

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.491

관 내 삽입 인젝터와 사이클론을 이용한 공기 가습<sup>§</sup>

김범준\* · 김성일\* · 변수영\*\*\* · 김민수\*† · 김현유\* · 권혁률\*\*

\* 서울대학교 기계항공공학부, \*\* (주) 현대-기아자동차 연구개발총괄본부,

\*\*\* 한국지역난방공사 지역난방기술연구소

Humidification of Air Using Water Injector and Cyclonic Separator

Beom Jun Kim\*, Sung Il Kim\*, Su Young Byun\*\*\*, Min Soo Kim\*†,  
Hyun Yoo Kim\*\* and Hyuck Ryul Kwon\*\*

\* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

\*\* Advanced Technology Center, Hyundai-Kia Motors,

\*\*\* District Heating Technology Institute, Korea District Heating Corp.

(Received September 25, 2009 ; Revised March 3, 2010 ; Accepted March 8, 2010)

**Key Words:** Humidification(가습), Injector(인젝터), Nozzle Spray(노즐 분사), Reverse-Flow-Type Cyclone(접선 유입식 역류형 사이클론)

**초록:** 연료전지 자동차는 성능과 수명 측면에서, 전해질막의 가습이 필요하며, 이를 위해 반응기체인 공기, 수소의 높은 가습이 요구된다. 본 연구에서는 내경 75 mm 공기공급관 내에 직접 삽입된 인젝터(노즐)와 액적제거를 위한 사이클론을 통한 가습장치를 고안하여 실험을 수행하였다. 충돌형 노즐 3 종류를 이용하여 분사압력, 공기 유량, 분사방향각도를 달리하여 실험을 수행하였다. 가습 성능을 분석하기 위해, 가습효율이라는 개념을 정의하였다. 별도의 외부 열공급원 없이 분사되는 물과 공기의 엔탈피가 자체 기화열 공급원으로, 분사되는 물의 양이 가습에 가장 중요한 변수임을 볼 수 있었다. 사이클론은 높은 공기유량에서 재비산이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 노즐타입 PJ24, 분사방향각도 90도, 분사압력 1200 kPa, 공기 유량 6000 nlpn에서 절대습도 21.29 kJ/kg<sub>da</sub>, 가습 효율 86.57%를 얻을 수 있었다.

**Abstract:** Humidification of PEM fuel cells is necessary for enhancing their performance and lifetime. In this study, a humidification system was designed and tested; the system includes an air-supply tube (inner diameter: 75 mm) through which a nozzle can be directly inserted and a cyclonic separator for the removal of water droplets. Three types of nozzles were employed to study the influence of injection pressure, air flow rate, and spray direction on the humidification performance. To evaluate the humidification performance, the concept of humidification efficiency was defined. In the absence of an external heat source, latent heat for evaporation will be supplied by the own enthalpies of water and air. Thus, the amount of water sprayed from the nozzle is the most critical factor affecting the humidification efficiency. Water droplets were efficiently removed by a cyclonic separator, but re-entrainment occurred at high air flow rates. The absolute humidity and humidification efficiency were 21.29 kJ/kg<sub>da</sub> and 86.57%, respectively, under the following conditions: nozzle type PJ24; spray direction angle 90°; injection pressure 1200 kPa; air flow rate 6000 Nlpm.

- 기호설명 -

- $h$  : 단위 질량 당 엔탈피(kJ/kg)
- $h_w$  : 물의 단위 질량 당 엔탈피(kJ/kg)
- $\dot{H}$  : 시간 당 엔탈피(kJ/s)
- $\dot{H}_{AirIn}$  : 입구공기 단위 시간당 엔탈피(kJ/s)
- $\dot{H}_{AirOut}$  : 출구공기 단위 시간당 엔탈피(kJ/s)

- $\dot{H}_{WaterIn}$  : 입구 물 단위 시간당 엔탈피(kJ/s)
- $\dot{H}_{WaterOut}$  : 출구 물 단위 시간당 엔탈피(kJ/s)
- $\dot{m}$  : 질량 유량(kg/s)
- $\dot{m}_{da}$  : 건공기 유량(kg/s)
- $\dot{m}_w$  : 분사되는 물 유량(kg/s)
- $\dot{m}_{v\_Ideal}$  : 이상적인 최대 가습 시 출구 습공기 중의 수증기 질량(kg/s)
- $T$  : 온도(°C)

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, minskim@snu.ac.kr

$T_{ideal}$  : 이상적인 최대 가습 시 출구 습공기의  
노점, 온도, 배출되는 물온도(°C)  
 $W$  : 절대습도(g<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub>)

## 1. 서론

인젝터는 분사되는 액체를 마이크론 단위의 액적으로 미립화시키는 장치로서 액체의 표면적을 크게 하여 열 및 물질 전달을 촉진시킬 수 있다. 인젝터를 이용한 액체 분사는 건물의 공기 냉각이나 가습, 산화 가스등의 기체흡착, 미세분진 제거 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 분사되는 액적이 얼마나 미세한 지가 인젝터 효율의 지표이고, 인젝터 노즐의 크기, 분사 압력, 혼합부의 설계 등을 통해 효율을 높이고 있다. 특히 공간이 제약된 시스템의 가습 및 냉각에서는 분사되는 입자의 크기가 매우 중요하다.

