



실험계획법을 이용한 곡선 유로 폴리스틸렌 열교환기의 온도교환효율 및 항균성능 분석

Analysis of Temperature Exchange Efficiency and Antibacterial Performance of Curved Euro Polystyrene Heat Exchangers through the Design of Experiments Method

박병용* · 전희준** · 오병철***

Beungyong Park* · Heejun Jun** · Byoungchull Oh***

* Assistant Professor, Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (bypark@hanbat.ac.kr)

** Coauthor, Researcher, Daeyoung Kong Jo System Co., LTD., South Korea (daeyoung7070@naver.com)

*** Corresponding author, Ph.D, Team Leader, Research and Development Division, International Climate & Environment Center, South Korea (obc9999@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: This study aims to design an efficiency-enhancing product by considering various factors and design variables to improve the heat exchange efficiency and antibacterial performance of the heat exchange element of the ventilation system for apartment houses. **Method:** In this study, the structure of polystyrene sensible heat exchanger element is proposed as a single-layer curved flow path structure. In addition, the factors affecting the heat exchange performance design were investigated, and the main factors and the influence between several factors were statistically analyzed using the 6-Sigma full factorial method. **Result:** It was found that the material (factor A), shape (factor B), and the single length of the heat exchange air passage (factor C) play an important role in achieving the target value required to design the heat exchanger. In particular, the effectiveness levels of factor B and factor C were found to be significant at $P < 0.05$. It was also determined that the optimal design to achieve 90% temperature exchange efficiency is a hexagonal shape of the sensible heat element and a single air passage length of 20 cm. Considering the manufacturing error and process reliability, the final 10 products were manufactured, and their average heating temperature exchange efficiency was 89.15. Experiments on antibacterial performance showed that the Alt 2 specimen using silver nanopowder mixed materials had excellent antibacterial ability against *E. coli* and *Staphylococcus aureus* with 99.9% each.

KEYWORD

폴리스틸렌
현열교환효율
열교환기
열회수형환기장치
공동주택

Polystyrene
Sensible Heat Exchange Efficiency
Heat Exchanger
Heat Recovery Ventilator
Apartment House

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 7, 2023
Final revision received Aug. 23, 2023
Accepted Aug. 28, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

탄소중립 구현을 위한 에너지 공급 및 수요 관리의 중요성은 꾸준히 확대되고 있다. 건물 부문의 온실가스 배출량은 간접배출량을 포함하여 24%를 차지하고 있다. 정부의 “2030 국가 온실가스 감축 로드맵 수정안” 발표에 따라 건물 부문의 에너지 효율화 정책 및 기술 개발의 필요성이 더욱 커지고 있다.

건축물의 에너지절약을 위한 방법으로 건물에서 배출되는 열량을 효과적으로 회수하는 폐열기술을 통해 실내의 냉방부하, 난방부하를 줄일 수 있다면 고단열·고기밀 건물에서는 가장 효과적인 에너지 절약 방법이 될 수 있다. 대표적인 건물의 폐열 회수 기술은 환기 시 외부로 배출되는 실내의 열을 회수하여 외기를 처리하는 방법이다. 또한 정부는 2006년부터 “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙”에 환기 시스템 설치를 의무화 하였다. 환기시스템의 국내 기술 기준을 살펴보면 다음과 같다. 산업표준화법으로 2003년 제정된 SPS-KARSE B 0030-0192 전열환기시스템에서의 제품 성능을 온도교환효율 90% 이상, 전열교환효율 65% 이상으로 규정하였다[1]. 2019년 위의 산

업표준이 폐지되었다. “건강친화형 주택 건설기준” 별표 3의 열회수 환기장치에서의 열교환 효율의 평가기준은 전열교환 냉방시 45% 이상, 난방시 70% 이상으로 제시되고 있다.

환기시스템에서 에너지 회수를 높이기 위해서 가장 중요한 기술은 열교환 소자이다. 박병용 외 2인(2020)의 연구에서는 국내 시장 제품 조사(n=959)를 통하여 전열, 현열, 잠열교환 효율과, 소비전력량 변화 추이를 조사하였다. 제품의 정격풍량에 따라 다소 차이는 있으나 냉방 전열교환효율은 평균 (54.2~59.7)%, 난방 전열교환효율은 평균 (73.4~74.3)%로 약 10여년의 시장 도입 후 큰 변화가 없는 것으로 보고되었다[2]. 조사대상 대부분의 제품이 국가 기술 기준치에서 요구하는 전열교환 효율 기준을 만족하기 위하여 온도, 습도 교환이 가능한 종이계 열교환 소자를 사용하고 있다. 그리고 종이계 열교환 소자는 오염으로 인한 문제로 정기적인 교체가 필요하고 폐기물로 처리되어야 한다. 지속가능한 재료를 통한 열교환 소자의 교체 없이 사용 가능한 기술 제안이 필요하다.

