

열 교환 소자 형상의 CFD 시뮬레이션을 통한 판형 전열 교환기 성능평가

A Performance Evaluation of Plate Type Enthalpy Exchanger through CFD Analysis of Elements

강인성(In-Sung Kang)^{1*}, 안태경(Tae-Kyung Ahn)², 박진철(Jin-Chul Park)³

¹중앙대학교 대학원 건축공학과, ²경동대학교 건축공학과, ³중앙대학교 건축학부

¹Department of Architecture Engineering, Graduate School of Chung-Ang University, Seoul, 156-756, Korea

²Department of Architecture Engineering, Kyung-Dong University, Gosung, Korea

³Department of Architecture, Chung-Ang University, Seoul, 156-756, Korea

(Received July 1, 2016; revision received November 3, 2016; Accepted: November 4, 2016)

Abstract In order to better save energy, many buildings have been constructed with high levels of insulation and airtightness in recent years. Additionally, having high quality indoor air has become more relevant, necessitating a ventilating system. This study is aimed at evaluating the performance of a humidity exchanger through computational fluid dynamics (CFD) analysis of elements for the purpose of providing comfortable indoor air and reduced energy consumption. The simulation was conducted with three different shapes (triangle, rectangular, and curve) of heat exchanger elements, in order to find the most effective element. A follow-up simulation then proved the efficiency of the chosen humidity exchanger, which was selected by analyzing the results of the preceding simulation, comparing study data with measurement data from the Korea Testing Laboratory (KTL). The resulting analysis revealed that the rectangular element showed the lowest level of efficiency in both heating and cooling, while the curved element showed the highest level of efficiency in both heating and cooling.

Key words Plate type enthalpy exchanger(판형 전열 교환기), Heat exchange element(열 교환 소자), CFD Analysis (전산유체역학 해석)

† Corresponding author, E-mail: suuung222@nate.com

기호설명

CMH : 풍량 [m^3 /hour]
 n_T : 현열 교환 효율 [%]
 n_i : 전열 교환 효율 [%]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 Q : 공기 유량 [m^3/h]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 RH : 상대습도 [%]
 KTL : 한국산업기술시험원

하첨자

EA : 배기(Exhaust Air)
 OA : 외기(Outside Air)
 RA : 환기(Return Air)
 SA : 급기(Supply Air)

1. 서론

최근 건축물의 에너지 소비 절감을 위해 건축물은 고기밀화 되어 가고 있다. 이에 따라 실내 공기의 공기질의 중요성이 더욱 대두되고 있으며, 쾌적한 실내 공기질을 유지하기 위하여 환기 설비 장치의 중요성 또한 부각되고 있다. 이에 따라 건물의 에너지 부하를 줄임과 동시에 쾌적한 실내 공기질을 유지하기 위한 방편으로 고효율 환기설비 장치가 필요하다.

본 연구에서는 종래 기술인 판형 전열 교환기의 소자 형상과 이를 개선하여 효율을 높인 전열소자 형상을 비교·분석하기 위하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)시뮬레이션을 실시하였다. 또한 개선된 전열소자 형상을 적용한 전열 교환기 챔버의

시뮬레이션 분석을 통하여 기존 전열 교환기와 성능을 비교·분석하였다. 시뮬레이션 결과와 한국산업기술시험원(Korea Test Laboratory, KTL)의 공인된 성능실험 결과를 비교하여 제시된 판형 전열 교환기의 성능을 평가하고자 한다.

2. 이론 고찰

전열 교환기는 실내의 오염된 공기를 밖으로 배출 시키고 동시에 신선한 외부공기를 실내에 공급하는 환기시스템으로, Fig. 1과 같이 냉·난방 환기 시 외부로 빼앗기는 열을 다시 회수하여 실내에 공급하는 전열 교환 방식의 열 회수 환기 시스템이다.

