

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 1, 2006

열회수형 환기장치의 운전조건에 따른 경제성 평가에 관한 연구

강태욱[†], 고재윤^{*}

*LG전자 에어컨 연구소

A Cost Analysis of the Heat Recovery Ventilator under Various Condition

Kang, Tae-Wook[†], Koh, Jae-Yoon^{*}

[†] Air-conditioning Laboratory, LG Electronics (twkang@lge.com)

^{*} Air-conditioning Laboratory, LG Electronics (jykoh@lge.com)

Abstract

Changes in building construction methods and repairing of older buildings have reduced infiltration rate. Synthetic materials, release airborne particles and uneven healthy odor are increased. For preventing pollutants introduce fresh outdoor air into the building, simply letting fresh outdoor air into building, however, is not a cost-effective way to ventilation. When additional ventilation is added to an existing HVAC system, the heating and cooling equipment, often cannot handle the increased load. A HRV provides a way to minimize in energy costs while introducing fresh air to a building. In this study, the economical research of HRV, made of three types of materials, are conducted. Heat recovering characteristics are studied at seasonal outdoor air conditions based on the outdoor air property condition at, Seoul in 2002. As a results, the average sensible effectiveness is 0.75 in the sensible heat exchanger and average total effectiveness is 0.65 in the total heat exchanger. The pay back period of the sensible heat exchangers are 3.2~3.5 year and it of total heat exchanger is 2.2 years.

Keywords : 전열효율(Total heat effectiveness), 실내 공기질(IAQ), 환기(Ventilation), 열회수형 환기장치(HRV : Heat Recovery Ventilator), 투습도(WVTR:Water vapor transmission rate)

기 호 설 명

- h : 엔탈피(Enthalpy) [J/kg]
- c : cooling period
- h : heating period
- p : 압력 [Pa]
- N : 연중 기간[year]
- Q : 에너지 회수율 [W]
- t : 시간 [sec, hour, day]
- ϵ : 효율
- x : 절대습도[g/kg]
- sen : Sensible
- lat : Latent
- tot : Total

1. 서 론

건물의 기밀성능 향상과 더불어 고단열 건물의 보급으로 건물 내 오염물질에 의한 피해가 증가하는 추세이다. 환기량 부족으로 인한 실내오염 공기를 개선하기 위한 도구로 일반적으로 환기를 이용하고 있다. 그러나 환기 시 발생하는 냉난방 에너지의 손실이 크며 이에 대한 대안으로 환기 에너지 손실분의 활용을 위한 열회수 환기연구의 필요성이 높아지고 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 서울지역의 연중 대기 물성을 기준으로 냉, 난방기간 동안의 공조운전조건에서 2종류의 현열 환기장치와 1종류의 전열 환기장치의 에너지회수능력을 실험적 방법으로 평가하였다. 열교환소자로는 국내에서 상품화되어 보편적으로 사용되는 현열 환기장치용 Al, PP소재의 부품과 전열 환기장치용 Pulp소재의 부품 각각 1개씩을 채택하여 실험을 실시하였다. 재실 평균인원 4명의 요구 환기량을 만족하는 107m³/h의 환기제품을 대상으로 실험을 실시하였으며 각 소자별 연간 운전경제성 및 고정비의 회수기간 등을 계산하여 주어진 환경에서 HRV를 채택할 경우의 경제적 이득을 평가

하였다.

2. 관련 이론⁽²⁾

2.1 현열 열회수 성능

$$\epsilon_{sen} = \frac{(T_{c_2} - T_{c_1})}{(T_{h_1} - T_{c_1})} \quad (1)$$

$$\epsilon_{lat} = \frac{(x_{c_2} - x_{c_1})}{(x_{h_1} - x_{c_1})} \quad (2)$$

$$\epsilon_{tot} = \frac{(h_{c_2} - h_{c_1})}{(h_{h_1} - h_{c_1})} \quad (3)$$

냉, 난방부하가 일정하게 유지되고 혼합환기방식이 적용된 실내를 가정하여 외기의 습공기 환경이 변화하는 경우 환기제품에서의 실내 급기 물성을 실험적 방법으로 확인하여 현열 및 전열환기장치의 효율과 에너지 회수량을 계산하였다.

공기 대 공기 열회수 환기장치(HRV:Heat Recovery Ventilator)의 효율은 열교환 유체가 건공기와 습증기의 혼합물인 습공기의 특성에 따라 현열효율, 잠열효율, 전열효율이 성능평가를 위한 척도로 정의되며 각각은 전달 가능한 최대 현열, 잠열, 전열 대 실제 전달된 현열, 잠열, 전열로 정의된다.

$$Q_{sen} = C_{min} \epsilon_{sen} (T_{h_1} - T_{c_1}) \quad (4)$$

$$Q_{heat} = \sum_{n=1}^{n=N_h} C_c \epsilon_{sen} (T_r - T_o) t_m \quad (5)$$

$$Q_{cool} = \sum_{n=1}^{n=N_c} C_c \epsilon_{sen} (T_o - T_r) t_m \quad (6)$$

열교환기의 현열효율을 ϵ_{sen} 라 하면 회수되는 현열율은 식(4)와 같이 정리된다. 여기서 실내온도를 일정하게 유지된다면 외기 온도가 실내온도보다 낮을 경우 열회수 환기장치는 난방부하를 절감하고

외기 온도가 실내온도보다 높을 때는 냉방부하를 절감하게 된다. 일년중 외기 온도가 실내온도보다 낮은 기간을 N_h , 실내온도보다 높은 기간을 N_c 라 하면 연간 열회수 환기장치가 회수하는 현열 열량은 각각의 기간에 대한 대수 합 식(5), (6)으로 얻어진다. 여기서, T_o 는 변화하는 외기 온도이고, T_r 은 실내설정온도, t_m 은 초 단위 환산시간이다. 여기에 공조설비의 COP(냉방:2.0, 난방:2.5)와 전력비용(107.7₩/kWh)을 고려하면 현열형 열회수 환기장치를 사용한 임의의 Y년에 사용자가 얻게 되는 이득(MFS: Money for recovering sensible energy)을 계산할 수 있다.

$$MFS_{tot} = \int_1^Y MFS(Y) dY \quad (7)$$

$$MFS_{tt} = \int_1^{tt} MFS(Y) dY \quad (8)$$

식(7)과 같이 환기장치사용 첫 해부터 임의의 기간까지 적분하면 사용 년까지 사용자가 얻게 되는 현열 회수이득을 계산할 수 있다. 또한 식(8)과 같이 제품의 수명연한까지 적분하면 제품사용한계 기간까지 현열 회수 이득을 계산할 수 있다.

