

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 2: June 2017 pp. 65-77

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.6.30.065>

반도체 클린룸용 외기공조시스템의 수분무 가습을 이용한 에너지절감에 관한 연구

송원일 · 김기철 · 유경훈* · 신대건¹⁾ · 태경웅²⁾ · 김용식³⁾ · 박덕준⁴⁾

한국생산기술연구원 나노오염제어연구실, ¹⁾(주)대한피엔씨, ²⁾은성화학(주), ³⁾삼우시스템(주), ⁴⁾(주)신성이엔지

(2017년 3월 28일 투고, 2017년 5월 1일 수정, 2017년 5월 2일 게재확정)

A Study on Energy Reduction in an Outdoor Air Conditioning System for Semiconductor Manufacturing Cleanrooms Using Water Spray Humidification

Won-Il Song · Ki-Cheol Kim · Kyung-Hoon Yoo* · Dae-Kun Shin¹⁾ · Kyung-Eung Tae²⁾ · Yong-Sik Kim³⁾ · Dug-Jun Park⁴⁾

Nanoscale Contamination Control Laboratory, Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

¹⁾Daehan PNC Co., Dangjin-si, 31721, Korea ²⁾Eunsung-chemical Co., Anseong-si, 17554, Korea

³⁾Samwoo System Co., Gwangmyeong-si, 14308, Korea ⁴⁾Sinsung ENG Co., Seongnam-si, 13543, Korea

(Received 28 March 2017; Revised 1 May 2017; Accepted 2 May 2017)

Abstract

In recent large-scale semiconductor manufacturing cleanrooms, the energy consumption in outdoor air conditioning (OAC) systems to heat, humidify, cool and dehumidify outdoor air(OA) represents about 40~50 % of the total cleanroom power consumption required to maintain cleanroom environment. Therefore, the assessment of energy consumption in outdoor air conditioning systems is essential for reducing the outdoor air conditioning load for a cleanroom. In the present study, an experiment with an outdoor air flow rate of 1,000 m³/h was conducted to compare the energy consumption in steam humidification, simple air washer, exhaust air heat recovery type air washer and dry cooling coil(DCC) return water heat recovery type air washer OAC systems. Besides, a numerical analysis was carried out to evaluate the annual energy consumption of the aforementioned four OAC systems. It was shown that the simple air washer, exhaust air heat recovery type air washer and DCC return water heat recovery type air washer OAC systems using water spray humidification were more energy-efficient than the steam humidification OAC system. Furthermore the DCC return water heat recovery type air washer OAC system was the most energy-efficient.

Keywords: Cleanroom, Outdoor Air Conditioning, Energy Consumption, Water Spray Humidification, Air Washer, Heat Recovery

* Corresponding author.

Tel : +82-31-8040-6437

E-mail : khyoo@kitech.re.kr

1. 서론

반도체, 디스플레이 등의 첨단 전자제품을 생산하기 위한 대규모 클린룸은 실내의 청정도(cleanliness) 및 양압(positive pressure)을 유지하지 위해 대기로부터 많은 양의 외기를 도입하고 있다. 이 외기는 우선 외기공조시스템에 의해 급기(supply air)의 온·습도 상태로 공조된 후 클린룸 실내로 공급되고 클린룸 실내를 일반적으로 제조공정에 최적인 23℃, 45%RH의 온·습도 상태로 유지시킨다. 이러한 첨단 전자산업용 클린룸을 위한 외기공조시스템은 일반건물 공조용 외기공조시스템에 비해 약 10~100배의 단위 바닥면적당 에너지를 소비하고 있으며(John, 1998), 그 절대량은 클린룸 사용면적의 증가와 반도체 집적기술의 고도화에 동반해서 증가하는 추세에 있다. 일반적으로 반도체 클린룸의 공조에너지는 클린룸 제조공장의 총 소비에너지의 약 40~50%를 차지한다. 그 중에서 냉동기는 약 50%의 에너지를 소비하며, 외기공조시스템은 냉동기 전력부하의 거의 절반에 해당하는 에너지를 소비한다(Tsao et al., 2008).

따라서 클린룸에서 소비되는 에너지 중 상당부분을 차지하는 외기공조시스템의 에너지소비에 대한 사용효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다(Hu et al., 2008). 이러한 노력의 일환으로 클린룸용 외기공조시스템들의 에너지소비량을 비교, 분석하는 것은 에너지절약적 측면에서 유효한 대책이라고 판단된다. 또, 외기공조시스템의 부분별 에너지 소비구조를 파악하면 외기공조시스템의 에너지 성능 개선에 도움이 되는 정보를 획득할 수 있다(Kim et al., 2012).

한편, 클린룸 실내의 온도는 클린룸 실내에 설치되어 있는 드라이코일(dry cooling coil, DCC)에 의해 제어될 수 있지만, 이 드라이코일은 클린룸 실내의 절대습도를 제어할 수 없다. 따라서 외기공조시스템은 클린룸 시스템에서 습도를 제어할 수 있는 가습 및 제습 수단이기 때문에 이곳에서의 습도 제어는 매우 중요하다. 또한 겨울철에 도입되는 외기를 가습하기 위해 주로 사용되는 가습 방식인 증기 가습(steam humidification) 방식은 화석연료에 의한 많은 가열에너지를 소비하고 있어, 외기공조시스템의 방대한 에너지소비의 주요 원인 중 하나로 지목 받고 있다. 이에 대한 대책으로 에너지 소비가 많은 증기

가습 방식을 에어와셔(air washer)를 이용한 수분무 가습(water spray humidification) 방식으로 대체하려는 연구가 수행되었다(Kim et al., 2012). 수분무 가습은 분사노즐에서 분무된 수액적이 공기로부터 증발잠열을 흡수하여 자연기화되는 방식이기 때문에, 물을 100~120℃의 증기로 만들기 위한 가열 에너지가 불필요하여 증기 가습 방식에 비해 에너지 소비가 적다는 장점을 가지고 있다.