실내·외부의 온도변화가 있을 시에는 냉방, 난방 전열교환 효율은 변동된다. 또한 겨울철 실내에서 조리, 취사 및 세탁물의 건조 등의 수분이 증가하는 생활패턴에 따라 고습의 실내공기가 실외 배기 시 차가운 외기와 열교환이 이루어짐과 동시에 소자 표면에 결로 발생이 동반되기도 한다. 다수의 연구에서 환기장치 내부의 결로 수에 의한 내

부 부식과 효율저하 및 미생물 발생 문제 또한 보고되고 있다[3, 4]. 이에 대한 대책으로 열회수형환기장치의 경우 프리히터를 설치하여 환하기에 작동이 가능한 시스템으로 마련되어 있으나, 에너지 사용량 증가가 동반되기에 다른 대안을 통한 에너지 절약 솔루션과 열교환 소자의 미생물 균에 대한 항균 능력을 보유한 제품 개발이 필요하다.

이에 본 연구에서 공동주택용 환기시스템 열교환 소자의 열교환 효율 향상 및 항균 성능 기능 개선을 위하여 폴리스틸렌 현열 열교환 소자에 단층 곡선유로 구조를 제안하고 선형적으로 온도교환 효율 90 % 제품 개발 목표로 한다. 폴리스틸렌 재료를 이용하기에 세척 후 재사용이 가능하기에 지속사용 가능한 기술 개발을 기대한다. 현열 열교환 소자의 설계 단계에 6-Sigma 기법을 이용하여 열교환 소자의 성능 인자에 대하여 계량화하고 평가한다.

2. 선행연구 고찰

에너지 회수를 위한 장치의 핵심부품인 열교환기는 다양한 방식이 있다. 판형 열교환기, 로터형 열교환기, 판형과 로터에 흡습재(실리카겔, 데시칸트)를 도포하는 에너지 휠 방식이다. 공기대 공기를 매개 물질의 에너지 전달을 높이기 위하여 구성 재료의 종류에 따라서 종이 계, 폴리스틸렌 계로 크게 나누어 주며 공기 유로의 최적화 설계를 위한 다양한 방식들이 연구되고 있다.

우리나라의 공동주택용 공기 대 공기 열교환기 도입을 위한 초기 연구로 최대업(1991)의 연구에서는 고정형 향류 방식이 공기 대 공기 열교환기의 200 m³/h, 270 m³/h 풍량에 따른 현열, 잠열, 전열 교환 효율의 변화를 실험적 방법으로 검토하였다. 실내 배열의 현열 회수율은 67%~75%, 전열회수율은 60%~68%로 나타났다[5].

다중레이어 구조의 열교환기 효율의 개선 연구로는, Nakamura and Yasuhara 의 연구에서 냉동기의 다중 유로에서 균일한 유량을 얻을 수 있도록 다 경로 배열을 제안하는 것으로 열교환 소자의 유로 형성에 있어 유체저항과 열교환 효율 개선을 검토하였다[6]. 김민수(2006) 연구에서는 패스 수 변화에 따른 유량 분배 특성 및 열적 성능에 대해 해석하고 열교환기 설계 시 패스 수에 따른 성능변화의 기초자료를 마련하였다. 다 패스 열교환기가 성능이 높다고 보고되었다[7].

열교환기 내부 공기의 유동을 개선한 연구는 다음과 같다. 이득호(2019)의 연구에서는 핀-휀 유동에서 가이드 베인의 위치와 입사각에 따른 전열 및 유동 특성에 대하여 수치 해석적 방법을 이용하여, 가이드 베인 적용을 통해 유동의 방향을 바꾸면 유동을 원활히 하여 열교환기 벽면에서 전열 성능이 향상됨을 검토하였다[8]. 광경민 외 2인(2007)의 연구에서는 종이계 열교환 소자의 다공형 유로를 통한 열교환 성능 개선을 위해 기하학적 유로 구조 변경을 하였다. 열교환기 표면이 매끄러운 경우 온도효율은 2.5%, 습도효율은 5% 증가하는 것으로 실험 결과를 보고하였다. 열교환기의 유로 및 표면 개선을 통해서도 열효율이 개선할 수 있는 것을 나타낸다[9]. 장인혁 외 2인(2004)은 열교환기 내부 유로의 꺾임 각 변화에 따른 열/물질 전달 특성을 실험 및 해석하였다. 열교환기 제작을 위한 재료의 접합 또는 벽면 근처에서 와류가 발생하는 것을 해석으로 확인하였으며, 꺾임 각과 곡률이 열교환 효율과 압력손실에 영향을 미치는 것을 보고하였다[10].