인젝터를 이용한 가습방식이 적용될 수 있는 하나의 분야로서 최근 연구가 활발한 연료전지 자동차의 공기 가습을 들 수 있다. 연료전지 자동차에서는 이온교환을 위한 막이 적절하게 젖어 있어야 반응이 잘 일어나는데, 이를 위해 공급되는 공기를 가습시키고, 공기에 포함된 수증기를 이용하여 막을 젖게하는 간접적인 가습방식을 적용하고 있다. 기존에는 막가습기를 이용해 고온 다습한 배출공기와 건조한 유입공기 사이에 열 및 물질을 교환하는 방식을 써왔으나 부피 및 가습량 조절에 한계가 있어 다른 대체 가습장치의 개발이 필요한 실정이다. 인젝터를 이용한 가습은 분사량 조절을 통해 가습량을 제어할 수 있고 가습장치의 부피를 줄일 수 있는 여지가 있어서 대체가 가능한 방안으로 꼽힌다.

본 연구의 목적은 공간이 제약된 시스템에서 공기공급기 관 내에 직접 삽입된 인젝터를 통해 가습효율을 높이고, 사이클론을 통해 기화되지 못한 액적을 효율적으로 제거하는 것이다.

연료전지 차량의 공간은 제약되어 있기 때문에 본 연구에서는 공기 공급관에 인젝터를 직접 삽입하여 분사하는 방식을 적용하였고 분사 방향 및 압력에 따라 최대 분사 효율, 가습효율을 얻기 위한 실험을 수행하였다.

인젝터를 이용한 가습 시 전량의 물이 기화되지 않는 액적으로 남는 물이 있기 때문에 이를

회수할 장치가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 액적을 제거할 목적으로 사이클론을 적용하였다. 사이클론은 입자 제거에 많이 쓰이는데 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 쓰이는 접선 유입식 역류형 사이클론을 적용하였다.

기존 연구로서 정승훈, 김민수 등<sup>(1)</sup>은 연료전지 자동차용 가습장치로서 엔탈피 믹서와 인젝터를 이용한 가습장치를 개발하였다. 공기 유량 200 nlpm에서 온도 58.4°C, 노점 54°C의 가습 성능을 얻을 수 있었다. Yoo와 Kwon<sup>(2)</sup>은 물 분사를 통한 공기의 냉각, 가열 및 가습, 제습 연구에서 입구 공기의 유량, 온도와 분사되는 물의 유량, 온도의 변화에 대한 영향을 실험을 통해 분석하였다. Sureshkumar 등<sup>(3,4)</sup>은 물 분사를 통한 공기의 냉각을 위해 분사 압력과 공기 유량을 변화시키며 냉각 및 가습 효과를 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Xu 등<sup>(5)</sup>은 습공기 가스터빈에서 고압 공기의 가습을 위한 물 분사탑의 공기 가습에 대한 준 1차원 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. Bruckner 등<sup>(6)</sup>은 낮은 증기압을 가진 액체와 기체의 직접 접촉 열 전달에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 액체는 오리피스를 통해 액적으로 분무되고 기체는 접선방향으로 유입되어 사이클론과 같이 원심력에 의해 액적들을 제거한다.

사이클론은 분진 등 입자 제거에 주로 사용되며 기체와 액체의 분리를 위한 사이클론은 주로 석유 채굴 시 기체와 원유의 분리에 사용되어 왔다. Rosa 등<sup>(7)</sup>은 석유 채굴 시 기체와 원유의 분리를 위한 사이클론의 기계적 모델링과 실험을 수행하였다. Polyakov 등<sup>(8)</sup>은 접선 유입식 사이클론의 액체의 분리 효율 및 재비산에 대한 실험을 수행하였다.

## 2. 이론적 최대 가습량

### 2.1 분사 가습 시스템 구성

본 실험의 가습 시스템은 인젝터가 삽입된 가습관과 사이클론으로 구성된다. 관 내에 삽입된 인젝터가 분사압력에 따라 일정한 분사유량으로 65°C의 물을 분사하며, 최대유량 6000 nlpm의 공기를 가습한다. 기화되지 못한 액적은 사이클론을 통해 원심력을 얻어 벽에 부딪히며, 하부의 배수구를 통해 배출된다.