전열 교환기는 현열 교환기와 달리 온도뿐만 아니라 습도까지 회수하여 약 3배 이상의 열 교환 효율이 있어 경제성이 뛰어나다. 일반적으로 전열 교환기의 열 교환 소자 재질은 폴리프로필렌, 고분자 멤브레인, 특수 가공 펄프(종이류) 등을 사용하여 전열막을 통한 열 및 수분 전달이 가능하다.⁽¹⁾

전열 교환기 효율에 대한 선행 연구는 다음과 같다. Kim et al.⁽²⁾ Kim et al.⁽³⁾은 종이 물성에 따른 판형 전열 교환기의 성능 분석, Chung,⁽⁴⁾ Chung⁽⁵⁾은 열 교환기의 소자 높이, 열 교환기의 크기에 따른 전열 교환기 효율을 분석, Kwak et al.⁽⁶⁾은 다공형 유로를 적용한 전열 교환기 소자의 성능향상에 대해 분석을 실시하였다. 열 교환 소자에 관한 선행 연구는 로터형 열 교환기의 알루미늄 요철의 형상에 대한 CFD 분석 등이 있으며 이는 2가지 형상의 열 교환 소자에 대해 분석하였다. 그러나 금속 재질을 사용하는 현열 교환기와는 달리 전열 교환기 소자 형상에 대해 제작 가능 여부와 구체적인 효율에 대한 고찰이 필요하다.

이외에도 많은 연구가 이뤄졌지만, 전열 교환기의 성능 분석이나 현열 교환기의 효율 향상에 국한되어 있는 경우가 많았다. 이에 본 연구는 전열소자에 대한 형상별 시뮬레이션 및 실험 결과 자료의 비교하여 전열 교환기 효율을 향상시키는 방안을 도출해보고자 한다.

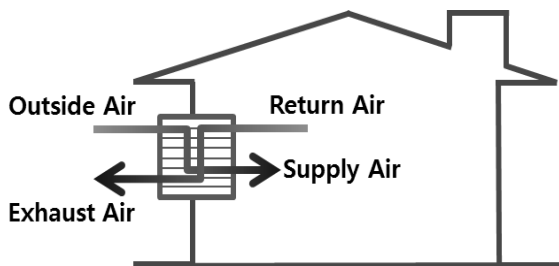


Fig. 1 Schematic diagram of enthalpy heat exchanger.

| Item | Factor |
|------------------------------|----------------------|
| Space | Three Dimensional |
| Time | Steady |
| Material | Gas |
| Flow | Segregated Flow |
| Equation of State | Constant Density |
| Viscous Regime | Turbulent |
| Reynolds-Averaged Turbulence | K-Epsilon Turbulence |

3. 연구 방법 및 범위

3.1 CFD 시뮬레이션 개요

본 연구에서 사용된 해석 소프트웨어는 유동 해석, 구조 해석, 열전달, 난류 해석 등이 가능한 CD-Adapco사의 STAR-CCM+(ver.9.06)로 실시하였다.⁽⁷⁾ 시뮬레이션의 분석조건은 Table 1과 같이 3차원 해석 공간, 기체, 분리된 유동 흐름, K-Epsilon 난류해석 등을 시뮬레이션에 적용하여 분석하였고, 계산 값이 일정 오차범위 내(수렴조건 : 10^{-5})로 수렴 할 때까지 계산하였다.

3.2 전열 교환기 및 소자 모델링

판형 전열 교환기에 사용되는 소자 종류는 알루미늄, 폴리프로필렌, 고분자 멤브레인, 펄프 재질(종이) 등이 있으며, 본 연구에서는 폴리머 재질의 열 교환 소자로 구성된 열 교환기를 대상으로 진행하였다.

전열 교환기의 구조는 아래 Fig. 2와 같이 전열막(Membrane)과 스페이서(Spacer)가 교대로 적층되어 있는 형태로 이루어져 있다. 전열막에서는 급기와 배기를 통과하는 유체간의 열 및 수분 교환이 이루어지며, 스페이서는 전열 교환기의 형태를 유지하며 급기 및 배기의 통로를 형성한다.

