

100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템 개발 I (시스템 및 스택 설계)

임희천, 안교상
한전 전력연구원 발전연구실

System Development of a 100 kW Molten Carbonate Fuel Cell I
(Design concept of Stack and System)

Hee Chun Lim, Kyo Sang Ahn
Power Generation Lab., Korea Electric Power Research Institute

Abstract - For developing a 100 kW MCFC power generation system, Several design parameters for a fuel cell stack and system analysis results by Cycle Tempo, a processing computer software, were described. Approximately 170 cells are required to generate 100 kW at a current density of 125 mA/cm² with 6000 cm² cells. An overall heat balance was calculated to predict exit temperature. The 100 kW power is expected only under pressurized operation condition at 3 atm. Recycle of cathode gas by more than 50% is recommended to run the stack at 125 mA/cm² and 3 atm. Manifolds should be designed based on gas flow rates for the suggested operating condition. The fuel cell power generation system was designed conceptually with several choices of utilization of anode exhaust gas. Also system efficiency was calculated at various type of system and operation conditions.

1. 서 론

석탄 가스화와 연계한 복합 발전이 가능한 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)는 천연가스, 석탄가스 등 다양한 연료를 사용할 수 있고, 공해요인이 적고, 높은 에너지 변환효율을 가지고 있어 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 새로운 발전방식이다. 현재 선진국에서는 MW급 실증플랜트 운전시험을 완료하고 상용 시스템 개발을 진행하고 있다. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작된 시스템 개발은 1996년에 1,000 cm² 단위 전지 20장을 적층한 2 kW급 MCFC 시스템을 개발 운전시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 2단계로 100 kW급 발전시스템 개발 연구가 진행되고 있다. 1997년부터 시작된 2단계 1차 사업에서는, 우선 25 kW급 시스템 개발을 추진하여, 1999년에는 6,000cm²급 단위전지를 이용한 25 kW 스택 및 시스템을 개발하여 성공적으로 운전함으로써 외부 개질형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 여기서는 올해부터 본격적으로 추진되고 있는 2단계 2차 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발에 있어서, 지금까지 연구결과를 바탕으로 한 100 kW MCFC 스택 기본설계, 그리고 전체 시스템 설계를 위한 개념을 소개하고자 한다.

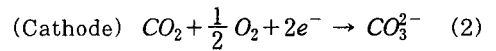
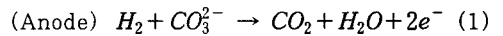
2. 본 론

2.1 MCFC 발전 시스템

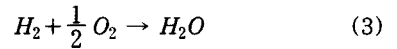
2.1.1 MCFC 발전의 원리

MCFC 연료전지는 다공성 연료극(anode)과 공기극(cathode) 층 사이에 전해질인 용융 탄산염을 지지하는 전해질 판으로 구성되어 있다. 두 전극 중 공기극에서는 CO₃²⁻를 생성하는 산소의 환원 반응이 일어나고 연료극

에서는 CO₃²⁻를 소모하는 수소의 산화 반응이 일어난다. 양극에서 만들어진 CO₃²⁻는 전해질을 통하여 확산, 전달되어 연료극 반응에 참여하고 산화에 의해 음극에서 생성된 전자는 외부회로를 통해 공기극으로 전달되어 환원 반응에 참여한다.



따라서 전지 전체에서의 총괄 반응은 다음과 같다.



2.1.2 MCFC 발전시스템 구성

위 질 반응이 일어나는 부분을 단위전지라 하며 이를 여러 장 적층하여 필요로 하는 전력을 얻게된다. 이를 적층 전지 혹은 스택(stack)이라 하며, 여러 장의 단위전지로 구성된 스택이 최적의 성능을 낼 수 있도록 가스의 공급 방식, 온도 분포, 연료와 공기의 흐름, 가스의 누출, 전해질의 이동 등을 고려하여 설계된다. 개발되는 연료전지 스택은 사용 방법 및 사용되는 용도에 따라 주변 기기와 연결되어 전체 시스템으로 구성된다.

전체 시스템은 연료 처리계, 스택 주변계, 배열 회수계 그리고 직·교류 변환계 등으로 나누어진다. 연료 처리계는 연료 종류에 따라 석탄가스를 이용하는 경우 석탄 가스화 설비, 천연가스인 경우 천연가스 개질기 등을 필요로 하며 스택 주변계의 경우 전지에 공급되는 가스의 온도, 유량, 조성 등의 조절을 목적으로 공기극, 연료극 가스 재 순환 시스템 등으로 구성된다. 배열 회수계의 경우 동력회수 및 가스 터빈, 증기 터빈과의 연계에 의한 복합 발전 기술 등을 포함한다.

