

SOFC 시스템의 장시간 운전 및 시스템 신뢰성 향상

이 용¹ · 신석재^{1,†} · 박세진¹ · 김민수¹ · 김현중¹ · 김준호² · 김인환² · 김용수²

¹경동나비엔 신재생시스템연구소, ²경동원 NE연구소

Long Term Operation and Improvement Reliability for SOFC System

YONG YI¹, SEOCK JAE SHIN^{1,†}, SE JIN PARK¹, MIN SOO KIM¹, HYUNG JOONG KIM¹, JUN HO KIM², INHWAN KIM², YONG SU KIM²

¹KD Navien, Renewable System Research Center, 205-38 Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08501, Korea

²KD One, NE Research Center, 169-21 Gasan digital 2-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08504, Korea

[†]Corresponding author :
skhan003@knou.ac.kr

Received 10 August, 2017
Revised 23 September, 2017
Accepted 30 October, 2017

Abstract >> Design, manufacture and operate the 700W Solid oxide fuel cell system suitable for housing. Except for BOP not produced domestically, most of the domestic BOPs were applied as much as possible. Finally, the system size was 350 liter. System performance was electric efficiency 44.64%, thermal efficiency 40.99%, total efficiency 85.62% at certificate authority. The system was operated for 4,500 hours, this operation time include automatically system on/off, E-stop for emergency stop, load trip for blackout and inverter error. There were that the system on/off were 26 times. System performance remains intact after system on/off.

Key words : Fuel cell(연료전지), SOFC(고체산화물 연료전지), Long term operation (장기운전), on/off cycle(시동/정지), Thermal cycle(열 사이클)

1. 서론

에너지 자원의 고갈과 환경오염이 꾸준히 제기 되는 가운데, 전기에너지의 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 환경과 에너지 수요를 동시에 해결 하기 위해 현재보다 친환경적이면서 고효율의 발전 시스템을 요구하고 있다. 기저발전의 기본을 담당하는 원자력 발전소는 폐기물 처리 비용을 포함하여 경제성을 재평가하려는 움직임이 있으며 안전상의 이유로 건설계획이 취소되고 화력

발전소는 대기오염으로 인해 석탄에서 천연가스로 전환하고 있다.

연료전지는 수소와 산소가 전기화학 반응을 통하여 전기를 생산하고 물만 배출하는 발전 시스템이며 친환경적이고 다양한 탄화수소계열의 연료를 사용할 수 있어 연료의 다양성도 높고 소음과 진동이 적어 새로운 발전 시스템으로 주목받고 있다.

연료전지의 종류로는 대표적으로 molten carbonate fuel cell (MCFC), polymer electrolyte membrane

fuel cell (PEMFC), solid oxide fuel cell (SOFC) 등이 있다. 그 중에서 SOFC는 약 700-1,000도 사이에서 운전되는 연료전지로서 고온에서 작동되기 때문에 다양한 연료를 사용할 수 있고 고가의 귀금속이 아닌 저가의 세라믹을 사용할 수 있다¹⁻³⁾. 또한 SOFC 시스템에서 나오는 고온의 배기가스를 활용하여 다른 연료전지 시스템에 비해 고효율 시스템이 가능하다.

SOFC 시스템은 설치 면적이 작아 분산 발전용 및 m-CHP용으로 개발되고 있다³⁾. 현재 국외에서는 미국의 Bloom Energy, 일본의 AISIN, Hitachi Zosen 등에서 1 kW 미만의 주택용 m-CHP 및 100 kW 이상의 분산발전 시스템을 공급하고 국내에서는 경동나비엔, STX, Mico 등이 주택용 SOFC 시스템, 포스코 에너지 등에서 건물 및 발전용 SOFC 시스템을 개발 중이다.

SOFC 시스템은 고온에서 작동하기 때문에 시스템 수준의 장시간 신뢰성 확보가 시스템 상용화에 가장 중요한 기술이다. 시스템의 신뢰성은 가장 취약한 BOP인 SOFC 스택 특성에 크게 좌우된다. SOFC 스택의 취약성은 시스템을 on/off로 인해 발생하는 스택 구성 물질 간의 열팽창 계수 차이와 기밀을 유지하는 밀봉재의 물리화학적 특성 변화로 인해 발생한다. 그 외의 BOP는 개질기, hot box용 열교환기, cold BOP의 특성이 신뢰성에 영향을 미치는 요소이다^{4,5)}.

시스템의 신뢰성을 높이기 위해서는 스택을 포함한 모든 BOP의 특성을 파악해야 한다. 모든 BOP가 각 BOP에 적합한 제어 범위 내에서 운전될 수 있도록 시스템을 제어해야 하며 그 범위 내에서 정격 출력과 효율을 얻어야 한다.

