

가스터빈/연료전지 하이브리드 시스템용 5kW급 SOFC 발전시스템의 개발

임택형¹⁾, 송락현¹⁾, 백동현¹⁾, 신동열¹⁾, 양정일²⁾, 정현²⁾, I.C. Vinke³⁾

Development of 5kW class SOFC power generation system for GT/FC hybrid system

Tak-Hyoung Lim, Rak-Hyun Song, Dong-Hyun Peck, Dong-Ryul Shin, Jung Il Yang,
Hun Jeong, I. C. Vinke

Key words : SOFC, atmospheric and pressurized operation, stack, hybrid system

Abstract : 본 연구에서는 독일 울리히 연구소에서 도입된 면적 200mm*200mm의 연료극 지지체 평판형 SOFC 셀 및 금속 분리판 40장을 적층하여 5kW급 SOFC 스택을 제작하고, 연속운전을 수행하여 운전특성을 분석했다. 본 연구를 통해 도입된 5kW급 SOFC 스택은 외국에서 시도된 적이 없는 평판형 SOFC 스택의 가압운전을 시도해 보는 것으로서, 스택의 임계압력 특성을 확인하고, 이를 바탕으로 가스터빈-연료전지 하이브리드 시스템에서의 SOFC 스택 가압 운전기술을 확보하는 것이다. 이러한 목적을 위해 본 연구에서는 상압형 5kW급 SOFC 스택 운전시스템에 대한 구성과 설계, 전반적인 운전 특성평가 (40셀 스택 운전, 열사이클 시험, 연료 전환 ($H_2 \rightarrow$ pre-reformed gas), 1200시간 연속운전 등)가 이뤄졌다.

1. 서론

고체산화물 연료전지(Solid oxide fuel cell : SOFC)는 연료기체가 소유하고 있는 화학에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변화시키는 에너지 변환 장치이다. 고체산화물 연료전지의 특성은 인산형 및 용융탄산염형 연료전지 등 다른 연료전지에 비해 효율이 높고 공해가 적으며, 연료개질기가 필요 없고, 연료전지-가스터빈 하이브리드 복합발전이 가능하다는 장점을 갖고 있다¹⁾.

현재 전 세계적으로 연료전지-가스터빈 하이브리드 시스템을 제작하고 운전한 나라는 미국으로서, 지멘스 웨스팅하우스사는 220 kW급 혼합시스템 (연료전지 200 kW급-마이크로가스터빈 20 kW급)을 3기압에서 성공적으로 운전하여 전기발효율을 53% 달성했다²⁾. 또한, Fuel Cell Energy 사에서도 상압형으로 유사한 시스템을 제작하여 운전한 경험을 갖고 있다. 그리고 일본의 경우 혼합발전 시스템을 위해 미쓰비씨 중공업에서 가압형 SOFC 를 개발했으며, 유럽은 롤스로이스와 울리히 연구소가 주축이 되어 SOFC 스택 개발을 추진하고 있다. 그러나, 현재 개발되는 SOFC 스택들은 주로 상압형으로 개발되고 있는데, 가스터빈과 연계시킨 하이브리드 발전 시스템을 운

전하기 위해서는 SOFC 스택을 어떻게 효과적으로 가압운전을 할 것이며, 가스터빈과 효율적으로 연계시키는 방안에 대해 많은 연구노력이 집중되고 있다³⁾.

실제 상압형 운전에서 발생하는 많은 여러 가지 문제점들이 가압 스택에 나타날 수 있으며, 가압형 스택의 운전을 통해 상압형과 가압형 스택의 차이점과 스택 설계상의 개선점도 도출될 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 여러 가지 구성소재의 문제점, 특히 가압 조건에서 발생하는 가스 누출 현상의 방지책 마련 등이 있어야 할 것이다⁴⁾. 특히 중요한 것은 가압 스택의 운전 시스템 최적화 및 가스 압력제어의 효과적인 방

1) 한국에너지기술연구원, 신에너지연구부, 신연료전지연구센터

E-mail : ddak@kier.re.kr, rhsong@kier.re.kr, dhpeck@kier.re.kr, drshin@kier.re.kr
Tel : (042)860-3608, 3578, 3015, 3501 Fax : (042) 860-3309

2) 한국에너지기술연구원, 에너지전환연구부, 합성석유연구센터

E-mail : yangji@kier.re.kr, jungh@kier.re.kr
Tel : (042)860-3663, 3795

3) 독일 울리히 연구소, IWW-3

E-mail : i.c.vinke@fz-juelich.de
Tel : (0 2461)616688 Fax : (0 2461)616696

안, 가압 임계조건 선정 등이 이루어져야 할 것이다⁵⁾.

