

# 외기 온습도 조건에 따른 폐열회수 환기장치의 열전달 특성 및 불확실성에 관한 연구

한 화 태<sup>†</sup>, 추 연 복<sup>\*</sup>

국민대학교 기계자동차공학부, \*국민대학교 대학원

## A Study on Heat Transfer Characteristics and Uncertainty of Heat Recovery Ventilator for Various Outdoor Temperature/Humidity Conditions

Hwataik Han<sup>†</sup>, Youn-bok Choo<sup>\*</sup>

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>\*</sup>Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received April 29, 2008; revision received August 25, 2008)

**ABSTRACT:** The purpose of the present paper is to investigate the effect of outdoor weather conditions on the performance of a heat recovery ventilator. Experiments have been performed by varying outdoor temperature/humidity conditions with the indoor conditions fixed at the standard conditions by KARSE. Results indicate humidity efficiency shows larger uncertainties than temperature efficiency in general. With the heat generation by an internal fan removed, the modified temperature efficiency remains almost constant regardless of the indoor-outdoor temperature difference. The enthalpy efficiency can have very large or negative values in case the outdoor conditions are in the vicinity of the indoor enthalpy line. The direction of heat flow, in such a case, can be opposite to that of moisture flow between two air streams. Discussions are included about various interesting features of the psychrometric processes taking place in a heat recovery ventilator.

**Key words:** Heat recovery ventilator(폐열회수 환기유닛), Uncertainty analysis(불확실성 해석), Attestation test(인증시험), Enthalpy efficiency(전열교환효율)

### 기 호 설 명

$C$  : 농도 [ppm]

$C_p$  : 정압비열 [kJ/kg · K]

$h$  : 엔탈피 [kJ/kg(DA)]

$h_f$  : 포화액체엔탈피 [kJ/kg]

$h_{fg}$  : 수증기 증발잠열 [kJ/kg]

$h_g$  : 포화기체엔탈피 [kJ/kg]

$P$  : 압력 [Pa]

$Q$  : 급기량 [m<sup>3</sup>/h, CMH]

$T$  : 온도 [°C]

$W$  : 정격소비전력 [W]

$w$  : 절대습도 [kg/kg(DA)]

$x_i$  : 측정값

$Y$  : 결과값

그리스 문자

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: hhan@kookmin.ac.kr

$\rho$  : 급기측 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  : 효율 [%]

하첨자

- d* : 건구
- eff* : 유효
- h* : 엔탈피
- q* : 누설
- w* : 습구
- OA* : 외기
- RA* : 환기
- SA* : 급기
- T* : 온도

1. 서 론

건축물의 단열화 및 고기밀화가 진행됨에 따라 기존의 자연환기방식으로는 신선외기의 도입이 부족하게 되어 실내공기의 오염문제가 대두되었다. 이에 따라 환경부에서는 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'<sup>(1)</sup>을 제정하여 실내환경기준을 제시하였고, 건설교통부에서는 '건축물의 설비기준 등에 관한 규칙'<sup>(2)</sup>을 제정하여 신축공동주택에 대하여 환기설비의 설치를 의무화하고 있다.

환기설비의 설치가 의무화됨에 따라 환기장치의 수요가 급증할 것으로 기대되고 있다. 이에 따라 환기업체의 차별화 및 기술개발을 유도하기 위하여 환기설비에 대한 인증이 필요하다. 현재 에너지관리공단(KEMCO)에서 '고효율에너지기자재' 인증<sup>(3)</sup>과 한국설비기술협회(KARSE)에서 '폐열회수 환기유닛'에 관한 인증<sup>(4)</sup>을 시행하고 있다. Table 1은 KARSE의 성능시험을 위한 실내의 온습도 조건을 보이고 있다.

