

용융탄산염 연료전지 발전시스템 구성 및 운전 조건에 따른 시스템 효율에 미치는 영향 분석

Effect of system configuration and operating condition on the system efficiency in molten carbonate fuel cell power generation system

강병삼, 임희천

한전 전력연구원 발전연구실

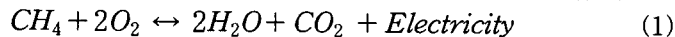
1. 서론

용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell) 발전 방식은 기존의 천연가스 이외에도 석탄가스 등 다양한 연료 사용이 가능하다. 또한, 고온의 스팀을 이용하여 복합발전을 할 수 있고 저공해, 고효율 발전 방식으로 각광 받고 있다. 선진 각국에서는 기술개발을 지속적으로 추진하여 상용화 단계에 들어가고 있는 기술로, 현재 국내에서는 전력연구원을 중심으로 국가 선도 기술 개발과제로 100 kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 개발의 2 단계 과제를 수행 중이다. 본 연구과제의 최종 목표인 100 kW급 MCFC 시스템은 분산형 전원과 대규모 발전 시스템의 소형 모듈의 기능으로서의 역할^[1,2]이 가능한 100 kW급 시스템에 대하여 시스템 전체의 효율을 분석이 필요하며, 이러한 분석과 함께 실제 시스템의 설계 및 운전 기술은 향후 시스템의 대형화에 직접적인 영향을 미치게 되며 시스템 설치 단계에 앞서 연료전지 스택뿐만 아니라 발전시스템 전체의 효율성 및 경제성에 중요한 영향을 미치게 될 것이다.

본 연구에서는 발전 공정의 효율 분석을 위한 상용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용하여 연료전지 시스템 공정을 모사하였고 이를 토대로 100 kW 용융탄산염 연료전지 시스템의 운전 조건 및 시스템 구성이 전체 공정의 효율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 주어진 100 kW급 MCFC 시스템에 대해 시스템 구성, 크기, 단위 기기 효율, 연료 및 공기 이용률 변화에 따른 전체 시스템 효율에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 이론

천연 가스를 연료로 하며 개질기를 이용하여 연료를 공급하는 경우 용융탄산염 연료전지 공정에서의 전체적인 반응은 다음과 같이 구할 수 있다^[3,4]



이 반응은 메탄이 산화되어 전기를 만들어 부가 생성물은 2몰의 스팀과 1몰의 이산화탄소를 생성하는 반응이다. 즉 반응물은 천연가스와 공기이며 생산물은 교류전류, 부가생성물은 이산화탄소, 질소와 물이 생성되는 반응이다. 외부 개질기를 포함한 연료전지 전체 공정은 다음 Fig. 1과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

일반적인 연료전지 공정의 순수 효율은 다음 (2)식과 같이 나타내어지며, 연료전지 공정의 효율이 높기 위해서는 공급되는 연료의 양을 최소로, 생산되는 전력을 최대로 그리고 부가적인 발전에 사용되는 전력을 최소한으로 줄이면 된다.

$$\eta_{Net} = \frac{(DC \text{ Power Produced}) - (Parasitic \text{ Power})}{HHV \text{ of Total Fuel to Fuel Processor}} \quad (2)$$

100 kW MCFC 시스템인 경우 주어진 공정에서는 공급되는 천연가스의 열량이 최소한 195 kW이며 생산되는 전력이 100 kW이므로 시스템 내에서 사용되는 전력을 최소한으로 줄이는 경우 부가적인 발전이 없는 경우 구할 수 있는 이론적인 최대 시스템의 효율은 51.28%(100/195)이다.

