

연료전지 자동차용 복합형 가습시스템에 관한 연구

김현유[†], 권혁률*, 서상훈*, 박용선*, 안병기*

*현대자동차

An Integrated Humidification System for a Fuel Cell Vehicle

HYUNYOO KIM[†], HYUCKRYUL KWON*, SANGHOON SEO*, YONGSUN PARK*, BYUNGKI AHN*

*Hyundai Motor Company, 104 Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-912, Korea

ABSTRACT

In this study, we suggested an integrated humidification system for a fuel cell electric vehicle (FCEV) as an efficient method of humidification under the various driving condition of the fuel cell vehicle and system. It is improving air humidification system combined the existing membrane humidifier and water injection. As a result, we verified it through experiments and the vehicle test and could get a result of improvement of humidification performance. The results show that an integrated humidification system is a useful method for FCEV applications.

KEY WORDS : Humidifier(가습기), Water Injection(물분사), Fuel cell(연료전지), Stack(스택), Membrane humidifier(막가습기)

1. 서 론

연료전지 차량에 있어서 전기동력을 발생시키는 고분자 전해질 스택의 안정적인 운전을 위해서는 고분자 전해질 막에 대한 일정 수준 이상의 가습이 필수적이다¹⁻⁴⁾. 따라서, 스택 내 가습을 위해서, 스택에 공급되어지는 공기를 가습하는 것이 일반적이며, 이를 위해 실제 시스템 내에 가습시스템을 도입하고 있다²⁾.

연료전지 가습시스템의 경우, 크게 내부가습과 외부가습 방식으로 나눌 수 있다. 외부가습 방식에

는 버블링 방식, 액적 분무 방식, 막가습기 방식 등이 있다^{2,5,6)}. 하지만, 연료전지 자동차의 경우 패키지 측면에 제한이 있기 때문에 상대적으로 부피가 작은 막가습기가 적용되고 있다. 또한 막가습기의 경우, 별도의 에너지원이나 동력장치가 필요하지 않다는 장점이 있다.

현재 연료전지 자동차의 경우, 대부분 막가습기가 적용되고 있다. 이런 막가습기의 단독 사용 및 운전에 있어서, 막가습기의 경우, 가습기 내부의 막을 통한 기체-기체 교환 방식으로, 스택에서 배출되어지는 배출 공기와 공기블로워에 의해 공급되는 공기 간의 열 및 수분 교환을 통하여 스택에 가습된 공기를 공급하는 장치이다^{2,7,8)}. 하지만, 차량 및 시스템의

[†]Corresponding author : Hyunwoo.kim@hyundai.com
[접수일 : 2010.9.15 수정일 : 2010.10.11 게재확정일 : 2010.12.17]

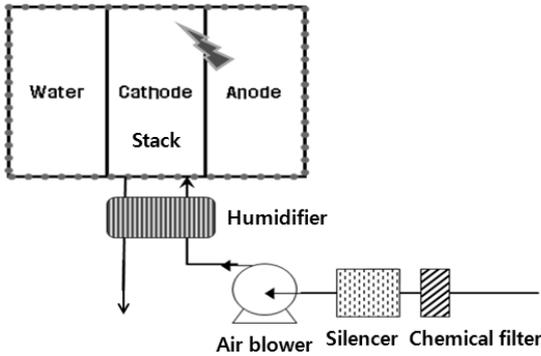


Fig. 1 Air processing system (APS) for fuel cell.

운전 조건 변화에 따라 스택 운전 온도 상승 및 back diffusion 등에 의한 연료극(anode)으로의 물 이동은 스택 배출 공기의 상대습도 및 수분함량을 감소시켜, 막 가습기의 가습성능을 저하시킨다.

본 연구에서는 이러한 연료전지 차량 및 시스템의 다양한 운전조건에서 효율적인 가습을 위한 방안으로 막가습기와 물 분사 방식을 혼합한 복합형 가습시스템을 제시하였으며, 실험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 공기공급시스템

공기공급시스템(air processing system, APS)은 스택의 운전 조건에 필요한 공기를 공급하는 시스템으로서, 필요한 공기량을 제어하고 가습시켜 주는 역할을 한다. 그리고 아래 Fig. 1과 같이 공기필터, 소음기, 공기블로워, 가습기 등으로 구성된다. 공기필터는 스택의 내구성을 저하시키는 수 마이크로미터 이상의 미세 먼지와 SO₂와 같은 화학물질을 제거해 주는 역할을 하며, 소음기는 공기 블로워에서 발생하는 소음을 저감시켜주는 역할을 한다.

