

# 반도체 클린룸용 배기 열회수식 외기공조시스템의 에너지소비 수치해석

송근수, 유경훈<sup>†</sup>, 김형태

한국생산기술연구원 에어로졸·오염제어 연구실

## Numerical Analysis on Energy Consumption of an Exhaust Air Heat Recovery Type Outdoor Air Conditioning System for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms

Gen-Soo Song, Kyung-Hoon Yoo<sup>†</sup>, Hyoung-Tae Kim

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

**ABSTRACT:** In recent semiconductor manufacturing clean rooms, in order to improve clean room air quality, air washers are used to remove airborne gaseous contaminants such as NH<sub>3</sub>, SOx and organic gases from the outdoor air introduced into 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 therefore useful for reducing the outdoor air conditioning load for a clean room. Therefore it is desirable to recover heat from the exhaust air and use it to reheat the outdoor air. In the present study, numerical analysis and experiment was conducted to simulate the amount of energy reduction of exhaust air heat recovery type air washer system. The present numerical results showed good agreement with the results of the experimental data.

**Key words:** Outdoor Air Conditioning System(외기공조시스템), Clean Room(클린룸), 열회수 소비(에너지 소비), Outdoor Air Conditioning Load(외기부하), Air Washer(에어와셔), Wet Scrubber(세정집진기), Heat Recovery(열회수)

### 기 호 설 명

$\dot{m}_a$  : 질량 유량  
 $\dot{m}_f$  : 응축을 위한 질량 유량  
 $\dot{m}_{uc}$  : 냉수의 질량 유량  
 $\dot{m}_{wh}$  : 온수의 질량 유량  
 $h_1, h_2$  : 상태 1, 2에서의 엔탈피  
 $\dot{Q}_c$  : 냉각코일의 총 냉각 용량  
 $w_1, w_2$  : 상태 1, 2에서의 비습  
 $\dot{Q}_{CCP}$  : 첫 번째 클링코일의 용량

$\dot{Q}_{CCS}$  : 두 번째 클링코일의 용량  
 $\dot{Q}_h$  : 리히팅 코일 용량  
 $\dot{W}_{fan}$  : 팬의 전력  
 $\Delta P_{fan}$  : 팬의 총 압력  
 $\eta_{eff.fan}$  : 팬의 효율  
 $\dot{V}_a$  : 체적 유량  
 $\Delta t_{wc}$  : 냉수의 온도차이  
 $\Delta t_{wh}$  : 온수의 온도차이  
 $\dot{W}_{pump}$  : 펌프 전력  
 $\Delta P_{pumpz}$  : 펌프 헤드 압력  
 $\eta_{eff.pump}$  : 펌프 효율  
 $\dot{W}_{ch}$  : 칠러 전력  
 $\dot{W}_{tr}$  : 보일러 전력

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

## 그리스 문자

$\eta_s$  : 에어와셔의 포화효율 [%]

$\rho_a$  : 공기의 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 1. 서론

우리나라는 2005년 2월16일에 교토의정서가 발효되면서 2013년에서 2017년까지의 2차 온실가스 의무감축 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 수출 주력품목인 반도체, 디스플레이 등의 첨단 전자 산업에서는 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 냉·열원의 약 27%이고 전체 공조부하의 약 45%에 이르며 반도체 집적기술의 고도화에 동반해서 그 절대량은 증가하는 추세에 있다. 따라서 에너지절감을 통한 온실가스 감축을 위해 외기부하와 관계되는 공조에너지의 사용 효율 증대 및 철저한 사용합리화가 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 클린룸의 배기로부터 폐열을 회수해서 도입 외기의 가열 및 냉각에 이용하는 것은 에너지절약적 측면에서 상당히 유효한 기술이라고 판단된다.

그동안 반도체 제조공장에서 클린룸 배기의 폐열을 회수하는 연구는 Fujisawa et al.<sup>(2,3)</sup>의 연구를 시작으로 Shiroma et al.<sup>(4)</sup>, Yamamoto et al.<sup>(5)</sup>, Yeo and Yoo<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었다. 그러나 전술한 연구들은 최근 반도체 클린룸용 외기공조 시스템에 일부 채택되고 있는 에어와셔(air washer)를 직간접적으로 이용하여 클린룸 배기로부터 열을 회수하는 기술을 보고하고 있다. 또한 열회수식 에어와셔를 반도체 클린룸용 외기공조 시스템에 적용할 경우 급기(supply air) 조건, 코일과의 조합 등과 같은 공조프로세스상의 제약조건을 고려한 시스템 측면에서의 적용가능에 대한 연구는 Song et al.<sup>(7)</sup>가 수행하였다. 그러나 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 열회수 성능에