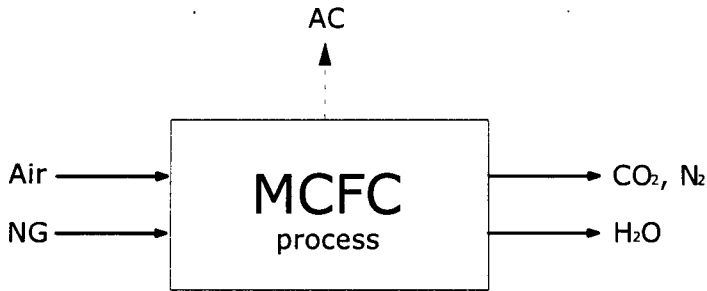


Fig. 1. Simplified MCFC process

3. 모사 실험

- 100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템

본 연구에서 기준으로 한 100 kW급 용융탄산염 연료전지 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료인 천연가스를 사용하며 전극 면적인 6,000cm²의 단위전지 170장으로 구성되며 운전 조건은 5기압에서 650°C를 운전 조건으로 하였다. 연료 및 공기 이용률은 각각 80%, 30%이며 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었으며, 연료극과 공기극에는 가스/가스 열교환기(HEN)가 설치되어 고온의 출구 가스와 저온의 입구 가스의 열교환을 이용함으로써 전기 히터 등 부가적인 장비의 사용이 줄어들어 시스템 전체의 효율이 높아지도록 구성되었다. 특별히, 공기극인 경우 고온 블로어(HTB)가 설치되어 스택의 냉각제로 사용되는 공기극의 산화제 가스량을 증대시켜 공급함으로써 스택 온도 조절이 용이하도록 구성하였다. 스택에서 발생된 공기극 반응 가스는 turbo charger(T/C)를 통해서 공기 압축과 터빈 발전이 이루어지도록 구성되어 있다. 배출된 공기극 가스는 HRSG를 통하여 개질기에 공급되는 스팀을 생산하는데 사용된다. 이 시스템에 대하여 발전 시스템 효율 분석용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용하여 다음과 같이 각각의 매개 변수에 따른 효율을 분석하였다.

- 시스템 구성 및 크기에 따른 시스템 효율 변화

시스템 구성 및 크기에 따른 시스템 효율 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 시스템의 구성에 따른 시스템의 효율 변화는 열교환기를 이용하여 스택의 입·출구 가스의 열교환망을 구성할 경우 30.19/9.85%(gross/net)이며 연료극 미반응 가스를 사용한 경우 38.95/12.82%이며 고온 블로어(HTB)를 사용하는 경우 40.91/18.42%로 증가되며 및 turbo charger를 이용하여 부가발전을 할 경우 42.45/38.42%로 효율이 증가(41%)됨을 알 수 있다. MCFC 발전 시스템의 경우 미반응된 연료극 가스와 고온 블로어를 사용한 스택의 온도 조절 및 turbo charger를 이용하여 공기 압축기를 대신하는 경우 등 시스템의 구성에 따른 전체 시스템의 효율이 크게 변화됨을 알 수 있다. Turbo charger를 사용하는 시스템의 경우 크기 변화(100kW→1MW)에 따른 전체 시스템의 효율은 45.45/41.1%에서 48.92/45.36%로 크게 증가되지 않아 시스템의 크기의 증가는 전체 시스템 효율 향상(3.9%)에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

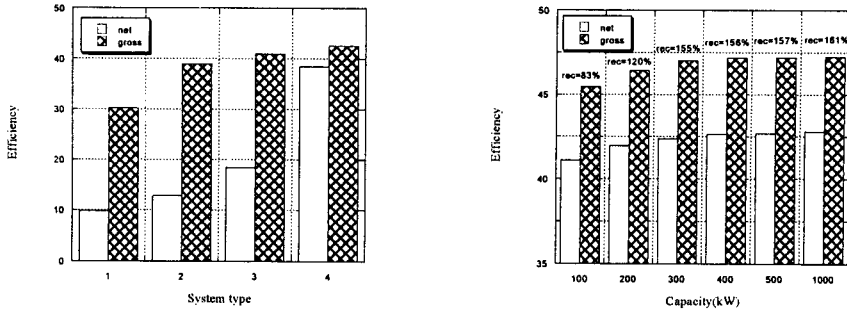


Fig. 2. Effects of system configuration and system size on the system efficiency(case 1: system with HEN, case 2 : system using anode off gas, case 3 : system with HTB, case 4 : system with T/C)

- 단위 기기의 효율에 따른 시스템 효율 변화

MCFC 발전 시스템에 사용되는 공기 압축기, 고온 블로어, 가스 compressor 등의 효율을 70%정도로 설정하였으며 Fig 3에서 보는 바와 같이 단위 기기의 용량이 늘어남에 따라 단위 기기의 효율이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 단위 기기의 효율 변화에 대한 전체 시스템의 효율은 45.45/41.1%에서 48.92/45.36%로 7.6% 증가됨을 알 수 있다.