2.2 이론적 최대 가습량

노즐에서 분사되는 물과 건공기가 완전한 열 및 물질 전달을 하게 되면 사이클론 공기출구에서 나오는 공기는 상대습도가 100%가 되고 배수구에서 나오는 물과 출구 공기의 온도는 같게 된다. 이를 이용해 분사가습의 최대 가습량을 구할 수 있다.

$$h = 1.006T + 0.001 \times W(2501 + 1.86T) \quad (1)$$

$$h_w = 4.186T \quad (2)$$

$$\dot{H} = \dot{m} \times h \quad (3)$$

$$\dot{H}_{AirIn} + \dot{H}_{WaterIn} = \dot{H}_{AirOut} + \dot{H}_{WaterOut} \quad (4)$$

식 (1)은 수증기가 함유된 공기의 단위 건공기당 엔탈피를 구하는 식이다.<sup>(9)</sup> 식 (2)는 온도가 T 인 물의 단위질량당 엔탈피이고 식 (3)은 단위시간당 엔탈피이다. 식 (4)는 에너지 보존 식으로서 분사되는 물, 입구공기의 엔탈피 합은 배수구로 나가는 물과 사이클론 출구 공기 엔탈피 합과 같다는 식이다.

여기서 공기출구온도와 배수구 온도, 공기출구 노점(응축점, dew point)을 같다고 놓으면 완전한 열 및 물질전달이 일어난 것이고 이론적 최대 가습량을 구할 수 있다. 식 (5)는 이러한 완전한 열 및 물질 전달로부터 유도한 이론적 최대 가습량을 구하는 식이다.

$$\dot{m}_{v\_Ideal} = \frac{\dot{H}_{AirIn} + \dot{H}_{WaterIn} - \dot{m}_{da} \times 1.006T_{Ideal} - \dot{m}_w \times 4.186T_{Ideal}}{0.001 \times (2501 + 1.86T_{Ideal}) - 4.186T_{Ideal}} \quad (5)$$

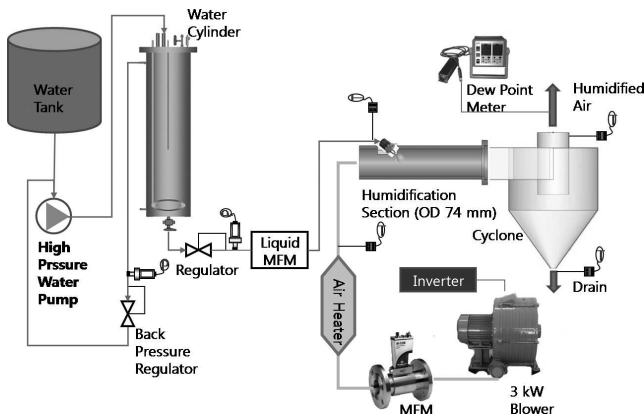


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

3. 분사 가습 실험

3.1 실험장치 구성

Fig. 1은 실험장치의 구성도이다. 인젝터 물 분사 시 차가운 수돗물이 물 실린더에 바로 유입되어 분사되는 물의 정밀한 온도제어를 어렵게 하는 것을 방지 하기 위해 예열을 목적으로 물탱크를 설치하였다. 50리터 크기의 예열 물탱크는 공급되는 낮은 온도의 일반 수돗물을 65°C 온도로 예열한다. 물탱크 밑에 설치된 물 실린더는 다시 물온도를 65°C로 정밀 제어한다. 고압 물펌프를 이용하여 가압하고 레귤레이터로 압력을 조절해 노즐에 물을 공급한다. 분사노즐은 BETE 사의 충돌형 노즐 PJ15, PJ20, PJ24를 사용하였다. Table 1은 분사노즐의 치수를 나타낸다. 분사되는 물의 유량은 Coriolis 질량유량계로 측정하였다. 공급공기는 공기히터를 통해 65°C로 공급된다. 출구의 가습된 공기의 노점은 Azbil 사의 노점측정계로 측정하였고 출구 공기 온도는 T 타입 열전대를 이용해 측정하였다.