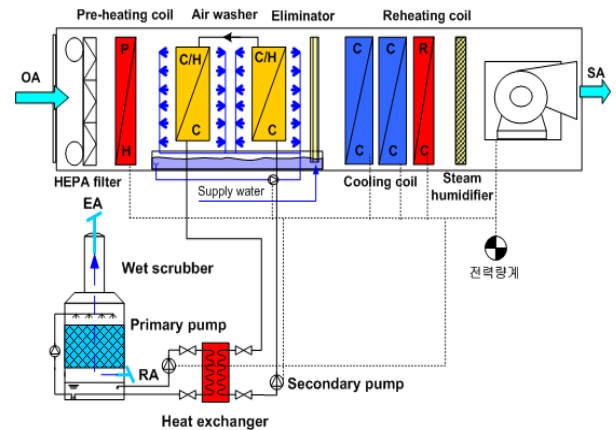


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

대한 실험적인 연구가 아닌 외기공조시스템의 에너지 소비를 수치적으로 해석하여 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 실용성 및 타당성을 검토한 연구는 전무한 실정에 있다.

본 연구에서는 반도체 클린룸의 필수 배기처리 장치인 세정집진기(wet scrubber)를 이용하여 클린룸 배기의 폐열을 회수한 뒤 회수한 열을 도입 외기의 가열 및 냉각에 이용할 수 있는 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 에너지 소비 성능을 평가하는 외기량  $5,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 실기 실험을 당진지역에 설치된 10평형 FFU 타입 클린룸에서 수행하였고 이 실험결과와 시뮬레이션에 의해 도출된 에너지 소비량을 비교 분석하였다.

참고로 본문중의 변수 및 상수, 물성치들은 모두 SI 시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었고 본문 중에 설명되지 않은 변수 및 기호는 “기호설명” 부분에 나타내었다.

## 2. 실험 및 수치해석 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 Song et al.<sup>(7)</sup>가 제안한 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개략도를 나타내고 있다. 이 제안된 외기공조시스템들을 평가하기 위하여 본 연구의 외기공조시스템 실험장치는 청정덕트, 고성능 에어필터(HEPA filter), 항온항습기, 에어와셔(Air washer), 엘리미네이터(Eliminator), 냉각코일(Cooling coil), 재열용 히

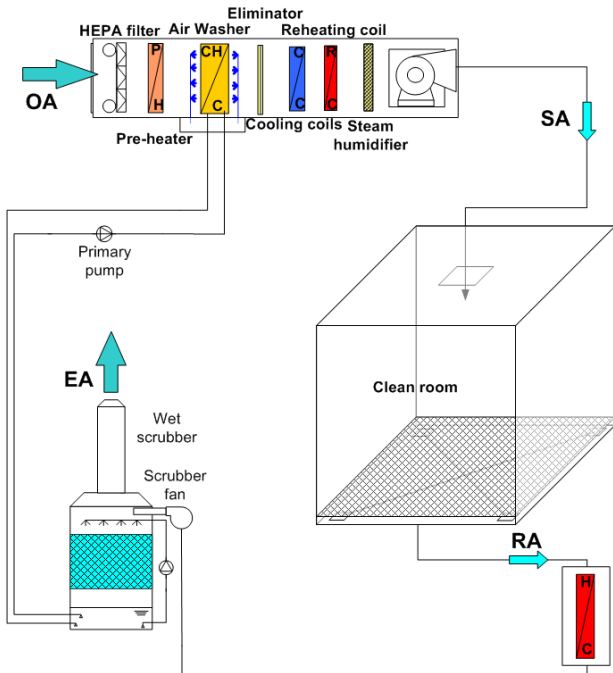


Fig. 2 Schematic diagram of the present experimental apparatus for the outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

터(Reheating coil), 전극봉식 증기가습기(Steam humidifier), 송풍기, 세정집진기(Wet scrubber), 중간열교환기(Heat exchanger), 중간열교환기 순환수용 1차 및 2차 펌프, 냉각/가열 겸용코일(C/H coil), 온습도센서 및 계측기로 구성되었다. 열회수식 에어와셔 외기공조시스템 실기실험장치는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 외기공조시스템의 실험장치에 추가로 당진지역에 10평형 FFU타입 클린룸이 편성되어 클린룸 배기로부터 외기측으

Table 1 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 : $\pm 2\% \text{ RH}$ at nominal temperature Reproducibility : $<1\% \text{ RH}$ at nominal temperature
	Measuring range : $5 \sim 100\% \text{ RH}$

로 열회수가 실시된다. 클린룸은 바닥면적  $33 \text{ m}^2$ , 높이 2.7 m의 체원을 가지며 클린룸 자체의 열부하가 없으므로 클린룸의 배기 조건( $23^{\circ}\text{C}$ ,  $45\% \text{ RH}$ )을 맞추기 위하여 클린룸 배기부분에 가열코일을 설치하였다. 배기는 가열코일을 지나 세정집진기로 보내진다.