따라서, 본 연구의 목적은 상압형으로 개발된 독일 울리히 연구소의 5kW 급 SOFC 스택을 도입해 운전시스템을 설계 및 제작하고, 제작된 운전 시스템에서 5kW 급 스택을 상압 및 가압 운전하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 5kW 급 SOFC 발전시스템에 대한 구성과 설계, 그리고 독일 울리히 연구소의 5kW 급 SOFC 스택에 대한 전반적인 운전 특성평가가 본 연구를 통해 이뤄졌으며, 5kW 급 SOFC 스택을 3.5기압까지 가압 운전하여 그 특성이 평가됐다.

2. 실험

SOFC 스택 시스템의 기본 구성성분은 로, 반응기체 공급, mechanical loading system, 계장으로 이뤄져 있는데 그림 1 에 잘 나타나 있으며, 독일에서 도입된 5kW급 SOFC 스택은 그림 2에 잘 나타나 있다⁶⁾.

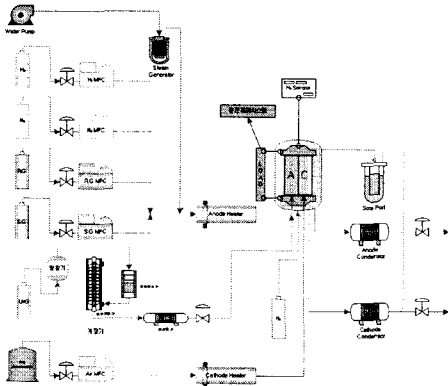


그림 1. 가압형 5kW 급 SOFC 발전시스템

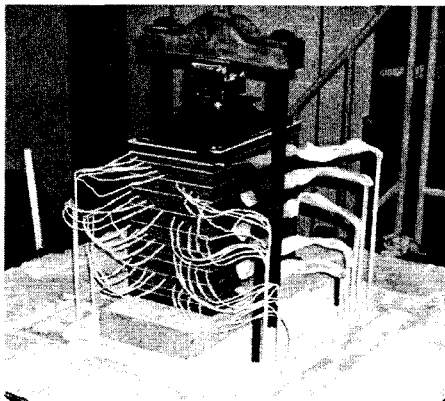


그림 2. 5kW급 SOFC 스택

2.1. 로 (furnace)

스택의 최초 가열, 환원, 운전 시에 사용되는 로는 전통적인 후드형태로서 최대상승 온도는 1280 °C, 사용전력은 20 kW이다. 가열은 후드의 4 벽 열선을 통해 이뤄지며, 후드 자체는 크레인을 이용해서 탈/부착이 이뤄진다. 로 내부는 스택이 존재해야 하기 때문에, 600*700 mm의 면적의 내부 공간이 확보돼야 하며, 후드 내의 평균 높이는 벽면에서 1050 mm, 중앙에서 1130 mm 이다. 스택 적층을 위한 높이는 65 cm 정도이며, 로 내부 아래 부분에 사용되는 벽돌은 refractory clay로 만들어진 벽돌로서 반응기체의 입/출구와 다양한 부분들이 관통하게 된다⁷⁾.

2.2. 스택 mechanical loading system

스택에 다양한 mechanical 로드를 주기 위해 load cell 시스템이 이용됐으며, mechanical load는 다양하게 변화될 수 있다. 스택이 조립된 후 일반적으로 200 kg의 로드가 스택에 주어지며, 글래스 실린트가 자리를 잡기 위해 적당한 온도로 가열되는 동안 일정하게 mechanical load 가 유지된다. 적정온도에 도달한 후 1 시간이 지나면, 무게는 520 kg 으로 증가되며, 그 때 이후에는 일정하게 무게가 유지된다. 20*20 cm² 셀이 장착된 스택의 경우 약 200 kg 의 최소 로드가 필요하다. Mechanical load 시스템 대부분은 Inconel 로 만들어졌으며, 스택과 무게 지레 시스템 사이의 전기적인 절연을 위해서 알루미늄으로 만들어진 round alumina disc 가 사용된다.