F. Fathich et al.의 연구에서는 로터형 공기 대 공기 열교환기 내

부에 삽입된 평형 열교환기 핀을 대상으로 입구 공기 온도 변화에 따른 핀의 병렬 배치 등에 대한 사례 연구를 통한 열교환 휠의 효율성 향상 연구하였다[11].

경제적인 분석에 관한 연구로는 R.W. Besant(2000) 연구에서는 공기 대 공기 열 회수 장치에 대하여 운전조건에서의 현열 및 전열 교환에 의한 건물 운영 에너지 요금과 운영 비용 저감에 대해 검토를 하고 경제성 있는 실내공기질 관리 장치의 필요성을 언급하였다 [12]. 위와같이 열교환기의 성능개선을 위하여 성능에 영향을 미치는 인자들을 대상으로 다양한 연구가 진행되었다. 그러나, 열교환기 설계를 위하여 복합 인자에 대한 영향도를 분석하여 최적의 제품 설계에 적용한 연구는 한정적이다.

3. 곡선 유로 폴리스틸렌 현열 열교환기

3.1. 개요

본 연구에서는 에너지 효율 및 항균성능 기능의 현열 열교환기를 제안한다. Fig. 1.은 기존 종이계 열교환 형태와, 개발 단계 시작품인 Alt 1 type, Alt 2 type의 제품 사진을 나타낸다. 기존 종이계 열교환 소자의 경우 직선 방향의 유로를 가지며 사각 형태의 열교환 소자이다. 종이계 소재를 적용하였기에 온도, 습도 교환이 동시에 가능한 특징이 있다. 그러나 본 연구에서 제안하고 제작한 Alt 1 type과, Alt 2 type은 폴리스틸렌 재료를 이용하여 온도교환만 이루어지지만, 세척 후 지속사용이 가능한 장점이 있다. 열교환 효율을 높이기 위해 소자를 곡선과 단층으로 구성하여 열전달 면적을 증가시켰으며, 모듈형 타입처럼 적용화가 가능하도록 구조를 설계하였다. 열교환기 필요 용량에 맞추어 적층 레이어를 증가할수록 필요한 열교환기의 성능을 맞춰서 구성 할 수 있다. 급배기 공기의 잔류시간이 증가하도록 설계하고 통과 유로에 있어 공기저항을 최소화하기 위한 곡선형

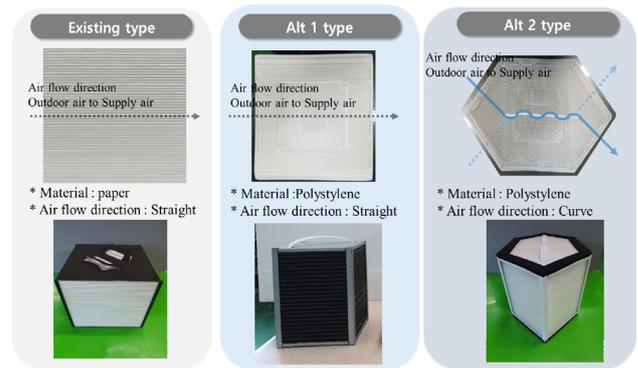


Fig. 1. Schematic view of heat exchanger element

Table 1. Specification of the heat exchanger element

Content	Specification	Function
Existing type	- Material : paper - Size : (240×240×235) mm	Enthalpy exchange
Alt 1 type	- Material : polystyrene - 1 Layer Size : (240×240×4.5) mm (52 Layer)	Sensible heat exchange
Alt 2 type	- Material : polystyrene + Nano attached powder - 1 Layer Size : (320×160×4.5) mm (52 Layer)	Sensible heat exchange Antibacteria

유로 형상을 반영하였다. 열교환기 설계에 있어서 공기유로저항, 열교환 면적(길이)이 중요한 변수이기에 시작품 제작 시 소자의 형태를 사각형태의 기본형에서 육각 형태로 변형하였으며, 열교환 면적을 증가시키기 위하여 돌기 형태 형상의 유로를 구조화하였다. 또한, Alt 2 type에는 항균 기능을 갖는 나노 입자 분말을 혼합재료로 사용하였다. Table 1.에 대상 열교환기의 사양 및 기능을 나타낸다.

3.2. 열교환기 디자인 설계

본 연구에서는 새로운 열교환기 제품 개발과 실험 검증에 위한 방법론으로 6-Sigma DFSS(Design for six sigma) 설계 방법을 이용한다. 본 방법은 신기술 제품 개발 단계에서 목표하는 성능 수준을 계획하고 효과적인 연구를 수행하는 방법이다. 실험계획법(DOE)을 활용하여 현열교환기의 열교환 효율 및 항균 성능 향상을 위해 열교환 소자의 형상 및 소재를 분석하였다.

