

## 반도체 클린룸용 배기 열회수식 에어와셔 시스템의 에너지절감에 관한 수치해석

송근수, 김형태, 유경훈<sup>†</sup>, 손승우\*, 신대건\*\*, 김영일\*\*\*  
한국생산기술연구원 나노오염제어연구실, \*(주)성림피에스, \*\*(주)대한피엔씨, \*\*\*서울산업대학교 건축학부

### Numerical Analysis on Energy Reduction of an Exhaust-Air-Heat-Recovery Type Air Washer System for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms

Gen-Soo Song, Hyung-Tae Kim, Kyung-Hoon Yoo<sup>†</sup>,  
Seung-Woo Son\*, Dae-Kun Shin\*, Young-Il Kim\*

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

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

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

*\*\*\*School of Architecture, Seoul National University of Technology*

*(Received May 12, 2010; revision received August 17, 2010)*

**ABSTRACT:** In recent semiconductor manufacturing clean rooms, air washers are used to remove airborne gaseous contaminants from the outdoor air introduced into a clean room. Meanwhile, there is a large amount of exhaust air from a clean room. From an energy conservation point of view, heat recovery is useful for reducing the outdoor air conditioning load required to maintain a clean room. Therefore it is desirable to recover heat from the exhaust air and use it to cool or heat the outdoor air. In the present study, numerical analysis was conducted to evaluate the recovered heat of an exhaust air heat recovery type air washer system, which is the key part of an energy saving outdoor air conditioning system for semiconductor clean rooms. The present numerical results showed relatively good agreement with the available experimental data.

**Key words:** Clean Room(클린룸), Air Washer(에어와셔), Heat Recovery(열회수), Numerical Analysis(수치해석)

#### 기 호 설 명

$C_{pw}$  : 물의 정압비열 [kJ/kg · °C]  
EA : Exhaust Air  
 $h$  : 비엔탈피 [kJ/kg]

OA : Outdoor Air  
 $Q_a, Q_b, Q_c$  : 각 단계별 열전달량 [kW]  
 $Q_{saved}$  : 열회수량 [kW]  
RA : Return Air  
RH : 상대습도 [%]  
SA : Supply Air  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $T_s$  : 포화온도 [°C]  
 $\dot{V}$  : 체적유량 [m<sup>3</sup>/s]

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

그리스 문자

- $\eta$  : 포화효율
- $\eta_{tr}$  : 전열회수효율
- $w$  : 절대습도 [kg/kgDA]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\epsilon_{hx}$  : 중간열교환기의 유효성

하첨자

- $a$  : 공기
- $aw$  : 에어와셔
- $w$  : 물
- $ws$  : 세정집진기

1. 서 론

반도체, 디스플레이 등의 첨단 전자디바이스 산업에서는 대규모 클린룸을 보유한 제조공장이 많고 이러한 클린룸은 대량의 에너지를 소비하기 때문에 클린룸 시스템의 에너지소비에 대한 사용효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다.<sup>(1)</sup> 그 중에서도 클린룸의 배기량에 대응되는 도입 외기량이 막대하기 때문에 클린룸 공조와 관계되는 외기 부하가 매우 높다. 일반적인 반도체 제조공장의 경우, 외기부하는 냉열원의 약 30%이고 전체 공조부하의 약 45%에 이르며 반도체 집적기술의 고도화에 동반해서 그 절대량은 증가하는 추세에 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 에너지절감을 통한 제조비용 절감 및 온실가스 감축을 위해 외기부하와 관계되는 외기공조 시스템의 에너지소비량을 절감하기 위한 노력들이 보고되고 있다.<sup>(3,4)</sup>

한편, 최근의 반도체 공장의 클린룸 시스템에서는 공기 중의 가스상 오염물에 의한 영향으로 반도체 제품의 품질 및 생산수율이 저하되는 것을 방지하기 위하여 외기공조 계통에 종래의 가습수단으로 사용하던 에어와셔를 외기 중의 가스상 오염물을 제거하는 장치로 고안하고 이 에어와셔의 가스상 오염물 제거 성능에 대한 연구결과들을 보고하였다.<sup>(5-7)</sup> 또한, 에너지절약의 관점에서부터 반도체 클린룸에서 배출되는 배기의 폐열을 회수할 수 있는 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 소비에너지 절감에 대한 실험적 연구결과들도 보고되었다.<sup>(8-10)</sup> 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개발은 외기부하의

