

DSP Controller를 적용한 연료전지 시스템의 유량 제어

신 범수¹⁾, 최 동민²⁾, 한 세영³⁾, 이 호준⁴⁾

Flow Control for Fuel Cell System with DSP Controller

Bum-Su Shin, Dong-Min Choi, Se-Young Han, Ho-Jun Lee

Key words : Fuel Cell System(연료전지시스템), DSP(Digital Signal Processor 디지털 신호처리기), Grid-Connected System(계통연계 시스템), Flow Control(유량 제어), PID Control(PID 제어)

Abstract : 본 논문은 DSP Controller를 적용한 연료전지시스템의 유량제어에 관한 논문이다. 그리고 이 연구에서 사용된 시스템은 1kW급 계통연계 연료전지 시스템이다. 이 연료전지 시스템이 안정적으로 전원을 공급할 수 있도록 시스템에서 요구하는 공기 유량을 정확히 공급하도록 제어하는 것이 본 연구의 목적이다. 이 목적을 이루기 위해 공기 공급 장치에 PID 제어기를 설계하여 적용하였다. PID 제어기의 Gain값은 지글러 니콜스 Tuning 방식으로 정하였다. 이 제어기를 적용하여 실험한 결과, 적용 전 상태와 비교하면 맥동이 30% 저감하였고, 정상상태 오차가 제거되어 온도 변화와 같은 외란과 상관없이 정확한 요구 공기 유량을 공급함을 확인할 수 있었다. 그리고 부하가 변동함에 따라 해당 요구 공기 유량이 바뀔 때 1초 내에 그 요구 공기 유량을 추종하여 스택이 안정적으로 운전될 수 있도록 하였다.

1. 서론

현대 산업 사회의 에너지 소비 증가에 따른 석탄, 석유 등의 화석 에너지 고갈과 화석 연료의 사용으로 인한 환경 문제에 대한 대안으로 연료전지, 풍력, 태양광 등과 같은 친환경적인 대체 에너지 분야에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 중에서도 연료전지시스템은 환경 조건에 영향을 받는 풍력, 태양광과는 달리 상시 운전이 가능하고 전기에너지와 열에너지를 동시에 활용할 수 있다는 장점으로 최근 많은 관심을 받고 있다. 또한 인류 문명의 발전과 함께 에너지원의 추이가 탄소 함유율 감소, 수소 함유율 증가의 방향으로 변화함에 따라 향후에는 수소경제 시대가 도래할 것이라는 전문가들의 의견으로 연료전지시스템에 대한 관심은 더욱 고조되고 있다.

연료전지시스템은 저전압, 고전류의 특성을 가지며, 부하에 따라 발전 전압이 변동하는 직류 전원으로써 이를 상용전원의 안정적 교류전원으로 이용하기 위해서는 전력변환장치의 출력제어, 부하의 안정적 전원공급을 위한 BOP(Balance of Plant)제어 그리고 부하에 따른 연료공급장치 제어가 동시에 수행되어야 한다.

본 논문에서는 안정적인 전원 공급을 위해 부하별 스택이 필요로 하는 요구 공기 유량을 적시에 공급하는 공기 유량 제어 시험을 수행하였다. 이 시험에서 사용된 제어기는 PID 제어기이고, TMS320F2812 DSP Controller를 통해 구현하였다. 그리고 1kW급 계통연계 연료전지시스템에 적용하여 시험을 진행한 후 제어기 성능을 평가하였다.