에어와셔는 외기공조시스템에서 가습 수단으로 사용하는 동시에 외기 중의 입자상, 가스상 오염물질을 제거하는 장치이며, 외기에 포함되어 있는 오염물에 의한 영향으로 인해 제품의 품질 및 생산수율이 저하되는 것을 방지하고 있다(Watanabe et al., 1998; Yoshizaki et al., 1999; Song et al., 2008). 최근에 Fujisawa et al.(2001, 2002), Yamamoto et al.(2003), Yeo and Yoo(2006), Song et al.(2009, 2010)은 에너지 절약적 관점에서 반도체 클린룸에서 배출되는 배기의 저온 폐열을 회수할 수 있는 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 소비에너지 절감에 대한 실험적, 이론적 연구결과들을 발표하였다. 이러한 연구들은 클린룸용 외기공조시스템에 널리 채택되고 있는 에어와셔를 직·간접적으로 이용하여 클린룸 배기로부터 저온 폐열을 회수하는 기술을 보고하고 있다. 또한, Ebine et al.(2005), Tsao et al.(2010)은 클린룸의 드라이코일에서 냉동기로 돌아가는 반환 냉수의 저온 폐열을 회수하여 동계의 가열부하를 절감할 수 있는 외기공조기술을 제안하였다. 그러나 저온 폐열을 이용한 열회수 기술들을 적용한 에어와셔 외기공조시스템의 공조프로세스 및 에너지소비량에 대한 연구가 매우 부족한 실정에 있다.

에너지 절약적인 클린룸용 외기공조시스템 개발의 주목적은 외기공조시스템이 외기를 임의의 온·습도 조건으로 공조하기 위해 소비하고 있는 에너지를 절감하는데 있다. 따라서 연구된 외기공조시스템이 실제 외기 조건에서 월 단위 이상으로 장기간 운용되었을 때 절감할 수 있는 에너지 값의 산출은 외기공조시스템의 운용 전략을 세우는데 많은 도움이 된다. 또한 클린룸 입지 조건(외기 조건)이 상이한 경우에 대해서도, 일관성 있는 방법으로 에너지소비량을 산출할 수 있는 평가방법의 확립이 필요하다. 그러나 클린룸 및 그 외기공조시스템의 실제 운전을 통한 연간 에너지소비량의 실측은 많은 비용과

시간이 소모되므로 매우 비경제적인 방법이다. 이에 대한 대안으로 실증 실험을 기반으로 검증된 수치 해석을 통한 외기공조시스템의 연간 에너지소비량 평가방법의 개발은 경제적인 관점에서 매우 가치가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 외기공조시스템인 증기가습 외기공조시스템에 에너지절약적인 수단인 수분부 가습을 도입한 단순 에어와셔 외기공조시스템, 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템, 반환냉수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 총 4가지 클린룸용 외기공조시스템들의 공조프로세스 및 에너지소비량을 비교하는 실험을 외기도입량 1,000 m³/h에 대해 우리나라 기흥 지역의 외기조건을 대상으로 수행하였다. 또한 실험결과를 토대로 하여 각 외기공조시스템의 연간 에너지소비량을 평가·비교하는 수치해석 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig.4는 본 연구에서 고려하는 반도체 클린룸용 증기가습 외기공조시스템, 단순 에어와셔 외기공조시스템, 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템, 반환냉수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개략도를 각각 나타내고 있다. 증기가습 외기공조시스템은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 에어필터(Air filter), 예열코일(Pre-heating coil), 냉각코일(Cooling coil), 재열코일(Reheating coil), 증기가습기(Steam humidifier), 송풍기, 급기(SA)의 온·습도 조절을 위한 건구온도 및 습구온도 측정 센서들로 구성된다. 단순 에어와셔 외기공조시스템은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 상기의 증기가습 외기공조시스템에서 예열코일과 냉각코일 사이에 2단 에어와셔(Air washer) 및 엘리미네이터(Eliminator)로 구성된 에어와셔부가 추가로 편성되고 증기가습의 일부분을 수분부가습으로 대체하는 경우이다.

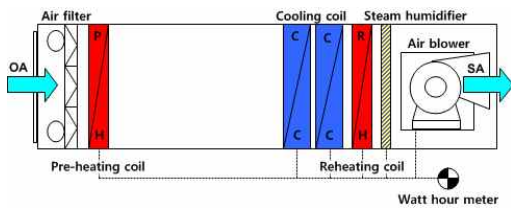


Fig. 1. Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with full steam humidification.

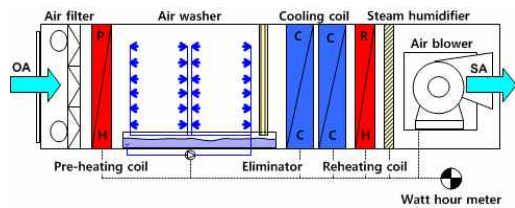


Fig. 2. Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with a simple air washer.

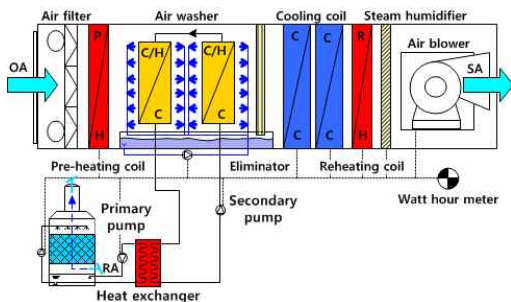


Fig. 3. Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

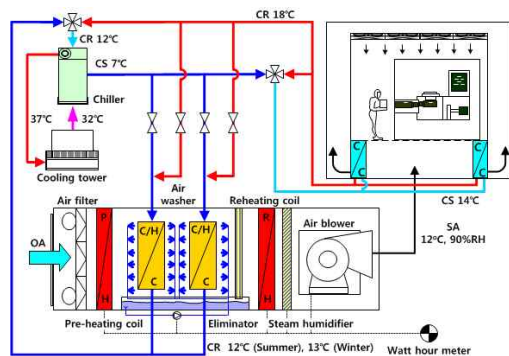


Fig. 4. Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with a DCC return water heat recovery type air washer.

Table 1. Experimental conditions

Items	Conditions
Air flow rate	1,000 m ³ /h
Outdoor air conditions	Winter : -18°C, 70.4 %RH (Actual properties : 5°C, 10.1 %RH) Summer : 38°C, 50 %RH
Class of spraying water for air washer	City water
Flow of spraying water for air washer	8 ℓ/min
Total number of nozzles in air washer	48
Water/air gravimetric ratio L/G for air washer	0.4
Flow of water for air washer C/H coil	40 ℓ/min
Supply air condition	12°C, 90 %RH

배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 단순 에어와서 외기공조시스템에 중간 열교환기(Heat exchanger), 중간 열교환기 순환수용 1차(Primary pump) 및 2차 펌프(Secondary pump), 냉각/가열 겸용 열교환 코일(C/H C), 세정집진기(Wet scrubber)가 추가로 구성되고, 이 설비들을 통해 클린룸 배기(RA, EA)에서 도입 외기(OA)로 열회수가 실시된다. 냉각/가열 겸용 열교환 코일은 열교환 능력이 높은 냉각코일을 사용하고, 코일을 통하여 배기로부터 회수된 열을 외기의 냉각 및 가열에 사용함으로써 외기부하를 절감하게 된다.