2.2 잠열 열회수 성능

$$Q_{lat} = mh_{fg} \epsilon_{lat} (x_{h_1} - x_{c_1}) \quad (9)$$

$$Q_{lat, hum} = \sum_{n=1}^{n=N_{hum}} mh_{fg} \epsilon_{lat} (x_r - x_o) t_m \quad (10)$$

$$Q_{lat, deh} = \sum_{n=1}^{n=N_{deh}} mh_{fg} \epsilon_{lat} (x_o - x_r) t_m \quad (11)$$

실내와 실외의 습도 차에 따라 환기 시 가습과 제습 부하가 발생하고 이에 따라 잠열전달이 가능

한 환기장치를 사용하게 되면 잠열전달에 따른 가습, 제습 이득이 발생한다. 열교환기의 잠열효율이 ϵ_{lat} 일 때 잠열 회수율은 식(9)과 같이 정의된다. 이때 열교환기는 변화하는 외기의 상태에 따라 외기습도가 실내습도보다 낮을 경우 가습 부하를 갖게 되고 외기의 습도가 실내습도보다 높을 경우 제습 부하를 갖게 된다. 실내습도 x_r 에 대해 외기습도 x_o 이 낮은 기간이 N_{hum} 이고 실내습도 x_r 에 대해 외기습도 x_o 이 높은 기간이 N_{deh} 이면 잠열형 열교환기 사용에 따른 총 잠열 회수량은 기간에 대한 대수합인 식(10), (11)로 계산된다. 이것을 가습기와 제습기의 효율, 각각의 에너지 금액, 에너지 비용상승률을 고려하면 사용자가 임의의 Y년에 얻게 되는 경제적인 이득 (MFL : Money for recovering latent energy)을 계산할 수 있다. MFL을 제품의 사용 년까지 적분하면 총 가습과 제습 부하에 대한 사용 년까지의 경제적 이득이 계산되고 제품수명기간까지 적분하면 제품사용한계기간까지 사용자가 얻게 되는 잠열회수이득이 된다.

2.3 압력 손실에 의한 비용

$$P = \left[\frac{M \Delta p}{\rho} \right]_{in} + \left[\frac{M \Delta p}{\rho} \right]_{out} \quad (12)$$

$$MFP(Y) = \frac{F_{fan}}{\eta_{fan}} (1 + \alpha_{fan})^{Y-1} P t_y \quad (13)$$

$$MFP_{tot} = \int_1^Y MFP(Y) dY \quad (14)$$

$$MFP_{tt} = \int_1^{tt} MFP(Y) dY \quad (15)$$

열교환 소자는 전열효율을 높이기 위해 좁은 공간에 넓은 열교환기 표면을 위치시키는데 이에 따라 유로에서 압력손실이 발생하며 이는 유체를 이송시키는 과정에서 에너지소비의 증가로 나타난다. 열교환 소자에서의 압력손실을 Δp 라 하면 이로 인

한 송풍기의 소모동력은 식(12)과 같다. 이때, 압력손실은 유동의 양 방향에서 동시에 발생하므로 사용자가 부담하는 에너지 손실은 실내 공기 측과 실외 공기 측의 손실을 모두 합하여야 한다. 에너지손실에 송풍기의 효율과 사용에너지 비용(MFP: Money for Pressure Drop)을 고려하면 실제 소비자가 부담하는 경제적 손실을 식(13)과 같이 계산할 수 있다. 여기서, t_y 는 기간의 초 단위 환산시간이다. 식(13)을 제품의 임의 사용년까지 적분하면 송풍기 부하에 대한 사용년까지의 경제적 손실 식(14)이 계산되고 수명기간까지 적분하면 제품사용한계기간까지 사용자가 부담해야 되는 송풍기에 이용에 대한 비용손실 식(15)을 계산할 수 있다.

2.4 투자비용 회수기간(Pay Back Period)

$$MFV(Y) = F_v(1 + \alpha_v)^{Y-1} \quad (16)$$

$$PGM(Y) = MFL(Y)_{tot} + MFS(Y)_{tot} - MFV(Y) - MFP(Y)_{tot} \quad (17)$$

$$LCS = MFL(Y_{tt}) + MFS(Y_{tt}) - MFV(Y_{tt}) - MFP(Y_{tt}) \quad (18)$$

제품의 설치비를 포함한 가격과 그에 따른 이율을 고려하면 식(16)에 따라 투자비용에 대한 임의의 Y년까지의 소비자의 투입(MFV : Money for Ventilator)을 계산할 수 있다. 열 회수 환기장치를 설치한 경우 발생하는 현열, 잠열이득과 압력손실에 따른 송풍기손실을 고려하면 환기장치사용에 따른 순비용 이득(PGM: Pure Gain Money)은 식(17)과 같다. 투자비용 회수기간은 순비용 이득이 0이 되는 사용연수이다. 환기장치를 수명연한까지 사용했을 때 사용자가 얻게되는 이득은 제품수명이익(LCS: Life cycle saving)이라 하고 수명연한까지의 초기투자비용에 현열이득, 잠열이득,

압력손실에 대한 손실을 고려하여 식(18)과 같이 정리된다.