절감을 목적으로 하기 때문에 핵심부인 열회수식 에어와셔의 연간 열회수량의 산출이 필수적으로 요구된다. 또한 시스템 설계조건 및 클린룸 입지조건이 다른 경우에 대해서도 동일한 열회수량 산출방법의 확립이 필요하다. 그러나 반도체 클린룸의 실제운전을 통한 연간 열회수량 및 에너지 절감량의 실측은 엄청난 비용과 시간이 요구되므로 수치해석을 통한 열회수식 에어와셔 시스템의 연간 열회수량 산출방법의 개발은 경제적인 관점에서 상당한 가치가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 반도체 클린룸용 배기 열회수식 에어와셔 시스템의 열회수량을 산출할 수 있는 수치해석방법을 개발하고 본 수치해석방법에 의한 동기(겨울철) 및 하기(여름철)의 계산결과를 기존의 실험결과와 비교하여 수치해석방법의 타당성을 검토하였다. 또한, 우리나라 기흥지역의 외기조건을 대상으로 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 시스템에 대해 연간 4 계절 운전에 의한 총열회수량 및 에너지 절감량을 산출하였다. 참고로 본문중의 변수의 표기에 있어 편의를 위하여 공기유량은 m<sup>3</sup>/h, 물유량은 L/min으로 표시하였으나 수식의 계산에 있어 모든 물리량 및 상수, 물성치는 SI시스템의 MKS 단위계로 통일되어 계산되었다.

2. 수치해석방법

Fig. 1은 반도체 제조를 위한 FFU 방식 클린룸

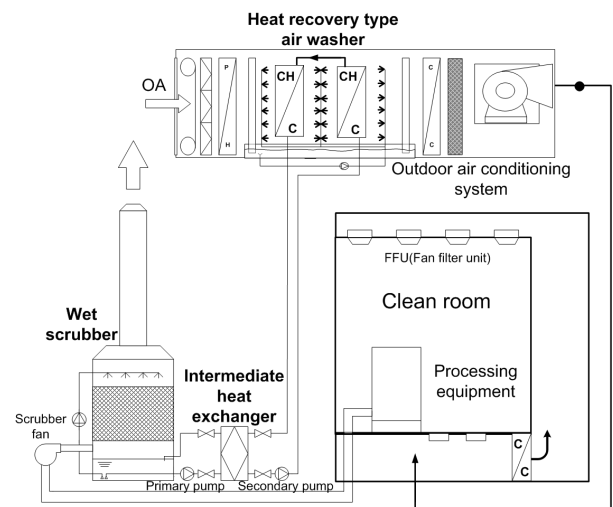


Fig. 1 Schematic diagram of an exhaust air heat recovery type air washer system for semiconductor manufacturing clean rooms.

용 배기 열회수식 에어와셔 외기공조 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 클린룸 내부에 반도체 제조장치가 있으며, 제조장치에서 발생하는 고농도 케미컬 배기가스는 배기 계통의 세정집진기로 투입된다. 이 배기는 이곳에서 세정수에 의해 정화된 뒤 대기로 배출되고 동시에 이 배기로부터 세정수로 회수된 열은 중간열교환기에서 이 세정수와 외기공조시스템의 에어와셔에 설치된 냉각/가열 겸용코일(CH C) 순환수와와의 간접 열교환에 의해 외기로 회수된다.<sup>(8-10)</sup>

본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 배기 열회수식 에어와셔 외기공조 시스템의 열회수식 2단 에어와셔 시스템을 Fig. 2와 같이 모델화하였다. 본 모델화에는 3단계 열교환 과정이 존재한다. 제 1단계는 세정집진기에서 배기(RA)의 폐열이 세정수(1차측 순환수)로 회수되는 단계, 제 2단계는 세정수로 회수된 열을 중간열교환기에서 간접 열교환을 통해 에어와셔 순환수(2차측 순환수)로 전달하는 단계, 제 3단계는 순환수로 전달된 열을 에어와셔의 냉각/가열 겸용코일(CH C)을 통하여 도입 외기의 예열 또는 예냉에 사용하는 단계이다. 이러한 3단계 열교환 과정이 동시에 발생하며 서로 열평형 상태에 있다고 가정하고 다음의 열전달 지배방정식들을 연립하여 계산하였다.