먼저, 열교환기의 에너지효율 성능을 현열 기준 90% 구현을 위한 임계요인에 대한 요소를 분석하고 구체화하였다. 열교환기 효율에 영향을 미치는 주요 핵심요소를 정의하고 6-sigma DFSS 분석 방법을 이용하여 효과적인 설계 검증을 실시한다. Fig. 2.에 열교환기의 성능에 영향을 미치는 임계요인에 대한 다이어그램을 나타낸다. 열교환기 디자인 설계의 목적함수는 온도교환효율이며, 문헌조사를 통해 열교환 효율에 영향을 미치는 대표인자를 결정하였다. 대표인자는 소자의 종류, 열교환 길이, 열교환 형태로 사각형, 육각형 형태로 결정하였다. 풍량은 설계 풍량 120 m³/h 로 고정하였다.

열교환 효율 성능 측정에 영향을 미치는 측정점, 측정센서의 오차, 평가자에 대한 오류는 사전 검토 시 미비한 것으로 판단되어 검토 인자에서는 생략한다. 즉 측정시스템에 대한 오차는 신뢰성을 확인한 것으로 수집된 데이터에 대한 오차가 없는 것으로 판단하였다. 이에 설계의 영향인자인 열교환 소자의 재질, 열교환기 형상, 열교환 길이의 상호인자에 영향을 미치는 교호작용의 효과에 대한 검토를 위해 최종 목표 성능에 가장 큰 영향을 주는 치명인자 재료(A인자), 형태(B이나), 열교환 공기유로의 단일 길이(C인자)에 대한 6-Sigma 완전배치법을 통해 통계분석을 실시한다. 목적함수 y는 식 1과 같이 평가하였다. 3인자 2수준(완전부분배치)배치를 실시하여 주인자와 교호작용의 효과에 대한 검토를 실시한다. 종이제 사각형 소자를 베이스라인으로 하고 폴리스틸렌-사각형, 폴리스틸렌-육각형, 열교환 길이변화에 대하여 총 14개 샘플 검토를 실시하고

데이터를 취득하였다. 분석 단계에서의 다양한 파라미터 결과 값을 분석하여 열교환기 설계에 영향을 미치는 인자의 영향도 분석을 실시하였다.

$$\eta = \frac{t_{OA} - t_{SA}}{t_{OA} - t_{RA}} \times 100 \tag{Eq.1}$$

여기에서

η 은 온도 교환 효율 (%)

t_{OA} 는 외기 건구 온도 (°C)

t_{SA} 는 급기 건구 온도 (°C)

t_{RA} 는 환기 건구 온도 (°C)

4. 현열교환효율 성능실험

4.1. 현열교환효율 실험개요

3.2.절에서 기술된 바와 같이 열교환기 설계 인자와 설계된 실험계획을 바탕으로 실험을 진행하였다. 본 실험 평가를 위하여 국가산업 표준인 KS B 6879 열회수형환기장치 :2017 에 만족하는 평가장비를 이용하였다. Fig. 3.에 평가 장비의 개념도를 나타낸다. 실내와 실외로 환경을 묘사할 수 있는 챔버의 중앙에 열회수형 환기장치 테스트유닛을 설치하였다. 테스트 유닛으로 환기시스템은 2개를 제작하여 사각형이 평가 가능한 형태와 육각형이 평가 가능한 형태로 제작하였다. 테스트 유닛에는 온도교환 효율 검토에 필요한 소자가 장착될 수 있도록 하였다.

Fig. 4.에 Alt 2 type 의 평가를 위한 시제품의 사진을 나타낸다. 육각형 소자와 장치 프레임 사이를 통과하는 급기측 공기와 배기측 공기가 혼합되지 않도록 기밀하게 마감하였다. 실험에 사용되는 공기온도계는 저항식 온도계 PT 100 Ω 로 건구온도 4개, 습구온도 4개를 설치하였다. 풍량은 기외정압 100 Pa을 구현한 상태에서 설계 풍량 120 m³/h가 되도록 급기팬, 배기팬의 회전수를 조정하여 풍량 조건을 동일하게 하였다. 건구온도와 습구온도의 센서의 설치 위치는 산업표준의 부속서에서 제시하고 있는 덕트 내부 중앙에 설치하였다. 실내측과 실외측의 챔버는 평가 조건 환경을 구현하기 위하여 항온항습기를 통해 산업표준에서 요구하는 환경조건을 구현하였다. 실내측 조건은 22 °C, 상대습도 40%이며 실외측 조건은 2 °C, 상대습도 75%이다.