3. 실험장치 및 방법

열회수용 환기장치의 성능평가를 위해 그림 1과 같이 실험설비를 이용하였다.⁽³⁾ 일정온도와 습도의 공기를 공급하기 위해 항온 항습챔버, 송풍기, 덕트, 열교환소자 시험부, 측정 및 제어부, 자료획득장치 등으로 구성되어 있다. 열교환소자의 성능시험장치에는 덕트 내의 유동 및 온도를 균일하게 유지하도록 송풍기를 흡입방향으로 열교환소자의 양 출구부분에서 흡입하도록 위치하였다. 항온 설비에서 단열된 덕트를 통해 열교환소자 시험부 입구로 설정된 상태의 공기가 공급되고, 공급공기의 온도 및 습도제어는 항온항습기를 통하여 제어하도록 하였다. 항온 챔버는 실내 측과 실외 측 두 개로 이루어져 있다. 현열소자 및 잠열소자를 비교하기 위해 현열 열전달과 잠열 열전달을 동시에 측정할 수 있도록 열교환 소자 전후에서 온습도 센서를 이용하여 건구온도 및 상대습도를 측정하였다. 자체 개발한 습공기 물성 프로그램을 이용하여 엔탈피 및 절대습도를 계산하여 현열 및 잠열에 의한 열전달량을 측정하였다. 본 논문에서의 열회수 환기장치는 통상 재실인원 4인의 요구 풍량을 만족하는 107 m³/h를 공급할 수 있다. 실외공기의 물성 변화에 따라 실내 측의 공급공기의 물성 및 열교환 효율

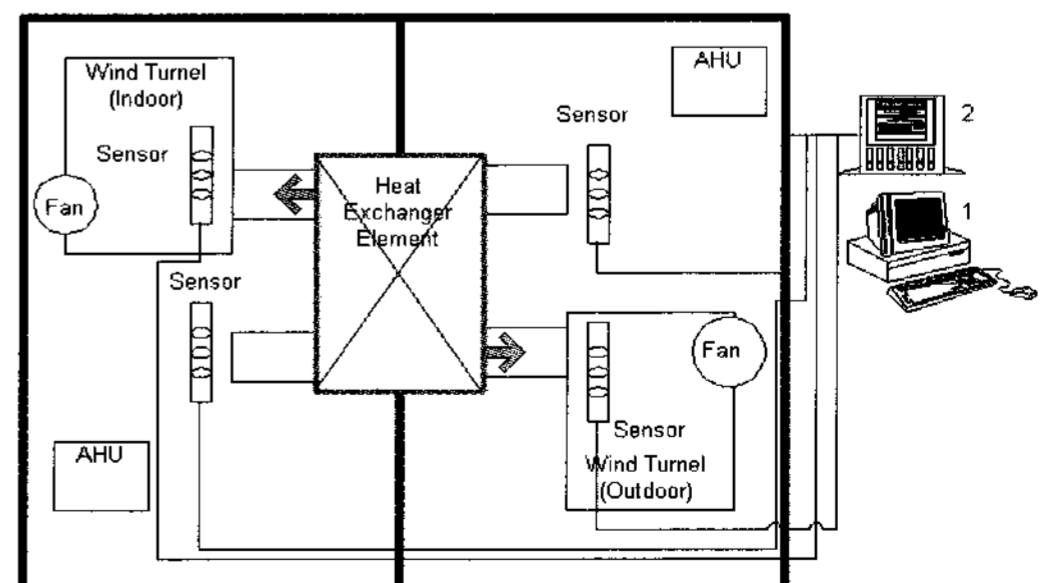


그림 1. 실험 장치

에 미치는 영향을 확인하였다. 실외기온은 기상청의 서울지역의 40년간 난방기간 및 냉방기간 기상 데이터를 참고하여 구현하였고 실내 측의 조건은 건구 온도 25°C, 상대습도 50%이다. 서울지역의 난방기간(1월) 및 냉방기간(8월)의 월별 시간대별 습공기 조건은 그림 2, 3과 같다.

