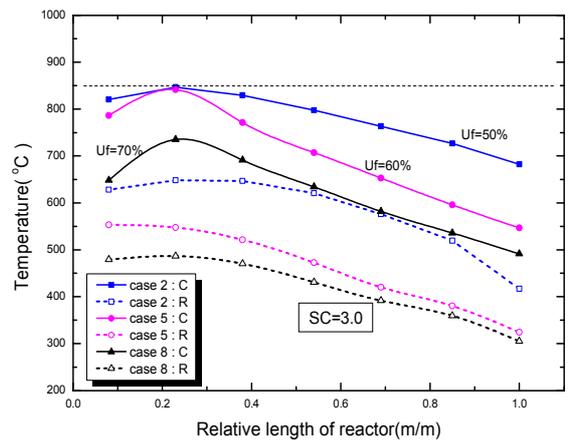
든 것과 낮은 반응온도로 흡열량이 아직 적기 때문이며 최고온도는 S/C 비에 따라서 각각, 600°C, 553°C, 542°C가 얻어졌고 개질층 수소수율 역시 적어짐을 GC측정을 통해 확인할 수 있었다. 극단적인 경우로서 Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 MCFC에서 연료이용률이 70%인 경우, 즉 연소층 매층에서 사용할 연료량이 현저히 부족한 경우로 촉매연소층 온도분포는 공기량을 한계 상황까지 낮추어 최고온도를 확보하려고 시도하였으나, 열원이 되어야 할 촉매연소층 온도분포가 800°C 부근에조차 도달하지 못하는 것을 볼 수 있고, 결과적으로 이에 상응하여 형성되는 개질층 온도분포 역시 Fig. 4(a), (b)의 경우 보다 현저히 낮게 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 개질층 최고온도 S/C 비에 따라서 개질기 출구단에서 475~498°C로 보다 낮게 형성되었다. 따라서 이러한 운전 조건에서는 별도의 연료를 촉매연소층에 부분 첨가하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

4.2 연료이용률 관점에서의 고찰

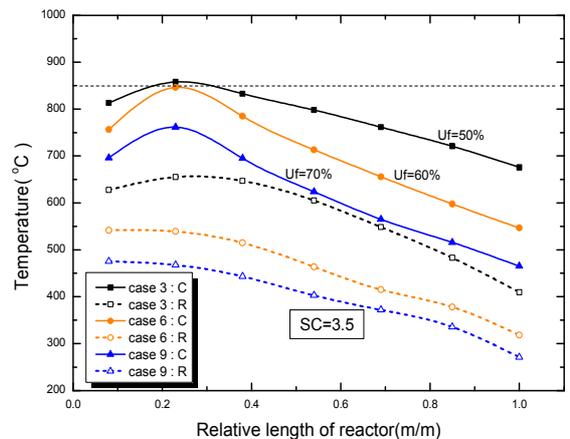
Fig. 5(a), (b), (c)는 앞 절에서의 결과를 다른 각도에서 비교하기 위하여 제시한 그림이다. 이 경우는 S/C 비를 기준으로 상호 비교하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 개질층에서의 S/C 비가 같더라도 연소층과 개질층에 각각 흐르는 가스 조성에 상당한 차이를 보이므로 Fig. 5(a), (b), (c)의 온도 분포에도 확연한 차이를 볼 수 있다. 이러한 양상은 앞 절에서의 Fig. 4(a), (b), (c)에서는 잘 드러나지 않는 현상이다. 결국, MCFC의 발전시스템과 이로부터 배출되는 연료극 슬립가스를 열원으로 이용하는, 본 연구에서와 같은 촉매연소-개질반응 통합시스템을 구성하는 경우에 있어서, MCFC 촉부하변동을 고려하지 않고 개질층의 안정된 운전을 위하여 S/C비를 고정하겠다는 제안은 고려의 대상이 되고, 또 이에 순응하여 S/C를 바꾸어 얻게 되는 효과도 미미할 것으로 판단된다. 즉, 개질층 온도 분포와 촉매연소층 온도분포의 운전 대역폭이 넓게 걸쳐 있어서 수소생산량이 크게 변동할 수 있고, 통합형 반응기의 열적 내구성에도 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 전력 생산시 부하 변동에 따라 MCFC의 연료이용률이 바뀌게 되면 이에 순응하여 통합형 반응기의 촉매연소층에는 슬립가스의 조성변화로 야기된 발열량저하 부분과 이에 따른 촉매연소층과 개질층의 온도



(a) Case 1,4,7(S/C = 2.5)



(b) Case 2,5,8(S/C = 3.0)



(c) Case 3,6,9(S/C = 3.5)

Fig. 5 Temperature profile of integrated reactor according to test conditions(C: combustor, R : reformer)