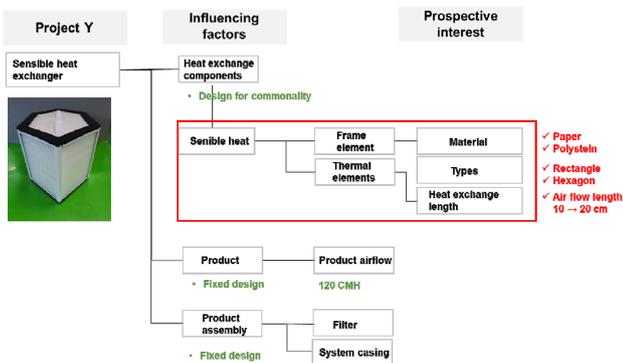


Fig. 2. Cause and effect diagram for sensible heat exchanger

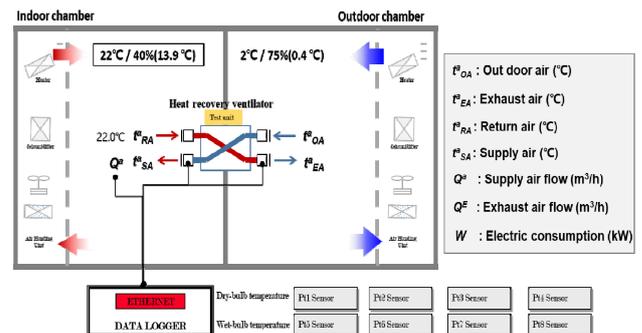


Fig. 3. Schematic view of test unit

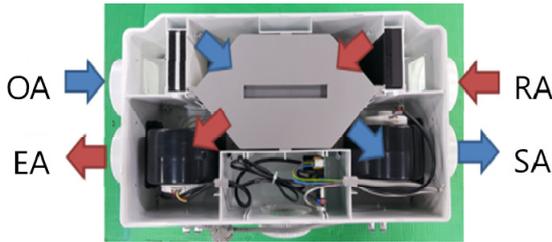


Fig. 4. Schematic view of Alt2 test product

4.2. 실험결과

본 시험에서는 열교환 소자 3인자 2수준(완전부분배치)배치를 실시하여 주인자와 교호작용의 효과에 대한 측정 데이터 분석을 실시하였다. Fig. 5.에는 3인자중 2인자 별의 측정 결과치를 나타낸다. 공기유로의 단일 통과 길이가 25cm의 경우의 사각형 소자의 종이게는 81.8%, 폴리스티렌 게는 82.1% 효율을 나타냈다. 재료에 따른 성능 차이는 크게 나타나지 않았다. 폴리스티렌 동일 재료의 사각형 타입과 육각형 타입으로 공기유로를 개선한 목적의 경우 사각형타입의 공기유로의 단일 통과 길이가 20cm는 78.1%, 길이 25cm의 경우 82.1%로 길이가 길수록 향상되었으며, 육각형 타입으로 만들고 30cm의 경우 85.3%로 나타났다. 종이게 사각형소자의 공기유로의 단일 통과 길이가 20cm의 경우 70.8%, 25cm의 경우 81.8%, 30cm의 경우 85%로 나타났다. 위와 같이, 2인자 별 분석을 통해 B인자 형태(형태)와, C인자 (공기유로의 단일 통과 길이)는 주 효과의 유의수준 $P < 0.05$ 이하로 주요 영향을 미치는 주인자(possible factor)이다. 그러나, A인자 재료에 있어서는 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. Fig. 6.은 3개의 인자의 교차에 따른 영향을 나타낸다. 각 인자 교차에 따른 교호작용은 없는 것으로 분석되었다. 즉 재료, 타입, 열교환 길이 중 두 요인들의 효과가 독립적으로 작용하고 다른 요인의 변화에 따라 영향을 미치지 않는 것이다. 결과적으로 현열 열교환 소자의 효율을 높이기 위한 최적해는 열교환 면적을 크게하는 형태로 육각형 타입과 열교환 길이를 길게하는 형태로 분석되었다. 열교환기의 온도교환 효율에 대한 통계분석 최종결과로 Fig. 6.(B)와 같이 선택된 결과치를 최적화 하였다. 최적화 결과는 통계 소프트웨어인 Minitab으로 실행되었으며, 목표성능 90%를 만족하기 위한 선택 인자들의 조합으로 목표 특성치를 만족하는 해를 찾게 되었다. 또한 Table 2.에 현열교환 회귀 방정식 산출 결과를 나타낸다. A 인자와, B인자, C인자와 교차영향 인자를 변수로 표현되며, 식을 이용하여 변수별 영향도를 추가 검토 할 수 있다.