반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 동계에 Fig. 4에 도시된 바와 같이 클린룸 실내에서 발생한 반도체 제조장비의 발열을 드라이코일(Dry Cooling Coil, DCC)에서 냉각한 후, 냉동기로 돌아가는 반환냉수를 외기의 가열·가습 열원으로 이용하는 경우이다. 외기공조시스템의 에어와서부와 연결된 냉각/가열 겸용 열교환 코일에는 하계의 외기의 냉각·제습을 위한 냉열원으로 냉동기로부터의 7°C의 냉수와 동계의 외기의 가열·가습을 위한 온열원으로 드라이코일로부터의 18°C의 반환냉수가 선택적으로 공급된다. 본 방식에 의하면 동계의 경우, 외기의 가열·가습 부하에 대해 클린룸 실내에서 발생한 냉각 부하가 그대로 온열원이 되고, 동시에 외기로 흡수된 열량은 냉동기의 냉각부하 감소로 이어지기 때문에 에너지절약 효과는 2배가 된다. 반면에 하계의 경우, 냉각/가열 겸용 열교환 코일로 냉동기로부터의 7°C 냉수가 흐르게 되고 반환냉수로부터 열회수

가 실시되지 않기 때문에, 코일의 냉각부하는 단순히 냉동기의 냉각부하의 일부에 해당된다. 따라서 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템을 동계에 운용할 경우 반환냉수로부터의 열회수를 통해 상당한 에너지를 절감할 수 있지만, 하계에 운용할 경우 열회수 기능이 없는 단순 에어와서 외기공조시스템과 유사한 에너지소비량을 보여주게 된다.

반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템에 대한 본 연구의 실험장치를 Fig. 5에 도시하였다. 본 실험장치는 외기공조시스템의 전단에 항온항습기(Constant temp&humid chamber)를 보유하고 있어 외기의 하계 및 동계 온·습도 조건을 발생시킬 수 있다. 또한 에어와서부의 냉각/가열 겸용 열교환 코일로 공급되는 동계의 18°C의 반환냉수와 하계의 7°C의 냉수의 열원을 항온조(Constant temperature chamber)로 대체하였다. 동계의 18°C 반환냉수를 만들기 위한 항온조의 가열부하의 2배가 반환냉수로부터의 열회수에 의한 에너지절감량에 해당되고, 하계의 7°C 냉수에 대한 항온조의 냉각부하는 냉동기 냉각부하의 일부에 해당된다. 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템 이외의 3가지 외기공조시스템들에 대한 실험장치는 Song et al.(2009)과 Kim et al.(2011)의 연구에 자세히 언급되어 있다. 외기공조시스템의 에너지소비량 측정에 있어 에너지소비량을 소비전력량으로 통합하기 위하여 모든 가열코일은 전기히터로, 증기·가습기는 보일러 대신 전극봉식 증기·가습기로 대체하였다.

2.2 실험방법

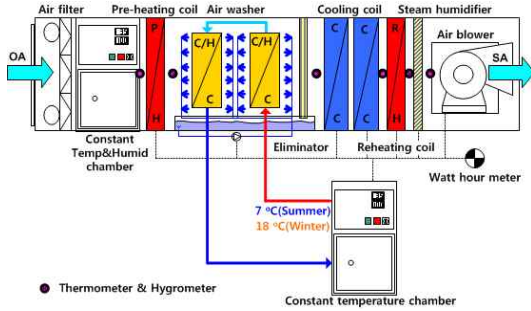


Fig. 5. Schematic diagram of the present experimental apparatus for the outdoor air conditioning system with a DCC return water heat recovery type air washer.

본 연구에서 수행하기 위한 외기공조시스템의 실험 조건들을 Table 1에 정리하였다. 외기도입량은 1,000 m³/h로 설정하였고, 동계 및 하계의 외기조건은 우리나라 기흥지역의 지난 30년간의 기상조건 중에서 최대치 및 최소치의 엔탈피를 가지는 경우로 설정하였다. 에어와셔수는 18℃의 수도수를 사용하였고, 48개의 노즐에서 총 8 l/min의 물을 분사하여 수공기비(L/G)가 0.4가 되도록 하였다. 또한 냉각/가열 겸용 열교환 코일에는 40 l/min의 7℃ 냉수 또는 18℃ 반환냉수가 흐르도록 하였다. 각 외기공조시스템들의 공조프로세스를 구하기 위해 Fig. 5에 도시된 바와 같이 실험장치의 항온항습기 하류, 예열코일 하류, 에어와셔 하류, 냉각코일 하류, 재열코일 하류, 증기가습기 하류, 총 6곳에서의 공기의 온습도를 각각 측정하였다. 모든 실험결과들은 각 지점의 온·습도 상태량이 정상상태에 도달한 후 1시간 동안 측정된 데이터를 이용하여 산출되었다.

외기공조시스템의 소비전력량은 Fig. 5에 도시한 전력량계(Watt Hour Meter)를 이용하여 측정하였다. 다만 동계 실험의 경우, 실험의 편의를 위하여 항온항습기 출구의 외기조건을 -18℃, 70.4 % RH로 설정하지 않고, 그 외기조건을 절대습도인 0.0005404 kg/kgDA를 그대로 유지한 채 가열한 5℃, 10 %RH의 외기조건을 생성하는 것으로 하였다. 이는 혹한기에 운용되는 클린룸용 외기공조시스템에서 최상류 예열코일이 동파방지를 위해 외기를 5℃ 정도로 예열한 후 그다음 가열코일로 보내는 실제적인 클린룸 운용상황을 실험에 적용하기 위함이다.