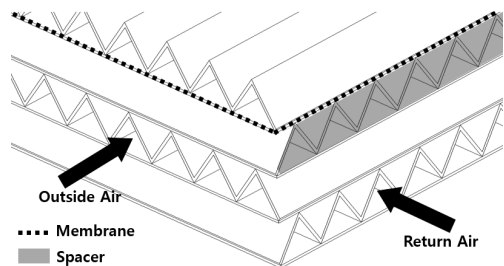


Fig. 2 Schematic drawing of the enthalpy exchanger.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 삼각형의 전열 소자 (a), 물결무늬 소자(b), 사각형 소자(c)에 대하여 유형별 열전달 성능을 분석하기 위해 격자를 생성하였다. 이후 전열 교환기 효율을 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 전열 교환기 A, B, C를 모델링하여 Fig. 5와 같이 전열 교환기 시험체에 적용시켰다. 전열 교환기 용량 및 크기와 시험체의 크기는 Table 2와 같으며, 격자계는 비구형격자계의 Surface Remesher, Polyhedral Mesher, Prism Layer Mesher를 사용하였다. 또한 전열 교환기 시험체와 전열 교환기의 격자 크기를 각각 10 mm, 1 mm로 다르게 설정하여 정확한 전열 교환기 형상을 구현하였다.

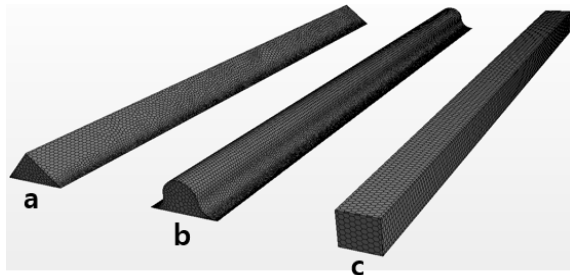


Fig. 3 Grid generation of enthalpy exchanger elements.

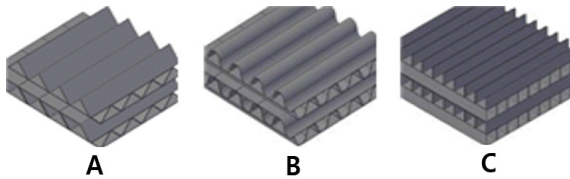


Fig. 4 Models of enthalpy exchanger.

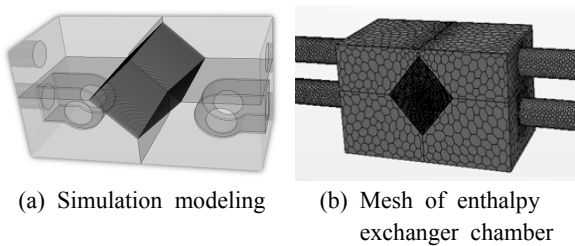


Fig. 5 Simulation model and mesh of STAR-CCM+.

Table 2 Conditions of humidity exchanger and chamber

| Item | Factor |
|--------------------|---------------------|
| Q | 2,000 CMH |
| Humidity Exchanger | 500×520×920(mm) |
| Chamber | 920×1,080×1,880(mm) |
| Grid Type | Surface Remesher |
| | Polyhedral Mesher |
| | Prism Layer Mesher |

3.3 전열 교환기 효율 산출

열 교환기의 효율은 배기로부터 회수되는 열의 회수 능력을 뜻하며, 현열 교환 효율, 잠열 교환 효율, 전열 교환 효율로 각각의 성능을 나타낼 수 있다. 현열 교환 효율은 온도만을 회수하는 효율, 잠열 교환 효율은 수분전달에 의한 습도 교환 효율이며 전열 교환 효율은 현열과 잠열을 모두 포함한 엔탈피 교환 효율이다.⁽⁸⁾

전열 교환기 효율을 산출하기 위해서는 아래의 식(1), 식(2)와 같이 외기(outside air, OA), 환기(return air, RA), 급기(supply air, SA)의 온·습도 값을 통해 계산 가능하다. OA와 RA는 KS B 6879 “열회수형 환기 장치”에 주어진 측정 조건에 따라 해석하였으며,⁽⁹⁾ Table 3에서 같이 OA와 RA의 건구 온도와 상대 습도를 나타내고 있다. SA의 온도는 CFD 프로그램에서 급기 부분의 평균 온도를 확인하였으며, KTL에서 실측한 결과와 습·공기 선도를 이용하여 SA의 엔탈피를 계산하였다.

$$\text{Sensible heat efficiency} : n_T = \frac{T_{OA} - T_{SA}}{T_{OA} - T_{RA}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Enthalpy efficiency} : n_i = \frac{i_{OA} - i_{SA}}{i_{OA} - i_{RA}} \times 100 \quad (2)$$