본 연구는 SOFC 스택이 안정적으로 운전이 가능한 제어 범위 내에서 정격 출력으로 운전하도록 시스템을 설계, 제작하였으며 정격 운전시 feed-back 제어를 통해 안정적으로 상태를 유지하도록 하여 시스템의 장기 신뢰성 및 자동제어 알고리즘의 안정성을 확인하였다. 또한 지금까지 on/off가 불가능하거나 어렵다고 알려진 SOFC 스

택의 운전 특성을 시스템 수준에서 H/W와 시스템 제어 알고리즘이 반영된 F/W를 통해 on/off 운전이 가능함을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시스템 설계 및 제작

시스템을 구성하는 BOP를 결정하고 모든 BOP의 운전 조건을 확인하여 제어 가능 범위 내에서 운전이 가능하도록 P&ID를 설계하였다. 스택을 포함한 고온 BOP로 구성된 hot box와 펌프 및 제어보드와 같이 상온에서 동작하는 저온 BOP로 구성된 cold box로 시스템을 구성한 후 3D 모델링을 통해 모든 부품의 배치와 연결 상태를 확인 하였다. Hot box와 cold box는 기체 배관, 신호선, 연료전지 전력선으로 연결되고 인버터와 시스템 제어기는 시스템 내부에 설치하여 시스템 전체를 1개의 모듈로 제작하였다.

시스템 v.01으로 시스템 운전을 하여 출력과 효율을 확인할 수 있었으나 hot box의 크기와 정비의 용이성을 위해 기능별로 상자형 모듈을 구성한 cold box에서 BOP 위치에 따른 손실이 발생하였다. 시스템 v.02는 기능별 상자형 모듈을 3차원 모듈 구조로 BOP를 배치하여 열손실을 감소시켜 발전효율과 열효율을 높여 인증기관 테스트와 장시간 운전을 하였다. 두 시스템의 BOP와 P&ID는 동일하며 배열 회수 모듈과 통합 제어기를 립콘 트롤러가 제어하도록 하였다.

두 시스템의 크기와 구조는 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 시스템 크기는 hot box와 cold box 모두 부피 축소가 가능한 상태이지만 정비 용이성을 위해 v.02의 350리터를 유지하였다.

시스템 v.01은 고온의 배기가스가 cold box의 배기가스용 열교환기까지 연결된 배관에서 열손실이 발생하여 효율이 낮았다. 시스템 v.02는 열손실을 줄이기 위해 hot box에서 배열회수모듈로 연결된 배관을 변경하여 열손실을 최소화하였다. 시스템

Table 1. System size Comparison

		Demension (mm)	Volume (L)	Volume (L)
v.01	Hot box	450 × 500 × 550	123	525
	Cold box	670 × 600 × 1000	402	
v.02	Hot box	580 × 580 × 470	158	350
	Cold box	580 × 580 × 570	192	

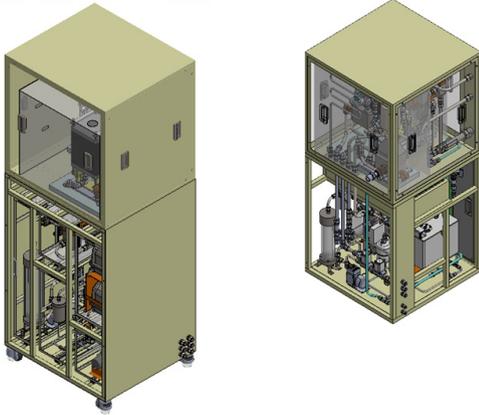


Fig 1. System v.01, v.02

v.01은 배열회수 모듈을 cold box에 설치하였고 시스템 v.02는 hot box로 위치를 변경하였다.

시스템 설계 단계에서부터 양산을 고려하여 양산 중인 부품을 우선 고려하였고 양산 부품의 적용이 어려우면 기존 양산 금형 적용을 우선적으로 검토하였다. 시스템 규격이 확정되지 않은 상태이어서 새로운 부품에 대한 금형 개발은 진행하지 않았으나 기존의 양산 금형을 기준으로 설계하였다.

현재 양산 부품 또는 양산 금형으로부터 개선된 부품은 이그나이터, 점화 트랜스, 배열회수 모듈, 솔레노이드 밸브, 비례 제어 밸브, 연도 및 연도 연결 부품필터 등이 있다.

시스템을 제어하기 위한 제어 보드는 설계 단계에서부터 인증 규격에 적합하도록 설계-제작되었으며 제어 보드의 크기 등은 기존 양산 중인 다른 제품의 제어 보드 규격과 동일하게 설계하여 제어 보드 케이스 등의 중복 투자를 미연에 방지하도록 하였다.

현재 hot box에 사용하는 고온용 열교환기는 수

량이 적어 고가에 제작하고 있으나 규격 및 수량 확정시 금형을 이용한 생산으로 가격을 크게 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 고온용 열교환기가 hot box BOP 중 스택을 제외하고 가장 고가이다.