- 1) (주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀
E-mail : bsshin@hyosung.com
Tel : (02)707-4362 Fax : (02)707-4399
- 2) (주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀
E-mail : powerofmin@hyosung.com
Tel : (02)707-4392 Fax : (02)707-4399
- 3) (주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀
E-mail : iamhansu@hyosung.com
Tel : (02)707-4393 Fax : (02)707-4399
- 4) (주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀
E-mail : gomax@hyosung.com
Tel : (02)707-4377 Fax : (02)707-4399

2. 시스템 구성

연료전지 시스템은 그 기능별로 구분하여 아래와 같이 설명할 수 있다. 수소와 산소의 전기화학 반응을 통해 전기를 생산하는 스택, 스택에 연료인 수소와 공기를 공급하는 연료공급부, 스택에서 생산된 가변적인 전력을 DC-DC 컨버터를 사용하여 안정적인 BOP 전원으로 공급해 주는 BOP 전원공급부, 스택에서 생산된 직류 전원을 계통 전원인 교류 전원으로 변환하는 전력변환장치, 그리고 마지막으로 시스템 제어기는 각종 온도제어, 유량제어, 출력제어, 시스템 보호 등을 수행하며 안정적인 시스템 운영을 책임진다.¹⁾

2.1 1kW급 계통연계 연료전지 시스템

아래 Fig 1은 본 연구에 사용된 1kW급 계통연계 연료전지 시스템에 대한 구성도를 나타낸다.

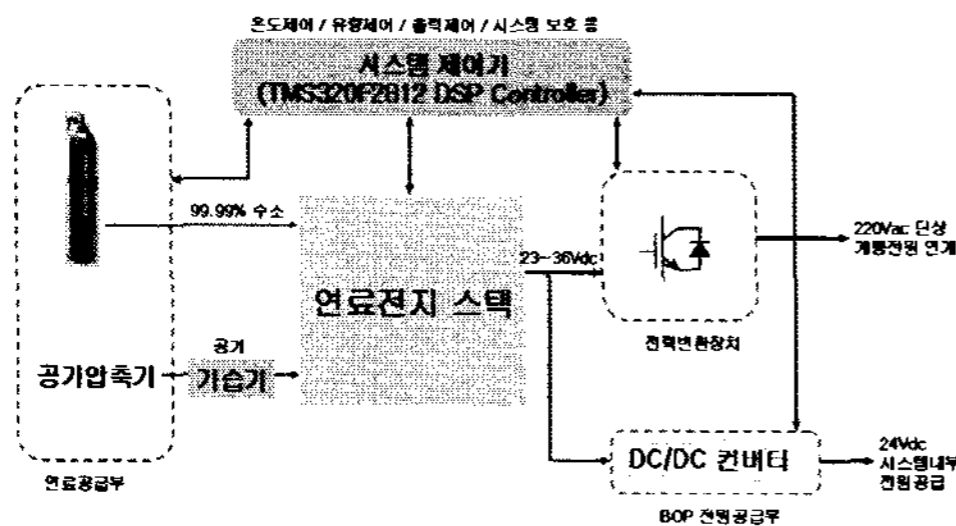


Fig 1. 시스템 블록 다이어그램

아래 Fig 2는 개발된 1kW급 계통연계 연료전지 시스템의 사진으로써, FAN을 이용하여 스택을 냉각하는 공랭식 PEMFC를 적용하였다. 초기 구동은 보조 전원을 이용하며, 스택 OCV 체크 이후의 운전 과정은 DC-DC 컨버터를 이용하여 BOP 전원공급을 하고, BOP 소모 전력 이외의 전력은 계통으로 연계되는 시스템이다.

