

고분자 연료전지의 설계기술 동향

김민진

(에너지기술연구원 수소연료전지연구본부 선임연구원)

고효율 친환경 에너지로 주목받고 있는 고분자연료전지 (proton exchange membrane fuel cell : PEMFC)는 기술 개발 및 실증 단계를 거쳐 보급을 목전에 두고 있다. 고분자 연료전지 시스템의 성공적인 시장 진출을 위해서는 무엇보다 가격 경쟁력 확보가 필수적이며 때문에 가격 저하를 목표로 한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 고분자연료전지 시스템의 가격 저하는 크게 제작비용과 운전비용 측면에서 고려할 수 있다. 제작비용은 주로 막, 촉매, 분리판 등 소재기술 및 그들의 제작기술에 의존적이며 운전비용은 연료전지 스택 및 주변장치의 효율에 의존적이다. 하지만 제작비용 및 장치 효율은 모두 연료전지 시스템의 운전 조건에 따라 가변적인 특징을 보이므로 연료전지 시스템의 운전 전략을 설계하는 것 또한 연료전지 시스템의 전체 비용을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문에서는 시스템의 가격 경쟁력 확보를 위한 연료전지 시스템의 최적 설계 기술을 소개하고자 한다. 연료전지 시스템의 핵심 요소인 스택의 운전조건 및 사이즈의 결정은 스택 자체의 제작비용 및 운전비용을 결정함은 물론 이에 필요한 수소 및 공기량을 결정하므로 이를 공급하기 위한 주변장치의 사이즈 및 이의 비용을 모두 결정하게 된다. 때문에 스택 운전조건 및 사이즈는 연료전지 시스템 전체의 제작비용과 운전비용을 좌우하는 열쇠라 할 수 있다. 연료전지 최적 설계 기술이란 운전비용은 물론 제작비용까지를 고려한 전체 비용을 최소화하기 위한 연료전지 운전조건 및 사이즈를 결정하는 기술을 말한다.

1. 서론

초기 고분자연료전지 시스템의 설계 기술은 다음 두 가지의 목표를 지향하였다. 첫째는 주어진 요구 전력을 충족시키기 위한 연료전지 스택 설계이고 둘째는 스택의 안정적 전력 공급을 지원하기 위한 연료전지 주변장치 (balance of plant : BOP)의 설계이다. 하지만 연료전지 기술의 발달로 스택의 안정성이 확보되면서 점차적으로 연료전지 시스템의 고효율화에 관심이 높아져왔고 이에 따라 연료전지 시스템 설계 기술 또한 고효율화를 위한 스택 및 주변장치의 종합 설계로 그 목표가 수정되어왔다¹⁻³⁾. 스택의 효율은 그의 운전조건에 따라 달라지며 스택 운전조건 변화는 스택은 물론 공기공급계, 연료공급계, 열관리계, 물관리계, 전력변환계 등의 주변장치의 설계 변화를 초래하므로 연료전지 시스템의 종합 효율을 향상시키기 위해서는 스택 및 주변장치의 종합 설계 기술이 필수적이기 때문이다.

최근에는 본격적인 연료전지 산업화를 대비하기 위한 가장 현실적인 요구 기술 중 하나로 시스템 제작비용과 운전비용을 동시에 고려한 전체 비용을 최소로 만들기 위한 최적 설계에 대한 관심이 높아지고 있다^{4,5)}. 연료전지 시스템이 기존 제품에 비해 높은 경쟁력을 확보하기 위해서는 무엇보다 먼저 해결되어야 하는 부분이 가격 경쟁력이다. 하지만 무조건적으로 시스템 효율만을 향상시키기 위한 기존 설계 기술은 오히려 시스템의 제작 단가를 높여 가격 경쟁력을 잃게 만드는 결과

를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고분자 연료전지 시스템의 비용 최소화를 위한 최적 설계 기술을 소개하고 추후 이의 활용 방향에 대해 논하고자 한다.

2. 고분자연료전지 시스템 구성

연료전지 시스템은 전기를 발생하는 스택, 스택에 연료 및 공기를 공급하는 연료 공급 장치와 공기 공급 장치, 물 및 열 관리를 담당하는 주변장치로 구성된다. 연료전지로부터 공급된 전력은 DC/DC 컨버터에 의해 증폭하고 DC/AC 인버터를 통해 변환된 후 최종적으로 사용처에 공급된다. 고분자연료전지 시스템은 자동차용, 가정용, 이동형 등 그 용도에 따라 다양한 구조를 갖는다. 수소극은 수소탱크와 재순환장치를 기반으로 순수 수소를 사용하기도 하고 개질 장치를 기반으로 개질 가스를 이용하기도 한다. 산소극은 압축기를 기반으로 공기를 이용하기도 하고 수소 탱크와 재순환장치를 기반으로 순수 수소를 이용하기도 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같은 수소-공기 기반 고분자연료전지 시스템을 대상으로 고분자 연료전지의 최적 설계 기술을 소개하고자 한다.