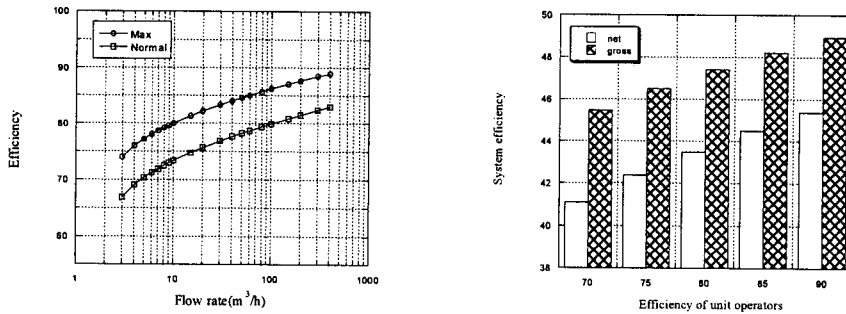


Fig. 3. Effects of efficiency of unit operators on the system efficiency

- 연료 및 공기 이용률에 따른 시스템 효율 변화

Fig. 4은 연료 및 공기 이용률에 따른 전체 시스템의 효율 변화를 나타낸 것이다. 연료 이용률의 경우 연료극의 미반응 가스가 촉매 연소기를 이용하여 개질기의 연소열을 공급하므로 미 반응된 연료극 가스의 양은 어느 단계($U_f=58\%$)까지는 이용률이 낮아짐에도 시스템 전체의 효율은 크게 감소하지 않고 있다. 연료 이용률 58% 이하의 운전 조건에서는 주어진 시스템에서는 미반응된 가스를 촉매 연소기에서 완전히 연소시키기 위한 공기 압축기의 용량 증가로 부가적인 전력량도 증가하여 net efficiency도 줄어들게 되며 연료 이용률이 40%인 경우 연소에 필요한 공기량의 증가로 recycle ratio가 0%로 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 2

에서 보듯이 적절한 시스템의 효율을 유지하기 위한 연료이용률은 60%이상으로 운전되어야 함을 알 수 있다. 공기 이용률의 경우 이용률의 변화에 따라 스택 출구 가스의 온도를 680℃로 유지하기 위한 recycle ratio도 함께 변화되며 20%이하로 운전할 경우 recycle 블로어가 사용되지 않아도 스택의 온도 유지됨을 알 수 있다. Recycle ratio가 증가할수록 공기 이용률은 증가하며 그에 따라 시스템의 효율도 증가하게 되지만 공기 이용률이 30%이상인 경우의 전체 시스템의 효율 증가폭은 30%이하의 증가폭에 비하여 줄어들음을 알 수 있다.

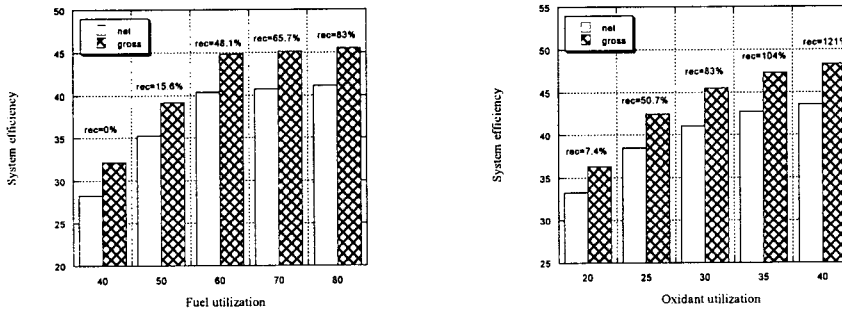


Fig. 4. Effects of fuel and oxidant utilization on the system efficiency(rec : recycle ratio, stack outlet temperature : 680℃)

4. 결과 및 토론

본 연구에서는 향후 설치 운전될 100 kW 용융탄산염 연료전지 시스템에 대하여 상용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용하여 정밀한 시스템 모사를 실시하고 모사를 통한 전체 시스템 효율 분석을 실시하였다. 분석된 100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템에 대하여 시스템의 대형화, 시스템의 구성 변화, 단위 기기의 효율 변화 및 연료 및 공기 이용률 변화에 따라 시스템 전체 효율의 변화를 계산하였다. 시스템의 대형화에 따라 시스템의 효율은 크게 변하지 않았으며 시스템의 구성 및 단위 기기의 효율에 따라 전체 시스템의 효율은 크게 변하였다. 주어진 시스템에서 운전 조건(연료 및 공기 이용률)에 따라라도 시스템의 효율이 크게 변하였으며 이를 기준으로 시스템의 적정 운전 조건을 설정할 수 있었다. 이러한 분석은 향후 대형 연료전지 시스템의 설계 및 시스템 효율 설정에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Hiroo Yasue, et al, "Development of a 1000 kW-class MCFC pilot plant in Japan," Journal of Power Sources, 71(1998) 89-94.
2. Paul H. Eichenberger, "The 2 MW Santa Clara Project," Journal of Power Sources, 71(1998) 95-99.
3. 강병삼, "100 kW급 MCFC 발전시스템 공정의 개념 설계," 전력연구원 기술보고서 TM00ES02.P2001.048.
4. 강병삼, "100 kW급 MCFC 발전시스템 공정의 개념 설계 및 효율 분석," 전력연구원 기술보고서 TM00ES02.P2000.577.