스택 출력은 인버터를 통해 계통에 연계하였다. 제어를 위한 시스템 소비 전력보다 발전량이 적거나 발전을 하지 않는 승온이나 감온 시에는 계통 전력으로 구동하였다. 발전량이 시스템 소비 전력보다 클 때는 계통으로 역송전하도록 하였다.

시스템의 모든 사양은 설계 단계부터 양산 부품을 우선 적용하였고 제어 알고리즘 또한 연료전지 검사 기준인 KGS AB934를 최대한 반영하였다.

3. 시스템 운전 결과 및 고찰

3.1 시스템 승온 운전

시스템의 열원은 버너 1개로 시스템이 운전되는 동안 버너는 연소 상태를 계속 유지하게 된다. 버너의 점화는 불꽃점화, 자연발화 등 다양한 방법을 시도하였으며 점화 기구 또한 다양하게 시도 하였다.

자연발화는 외부에서 가열된 기체를 공급하여 버너 내부가 자연발화 조건에 도달하면 연료를 공급하여 점화하는 방법으로 승온 속도를 느리게 할 수 있고 온도차를 줄일 수 있는 장점이 있으나 별도의 외부 열원이 필요한 단점이 있다.

불꽃 점화는 가장 많이 사용되는 방법으로 다양한 점화 기구가 있으며 양산형 모델을 우선적으로 시도하였다. 양산형 점화 기구는 일반적으로 상온 위치에 설치되지만 SOFC 버너는 hot box 내부에 위치하므로 고온으로 인해 기밀이 파괴되는 문제가 발생하여 기밀 유지를 위해 별도 조치 후 운전하였다.

대부분 점화는 불꽃 점화 방법을 사용하였으며 부하 운전 시간까지 승온 시간은 19-155시간까지 조절하였다. 승온 시간 단축은 스택의 승온 시간에 의존하였다.

승온 후 부하운전시 계통으로 역송전되는 전력은 580-762 Wac이었다. 이 때 스택 상단 온도는 720℃일 때 580 Wac, 인버터 효율 91%, 758℃일 때 762.5 Wac, 인버터 효율 93.2%의 결과를 얻었다.

수회 운전 결과를 통해 버너의 최고 온도를 950℃, 스택 상단 최고 750℃로 제한하고 스택 입-출구 온도차, 스택 상-하단 온도차를 일정 범위 내로 유지하면서 운전하였다.

개질반응을 위해 공급하는 물은 최초 승온 시에는 물탱크에서 공급하였으며 부하 운전이 시작되면 스택에서 전기화학반응에 의해 생성되는 물이 물탱크에 보충되었으며 과잉의 물은 일정 수위에 도달하면 외부로 배출하여 시스템이 안정성을 유지하도록 하였다. 위의 방법을 통해 부하 운전 중에는 물 보충 없이 재활용되는 물에 의해 시스템을 운전하였다.

3.2 시스템 장시간 운전

시스템 장기운전은 중간 정비시간을 제외하고 시스템 기준으로 약 4,500시간을 운전하였고 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 운전시간 동안 스택 및 BOP 교체는 없었으며 시스템 안정성을 높이고 제어 조건 변화를 위해 배관 일부를 수정하였다. 계통과 연계된 부하 그래프와 온도 그래프가 일치하지 않은 것은 장시간 운전의 마지막 구간에서 온도 기록이 꺼졌기 때문이다.

Fig. 2 중 온도 그래프는 열원가스, anode in/out, cathode in/out을 나타내고 있고 성능 그래프는 동일 시간의 부하 특성을 나타내었다. BOG로 표시된 열원가스가 시스템 전체에 에너지를 공급한다. 열원가스는 개질 반응, anode와 cathode로 공급되는 기체의 예열에 이용한다. 버너 하나 만으로 승온, 정격 운전이 가능하도록 시스템을 설계하여 스택 온도 700-750℃에서 시스템을 운전하였다.