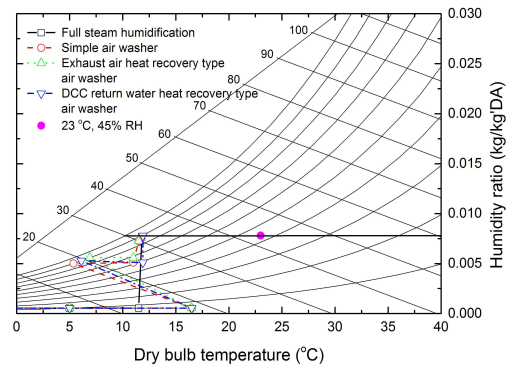


Fig. 6. Variation of the air conditioning process on psychrometric chart for the winter operation

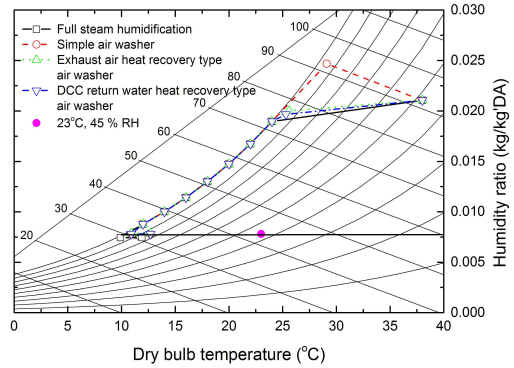


Fig. 7. Variation of the air conditioning process on psychrometric chart for the summer operation

따라서 본 연구의 동계 실험의 경우, 전력량계에서 측정된 소비전력량은 예열코일에서 외기를 -18℃, 70.4 %RH에서 5℃, 10 %RH로 가열할 때 소비되는 전력량이 제외되어 측정된다. 이 제외된 전력량은 각 외기공조시스템의 공조프로세스에서 서로 중첩되는 부분이기 때문에 에너지 절감량의 산출에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 반면에 하계 실험의 경우, 항온항습기가 외기조건 38℃, 50 %RH를 바로 생성하기 때문에 전력량계에서 측정된 소비전력량은 외기공조시스템의 공조프로세스 전체의 소비전력량을 나타내게 된다. 에너지 절감량은 측정된 4가지 외기공조시스템의 소비전력량 차이를 통해 산출하였다.

Table 2. Summary of energy consumption

Season	Category	Item	Full steam humidification (kW)	Simple air washer (kW)	Exhaust air heat recovery type air washer (kW)	DCC return water heat recovery type air washer (kW)
Winter, -18°C, 70.4 %RH (5°C, 10.1 %RH)	Total	Power consumption	33.24 (23.67)	27.85 (18.28)	25.03 (15.46)	24.16 (14.59)
		Reduced power	0	5.39	8.21	9.08
	Breakdown	Pre-heating coil	12.28 (2.71)	14.37 (4.8)	14.37 (4.8)	14.37 (4.8)
		Steam humidifier	20.7	9.6	6.66	7.98
		Reheating coil	0	1.9	1.1	1.4
		Air blower	0.26	0.51	0.83	0.74
		Air washer pump	0	1.47	1.47	1.47
		Constant temperature chamber	0	0	0	-1.8
		Primary pump	0	0	0.3	0
Secondary pump	0	0	0.3	0		
Summer, 38°C, 50 %RH	Total	Power consumption	10.8	12.68	11.28	10.75
		Reduced power	0	-1.88	-0.48	0.05
	Breakdown	Cooling coil	9.97	10.13	7.82	3.2
		Reheating coil	0.57	0.57	0.56	0.58
		Air blower	0.26	0.51	0.83	0.74
		Air washer pump	0	1.47	1.47	1.47
		Constant temperature chamber	0	0	0	4.76
		Primary pump	0	0	0.3	0
		Secondary pump	0	0	0.3	0

3. 실험결과 및 검토

3.1 공조 프로세스

Fig. 6은 동계 외기조건에서 증기가습, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공조프로세스에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 그림으로부터 외기공조시스템들은 동계 조건인 -18°C, 70.4 %RH의 외기를 유입하고, 각 외기공조시스템의 가열·가습 방식에 따라 서로 다른 공조프로세스를 보여주고 있음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 동계 실험에서는 실험의 편의를 위하여 항온항습기 출구의 공기상태를 5°C, 10.1 %RH로 동일하게 설정하였기 때문에, 그림

상의 5°C 이하의 공조프로세스 부분은 이해를 돕기 위하여 가상으로 그려놓은 것이다.

외기는 증기가습 외기공조시스템의 경우 예열코일에서 11.5°C, 6.5 %RH까지, 3가지의 에어와서 외기공조시스템의 경우 16.5°C, 4.7 %RH까지 각각 가열되고 있다. 이 가열된 공기들은 그 상태에서 각 외기공조시스템의 가습 방식에 의한 공조프로세스를 따르면서 그림에서 수평 실선으로 표시된 반도체 클린룸의 최적 절대습도 0.007864 kg/kgDA 선상의 12°C, 90 %RH 근처에 도달한 후 클린룸으로 공급되고 있다. 각각의 외기공조시스템의 공조프로세스를 비교해 보면 외기와 급기의 상태는 동일하지만, 외기를 급기 상태로 만들어주는 공조프로세스가

서로 상이하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 외기와 급기의 엔탈피 차이에 의한 가열·가습에 필요한 열량, 즉 외기부하는 동일하지만 공조프로세스 상의 경로 차이에 의한 에너지소비량, 즉 소비전력량의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 하계 외기조건에서 외기공조시스템들의 공조프로세스에 대한 실험결과를 각각 나타내고 있다. 그림에서 각 외기공조시스템의 공조프로세스의 포화선 상에 그려진 7개의 상태점들은 공조프로세스 곡선의 표현을 위해 가상으로 삽입한 것이며, 실험 결과는 아님을 명심하기 바란다. 그림으로부터 증기가습 외기공조시스템의 경우, 38°C, 50 %RH의 외기는 냉각코일에 의해 반도체 클린룸의 최적 절대습도 0.007864 kg/kgDA의 노점(Dew point)온도 10.4°C 근처인 9.9°C, 98 %RH까지 냉각·제습 되고, 재열코일에서 12.7°C, 86 %RH의 급기상태까지 재열된 후 클린룸으로 공급되고 있음을 알 수 있다.

