

반도체 클린룸용 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템의 에너지소비량 비교연구

김형태* · 송근수** · 김기철** · 유경훈*** · 손승우*** · 신대건**** · 박덕준***** · 권오명*

* 고려대학교 기계공학과, ** 한국생산기술연구원 나노오염제어연구실, *** (주)성림피에스, **** (주)대한피엔씨, ***** (주)신성이엔지

Comparative Study on Energy Consumption in Steam-Humidification- and Water-Spray-Humidification-Type Outdoor Air-Conditioning Systems for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms

Hyung-Tae Kim*, Gen-Soo Song**, Ki-Cheol Kim**, Kyung-Hoon Yoo***, Seung-Woo Son***, Dae-Kun Shin****, Dug-Jun Park***** and Oh-Myung Kwon*

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

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

*** Sunglim PS Co., **** Daehan PNC Co., *****Shinsung ENG Co.

(Received June 6, 2010; Revised October 28, 2011; Accepted November 2, 2011)

Key Words : Clean Room(클린룸), Outdoor Air Conditioning System(외기공조시스템), Energy Consumption(에너지 소비량), Power Consumption Per Unit Load(단위부하당 소비전력), Steam Humidification(증기가습), Water Spray Humidification(수분무가습)

초록: 최근의 반도체 제조용 대규모 클린룸에서는 도입 외기를 가열가습 및 냉각감습하는 외기공조시스템의 에너지소비량이 클린룸 환경을 유지하기 위해 필요한 전체 공조에너지의 약 45 %를 차지하고 있다. 특히 동기(겨울철)의 경우 외기를 가습하기 위한 에너지소비량은 매우 높다. 따라서 에너지절감을 통한 제조비용 절감 및 온실가스 감축을 위해 외기부하와 관계되는 공조에너지의 사용효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다. 따라서 반도체 클린룸용 외기공조시스템의 핵심 가습방식인 증기가습과 수분무가습 방식에 대한 소비전력량을 분석하는 것은 에너지절약적 측면에서 상당히 가치가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 전극봉식 가습기에 의한 증기가습방식 및 에어와셔에 의한 수분무가습방식 외기공조시스템들의 공조프로세스 및 소비전력량을 외기량 1000 m³/h의 경우 기흥지역의 동기 및 하기의 피크부하에 대해 비교하는 실험을 수행하였다. 실험결과들로부터 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템이 전극봉식 증기가습 외기공조시스템보다 연간 소비전력량이 적어서 에너지절약적임을 보여주었다.

Abstract: In modern large-scale semiconductor manufacturing clean rooms, the energy consumed by the outdoor air-conditioning system during heating, humidification, cooling, and dehumidification of the incoming outdoor air represents about 45% of the total air-conditioning load required to maintain a clean-room environment. In particular, the energy required for humidification of the outdoor air in winter is very high. Therefore, evaluation and comparison of the energy consumption in key humidification systems, viz., steam-humidification and water-spray-humidification systems, used in outdoor air-conditioning systems would be useful to reduce the outdoor air-conditioning load in clean rooms. In the present study, an experiment with an outdoor air flow of 1000 m³/h was conducted to compare the air-conditioning process and energy consumption in outdoor air-conditioning systems with electrode-boiler steam humidifiers and air-washer water spray humidification systems. The experimental results showed that the water-spray-humidification-type outdoor air-conditioning system consumed less electrical power than did the steam-humidification-type system and was more energy efficient during winter.

1. 서 론

우리나라의 수출주력품목인 반도체, 디스플레이

등의 첨단 전자디바이스 제조용 대규모 클린룸에서는 정밀한 습도 제어가 요구되기 때문에 겨울철의 도입 외기를 위한 가습 방법으로 보일러를 이용한 증기가습(steam humidification) 방식이 일반적으로 채용되고 있다. 그러나 이 증기가습은 화석

† Corresponding Author, khyoo@kitech.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

연료에 의한 방대한 가열에너지를 소비하고 있고 이것에 기인하는 이산화탄소의 배출량도 매우 높다. 우리나라 기흥지역의 경우 2009 년도의 온습도 기상자료로부터 계산한 결과 클린룸 외기량 1,000 m³/h 에 대해 연간 약 23.29 톤의 증기 가습량, 이를 위한 약 61.36 GJ 의 증기가습 에너지가 필요함을 알 수 있다. 이로부터 에너지절약 및 이산화탄소 배출량 저감의 관점에서부터 증기(steam)를 사용하지 않는 가습 방식의 요구가 증대되고 있다.

