

## 반도체 클린룸용 배기 열회수식 외기공조시스템의 에너지절감에 관한 실험적 연구

송근수, 유경훈<sup>†</sup>, 강신영\*, 손승우\*\*

한국생산기술연구원 에어로졸·오염제어 연구실, \*(주)대한피엔씨, \*\*(주)성림피에스

### An Experimental Study on Energy Reduction of an Exhaust Air Heat Recovery Type Outdoor Air Conditioning System for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms

Gen-Soo Song, Kyung-Hoon Yoo<sup>†</sup>, Shin-Young Kang\*, Seung-Woo Son\*\*

*Aerosol and Contamination Control Laboratory, Korea Institute of Industrial Technology(KITECH),  
1271-18, Sa-1-Dong, Sangnok-Gu, Ansan-Si 426-171, Korea*

*\*Daehan PNC Co., Dangjin 343-827, Korea*

*\*\*Sunglim PS Co., Seoul 153-802, Korea*

*(Received February 24, 2009; revision received March 27, 2009)*

**ABSTRACT:** In recent semiconductor manufacturing clean rooms, the energy consumption of outdoor air conditioning systems represents about 45% of the total air conditioning load required to maintain a clean room environment. Meanwhile, there is a large amount of exhaust air from a clean room. From an energy conservation point of view, heat recovery from the exhaust air is therefore useful for reducing the outdoor air conditioning load for a clean room. In the present work, an energy-efficient outdoor air conditioning system was proposed to reduce the outdoor air conditioning load by utilizing an air washer to recover heat from the exhaust air. The proposed outdoor air conditioning system consisted mainly of a preheating coil, an air washer, two stage cooling coils, a reheating coil, a humidifier and two heat recovery cooling coils inserted into the air washer and connected to a wet scrubber. It was shown from the lab-scale experiment with outdoor air flow of 1,000 m<sup>3</sup>/h that the proposed system was more energy-efficient for the summer and winter operations than an outdoor air conditioning system with a simple air washer.

**Key words:** Outdoor air conditioning system(외기공조시스템), Clean room(클린룸), Outdoor air conditioning load(외기부하), Air washer(에어와셔), Wet scrubber(세정집진기), Heat recovery(열회수)

#### 기 호 설 명

$h_i$  : 에어와셔 입구공기의 비엔탈피 [kJ/kg]

$h_o$  : 에어와셔 출구공기의 비엔탈피 [kJ/kg]

L/G : 수공기비

$Q_{rh}$  : 열회수량 [kW]

$T_{inlet, DB}$  : 에어와셔 입구에서의 건구온도 [°C]

$T_{inlet, WB}$  : 에어와셔 입구에서의 습구온도 [°C]

$T_{outlet, DB}$  : 에어와셔 출구에서의 건구온도 [°C]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-8040-6437; fax: +82-31-8040-6420

E-mail address: khyoo@kitech.re.kr

$V$  : 외기량 [ $m^3/h$ ]

그리스 문자

$\eta_s$  : 에어와셔의 포화효율 [%]

$\rho_a$  : 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]

1. 서 론

우리나라는 2005년 2월 16일에 교토의정서가 발효되면서 2013년에서 2017년까지의 2차 온실가스의무감축 이행기간중에 온실가스 배출량을 1990년 대비 5.2%를 감축해야 하는 어려운 상황에 직면하고 있다. 한편, 배럴당 150달러를 위협하는 사태가 출현함으로써 향후 석유 파동 뿐만 아니라 고유가 시대가 도래할 가능성도 배제할 수 없는 실정이다. 이러한 상황에서 우리나라의 수출주력품목인 반도체, 디스플레이 등의 첨단 전자산업에서는 대규모 클린룸을 보유한 제조공장이 많아서 이러한 클린룸에서 도입하는 외기량이 막대하기 때문에 클린룸 공조와 관계되는 외기부하가 매우 높다.<sup>(1)</sup> 일반적인 반도체 제조공장의 경우, 외기부하는 냉열원의 약 27%이고 전체 공조부하의 약 45%에 이르며 반도체 집적기술의 고도화에 동반해서 그 절대량은 증가하는 추세에 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 에너지절감을 통한 온실가스 감축을 위해 외기부하와 관계되는 공조에너지의 사용효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 클린룸의 배기로부터 폐열을 회수해서 도입 외기의 가열 또는 냉각에 이용하는 것은 에너지절약적 측면에서 상당히 유효한 기술이라고 판단된다.