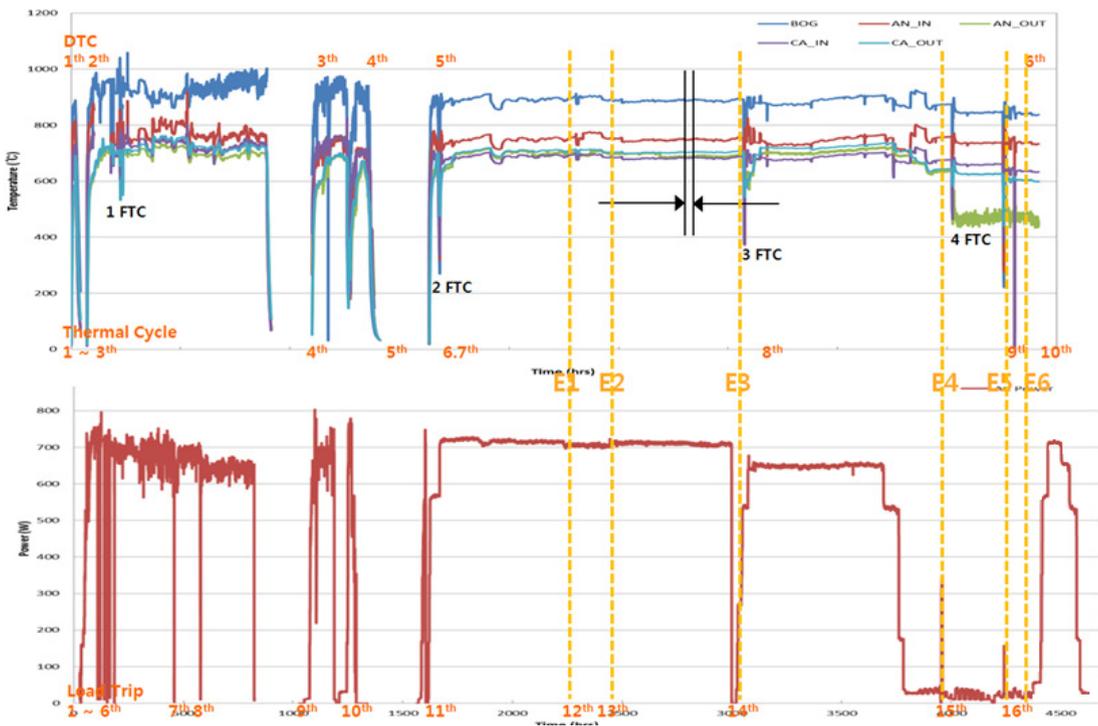


Fig. 2. System long term operation

버너가 시스템 전체에서 유일한 열원이므로 버너의 운전 가능 범위에 따라 시스템의 운전 가능 범위가 정해진다. 버너의 운전 범위를 넓히기 위해 승온, 정격 운전 및 정지 조건에 따라 버너로 유입되는 가스의 조건을 분석하여 연소실 구조 및 염공 규격을 최적화하고 그에 따른 제어 범위를 설정 후 제어 방법을 설계하였다.

버너는 항상 고온을 유지하므로 고온 산화가 가장 심하게 진행되는 부품이다. 제어 범위를 넓히기 위한 구조 변경 이외에 버너 내구성을 높이기 위한 구조 변경도 병행하였다. 내구성을 높이기 위한 표면 처리 및 구조 변경 결과 시스템 기준 약 4,500시간, 이 때 사용한 버너 기준 약 5,000시간 동안 문제없이 운전하였다.

시스템 on/off는 스택 온도를 기준으로 하는 thermal cycle, 부하 운전 중 여러 가지 원인으로 인버터가 갑자기 꺼지는 load trip, 부하 운전 중 연료, 전원이 동시에 차단되어 자연 냉각이 되는 E-stop으로 구분할 수 있다. Thermal cycle은 시스템이 꺼져 스택온도가 하강할 때 가장 낮은 온도를 기준으로 구분하였으며 200℃를 기준으로 최저 온도가 높을 때 fast thermal cycle (FTC), 낮을 때 deep thermal cycle (DTC)로 정의하였다.

실제 설치 현장과 달리 본 연구에서는 on/off에 따라 밀봉재를 포함한 스택의 성능 유지 여부와 시스템 제어를 우선으로 하였으며 200℃ 이하에서는 구성 물질의 열팽창 계수 차이로 인한 영향이 미미하다고 판단하여 200℃를 기준으로 DTC와 FTC를 구분하였다. 추후 필드 테스트에서는 DTC와 FTC의 기준을 다른 온도로 설정할 예정이다.

DTC는 장시간 정지 및 유지 보수에 해당하는 운전 조건이다. 시스템을 완전히 정지한 DTC는 3회였으며 이 때 제어 안정성을 높이기 위해 일부 배관을 수정하였고 스택을 포함한 hot BOP는 초기 상태를 유지하였다. 그 외에 5회의 DTC는 외부 요인에 의해 시스템이 정지 상태로 들어가 스택 온도가 200℃ 이하까지 내려간 경우에 해당한다. 이 때는 다시 승온 운전을 통해 정상 상태까지

도달하였다. 4,500시간 운전 동안 DTC는 총 6회가 있었다.

SOFC는 저온형 연료전지와 달리 연료가 차단되고 버너가 꺼지더라도 SOFC 스택은 운전 온도를 유지하기 때문에 적절한 제어를 통해 다시 부하운전이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 조건을 FTC로 정의하고 200℃를 기준으로 DTC와 구분하였다. 추후 즉시 운전이 가능한 조건과 승온이 필요한 조건으로 세분할 계획이다.

FTC는 시스템에 이상이 발생하여 제어 알고리즘에 의해 시스템 정지에 들어가는 상황으로 계통을 차단하고 고온에서 대기하는 상황이다. 발전이 불가능한 200-600℃ 범위를 포함하므로 온도에 따라 승온 단계가 필요한 경우도 있다. FTC는 실제 현장에서 쉽게 발생할 수 있는 상황으로 FTC 운전 알고리즘은 SOFC 시스템의 가동률 확보를 위해 반드시 필요한 운전 기술이다.