시험기준은 설정온도와 설정온도의 오차범위를 가지고 있는데 각 인증별로 시험조건이 서로 다르며 이에 따라 결과값과 오차가 서로 다르게 나타난다. Allan et al.<sup>(5)</sup>은 폐열회수환기유닛을 실제 건물에 설치하였을 때 발생할 수 있는 오차를 분석하였고 Yee et al.<sup>(6)</sup>은 한국과 일본의 인증조건을 비교하여 국내 기후조건에 대한 적합성을 검토하였다. 또 Yoo et al.<sup>(7)</sup>은 모터발전

을 고려하여 외기 온습도 조건 변화에 따른 종이 열교환기의 효율을 비교한 바 있다.

본 논문에서는 한국설비기술협회의 폐열회수 환기유닛 인증제도에 제시된 외기 온습도 조건을 다양하게 변화시키면서 여러 가지 효율을 측정하여 외기 온습도 시험조건에 따른 환기유닛의 성능추정상의 오차를 비교 분석하여 향후 인증시험 방법 개선에 필요한 기초 데이터를 제공할 것을 목적으로 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

실험에 사용된 폐열회수 환기유닛은 W사의 평판형 열교환기로서 덕트형 천정매립형이다. 정격 풍량과 전력소비량은 Table 2에 나타나 있다.

풍량 측정을 위해서 KS A 0612 조임 기구에 의한 유량 측정방법<sup>(8)</sup> 중 노즐법을 채용한 유량 측정장비를 이용하였다. 급기측과 환기측의 풍량을 동일하게 조정된 후(±5%) 열교환 시험을 실행하였다. 측정장비 자체의 오차는 ±1%이다.

누설률 측정은 이산화탄소를 이용하여 측정하였다. 환기측에 이산화탄소 발생 챔버를 설치하여 폐열회수 환기유닛에서 급기측으로 전달되는 이산화탄소 농도를 측정하여 누설률을 측정하였다. 측정장비의 측정 범위는 0~1000 PPM, 오차는 ±2%이다. 누설률은 식(1)에 따라서 이산화탄소의 농도 차이를 이용하여 구한다.

$$\eta_q = \frac{C_{OA} - C_{SA}}{C_{OA} - C_{RA}} \times 100\% \quad (1)$$

열교환 시험은 Fig 1과 같이 폐열회수 환기유닛을 설치할 수 있는 두 개의 항온항습 챔버를 이용한다. 관로내 평균값이 얻어질 수 있도록 직

Table 2 Specifications of the HRV tested

Item	Specifications
Heat transfer type	Parallel plate type
Installation type	Ceiling-mount duct type
Flow rate	300 CMH
Power consumption	200 W

Table 1 Test conditions of HRV by KARSE

	Indoor condition		Outdoor condition	
	Td(°C)	Tw(°C)	Td(°C)	Tw(°C)
Cooling	24±0.3	17±0.2	35±0.3	24±0.2
Heating	22±0.3	13.9±0.2	2±0.3	0.44±0.2

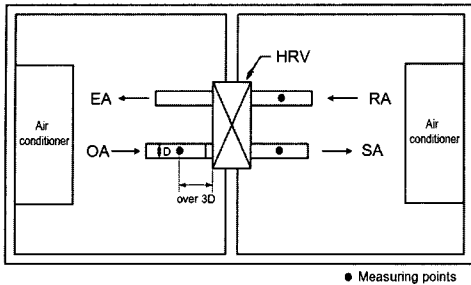


Fig. 1 Schematic drawing of the test facility for heat recovery ventilators.

경의 3배 이상의 거리에 온도의 측정점이 있다. 항온항습 챔버의 용량은 80 MW이고, 온도측정에 사용되는 온도계의 측정 범위는 -50 °C ~ 100 °C이고, 오차범위는 ±0.1 °C이다.