2.3. Gas 공급 설비

스택은 로 내부에서 adapter plate 와 top plate 사이에 위치하게 되는데, adapter plate에서 기체 공급 pipe 가 연결된다. Adapter plate는 DIN 1.4742 합금으로 만들어졌으며, 스택과 바닥 판은 유리-세라믹 밀봉재를 이용해 실링이 이뤄졌고, 스택 바닥 판과 adapter plate는 mica로 실링이 이뤄졌다. Adapter plate는 기체공급 설비와 스택을 연결해주며, 2개의 연료 주입구와 1개의 공기 배출구, 2개의 공기 주입구와 1개의 연료 배출구로 구성돼 있다. 연료/공기 흐름은 스택 내에서 반대방향 흐름을 갖는다. SOFC 스택 운전을 위해 공기극에서 산화제로서 공기, 연료극에서 연료 기체로서 수소 및 메탄을 이용한다. 수소 및 메탄의 가습화는 개회로전압(OCV)을 고정하기 위해 필요한데, 연료 주입가스의 경우 3-10% 정도 주입되어야 한다. 메탄은 가열 중에 코킹 현상을 방지하기 위해 증기/탄소(S/C) 비율을 1.5-2 정도로 유지해야 한다. Ar는 비활성 기체로서 사용될 수 있으며, 대체가스로서 N₂도 이용 가능하다. Ar 바탕에 4-5% 의 H₂ 는 가열/냉각 사이클 도중 연료극이 재산화되는 것을 방지하기 위해 연료전지 연료극에 퍼지 가스로서 사용되며, 비상시에도 사용될 수 있다. 연료 및 공기유량은 MFC (mass flow controller)로 조절되는데 최초가열, 환원, 운전, 냉각 및 가열 등에 이용될 수 있는 범위로 조절된다. 연료 및 공기는 스택에 공급되기 전에 예열기로 가열되며, 연료에 수분을 공급하기 위해 steam generator 시스템이 부착되어서 3-10 %의 수분을 공급한다. 스택으로부터 배출되는 연료 및 공기 라인에 chiller 로 냉각된 후 배출구로 배출된다.

동시에 물은 응축되고 기체 흐름으로부터 분리되어 drain line으로 배출된다.

3. 실험 결과

독일 울리히 연구소에 도입된 5kW급 SOFC 스택은 연료극지지체 평판형으로서 20*20cm² 40장의 unit cell 이 적층되어 스택이 구성되며, 이러한 스택이 운전 특성평가를 위해 사용됐다. SOFC 스택 수행성을 나타내는 I-V (그림 3) 특성 분석이 수행됐는데, 스택 내부의 온도와 H₂, 공기, 유량은 800 °C, 144 l/min, 447 l/min 이었으며, dry condition 및 반응 활성 면적은 361 cm² 이었다. 수소 주입 운전시 약 0.7A/cm²의 전류밀도에서 8.1kW의 출력을 얻어낼 수 있었다. 또한, 연료로서 H₂ 대신 개질기를 연계해 개질된 연료를 주입함으로써 얻어지는 SOFC 스택의 I-V 커브 결과 (그림 4)를 분석했으며, fuel utilization에 따른 SOFC stack의 성능 평가 실험도 수행됐다.

5kW급 SOFC 스택의 성능 곡선 이와 더불어, 가압형 5kW급 SOFC 발전시스템에 대한 구성과 설계, SOFC 발전시스템 운전에 대한 전반적인 특성평가 (연료 전환(H₂ → reformed gas, 마이크로가스터빈과의 하이브리드 운전 (그림 5), 3.5 기압까지 가압 운전 등이 이뤄졌다.