한편, 최근의 반도체 제조용 클린룸에서는 공기 중의 가스상 오염물의 영향으로 반도체 제품의 품질 및 생산수율이 저하되는 것을 방지하고 있다. 특히 암모니아, SO_x, NO_x 가스성분은 외기에 많이 포함되어 있어 외기로부터 침입하는 것을 방지하기 위하여 도입 외기를 물로 세정하여 청정화시키는 에어와셔(air washer)를 실용화하여 외기공조시스템에 편입하는 연구들이 보고되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 에어와셔는 수분무가습(water spray humidification) 방식을 채용하고 있다. 수분무가습은 분무된 물이 공기로부터 증발 잠열을 흡수하여 기화하는 방식이기 때문에 물을 100~120 °C 의 증기로 만들기 위한 가열에너지가 필요한 증기가습에 비해 가습에 필요한 에너지는 감소할 것으로 판단된다. 또한, 반도체 제조공장은 대규모 클린룸을 보유한 경우가 많고 이러한 클린룸에서 도입하는 외기량이 막대하기 때문에 클린룸 공조와 관계되는 외기 부하가 매우 높다.^(4,5) 따라서 에너지절감을 통한 온실가스 감축을 위해 외기부하와 관계되는 공조 에너지의 사용효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 반도체 클린룸용 외기공조시스템의 소비전력량을 분석하여 에너지절약적인 외기공조시스템을 채용하는 것은 상당히 유효한 대책이라고 판단된다.

그동안 반도체 클린룸 제조공장에서 클린룸 배기의 폐열을 회수하는 에너지절약형 외기공조시스템에 관한 연구는 Fujisawa 등,^(6,7) Yamamoto 등,⁽⁸⁾ Yeo and Yoo,⁽⁹⁾ Song 등^(10,11)에 의해 수행되었다. 이러한 연구들은 최근 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 일부 채택되고 있는 에어와셔(air washer)를 직간접적으로 이용하여 클린룸 배기로부터 폐열을 회수하는 기술을 보고하고 있다. 그러나 에너지 절약적 관점에서 반도체 클린룸용 외기공조시스템의 가장 기본이 되는 가습 방식인 증기가습 및 수분무가습에 대한 외기공조시스템들의 에너지 소비량에 대한 연구가 전무한 실정에 있다.

본 연구에서는 우리나라 기흥지역의 외기조건을

대상으로 외기량 1,000 m³/h 의 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 대해 전극봉식 가습기에 의한 증기가습 방식과 에어와셔에 의한 수분무가습 방식을 채용한 경우에 대한 공조프로세스 및 소비전력량의 비교 연구를 실험적으로 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1 과 Fig. 2 는 각각 본 연구에서 고려하는 반도체 클린룸용 증기가습 외기공조시스템과 Song 등⁽¹⁰⁾이 제안한 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템의 개략도를 나타내고 있다. 본 연구의 증기가습 외기공조시스템은 Fig. 1 에 도시된 바와 같이 에어필터(Air filter), 예열히터(Pre-heater), 냉각코일(Cooling coil), 재열코일(Reheating coil), 증기가습기(Steam humidifier), 송풍기, 온습도 조절용 건구온도 및 노점온도 센서로 구성된다. 수분무가습 외기공조시스템은 Fig. 2 에 도시된 바와 같이 전술한 Fig. 1 의 증기가습 외기공조시스템에서 예열히터와 냉각코일 사이에 추가로 에어와셔(Air washer) 및 엘리미네이터(Eliminator)가 편성되고 증기가습의 일부를 수분무가습으로 대체한 것이다.