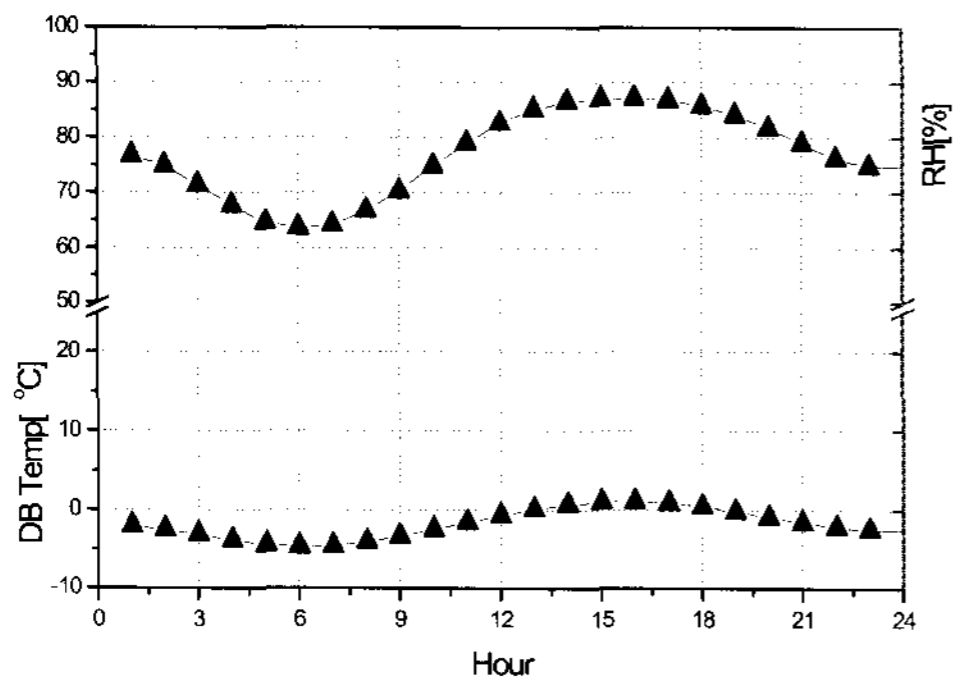


그림 2. 난방기간(1월)의 실외 공기조건

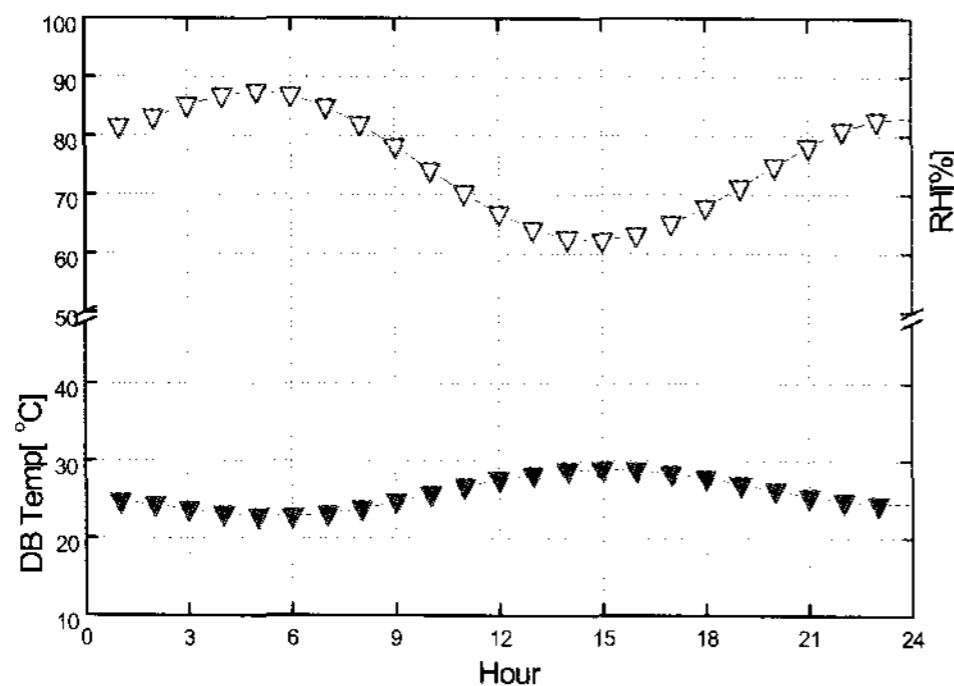


그림 3. 냉방기간(8월)의 실외 공기조건

4. 실험결과 및 고찰

표 1. 열교환소자의 상세

	Unit	Al	PP	Pulp
thickness	mm	0.25	0.35	0.06
Area	m ²	0.04	0.04	0.04
κ	W/m°C	204	0.845	0.18
WVTR	g/m ² 24hr	-	-	2000
Pith	mm	6.9	8.95	2.2
Layer	n	47	47	47

그림 4, 5는 난방, 냉방기간 중 대표일의 외기 온도에 대한 하루 시간별 열교환 효율의 변화이다. 열교환소자별 현열효율은 각각의 조건에 대해 큰 변화를 보이지 않고 있지만 전열효율에서는 각 열교환기간에 따라 차이가 크게 나타난다. 전열 효율의 경우 실외온도의 증가에 따라 공기간의 엔탈피 중 습증기의 잠열부분이 잠열형 열교환소자를 통하여 이동되면서 효율이 높아진다.