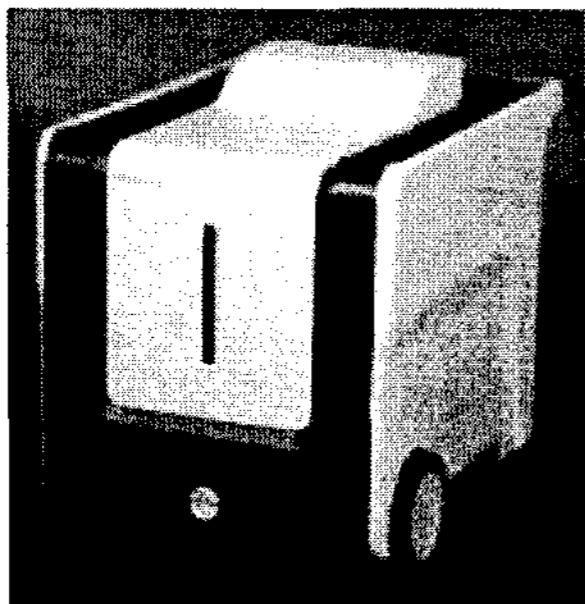


Fig 2. 1kW급 계통연계 연료전지시스템

2.2 시스템 제어기 - DSP

1kW 계통연계 연료전지 시스템에 적용된 시스템 제어기는 아래 Fig 3에서 보는 바와 같다. 이 제어기는 TMS320F2812를 사용하여 각종 Data를 처리하는 Main Processor부와 시스템의 입/출력 제어 신호를 처리하는 주변회로부로 구성되었다.

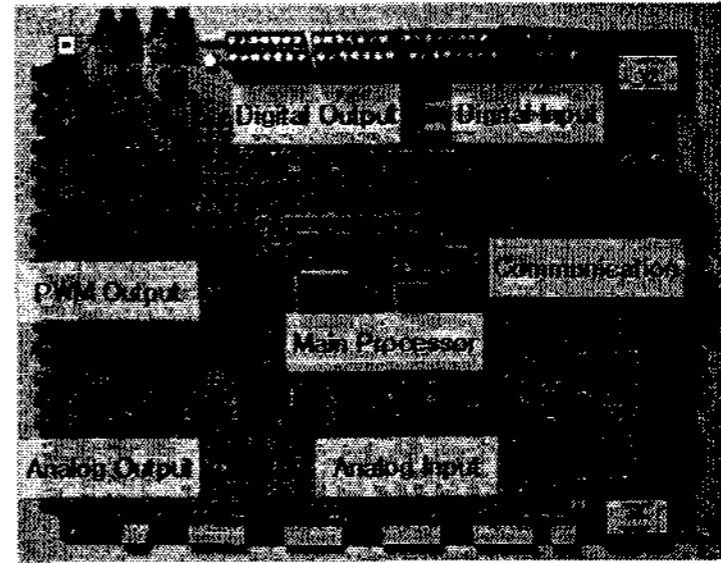


Fig 3. 시스템 제어기

3. 연료전지 시스템 제어

연료전지시스템은 연료 공급 장치(공기, 수소), 냉각장치, 가습장치, 전력변환장치로 크게 나누어 볼 수 있으며, 각 장치에 따른 제어 요소는 Fig 4와 같다.