먼저 수분무가습 외기공조시스템의 에너지소비량을 평가하기 위한 본 연구의 실험장치는 Fig. 3 과 같이 청정덕트, 고성능 에어필터(HEPA filter), 항온항습기(Constant temperature and humidity chamber), 예열히터, 에어와셔, 엘리미네이터, 냉각코일, 재열코일, 증기가습기, 송풍기, 온습도센서

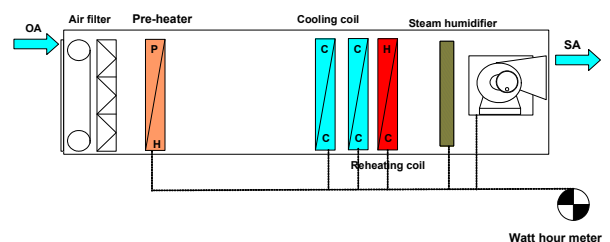


Fig. 1 Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with steam humidification

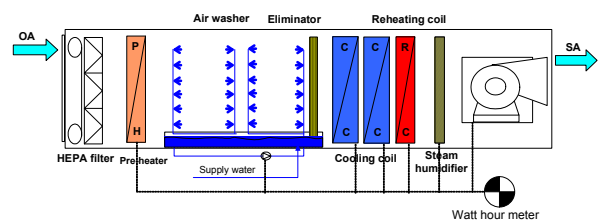


Fig. 2 Schematic diagram of an outdoor air conditioning system with water spray humidification

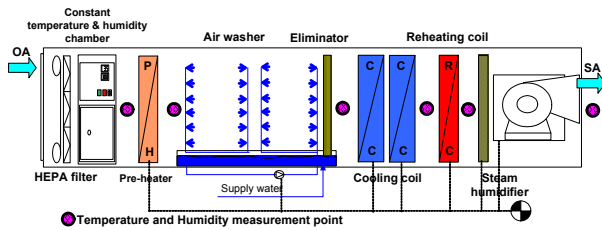


Fig. 3 Schematic diagram of the present experimental apparatus for the water spray humidification type outdoor air conditioning system

및 계측기, 전력량계(Watt hour meter)로 구성되었다. 증기가습 외기공조시스템의 실험장치는 전술한 Fig. 3 에서 에어와셔 및 엘리미네이터가 없는 경우이다. 본 연구의 외기공조시스템의 에너지소비량 측정에 있어 에너지소비량을 전력량으로 통합하기 위하여 모든 가열코일을 전기히터로, 증기가습기를 보일러 대신에 전극봉식 증기가습기로 대체하였다. 향온향습기는 외기의 4 계절 조건을 생성하기 위하여 예열코일의 전단부에 설치하였다.

수분무가습을 위한 에어와셔는 일반적으로 공기를 가습하면서 동시에 가스상 오염물을 제거하는 장치이다. 이때 공기는 열의 출입이 없으면 단열가습의 등엔탈피 과정을 겪게 된다. 본 연구의 에어와셔의 경우 단면적 $0.33 \text{ m} \times 0.33 \text{ m}$ 의 청정덕트에 분사노즐이 각각 3 개씩 장착된 원관 4 개가 일렬로 배치되어 1 개의 बैं크(bank)를 이루고 총 4 개의 बैं크, 총 48 개의 노즐로 구성되었다. 분사노즐의 분사방향은 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 공기 유동방향에 대해 बैं크별로 상류로부터 동류, 향류, 동류, 향류를 이루고 2 개의 बैं크는 서로 마주보며 분사하고 1 개의 에어와셔 모듈을 구성한다. 청정덕트 평균 풍속을 2.5 m/s 로 유지시키기 위해 송풍기는 인버터가 장착된 터보팬을 사용하였다. 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템들의 소비전력량을 측정하기 위해 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 LS 산전 3 상 유도형 전력량계를 Fig. 1 과 Fig. 2 의 전기를 사용하는 모든 부분에 연결하였다. 청정덕트내의 공기의 온습도 측정은 독일 AHLBORN 사의 ALMEMO-MA5990-2 데이터로거를 사용하였고 ALMEMO 센서와 전력량계의 상세는 Table 1 에 수록하였다.