그동안 반도체 제조공장에서 클린룸 배기의 폐열을 회수하는 연구는 Fujisawa et al.<sup>(3-4)</sup>의 연구를 시작으로 Shiroma et al.,<sup>(5)</sup> Yamamoto et al.,<sup>(6)</sup> Yeo and Yoo<sup>(7)</sup>에 의해 수행되었다. 전술한 연구들은 최근 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 일부 채택되고 있는 에어와셔(air washer)를 직간접적으로 이용하여 클린룸 배기로부터 열을 회수하는 기술을 보고하고 있다. 이러한 열회수식 에어와셔를 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 적용할 경우 급기(supply air) 조건, 코일과의 조합 등과 같은 공조프로세스상의 제약조건을 고려한 시스템 측면에서의 적용가능성 및 열회수

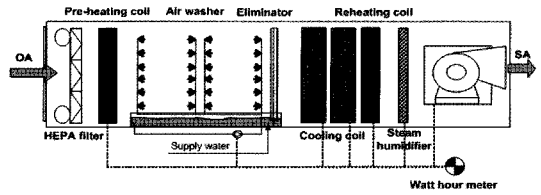


Fig. 1 Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with a simple air washer for semiconductor manufacturing clean rooms.

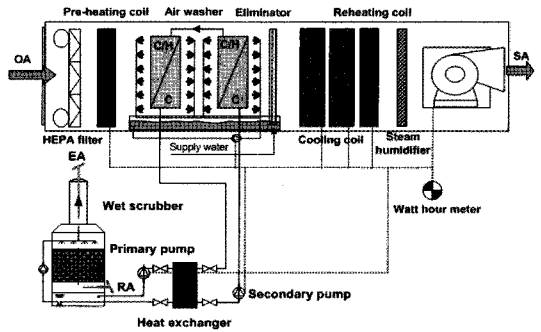


Fig. 2 Schematic diagram of the proposed outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

성능에 대한 연구가 전무한 실정에 있다.

본 연구에서는 반도체 클린룸의 필수 배기처리장치인 세정집진기(wet scrubber)를 이용하여 클린룸 배기의 폐열을 회수한 뒤 회수한 열을 도입 외기의 가열 및 냉각에 이용할 수 있는 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템을 제안하고 이 열회수식 외기공조시스템의 에너지절감 성능을 평가하는 외기량  $1,000 m^3/h$ 의 실험을 우리나라 기흥지역의 외기조건을 대상으로 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 단순 에어와셔 외기공조시스템 및 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개략도를 각각 나타내고 있다. 이 제안된 외기공조시스템들을 평가하기 위하여 본 연구의 단순 에어와셔 외기공조시스템 실험장치는 청정덕트, 고성능 에어필터(HEPA fil-

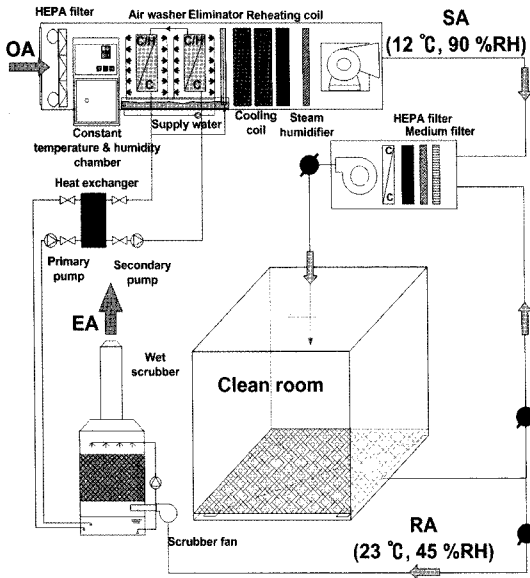


Fig. 3 Schematic diagram of the present experimental apparatus for the outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