단순 에어와서 외기공조시스템의 경우, 38°C, 50 %RH(절대습도 0.02105 kg/kgDA) 상태의 외기는 에어와서부의 수분부 가습에 의한 냉각·가습의 등엔탈피 프로세스를 통해 29.1°C, 0.02467 kg/kgDA의 상태가 된다. 그 후 냉각코일에 의해 냉각·제습되고, 재열코일에 의해 가열되어 급기상태 12.7°C, 86 %RH에 도달된 후 클린룸으로 공급됨을 알 수 있다. 반면에 배기 열회수식 및 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 단순 에어와서 외기공조시스템의 등엔탈피 프로세스와는 달리 38°C, 50 %RH(절대습도 0.02105 kg/kgDA) 상태의 외기가 에어와서부를 통과하면서 공기의 건구온도와 절대습도가 모두 감소하여 냉각·제습되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 외기가 에어와서부를 통과한 후 배기 열회수식의 경우는 25.6°C 0.02002 kg/kgDA, 반환냉수 열회수식의 경우는 25.3°C 0.01967 kg/kgDA의 상태가 되는데 이는 에어와서부의 초기에 수분부가습 과정을 거치지만 이후 냉각/가열 겸용 열교환 코일의 냉각에 따른 제습효과가 더 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 그 후 외기는 냉각코일, 재열코일을 거치면서 클린룸의 급기 상태가 되어 클린룸으로 공급되고 있다. 동계 실험과 마찬가지로 각 외기공조시스템의 급기 상태는 동일하지만 공조프로세스가 상이하기 때문에, 외기부하는 동일하지만 소비전력량의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 소비전력량

Table 2는 Fig. 6과 Fig. 7의 증기가습, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공조프로세스에 의한 총 소비전력량(Total) 및 부분별 소비전력량(Breakdown)을 각각 나타내고 있다. 동계 실험의 경우, 소비전력량에서 괄호 내의 값은 전술한 바와 같이 본 연구에서 실제로 수행한 외기 5°C, 10 %RH의 조건에 대한 외기공조시스템의 소비전력량 측정값을 나타낸다. 괄호 밖의 값은 -18°C, 70.4 %RH의 외기 조건에 대한 소비전력량 환산값을 나타낸다. 즉 외기를 -18°C, 70.4 %RH에서 5°C, 10 %RH까지 예열하기 위해 필요한 소비전력량인 9.57 kW를 괄호 내의 값에 더한 것이다. 이 예열 구간의 소비전력량 9.57 kW는 본 연구와 동일한 실험장치의 가열코일(전기히터)에 대한 Kim et al.(2011)의 가열부하당 소비전력 1.24 kW/kW를 이용하여 계산하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Table 2의 동계 및 하계 실험에 대한 외기공조시스템의 부분별 소비전력량의 변화를 도시하고 있다. 동계실험의 경우, Fig. 8로부터 증기가습 외기공조시스템이 33.24 kW의 가장 높은 총 소비전력량을 나타내고 있음을 알 수 있다. 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템들은 증기가습 외기공조시스템에 비해 각각 5.39 kW, 8.21 kW, 9.08 kW만큼 소비전력량이 감소되었음을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 부분별 소비전력량 분포에서 알 수 있듯이 에어와서 외기공조시스템들이 모두 채용하고 있는 에어와서에 의한 수분부가습이 증기가습 외기공조시스템의 증기가습의 상당부분을 대체하였고, 이로부터 발생한 소비전력량 감소분이 에어와서부의 냉각/가열 겸용 열교환 코일의 추가로 인한 송풍기 동력 및 에어와서 펌프동력, 예열에너지의 추가분을 압도하였기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 Fig. 8에서 에어와서 외기공조시스템들의 부분별 소비전력량 분포를 확인해보면 예열코일, 송풍기, 에어와서 펌프의 소비전력량은 소폭 상승하였지만, 증기가습을 위한 소비전력량이 상당부분 감소되었다는 것을 확인할 수 있다.

하계실험의 경우 Table 2 및 Fig. 9로부터 단순 에어와서 및 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템들의 소비전력량이 증기가습 외기공조시스템에 비

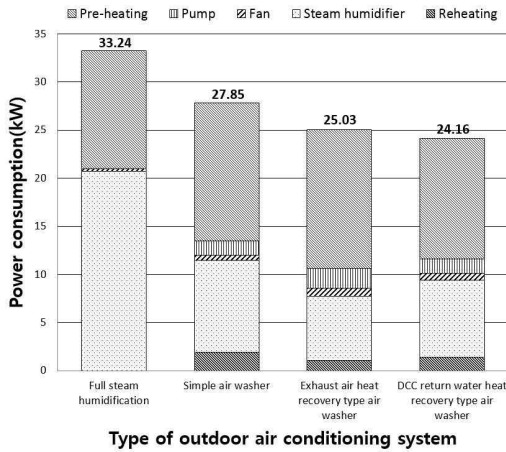


Fig. 8. Breakdown of total energy consumption for the winter operation

해 각각 1.88 kW, 0.48 kW만큼 증가한 것을 알 수 있다. 이는 부분별 소비전력량으로부터 알 수 있듯이 증기가습 외기공조시스템에 비해 단순 에어와셔 및 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템에 추가로 설치된 에어와셔부에 의한 송풍기 부하 및 펌프 동력의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 두 시스템은 증기가습 외기공조시스템에 비해 에어와셔부의 가스상 오염물질 제거기능 및 화학필터의 경감을 동반하므로, 이에 따른 차압 및 운전비용의 감소를 고려하면 소비전력량은 거의 동일한 것으로 판단된다.

이와는 달리 반환냉수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템은 증기가습 외기공조시스템에 비해 미미한 수준인 0.05 kW만큼 감소된 거의 동일한 총 소비전력량을 보여주고 있다. 또한 반환냉수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템이 동계의 경우에는 달리 열회수를 할 수 없는 조건임에도 불구하고, 총 소비전력량이 동일한 구조의 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템보다도 0.53 kW만큼, 단순 에어와셔 외기공조시스템보다도 1.93 kW만큼 총 소비전력량이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 2의 부분별 소비전력량으로부터 항온조의 4.76 kW와 Cooling coil의 3.2 kW의 합이 7.96 kW라는 사실을 감안하면, 에어와셔부의 냉각/가열 겸용 열교환 코일에 7℃의 냉수를 공급하는 항온조의 COP가 에어