2.2 실험방법

본 연구의 외기공조시스템에 대한 실험조건을 Table 2 에 수록하였다. 표에서 동기(겨울철) 및 하기(여름철)의 외기조건은 우리나라 기흥지역의 지난 30 년간의 기상조건 중에서 제일 극한의 엔

Table 1 Specifications of watt hour meter and temperature/relative humidity measuring apparatus

| | |
|-------------------------------------|--|
| Watt hour meter | Range 0~99.99 kW: $\pm 2\%$ |
| Temperature measuring circuit | Sensor: NTC type N |
| | Accuracy : $-20 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C} : \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ $0 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C} : \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ $70 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C} : \pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | Reproducibility : $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Relative humidity Measuring circuit | Sensor: FHA646-E1C |
| | Accuracy : $\pm 2\%$ RH at normal temperature |
| | Reproducibility : $<1\%$ RH at normal temperature |
| | Range: 3 ~ 100% RH |

Table 2 Experimental conditions

| | |
|--|---|
| Air flow | $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| Outdoor air condition | Winter : $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 10.1 \%RH ($-18 \text{ }^\circ\text{C}$, 70.4 \%RH) Summer : $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 | 0.4 |
| Supply air condition | $12 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 \%RH |

탈피를 가지는 경우를 선정하였다. 다만, 동시 실험의 경우 Fig. 3 의 향온향습기는 실험의 편의를 위하여 외기조건 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, 70.4 \%RH 을 생성하지 않고 그 절대습도 $0.0005404 \text{ kg/kgDA}$ 를 유지한 채 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 10.1 \%RH 의 출구 조건으로 하였다. 이는 일반적으로 혹한기에 외기공조시스템 최상류 예열히터의 동과방지 출구온도인 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 기점으로 하기 위함이며 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템들의 공조프로세서가 서로 동일한 부분이기 때문에 에너지절감량의 산출에 아무런 문제가 발생하지 않는다. 본 연구의 향온향습기는 가열을 위한 3

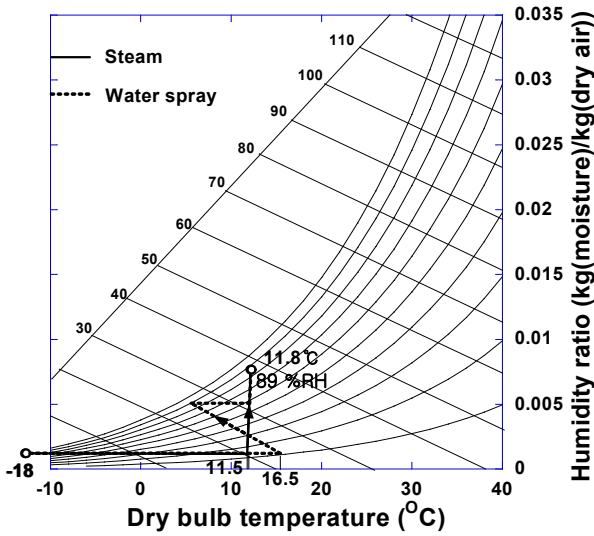


Fig. 4 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart for the winter operation

kW 용량의 전기히터, 냉각을 위한 3.2 RT의 냉동기 2대, 가습을 위한 용량 10 kg/h의 전기가열식 증기가습기로 구성되었고 향온향습기의 제어방식은 on-off 제어를 사용하였다.

외기공조시스템의 출구 온습도조건인 급기(SA) 조건은 12°C, 90%RH로 하였다. 본 연구의 외기공조시스템들의 공기선도상의 공조프로세스를 구하기 위하여 Fig. 3에 도시한 바와 같이 향온향습기 하류, 예열히터 하류, 에어와셔 하류, 냉각코일 하류, 재열코일 하류, 가습기 하류에서 공기의 온습도를 각각 측정하였다. 본 연구의 모든 실험 결과는 정상상태에 도달한 후에 1시간동안 측정된 데이터를 이용하여 산출하였다. 외기공조시스템의 에너지소비량은 Fig. 3에 도시된 전력량계로부터 실측된 소비전력량에 해당하고 에너지절감량은 2개의 외기공조시스템의 소비전력량 차이에 해당한다.