ter), 향온향습기, 에어와셔(air washer), 엘리미네이터(eliminator), 냉각코일(cooling coil), 재열용 히터(reheating coil), 전극봉식 증기가습기(steam humidifier), 송풍기, 온습도센서 및 계측기, 전력량계로 구성되었다. 열회수식 에어와셔 외기공조시스템 실험장치는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 단순 에어와셔 외기공조시스템의 실험장치에 추가로 세정집진기(wet scrubber), 중간열교환기(heat exchanger), 중간열교환기 순환수용 1차 및 2차 펌프, 냉각/가열 겸용코일(c/h coil), 모델클린룸이 편성되어 클린룸 배기로부터 외기측으로 열회수가 실시된다. 본 실험장치의 향온향습기는 외기의 4계절 조건을 생성하기 위해 Fig. 1과 Fig. 2의 예열코일을 대신해서 설치하였다. 모델클린룸은 바닥면적  $6.25 \text{ m}^2$ , 높이 2.4m의 체원을 가지며 자체의 공조기로 출구조건  $23^\circ\text{C}$ , 45%RH를 생성하여 세정집진기로 보낸다.

에어와셔는 일반적으로 공기를 가습하면서 동시에 가스상 오염물을 제거하는 장치이다. 본 연구의 에어와셔의 경우 단면적  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 의 청정덕트에 분사노즐들이 부착된 원관 4개가 일렬로 배치되어 1개의 बैं크(bank)를 이루고 총 4개의 बैं크로 구성되었다. 1개의 बैं크당 12개의 노

Table 1 Nominal operational conditions of the present spraying nozzle

Dimension	1/8 in O.D.				
Operation pressure of spraying nozzle(MPa)	0.15	0.3	0.7	1.0	1.4
Water flow( $\ell/\text{min}$ )	0.092	0.13	0.167	0.24	0.28
Spray angle( $^\circ$ )	80	80	75	75	75

즐이 설치되어 총 48개의 노즐이 사용되었다. 분사노즐은 1/8 in 외경을 가지며 노즐의 작동압력에 따른 분사수량 및 분사각도를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 노즐의 정격 작동압력은  $0.7 \text{ MPa}$ 로 하였다. 분사노즐의 분사방향은 Fig. 1과 Fig. 2에 도시된 바와 같이 공기유동방향에 대해 बैं크별로 상류로부터 동류, 향류, 동류, 향류를 이루게 하였고 2개의 बैं크들은 서로 마주하여 분사하는 1개의 에어와셔 모듈이 되도록 구성하였다.

열회수식 외기공조시스템 실험장치의 경우 Fig. 2에 도시된 바와 같이 에어와셔 모듈의 중간에 냉각/가열 겸용코일을 삽입하였다. 이 겸용코일은 열교환 능력이 높은 냉각코일을 사용하였다. 세정집진기와 중간열교환기를 통해 배기로부터 회수된 열을 이 겸용코일을 통하여 외기를 냉각 혹은 가열하는데 사용함으로써 외기부하를 절감하게 된다. 청정덕트 내 유속을  $2.5 \text{ m/s}$ 로 유지시키기 위해 송풍기는 인버터가 장착된 터보팬을 사용하였다. 단순 에어와셔 및 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템들의 전력소비를 측정하기 위해 Fig. 1과 Fig. 2에 도시된 바와 같이 LS산전 3상 유도

Table 2 Temperature and relative humidity measurement apparatus

Temperature measuring circuit	Sensor : NTC type N
	Accuracy : $-20 \sim 0^\circ\text{C} : \pm 0.4^\circ\text{C}$ $0 \sim 70^\circ\text{C} : \pm 0.1^\circ\text{C}$ $70 \sim 80^\circ\text{C} : \pm 0.6^\circ\text{C}$
	Reproducibility : $0.1^\circ\text{C}$
Relative humidity measuring circuit	Sensor : FHA646-E2C
	Accuracy : $\pm 2\%$ RH at nominal temperature
	Reproducibility : $<1\%$ RH at nominal temperature
Measuring range : $5 \sim 100\%$ RH	

형 전력량계를 전력을 사용하는 모든 부분에 연결하였다. 청정덕트내의 공기의 온습도 측정은 독일 AHLBORN사의 ALMEMO-MA5990-2 데이터로거를 사용하여 Table 2에 수록된 ALMEMO 센서들을 통하여 측정하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구의 열회수식 외기공조시스템에 대한 실험조건을 Table 3에 수록하였다. 표에서 동기 및 하기의 외기조건은 우리나라 기흥지역의 지난 30년간의 기상조건 중에서 제일 극한의 엔탈피를 가지는 경우를 선정하였고 중간기의 외기조건은 봄철과 가을철의 중간 정도로 선정하였다. 본 연구의 에어와셔 외기공조시스템들의 공기선도상의 공조프로세스를 구하기 위하여 Fig. 3에서 향온항습기 하류, 에어와셔 하류, 냉각코일 하류, 재열코일 하류, 가습기 하류에서 공기의 온습도를 각각 측정하였다. 본 연구의 모든 실험결과는 정상상태에 도달한 후에 1시간동안 측정된 데이터를 이용하여 산정하였다.