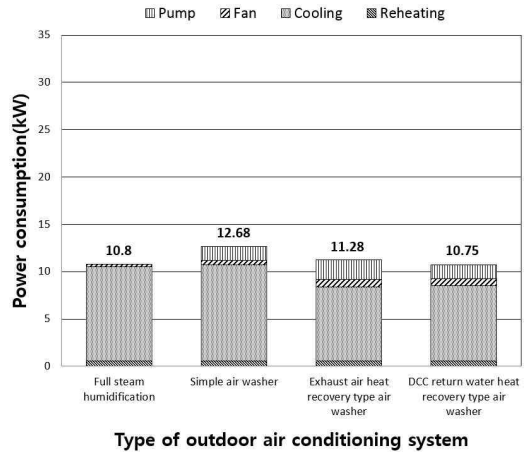


Fig. 9. Breakdown of total energy consumption for the summer operation

와셔 하류의 냉각코일에 냉수를 공급하는 냉동기의 COP보다 높아서 발생한 결과로, 본 연구의 실험장치에서만 발생하는 특정된 현상으로 일반적인 사실은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 하계실험의 경우 에어와셔 외기공조시스템들은 모두 증기가습 외기공조시스템에 비해 에너지 절감효과는 거의 없는 것으로 결론지을 수 있다.

외기공조시스템들의 총 소비전력량을 연간으로 살펴보면, 동계 조건에 대한 외기공조시스템들의 총 소비전력량은 모두 하계 조건의 경우에 비해 2배 이상이고, 특히 증기가습 외기공조시스템의 경우 약 3 배임을 알 수 있다. 한편 3가지 에어와셔 외기공조시스템들은 모두 동계 조건에서는 증기가습 외기공조시스템보다 큰 폭의 에너지절감량을 나타내지만, 하계 조건에서는 거의 에너지절감량이 없음을 알 수 있다. 그리고 3가지 에어와셔 외기공조시스템들은 모두 증기가습 외기공조시스템에 비해 연간으로 평가한다면 에너지절약적이라고 볼 수 있다. 특히 반환냉수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템은 가장 큰 에너지절감량을 나타낼 것으로 판단되고 가장 에너지절약적인 시스템임을 알 수 있다.

3.3 단위부하당 소비전력

Fig. 6, Fig. 7의 공조프로세스 및 Table 2의 소비전력량 실험결과를 바탕으로 본 연구의 클린룸용

Table 3. Summary of electric power consumption per unit humidifying load

Type	Full steam humidification	Simple air washer	Exhaust air heat recovery type air washer	DCC return water heat recovery type air washer
Electric power consumption per unit load for humidification (kW/kW)	3.40 (Reduction rate 0 %)	2.52 (26.0 %)	2.05 (39.6 %)	1.91 (43.8 %)

외기공조시스템들의 단위부하당 소비전력을 산출할 수 있다. 본 연구의 가열부하당 및 냉각부하당, 증기 가습부하당 소비전력들은 본 연구의 실험장치와 동일한 이전 연구의 1.24, 0.47, 3.40 kW/kW를 고려할 수 있다(Kim et al., 2011). 한편 동계 조건의 경우 외기공조시스템들의 소비전력량이 큰 차이를 보이는데, 이는 가습 방식에 따라 외기를 가습하기 위한 전력소비량이 상이하기 때문이다. 따라서 각 외기공조시스템이 채용하고 있는 가습과정에 대한 가습부하당 소비전력을 비교할 필요가 있다고 판단된다.

증기가습에 대한 상대적인 비교를 위하여 Fig. 6의 공조프로세스를 살펴보면, 3가지 에어와서 외기공조시스템들은 증기가습이 시작되는 11.5℃, 6.5%RH로부터 16.5℃, 4.7%RH까지의 추가 예열, 에어와서에 의한 수분무가습, 재열을 통하여 급기 조건인 11.8℃, 89%RH까지의 공조프로세스를 실시하고 있다. 이 공조프로세스의 총 가습부하는 증기가습 외기공조시스템의 증기가습 부하인 6.08 kW와 동일하다(Kim et al., 2011). 따라서 전술한 가습구간에 대한 외기공조시스템의 해당 소비전력량을 Table 2로부터 구하고, 그 소비전력량을 6.08 kW로 나누면 각 외기공조시스템의 가습부하당 소비전력을 구할 수 있다.

본 연구의 각 외기공조시스템에 대해 상기의 방식으로 산출한 가습부하당 소비전력들을 Table 3에 수록하였다. 예상한 바와 같이 증기가습 외기공조시스템이 가장 많은 가습부하당 소비전력을 나타내고 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템 순으로 큰 가습부하당 소비전력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 괄호 내에 표시한 증기가습부하당 소비전력 대비 가습부하당 소비전력 절감율을 살펴보면 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템이 가장 높은 절감

율인 43.8 %를 나타내고 배기 열회수식 및 단순 에어와서 외기공조시스템은 각각 39.6 %, 26.0 %의 절감율을 나타내고 있다.

4. 연간 소비전력량 산출

4.1 수치해석 방법

실제 외기공조시스템의 운전 상황을 수치해석에 반영하기 위해, 외기공조시스템에서 외기의 상태를 0.0078 kg/kgDA의 절대습도를 가지는 이슬점인 10.4℃, 100%RH로 만드는 것을 기본 방향으로 설정하였다. 그 다음 0.0078 kg/kgDA의 절대습도선을 따라서 클린룸 실내의 발열부하에 따라 재열의 정도를 결정하도록 수치해석을 진행하였다. 클린룸은 연강항시 운전하는 것으로 가정하였으며, 외기공조시스템의 출구 공기(SA) 상태는 12℃, 90%RH로 일정하게 유지되도록 하였다. 또한 수치해석에 사용된 조건 및 상수들을 선행 실험의 설정 값과 실측 값들을 최대한 반영하여 현실성 있는 수치해석이 되도록 하였다.

각 외기공조시스템은 도입 외기의 온·습도에 따라 운전 상태를 동계 모드, 중간기 모드, 하계 모드 중 하나로 설정되며, 모드에 따라 외기공조시스템을 구성하고 있는 유틸리티(Utility)의 작동 유·무를 결정하여 외기를 급기 상태로 공조하도록 하였다. 수치해석 방법에 대한 자세한 내용은 Song et al.(2010)과 Kim et al.(2013)의 연구에 자세히 언급되어 있다. 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템 경우, Song et al.(2010)에서 언급된 수치해석 방법 중 에어와서에서의 지배방정식을 수정하여 수치해석을 진행하였다.