장시간 운전하는 동안 FTC는 총 4회가 있었고 사용자에게 의한 FTC는 없고 모두 외부 요인에 의해 자동 제어를 통한 thermal cycle에 해당한다.

사용자에게 의하지 않은 대표적인 시스템 on/off 원인으로는 load trip과 E-stop이 있다. Load trip은 계통에 연계되어 부하 운전 중에 시스템 이상이나 계통 이상으로 인해 인버터가 차단되는 경우에 해당한다. 연료전지 시스템 중 인버터는 계통에 연결되므로 별도 인증 품목으로 지정되어 이상 조건이 발생하면 인버터를 차단하도록 되어 있다.

Load trip이 발생하면 스택이 부하운전에서 OCV 상태로 짧은 시간에 전환되면서 연료 이용률에 해당하는 에너지가 버너로 이동하여 버너 온도가 급격히 상승하고 개질기와 스택 온도가 임계 온도 이상으로 올라가 시스템에 치명적인 손상을 입게 된다.

Load trip은 계통이 불안정한 시간에 많이 발생하며 발생 시간 예측이 불가능한 반면 시스템에는 회복 불가능한 영향을 미친다. Load trip으로 인한 영향을 최소화하기 위해 load trip 발생시 빠르게 대응하기 위한 제어 알고리즘이 필요하다.

Load trip이 발생하는 원인은 다음과 같다.

1. 계통의 주파수와 전압이 규정치를 벗어날 때
2. 스택 출력이 인버터 입력 범위를 벗어날 때
3. 정전 등의 이유로 계통이 차단될 때
4. 연료 공급이 차단될 때

시스템에는 F/W 형태로 제어 알고리즘이 설치되어 있으며 영향을 최소화하기 위한 최적화 작업이 계속 진행 중이다. 4,500시간 동안 load trip은 총 16회가 있었으며 그중에 load trip이 원인이 되어 4번은 FTC로, 4번은 DTC로 연결되었다.

Thermal cycle까지 연결되지 않은 load trip은 즉시 시스템을 복구하였고 thermal cycle로 연결된 load trip은 다른 원인이 복합적으로 작용하였다. Thermal cycle 후에 정격 운전 조건에서 스택 성능은 정상임을 확인하였다.

정격 부하 운전을 포함하여 전체 운전 시간 중 가스화 계통이 동시에 차단되어 시스템이 자연 냉각 상태로 넘어가는 상황을 E-stop으로 분류하였다. 본 연구의 시스템은 연료전지 제품 검사 규격인 KGS AB934를 기준으로 설계하였으며 동 규격에 따라 연료인 도시가스 공급이 중단되거나 계통이 차단(정전)되면 시스템의 가스와 전원이 동시에 차단되도록 제작되어 있다.

이 때 시스템은 제어 없이 자연 냉각에 들어가는데 연료극에 연료가 공급되지 않음으로 인해 개질기 촉매와 스택 전극이 산화되어 복구 불가능한 손상을 입히게 된다. 산화 방지를 위해서는 비활성 기체나 환원성 기체를 공급하는 방법이 있으나 E-stop에서는 제어 전원도 차단되므로 적합하지 않으며 상용화시 주택에 추가 기체용기 설치가 불가능하므로 새로운 기술 적용이 필요하다.

E-stop에 대응하기 위해서는 시스템 설계시 H/W적으로 시스템을 보호하도록 설계를 변경하였다. 장시간 운전 기간 동안 E-stop은 총 6회가 있었으며 계통이 차단되므로 load trip과 동시에 발생하며 원인 해소 후 시스템 복구 시간에 따라 thermal cycle로 이어지기도 한다. 6회의 E-stop 중

FTC로 2회, DTC로 2회 연결되었으나 시스템을 완전히 정지하지는 않고 다시 승온시켜 운전을 지속하였으며 재운전시 정격 성능이 유지됨을 확인하였다.

시스템이 계통에 연계되어 있으므로 모든 출력은 AC로 표기하며 정격 운전 시에는 제어에 소요되는 자체 소비 전력을 상계한 후 계통으로 역송전되는 전력에 해당한다.

본 연구에 사용한 인버터는 700 W 시스템에 최적화되지 않은 상태로 스택의 DC 출력과 계통과 연결된 인버터의 AC 출력의 비로 표시하는 인버터 효율은 88-90% 범위였다. 상용화된 연료전지용 인버터 효율이 91-93%임을 감안하여 700 W에 최적화된 인버터를 적용하면 시스템 발전 효율은 수 % 높아질 수 있다.

4,500시간 동안 200℃ 이하로 내려가는 DTC은 6회, 200℃ 이상에서 다시 온도를 상승시킨 FTC 4회이며 제어에 의하지 않은 load trip 16회, E-stop 6회로 중복되는 횟수를 정리하면 총 26회의 on/off가 있었고 최종 정지 시까지 스택 출력이 정상임을 확인하였다.