2.2 실험방법

풍량 측정결과 307 CMH, 소비전력 205 W 그리고 누설률 9% 이었다. 이들 값들이 고정된 상태에서 외기 온습도 조건을 Table 3과 같이 변화시키면서 열교환 성능을 측정하였다. Fig. 2는 각각의 실험조건들을 습공기 선도에 표시한 것이다. C0과 H0 조건은 한국설비기술협회에서 개정된 인증시험의 외기조건이다. 먼저 냉방조건인 C1와 C4는 C0조건과 절대습도는 동일하고 온도조건이 다른 경우이고, C2는 실내조건과 절대습도는 동일하고 온도는 C0조건과 동일한 경우이다. C3는 C0과 엔탈피가 같은 조건이다. 난방조건인 경우 H1는 H0과 상대습도가 동일한 조건이고, H2와 H3는 H0과 엔탈피가 동일한 조건이다. H4 조건은 결로를 유발하기 위한 겨울철의 극한 온습도 조건이다. 이와 같은 실내외 온습도 조건하에서 두 시간 이상 가동하여 정상상태에 도달한 후 30분 동안 측정값의 평균값을 사용하여 각각의 상대량을 측정하였다.

효율측정의 중요한 변수인 엔탈피는 식(2)와 같이 온도와 절대습도의 관계로 이루어진다.

$$h = C_{pa} T + w(h_{fg} + C_{pv} T) \tag{2}$$

여기서  $C_{pa}$ 와  $C_{pv}$ 는 각각 건공기와 수증기의 비열이며,  $w$ 는 절대습도로서 식(3)에 따라 건습구 온도로부터 구한다.

$$w = \frac{C_{pa}(T_w - T_d) + \frac{0.62198 P_{sat,w}}{101325 - P_{sat,w}} h_{fg,w}}{h_{g,d} - h_{f,w}} \tag{3}$$

여기서  $P_{sat,w}$ 는 습구온도에서의 포화수증기압<sup>(9)</sup>이다. 에너지 효율 측면에서 중요한 변수인 전열교환효율은 실내외 공기의 엔탈피와 급기 엔탈피의 상대적인 비율을 이용한 식(4)로 부터 계산한다.

$$\eta_h = \frac{h_{OA} - h_{SA}}{h_{OA} - h_{RA}} \times 100\% \tag{4}$$

유효전열교환효율은 누설되는 공기를 제외한 급기와 배기 사이의 실질적인 엔탈피교환 효율을 나타낸다. 유효전열교환효율은 식(5)에서 볼 수 있듯이 전열교환효율  $\eta_h$ 와 누설률  $\eta_q$ 의 함수이다.

$$\eta_{h,eff} = \frac{\eta_h - \eta_q}{100 - \eta_q} \times 100\% \tag{5}$$

Table 3 Experimental conditions of indoor and outdoor dry-bulb/wet-bulb temperatures(RH in parenthesis)

No	Outdoor(°C)	Indoor(°C)
C0	35/24(40.3%)	24/17(49.6%)
C1	40/25.29(30.7%)	
C2	35/20.57(26.3%)	
C3	25/23.5(88.3%)	
C4	21/19.9(90.5%)	22/13.9(40.0%)
H0	2/0.44(75%)	
H1	7/5(74%)	
H2	4/0.44(49%)	
H3	1/0.44(90.5%)	-8.5/-10.327(49.9%)
H4	-8.5/-10.327(49.9%)	

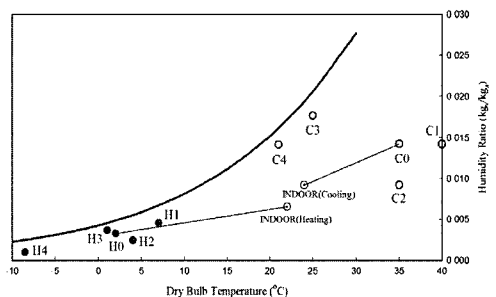


Fig. 2 Test conditions on a psychrometric chart.