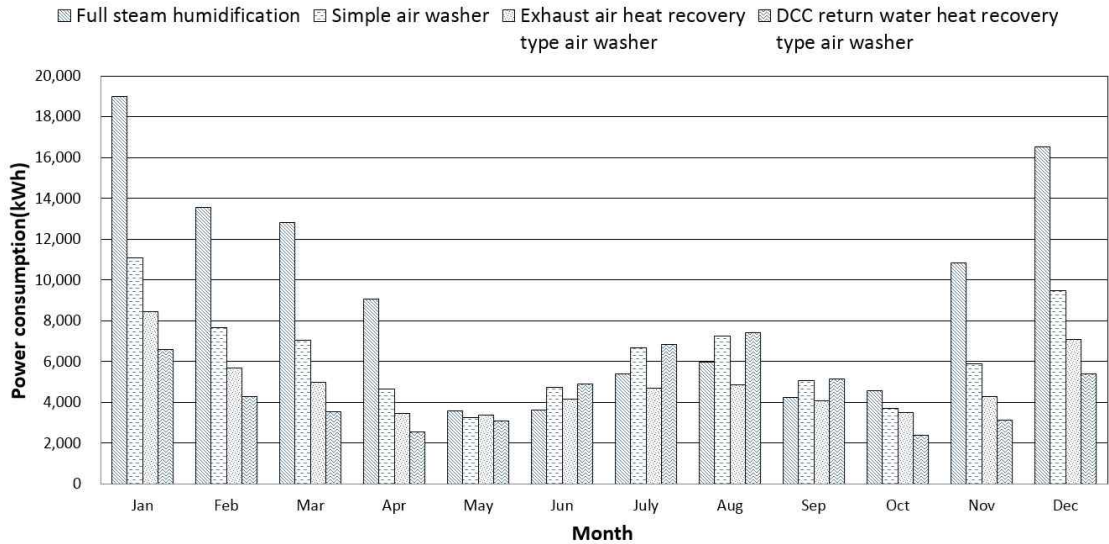


Fig. 10. Monthly energy consumption of each type outdoor air conditioning system

4.2 수치해석 결과 및 검토
 수치해석을 통해 계산된 우리나라 기흥지역의 외기조건에 대한 각 외기공조시스템의 연간 에너지소

비를 Table 4에 나타내었다. 표로부터 증기가습, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 연간 소비전

Table 4. Annual energy consumption of the present outdoor air conditioning systems

Month	Full steam humidification (kWh)	Simple air washer (kWh)	Exhaust air heat recovery type air washer (kWh)	DCC return water heat recovery type air washer (kWh)
Jan	19,002	11,095	8,428.0	6,574.7
Feb	13,544	7,669	5,682.0	4,272.1
Mar	12,804	7,041	4,965.3	3,539.8
Apr	9,073	4,652	3,468.7	2,554.7
May	3,573	3,241	3,384.6	3,089.8
Jun	3,623	4,737	4,173.4	4,898.2
July	5,379	6,658	4,714.1	6,829.5
Aug	5,982	7,262	4,838.6	7,432.9
Sep	4,253	5,046	4,094.3	5,155.7
Oct	4,590	3,698	3,502.4	2,389.1
Nov	10,821	5,905	4,295.0	3,126.6
Dec	16,520	9,475	7,067.5	5,388.0
Total	109,163	76,479	58,614	55,251
Proportion(%)	100	70.1	53.7	50.6

력량은 각각 109,163 kWh, 76,479 kWh, 58,614 kWh, 55,251 kWh임을 알 수 있다. 이로부터 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 등 에어와서를 채용한 외기공조시스템들은 증기가습 외기공조시스템에 비해 각각 29.9%, 46.3%, 49.4%의 에너지 절감율을 보였으며, 피크부하 실험의 경우와 동일하게 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템이 가장 에너지 절약적인 시스템임을 나타내고 있다. 또한 열회수 기능이 없는 단순 에어와서의 경우에 비해 배기 열회수식 에어와서나 반환냉수 열회수식 에어와서 등 폐열회수를 결합한 경우도 상당히 효과적인 방법이라는 것을 알 수 있다. 다만 에너지 절감율을 살펴보면, 수분무가습 시스템과 폐열회수 시스템의 적용을 통해 발생하는 에너지 절감량이 실험에 비해 수치해석에서 다소 과다평가 되었다는 것을 확인할 수 있다. 이는 외기공조시스템의 실제 운전조건에서 발생하는 에너지 손실을 수치해석 과정에 충분히 반영하지 못한 결과로 판단되며, 이 부분을 추후 연구를 통해 보완·수정한다면 좀 더 현실적인 수치해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4에 나타난 외기공조시스템에 따른 월별 에너지소비량을 Fig. 10에 도시하였다. 외기공조시스템이 가습을 거의 하지 않는 5월부터 10월까지의 4가지 외기공조시스템들이 거의 비슷한 에너지소비량을 나타낸다. 이러한 결과는 하계의 피크부하 실험 결과와 유사하며 외기의 조건이 고온·다습하여 제습할 필요가 있는 경우에 수분무가습 및 열회수 기능의 외기공조시스템으로의 적용은 에너지 절약적인 방법은 아님을 보여준다. 그러나 가습량이 많은 11월부터 4월까지의 에어와서 외기공조시스템들이 증기가습 외기공조시스템에 비해 현저히 낮은 에너지소비량을 나타낸다. 따라서 클린룸용 외기공조시스템을 설계·제작할 때 외기공조시스템이 채용할 가습 과정에 대한 가습부하당 소비전력을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 수분무 가습을 이용하여 반도체 클린룸용 외기공조시스템의 에너지절감을 도모하기

위하여 반도체 클린룸용 증기가습, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공조프로세스 및 에너지소비량을 비교하였다. 외기도입량 1,000 m³/h급 lab-Scale 외기공조시스템 실험장치를 제작하고, 우리나라 기흥 지역의 외기조건을 이용하여 에너지소비량 측정 실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 기반으로 각 외기공조시스템의 연간 에너지소비량을 평가·비교하는 수치해석 연구를 수행하였다. 얻어진 실험적·수치해석적 결과를 비교분석하여 다음과 같은 사항들을 관찰할 수 있었다.