3. 고분자 연료전지 시스템의 효율과 비용

3.1 연료전지 시스템의 효율

연료전지 스택은 전압, 압력, 온도, 습도 등 다양한 운전조건에 따라 그 효율이 달라진다. 그 중 연료전지의 전압과 전류 밀도의 상관관계는 연료전지 스택의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 연료전지 고유의 특성으로써 간단히 연료전지 성능곡선이라 한다. 그림 2에서 cell voltage로 표시된 그래프가 연료전지 성능곡선이다. 연료전지 스택은 수소를 전기에너지로 전환시키는 과정에서 활성화 과전압, 저항 손실, 농도 손실 등의 에너지 손실을 발생시키는데 때문에 그림과 같이

운전 전류가 높아질수록 전압의 손실이 증가하는 양상을 보인다.

반면 공기 압축기, 냉각수 펌프, 재순환장치, 가습기 등의 연료전지 주변장치들 또한 각자 고유의 기계적 특징에 의해 부하변동에 따라 효율이 달라진다. 그림 3에서 보는 바와 같이 주변장치 중 연료전지 시스템 효율에 가장 큰 영향력을 지닌 것은 공기 압축기이다. 그림(FC Stack Power 라인)과 같이 연료전지 스택의 전류가 증가할수록 스택은 높은 전력을 발생한다. 하지만 이를 발생시키기 위해 작동한 주변장치 특히 공기 압축기의 소비동력으로 인해 외부 요구 전력을 충족시키는 목적으로 공급할 수 있는 전력은 그림(FC Net Power 라인)과 같이 줄어든다. 그림 2에서 system efficiency로 표시된 그래프는 스택 성능곡선과 연료전지 주변장치의 효율까지를 고려한 연료전지 시스템의 효율을 나타낸다. 연료전지 시스템은 주로 낮은 전류밀도 영역에서 효율이 매우 높다. 하지만 연료전지의 전류 밀도가 아주 낮은 영역의 경우, 스택의 효