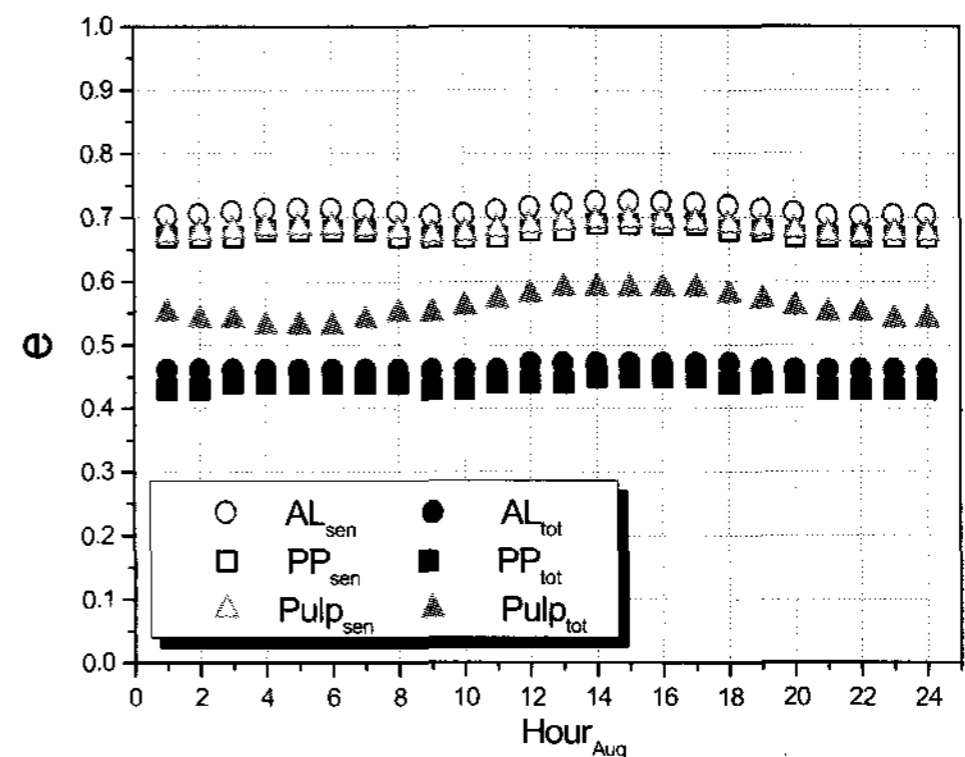


그림 4. 난방기간의 효율 변화

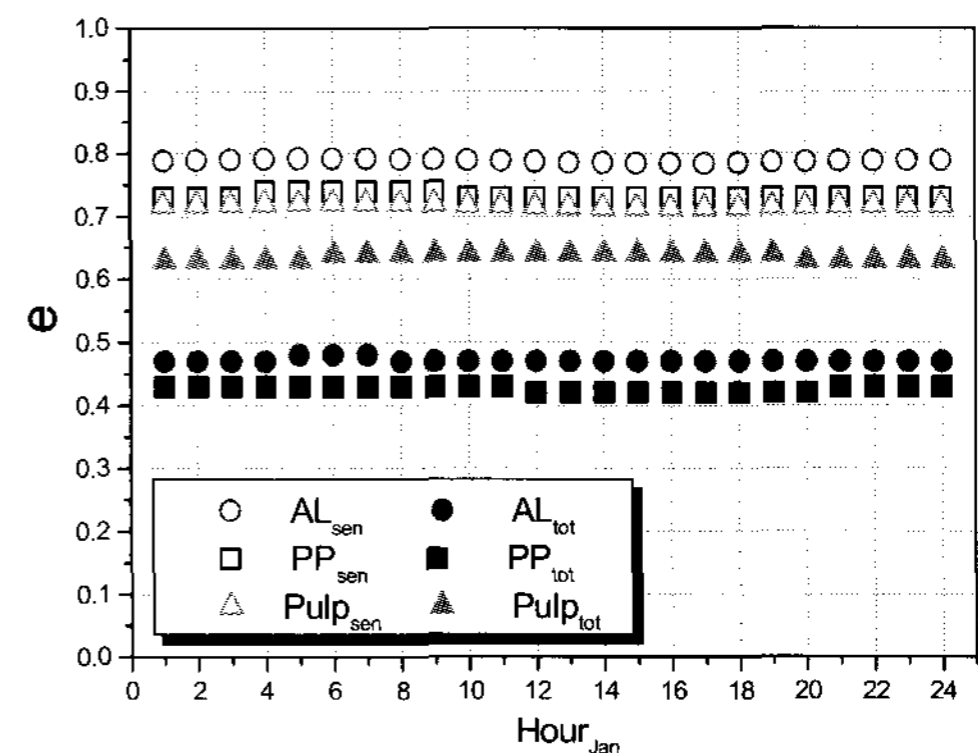


그림 5. 냉방기간의 효율 변화

열회수 환기장치를 이동하는 유체는 습공기로 절대습도량이 높을 경우 상대 유체와의 열전달로 인해 습공기는 포화점에 도달하게 되어 응축현상이 나타나게 된다. 본 연구에서는 지역적 특성에 따라

외기온 10℃ 이하에서 응축수가 발생하기 시작하였고 그 보다 높은 외기온도 범위에서는 습공기의 물성이 포화선 이내에 위치하여 습공기의 포화상태가 발생하지 않았다.