3. 결과 및 검토

3.1 공조프로세스 및 소비전력량

Fig. 4는 동기 조건에서 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템들의 공조프로세스에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 그림으로부터 2가지 외기공조시스템들은 모두 동기조건 -18°C, 70.4%RH의 외기를 유입하고 증기가습 외기공조시스템의 경우 예열코일에서 11.5°C, 6.5%RH까지, 수분무가습 외기공조시스템의 경우 16.5°C, 4.7%RH까지 각각 가열하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이 가열된 공기들은 이 공기상태들로부터 각각의 가습

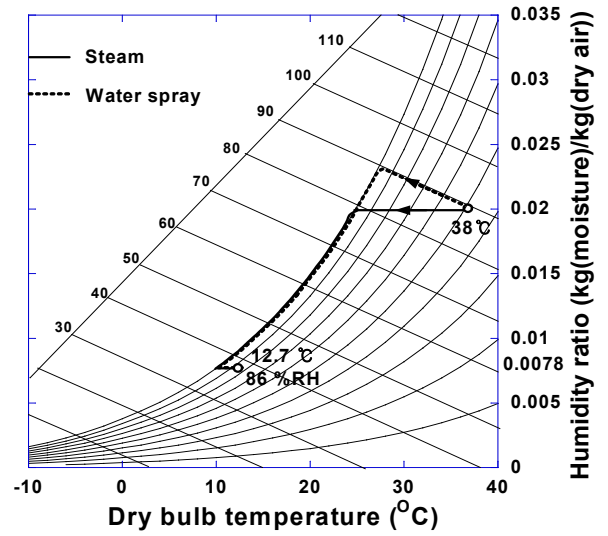


Fig. 5 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart for the summer operation

방식에 의한 공조프로세스를 따르면서 절대습도가 0.007658 kg/kgDA인 11.8°C, 89%RH의 급기(SA) 상태에 도달된 후 클린룸으로 공급되고 있음을 알 수 있다. 명심할 것은 본 연구의 수분무가습 외기공조시스템은 증기가습의 일부분을 수분무가습으로 대체하는 공조프로세스로 설계되었다. 여기서 클린룸 실내에서는 반도체 및 제조공정에 최적인 0.0078 kg/kgDA 근처의 절대습도를 가지는 23°C, 45%RH의 조건을 유지하는 것이 매우 중요하다. 전술한 바와 같이 동기 실험에서는 실험의 편의를 위하여 향온향습기 출구의 공기상태를 5°C, 10.1%RH로 동일하게 맞추었으므로 그림상의 5°C 이하의 공조프로세서 부분은 이해를 돕기 위하여 가상으로 그려져 있다.

증기가습과 수분무가습 외기공조시스템의 공조프로세서들은 각각의 경로상의 증첩 부분이 없기 때문에 외기 및 급기의 엔탈피 차이에 의한 가열가습에 필요한 열량, 즉 외기부하는 동일하지만 공조프로세스상의 경로 차이에 의한 에너지소비량, 즉 소비전력량이 다르게 될 것임을 짐작할 수 있다. 또한, 수분무가습 외기공조시스템은 비교적 일정한 포화효율을 나타내는 에어와셔의 수분무가습능력에 의해 증기가습의 상당한 부분을 대체할 수 있고 보일러 운전에 의한 증기제조 비용을 크게 줄일 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5는 하기 조건에서 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템들의 공조프로세스에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 그림으로부터 증기가습 외기공조시스템의 경우 향온향습기에서 생성한 38

Table 3 Summary of energy consumption

| Season, outdoor air condition | Category | Item | Steam type (kW) | Water spray type (kW) |
|--|------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Winter, -18 °C, 70.4 %RH (actually 5 °C, 10.1 %RH) | Total | Power consumption | 23.67 | 18.28 |
| | | Reduced power | 0 | 5.39 |
| | Break-down | Pre-heating | 2.71 | 4.8 |
| | | Steam humidifier | 20.7 | 9.6 |
| | | Reheating | 0 | 1.9 |
| | | Fan | 0.26 | 0.51 |
| Air washer pump | 0 | 1.47 | | |
| Summer, 38 °C, 50 %RH | Total | Power consumption | 10.8 | 12.68 |
| | | Reduced power | 0 | -1.88 |
| | Break-down | Cooling coil | 9.97 | 10.13 |
| | | Reheating coil | 0.57 | 0.57 |
| | | Fan | 0.26 | 0.51 |
| | | Air washer pump | 0 | 1.47 |