Fig. 3에서 클린룸 배기로부터 외기측에 전달된 열회수량  $Q_{rh}$ 는 에어와셔 상류(향온항습기 하류)와 하류에서 측정된 공기의 온습도를 이용하여 아래의 식에 의해 산출하였다.

$$Q_{rh} = \frac{\rho_a V (h_o - h_i)}{3600} \quad (1)$$

Table 3 Experimental conditions of the present exhaust air heat recovery type air washer system

Air flow and velocity	1000 m <sup>3</sup> /h, 2.5 m/s
Outdoor air temperature and humidity	Winter : -18°C, 70.4% Midterm : 22°C, 55% Summer : 38°C, 50%
Class of spraying water for air washer	City water
Flow of spraying water	8 ℓ/min
Total number of nozzles in air washer	48
Water/air gravimetric ratio L/G	0.4
Flow of water for air washer C/H coil	40 ℓ/min
Supply air condition	12°C, 90%RH

여기서,  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $V$ 는 외기량,  $h_i$ 는 에어와셔 입구공기의 비엔탈피(specific enthalpy),  $h_o$ 는 에어와셔 출구공기의 비엔탈피이다. 열회수량  $Q_{rh}$ 가 양이면 온열, 음이면 냉열을 의미한다.

외기공조시스템의 에너지소비량은 Fig. 1과 Fig. 2에 도시한 대로 설치된 전력량계로부터 실측된 소비전력량에 해당한다. 다만, 동기의 경우 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 예열코일 대신에 설치된 향온항습기가 외기조건 -18°C, 70.4%RH을 생성하지 않고 에어와셔 입구 조건을 생성하는 것으로 하였다. 이는 단순 에어와셔 및 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템들의 공조프로세서가 서로 동일한 부분이기 때문에 에너지절감량의 산출에 아무런 문제가 발생하지 않는다. 에너지절감량은 2개의 외기공조시스템의 소비전력량 차이에 해당한다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 포화효율과 가스제거율

본 연구에 사용된 Fig. 1의 단순 에어와셔의 포화효율을 구하기 위하여 2개의 뱅크로 이루어진 1개의 에어와셔 모듈의 상하류에 설치한 온습도 센서에서 측정된 에어와셔 통과 전후의 공기 상태를 이용하여 다음 식에 의해 포화효율  $\eta_s$ 를 산출하였다.

$$\eta_s = \frac{T_{inlet, DB} - T_{outlet, DB}}{T_{inlet, DB} - T_{inlet, WB}} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $T_{inlet, DB}$ 는 에어와셔 입구에서의 건구온도,  $T_{inlet, WB}$ 는 에어와셔 입구에서의 습구온도,  $T_{outlet, DB}$ 는 에어와셔 출구에서의 건구온도를 나타낸다.

Fig. 4는 에어와셔의 포화효율을 산출하기 위하여 1개의 에어와셔 모듈에 대해 수공기비 L/G가 0.2일 때 유입공기의 다양한 온습도조건에 대한 공기의 상태변화 실험결과를 보여주고 있다. 그럼에 도시된 결과들로부터 포화효율이 최소 76.2%, 최대 78.6%, 평균 77.4%의 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 본 연구의 에어와셔가 유입 공기의 온습도에 관계없이 대체로 일정한 포화효율을 나타내는 특성을 가질 수 있기 때문에 공조기 입구의 온습도가 변화해도 에어와셔가

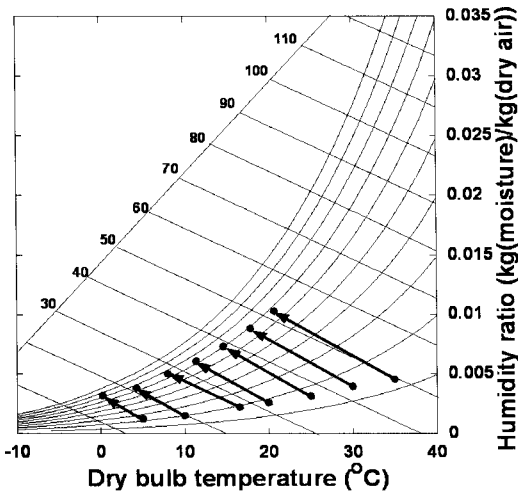


Fig. 4 Experimental results of air state change by the simple air washer module for various incoming air conditions.