Fig. 6.에서 최종적으로 목표함수 y 를 찾기 위한 최적해는 현열소자의 육각형 형태와 현열 소자의 단일 공기 통과 길이를 30cm로 하는 것이 바람직한 것으로 확인되어 열교환기 디자인 설계의 최적값을 결정하였다. Fig. 7.은 최적해를 통해 결정된 폴리스티렌 소자의 육각형 열교환기를 이용한 온도교환 효율에 대한 반복성능 실험 결과이다. 현열열교환기를 사출모형으로 생산한 10개 소자에 대한 동일 성능을 발휘하고 있는지에 대한 신뢰성 결과에 대한 결과 치에 대한 산포도 이다. Table 3.과 같이 최종 설계안에 대한 반복 온도교환 효율 성능평가를 실시하는 것으로 제품 제작시의 오차 및 공정 신뢰성을 확인 하였다. 최종 평균온도 교환 효율은 89.15 이며, 평균값과의 표준 편차인 Z- value(표준점수) 5.65 이다.

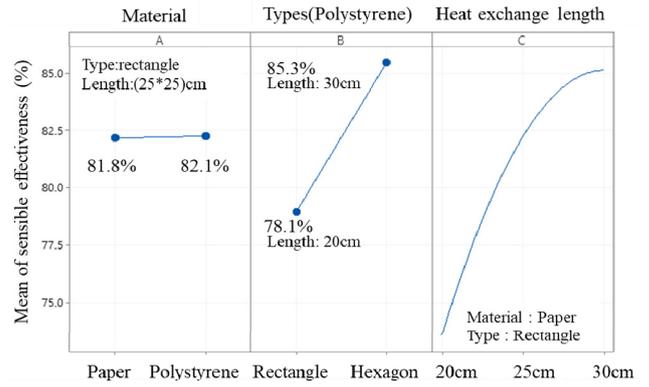


Fig. 5. Test result of sensible effectiveness to change 2 factor in heat recovery ventilator

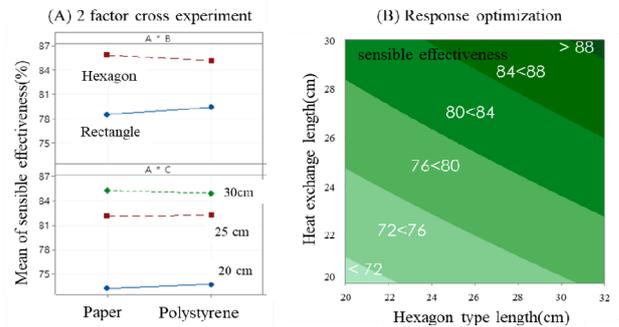


Fig. 6. Response optimization plot obtained from the test result of sensible efficiency

Table 2. Result of sensible effectiveness regression equation

Content	Regression equation in uncoded units
-	38.8200
A	0.6810
B	3.2562
C	4.6250
C*C	-0.1155
A*B	-0.3880
A*C	-0.0425

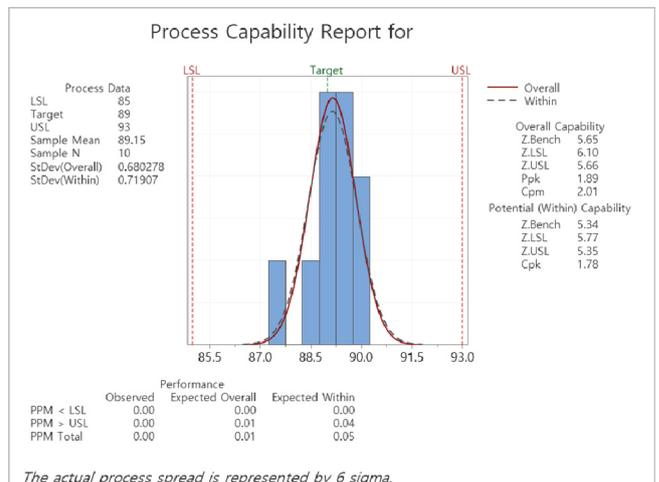


Fig. 7. Test result of Alt 2 heat recovery ventilators

Table 3. Final process capability analysis

Project Y		Spec limit	Target	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10
Sensible heat exchanger	Sensible heat exchanger rate	LSL 85	90	89	90	89	89.5	89.2	89.8	89.4	87.7	88.4	89.5
Average							89.15						
Z-Value							5.65						

5. 항균효율 시험

5.1. 시험개요

열교환 소자의 폴리스틸렌 표면이 미생물 성장을 억제하는 항균 성능에 대한 검토를 위하여 JIS Z 2801:2010 표준법을 이용하였다. 본 연구에서 폴리스틸렌 소자의 재료에 따라 Alt 1 폴리스틸렌 소자와 Alt 2 폴리스틸렌과 은나노 파우더 혼합 소자에 대하여 재료혼합에 따른 소자의 항균성을 평가하였다.