이들 주변기기들을 유기적으로 연결하여 종합시스템으로 구성하기 위하여 시스템 공정을 시뮬레이션하고 이를 바탕으로 주변 기기에 대한 상세 설계를 하며, 최종적으로 종합 설계를 바탕으로 시스템을 건설하게 된다. 또한 시스템을 안전하고 안정적으로 운전하기 위하여 플랜트의 운영을 제어시스템이 필요하게된다.

2.2 MCFC 스택 설계

2.2.1 MCFC 스택 설계

여러 장의 단위전지를 적층하여 구성된 MCFC 스택은 최적의 성능을 낼 수 있도록 가스의 공급 방식, 온도 분포, 연료와 공기의 흐름, 가스의 누출, 전해질의 이동 등을 고려한 manifold와 단위전지의 적층 후 발생되는 스택 내 및 외부 기기와의 절연, 스택의 냉각 방식 및 단열, 보온 등에 관한 고려가 필요하다. 현재 개발 중인 MCFC 스택은 가스의 균일한 공급이 용이하며 전해질의 이동문제를 해결할 수 있고 대형화가 용이한 내부 manifold 형식의 적층 기술을 채택하고, 연료 가스가 외부에서 공급되는 외부 개질형 스택으로 개발되고 있다.

100 kW급 MCFC 스택 설계에서는 사용되는 단위 전지 면적은 약 6,000 cm²로서, 전극 제작에 사용되는 Tape casting 장치와 공정 조건을 고려하여 길이가 50~53 cm로 정하고 이 때의 폭은 110~115 cm로 설정하였다. 100 kW의 전력을 얻기 위한 총 적층 수는 이전 시험한 스택의 성능 즉 전류-전압 데이터를 근거로 계산하는데, 125 mA/cm²의 부하에서 약 0.8 V를 얻는다고 보면 100 kW를 위해 필요한 전지 수는 약 170장이 된다. 현재 스택은 170장을 2개의 sub-stack으로 나누어 스택을 제작하여 시스템을 구성하는 것이 안정적인 것으로 판단된다.

2.2.2 MCFC 스택 운전조건

한편 전지 반응에서는 전기 에너지 외에도 많은 양의 열이 발생(Q_{cell})하는데 발생된 열에 의해 스택 온도가 상승하게 된다. 연료 및 공기가 같은 방향으로 흐르는 co-flow 형태의 100 kW 스택은 출구 부분 온도가 최고로 상승하며 안정적인 운전을 위해서는 출구 온도를 700℃ 이하로 조절하여야 한다. 출구 온도 조절은 공기극에 공기를 주입하여 스택 출구를 냉각하게 되며, 공급량은 산소 이용률에 의해 결정된다.

한편 정상 운전에서는 연료 이용 경제성을 위해 연료 이용률을 0.8로 하여 운전하게 되는데 이때 스택 출구 온도를 680℃ 이하로 조절하려면 부하 조건 125 mA/cm²인데, 공기 이용률 0.2 이하로 맞추어 주어야 한다. 이 때 발생되는 과도 차압을 방지하기 위하여 시스템 운전 압력을 증가시키고 공기극 가스를 재 순환하여 냉각에 필요한 유량을 확보하는 가압 운전 방식을 채택하게 된다. 가압 시 125 mA/cm²의 부하 조건에서 예상되는 출구 온도를 맞추기 위하여 공기 이용률을 0.3으로 제한 할 때에 필요한 공기극 리싸이클 비율은 약 0.5이다. 스택 설계 및 운전 조건을 정리하면 표 1과 같게 된다.

Table 1. Specification of the 100 kW stack and its operating condition

| 변수 | 설정치 또는 예상치 |
|---------------|--|
| Manifold 형태 | 내부 manifold |
| 가스 흐름 | Co-flow |
| 전지 면적 | 6000 cm ² (길이 53 cm) |
| 스택 적층 수 | 85/stack × 2 stacks |
| 연료극 가스 | H ₂ :CO ₂ =4:1 + Steam 30% |
| 공기극 가스 | O ₂ :CO ₂ =1:2 (공기 사용) |
| 수소 이용률 | 0.4 (상압시), 0.8 (가압시) |
| 산소 이용률 | 0.3 |
| 공기극 가스 리싸이클 비 | 0.5 (가압시) |
| 부하 전류 밀도 | 50~75 mA/cm ² (상압) 125 mA/cm ² (가압) |
| 입구 가스 온도 | 580℃ |
| 출구 가스 온도 | 680℃ (목표치) |
| 운전 압력 | 1~5 기압 |
| 예상 출력 | 46~66 kW (상압 운전시) 102 kW (가압 운전시) |

2.2.3 MCFC 스택 분리판 설계

분리판은 여러 개의 단위전지를 전기적으로 직렬로 연결하고 또한 각각 단위전리를 분리하며, 반응가스가 전달되는 통로가 설치된다. 스택 입 출구에는 반응가스를 분배하는 manifold가 존재한다. 내부 manifold형 MCFC 스택에서는 분리판 면적이 전극 면적보다 커지

게되며 이의 설계는 아주 중요하다.