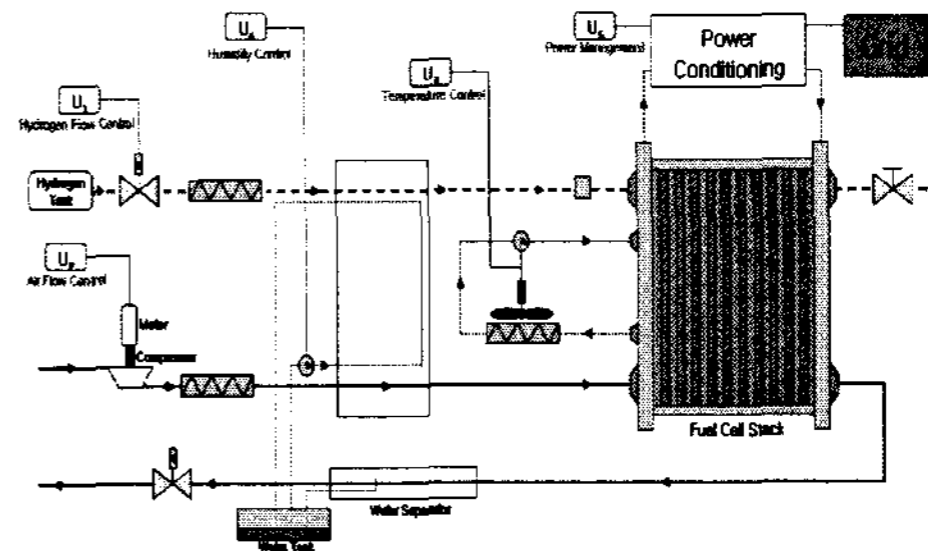


Fig 4. 연료전지 시스템 제어 요소

Fig 4에서 보는 것과 같이 연료전지시스템의 제어는 Anode측과 Cathode측 반응유체(공기, 산소)의 유량 제어, 스택의 온도 및 습도제어, 스택에서 생성된 DC 전력을 AC로 변환시켜주는 전력 제어로 나눌 수 있다. 이러한 제어요소는 BOP의 전력소비를 최소화하고, 시스템의 시동 및 정지, 부하 변동 등과 같은 시스템의 과도 응답 시 빠르고 안정적인 전력생산이 고려되어야 한다. 또한 각각의 제어요소는 서로 독립적으로 수행되는 것이 아니라 한 개의 제어요소가 변화함에 따라 다른 제어요소들도 변화하게 되므로 각각의 제어요소에 대한 최적 운전 조건을 결정해야 한다. 본 논문에서는 위에서 제시한 제어요소 중 연료전지 공기공급장치의 유량 제어에 PID 제어 기법을 적용하여 실험하였다.

3.1 PID 유량 제어기 설계

연료전지 시스템에서 유량 제어의 목적은 요구 전력을 생산하기 위해 스택에 해당 유량을 정확하게 공급하는 것이다. 요구 유량보다 작게 공급되면 생산 전력량이 감소하여 스택에 손상을 줄 수 있고, 공급 유량이 계속 흔들리면 스택에서 생산되는 전력도 흔들리게 된다. 따라서 정확한 유량을 흔들리지 않게 제어하여 안정적으로 공급해야 한다.

여기서 사용된 PID 제어기는 구조가 간단하고 제어성능이 우수하며 제어이득 조정이 쉬워 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. PID 제어기는 비례, 적분, 미분 제어의 세 부분을 조합하여 구성하는 제어기로 시스템의 감쇠비를 증가시키고 상승시간을 빠르게 개선하는 동시에 정상상태 오차도 개선시키는 등 정상상태응답과 과도상태응답을 모두 개선하는 효과를 가지고 있다.

일반적인 제어 시스템은 아래와 같이 Fig 5으로 나타낼 수 있다.²⁾

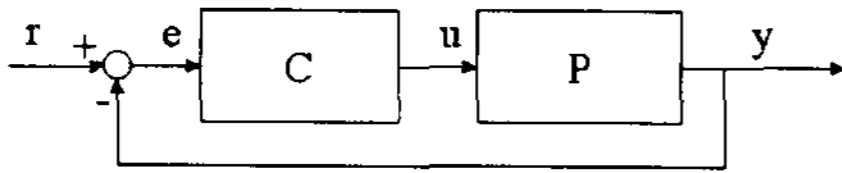


Fig 5. PID 제어 시스템

위 그림에서 PID 제어기(C)의 전달 함수를 아래 식(1)과 같이 나타낸다.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

그리고 식(1)을 시간영역에서 나타내면, 아래 식(2)와 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

위 식(2)에서 시스템(P)를 안정화시키고 동적응답특성을 결정짓는 PID 제어기 Gain값인 K_p, K_d, K_i 를 찾아 제어기를 설계 한다.