장시간 운전 중 DTC 시에 시스템을 일부 정비하였으며 시스템을 제어하는 F/W를 rev.1부터 rev.3까지 개선하여 시스템 안정성을 높일 수 있었다. 시스템을 완전히 정지시킨 총 5번의 thermal cycle 중 4번째 thermal cycle (5th DTC)이 가장 장시간 운전을 하였으며 그 시간은 시스템 2,914시간, 부하운전 2,850시간이었다.

운전 초기부터 운전 종료 시까지 승온 및 감온 구간을 제외한 정격 운전 조건에서 연료이용률은 70-80% 범위를 유지하였다. 기체 유량이 MFC가 아닌 비례제어 밸브에 의해 제어되므로 세밀한 유량 제어가 불가능하여 유량은 허용 가능한 유량 범위를 정하고 그 범위를 유지하도록 제어하였다.

정격 운전시 부하는 인버터에 의해 제어되며 정전류 운전 상태를 유지하게 된다. Fig. 2의 부하운전은 전 구간에 걸쳐 정전류 상태로 운전하였다.

Thermal cycle 시간이 가장 긴 5th DTC 구간에

서 성능 감소율은 0.42%/1000시간이었다. 이 구간에는 FTC 2회와 E-stop 2회가 포함되어 있다. FTC와 E-stop 시에는 제어 조건이 급격히 변화하게 되는데 개질기 촉매와 스택 전극을 보호하여 시스템의 성능을 유지하기 위해 시스템 H/W와 F/W로 구현된 S/W로 대응하였다. 현재, 복구 시간이 짧은 E-stop은 시스템 성능에 미치는 영향이 적으나 복구 시간이 긴 E-stop은 단기 성능에 미치는 영향은 적으나 장기 성능에는 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

시스템 총 운전 시간은 4,515시간, 승온, 감온 및 무부하 운전을 제외하고 정격 운전을 포함한 부하 운전은 3,852시간이었다. 운전 시간에는 전술한 것과 같이 제어에 의한 thermal cycle, load trip, E-stop을 포함하여 총 26회의 on/off가 있었으며 마지막 시스템 정지 시까지 정격출력을 확인하였다.

본 연구의 시스템은 운전 시작 후 10-50시간 후에 부하 운전이 가능하며 다양한 에러에 대해 스택 상태를 유지하면서 재가동이 가능하도록 안전하게 자동으로 정지할 수 있다. 시스템 기준으로 승온 시간이나 감온 시간은 1시간까지 단축할 수 있으나 스택을 구성하는 세라믹 물질의 특성에 의존하여 시간 단축은 크게 제한된다.

시스템 정비시간을 제외한 시스템 운전시간에 대한 발전시간을 발전 가동률, 정비시간을 포함한 전체 기간에 대한 발전 시간을 총 가동률로 구분하였다. 발전 가동률은 승온 및 냉각시간이 가장 큰 영향을 미치며 운전 중 에러 발생에 의한 FTC, load trip, E-stop 등에 의한 시간도 포함되므로 에러 발생이 적을수록 발전 가동률은 높아진다. 시스템 안정성이 높고 자동제어 시스템에서 에러 발생시 자동 복구 기능이 있을 경우 발전 가동률은 높아질 수 있다.

총 가동률은 정비 등의 이유로 시스템 정지시간에 영향을 받는다. 본 연구에서 정비를 위한 DTC는 2회가 있었으며 그중 1회는 휴일을 포함하여 7일이었다.

장시간 운전에 대해 시스템 총 가동율은 80.7%, 발전 가동률은 85.3%였으며 시스템의 신뢰성이 향상되어 정비시간 없이 제어에 의한 정지만 있다고 하면 발전 가동률은 90%를 상회할 것으로 예상된다.

계산 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{발전 가동률} &= \text{부하 운전시간}/\text{시스템 운전시간} \\ &= 3,852\text{시간}/4,515\text{시간} = 85.3\% \\ &\quad (\text{on/off cycle 포함}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{총 가동률} &= \text{부하 운전시간}/\text{총 기간} \\ &= 3,852\text{시간}/4,776\text{시간} = 80.7\% \\ &\quad (\text{정비 시간 포함}) \end{aligned}$$

위의 결과를 바탕으로 소비자의 전력 소비 패턴과 시스템 신뢰성에 영향을 받는 총 가동률에 따라 시스템의 출력 및 시스템 제어 알고리즘을 최적화하여 시스템의 경제성을 높일 필요가 있다.

3.3 시스템의 효율 측정

장시간 시스템과 동일한 시스템에 대해 공인 기관 중 한 곳인 한국가스안전공사에서 공인 검사 규격인 KGS AB934에 의해 시스템 성능을 측정하였다. 측정 항목은 발전효율, 열효율, 소음, 배가스 조성이었다.