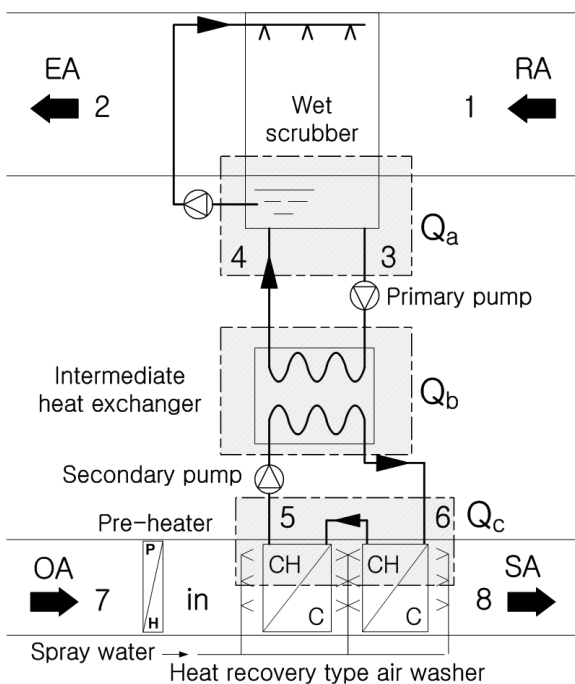


Fig. 2 Schematic diagram of the present numerical model for a heat recovery type 2-stage air washer system.

시스템의 열평형 지배방정식

$$Q_a = Q_b = Q_c \quad (1)$$

세정집진기에서의 지배방정식

$$\eta_{ws} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{s,ws}} = \frac{w_1 - w_2}{w_1 - w_{s,ws}} \quad (2)$$

$$T_{s,ws} = T_3, \eta_{ws} = 1 \quad (3)$$

$$Q_a = \rho_a \dot{V}_{12}(h_1 - h_2) \quad (4)$$

$$Q_a = \rho_w \dot{V}_{34} C_{pw}(T_3 - T_4) \quad (5)$$

중간열교환기에서의 지배방정식

$$Q_b = \rho_w \dot{V}_{34} C_{pw}(T_3 - T_4) \quad (6)$$

$$Q_b = \epsilon_{hx} \rho_w \dot{V}_{34} C_{pw}(T_3 - T_5), \epsilon_{hx} = 0.85 \quad (7)$$

$$Q_b = \rho_w \dot{V}_{56} C_{pw}(T_6 - T_5) \quad (8)$$

에어와셔에서의 지배방정식

$$\eta_{aw} = \frac{T_{in} - T_8}{T_{in} - T_{s,aw}} = \frac{w_{in} - w_8}{w_{in} - w_{s,aw}} \quad (9)$$

$$T_{in} \geq 5^\circ\text{C}, w_{in} = w_7 \quad (10)$$

$$T_{s,aw} = T_5, \eta_{aw} = 0.8963 \quad (11)$$

$$Q_c = \rho_w \dot{V}_{56} C_{pw}(T_6 - T_5) \quad (12)$$

$$Q_c = \rho_a \dot{V}_{78}(h_8 - h_{in}) \quad (13)$$

여기서  $Q_a, Q_b, Q_c$ 는 각 단계별 열전달량(kW),  $\eta$ 와  $T_s$ 는 세정집진기와 에어와셔에서의 포화효율(saturation efficiency)과 포화온도( $^\circ\text{C}$ ),  $w$ 는 절대습도(kg/kgDA),  $\dot{V}$ 은 공기 또는 물의 체적유량( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\rho$ 는 밀도( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $h$ 는 비엔탈피(kJ/kg),  $C_{pw}$ 는 물의 정압비열(kJ/kg $^\circ\text{C}$ ),  $\epsilon_{hx}$ 는 중간열교환기에서의 유효성(effectiveness)이다. 하첨자의 숫자 및  $in$ 은 Fig 2에서의 각 위치를 나타내고 하첨자  $a, w, ws, aw$ 는 각각 공기, 물, 세정집진기, 에어와셔를 나타낸다.