3.2 실험 조건

Table 2는 본 연구의 실험조건을 나타낸다. 노즐은 Bete사의 충돌형 노즐을 사용하였다. 여기서

Table 1 Nozzle Dimensions

Nozzle Number	Orifice Diameter(mm)	Pipe Size (inch)	Dimension(mm)	
			A	B
PJ15	0.381			
PJ20	0.508	1/4	24.6	14.2
PJ24	0.61			

Table 2 Experimental Conditions

Nozzle Type	PJ15, PJ20, PJ24
Spray Direction Angle(°)	55, 90
Injection Pressure(kPa)	400, 800, 1200
Air Flow Rate(nlpm)	2000, 4000, 6000
Spray Water Temperature(°C)	65
Inlet Air Temperature(°C)	65

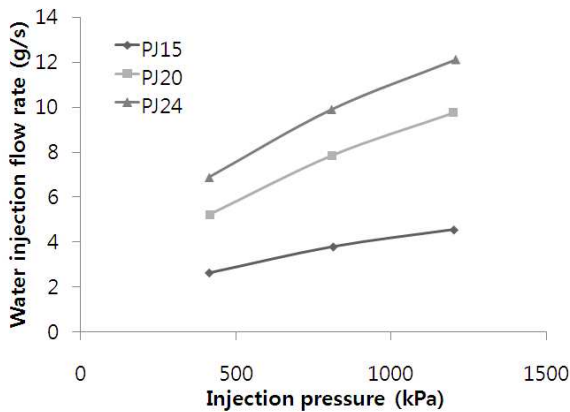


Fig. 2 Flow rate vs. injection pressure

분사 방향각도는, 분사각도(spray angle)와는 다른 말로, 노즐과 공기관 위 벽면과의 각도를 나타낸다. 즉, 90도는 공기 진행 방향과 직각방향으로 분사하는 것이고 55도는 공기 진행방향에서 시계 방향으로 55도 각도로 분사되는 것을 말한다. 분사압력은 최대 1200 kPa의 세가지 경우에 대해서 수행하였다. 공기 유량은 80 kW급 연료전지 차량의 최대 공기 유량인 6000 nlpm과 2000 nlpm, 4000 nlpm에 대해서 실험을 수행하였다. 분사되는 물온도는 연료전지 스택 작동온도가 75℃ 것을 감안하여 65℃로 선정하였다. 공기 입구 온도는 연료전지 차량의 블로워 공기 공급시 고유량을 공급할 때 공기 온도가 최대 90℃까지 올라가고 운전 범위에 따라 공기 온도가 달라지게 된다. 여기서는 공기 입구 온도를 65℃로 고정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 압력에 따른 세 노즐의 유량을 나타낸다. 압력이 높아짐에 따라 거의 선형적으로 유량이 증가함을 볼 수 있다. 분사압력 400~1200 kPa에서 PJ15는 2.64~4.55 g/s, PJ20은 5.23~9.75 g/s, PJ24는 6.87~12.10 g/s의 유량을 분사한다.

3.3 분사 실험 결과

Fig. 3 ~ Fig 8은 각 노즐, 분사방향각도별 실험결과를 습공기선도에 나타낸 것이다. 다이아몬드 점은 연료전지 자동차의 고출력 운전조건에서 최종 가습 목표치인 65℃, 50%상대습도 점을 나타낸 것이고, 동그란 점은 공급공기 입구의 상태 점을 나타낸 것이다. 음의 기울기를 가진 사선은 등엔탈피 선을 나타내며, 맨 밑에 사선이 70 kJ/kg<sub>da</sub>이고, 10 kJ/kg<sub>da</sub>씩 증가하여 맨 위에 사선

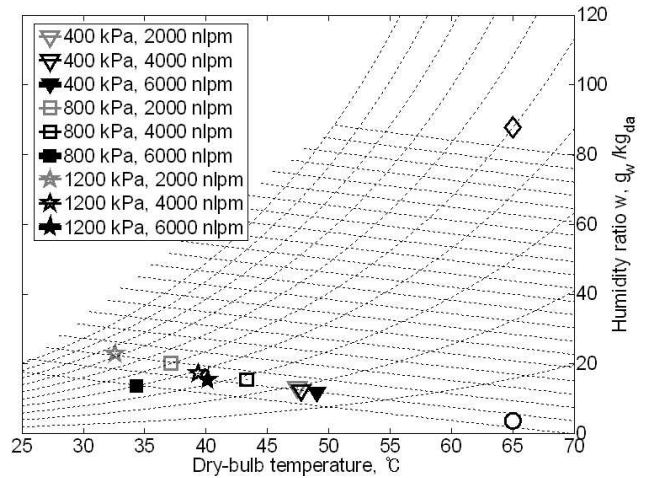


Fig. 3 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ15) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 55°