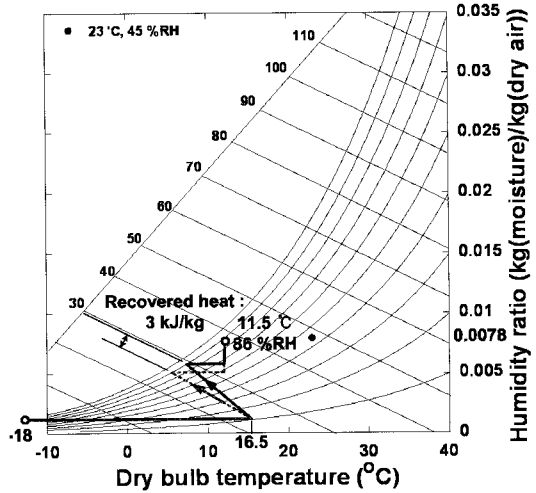


Fig. 5 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart by heat recovery for the winter operation.

필요한 능력을 발휘할 수 있도록 Fig. 1에 도시된 상류의 예열코일을 제어할 수 있어 외기공조시스템 출구의 노점온도는 일정하게 만들 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 에어와셔를 통한 수분무식 가습에서도 증기가습과 같은 비교적 정밀한 가습제어가 가능하게 된다. 또한, 가습 후의 건구온도는 외기조건에 의해 변화하지만 하류의 냉각코일 및 재열코일에 의해 외기공조시스템 출구조건(급기조건)으로 제어할 수 있게 된다. 이러한 관찰로부터 90% 이상의 포화효율이 얻어질 수 있도록 단순 에어와셔 외기공조시스템을 Fig. 1과 같이 수공기비 L/G가 0.4가 되도록 2개의 에어와셔 모듈(총 4개의 탱크)로 구성하고 동기의 경우에 에어와셔 입구의 온도조건을 16.5°C로 설계하였다. 수공기비 L/G가 0.4에 해당하는 2개의 에어와셔 모듈에 대한 실험으로부터 포화효율이 동기조건인 경우 89.2%, 하기조건인 경우 89.8%,

Table 4 Experimental results of removal efficiency for ammonia gas

Inlet air temperature	10°C	16.5°C	25°C	35°C
1 module L/G = 0.2	75.1	73.3	71.6	70.0
2 modules L/G = 0.4	90.4	89.6	88.7	87.9

중간기조건인 경우 89.9%로 얻어졌다. 이는 각각의 에어와셔 모듈이 거의 선형적으로 전체 포화효율에 기여했다는 것을 보여주는 것이다.

한편, 에어와셔의 수용성 가스제거성능을 살피기 위하여 입구공기의 온도에 대한 암모니아 제거실험을 수행하였다. Table 4는 수공기비 L/G가 0.2인 1개의 에어와셔 모듈을 장착한 경우와 L/G가 0.4인 2개의 에어와셔 모듈을 장착한 경우에 대해 에어와셔 상하류의 암모니아 가스농도를 측정하여 산출한 암모니아 제거율을 각각 수록하고 있다. 에어와셔 입구농도는 대기중의 약 6~20 ppb 수준의 농도를 고려하여 50 ppb로 유지하였다.<sup>(8)</sup> 표로부터 1개의 에어와셔 모듈의 경우 암모니아 제거율이 전체적으로 70%를 상회하고 평균적으로 72.5%를 나타내고 있음을 알 수 있다. 2개의 에어와셔 모듈의 경우 제거율은 평균적으로 89.2%를 나타내고 있는데 이는 순차적으로 배열된 각각의 에어와셔 모듈의 제거율이 거의 선형적으로 나타났기 때문이다. 또한, Song et al.<sup>(8)</sup>이 관찰한 것처럼 공기온도가 증가함에 따라 제거율이 감소함을 알 수 있다.