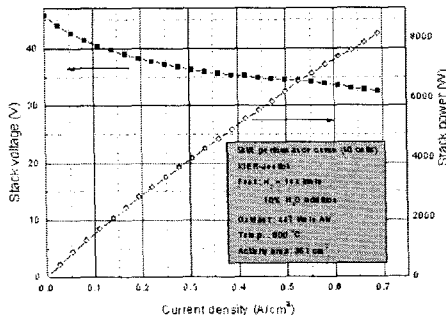


그림 3. 5kW급 SOFC 스택의 성능 곡선

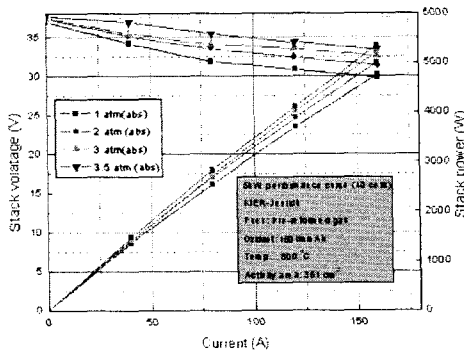


그림 4. 개질기-SOFC stack 연계운전 특성

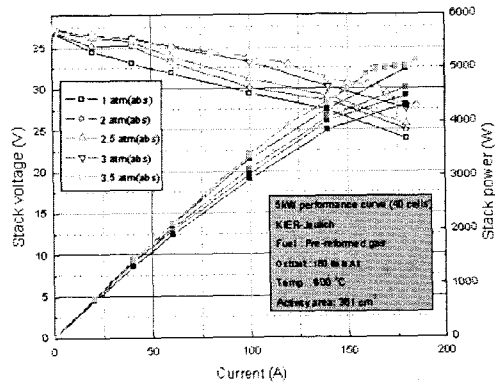


그림 5. SOFC 시스템-가스터빈 연계운전 특성 곡선

3. 결론

본 연구에서는 독일 울리히 연구소에서 도입된 면적 200mm*200mm의 연료극 지지체 평판형 SOFC 셀 및 금속 분리판 40장을 적층하여 5kW급 SOFC 스택을 제작하고, 연속 운전을 수행하여 운전특성을 분석했다. 본 연구를 통해 도입된 5kW급 SOFC 스택은 외국에서 시도된 적이 없는 평판형 SOFC 스택의 가압운전을 시도해 보는 것으로서, 스택의 임계압력 특성을 확인하고, 이를 바탕으로 가스터빈-연료전지 하이브리드 시스템에서의 SOFC 스택 가압 운전기술을 확보하는 것이다. 이러한 목적을 위해 본 연구에서는 상압형 5kW급 SOFC 스택 운전 시스템에 대한 구성과 설계, 전반적인 운전 특성평가 (40셀 스택 운전, 열 사이클 시험, 연료 전환 (H₂ → pre-reformed gas), 1200시간 연속운전 등)가 이뤄졌다.

References

- [1] N. Q. Minh, and Takehiko, Science and Technology of Ceramic Fuel Cell, Elsevier Science(1995).
- [2] T. Iwata, J. Electrochem. Soc. 143[5], 1521-1525(1996).
- [3] T. C. Hsiao, and J. R. Selman, Solid State Ionics, 98, 38-38(1997).
- [4] S. C. Singhal and K. Kendall, High Temperature Solid Oxide Fuel Cell: Fundamentals, Design and Applications, Elsevier Science(2003).
- [5] A. J. Appleby, F. R. Foulkes, Fuel Cell Handbook, van Nostrand Reinhold, New York, 1989, pp. 124-129.
- [6] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Second ed., John Wiley & Sons Ltd., New York, 2003, pp. 1435-1439.
- [7] S. E. Veyo, W. L. Lundberg, S. D. Vora, and K. P. Litzinger, Tubular SOFC hybrid power system status, in: ASME Paper GT2003-38943, 2003.

- [8] G.D. Agnew, M. Bozzolo, R.R. Moritz, S. Berenyi, The design and integration of the Rolls-Royce fuel cell systems 1 MW SOFC, in: ASME Paper GT2005-69122, 2005.
- [9] J. H. Kim, S. S. Yang, and D. S. Lee, Development of high efficiency gas turbine/fuel cell hybrid power generation system, International workshop on fuel cell and fuel cell hybrid systems, 46, 2004, pp. 243-251.
- [10] H.P. Buckkremer, U. Diekmann and D. Stover, in B. Thorstensen (ed.), Proc. 2nd Eur. SOFC Forum 1996, U. Bossel, Mogenacher-strasse 2F, CH-5452 Oberrohrdorf, Switzerland, 1996. pp. 221-228.
- [7] L.G.J. de Haart, K. Mayer, U. Stimming, and I. C. Vinke, Operation of anode-supported thin electrolyte film solid oxide fuel cells at 800 oC and below, J. Power Sources, 71 (1998) 302-305.