본 연구의 기흥지역에 대한 수치해석에 사용된 조건 및 상수들은 Table 1에 수록하였다. 중간열교환기에서의 유효성은 판형 열교환기의 열교환 효율을 고려하여 0.85로 가정하였고 2단 에어와셔모델에 의한 유입공기의 포화효율은 Song et al.<sup>(10)</sup>의 수공기비  $L/G = 0.4$ 의 포화효율 실험결과로부터 0.8963으

Table 1 The present calculation conditions and constants

$\dot{V}_{12} = \dot{V}_{78}$ [m <sup>3</sup> /h]	1000
$\dot{V}_{34} = \dot{V}_{56}$ [L/min]	40
$\rho_a, \rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2, 1000
$C_{pw}$ [kJ/kg °C]	4.184
$\eta_{ws}, \eta_{aw}$	1, 0.8963
$\epsilon_{hx}$	0.85
$T_1, RH_1$	23 °C, 45% RH

로 지정하였다. 한편, 세정집진기에서의 공기의 포화효율은 본 연구의 수공기비 L/G가 4.0인 점과 충전재에 의한 기액 접촉면적의 대폭적인 확대를 고려하여 1로 가정하였다.

### 3. 계산결과 및 검토

#### 3.1 실험결과와의 비교

우선 본 연구의 수치해석방법의 타당성을 검토하기 위하여 기존의 문헌에 있는 실험 결과와의 비교를 시도하였다. 본 비교에 사용된 Yamamoto et al.<sup>(9)</sup>의 클린룸 실기실험 조건은 동기(Winter)의 경우 외기량  $\dot{V}_{78} = 7,960$  m<sup>3</sup>/h, 배기량  $\dot{V}_{12} = 21,000$  m<sup>3</sup>/h, 순환수량  $\dot{V}_{34} = \dot{V}_{56} = 200$  L/min,  $T_1 = 19.9$  °C,  $RH_1 = 34.4\%$ ,  $T_7 = 9.7$  °C,  $RH_7 = 74.3\%$ 이고 하기(Summer)의 경우  $\dot{V}_{78} = 11,804$  m<sup>3</sup>/h,  $\dot{V}_{12} = 17,280$  m<sup>3</sup>/h,  $\dot{V}_{34} = \dot{V}_{56} = 200$  L/min,  $T_1 = 25.1$  °C,  $RH_1 = 40.6\%$ ,  $T_7 = 26.9$  °C,  $RH_7 = 80.0\%$ 이다. 이 동기 및 하기에 대한 실험조건들을 각각 입력하여 식(1)에서 식(13)까지 연립하여 구한 열회수식 에어와서 시스템의 상류 및 하류에서의 공기상태 계산결과를 실험결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다. 본 실험조건에서 배기량이 외기량보다 큰 것은 여러 개의 세정집진기를 1개의 열회수식 에어와서 시스템과 연결한 것으로 판단된다. 그림으로부터 실험결과와 계산결과가

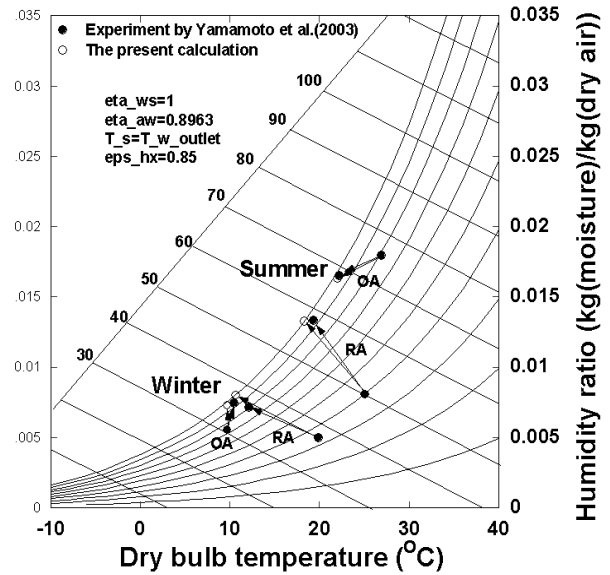


Fig. 3 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart through the air washer system.