°C, 50 %RH의 외기는 먼저 냉각코일에 의해 반도체 클린룸의 최적 절대습도 0.0078 kg/kgDA의 노점(dew point) 온도 근처인 9.9 °C, 98 %RH까지 냉각제습되고 재열코일에서 12.7 °C, 86 %RH의 급기 상태까지 가열된 후 클린룸으로 공급되고 있음을 알 수 있다. 한편 수분무가습 외기공조시스템의 경우 38 °C, 50 %RH의 외기는 먼저 에어와셔에 의한 단열가습 공조프로세스를 겪게 되고 이후 냉각제습되어 재열된 후 급기 상태에 이르게 됨을 알 수 있다. 본 하기 실험에서는 항온항습기가 외기 조건 38 °C, 50 %RH를 생성하기 때문에 에너지소비량의 산출에 있어 전력량계에서 측정된 전력량이 외기공조시스템 공조프로세스 전체의 전력소비량을 산출하게 된다. 역시 증기가습과 수분무가습 외기공조시스템의 공조프로세스들은 각각의 경로상의 중첩 부분이 없기 때문에 외기 및 급기의 엔탈피 차이에 의한 외기부하는 동일하지만 공조프로세스의 경로 차이에 의한 소비전력량이 다르게 될 것임을 알 수 있다.

Table 3은 Fig. 4와 Fig. 5의 공조프로세스에 대해 전극봉식 증기가습 및 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템들의 총소비전력량과 부분별 소비전력량을 측정한 실험결과를 나타내고 있다. 표로부터 하기의 경우 수분무가습 외기공조시스템의 총소비전력량이 증기가습의 경우에 비해 1.88 kW만큼 증가하였음을 알 수 있다. 이는 부분별 소비전력량으로부터 수분무가습 외기공조시스템이 증기가습의 경우에 비해 추가로 투입된 에어와셔에 의한 차압 증가로 인한 송풍기동력 증가 및 에어와셔 펌프동력의 추가에 기인한 것임을 알 수 있다. 그러나 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 에어와셔에 의한 수분무의 외기중의 가스상 오염물의 제거기능에 의한 케미컬필터의 경감이 동반되므로 이에 따른 경제적 이득과 차압 감소가 이 소비전력 증가분과 거의 상쇄될 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 동기의 경우 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템의 총소비전력량이 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 5.39 kW만큼 감소되었음을 알 수 있다. 이는 부분별 소비전력량으로부터 수분무가습 외기공조시스템이 증기가습의 경우에 비해 증기가습의 상당 부분을 에어와셔에 의한 수분무가습으로 대체함으로써 발생한 소비전력량의 감소분이 송풍기동력 증가분, 에어와셔 펌프동력 추가분, 가열에너지 추가분을 압도하였기 때문이다. 연간으로 볼 때, 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템은 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 동기의 소비전력량 감소치가 하기의 소비전력량 증가치를 압도하므로 전체적으로 에너지가 절감될 것임을 짐작할 수 있다.

3.2 단위부하당 소비전력

전술한 공조프로세스 및 소비전력량의 실험결과를 바탕으로 본 연구의 반도체 클린룸용 외기공조시스템들의 에너지소비량의 원단위인 단위부하당 소비전력을 산출할 수 있다. 먼저 증기가습의 단위부하당 소비전력을 구하기 위하여 Fig. 4의 증기가습 외기공조시스템에 대한 공조프로세스를 살펴보면 예열후 11.5 °C, 6.5 %RH에서 11.8 °C, 89 %RH까지 증기가습을 실시하고 있으므로 증기가습에 요구되는 열량은 $(1.2 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ m}^3/\text{h}) \times (31.19 - 12.94 \text{ kJ/kg}) = 2.19 \times 10^4 \text{ kJ/h} = 6.08 \text{ kW}$ 가 된다. 이것으로 Table 3의 증기가습에 소모된 전력 20.7 kW를 나누면 증기가습 단위부하당의 소비전력은 3.40 kW/kW가 얻어진다. 즉 본 연구의 1,000 m³/h의 반도체 클린룸용 외기공조시스템에 사용된 전

Table 4 Summary of electric power consumption per unit load for the present outdoor air conditioning system

| Heating [kW/kW] | Cooling [kW/kW] | Steam humidifying [kW/kW] |
|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 1.24 | 0.47 | 3.40 |