시험은 인증규정인 KGS AB934에서 제시하는 방법과 동일하게 정격 유지 상태에서 1시간씩 3회(총 3시간) 측정하였고 시스템의 소음과 연소 배가스 분석, 시스템 내부 부품의 온도 변화 측정을 병행하였다. 발전 및 수전 전력과 배가스 중 CO를 전체 운전시간에 대해 Fig. 3에 나타내었고 성능 측정 구간은 상자로 표시한 구간이다⁹⁾. 정격운전은 약 10시간 유지하였으며 정격 운전 조건 도달 후 KGS AB934에서 제시한 안정화 시간이 경과한 상태에서 1시간씩 3회, 총 3시간 측정하였다.

상자로 표시한 구간 정격 운전 구간을 기준으로 앞쪽은 승온 구간, 뒤쪽은 감온 구간에 해당한다.

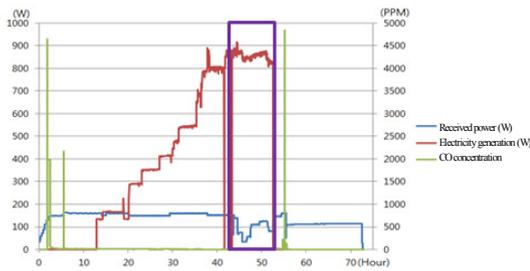


Fig. 3. Result at certificate authority

다. 승온과 감온 구간은 시스템 효율과 관계 없이 운전하는 구간이다. 승온 구간은 열충격을 최소화 하면서 승온 속도를 빠르게 하기 위해 허용된 범위 내에서 최대 열량을 공급하도록 하며 감온 구간에서는 개질기 촉매와 스택 전극을 보호하면서 안전한 온도 구간까지 빨리 내리기 위해 일부 BOP는 최대 출력으로 운전하게 된다.

정격 운전 구간에서는 계통으로 보내는 잉여전력을 최대화하기 위해 수전전력을 최소화하도록 제어 알고리즘을 구성하여 시스템의 경제성이 확보되도록 하였다. Fig. 3에서 정격 구간을 중심으로 수전전력의 차이는 위와 같은 원인에 의한 것이다. 정격 운전 구간에서 수전전력 변화는 정격 운전 상태를 유지하기 위한 피드백 제어에 의한 것이다.

측정 결과 발전효율 44.63%, 열효율 40.99%, 종합효율 85.62%의 결과를 얻었다. 장시간 운전과 동일한 인버터와 제어보드를 사용하였기 때문에 인버터 효율과 제어보드의 소비전력은 최적화되지 않은 상태이어서 최적화할 경우 추가 효율 상승이 가능한 상태이다.

CO 농도는 버너의 점화 시기와 소화 시기에 일시적으로 4,500 ppm 이상까지 상승하지만 나머지 시간은 평균 6 ppm을 유지하였다. 검사 규격의 CO 농도는 정상상태일 때 1,000 ppm 이하이다. 일시적으로 CO 농도가 상승하는 것은 점화와 소화시 연소되지 않은 과량의 연료가 공급되어 발생하는 것으로 검사 규격과 관련 없이 제어 알고리즘을 통해 개선할 예정이다.

Table 2. Result of exhaust gas

Component	R-2	1-1	Unit
CO	6	29	ppm
CO ₂	4.94	3.64	vol%
CH ₄	0	0	ppm
NO _x	0	0	ppm
O ₂	11.4	13.6	vol%

일반 운전에서 사용하는 R-2 가스⁶⁾ 이외에 불완전 연소를 유발하는 1-1 가스⁶⁾에 대해서도 동일한 방법으로 배가스 측정을 하였으며 이 때 결과 또한 규정치를 충분히 만족하였다.

저온형 연료전지와 보일러는 버너만 고온으로 유지되며 연소가 일어나기 때문에 버너에서 연소되지 않은 미연소 가스는 외부로 배출될 수 있다. 고온에서 운전되는 SOFC는 hot box 내부 배관 자체가 자연 발화 조건 이상을 유지하고 희박 연소 조건이어서 공기가 과잉으로 공급되므로 버너에서 연료가 미연소 되더라도 배관을 따라 흐르면서 후연소가 일어나 완전 연소가 일어난다. 이러한 현상은 Fig. 3과 같이 시스템 운전 초기와 종료 시 짧은 시간을 제외하고 전체 운전시간 동안 CO 농도가 낮은 것으로 확인할 수 있으며 1-1 가스에 대해서도 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

3.4 시스템의 신뢰성 향상

시스템의 신뢰성을 높이는 방법은 시스템의 P&ID를 수정하고 이를 H/W로 구현하는 방법과 시스템의 P&ID의 큰 변화 없이 제어 알고리즘 개선을 통하는 방법이 있다. 본 연구에서는 시스템의 P&ID는 크게 변화하지 않는 범위에서 일부 H/W를 변경하였고 제어 조건 변경을 위해 일부 BOP를 교체하고 변경된 H/W 및 BOP 조건을 포함한 제어 알고리즘을 통해 시스템의 신뢰성을 높였다. 현재 시스템은 H/W 개선보다 제어 알고리즘을 포함한 F/W 수정을 통해 시스템 신뢰성 향상이 필요한 단계이다.