### 3.2 에너지 절감량

Fig. 5는 동기조건에서 배기 열회수에 의한 외기공조시스템의 공기선도에서의 공조프로세서 변

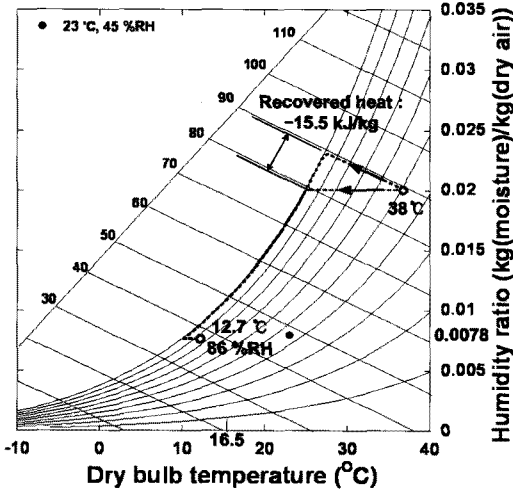


Fig. 6 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart by heat recovery for the summer operation.

화에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 2가지 외기공조시스템들은 모두 동기조건 -18 °C, 70.4%RH의 외기를 유입하여 예열코일을 통과시켜서 공기상태가 16.5 °C, 9%RH로 변화시키게 된다. 본 동기 실험에서는 향온향습기가 외기조건이 아니라 에어와서 입구조건을 바로 만들었기 때문에 에너지소비량의 산출에 있어 전력량계에서 측정된 전력량은 예열코일에 의한 가열부하를 제외한 외기공조시스템의 전력소비량에 해당된다. 그림으로부터 단순 에어와서 외기공조시스템의 경우 에어와서에서 분사된 수액적들이 증발하면서 공기가 냉각되는 단열가습을 통한 등엔탈피 과정을 보여주고 있음을 알 수 있다. 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 경우 세정집진기를 통해 배출되는 배기의 폐열을 에어와서에 삽입된 냉각/가열 겸용코일로 전달하여 공기의 가열가습에 이용하였기 때문에 단순 에어와서 외기공조시스템에 비해 3 kJ/kg 만큼의 가열가습부하가 절감되는 것을 확인할 수 있다. 이를 식(1)에 대입하면 본 연구의 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h에 대해 열회수량은 1.01 kW가 얻어지게 된다.

Fig. 6은 하기조건에서 배기 열회수에 의한 외기공조시스템의 공기선도에서의 공조프로세스 변화에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 외기공조시스템들은 동기조건과는 달리 예열코일의 역할이 불필요하기 때문에 38 °C, 50%RH의 외

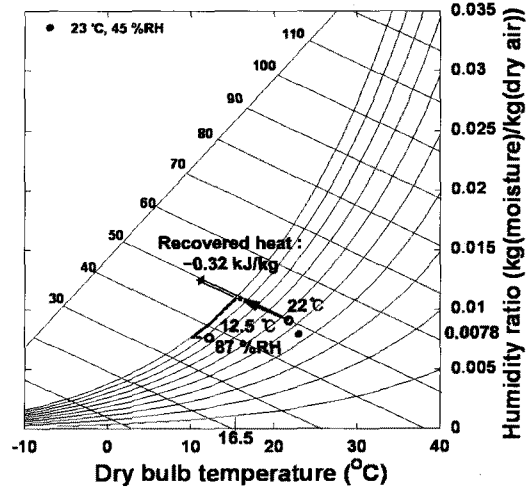


Fig. 7 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart by heat recovery for the midterm operation.

기는 곧바로 에어와서에서의 공조프로세스를 겪게 된다. 본 하기 실험에서는 향온향습기가 외기조건 38 °C, 50%RH을 생성하기 때문에 에너지소비량의 산출에 있어 전력량계에서 측정된 전력량이 외기공조시스템 전체의 전력소비량을 산출하게 된다. 그림으로부터 단순 에어와서 외기공조시스템의 경우 에어와서에서는 동기조건에서 관찰한 바와 같이 단열가습과정을 통해 등엔탈피 변화를 보여주고 있음을 알 수 있다. 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 경우 회수된 열을 공기의 냉각제습에 이용하였기 때문에 단순 에어와서 외기공조시스템에 비해 15.5 kJ/kg 만큼의 냉각제습부하가 절감되는 것을 확인할 수 있다. 이를 식(1)에 대입하면 본 연구의 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h에 대해 열회수량은 5.18 kW가 얻어지게 된다.