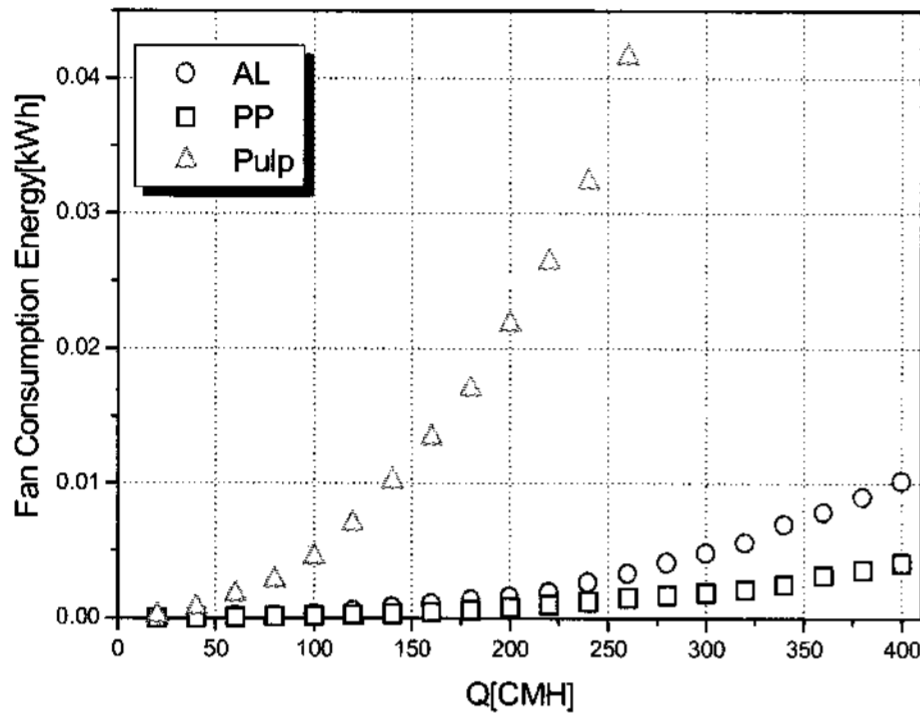


그림 6. 팬 소비 동력

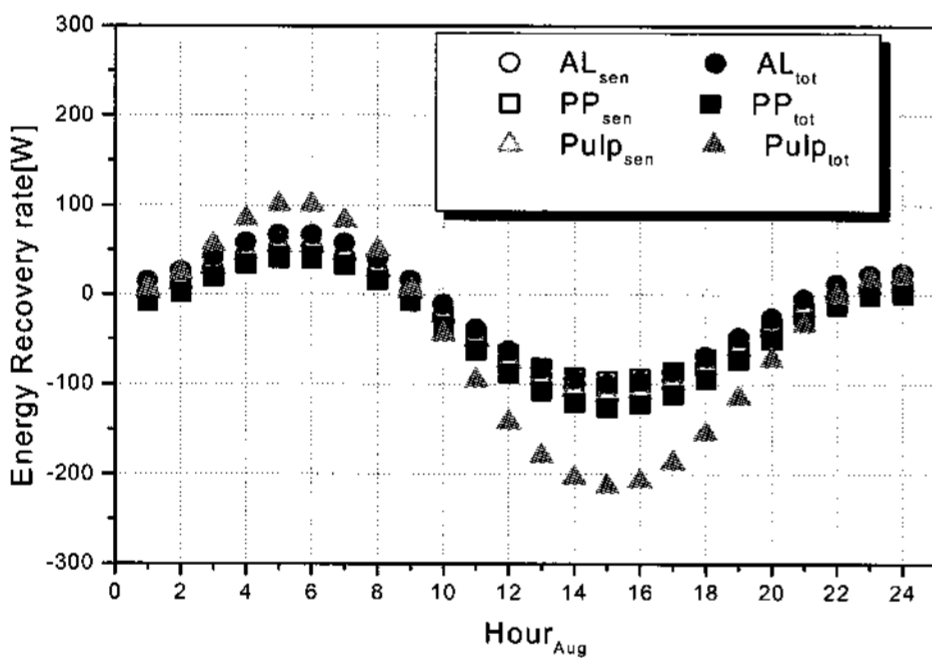


그림 7. 냉방기간의 열회수율

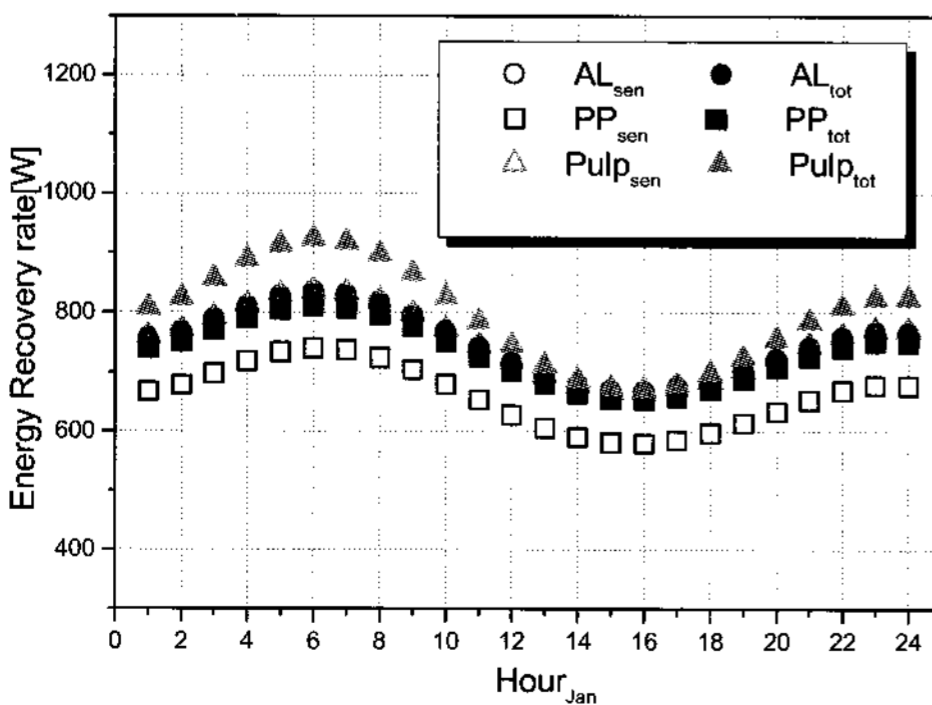


그림 8. 난방기간의 열회수율

그림 6은 열교환소자의 압력손실에 따른 Fan 소비전력의 증가경향을 나타낸 것이다. Fan 소비전력은 유속의 제곱에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 그림 7은 냉방기간 8월의 열교환 소자를 통과하는 외기의 시간대별 평균 물성변화에 따른 열전달량을 나타낸 것이다. 외기와 실내온도의 차가 증가하면서 열전달량이 증가하고 있고 냉방조건에서는 실내공기와 실외공기의 온도차가 상대적으로 작기 때문에 현열 열전달량이 크지 않다. 냉방기간에는 상대적으로 절대습도가 높기 때문에 수분전달이 미치는 영향이 크고 이때의 열교환 소자성능의 중요한 지표는 잠열효율이 된다.

그림 8은 난방기간 1월의 열교환소자를 통과하는 외기의 시간대별 평균 물성변화에 따른 열전달을 나타낸 것이다. 냉방기간과 같이 온도차가 증가하면서 열전달량이 증가하고 있고 난방조건에서는 실내와 실외공기의 온도차가 냉방조건보다 상대적으로 크기 때문에 열전달량이 큰 값을 보인다. 난방기간에는 상대적으로 절대습도가 낮기 때문에 수분전달이 미치는 영향은 작으며 이때의 열교환소자성능의 중요한 지표는 온도효율이 된다.

그림 9, 10은 Fan 소비전력을 제외한 순 에너지회수금액을 나타낸다. 실내외의 온도차가 크지 않은 하계의 경우보다 동계의 에너지 회수비용이 매우 크다.

그림 11, 12는 환기장치사용에 따른 연간 현열 및 전열회수 이득을 설명한 것이다. 열회수 환기장치의 설치비를 포함한 최초설비비는 CMH당 ₩5,000으로 책정하여 현열/전열회수장치 동일하게 ₩535,000으로 결정하였다. 각각의 비용은 물가인상을 4%에 따라 상승하며 사용자의 이득은 현열 열회수만을 한다면 사용년 첫해에 ₩154,331~176,669에서 제품수명연한, 10년에는 누적이득이 ₩2,210,000~2,520,000이 된다. 전열 열회수를 한다면 사용년 첫 해에 ₩166,301~259,696에서 제품 수명연한 10년에는 누적이득 즉, 제품수명이득은 ₩2,370,000~3,711,073이 된다.