항균 성능 평가를 위한 열교환 소자의 시편 크기는 40mm×40mm을 사용하였다. 사전 준비 작업으로 평가대상 시료의 멸균을 위하여 UV(파장 254nm)를 조사하여 살균을 실시한다. 항균 성능 평가를 위한 균주는 Staphylococcus aureus ATCC 6538P 황색포도상구균과 Escherichia coil ATCC 8739 대장균을 이용하였다. 유효시험 조건은 최대생균 수와 최저생균 수의 차와 평균 생균수의 비율이 0.2 이하일 경우 유효 시험조건으로 판단하고 시험하였다. 감소율은 Eq. 2를 이용한다.

$$\frac{10^{U_i} - 10^{A_i}}{10^{U_i}} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

여기에서

U_0 는 접종직후 비처리 시험편에서 회수된 생균수의 상용로그 평균 ($6.2 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$ 세포이상/cm²)

U_t 는 24시간 후 비처리 시험편에서 회수된 생균수의 상용로그 평균 (6.2×10^1 세포이상/cm²)

A_t 는 24시간 후 처리 시험편에서 회수된 생균수의 상용로그 평균 (세포/cm²)

5.2. 시험결과

Alt 1 시편과 Alt 2 시편에 대한 Staphylococcus aureus ATCC 6538P 황색포도상구균과 Escherichia coil ATCC 8739 대장균의 항균성능 평가 결과를 Table 4.에 나타낸다. 각 표준균이 유효한 조건에서 평가 될수 있는 조건에서 실험을 진행하였으며, 각 시험별 유효균 조건이 0.2 이하로 대장균의 경우 0.032, 황색포도상구균의 경우 0.029 조건이다.

최종 항균력 검토 결과 Alt 1 샘플 시료는 황색포도상구균 항균능력 15.4%, 대장균 항균능력 14.3%로 나타났다. Alt 2시료는 폴리스틸렌과 은 나노 파우더가 함유되어 황색포도상구균과 대장균의 항균효과가 99.9%로 나타났다.

Table 4. Result of bacteriostatic test at JIS Z 2801

Test	Staphylococcus aureus ATCC 6538P		Escherichia coil ATCC 8739	
	Alt 1	Alt 2	Alt 1	Alt 2
Concentration of inoculum (CFU/ml)	5.4×10 ⁵		4.9×10 ⁵	
Validation test conditions	0.032		0.029	
U_0	1.4×10 ⁴		1.2×10 ⁴	
U_t	7.0×10 ⁵		6.8×10 ⁵	
A_t	5.9×10 ⁵	<10	5.8×10 ⁵	<10
Reduction (%)	15.4	99.9	14.3	99.9

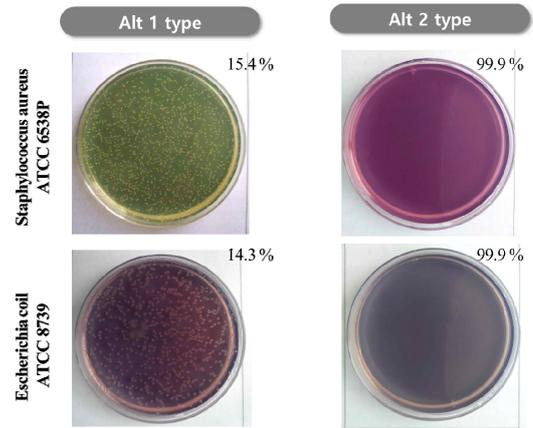


Fig. 8. Schematic of bacteriostatic plate test result

본 결과는 재료 샘플에 대한 항균능력 평가로 열교환 소자 모듈화 되어 상시 소자의 환경이 습한조건에서의 항균효과를 대표하지 않는다. Fig. 8.에 각 시편에 따른 항균성능 반응 플레이트의 결과를 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 공동주택용 환기시스템 열교환 소자의 열교환 효율 향상 및 항균 성능 기능 개선을 위하여 폴리스틸렌 현열 열교환 소자에 단층 곡선유로 구조를 제안하였다. 열교환 성능 설계에 영향을 미치는 인자를 조사하고, 6-Sigma 완전배치법을 통한 주인자, 복수인자에 대한 영향도를 통계분석 방법을 이용한 실험 검토를 실시하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 공기 대 공기 열교환기 설계를하는데 필요한 목표 수치를 수치 달성하기 위해 재료(A인자), 형태(B인자), 열교환 공기유로의 단일 길이(C인자)가 중요한 역할을 함을 확인하였다. 특히 B인자와 C인자의 유효수준이 $P < 0.05$ 로 주요한 영향을 미친 것으로 나타났다.

2. 온도교환 효율 목표 90%를 달성하기 위한 최적 설계는 현열 소자의 육각형 형태와 단일 공기 통과 길이를 30cm로 하는 것으로 열교환기 디자인 설계의 최적값으로 결정하였다.