약간의 차이는 있으나 대체로 일치하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

열회수량의 정확성을 검토하기 위하여 그림으로부터 에어와서 입출구의 비엔탈피 차이를 비교하였다. 동기의 경우 실험결과는 5.55 kJ/kg, 계산결과는 4.39 kJ/kg로 20.9%의 오차로 과소 예측하였고, 하기의 경우 -8.39 kJ/kg, -9.25 kJ/kg로 10.2%의 오차로 과대 예측하였음을 알 수 있다. 여기서 양의 값은 온열, 음의 값은 냉열을 의미한다. 한편, 이 실기실험 조건으로부터 Fig. 2의 각 위치에 대한 공기 및 물의 온도를 계산한 결과를 Table 2에 수록하였다. 본 계산 결과와 Fig. 3으로부터 동기의 경우 외기는 가열가습, 배기는 냉각가습되고 하기의 경우 외기는 냉각제습, 배기는 냉각가습이 됨을 알 수 있다. 특이한 것은 하기의 경우 외기의 냉각과 배기의 냉각이 동시에 일어난다는 것이다. 이는 배기의 열회수장치인 세정집진기가 배기를 세정하기 위해 세정수를 분사하면서 이 세정수와 습공기 사이에 현열과 잠열을 동시에 교환하는 전열교환기의 역할을 하기

Table 2 Calculated results of temperature for each position in Fig. 2 with Yamamoto et al.(9)'s field test

	$T_1$ (RA) (given)	$T_2$ (EA)	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$ (OA) (given)	$T_{in}$	$T_8$ (SA)
Summer (°C)	25.1	18.37	18.37	20.98	21.44	18.83	26.9	26.9	22.01
Winter (°C)	19.9	10.69	10.69	9.86	9.71	10.54	9.7	9.7	9.71

때문이다. 즉, 물이 증발하면서 증발잠열을 습공기로부터 흡수하므로 습공기의 건구온도는 감소되지만 습공기 전체의 엔탈피는 증가되기 때문이다.

### 3.2 열회수량, 전력절감량, 온실가스감축량의 산출

우리나라 기흥지역에 대한 열회수식 에어와서 시스템의 연간 열회수량을 산출하기 위한 수치해석을 Table 1의 계산조건에 대해 실시하였다. 외기(OA) 조건은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 우리나라에서 반도체 공장이 집중적으로 배치되어 있는 기흥 지역에 대한 2008년도의 1시간 마다의 8,784개의 온습도 기상데이터를 사용하였다. 배기(RA) 조건은 연간으로 23°C, 45% RH로 설정하였다. 열회수식 에어와서 시스템은 연간을 통해 상시 열회수 운전을 실시하지만 열회수량을 계산하는데 있어 외기와 배기(RA)의 엔탈피 차이가 작은 중간기의 경우 역열교환이 발생하는 무익한 경우가 발생하므로 이 경우에는 중간열교환기 순환수 라인상의 1차 펌프와 2차 펌프를 모두 정지하는 것으로 하였다.

계산된 에어와서 입출구에서의 온습도상태로부터 아래의 식을 사용하여 열회수량과 전열회수효율을 산출하였다.

$$Q_{saved} = \rho_a \dot{V}_{78} (h_8 - h_{in}) \quad (14)$$

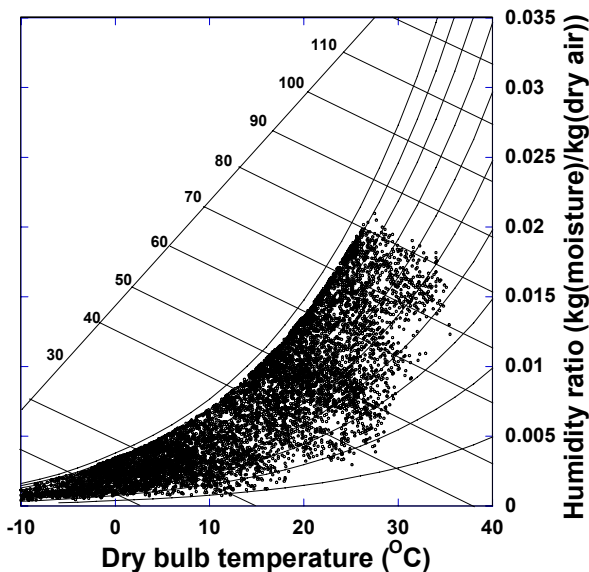


Fig. 4 Yearly temperature and humidity data for the year of 2008 in Giheung.