또한 공기블로워는 제어기를 통한 회전수 조절로 스택 운전에 필요한 공기 유량을 스택에 직접 공급해 주는 역할을 한다. 그리고 이 중에서 연료전지용 가습기는 스택 배출 공기의 열 및 수분을 스택 공급

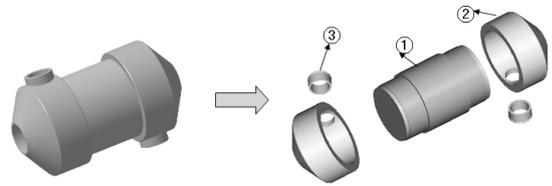


Fig. 2 Membrane humidifier for fuel cell.

공기에 전달하여, 스택에 공급되는 공기의 온도 및 습도를 스택 요구 조건에 적합하도록 조절하는 부품이다. 특히 막가습기는 막의 화학적 수분이동 능력을 활용하여 기체-기체 혹은 기체-액체 형태로 공기를 가습하여 연료전지 반응에 필요한 가습된 공기를 공급하는 장치이다. 막가습기의 주요 구성품으로는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가습막 모듈(1), 하우징(2), 매니폴드(3)등으로 구성되어 있다.

2.2 연구개요

자동차의 경우, 차량 운전 조건을 만족시키기 위해서는 차량의 냉각성능이 필수적으로 뒷받침 되어야 한다. 하지만 연료전지 자동차의 경우, 엔진 역할을 하는 스택의 운전온도가 내연기관에 비해 낮기 때문에 차량의 냉각성능이 부족하다는 문제가 있다. 따라서 연료전지 차량의 냉각성능과 차량 운전 조건을 만족시키기 위해서는 연료전지 스택의 운전 온도 상승이 수반되어야 한다.

연료전지 스택의 운전온도를 상승시키기 위해서 필수적으로 뒷받침 되어야 하는 것이 바로 막가습기의 가습성능 향상이다. 하지만, 연료전지 스택의 운전온도를 상승시킬 경우, 운전온도의 상승에 따라 스택 공기극에서 배기되는 배출 공기(off-gas)의 온도가 높아지게 된다. 이에 따라 배출 공기의 상대습도가 저하되어 오히려 가습기의 가습성능 저하를 초래하게 된다. 그리고 이러한 가습기의 성능저하는 스택에 공급되는 공기의 상대습도 저하를 초래하여 결국, 스택의 성능 및 내구성 저하의 원인이 된다(연료전지 스택 운전온도 상승 → 공기극 배출 공기 온도상승 → 공기극 배출 공기 상대습도 저하 →

막가습기 가습성능 저하 → 공기극 공급공기 상대습도 저하 → 연료전지 스택 성능 및 내구성 저하).

또한 막가습기의 가습성능을 연료전지의 연료극 측과 관련하여 볼 수 있다. 연료전지 스택에 공급되는 수소는 수소탱크에서 공급되는 수소와 재순환되는 수소가 합쳐져서 스택에 공급되게 된다. 이 때 스택에 공급되는 수소의 상대습도는 포화상태에 근접하나 온도는 매우 낮은 상태가 된다. 따라서 이러한 상태에서 스택 연료극 측에 공급되면 온도가 상승하면서 상대습도는 급격히 저하된다. 이로 인해 연료극 입구의 막이 건조(dry-out) 하게 된다.

결과적으로 스택 공기극 측에서 생성된 물이 back-diffusion에 의하여 연료극 측으로 넘어가, 오히려 스택 배출 공기의 수분함량을 감소시켜, 더욱더 막가습기의 가습 성능 저하를 초래하게 된다. 이러한 back-diffusion 현상은 스택의 운전온도가 상승함에 따라 더욱더 심화된다(연료전지 스택 운전 온도 상승 → 연료극 측으로의 back-diffusion 증가 → 공기극 배출 공기 상대습도 저하 → 막가습기 가습성능 저하 → 공기극 공급공기 상대습도 저하 → 연료전지 스택 성능 및 내구성 저하).

따라서 이러한 기술적인 문제점들을 해결하기 위하여 스택 배출 공기의 온도를 낮추어 상대습도를 높이고, 연료극에서 생성되는 응축수를 이용할 수 있다면, 막가습기의 가습성능을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 이를 위한 방법으로 기존 막가습기에 연료극 측에서 생성되는 응축수를 분사하는 것을 모사한 물 분사 방식을 제안하였으며, 실험을 통하여 검증하였다. 연료극 측에서 생성되는 응축수를 분사할 경우, 응축수를 이용할 수 있을 뿐만 아니라, 응축수에 의해 스택 배출 공기의 온도를 낮출 수 있어 가습성능 향상을 도모할 수 있다. 즉, 연료전지 스택의 운전온도 상승 및 이에 따른 차량 시험 조건을 만족하기 위한 막가습기의 가습성능 향상 방안으로 기존 막가습기에 물 분사 하는 방식, 즉, 복합형 가습시스템을 제시하였고 실험을 통하여 검증하였다. 또한 본 연구에서는 이에 앞서, 기존 막가습기의 여러 조건 하에서의 기본성능 및 이에 따른 성능맵을 도출하였다.