열회수식 외기공조시스템 실험장치의 경우 Fig. 1, 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. 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템들의 전력소비량을 측정하기 위해 Fig. 1에 도시된 바와 같이 LS산전 3상 유도형 전력량계를 전력을 사용하는 모든 부분에 연결하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구의 열회수식 외기공조시스템에 대한 실험조건을 Table 2에 수록하였다. 표에서 동기 및 하기의 외기조건은 우리나라 기흥지역의 지난 30년간의 기상조건 중에서 제일 극한의 엔탈피를

Table 2 Experimental conditions of the present exhaust air heat recovery type air washer system

Air flow	$1000 \text{ m}^3/\text{h}$
Outdoor air temperature and humidity	Winter : $-18^{\circ}\text{C}$ , $70.4\%$
	Midterm : $22^{\circ}\text{C}$ , $55\%$
	Summer : $38^{\circ}\text{C}$ , $50\%$
Class of spraying water for air washer	City water
Temperature of spraying water for air washer	$19^{\circ}\text{C}$
Flow of spraying water	$8 \text{ l}/\text{min}$
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	$40 \text{ l}/\text{min}$

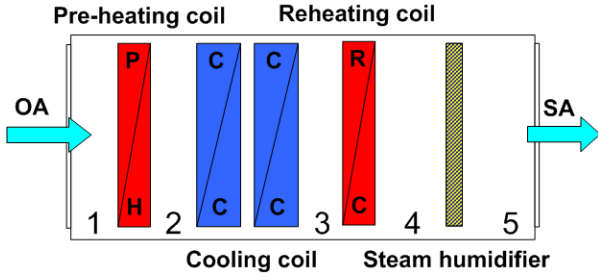


Fig. 3 Schematic diagram of the present numerical simulation for an outdoor air conditioning system with an exhaust air heat recovery type air washer.

가지는 경우를 선정하였고 중간기의 외기조건은 봄철과 가을철의 중간 정도로 선정하였다. 본 연구의 에어와서 외기공조시스템들의 공기선도상의 공조프로세스를 구하기 위하여 Fig. 3에서 향습기 하류, 에어와서 하류, 냉각코일 하류, 재열코일 하류, 가습기 하류에서 공기의 온습도를 각각 측정하였다. 본 연구의 모든 실험결과는 정상상태에 도달한 후에 1시간동안 측정된 데이터를 이용하여 산정하였다. 이외의 실험 장치 및 방법에 대한 내용은 Song et al.<sup>(7)</sup>의 방법을 참고하였으므로 관련 내용을 참조 할 수 있다.

외기공조시스템의 에너지소비량은 Fig. 1과 Fig. 2에 도시한 대로 설치된 전력량계로부터 실측된 소비전력량에 해당한다.

### 2.3 수치해석 방법 및 조건

배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 에너지 소비 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서 수행한 외기공조기시스템 수치시뮬레이션의 개략도를 Fig. 3과 같이 도시하였다. Fig. 3의 각 부분에서 소모되는 에너지를 계산하기 위하여 다음의 계산을 수행하였다.

$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_f h_{f,2} + \dot{Q}_c \quad (1)$$

$$\dot{m}_a w_1 = \dot{m}_a w_2 + \dot{m}_f \quad (2)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_a [(h_1 - h_2) - (w_1 - w_2) h_{f,2}] \quad (3)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{CCP} + \dot{Q}_{CCS} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_a (h_3 - h_2) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_a [c_p (t_3 - t_2) + w_2 (h_{g3} - h_{g2})] \quad (6)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_a [c_p (t_3 - t_2) + w_1 (h_{g3} - h_{g2})] + \dot{Q}_{fan} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{fan} = \frac{\dot{V}_a \Delta P_{fan}}{\eta_{eff, fan}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{wc} = \frac{\dot{Q}_c}{c_p (\Delta t_{wc})} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{wh} = \frac{\dot{Q}_h}{c_p (\Delta t_{wh})} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{pump} = \frac{\dot{V}_w \Delta P_{pump}}{\eta_{eff, pump}} \quad (11)$$

$$\dot{W}_{ch} = \frac{\dot{Q}_c}{COP} \quad (12)$$

$$\dot{W}_{tr} = \frac{\dot{Q}_h}{\eta_{boiler}} \quad (13)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{ch} + \dot{W}_{tr} + \dot{W}_{fan} + \dot{W}_{pump} \quad (14)$$