Fig. 7은 중간기조건에서 배기 열회수에 의한 외기공조시스템의 공기선도에서의 공조프로세스 변화에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림으로부터 0.32 kJ/kg의 냉각제습부하가 절감되는 것을 확인할 수 있다. 이는 식(1)로부터 열회수량 0.11 kW에 해당한다.

Table 5는 본 연구의 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 에너지 절감량에 대한 실험결과들을 수록하고 있다. 표로부터 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템이 동기조건 및 하기조건에 모두 단순 에

Table 5 Summary of energy consumption and heat recovery

Category	Season, Outdoor air condition	Item	Simple air washer type(kW)	Exhaust air heat recovery type(kW)
Power consumption and heat recovery	Winter, -18°C, 70.4%RH	Recovered heat	0	1.01
		Power consumption	13.8	10.98
		Reduced power	0	2.82
	Summer, 38°C, 50%RH	Recovered heat	0	-5.18
		Power consumption	12.68	11.28
		Reduced power	0	1.4
	Midterm, 22°C, 55%RH	Recovered heat	0	-0.11
		Power consumption	5.68	6.5
		Reduced power	0	-0.82
Other related power consumption	All	Fan	0.51	0.83
		Primary pump	0	0.3
		Secondary pump	0	0.3

여와서 외기공조시스템에 비해 전력소비량이 절감되고 특히 동기조건의 경우에 하기조건의 경우보다 약 2배라는 큰 폭의 절감이 있음을 확인할 수 있다. 즉, 열회수의 실행으로 인해 2개의 중간 열교환기 순환수용 펌프동력의 추가분 0.6 kW, 냉각/가열 겸용코일의 삼입으로 인한 차압 증가에 의한 송풍기동력 증가분 0.32 kW가 있음에도 불구하고 전력소비량이 절감된 것이다. 그러나 중간기조건의 경우에는 이러한 열회수 운전을 위한 추가적인 소비전력 증가분 0.92 kW가 회수열량에 의한 전력소비량의 절감분을 압도하게 되어 전력소비량이 전체적으로 0.82 kW가 증가되었음을 알 수 있다. 이러한 중간기조건의 경우와 같이 무익한 운전상태가 발생될 때 순환수용 펌프를 정지하는 것을 고려해야 한다.

추가로 관찰할 수 있는 것은 소비전력 절감량과는 달리 회수열량은 하기조건의 경우가 동기조건의 경우보다 크고 표에서 하기조건의 경우에 회수열량이 소비전력 절감량의 3.7배라는 점이다. 다시 말하면 하기조건의 경우에 배기로부터 회수된 냉열이 Fig. 2에서 에어와서의 하류에 있는 냉각코일에서의 냉각제습부하의 절감을 동반하게 되는데 열회수 운전을 위한 추가적인 소비전력 증가분 0.92 kW를 소비전력 절감량에 더하면 회수열량이 실질적으로 2.23배에 해당하고 이 값은 일반적으로 냉각코일에 공급되는 냉수를 제조하는 냉동기의 성능계수(COP)에 상당한 값이 되는 것을 알 수 있다. 이와는 달리 동기조건의 경우

에서는 회수열량이 소비전력 절감량의 0.36배라는 것을 알 수 있다. 이는 열회수 운전을 위한 추가적인 소비전력 증가분 0.92 kW를 소비전력 절감량에 더하면 실질적으로 0.27배에 해당되고 회수된 온열이 에어와서 하단의 재열용 히터와 가습기의 가열가습부하를 절감하게 되는데 재열코일 및 가습기와 관련된 효율에 상당한 값이다.

한편, 본 연구에서 제안하는 에어와서 외기공조시스템들의 공통된 장점은 전술한 에어와서 모듈의 일정한 포화효율에 의한 정밀한 가습제어 특성이라는 것이다. 즉, 동기의 경우 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 일반적으로 채용되고 있는 보일러에 의한 증기 가습의 상당한 부분을 에어와서에 의한 수분무식 가습으로 대체할 수 있어 보일러 운전에 의한 증기제조비용을 크게 줄일 수 있다는 것이다.