시스템 신뢰성을 높이기 위해 시스템 및 BOP

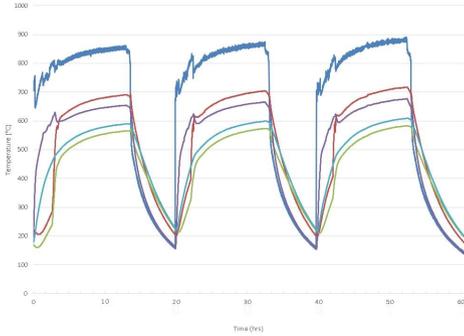


Fig. 4. Result of thermal cycles

의 제어 범위를 넓히고자 하였다. 제어 범위가 좁았던 일부 H/W를 개선하였고 이를 구현하기 위해 변경된 조건에 대해 각 BOP의 제어 범위를 재설정하고 이를 바탕으로 일부 BOP를 변경하였다.

시스템 신뢰성을 높이기 위해 제어 관련 추가 사항을 반영한 제어보드의 H/W를 수정을 하였고 시스템 BOP 및 제어보드의 H/W 수정 내용, 제어 알고리즘 개선 사항을 F/W로 구현하여 시스템의 신뢰성을 높이고자 하였다.

Fig. 4는 위에 언급한 모든 내용이 반영된 F/W에 의해 더미 시스템이 운전된 결과를 나타내었다. 시스템은 제어보드와 별도로 설치된 립컨트롤러를 사용하여 on/off를 하였다. 립컨트롤러는 당사에서 사용하는 양산제품을 사용하였다.

시스템 on은 립컨트롤러에서 수동 조작에 의해 제어보드에 설치된 F/W를 가동시켜 시스템이 자동으로 점화 - 승온 - 정상 상태 - 감온 - 정지가 진행된다. 정상 상태에 도달하면 feed-back 제어를 통해 10시간 유지 후 제어 조건 하에서 감온이 진행되고 설정된 조건에 도달하면 시스템이 꺼지도록 하여 1회의 thermal cycle을 구성하였다.

정지 상태에서 다음 thermal cycle은 립컨트롤러의 수동 조작에 의해 시작되며 이후 조건은 동일하게 진행하였다. 1 thermal cycle에 약 21시간 소요되었는데 자동 thermal cycle 운전에는 더미 스택이 사용되어 승온 및 감온 속도가 빠르게 나타났다.

현재 시스템 제어 알고리즘은 실제 스택 운전 결과를 바탕으로 하였고 제어 변수는 실제 스택과

더미 스택의 차이와 무관하도록 되어 있어 실제 스택 운전 시에는 승온 및 감온 시간만 변화할 뿐 온도 변화 및 제어 조건은 동일하도록 되어 있다.

3회의 thermal cycle 동안 시스템은 안정적으로 작동하였으며 스택 수명에 영향을 미치는 문제점은 발견되지 않았다.

4. 결론

본 연구를 통해 주택용 700 W SOFC 시스템에 대한 장시간 운전 및 신뢰성에 관련하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 시스템 발전효율 44.63%
- 시스템 열효율 40.99%
- 시스템 종합효율 85.62%
(공인성적서 기준 국내 최고 효율)
- 최장 시간 시스템 운전(4,515시간)
- 최초 thermal cycle, E-stop을 포함한 장시간 운전
- 최장 thermal cycle (1 thermal cycle로 2,914시간 운전)
- 정비 시간을 포함한 총 가동률 80.7%
- on/off cycle을 포함한 발전 가동률 85.3%
- 시스템의 자동 on/off 운전을 통해 시스템 신뢰성 향상

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호: 20163030031820)이다.

References

1. Z. U. Dun and Z. A. Zainal, "Biomass intergrated gasification-SOFC systems: Technology overview", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, 2016, pp. 1356-1376.
2. Y. M. Son, "Fuel cell based CHP technologies for residential

- sector”, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 25, No. 4, 2016, pp. 251-258.
3. Y. Lee, C. Yang, C. Yang, S. Park, and S. Park, “Optimization of operating conditions for a 10 kW SOFC system”, *Trans. Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No 1, 2016, pp. 49-62.
 4. Y. D. Lee, S. Kang, K. Y. Ahn, and G. Tsatsaronis, “Environmental Impact Assessment of an SOFC-based CHP System”, *Proceeding of KSME*, Vol. 2014, pp. 1327-1332.
 5. J. H. Jeong, J. Y. Han, Y. W. Sung, and S. S. Yu, “Design of LQR Controller for Thermal Management System of 5KW Solid Oxide Fuel Cell”, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 6, 2015, pp. 505-511.
 6. KGS AB934.