극봉식 증기가습기의 실질적인 가습부하당 소비전력에 해당한다. 다음으로 가열부하당 소비전력을 구하기 위하여 Fig. 4의 증기가습 외기공조시스템에 대한 공조프로세스에서 예열 과정에 해당하는 부분을 고려한다. 5 °C, 10.1 %RH 에서 11.5 °C, 6.5 %RH 까지의 가열에 요구되는 열량은 $(1.2 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ m}^3/\text{h}) \times (12.94 - 6.391 \text{ kJ/kg}) = 7.86 \times 10^3 \text{ kJ/h} = 2.18 \text{ kW}$ 가 된다. 이것으로 Table 2의 해당 소비전력 2.71 kW 를 나누면 가열부하당의 소비전력은 1.24 kW/kW 가 얻어지게 된다. 이는 본 연구에 사용된 전기히터의 실질적인 가열부하당 소비전력에 해당한다. 마찬가지로 냉각부하당 소비전력을 구하기 위하여 Fig. 5의 증기가습 외기공조시스템에 대한 공조프로세스에서 냉각제습 과정에 해당하는 부분인 38 °C, 50 %RH 에서 9.9 °C, 98 %RH 까지의 냉각제습에 요구되는 열량은 $(1.2 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ m}^3/\text{h}) \times (92.35 - 28.67 \text{ kJ/kg}) = 7.64 \times 10^4 \text{ kJ/h} = 21.2 \text{ kW}$ 가 된다. 이것으로 Table 3의 해당 소비전력 9.97 kW 를 나누면 냉각부하당의 소비전력은 0.47 kW/kW 가 얻어지게 된다. 이는 본 연구에 사용된 냉동기의 실질적인 냉각부하당 소비전력에 해당한다.

본 연구의 외기공조시스템들에 대한 상기의 단위부하당 소비전력들을 Table 4에 정리하였다. 냉각의 경우는 예상대로 냉동기의 COP가 1보다 크기 때문에 냉각부하당 소비전력이 1보다 작은 0.47 kW/kW 가 얻어짐을 알 수 있다. 이는 기존 문헌^(12,13)에 소개된 반도체 클린룸용 터보냉동기 자체의 냉각부하당 소비전력 0.222~0.257 kW/kW 에 비해 약 2 배로 에너지를 소비하고 있음을 알 수 있다.

한편, 비교를 위하여 동일한 가습조건에 대해 본 연구의 전극봉식 증기가습기에 의한 증기가습과 에어와셔에 의한 수분무가습의 소비전력을 구하였다. 에어와셔의 수분무가습에 의한 소비전력을 구하기 위하여 Fig. 4의 수분무가습 외기공조시스템에 대한 공조프로세스를 살펴보면 증기가습의 경우에 비해 11.5 °C, 6.5 %RH 에서 16.5 °C, 4.7 %RH 까지의 추가 예열, 수분무가습, 재열, 11.8

°C, 89 %RH 까지의 증기가습이라는 공조프로세스를 실시하고 있으나 이 공조프로세스 전체에 요구되는 열량은 전술한 전극봉식 증기가습만으로 요구되는 열량인 6.08 kW 와 동일하다. 이것으로 Table 3의 수분무가습에 소모된 전력 $(4.8 - 2.71) + 1.47 + 1.9 + 9.6 = 15.06 \text{ kW}$ 를 나누면 단위부하당의 소비전력은 2.48 kW/kW 가 된다. 이는 Table 4의 전극봉식 증기가습기만의 증기가습부하당의 소비전력 3.40 kW/kW 보다 약 27%의 에너지가 절감된 것이다. 이로부터 전극봉식 증기가습을 부분적으로 에어와셔 수분무가습으로 대체하는 것은 에너지절약적인 대책임을 알 수 있다. 또 증기가습의 대체 부분인 11.5 °C, 6.5 %RH 에서 추가 예열, 수분무가습, 재열의 구간인 11 °C, 62 %RH 까지는 순수한 수분무가습을 실시하고 있으므로 순수 수분무가습에 요구되는 열량은 $(1.2 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ m}^3/\text{h}) \times (23.77 - 12.94 \text{ kJ/kg}) = 1.30 \times 10^4 \text{ kJ/h} = 3.61 \text{ kW}$ 가 된다. 이것으로 Table 3의 수분무가습으로 인하여 소모된 전력 $(4.8 - 2.71) + 1.47 + 1.9 + (0.51 - 0.26) = 5.71 \text{ kW}$ 를 나누면 단위부하당의 소비전력은 1.58 kW/kW 가 된다. 이로부터 Table 4의 전극봉식 증기가습의 경우가 에어와셔의 수분무가습의 경우보다 2 배 이상의 에너지를 소비함을 알 수 있고 에어와셔에 의한 수분무가습이 전극봉식 증기가습기에 의한 증기가습 부분을 대체하면 할수록 더 에너지절약적일 것임을 알 수 있다.