#### 4. 결 론

반도체 클린룸에서 소비되는 외기부하를 절감하기 위하여 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템을 제안하였다. 이 제안된 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 에너지절감 성능을 평가하기 위하여 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 단순 에어와서 및 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템 실험장치를 제작하였다. 먼저 기초실험인 에어와서 기본모듈의 포화효율 및 암모니아 제거율 실험을 수행하였고 기흥지역의 4계절 외기조건에 대

한 단순 에어와서 및 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공조프로세스와 전력소비량을 구하는 실험을 수행하였다. 실험결과로 얻어진 열회수량 및 에너지절감량, 포화효율, 가스제거율의 비교분석을 통하여 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 제안한 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 동기조건 및 하기조건의 경우 모두 단순 에어와서 외기공조시스템에 비해 전력소비량이 절감되고 특히 동기조건의 경우에 하기조건의 경우보다 약 2배의 절감량이 있음을 확인하였다.

(2) 중간기조건의 경우 열회수 계통의 운전을 위한 추가적인 소비전력 증가분이 회수열량에 의한 소비전력 절감분을 압도하게 되어 전력소비량이 증가되었음을 알 수 있었다. 이러한 무익한 운전상태가 발생될 때 중간열교환기 순환수용 펌프를 정지하는 것이 필요하다.

(3) 회수열량은 소비전력 절감량과는 달리 하기조건의 경우가 동기조건의 경우보다 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 회수열량이 하기조건의 경우에 소비전력 절감량의 3.7배가 되고 동기조건의 경우에 소비전력 절감량의 0.36배가 되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 운전중인 열원의 성능과 상관성이 있음을 관찰할 수 있었다.

(4) 본 연구의 에어와서 기본모듈은 유입공기의 온습도조건에 상관없이 일정한 포화효율 특성을 보여주었고 에어와서에 의한 수분무식 가습에서도 증기가습과 같은 비교적 정밀한 가습 제어가 가능함을 확인하였다.

(5) 본 연구의 에어와서 기본모듈은 수공기비 L/G가 0.2일 때 수용성 가스인 암모니아에 대해 10℃~35℃의 유입공기온도에서 70% 이상의 가스제거율을 보여주었고 기본모듈 2개를 편성하면 90% 이상의 가스제거율을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부가 주관하고 에너지관리공단이 지원한 에너지자원기술개발사업 반도체/LCD 클린룸 에너지절약기술 개발의 세부과제 '열회수식 에어와서 시스템 개발'과 경기도 기술개발사업 전략산업과제 '첨단전자산업을 위한 에너지절약형 초정정클린룸 개발'의 일환으로 수행되었으

며 이에 대해 관계자들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Yoo, K.H., 2007, Reduction of air conditioning energy in semiconductor/display manufacturing clean rooms, *Air Cleaning Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 1-18, Korea Air Cleaning Association.
2. Yamamoto, H., Katsuki, T., Fujisawa, S., Moriya, M., Nabeshima, Y. and Oda, H., 2002, Removal of gaseous contaminants by air washer and development of a heat recovery system, Technical report No.2, Seiken Company, Osaka, Japan, pp. 19-30(in Japanese).
3. Fujisawa, L., Moriya, M., Yosa, K., Ikuta, M., Yamamoto, H. and Nabeshima, Y., 2001, Removal of chemical contaminants as well as heat recovery by air washer(part 1), *Proc. Of the 19th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, pp. 166-168(in Japanese).
4. Fujisawa, S., Moriya, M., Yosa, K., Nishiwaki, S., Yamamoto, H., Katsuki, T., Nabeshima, Y. and Oda, H., 2002, Removal of gaseous chemical contaminants as well as heat recovery by air washer(Part 2), *Proc. of the 20th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, pp. 162-165(in Japanese).
5. Shiroma, S., Tomita, H., Yoshizaki, S. and Suzuki, K., 2002, Heat recovery system for exhaust air by the water spray, *Proc. of the 20th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, pp. 260-262(in Japanese).
6. Yamamoto, H., Katsuki, T., Fujisawa, S., Yosa, K., Nishiwaki, S., Nabeshima, Y. and Oda, H., 2003, Removal of gaseous chemical contaminants as well as heat recovery by air washer (Part 3), *Proc. of the 21st Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, pp. 151-154(in Japanese).
7. Yeo, K.H and Yoo K.H., 2006, An experiment on the characteristics of heat recovery, particle collection and gas removal in an air washer system for semiconductor clean rooms, *Indoor Environment and Technology*, Vol. 3, No. 2,



- pp. 131-140.
8. Song, G. H., Yoo K. H. and Son, S. W., 2008, A study on ammonia removal performance improvement of an air washer for semiconductor manufacturing clean rooms, *Indoor Environment and Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-157.