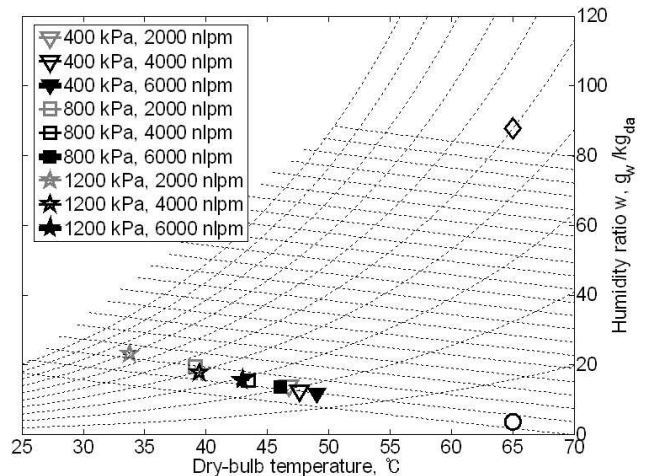


Fig. 4 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ15) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 90°

은 280 kJ/kg<sub>da</sub> 등엔탈피 선을 나타낸다. 그리고 양의 기울기를 가진 곡선은 상대습도를 나타내며 x축은 절대습도 0인 상대습도가 0%임을 나타내며 10% 간격으로 상대습도선을 나타내어 맨 위의 곡선은 상대습도 100%선을 나타낸다.

분사압력이 높아짐에 따라 분사되는 물 유량이 증가한다. 그리고 액적이 미세해지고 따라서 표면적이 커진다. 또한, 가벼워져서 이동거리가 긴 액적이 많아져 절대습도 및 상대습도가 커진다. PJ15 노즐 분사 결과에서는 분사 물 유량이 적고, 액적의 크기가 PJ20, PJ24에 비해 작다. 따라서, 관 내 벽에 부딪쳐 응집되어 버리는 액적에 비해 공기와 같이 이동할 수 있는 액적의 비율이

높고 기화하는 비율도 크다. 하지만, 이렇게 이동하는 액적의 수에는 한계가 있으므로 공기유량이 증가함에 따라 상대습도 및 절대습도가 낮아진다.

Fig. 3은 PJ15 노즐의 분사방향각도 55°에서 분사 가습실험한 결과를 습공기 선도에 나타낸 것이다. 분사압력이 증가함에 따라 가습량이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 분사압력이 커지면 액적의 크기도 더 미세해지고 분사되는 물의 양도 많아지기 때문이다. 공기유량이 증가함에 따라 습공기의 온도는 높아지고 절대습도는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이것은 건공기의 유량이 2000, 4000, 6000 nlpm으로 2배, 3배씩 증가하여 기화되

는 물의 질량은 증가하지만, 건공기와의 질량비 측면에서 습도는 낮게 나타나는 것이다. 상대습도가 100%에 이르지 못하는 것은 열 및 물질전달이 100% 이루어지지 못한 것을 말한다. 이것은 75 mm 관 내에서 분사되는 액적이 관 벽에 부딪혀 진행거리가 짧아 노즐의 미립화에 의한 열 및 물질 전달 효율이 감소하기 때문이다.

Fig. 4는 PJ15 노즐의 분사방향각도 90°의 실험 결과이다. 전체적인 경향은 같다. 가습성능은 Fig. 3과 거의 차이가 없다. 이것은 내경 75 mm관에서 액적 분사의 진행거리가 작아 분사방향각도의 영향이 감소되었기 때문이라고 생각된다. 물의 분사량이 작기 때문에 초기의 건공기의 엔탈피

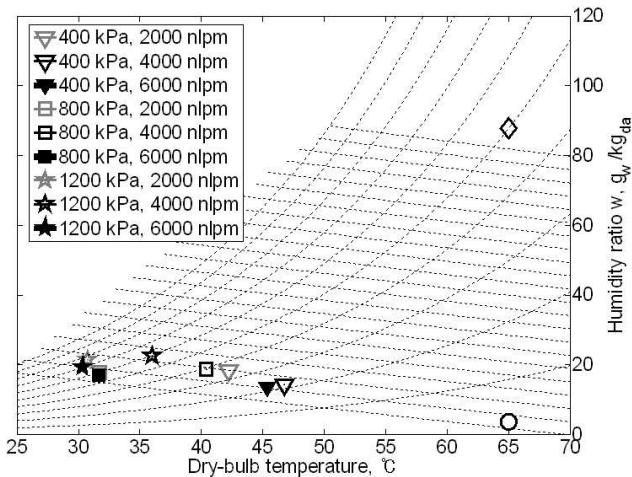


Fig. 5 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ20) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 55°