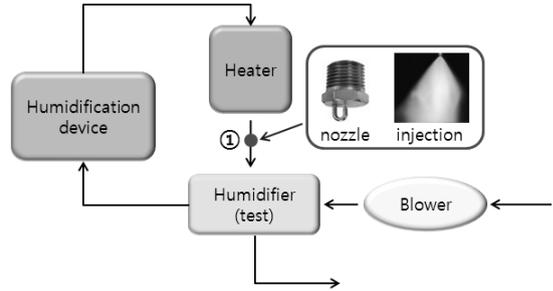


Fig. 3 Schematic of the experiment in this study.

3. 실험

기본적인 실험 장치 구성은 공기를 공급해 주는 블로워, 스택 모사를 위한 가습장치, 물 분사를 위한 인젝터로 구성된다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 물 분사 위치는 평가 가습기를 기준으로 하여, 스택 배기(①)에 장착하여 실험을 수행하였다.

공기유량의 경우, SR(stoichiometry ratio) 2.0을 기준으로 하였으며, 분사되는 물의 양은 1, 2g/sec 를 기준으로 하였다. 기본 실험 및 측정은 일반적인 막가습기 성능 측정 방법으로 스택 배출 공기의 온도 및 상대습도(RH) 변화에 따른 스택 입구 공기의 온도 및 상대습도를 측정함으로써 비교 평가 하였다. 스택 배출 공기의 온도는 60°C~90°C까지 변화시켰으며, 각 온도에 대해 상대습도는 30%~90%까지 변화시켜 시험을 실시하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 막가습기 성능 평가

실험을 통하여, 막가습기의 단독 운전 시, 막가습기에 대한 성능맵(절대습도)을 Fig. 4와 같이 얻을 수 있었다. 성능맵의 경우는 실제 시험을 통하여 측정한 여러 값들을 이용하여 스택 배출 공기의 온도와 상대습도에 따른 스택 입구 공기의 절대습도 값을 계산하여 구하였으며, 이를 연속상의 그래프로 표현하였다. 즉, 이를 통하여 스택 배기 공기의 온도 및 상대습도에 따라서 실제 스택으로 들어가는 공기 중에 포함된 물 양을 구할 수 있는 막가습기 자체의

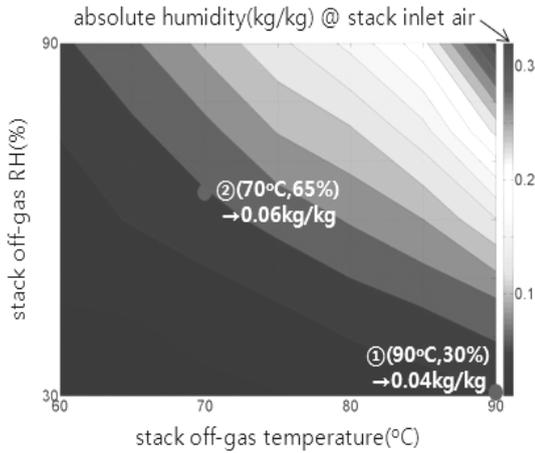
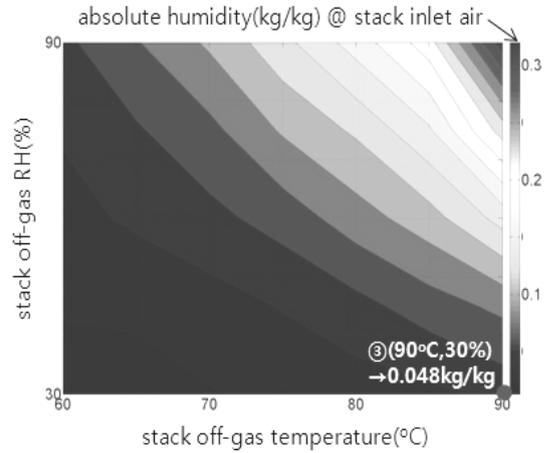


Fig. 4 Performance map of membrane humidifier.