$$\eta_{tr} = \frac{\dot{m}_{78}(h_{in} - h_8)}{\dot{m}_{12}(h_7 - h_1)} \quad (15)$$

여기서  $Q_{saved}$ 는 열회수량(kW),  $\eta_{tr}$ 는 전열회수 효율,  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $\dot{V}_{78}$ 는 외기량,  $h_{in}$ ,  $h_8$ 는 각각 에어와서 입구 및 출구에서의 공기의 비엔탈피,  $h_7$ 은 외기의 비엔탈피,  $h_1$ 은 세정집진기 입구에서의 비엔탈피,  $\dot{m}_{78}$ ,  $\dot{m}_{12}$ 은 각각 외기 및 배기의 질량유량이다. 열회수량  $Q_{saved}$ 가 양이면 온열, 음이면 냉열을 의미한다.

Table 3은 우리나라 기흥지역에서 운전되는 외기 도입량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 배기 열회수식 에어와서 시스템의 경우에 대해 본 연구에서 계산한 열회수량, 전열회수효율, 정상적인 열회수 총시간을 나타내고 있다. 표로부터 연간 온열회수량은 62.07 GJ/년, 냉열회수량은 20.20 GJ/년, 평균 전열회수효율 38.41%가 얻어지고 연간 전체로 볼 때 냉열회수량보다는 온열회수량이 더 많다는 것을 알 수 있다. 이는 연평균 기온이 낮을수록, 즉 추운 지방일수록 온열회수량이 더 많을 것임을 짐작할 수 있다. 또한 표로부터 정상적인 열회수가 연간으로 총 6,928시간이

Table 3 Calculated results of recovered heat, total heat recovery efficiency and total normal heat recovery hour for Giheung(2008)

	$Q_{saved}$ [GJ]		$\eta_{tr}$ [%]	No. of normal mode
	Heating	Cooling		
Jan	12.08	0	34.57	744
Feb	11.43	0	34.49	696
Mar	9.182	0	39.56	744
Apr	5.433	0.007523	40.33	677
May	2.230	0.4115	39.96	450
Jun	0.03965	1.706	39.44	287
July	0	8.536	38.65	634
Aug	0	6.734	38.83	545
Sep	0.4883	2.640	39.32	390
Oct	2.099	0.1639	39.99	323
Nov	8.011	0	39.4	694
Dec	11.06	0	36.27	744
Total	62.07	20.20	38.41(avg)	6,928

발생하였고 이를 연간 총시간 8,784시간에서 차감하면 역열교환에 의해 총 1,856시간 동안 중간열교환기 순환수 1차, 2차 펌프를 정지하였음을 알 수 있다. 그리고 열회수량이 펌프 동력을 하회하는 비경제적인 경우가 중간기에 발생하는데 이 경우는 대부분 역열교환의 경우에 이미 포함되어 있고 추가의 시간이 미미하여 시스템의 제어의 간결성을 고려하여 정상적인 열회수 운전의 경우로 하였다. 정상적인 열교환의 경우는 시스템이 정상 가동되는 것이므로 연간 총 전력 절감량의 결과에서 2개의 펌프동력의 합인 0.5 kW의 연간 총 소비전력량을 공제하는 것으로 하였다.