4. 시뮬레이션 결과

4.1 열 교환 소자 효율 분석

본 연구에서 개발된 전열소자에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과는 아래 Fig. 6과 같이 온도 분포로 나타났다. Table 4와 같이 전열 소자의 기존 내부온도는 26℃이며 35℃인 급기를 1m/s로 설정하여 a, b, c 소자의 열 전달 특성을 분석하였다. Fig. 6(a)부터 Fig. 6(h)까지는 각각의 소자에 동일한 유속과 온도를 갖는 공기가 주어졌을 때 Iteration(시뮬레이션 반복 횟수) 10부터 200까지의 열전달 분포를 나타낸 것이다. 분석 결과 c형상의 기류가 Iteration 대비 가장 빠르게 전달되며, b형상에서 가장 느리게 전달되는 것으로 나타났다.

Table 3 Ambient conditions

| | RA | | OA | |
|--------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | $T(^{\circ}\text{C})$ | $RH(\%)$ | $T(^{\circ}\text{C})$ | $RH(\%)$ |
| Summer | 24±0.3 | 49.6 | 35±0.3 | 40.3 |
| Winter | 22±0.3 | 40 | 2±0.3 | 75.1 |

Table 4 Condition of elements

| Item | Factor |
|--------------------------------|--------|
| Velocity of inlet(m/s) | 1 |
| $T_{inlet}(^{\circ}\text{C})$ | 35 |
| $T_{outlet}(^{\circ}\text{C})$ | 26 |

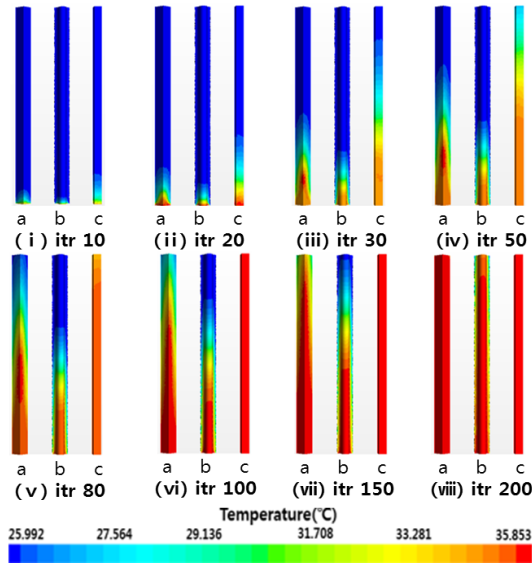


Fig. 6 Heat transfer distribution of element.

Table 5 Field measurement result of KTL

| SA | Cooling | Heating |
|----------------------------------|---------|---------|
| Temperature(°C) | 28.906 | 17.58 |
| Relative Humidity(%) | 50.05 | 33.2 |
| Enthalpy(kcal/kg) | 14.561 | 6.715 |
| Sensible heat efficiency(%) | 55.4 | 77.9 |
| Enthalpy efficiency(%) | 44.6 | 62.6 |
| Effective enthalpy efficiency(%) | 42.1 | 61.0 |

4.2 전열 교환기 시험체 효율 분석

전열 교환기 시험체의 급기 온도와 엔탈피를 구하고 열 교환 효율 산출식에 대입하기 위한 방편으로 전열 교환기 시험체에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. KTL에서 실시한 실측실험과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 실시하였으며, 실측 결과와 비교하여 CFD 분석 결과의 신뢰성을 입증하였다.

Table 5에서는 KTL에서 전열 교환기 시험체 급기구에 대한 실측 데이터를 나타내고 있으며, 건구 온도, 상대 습도, 엔탈피, 현열 교환 효율, 전열 교환효율, 유효 전열 교환 효율 결과가 포함되었다.

시뮬레이션에서 Inlet의 유속 설정값은 KTL에서 팬을 가동한 유속과 동일하게 3 m/s, 배기 압력은 0.5 Pa로 적용하였으며, 결과 도출을 위한 Iteration 횟수는 토출온도가 수렴하는 200회로 설정하였다.