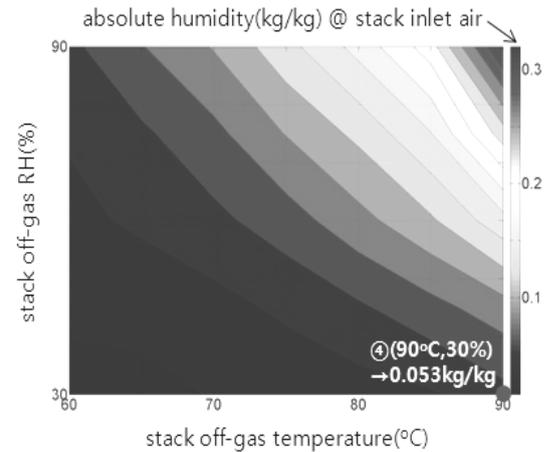
성능맵을 구할 수 있었다. 예를 들어, 스택 배기 공기의 온도 및 상대습도 값이 90°C, 30%일 경우, 스택으로 들어가는 공기의 절대습도는 0.04kg/kg 임을 Fig. 4의 성능맵을 통하여 알 수 있다.

또한, Fig. 4를 통하여 알 수 있는 것은 막가습기의 경우, 스택 배출 공기의 절대습도가 동일할 때, 즉 스택 배출 공기 내에 포함된 수분의 양이 같을 경우, 온도가 낮고 상대습도가 높으면 높을수록 막가습기의 성능 측면에 있어서는 더 유리함을 알 수 있다. 이는 스택 배출 공기의 온도가 높고 상대습도가 낮은 것보다, 온도가 낮고 상대습도가 높은 것이 막가습기를 통한 수분 전달에 있어서 더 효율적이라는 것을 의미한다.

예를 들어 스택 배출 공기의 온도 및 상대습도가 90°C, 30%일 때와 70°C, 65%일 때를 비교해 보면 (이 둘의 경우는 절대습도가 동일함), 각각의 경우, 스택으로 공급되는 공기의 절대습도는 0.04kg/kg, 0.06kg/kg으로 차이가 남을 Fig. 4를 통하여 알 수 있다. 즉, 이는 앞서서도 말했듯이, 차량 시험 조건을 만족시키기 위하여, 연료전지 스택의 운전온도를 상승시킬 경우, 스택 배출 공기의 온도 상승 및 이에 따른 상대습도 저하로 인하여 막가습기의 가습능력이 오히려 저하됨을 나타내는 결과이다.



(a)



(b)

Fig. 5 Performance map of membrane humidifier/water injection; (a) 1g/sec (b) 2g/sec.

4.2 막가습기/물 분사 성능 평가

막가습기/물 분사 성능 평가 결과, 막가습기/물 분사에 대한 성능맵을 얻을 수 있었으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 막가습기/물 분사 성능 평가 결과 중 스택 배출 공기의 온도 및 상대습도 조건이 90°C, 30%일 때의 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이, 스택 배출 공기의 온도 및 RH가 90°C, 30%일 때, 스택 배출 공기에

Table 1 Test results of membrane humidifier/water injection @ 90°C, RH30%

No injection	Injection (1 g/sec)	Injection (2 g/sec)
0.04 kg/kg	0.048 kg/kg (20% ↑)	0.053 kg/kg (32.5% ↑)

1g/sec 또는 2g/sec의 물을 분사하였을 경우, 막가습기 단독 운전 대비, 절대습도가 0.04kg/kg에서 각각 0.048kg/kg, 0.053kg/kg으로 가습성능이 20%, 32.5% 향상됨을 실제 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 스택 배출 공기에 물 분사를 할 경우, 스택 배출 공기의 온도 저하에 따른 상대습도 증가로 인하여 막가습기의 가습성능이 향상되었을 뿐만 아니라, 물 분사에 의한 추가적인 수분 공급으로 인하여 또한 막가습기의 가습성능이 향상되었음을 나타내는 결과이다.

4.3 차량 성능 평가

위의 결과들 즉, 막가습기 성능 평가 및 막가습기/물 분사 성능 평가를 바탕으로 하여 복합형 가습시스템의 냉각 효과를 확인하기 위하여 실제 연료전지 차량에서 냉각 장치를 활용한 성능 테스트를 실시하였다. 실제 연료전지 차량 평가에 있어서는, 평가의 용이를 위하여, 물 분사 대신 인터쿨러를 적용하였으며, 인터쿨러 적용을 통하여 스택 배출 공기와 냉각수와의 열교환을 통한 스택 배출 공기의 온도를



Fig. 6 Test set-up of the fuel cell vehicle.