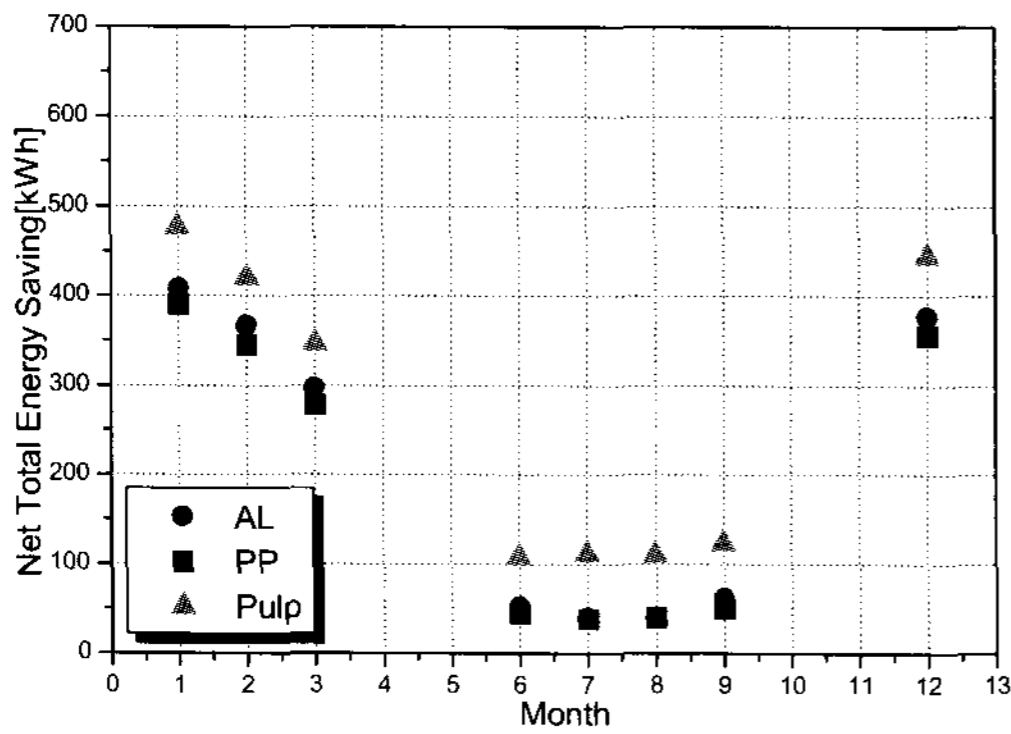


그림 9. 연간 순 에너지 회수

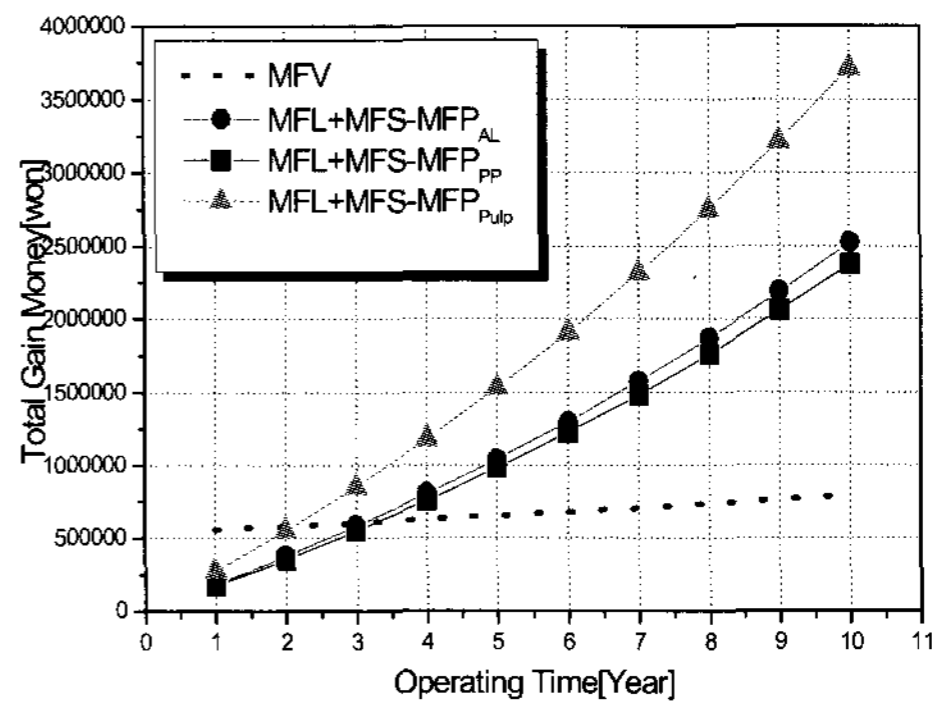


그림 12. 연간 전열회수 이득

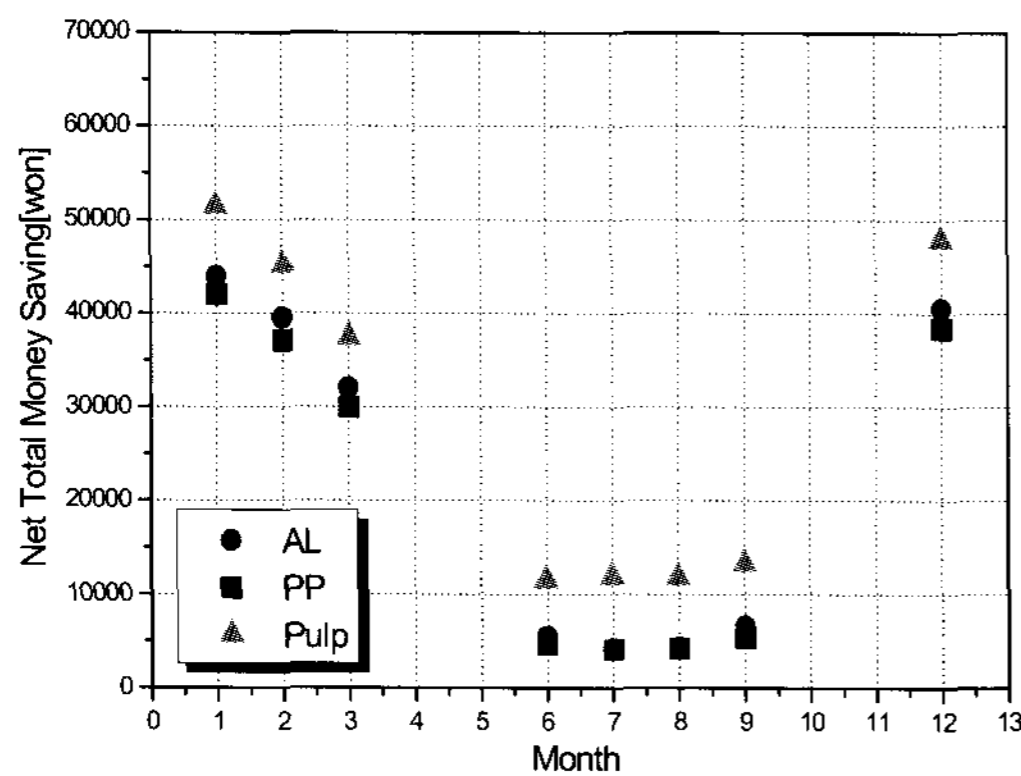


그림 10. 연간 순 비용 절감

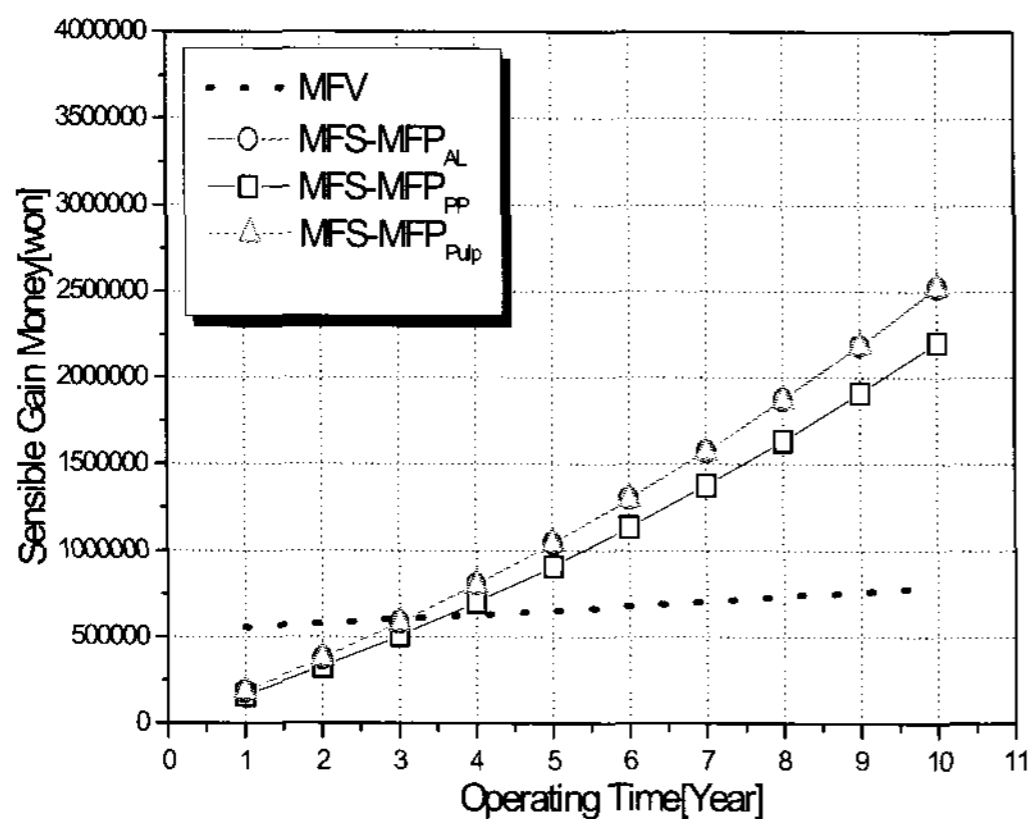


그림 11. 연간 현열회수 이득

현열 회수만을 할 경우 AL재, Pulp재의 현열회수 환기장치의 투자회수기간은 약 3.3년, PP재의 투자회수기간은 약 3.7년으로 계산되었다. 전열회수를 할 경우 AL, PP 소재의 현열형 열교환기의 기간은 거의 변화가 없고 Pulp재의 전열회수환기 장치의 투자회수기간은 2.2년으로 단축되었다.

5. 결 론

1. “AL”소재의 현열효율평균 0.77, “PP”의 현열효율평균 0.75, “Pulp”소재는 현열효율평균 0.71, 전열효율 하계평균 0.56, 동계평균 0.63을 나타내었다.
2. “AL”은 하계평균 48 kWh, 동계평균 362 kWh, “PP”은 하계평균 43 kWh, 동계평균 342 kWh의 현열회수를, “Pulp”소재는 하계 평균 113 kWh, 동계평균 422 kWh의 전열 회수를 나타내었다.
3. 서울지역기후의 연평균 기준에서 현열 및 잠열 회수이득은 1월에 가장 큰 값을 나타내었고 7월에 가장 낮은 회수 이득을 나타내었다.
4. 환기장치의 투자비용회수기간은 현열 열교환 소자의 경우 “AL”은 3.2년, “PP”는 3.5, “Pulp”소재는 2.2년이었고 환기장치의 수명이득은 현열 열교환소자의 경우 “AL”은 2,520,000

원, "PP"는 2,370,000원, 전열 열교환 소자는 3,710,000원 이었다.

참 고 문 헌

1. ASHRAES tandard, 1984, "Method of Testing Air-to-Air Heat Exchanger", pp.84-78
2. Min, L. H., Koh, J. Y., Lee, C. M., Yim, C. S., 2002, "The study on the Heat Recovery Ventilator using Compact Heat Exchanger", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 2002 Summer, pp. 1135-1142.
3. ASHRAE Handbook, 2000, "HVAC Systems and Equipment," S44, Air-to-Air Energy Recovery.