여기서  $\dot{m}_a$ 는 질량유량,  $h_1, h_2$ 는 상태 1, 2에서의 엔탈피,  $\dot{m}_f$ 는 냉각코일의 총 냉각용량,  $\dot{m}_f$ 는 응축을 위한 질량유량,  $w_1, w_2$ 는 상태 1, 2에서의 비습,  $h_{f,2}$ 는 상태 2 온도 이하 응축액의 엔탈피,  $\dot{Q}_{CCP}$ 는 1st 쿨링코일 용량,  $\dot{Q}_{CCS}$ 는 2nd 쿨링코일 용량,  $\dot{Q}_h$ 는 리히팅코일 용량,  $\dot{W}_{fan}$ 은 fan의 전력,  $\Delta P_{fan}$ 은 fan의 총압력,  $\eta_{eff, fan}$ 은 fan 효율,  $\dot{V}_a$ 는 체적유량,  $\dot{m}_{wc}$ 은 냉수의 질량유량,  $\Delta t_{wc}$ 는 냉수의 온도차이,  $\dot{m}_{wh}$ 은 온수의 질량유량,  $\Delta t_{wh}$ 는 온수의 온도차이,  $\dot{W}_{pump}$ 은 pump의 전력,  $\Delta P_{pump}$ 은 head of the pump,  $\eta_{eff, pump}$ 은 pump 효율,  $\dot{W}_{ch}$ 는 칠러의 전력,  $\dot{W}_{tr}$ 는 보일러의 전력을 나타낸다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 전력 소모량

본 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 실기실험을 위하여 10평형 FFU타입 모델 클린룸과 5,000 CMH급 열회수식 에어와서 외기공조시스템을 당진 지역에 설치하여 2009년도 1~2월에 실기실험을 수행하였다. 일반적인 클린룸과는 달리 클린룸 내부의 열부하가 없기 때문에 반환 공기(RA)의 온습도 조건(23 °C, 45 %RH)을 맞춰주기 위하여 RA 하단부에 가열코일을 설치하였

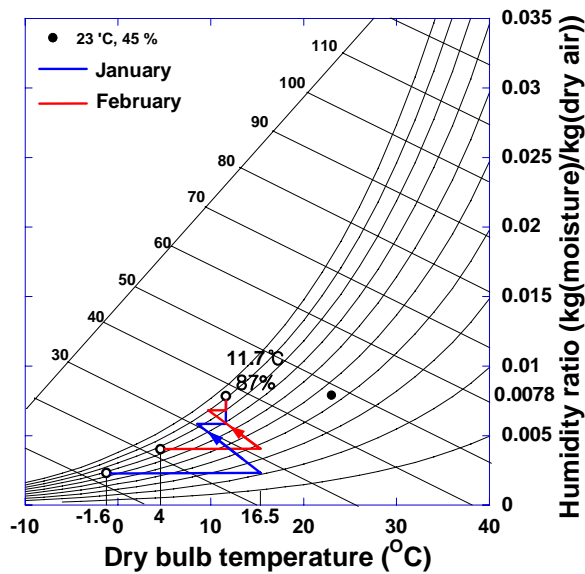


Fig. 4 Variation of the air conditioning process on psychrometric chart by heat recovery for the January and February operation.

다. 온습도 센서 및 계측기는 Song et al.<sup>(7)</sup>의 연구와 동일하게 AHLBORN사의 ALMEMO-MA 5990-2 데이터로거를 사용하여 Table 1 에 수록된 ALMEMO 센서를 사용하였고 전력량계 역시 LS산전 3상 유도형 전력량계를 전력을 사용하는 모든 부분에 연결하여 전력소모량을 측정하였다. Fig. 4은 배기 열회수에 의한 외기공조시스템 실기 실험의 공기선도에서의 공조프로세서 변화를 1월 및 2월 실기실험 결과를 평균하여 나타내었다. 본 실시실험에서는 단순 에어와서 외기공조시스템 실험을 하지 못하였기 때문에 실제 열회수가 일어나는지는 공기선도 상에서 확인할 수는 없다. 그러나 Song et al.<sup>(7)</sup>의 연구결과에 의하면 단순 에어와서 외기공조시스템처럼 열회수를 하지 않을 경우 에어와서에서 분사된 수액적들이 증발하면서 공기가 냉각되는 단열가습을 통한 등엔탈피 과정을 하는데 반해 Fig. 6의 공기선도는 Song et al.<sup>(7)</sup>의 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 공기선도처럼 열회수를 하기 때문에 본 실기실험도 열회수가 일어난다고 판단된다. 전력소모량은 1월에 98.3kW 2월에 56.5 kW로 나타난다.