Fig. 7은 전열 소자 A, B, C를 포함하는 열 교환기에 대한 기류 분포이며, A형상과 C형상의 배기 유속은 약 1.8 m/s로 비슷하게 나타났으며, B형상의 배기 유속은 약 2.2 m/s로 가장 빠르게 나타났다. SA 토출온도 그래프는 Fig. 8에서 나타내고 있다. A형상의 토출

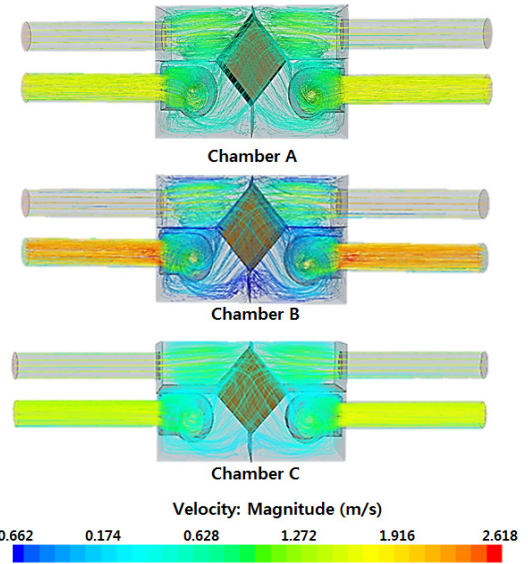


Fig. 7 Airflow distribution of chamber.

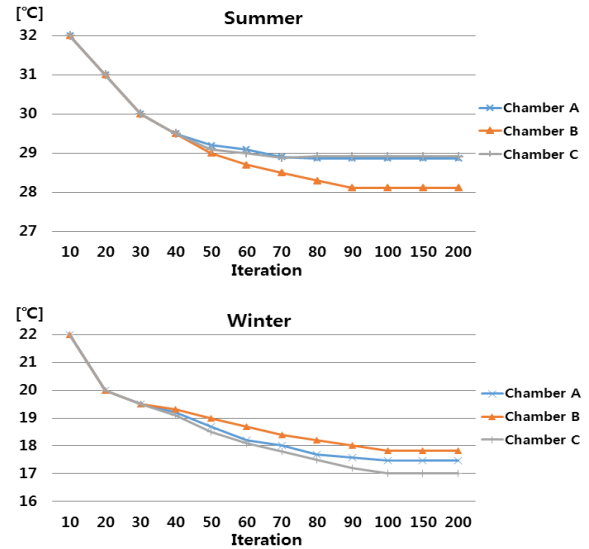


Fig. 8 Temperature distribution of supply air duct.

온도(TSA)는 냉방 시 약 28.87°C, 난방 시 약 17.47°C, B형상은 냉방 시 약 28.12°C, 난방 시 약 17.82°C로 나타났으며, C형상은 냉방 시 약 28.91°C, 난방 시 약 17.0°C로 나타났다. B형상의 토출 온도가 냉방 시 가장 낮고, 난방 시 가장 높은 것으로 나타나, 배기 유속과 TSA(냉방)는 C, A, B형상 순으로 높았으며 TSA(난방)는 B, A, C순으로 높았다.

또한 시뮬레이션 결과 값의 신뢰성을 파악하기 위해 기존의 전열 교환기(Chamber A)에 대해 KTL의 실측 데이터와 비교·분석을 실시하였다. RA, OA 조건은 KTL과 동일하게 시뮬레이션에 적용하였고, 이를 통해 토출된 TSA 온도 및 현열 교환효율(η_T)을 비교하였다.

Table 6 Comparison of KTL result with simulation

| Chamber A | KTL | | CFD simulation | | Differential | | |
|-----------|------|---------|----------------|---------|--------------|---------|---------|
| | Mode | Cooling | Heating | Cooling | Heating | Cooling | Heating |
| TRA(°C) | | 24±0.3 | 22±0.3 | 24±0.3 | 22±0.3 | - | - |
| TOA(°C) | | 35±0.3 | 2±0.3 | 35±0.3 | 2±0.3 | - | - |
| TSA(°C) | | 28.906 | 17.58 | 28.87 | 17.47 | 0.036 | 0.11 |
| n_T (%) | | 55.4 | 77.9 | 55.73 | 77.35 | 0.33 | 0.55 |