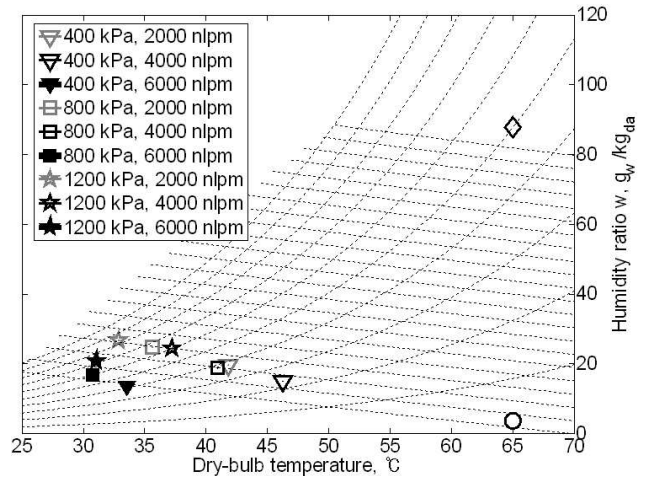


Fig. 7 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ24) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 55°

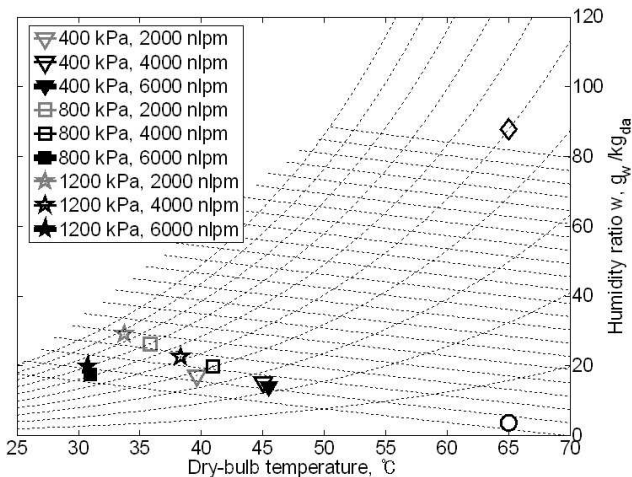


Fig. 6 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ20) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 90°

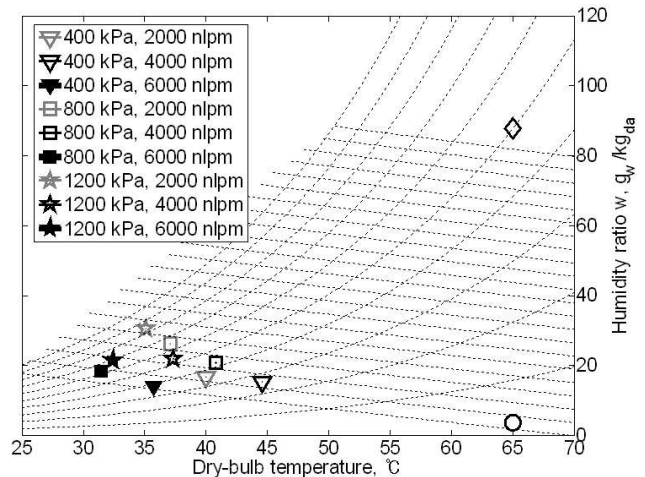


Fig. 8 Psychrometric chart of wet air with the nozzle (PJ24) for several injection pressures and air flow rates at the spray direction angle of 90°

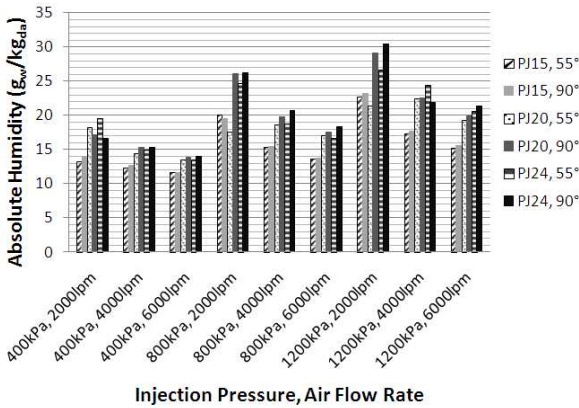


Fig. 9 Absolute humidity change for several nozzle types, spray direction angle, air flow rate and injection pressure

75.5 kJ/kg<sub>da</sub>에서 최대 엔탈피 증가는 분사압력 1200 kPa, 공기유량 2000 nlpm의 94.4 kJ/kg<sub>da</sub> 으로 비교적 엔탈피 증가량이 작다.