(1) 증기가습, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공조프로세스는 각 시스템의 특성에 의해 서로 다른 공조프로세스를 보인다. 따라서 외기 및 급기 조건의 엔탈피 차이에 의한 외기부하는 서로 동일하지만, 공조프로세스의 경로 차이에 따른 소비전력량의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

(2) 하계실험의 경우, 단순 에어와서 및 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 증기가습 외기공조시스템보다 소비전력량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에어와서 외기공조시스템들에 추가로 투입된 에어와서부의 차압 증가로 인한 송풍기 부하 및 펌프동력의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 두 시스템은 증기가습 외기공조시스템에 비해 에어와서부의 가스상 오염물질 제거기능 및 화학필터의 경감을 동반하므로, 이에 따른 차압 및 운전비용의 감소를 고려하면 소비전력량은 거의 동일한 것으로 판단된다.

(3) 동계실험의 경우, 증기가습 외기공조시스템이 33.24 kW의 전력을 소비해 가장 많은 소비전력량을 나타냈다. 단순 에어와서 외기공조시스템의 소비전력량은 증기가습 외기공조시스템에 비해 5.39 kW만큼 감소되었고, 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 경우 8.21 kW, 반환냉수 열회수식 외기공조시스템의 경우 9.08 kW만큼 소비전력량이 감소되었음을 확인하였다.

(4) 각 외기공조시스템에 대한 연간 소비전력량을 살펴본 결과 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템들은 모두 증기가습 외기공조시스템에 비해 에너지소비량을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 반환

냉수 열회수식 외기공조시스템은 외기공조시스템 중 가장 큰 에너지절감량을 나타냄으로써 가장 에너지 효율적인 시스템임을 확인 할 수 있었다.

(5) 각 외기공조시스템에 따른 가습부하당 소비전력량을 계산해 본 결과, 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 증기가습 외기공조시스템에 비해 43.8 %, 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 39.6 %, 단순 에어와서 외기공조시스템은 26.0 %의 가습 에너지를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

(6) 수치해석 결과, 단순 에어와서, 배기 열회수식 에어와서, 반환냉수 열회수식 에어와서 등 에어와서를 채용한 외기공조시스템들은 증기가습 외기공조시스템에 비해 순서대로 약 29.9%, 46.3%, 49.4%의 에너지 절감율을 나타냈으며, 실험의 결과와 동일하게 반환냉수 열회수식 에어와서 외기공조시스템이 가장 에너지 절약적인 시스템임을 확인할 수 있다. 또한 배기 열회수식이나 반환냉수 열회수식 등 폐열 회수를 통한 에너지절감 방법 역시 상당히 효과적인 방법이라는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청이 주관하고 중소기업기술정보진흥원이 지원한 출연연-중소기업공동기술개발사업 제조현장녹색화기술개발과제 “첨단전자산업을 위한 절전형 열원기술 개발”과 산업통상자원부가 주관하고 한국에너지기술평가원이 지원한 에너지기술개발사업 시장수요대응형과제 “공업용 클린룸을 위한 실내 수분무가습 시스템 개발”과 기획재정부가 주관하고 한국생산기술연구원 지원한 중소중견기업 타깃형 육성 생산기술개발사업 “기축건물 바닥 설치형 열회수 환기장치 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 대해 관계자들에게 감사드립니다.

References

Ebine, T., Yoshida, H., Nishikawa, M. and Taura, H. (2005). Precision humidity control system by wetted-element humidifier and the cost reduction ef-

fect-(Part 2) Study on the system which used low temperature water, Proc. of the 23st Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, 190-193.

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, 166-168.

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, 162-165.

Hu, S.C., Wu, J.S., Chan, D.Y.L., Hsu, R.T.C. and Lee, J.C.C. (2008). Power consumption benchmark for a semiconductor cleanroom facility system, Energy and Buildings, 40, 1765-1770.

John, B. (1998). Cleanroom of the Future : An Assessment of HVAC Energy Savings Potential In a Semiconductor Industry Facility, LBNL Report No. 41356.

Kim, H.T., Song, G.S., Kim, K.C., Yoo, K.H., Son, S.W., Shin, D.K., Park, D.J. and Kwon, O.M. (2011). Comparative study on energy consumption of steam humidification type and water spray humidification type outdoor air conditioning systems for semiconductor manufacturing clean rooms, Trans. of the KSME (B), 35, 1249-1255.

Kim, K.C., Kim, H.T., Song, G.S., Yoo, K.H., Son, S.W., Shin, D.K., Park, D.J. (2012). An Experimental Study on Energy Consumption of Air Washer Outdoor Air Conditioning Systems for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms, Journal of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 24, 297-305.

Kim, K. C., Song, G.S., Kim, H.T., Yoo, K.H., Shin, D.K. and Park, D. J. (2013). An Assessment of Energy Consumption in Steam-Humidification- and

- Water-Spray-Humidification-Type Outdoor Air Conditioning Systems for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 25, 055-063.
- 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, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 5, 151-157.
- Song, G.S., Yoo, K.H., Kang, S.Y. and Son, S.W. (2009) An experimental study on energy reduction of an exhaust air heat recovery type outdoor air conditioning system for semiconductor manufacturing clean rooms, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 21, 273-281.
- Song, G.S., Kim, H.T., Yoo, K.H., Son, S.W., Shin, D.K. and Kim, Y.I. (2010). Numerical analysis on energy reduction of an exhaust-air-heat-recovery type air washer system for semiconductor manufacturing clean rooms, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 22, 697-703.
- Tsao, J.-M., Hu, S.-C., Chan, D. Y.-L., Hsu, R. T.-C. and Lee, J. C.-C. (2008). Saving energy in the make-up air unit (MAU) for semiconductor clean in subtropical areas, *Energy and Buildings*, 40, 1387-1393.
- Tsao, J.-M., Hu, S.-C., Xu, T. and Chan, D. Y. L. (2010). Capturing energy-saving opportunities in make-up air systems for cleanrooms of high-technology fabrication plant in subtropical climate, *Energy and Buildings*, 42, 2005-2013.
- Watanabe, T., Fujii, T., Murata, K. and Wada, T. (1998). Removal of chemical components in air by air washer, *Proc. of the 16th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, 1-4.
- 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*, 151-154.
- 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, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 3, 131-140.
- Yoshizaki, S., Hasegawa, T., Fujii, M. and Iijima, K. (1999). Removal of chemical compounds from outside air by air washer (part 3) The influence of the temperature and humidity of inlet air on removal efficiency, *Proc. of the 17th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control*, 1-4.