연료전지 반응에서는 산소 대신 공기를 사용함에 따라 공기극 유량이 연료극 유량보다 아주 크게 되며, 공기극에서는 수소 반응량의 1.5배(물 기준)에 해당하는 가스가 소모되고, 연료극에서는 수소 반응량에 해당하는 가스량 증가가 진행된다. 이러한 특징에 의해 스택 내에서 가스의 유량비가 변화하는 현상을 고려하여 manifold를 설치하여야 한다. 현재 구상되는 스택에서의 가스 흐름 형태와 분리판 단면적에서 보는 manifold hole들의 모습은 그림 1과 같다.⁽²⁾

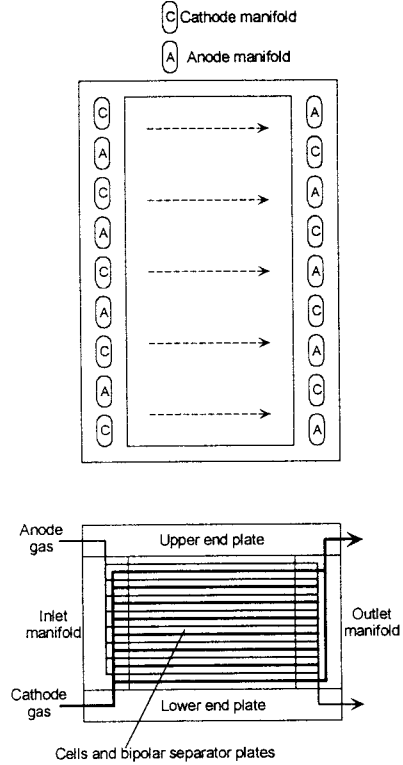


Fig. 1. Schematic of separator and stack

그림 1과 같은 분리판 형태에서 manifold 수와 크기는 표 1과 같은 운전 예상 조건에서의 유량을 기준으로 설정한다. Manifold 설계에서 중요한 것은 압력 분포에 따른 유량분배로, 같은 유량에 대해 압력 강하는 시스템 압력에 반비례하기 때문에 보다 냉각에 필요한 많은 양의 공기 주입 및 재 순환이 가능하다 따라서 부하 전류를 증가시키면서 출력 또한 증가할 수 있다.

한편 분리판 설계에 직접 관계되는 것은 유체 속도와 Reynolds number인데 이를 계산하기 위해서는 가스 통로 단면적이 주어져야 한다. 전극판 위를 흐르는 가스의 통로 높이를 1.2 mm, 폭은 120 mm로 가정하고, 각 manifold는 직경 41 mm, 중심부 거리가 35 mm인 타원형이라고 보았을 때의 가스 유동 속도를 계산하였다. 계산 결과에 의하면 manifold에서의 가스 유동 속도가 전지 통로 내부에서보다 매우 크고 laminar flow와 turbulent flow의 전이 영역에 있음을 알 수 있다. 실제 부하 운전 시 입 출구 가스 유량 변화보다 양극/음극 가스 유량 차이가 매우 심하므로 이를 고려하여 manifold 크기를 결정하여야 한다.

2.3 MCFC 발전 시스템 개념설계

2.3.1 100 kW급 MCFC 공정 설계

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부개질형으로 연

료로 천연가스를 사용하며, 전극 면적인 6,000cm²의 단위전지 170장으로 구성되며 5기압에서 650℃를 운전 조건으로 하였다. 연료 및 공기 이용률은 각각 80%, 30%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었다. 연료극과 공기극에는 가스/가스 열교환기(HEN)가 설치되어 열교환을 이용함으로써 시스템 전체 효율이 높아지도록 구성되었다. 특별히, 공기극인 경우 고온 블로어(HTB)를 설치하여 공기극 리사이클을 통하여 스택 온도 조절이 용이하도록 구성하였다. 스택에서 발생한 공기극 반응 가스는 turbo charger(T/C)를 통해서 공기 압축과 터빈 발전이 이루어지도록 구성하였다. 배출된 공기극 가스는 HRSG를 통하여 개질기에 공급되는 스팀을 생산하는데 사용된다. 이 시스템에 대하여 발전 시스템 효율 분석용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용하여 각각의 매개 변수에 따른 효율을 분석하였다.