이 Gain값을 결정하는 방법에는 크게 무모델 조정법과 모델기반 조정법으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 무모델 조정법 중 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 방법을 이용하여 PID Gain값을 결정하였고, 세부적인 Gain Tuning을 진행하여 PID 제어기를 설계하였다.³⁾

3.2 PID 유량 제어 전/후 성능 비교

앞에서 설계된 PID 제어기의 성능 평가를 위해 PID 제어 성능 비교 시험을 하였다. 경부하와 중부하 조건에서 각각 PID 유량 제어 전/후의 유량을 비교하여 아래 그래프에 나타내었다.

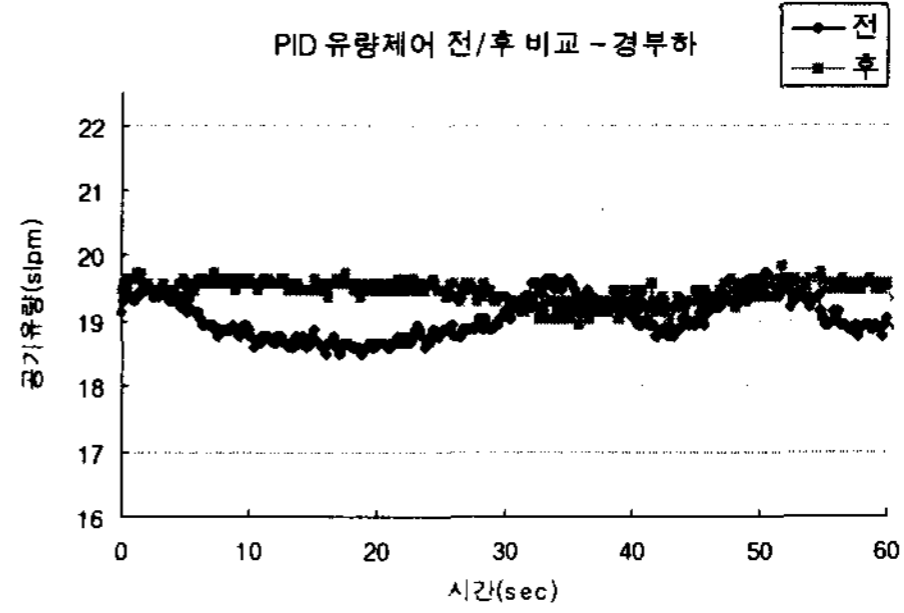


Fig 6. PID 유량 제어 성능 비교(경부하)

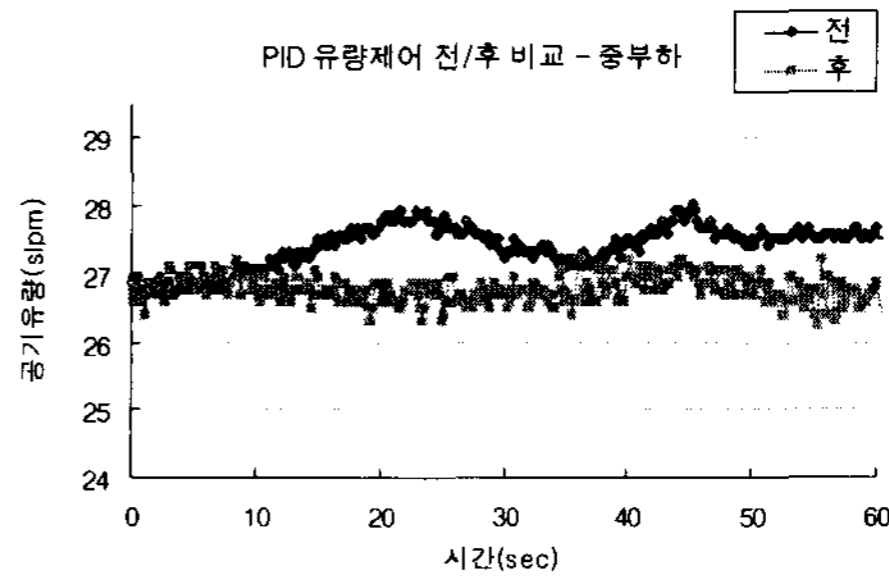


Fig 7. PID 유량 제어 성능 비교(중부하)

Fig 6과 Fig 7에서 보는 바와 같이 PID 제어기를 적용하기 전보다는 적용한 후에 정상상태 오차가 제거됨을 알 수 있고, 리플이 저감됨을 볼 수 있다. 위 그래프에 나타난 유량 변동폭(Peak to Peak)을 아래 Table 1에 정리하여 PID 제어기의 리플(ripple) 저감 성능을 정량적으로 비교하였다.