Table 7 Result of sensible heat exchange efficiency

| Type | Mode | Temperature(°C) | n_T (%) |
|-------------|---------|-----------------|-----------|
| A | Cooling | TRA : 24±0.3 | 55.73 |
| | | TOA : 35±0.3 | |
| TSA : 28.87 | | | |
| A | Heating | TRA : 22±0.3 | 77.35 |
| | | TOA : 2±0.3 | |
| TSA : 17.47 | | | |
| B | Cooling | TRA : 24±0.3 | 62.54 |
| | | TOA : 35±0.3 | |
| TSA : 28.12 | | | |
| B | Heating | TRA : 22±0.3 | 79.1 |
| | | TOA : 2±0.3 | |
| TSA : 17.82 | | | |
| C | Cooling | TRA : 24±0.3 | 55.36 |
| | | TOA : 35±0.3 | |
| TSA : 28.91 | | | |
| C | Heating | TRA : 22±0.3 | 75.0 |
| | | TOA : 2±0.3 | |
| TSA : 17.0 | | | |

Table 8 Result of enthalpy exchange efficiency

| Type | Mode | Enthalpy(kJ/kg) | n_i (%) |
|------|---------|-----------------|-----------|
| A | Cooling | hRA : 47.62 | 44.36 |
| | | hOA : 71.47 | |
| | | hSA : 60.89 | |
| A | Heating | hRA : 38.81 | 62.03 |
| | | hOA : 10.21 | |
| | | hSA : 27.95 | |
| B | Cooling | hRA : 47.62 | 53.37 |
| | | hOA : 71.47 | |
| | | hSA : 58.74 | |
| B | Heating | hRA : 38.81 | 64.1 |
| | | hOA : 10.21 | |
| | | hSA : 28.54 | |
| C | Cooling | hRA : 47.62 | 43.85 |
| | | hOA : 71.47 | |
| | | hSA : 61.01 | |
| C | Heating | hRA : 38.81 | 59.3 |
| | | hOA : 10.21 | |
| | | hSA : 27.17 | |

Table 6과 같이 KTL 성능 시험 데이터와 CFD 시뮬레이션을 비교한 결과 외기 온도와 환기 온도는 동일하며, 토출되는 급기 온도의 경우 냉방 시 0.036°C, 난방 시 0.11°C정도 차이가 나타났다. 또한 현열 교환 효율을 비교해보면 냉방 시 0.33%, 난방 시 0.55%로 매우 미세한 차이가 나타났다.

4.3 전열 교환기 효율

기존 전열 교환기인 A형상, 물결무늬 소자인 B형상, 사각형 소자인 C형상에 대한 열 교환기의 성능을 비교하기 위해 효율을 산출하였다. Table 7과 Table 8에서는 전열 교환기 시험체의 시뮬레이션 결과를 통해 얻어진 배기구 토출 온도와 엔탈피를 산출식에 적용하여 구한 냉·난방 시 현열 효율 및 전열 효율을 나타내고 있다.

시험체 A의 냉·난방 시 현열 교환 효율은 각각 55.73%, 77.35%, 전열 교환 효율은 각각 44.36%, 62.03%로 나타났다. 시험체 B의 냉·난방 시 현열 교환 효율은 각각 62.54%, 79.1%, 전열 교환 효율은 각각 53.37%, 64.1%로 나타났다. 시험체 C의 냉·난방 시 현열 교환 효율은 각각 55.36%, 75%, 전열 교환 효율은 각각 43.85%, 59.3%로 나타났다. 전열 교환기 시험체 A, B, C의 냉·난방 시 현열 교환 효율 및 전열 교환 효율을 비교한 결과는 Fig. 9에서 나타났다. 시험체 B의 냉·난방 시 현열 교환 효율 및 전열 교환 효율이 가장 높게 나타났으며, 특히 효율이 가장 낮은 시험체 C에 비해 냉방 시 현열 교환 효율은 약 7.2%, 전열 교환 효율은 약 9.5%의 차이를 보였다.