Table 2 Test results of the fuel cell vehicle

	Stack off-gas temperature	Stack inlet-gas RH
Humidifier (No intercooler)	10°C ↓	47%
Humidifier (w/intercooler)		63%

낮추어 평가를 진행하였다. 그리고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 실제 연료전지 차량에 인터쿨러를 적용하여 평가하는 모습을 나타낸다.

Table 2에서 보는 바와 같이, 인터쿨러 적용을 통하여 스택 배출 공기의 온도를 10°C 낮출 수 있었으며, 이 때, 스택으로 공급되어 지는 공급 공기의 상대습도가 47% → 63%로 16%증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서서도 말했듯이, 막가습기의 경우, 스택 배출 공기의 온도가 높고 상대습도가 낮은 것보다, 온도가 낮고 상대습도가 높은 것이 막가습기의 막을 통한 수분 전달에 있어서 더욱더 효과적이라는 것을 실제 차량 평가를 통해서도 나타내는 결과이다. 즉, 인터쿨러 적용을 통하여, 스택 배출 공기의 온도를 10°C 낮춤으로 인하여, 그만큼 스택 배출 공기의 상대습도는 증가하여, 이로 인하여 막가습기의 가습성능이 향상되기 때문이다.

결국, 차량 적용 평가를 통하여, 본 논문에서 제시한 기존 막가습기 시스템에 물 분사 하는 방식, 즉, 물 분사를 통하여 스택 배출 공기의 온도를 낮추고 상대습도를 높임으로서 막가습기의 가습성능을 향상시키는 복합형 가습시스템 적용 시, 큰 효과가 있을 것임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 연료전지 차량 및 시스템의 다양한 운전조건에서의 효율적인 가습을 위한 방안으로 기존 막가습기에 물 분사하는 방식, 즉, 복합형 가습시스템을 제시하였으며, 실험을 통하여 이를 검증하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평가를 통하여 막가습기의 성능맵을 도출할 수 있었으며, 막가습기의 경우, 스택 배출 공기의 온도가 낮고 상대습도가 높을수록 더 우수한 가습 성능을 발휘한다.
- 2) 막가습기/물 분사 성능 평가 결과, 2g/sec 물 분사 시, 최대 32.5%의 가습 성능 향상 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 차량에 인터쿨러를 설치하여, 스택 배출 공기의 온도를 낮추고 상대습도를 증가시킨 결과, 스택으로 공급되어지는 공급 공기의 상대습도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이를 통하여, 실제 차량에 있어서 스택 배출 공기의 온도를 낮추는 것이 효과가 있음을 알 수 있었으며, 본 논문에서 제시한 복합형 가습시스템 적용 시, 큰 효과가 있을 것임을 알 수 있다.
- 4) 차량의 시험 조건을 만족시키기 위해서는, 연료전지 스택의 운전온도 향상이 필수적이며, 이를 위해서는 막가습기의 가습성능 향상이 필수적이다. 따라서, 본 연구 결과를 토대로, 향후 막가습기의 가습성능 향상을 위한 기술적 개선 방향을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 김영민, 임태원, 이종현, 안병기, 임세준, “In-Situ 분석법에 의한 연료전지 특성 연구”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 208-215.
- 2) 이무석, 김경주, 신용철, 김동현, 서상훈, 김현유, “수송용 연료전지 시스템 적용을 위한 기체-기체 막가습기 구조 최적화”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 111-116.
- 3) James Laminie, Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained”, John Wiley & Sons, Ltd., 2003, pp. 77-80, p. 290.
- 4) 김태희, 이정훈, 이호, 임태원, 박권필, “저전류/저가습 조건에서 고분자 전해질 막 열화”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 157-163.
- 5) 하태훈, 김한상, 민경덕, “고분자 전해질형 연료전지용 막 가습기의 가습 성능 실험 및 모델링”, 한국자동차공학회 2006년도 춘계 학술대회논문집, 2006, pp. 1766-1771.
- 6) F.N. Buchi and S. Srinivasan, “Operating proton exchange membrane fuel cells without external humidification of the reactant gases-fundamental aspects”, J. of Electrochemical Society, Vol. 144, No. 8, 1997, pp. 2767-2772.
- 7) S.K. Park and I.H. Oh, “An analytical model of Nafion membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells”, J. of Power Source, Vol. 188, 2009, pp. 498-501.
- 8) T.H. Ha, H.S. Kim and K.D. Min, “Experimental and modeling study of humidification performance of membrane humidifier for pem fuel cell”, J. of KSAE, 2006, pp. 1766-1771.

- 1) 김영민, 임태원, 이종현, 안병기, 임세준, “In-Situ 분석법에 의한 연료전지 특성 연구”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 20, No. 3,