4. 결론

반도체 클린룸을 위한 전극봉식 증기가습 및 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템들에 대한 공조프로세스 및 소비전력량을 구하기 위하여 우리나라 기흥지역의 외기조건을 대상으로 1,000 m³/h의 외기량에 대한 비교실험을 수행하였다. 본 실험에서 얻어진 소비전력량 실험결과와 이를 통해 산출한 단위부하당 소비전력을 비교분석하여 다음과 같은 사항들을 관찰할 수 있었다.

(1) 증기가습 및 수분무가습 외기공조시스템의 공조프로세스들은 외기 및 급기의 엔탈피 차이에 의한 열적인 외기부하는 서로 동일하지만 서로 다른 가습장치에 의한 공조프로세스의 경로 차이에 따른 소비전력량은 서로 다르다는 것을 확인하였다.

(2) 에어와셔 수분무가습 외기공조시스템은 하기의 경우 소비전력량이 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 증가하였다. 이는 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 추가로 투입된 에어와셔에 의한 차압

증가 및 에어와서 펌프동력에 기인한 것이었다.

(3) 에어와서 수분무가습 외기공조시스템은 동기의 경우 총소비전력량이 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 감소되었다. 이는 에어와서 수분무가습이 전극봉식 증기가습의 상당 부분을 대체함으로써 소비전력량이 크게 감소하였기 때문이었다.

(4) 연간으로 볼 때, 에어와서 수분무가습 외기공조시스템은 전극봉식 증기가습의 경우에 비해 동기의 소비전력량 감소가 하기의 소비전력량 증가를 압도하므로 전체적으로 에너지가 절감될 것으로 판단된다.

(5) 가습부하당의 소비전력은 전극봉식 증기가습만의 경우가 에어와서 수분무가습만의 경우보다 약 2 배 이상이었고 이로부터 에어와서 수분무가습이 전극봉식 증기가습의 경우보다 더 에너지절약적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 경기도가 주관하고 경기과학기술진흥원이 지원한 경기도기술개발사업 전략산업과제 “첨단전자산업을 위한 에너지절약형 초정정클린룸 개발” 과 중소기업청이 주관하고 중소기업기술정보진흥원이 지원한 제조현장녹색화기술개발사업 “클린룸 제조환경을 위한 에너지절약형 외기공조 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 대해 관계자들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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*, pp. 1~4, Japan Air Cleaning Association (in Japanese).
- (2) 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*, pp. 1~4 (in Japanese).
- (3) 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*, Vol. 5, No. 2, pp. 151~157.
- (4) Yoo, K.H., 2007, "Reduction of Air Conditioning Energy in Semiconductor/ Display Manufacturing Clean Rooms," *Air Cleaning Technology*, Korea Air Cleaning Association, Vol. 20, No. 4, pp. 1~18.
- (5) 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 Rooms in Subtropical Areas," *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 1387~1393.
- (6) 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).
- (7) 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).
- (8) 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).
- (9) 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*, Vol. 3, No. 2, pp. 131~140.
- (10) 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*, Vol. 21, No. 5, pp. 273~281.
- (11) 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*, Vol. 22, No. 10, pp. 697~703.
- (12) JACA, 2007, "The Energy Conversion Factors for a Semiconductor Factory," *Journal of Japan Air Cleaning Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 16~28, Japan Air Cleaning Association, Energy saving technical committee (in Japanese).
- (13) 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*, Vol. 40, pp. 1765~1770.