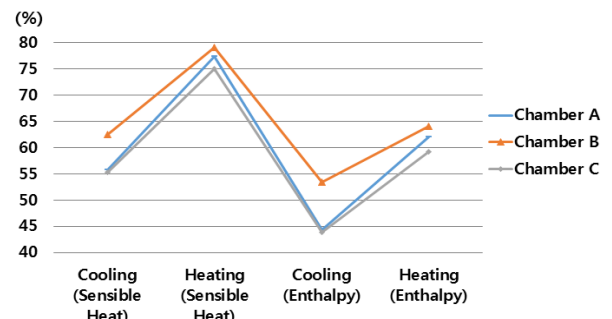


Fig. 9 Efficiencies of heat and enthalpy exchangers.

5. 결 론

본 연구는 CFD 시뮬레이션을 이용하여 전열 소자 형상의 열전달 특성을 확인하였고, 이를 통해 판형 전열 교환기의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 이후 전열 교환기 시험체 모델에 적용하여 효율을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 문헌 고찰 및 열 교환 소자에 대한 분석 결과 기존 열 교환 소자(A)와 물결무늬(B), 사각(C) 형상의 열 교환 소자에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. CFD 결과 C, A, B순으로 기류속도가 빠르게 나타났으며, 전면풍속에 따른 효율 및 정압손실 관계에 따라 B형상의 열 교환 소자 효율이 가장 높을 것을 판단되었다.
- (2) A, B, C형상의 열 교환기 시험체에 대한 시뮬레이션 결과 토출되는 기류속도는 C, A, B순으로 높게 나타났고 열 교환 효율은 B, A, C순으로 높게 나타났다. 따라서 토출되는 기류 속도와 열 교환 효율은 반비례 관계를 갖는 것으로 나타났다.
- (3) A형상 전열 교환기의 냉·난방 시 현열 교환효율은 각각 55.73%, 77.35%, 전열 교환효율은 각각 44.36%, 62.03%로 나타났다. B형상 전열 교환기의 냉·난방 시 현열 교환효율은 각각 62.54%, 79.1%, 전열 교환효율은 각각 53.37%, 64.1%로 나타났다. C형상 전열 교환기의 냉·난방 시 현열 교환효율은 각각 55.36%, 75%, 전열 교환효율은 각각 43.85%, 59.3%로 나타났다. 냉·난방 시 현열 교환효율은 B, A, C순으로 높았으며, 기존 열 교환기에 비해 B형상 열 교환기 현열 교환효율은 냉방 시 약 6.81%, 난방 시 약 1.8% 높았고, 전열 교환 효율은 냉방 시 약 9%, 난방 시 약 2% 정도 높은 것으로 나타났다.

References

1. Lee, E. J., Song, K. S., Oh, W. K., Cho, J. P., and

Kim, N. H., 2009, Performance of an enthalpy heat exchanger at Different Humidity Condition, Proceedings of the Autumn Conference, pp. 1595-1599.

2. Kim, N. H., Lee, E. J., Song, K. S., and Oh, W. K., 2010, Thermal Performance of an enthalpy heat exchanger Made of Paper at Different Outdoor Temperatures and Humidities, The Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 34, No. 7, pp. 697-702.

3. Kim, N. H., Cho, J. P., Song, G. S., and Kim, D. H., 2008, Performance of a Plate-Type enthalpy heat exchanger Made of Papers Having Different Properties, Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 547-555.

4. Chung, M. H. and Oh, B. K., 2012, An Experimental Study on Performance of Paper Heat Exchangers for Exhaust Heat Recovery Ventilation System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 240-246.

5. Chung, M. H. and Oh, B. K., 2012, An Experimental Study on Performance Improvement for Heat Recovery Ventilation System, SAREK Summer Conference, Vol. 6, pp. 1013-1016.

6. Kwak, K. M., Bai, C. H., Kim, J. Y., and Chu, E. S., 2007, A Study on Improvement of Performance for Perforated Type Total HEX Element, SAREK, Vol. 19, No. 7, pp. 529-536.

7. STAR-CCM+ Training, CD-adapco.

8. Kim, D. G., Ha, B. Y., Kim, K. O., Kum, J. S., and Jeong, S. K., Research on Performance of Large Rotor-type Heat Recovery Exchanger using CFD Analysis on Surface Corrugation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 12, pp. 875-880.

9. KS B 6879, 2007, Heat-recovery ventilators.