실제로 제품을 사용함에 있어서 중요한 지수인 에너지계수는 식(6)에 나타난 바와 같이 공급되는 전력량과 비교하여 급기에 회수된 엔탈피의 비율을 나타낸다. 최근 개정된 한국설비기술협회의 에너지계수 계산법은 이전의 오류를 수정하여 급기풍량이 아닌 유효풍량을 사용한다. 이는 급기풍량에서 누설량을 뺀 값이다.

$$COE = \frac{\rho \eta_{h,eff} Q_{eff} |h_{OA} - h_{RA}|}{W} \quad (6)$$

### 2.3 오차 분석

오차분석이란 각각의 측정요소들이 가지고 있는 측정오차가 결과 값에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 결과 값을  $Y$ , 각각의 측정값을  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )라고 할 때 각 측정값의 오차  $\Delta x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )가 결과 값  $Y$ 에 끼치는 영향을 분석한다. 여기서는 각 측정값 오차에 의하여 발생한 오차를 제공하여 합하고 이것의 제곱근을 구하여 추정하는 방법을 사용하였다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Y}{\partial x_i} \frac{x_i}{Y} \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} \quad (7)$$

본 실험에서의 측정요소는 실내, 실외, 급기의 건습구 온도이다. 각 건습구 온도가 엔탈피에 미치는 영향을 파악하고 그로부터 온도효율, 습도

효율, 그리고 전열효율 등에 미치는 오차를 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Table 4는 실내의 건구온도와 습구온도에 따른 온습도효율 및 전열효율, 그리고 에너지계수를 오차와 함께 나타낸 것이다. C2의 경우 실내와 실외의 절대습도 조건을 동일하게 하였기 때문에 습도교환효율을 계산하지 않았다. 이를 실내의 온도차에 대하여 그래프로 표현한 것이 Fig. 3에 보인다. 온도차가 음수일 때는 난방, 양수일 때는 냉방을 의미한다.

실내의 온도차나 엔탈피차가 매우 작은 한두 경우를 제외하면 온도효율은 60~70% 대의 값을 보이는데 비하여 습도효율은 20~30% 대의 값을 보인다. 반면 습도효율의 오차는 온도효율의 오차보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 습도 측정상의 오차가 온도 측정상의 오차보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 전열교환효율과 유효전열교환효율은 30~60%의 분포를 보이고 있으며, 난방기 보다는 냉방기에 더 큰 불확실성을 보이고 있다. 또한 에너지계수는 2~10의 값을 보이고 있는데, 송풍기 모터의 전력량이 크게 변화하지 않기 때문에 에너지계수는 실내의 엔탈피 차에 비례하는 값으로 생각할 수 있다.

결과값 중 주목할 것은 음의 값을 갖는 C3 경우의 온도효율이다. 이는 폐열회수 환기유닛을

Table 4 Experimental results on various efficiencies and COE

Experimental No	Temperature efficiency (%±%P)	Humidity efficiency (%±%P)	Enthalpy efficiency (%±%P)	Effective enthalpy efficiency (%±%P)	Coefficient of Energy (COE)
C0	58.75±1.09	20.49±3.95	38.72±1.86	32.66±2.05	3.47±0.23%
C1	61.35±0.78	19.17±3.98	42.53±1.57	36.85±1.73	4.70±0.24%
C2	57.68±1.13	-	61.68±3.56	57.89±3.91	2.81±0.23%
C3	-51.71±21.47	27.84±2.24	24.72±2.10	17.28±2.30	1.75±0.24%
C4	97.61±4.59	25.02±3.65	0.53±5.17	-9.31±-5.68	-0.38±0.23%
H0	69.46±0.63	29.27±3.49	57.43±0.98	53.22±1.08	7.02±0.19%
H1	71.69±0.84	30.34±6.65	61.86±1.50	58.09±1.65	5.33±0.19%
H2	69.93±0.70	26.19±2.86	54.03±0.97	49.48±1.06	6.47±0.18%
H3	69.27±0.60	31.32±4.08	59.48±1.00	55.47±1.10	7.27±0.19%
H4	67.32±0.41	34.47±1.94	56.97±0.58	52.72±0.64	10.94±0.21%