3. 제품 제작시의 오차와 공정신뢰성을 고려하여 제품을 제작하였으며, 난방조건 평균 온도교환효율은 89.15%로 나타났다.

4. 항균성능에 관한 실험 결과, 은나노 파우더 혼합재료를 사용한 Alt 2 시편의 항균성능으로 황색포도상구균과 대장균 항균효과 99.9%로 나타났다.

이로써 본 연구는 공동주택용 환기시스템 열교환 소자의 열교환 효율과 항균성능을 개선하기 위한 다양한 요소와 설계 변수를 고려하여 실험적인 방법으로 최적의 결과를 도출하였다. 공기유로 설계 내용에 있어서는 기업공동연구의 비밀보장에 따른 제약된 정보를 기입하고 있다. 추후 연구에서는 제품의 외관 재질, 보온성 등 기타 요인을 설계인자로 반영하여 고효율 제품 설계를 실시하고 성능 검토하고자 한다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1F1A1071084).

References

- [1] Korean Association of Air Conditioning, Refrigerating and Sanitary Engineers, Total heat-recovery vented system, SPS-KARSE B 0030-0192:2016.
- [2] 박병용, 조진균, 오병철, 열회수형환기장치의 성능 현황 및 평가방법에 관한 연구, 설비공학논문집, 제34권 제3호, 2022, pp.145-153. // (B.Y. Park, J.K. Cho, B.C. Oh, A study on performance status and test standard of heat recovery ventilator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 34(3), 2022, pp.145-153.)
- [3] 전병현 외 4인, 전열교환 환기시스템의 운전상태에 따른 결로 발생에 관한 연구, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2012, pp.191-194. // (B. H. Heon et al., A study on the dew condensation according to the operational conditions of heat-recovery ventilator, Korean Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Winter Conference, 2012, pp.191-194.)
- [4] 김원준, 정재원, 현열 및 잠열교환 효율 차이를 고려한 전열교환 환기장치의 결로방지방용 예열코일 용량산정에 관한 연구, 한국건축환경설비학회 논문집, 제11권 제3호, 2017, pp.197-202. // (W.J. Kim, J.W. Jeong, Determination of preheat coil capacity in an energy recovery ventilator considering the differences in sensible and latent effectiveness values, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 11(3), 2017, pp.197-202.)
- [5] 최대엽 외 4인, 고정형 대향류방식 전열교환기 성능평가에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 계획계, 제11권 제2호, 1991, pp.325-328. // (A.Y. Choi et al., An experimental study of the performance of counterflow fixed pipe type total heat exchanger, Architectural Institute of Korea Conference, 11(2), 1991, pp.325-328.)
- [6] Y. Nakamura, W. Jia, M. Yasuhara, Incompressible flow through multiple passages, Numerical Heat Transfer, Part A, 16, 1989, pp.451-465.
- [7] 김민수, 이관수, 다패스 다분지 열교환기의 패스 수에 따른 성능분석,

- 대한기계학회논문집 B권, 제30권 제8호, 2006, pp.741-748. // (M.S. Kim, K.S. Lee, Performance analysis on a multi-pass multi-branch heat exchanger according to pass arrangement, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 30(8), 2006, pp.741-748.)
- [8] 이득호 외 4인, 가이드 베인을 부착한 핀-핀 유동에서 가이드 베인 위치와 입사각에 따른 전열 및 유동 특성에 관한 수치적 연구, 한국추진공학회지, 제23권 제3호, 2019, pp.35-43. // (D.H. Lee et al., numerical study on the effect of guide vane position and angle on heat transfer and flow characteristics of a pin-fin channel with a guide vane. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 23(3), 2019, pp.35-43.)
- [9] 광경민 외 3인, 다공형 유로를 적용한 전열교환기 소자의 성능향상에 관한 연구, 설비공학논문집, 제19권 제7호, 2007, pp.529-536. // (K.M Kwak et al., A study on improvement of performance for perforated type total HEX element. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 19(7), 2007, pp.529-536.)
- [10] 장인혁, 황상동, 조형희, 열교환기 내부 유로의 꺾임각 변화에 따른 국소 열/물질전달 특성 고찰, 대한기계학회 논문집 B권, 제28권 제7호, 2004, pp.789-799. // (I.H. Jang, S.D. Hwang, H.H. Cho, Effects of corrugation angle on local heat/mass transfer in wavy duct of heat exchanger. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 28(7), 2004, pp.789-799.)
- [11] F. Fathieh et al., Determination of air-to-air heat wheel sensible effectiveness using temperature step change data, International Journal of Heat and Mass Transfer, 87, 2015, pp.312-326.
- [12] R.W. Besant, C.J. Simonson, HVAC system design employing certified air-to-air energy recovery equipment, ASHARE Journal, 42(5), 2000, pp.31-35.