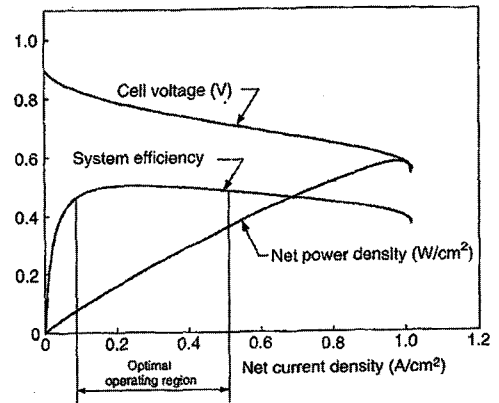


그림 2 연료전지 스택의 일반적 운전 특징

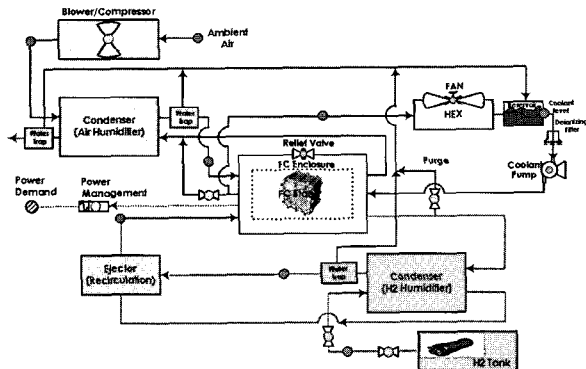


그림 1 고분자연료전지 시스템 구성도

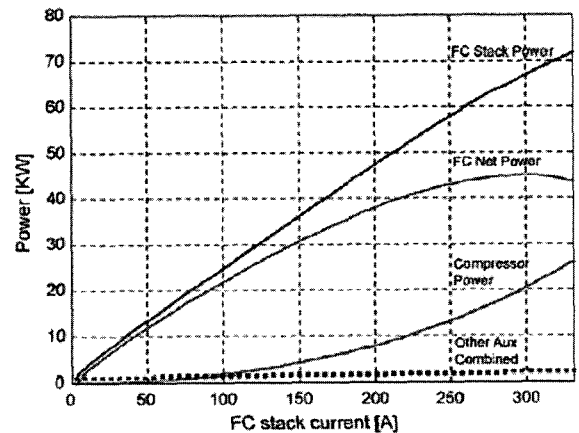


그림 3 연료전지 스택 전류에 따른 연료전지 스택 총 발생 전력, 연료전지 공급 전력, 압축기 소비전력, 기타 소비전력의 비교

표 1 연료전지 시스템 설계 변동과 시스템 비용 변동의 상관관계

구성 요소	제작비용	운전비용	
		전력	수소
스택	0	-	0
공기압축기	0	0	-
이젝터	0	-	-
막가습기	0	-	-
열교환기	0	-	-
냉각수 펌프	0	0	-
물탱크	0	-	-
물받이	0	-	-
전력변환계	0	0	-

율이 매우 높은 반면 주변장치들의 초기 소모 동력이 매우 커서 연료전지 시스템의 효율은 아주 낮아진다.

연료전지 시스템의 효율을 극대화시키기 위해서는 그림의 최적 운전 영역과 같이 낮은 전류 영역에서 운전하는 것이 유리하다. 이 영역에서는 스택의 효율이 높으므로 동일 전력 발생을 기준으로 필요 수소량 및 공기량이 상대적으로 작아지고 이에 따른 수소 공급 및 공기 공급 장치의 용량도 작아지기 때문이다. 또한 연료전지의 발생열이 상대적으로 작아지므로 연료전지 운전 온도를 유지하기 위한 냉각 시스템의 열교환기 및 냉각수 펌프의 용량 또한 작아진다.

3.2 연료전지 시스템의 비용

시스템 제작비용 측면에서는 높은 전류 영역이 낮은 전류 영역 보다 유리하다. 이미 언급한 바와 같이 낮은 전류 영역에서의 운전은 상대적으로 적은 량의 수소와 공기를 요구하므로 이에 따른 운전비용은 감소하는 반면 낮은 전류 영역의 경우 동일 요구 부하를 충족시키기 위해서는 보다 높은 전압 즉, 보다 많은 셀 개수를 필요로 하기 때문에 연료전지 제작비용이 급격히 증가하게 된다.

추가적으로 그림 1에 소개된 시스템을 대상으로 연료전지 시스템 설계 변동에 따른 시스템 비용 변동 요인을 표 1에 요약하였다. 대상 시스템의 경우 수소-공기 시스템이므로 공기의 운전비용은 제외한다. 또한 가습장치와 수소 순환장치의 경우 수동적 방식으로 작동하는 막가습기와 이젝터를 사용하므로 소요 동력은 없다.

4. 비용 최소화를 위한 최적 설계

연료전지 시스템 구성요소의 사이즈와 효율은 모두 시스템의 제작비용(capital cost)과 운전비용(operating cost)을 결정한다. 그러므로 시스템의 사이즈와 효율을 모두 비용으로

환산하면 비용을 최소로 한다는 하나의 기준으로 시스템을 최적 설계할 수 있다. 본 논문에서는 주어진 연료전지의 요구 출력을 만족시키면서 비용이 최소가 되는 고분자연료전지 시스템을 설계하는 기술을 소개한다.

4.1 최적화 정형화

만약 연료전지 시스템을 높은 전압으로 운전하면서 동일 출력을 공급하기 위해서는 연료전지 셀 개수를 늘려야하고 막전극복합체(membrane electrode assembly : MEA)의 활성 면적은 줄여야 한다. 분리판의 개수 증가에 따른 비용 증가가 막전극복합체의 활성면적 감소에 따른 비용 감소에 비해 월등히 높으므로 높은 전압의 운전은 전체 제작비용을 상승시키는 결과를 초래한다. 반면 연료전지 시스템 효율의 상승을 통해 운전비용 절감의 효과를 보이기도 한다. 즉, 연료전지의 제작비용과 운전비용에는 운전조건에 따라 상반관계(trade-off)가 존재한다. 그러므로 연료전지 시스템의 비용을 최소로 하는 최적설계를 수행하기 위해서는 제작비용과 운전비용을 동시에 고려해주어야 한다. 하지만 제작비용은 시스템 제작 당시 일시적으로 들어가는 반면 운전비용은 연료전지 시스템을 사용하는 내내 들어가야 할 비용이므로 연료전지 시스템의 수명을 도입하여 연간 전체 비용으로 환산하여 최적화를 수행한다. 다음은 연료전지시스템의 전체 비용을 최소로 하는 운전전압 및 스택 사이즈를 찾기 위한 최적화 정형화이다.