연간 총열회수량을 전력량으로 환산하기 위하여 일본공기청정협회인 JACA<sup>(11)</sup>에서 제시한 전형적인 반도체 클린룸에 대한 에너지환산계수인 가열가습부하당의 소요전력 0.44 kW/kW, 냉각부하당의 소요전력 0.222 kW/kW를 도입하였다. 이 에너지환산계수로부터 Table 3의 온열회수량에 의한 전력절감량은  $62.07 \text{ GJ/년} \times 10^6 / 3600 \times 0.44 \text{ kW/kW} = 7,586 \text{ kWh/년}$ , 냉열회수량에 의한 전력절감량은  $20.20 \text{ GJ/년} \times 10^6 / 3600 \times 0.222 \text{ kW/kW} = 1,246 \text{ kWh/년}$ 으로 산출된다. 이 전력절감량의 합에서 6,928시간동안 0.5 kW의 중간열교환기 순환수 1차, 2차 펌프의 소비전력량을 빼게 되면 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 배기 열회수식 에어와서 시스템을 기흥지역에 설치하여 운전할 경우의 연간 총전력절감량은 5,368 kWh/년이 얻어진다.

한편, 한국전력에서 공고한 전력요금인 76.8원/kWh를 곱하면 연간 에너지절약금액은 412,262원/년이 됨을 알 수 있다. 또한, 연간 전력절감량에 우리나라의 발전용 연료의 구성에 따른 전력량당 탄소배출계수인 0.4836 kgCO<sub>2</sub>/kWh를 곱하면 연간 이산화탄소 감축량은 2,596 kgCO<sub>2</sub>/년이 되어 약 2.6톤의 온실가스 배출권을 확보할 수 있게 됨을 알 수 있다. 따라서 현재 기흥지역에서 가동되고 있는 반도체 클린룸제조공장들의 총외기량인 약 9,000,000 m<sup>3</sup>/h를 고려하면 연간으로 총전력절감량 48.3 GWh, 에너지절약금액 37.1억 원, 이산화탄소 감축량 23,400 tCO<sub>2</sub>에 달하여 경제적으로도 유효함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

반도체 클린룸에서 소비되는 외기부하를 절감하기 위한 배기 열회수식 에어와서 시스템의 열회수 성능에 대한 수치해석방법을 개발하고 이를 통한 계산결

과와 기존의 실험결과와의 비교를 실시하였다. 또한 우리나라 기흥지역의 외기량 1,000 m<sup>3</sup>/h의 배기 열회수식 에어와서 시스템에 대한 열회수량을 산출하고 이로부터 전력 절감량, 에너지절약금액, 이산화탄소 감축량을 평가하였다. 이러한 결과들로부터 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 본 연구에서 개발한 배기 열회수식 에어와서 시스템의 열회수성능에 대한 수치해석방법은 기존의 반도체 클린룸 실기실험 결과와 비교적 일치하는 계산결과를 보여주었다.

(2) 동기의 경우 외기는 가열가습, 배기는 냉각가습되고 하기의 경우 외기는 냉각제습, 배기는 냉각가습됨을 확인할 수 있었다. 특이한 것은 하기의 경우 외기와 배기가 동시에 냉각되는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 배기의 세정집진기에서 세정수와 공기 사이에 현열과 잠열을 동시에 교환하는 전열교환이 발생하여 물의 증발잠열에 의한 공기의 건구온도는 감소되지만 습공기 전체의 엔탈피가 증가되기 때문이었다.

(3) 본 연구의 수치해석을 통하여 배기 열회수식 에어와서 시스템이 우리나라 기흥지역에서 작동할 경우 회수하게 되는 냉온열량으로부터 산출되는 전력절감량 및 이산화탄소 감축량은 경제적으로 유효하다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 경기도가 주관하고 경기과학기술진흥원이 지원한 경기도기술개발사업 전라산업과제 “첨단전자산업을 위한 에너지절약형 초청정클린룸 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 대해 관계자들과 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 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.
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, Seiken Company, Osaka, Japan, Vol. 2 pp. 19-30 (in Japanese).
3. 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.
  4. Babur, N., 2008, Design concepts in air management systems, *Controlled Environments*, pp. 10-18.
  5. 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 (in Japanese).
  6. 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).
  7. 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.
  8. 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).
  9. 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).
  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. Japan Air Cleaning Association Energy saving technical committee, 2007, The energy conversion factors for a semiconductor factory, *Journal of Japan Air Cleaning Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 16-28 (in Japanese).