Table 2 Reformate compositions(volume %) at exit of reformer

case # %	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8	case 9
H ₂	73.43	73.20	76.28	73.19	70.75	71.49	63.29	59.60	64.02
N ₂	1.89	1.87	1.87	1.82	1.84	1.83	1.87	1.89	1.88
CO	5.59	5.38	7.21	6.01	3.21	2.68	1.62	1.21	1.07
CH ₄	8.14	8.32	3.79	8.24	11.96	11.26	21.31	25.85	20.61
CO ₂	10.94	11.23	10.85	10.74	12.24	12.74	11.91	11.44	12.42
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 3 Optimal volume flow rate of air for catalytic combustion in this experiments

case # Air	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8	case 9
λ	2.6	2.5	2.4	2.1	2.0	1.5	1.1	1.1	1.2
slpm	70.66	70.37	63.91	40.49	36.76	26.89	14.97	13.33	14.04

보상을 할 수 있는 방안이 마련되는 것이 더욱 바람직할 것으로 사료된다.

이상에서 설명한 결과를 Table 1의 실험조건에 따라, 정상운전상태에서의 GC 농도분석기로 측정된 개질된 가스의 조성을 제시하면 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 본 실험에서 수소가 가장 많이 얻어지는 경우는 case 3으로서 연료이용률 50%, S/C 비가 3.5의 조건에 해당되었다. 이것은 이 조건에 상응하는 열역학적 평형상태에서의 수소수율의 약 98%에 해당되는 값이며, 공급된 메탄 역시 3.79%로 가장 적은 양으로 남게되어 수소와 일산화탄소로의 전환이 가장 활발한 것을 가늠할 수 있다.

또한 그때의 온도분포 역시 Fig. 4(a)의 삼각형 심불에서 확인해 보면 연소측과 개질측 모두 가장 높은 반응온도에 도달되어 있음을 알 수 있다. 또한, 촉매연소측의 연소반응을 진행시키면서 최대의 열을 개질측으로 전달하는데 소요된 적정 공기량을 λ 값과 체적유량으로 Table 3에 나타내었다.

5. 결 론

MCFC의 연료극 슬립가스를 촉매연소로 활용할 수 있는 동심 2중관 통합형 촉매연소-개질 반응기에 있어서, MCFC의 연료이용률과 개질측의 S/C 비를 변동시키는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) MCFC측 연료이용률의 변동에 따라서 연료

극에서 슬립되는 가스의 조성비가 다양하게 변화므로 연소측 및 개질측의 열적거동은 복합적으로 이루어진다.

(2) MCFC의 연료이용률이 높을 경우에는 촉매연소측에서 사용될 가연성 연료성분이 부족하게 되어 연소측에서의 공기량을 조절하거나 개질측에서의 S/C 비를 조절하여 목표하는 온도분포를 얻어내고, 수소생산량을 조정할 필요가 있다.

(3) 상기 (1), (2)항에 따라 촉매연소기와 개질반응기의 온도분포는 폭넓게 변화하므로 운전조건 변동에도 일정한 촉매연소측 온도분포를 확보할 수 있는 방안을 강구하는 것이 바람직할 것이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 신재생청정시스템 연구실의 일반사업지원하에 수행되었으며 관련 연구원님들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Benjamin T. S., Matthias D. and Olaf, D., 2009, "Steam Reforming of Methane, Ethane, Propane, Butane, and Natural Gas over a Rhodium-Based Catalyst," *Catalysis Today*, Vol. 142, pp. 42~51.
- (2) Lee, S. D., Hwang, I. C., Lee, B. G., Seo, I. S. Lim, T. H. and Hong, S. A., 2000, "The Effect of Temperature and Space Velocity on the Performance of Plate Reformer for Molten Carbonate Fuel Cell,"

- Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 38, No. 5, pp. 719~724.
- (3) Park, J. G., Lee, S. H., Lim, S. K. and Bae, J. M., 2009, "Numerical Study on Operating Parameters and Shapes of a Steam Reformer for Hydrogen Production from Methane," *Trans of the KSME(B)*, Vol. 33, No. 1. pp. 60~67
- (4) KOGAS, 2002, "Synthesis of the Hydrogen from Natural Gas," *Final Research Report*, pp. 16~25.
- (5) Williams, M. C., Strakey, J. P. and Singhal, S. C., 2004, "U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79~85.
- (6) Ghang, T. G., Yu, S. S., Kim, Y. M. and Ahn, K. Y., 2010, "Experimental Study of Steam Reforming Assisted by Catalytic Combustion in the Concentric Annular Reactor," *Trans of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 4. pp. 375~381.
- (7) Liu, X. and Jensen, M. K., 2001, "Geometry Effects on Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Inned Tubes," *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 1035~1044.
- (8) Xu, J. and Froment, G. F., 1989, "Methan Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift-1," *AlchE Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 88~96
- (9) Hayes, R. E. and Kolaczkowski, S. T., 1997, "Introduction to Catalytic Combustion," pp. 41~45.