### 3.2 에너지 소비량

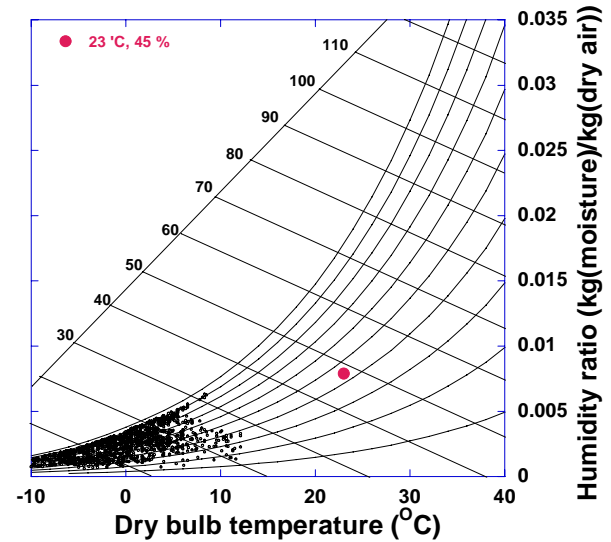


Fig. 5 Variation of the air temperature and humidity of January and February on psychrometric chart

본 연구의 수치시뮬레이션에 있어서 외기의 온도와 습도는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 실기실험지역인 당진지역의 1, 2월 온습도 데이터를 입력하여 에너지 소비량을 계산하였다. Fig. 5는 당진지역의 2009년도 1, 2월의 시간별 외기 데이터를 나타내고 있다. Fig. 5의 온/습도 데이터를 입력하여 위의 식 (1)-(14)에 의해 계산된 당진지역의 1월 및 2월의 평균 에너지 소비량은 각각 95.5 kW, 53.9 kW가 계산되어진다. 실기 실험 데이터와 거의 일치하긴 하지만 보다 작게 나온 이유는 실제 외기공조시스템이 가동되어질 때 발생하는 열손실을 고려하지 않았기 때문이라고 판단된다. 실기 실험에서는 외기공조시스템이 작동되는 동안에 냉/온수가 흐르는 배관등에서 열손실이 발생하게 되고 이 열손실을 보상하기 위하여 추가적인 에너지가 소비되기 마련이다. 따라서 차후에는 이를 고려하여 열 손실로 인해 추가적으로 발생하는 에너지 소비량을 계산하여야 할 것으로 생각된다.

### 4. 결론

반도체 클린룸에서 사용되는 에너지소비량을 분석하기 위하여 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템 수치시뮬레이션을 개발하였다. 이 개발

된 수치시물레이션을 평가하기 위하여 10평형 FFU타입 모델 클린룸과 5,000 CMH급 열회수식 에어와셔 외기공조시스템을 당진 지역에 설치하여 2009년도 1~2월에 실기실험을 수행하였다. 실험 및 수치해석 결과로 얻어진 에너지소비량을 통하여 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 배기 열회수식 에어와셔시스템의 에너지 소비에 대해 수치시물레이션 수법을 개발하게 되어 연간 에너지 소비량을 분석이 가능하게 되었다.

(2) 당진지역에 설치된 5,000 CMH급 외기공조시스템과 수치해석 결과가 비교적 잘 맞지만 열손실을 고려하지 않아 과소하게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부가 주관하고 에너지관리공단이 지원한 에너지자원기술개발사업 반도체/LCD 클린룸 에너지절약기술 개발의 세부과제 ‘열회수식 에어와셔 시스템 개발’과 경기도 기술개발사업 전략산업과제 “첨단전자산업을 위한 에너지절약형 초청정클린룸 개발”의 일환으로 수행되었으며 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. 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).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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.
7. Song, G. S., Yoo K. H., Kang S. H. and Son, S. W., 2009, An experiment on energy reduction of an exhaust air heat recovery type outdoor air conditioning system for semiconductor manufacturing clean rooms, J. of SAREK, accepted.