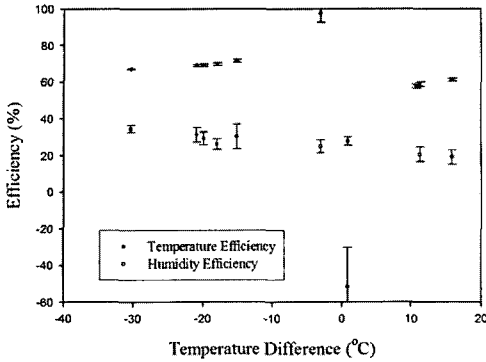


Fig. 3 Temperature efficiency and humidity efficiency with respect to the indoor/outdoor temperature difference.

통과하여 실내로 공급되는 급기가 외기보다 오히려 높은 온도를 가지고 있다는 것을 의미한다. 이는 실내의 온도차가 크지 않은 상태에서 폐열 회수 환기유닛 내부에 설치된 모터의 발열에 따른 온도상승에 의한 것이다.

Fig. 4는 냉방시 폐열회수 환기유닛을 통과할 때 외기로부터 급기의 상태변화 과정을 습공기선 도상에 표현한 것이다. 점 O의 외기가 환기와 열교환이 이루어진 후 점 S'에 도달하게 된다. 온도효율이 습도효율보다 큰 경우에 OS'선은 실내의 냉난방부하의 현열비를 나타내는 OR선보다 기울기가 작게 된다. 모터에서 발생한 열량이 급기로 전달되면서 S'점에서 S점으로 이동하여 실내로 급기된다. 결과적으로 나타나는 온도교환효율은 Rc에 대한 bc의 길이 비이다. b점이 c점보다 크게 되면 온도효율이 음의 값을 갖게 된다.

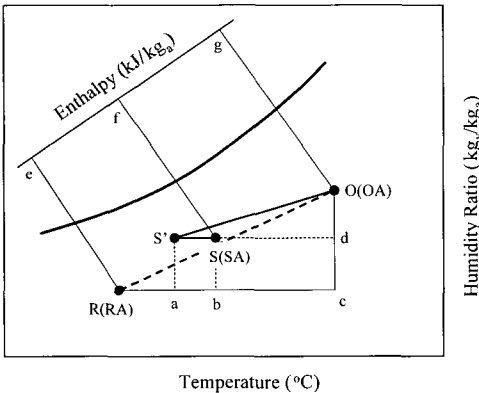


Fig. 4 Process lines on a psychrometric chart.

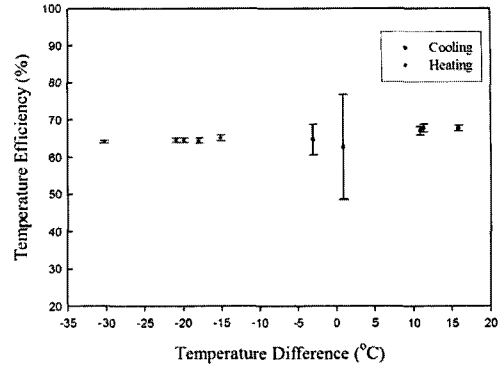


Fig. 5 Temperature efficiency modified with the motor heat generation omitted.

C3 경우가 이러한 경우에 해당된다. 습도효율은 습공기 선도에서  $\overline{Oc}$ 에 대한  $\overline{Od}$ 의 길이비로 나타난다.

Yoo et al.<sup>(7)</sup>에서 모터의 발열부하를 산정할 때 전체 발열량 중 40~50%를 감안한 결과를 참고하여 본 논문에서는 모터 발열량의 50%가 급기로 전달된다고 가정하였다. 모터 발열량에 의한 온도 상승분을 제거한 식(8)을 이용하여 수정 온도교환효율을 계산한 것이 Fig. 5에 보인다.

$$\eta_T' = \frac{T_{OA} - (T_{SA} - \Delta T_m)}{T_{OA} - T_{RA}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{Rc}} \quad (8)$$

흥미롭게도 Fig. 5에서 모터에 의한 온도상승분,  $\Delta T_m$ 을 차감한 수정온도효율은 실외조건에 무관하게 냉난방시 모두 64~68%로 거의 일정한 값을 보이고 있다. 또 온도효율의 불확실성은 실내외 온도차가 작을수록 크게 나타나고 있다.