Fig. 5는 PJ20 노즐의 분사방향각도 55°의 실험 결과이다. Fig. 6은 PJ20 노즐의 분사방향각도 90°의 실험 결과이다. 분사압력이 증가함에 따라 가습량이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 하지만, PJ15 노즐과는 달리, PJ20, PJ24의 경우, 공기유량이 4000 nlpm에서 6000 nlpm으로 증가할 때 절대습도는 낮아지지만, 상대습도가 높아진다. 이것은 분사유량이 많고 기화되지 못한 액적이 관속에서 유속증가에 따라 사이클론 공기출구까지 이동하면서 물질교환이 증가하여 나타나는 현상으로 생각된다. 실제로 공기유량 6000 nlpm에서 사이클론의 액적 제거율이 현저히 떨어지고 많은 액적이 재비산(re-entrainment)되어 사이클론 출구로 빠져 나가는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 PJ24 노즐의 분사방향각도 55°, 90°의 실험 결과이다. 노즐 구멍이 더 커서 분사 유량이 많아 PJ15, PJ20 보다 가습량이 큰 것을 알 수 있다. 전체적인 경향은 앞의 경우와 같다.

이 실험 결과에서 분사방향각도의 영향은 크지 않음을 볼 수 있었다. 직경이 75 mm인 원관 내에서 분사되는 상황이므로 분사된 액적이 벽에 부딪혀서 진행거리가 짧아졌고, 따라서 분사방향각도의 영향이 크지 않았다. 하지만, PJ20과 PJ24의 경우, 분사방향각도가 90도인 경우 분사방향각도가 55도인 경우보다 조금이나마 가습량이 커진 것을 알 수 있다. 90도 분사의 경우 55도 분

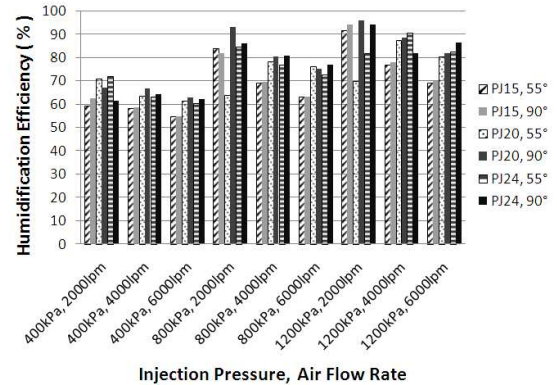


Fig. 10 Efficiency of water spray humidification for several nozzle types, spray direction angle, air flow rate and injection pressure

사의 경우 보다 공기와 분사되는 물의 상대속도 차가 커져 공기와 물이 강도있게 충돌하며, 이에 따라 열 및 물질 전달률이 증가한 것이 원인이라고 볼 수 있다.

Fig. 9는 실험에서 얻은 절대습도  $W(g_w/kg_{da})$ 를 나타낸 그래프이다. PJ24 노즐 분사 실험의 경우 공기유량 6000 nlpm에서 압력이 높아짐에 따라 14 g<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub>에서 21.3 g<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub> 으로 높아진다. 연료 전지자동차의 목표점인 65°C, 50%에서의 절대습도 87.68 g<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub>에 비해 상당히 낮은 수준인데, 이 조건을 만족시키려면 인젝터를 조합해서 분사유량을 늘리거나 아니면 부족한 기화열 공급을 위한 열교환기를 설치할 필요가 있다.

물의 기화열은 0°C 기준으로 2501 kJ/kg<sub>w</sub>이다. 온도가 높아짐에 따라 조금씩 낮아져 60°C에서 2357 kJ/kg<sub>w</sub>이다. 이에 반해 공기의 비열은 1.006 kJ/kg<sub>da</sub>이며, 물의 비열은 4.186 kJ/kg<sub>w</sub> 이다. 본 실험에서는 열원이 오직 고온의 공기와 분사되는 물이며, 분사된 물이 증발하면서 기화열을 흡수하기 때문에 습공기의 온도가 30°C 대로 낮아지고, 상대습도는 80%정도를 얻을 수 있었다.

Fig. 10은 이론적 최대가습량에 대해 실험값인 절대습도의 비를 분사가습 효율 개념으로 나타낸 그래프이다. 분사압력이 높아질 수록 액적이 미세해지기 때문에 이론적 최대가습량에 가까워짐을 볼 수 있다. 1200 kPa의 압력에서 70% 이상의 분사 가습효율을 보이고 있다.