Table 1. 제어 전/후의 유량 변동폭 비교

부하 조건	유량 변동폭(slpm)	
	제어 전	제어 후
경부하	1.26	0.90
중부하	1.35	0.99

Table 1을 통해 PID 제어 적용 후에 약 30% 정도의 리플 저감 성능을 보여준다. 위 실험에서 적용된 PID 제어기의 Gain값은 특정 부하 영역에 맞게 Tuning된 것이므로 위 경, 중부하 조건에

최적화된 Gain값을 선정하게 되면 제어기의 성능을 개선할 수 있다.

3.3 부하 변동 시 공기 이용률 제어

부하 변동 시 시스템에서 요구하는 공기 유량이 변함에 따라 이 변동 유량을 추종하는 PID 제어기의 성능을 평가하는 시험을 하였다. Fig 8은 15초 간격으로 변동하는 부하 발생 시 PID 제어기가 변동된 요구 공기 유량을 자동 추종함으로써 공기 이용률을 일정하게 제어하고 있음을 보여준다. 그리고 Fig 9는 이런 부하 변동 시 스택의 응답 특성을 보여주고 있다.⁴⁾

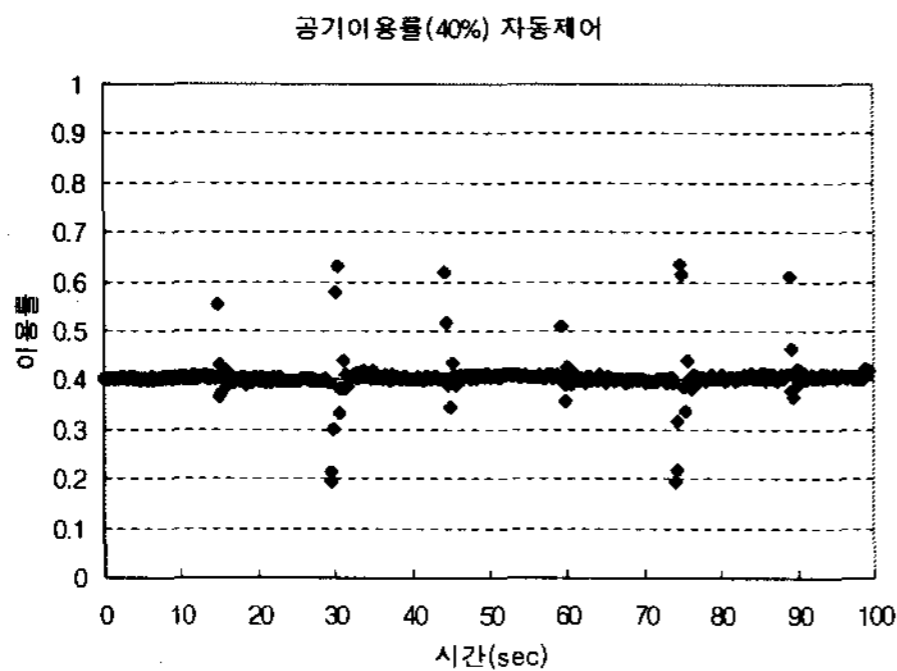


Fig 8. PID 제어 시 공기 이용률

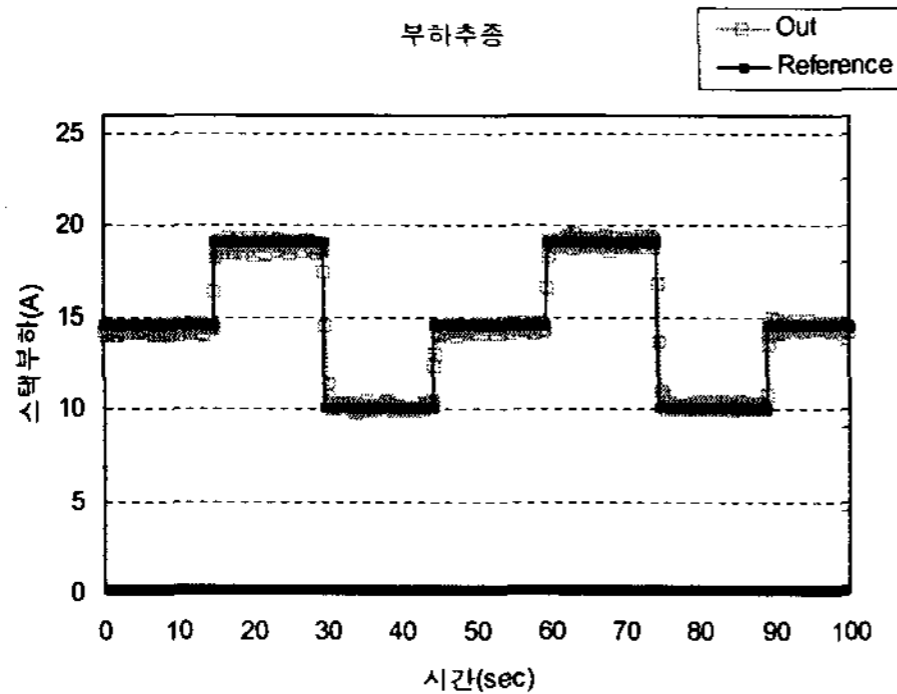


Fig 9. 부하 변동 시 스택 출력

위 Fig 8을 통해 부하 변동 시 PID 제어기가 1초 내에 추종하여 요구 공기 유량을 만족시킴을 볼 수 있다. 이와 같이 공기 유량이 적기에 정확하게 공급될 때 스택의 전원공급이 안정적으로 출력될 수 있다. 그리고 Fig 9는 PID 제어기의 부하 추종 제어를 통해 부하 변동 시에도 스택이 요구 부하의 전력을 안정적으로 출력시킴을 보여준다. 즉, 부하 변동 후 1초 내로 스택 출력이 추종함을 볼 수 있다. 참고로 점 사이의 간격은 0.2초이다.

4. 결론

본 연구에서는 연료전지 시스템의 중요 제어 요소 중 하나인 유량제어를 PID 제어기를 설계하여 진행하였고 그 제어기 성능을 평가하였다. PID 유량 제어를 통해 요구 공기 유량의 정상상태 오차를 제거하고 유량의 변동폭을 30% 정도 저감시켜 정확한 유량을 안정적으로 공급하였고, 부하 변동에 따른 요구 공기 유량을 1초 내로 추종하여 스택의 안정적인 전원공급이 가능하게 하였다.

References

- [1] James Larminie, Andrew Dicks, 2003, "Fuel Cell Systems Explained", pp67-118, Wiley
- [2] Jay H. Lee, Jin Hoon Choi, Kwang Soon Lee, 1997, "Overview of Process Control", pp20-31
- [3] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, 2002, "Feedback Control of Dynamic Systems", pp215-230, Prentice Hall
- [4] 송석홍, 이원용, 김창수, 박영필, 2002, "연료전지 모델링 및 공기이용률 제어에 관한 연구", 연료전지 심포지움 2002 논문집, pp151-156
- [5] Chi-Tsong Chen, 1999, "Linear System Theory and Design", pp5-37, Oxford