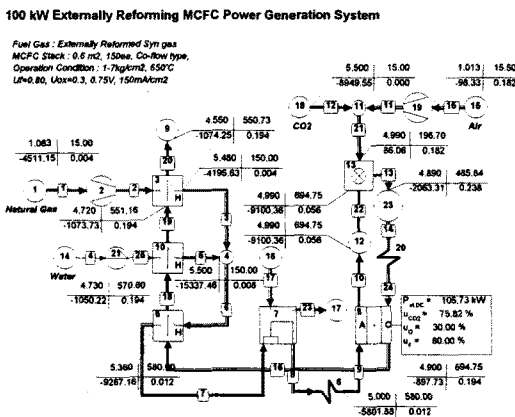


Fig. 2. An Example of system analysis result of 100 kW MCFC system by Cycle Tempo

2.3.2 시스템 구성 및 기기 변화에 시스템 효율 변화
 시스템의 구성에 따른 시스템의 효율 변화는 열교환기를 이용하여 스택 입·출구 가스를 활용하는 경우 30.19/9.85%(gross/net)이며, 연료극 미반응 가스를 사용하는 경우 38.95/12.82%, 그리고 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 미반응 연료극 가스 와 고온 블로어, 그리고 turbo charger를 이용하는 등 시스템 구성 변화에 따라 전체 시스템의 효율이 크게 변화되고 있음을 알 수 있다. 또한 MCFC 발전 시스템에 사용되는 공기 압축기, 고온 블로어, 가스 compressor 등 단위 기기 용량 증가에 따라, 단위 기기의 효율이 증가하고 있으며 이러한 단위 기기의 효율 변화에 대한 전체 시스템의 효율은 45.45/41.1%에서 48.92/45.36%로 7.6% 증가되는 것을 알 수 있었다.

2.3.3. 이용률 변화에 따른 시스템 효율 변화

촉매 연소기를 이용하여 연료극 미반응 가스를 개질기 반응열로 공급하는 경우 연료 이용률 $U_f=58\%$ 까지는 이용률이 낮아짐에도, 시스템 전체 효율은 크게 감소하지 않고 있다. 연료 이용률 58% 이하 운전 조건에서는, 미 반응 가스를 촉매 연소기에서 완전 연소시키기 위한 공기 압축기 용량 증가로 전체 효율이 감소하게 되

며 연료 이용률이 40%인 경우 연소에 필요한 공기량의 증가로 recycle ratio가 0%로 줄어들게 된다. 분석 결과 적절한 시스템 효율을 유지하기 위한 연료이용률은 60%이상으로 운전되어야 함을 알 수 있다. 공기 이용률의 경우, 스택 출구 가스 온도를 680℃로 유지하기 위하여 recycle ratio를 변화시켜 운전하여야 하나, 비율이 20%이하로 운전할 경우 recycle 블로어를 사용하지 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 크게 줄어들게 된다.

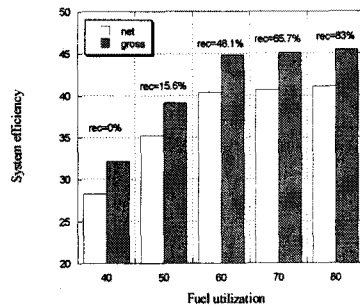


Fig. 3. Effects of fuel oxidant utilization on the system efficiency

3. 결론

본 연구에서는 향후 설치 운전될 100 kW MCFC 시스템 개발을 위하여 필요한 스택 설계조건 검증 및 시스템에 대하여 상용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용 시스템 모사를 통한 효율을 분석하여 보았다. 100 kW MCFC 스택은 6,000 cm² 전지 170장이 필요하며, 정상 운전을 위하여 시스템 압력은 3 기압으로 증가시켜야하며, 이때 125 mA/cm²의 부하와 0.8의 수소 이용률에서 산소 이용률이 0.3, 그리고 공기극 가스 리사이클 비는 0.5가 필요한 것으로 예상된다. 이 때의 분리판 manifold에서 가스 유동은 turbulent에 가까운 것으로 해석된다. 시스템 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 따라서도 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.

(참고 문헌)

- [1] Hiroo Yasue, et al. "Development of a 1,000 kW-class MCFC pilot plant in Japan." Journal of Power Sources, 71, pp89-94, 1998.
- [2] 강병삼, "100 kW급 MCFC 발전시스템 공정의 개념설계," 전력연구원, TM00ES02.P2001.048.2000
- [3] Koh J.-H., Kang B.-S. and Lim H. C., 2000, J. Power Sources, Vol. 91, p161.2000
- [4] 강병삼, 고준호, 이충근, 임희천, "kW급 MCFC 스택에서의 유동 및 열분포 해석", 한국에너지공학회지, Vol. 8, No. 4, p592. (1999)