이 실험에서 사용된 사이클론은 원추형 하부가 깊지 않아 공기유량이 큰 조건에서 재비산(re-entrainment)이 발생하였다. 이를 방지하기 위

해서는 사이클론을 보다 크게 만들거나, 비산 액적의 속도를 낮출 수 있는 설계가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 인젝터 가습장치의 부피를 줄이고 직경이 75 mm인 원관 내에 직접 삽입된 인젝터로 분사 가습하는 실험을 수행하였다. 3종류의 인젝터 노즐을 가지고 분사압력, 분사방향각도, 공기유량을 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 분사되어 기화되지 못한 큰 액적들을 제거하기 위하여 입자제거에 범용적으로 많이 쓰이는 접선 유입식 역류형 싸이클론을 적용하였다.

본 실험에서 PJ24 노즐분사가습 시, 분사방향각 90도, 분사압력 1200 kPa, 공기 유량 6000 nlpm에서 공기온도 32.42℃, 상대습도 68.83%, 절대 습도 21.29 kJ/kg<sub>da</sub>의 가습 성능을 얻을 수 있었다. 이것은 이상적인 가습량과 비교할 때 가습 효율 86.57%에 해당하는 결과이다. 관에 인젝터를 삽입하여 물을 분사시키기 때문에 관 직경에 의한 공간상의 제약으로 액적의 진행거리가 짧아 분사 방향각도의 영향은 작았다. 물의 분사압력이 높아 분사유량이 많고 공기 유량이 작을 수록 공기의 습도는 높아짐을 볼 수 있었다.

25℃에서 기화열은 2430 kJ/kg<sub>w</sub>로 물의 비열 4.186 kJ/kg<sub>w</sub>에 비해 상당히 큰 열량이다. 따라서 가습량을 높이기 위해서는 이처럼 큰 기화열을 공급하기 위한 충분한 열원 공급원이 있어야 한다. 하지만, 본 실험에서는 별도의 열공급원 없이 오직 고온의 공기와 물이 온도가 낮아지면서 자체로 기화열을 공급하는 방식이었기 때문에 가습량이 크지 않음을 볼 수 있었다. 가습량을 높이기 위해서는 물 분사압력을 높게 하여 물 분사유량을 많게 하여야 한다. 하지만, 연료전지 차량에서 물의 양은 제한적이다. 연료전지 자동차와 같이 높은 가습량이 요구되는 경우, 열교환기와 같은 다른 기화열 공급원이 필요하다. 연료전지 자동차의 기존 막가습기는 가습량 조절이 어렵고, 부피가 크기 때문에 막가습기의 용량을 줄이고 나머지를 분사가습으로 보조함으로써 가습량을 제어할 수 있을 뿐만 아니라, 가습시스템의 부피를 줄일 여지도 있다. 따라서 본 연구의 분사가습 방법을 연료전지 자동차에 적용하는 경우 보조 가습 방식으로 적합하리라 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 및 현대기아자동차의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드린다. 또한 마이크로열시스템연구센터 및 정밀기계설계공동연구소의 지원에도 감사드린다.

#### 참고문헌

- (1) Jung, S. H., Kim, S. L., Kim M. S., Park, Y. S. and Lim, T. W., 2007, "Experimental Study of Gas Humidification with Injectors for Automotive PEM Fuel Cell Systems," *J. of Power Sources*, Vol. 170, Issue 2, pp. 324~333.
- (2) Yoo, S. Y. and Kwon, H. K., 2004, "An Experimental Study on the Performance of Air/Water Direct Contact Air Conditioning System," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 1002~1009.
- (3) Sureshkumar, R., Kale, S.R. and Dhar, P.L., 2008, "Heat and Mass Transfer Processes Between a Water Spray and Ambient Air - I. Experimental Data," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, Issues 5~6, pp. 349~360.
- (4) Sureshkumar, R., Kale, S.R. and Dhar, P.L., 2008, "Heat and Mass Transfer Processes Between a Water Spray and Ambient Air - II. Simulations," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, Issues 5~6, pp. 361~371.
- (5) Xu, Z. and Wang, Y., 2007, "Experimental and Theoretical Studies on Air Humidification by a Water Spray at Elevated Pressure," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, Issues 14~15, pp. 2549~2558.
- (6) Bruckner, A. P. and Mattick, A. T., 1984, "High Effectiveness Liquid Droplet/Gas Heat Exchanger for Space Power Applications," *Acta Astronautica*, Vol. 11, Issues 7~8, pp. 519~526.
- (7) Rosa, E. S., França, F. A. and Ribeiro, G. S., 2001, "The Cyclone Gas - Liquid Separator: Operation and Mechanistic Modeling," *J. of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 32, Issues 2~4, pp. 87~101.
- (8) Polyakov, L. E., 1968, "Cyclone Separators for

Gas-Liquid Mixtures,” *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 6~8.

Air-Conditioning Engineers, 2005, “ASHRAE Handbook Fundamentals,” Chap. 6.

(9) American Society of Heating, Refrigerating,