$$\text{Minimize: } f(x) = C_c / I_c + C_o$$

$$\text{where, } x = \{V_c, N_c\}$$

$$C_c = C_{c-cell} N_c + C_{c-bops}$$

$$C_o = C_{H_2} F_{H_2} + C_{e-comp} F_{H_2} + C_{e-pump} F_{H_2O} + C_{e-loss} P_{fc}$$

$$C_{c-bops} = f_1(V_c)$$

$$F_{H_2} = f_2(V_c)$$

$$F_{H_2O} = f_3(V_c)$$

$$F_{Air} = f_4(V_c)$$

$$\Delta P_{comp} = f_5(V_c)$$

$$\Delta P_{pump} = f_6(F_{H_2O})$$

$$\text{subject to: } 0 \leq f(x) \leq C_t^{\max}$$

$$0 \leq \Delta P_{comp} \leq \Delta P_{comp}^{\max}$$

$$0 \leq \Delta P_{pump} \leq \Delta P_{pump}^{\max}$$

모든 변수 : 양수

N_c : 정수

최적 설계값의 현실성을 높이기 위해서는 데이터의 정확도가 무엇보다 중요하다. 제작비용 측면으로는 연료전지 유형별 제작 기법이 규명되고 그에 따른 정확한 단가 데이터가 중요하다. 운전비용 측면으로는 연료전지 스택 및 주변장치의 정확한 효율 데이터와 성능 예측 모델이 필요하다. 때문에 같은 최적 설계 기술을 사용하더라도 추후 단가 및 성능 데이터의 정확도가 높아질수록 더욱 가치 있는 설계 값을 얻을 수 있다.

5. 결론

고분자연료전지 시스템의 제작비용은 물론 운전비용도 함께 최소화하기 위해서는 연료전지 시스템 설계 시 스택과 주변장치 모두를 대상으로 스택의 운전조건 및 사이즈를 동시에 결정해야 한다. 연료전지의 제작비용과 운전비용 사이에는 스택의 운전조건에 따라 상반관계가 존재하므로 최적화 기술을 도입하여 스택의 운전조건 및 사이즈를 결정한다. 본 논문에서 소개한 연료전지의 최적 설계 기술은 연료전지의 상업화를 촉진시키기 위해 꼭 필요한 기술이며 정확한 제작 단가 및 성능 데이터가 동반될 때 비로소 현실적인 가치가 부여될 것이다. ■

기 호

- C_c : 제작비용 (capital cost)
- C_o : 운전비용 (operating cost)
- F : 유량
- f : 목적함수
- f_1 : 스택 사이즈에 따른 주변장치 제작비용
- f_2 : 스택 사이즈에 따른 수소 유량
- f_3 : 스택 사이즈에 따른 냉각수 유량
- f_4 : 스택 사이즈에 따른 공기 유량
- f_5 : 공기 유량에 따른 압축기 압력강하
- f_6 : 냉각수 유량에 따른 펌프 압력강하
- lc : 수명 (life cycle)
- N_c : 셀 개수
- x : 결정변수 (decision variable)
- V_c : 셀 압력
- ΔP : 압력강하

하 첨 자

- Air* : 공기
- bops* : 연료전지 주변장치들
- cell* : 연료전지 셀

- comp* : 공기 압축기
- fc* : 연료전지
- H2* : 수소
- H2O* : 냉각수
- loss* : 전력변환손실
- pump* : 냉각수 펌프
- t* : 제작비용과 운전비용의 합

상 첨 자

- max* : 최대 범위

참 고 문 헌

- [1] B. Sorensen, "Assessing current vehicle performance and simulating the performance of hydrogen and hybrid cars", International Journal of Hydrogen Energy, In press, 2006.
- [2] J.V. Mierlo, G. Maggetto, and Ph. Lataire, "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 2748-2760, 2006.
- [3] K.-S. Jeong and W.-Y. Lss, "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15 (1), pp. 1-11 2004.
- [4] M.-J. Kim and H. Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 165, pp. 819-832, 2006.
- [5] J. Hellgren, "Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus power train for year 2005 and 2020", Energy Policy, Vol. 35 (1), 2007, pp. 39-49.

〈 저 자 소 개 〉



김민진(金旻縉)

1976년 3월 27일생. 1999년 서강대 화학공학과 졸업. 2005년 포항공과대 화학공학과 졸업(공박). 2005년~현재 에너지기술연구원 선임 연구원.