또한 Table 4의 결과값 중 특이한 것은 C4의 유효전열교환효율이다. C4의 온습도 조건이 역전되어 온도전달 방향과 습도전달 방향이 반대로 되며 온도효율과 습도효율이 서로 상쇄되어 전열교환효율이 매우 작은 값을 갖는다. 이때 전열교환효율이 누설률 보다 작으면 유효전열교환효율이 음의 값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

평판형 폐열회수 환기유닛에 대하여 다양한 실내외 건습구 온도조건이 열교환 효율과 불확실성

에 미치는 영향에 관하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 외기조건에 상관없이 항상 온도효율이 습도 효율보다 크게 나타났다. 또한 습도 측정상의 불확실성 때문에 온도효율에 비하여 습도 효율의 불확실성이 큰 것으로 나타났다.
- 냉난방 조건에 따라 폐열회수 환기유닛의 온도효율이 다르게 나타나는 이유는 송풍기의 모터의 발열에 의한 것으로 유추된다. 모터에 의한 발열을 제거한 수정온도효율은 냉난방 조건에 무관하게 64~68%로 일정하게 나타났다.
- 실내외의 엔탈피 차이가 적을 경우 전열교환 효율의 오차가 크게 발생하며 효율값이 음이나 100% 이상의 값을 가지는 경우가 발생할 수 있다. 또한 전열교환효율이 누설률 보다 작은 경우에 유효전열교환효율이 음의 값을 가질 수 있다.
- 한국설비기술협회에서 새로 개정된 인증시험 조건(C0, H0)에서의 온도효율의 오차는 냉방시 1%P, 난방시 0.6%P이며, 습도효율은 냉방시 4%P, 난방시 3.5%P로 나타났다. 또 유효전열교환효율은 냉방시 약 2%P, 난방시 약 1%P로 나타나 개정 전의 시험조건에서 비하여 개선된 것으로 판단된다.

향후 인증시험조건을 재조정할 경우에도 시험조건에 따른 결과의 불확실성 검토가 필요하며 시험 결과의 불확실성을 줄이기 위한 노력이 지속적으로 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2007년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Statute 6911, Ministry of Environment.
2. Statute 497, Ministry of Construction Transportation.
3. Statute 2006-29, Ministry of Commerce, Industry and Energy.
4. KARSE B 0030 2007, Heat-Recovery Ventilators, Korea Association of Air Conditioning Refrigerating and Sanitary Engineers.
5. Allan, B. J., Carey, J. S., and Robert, W. B., 1998, Uncertainty analysis in the testing of air-to-air heat/energy exchangers installed in buildings, ASHRAE Transaction Vol. 104, No. 1, Pt. B.
6. Yee, J. J., Ihm, P. C., and Kim, H. J., 2005, Sensitivity analysis in KS and JIS standard for heat recovery ventilator, J. of SAREK, Vol. 17, No. 11, pp. 998-1005.
7. Yoo, S. Y., Chung, M. H., Choi, J. H., Kwon, H. K., Lee, C. W., and Lee, K. S., 2005, A study on performance of paper heat exchanger for exhaust heat recovery, Proceedings of SAREK 2005 Summer Conference, pp. 438-443.
8. KS A 0612, Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full, Korean Industrial Standards.
9. Murphy, D. M. and Koop, T., 2005, Review of the vapour pressures of ice and super-cooled water for atmospheric applications, Quart. J. Royal Met. Soc, 608 Part B, pp. 1539-1565.
10. Han, H. and Choo, Y. B., 2006, Uncertainty analysis of test method for heat recovery ventilators, Proceedings of SAREK 2006 Summer Conference, pp. 423-428.