

# 배기열 회수용 플라스틱 열교환기의 성능 향상에 관한 연구

김진혁<sup>\*†</sup>, 유성연<sup>\*</sup>, 한규현<sup>\*</sup>, 강형철<sup>\*\*</sup>, 윤홍익<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단, <sup>\*\*</sup>(주)가교테크

## A Study on the Performance Improvement of Plastic Heat Exchanger for Exhaust Heat Recovery

Jin-Hyuck Kim<sup>\*†</sup>, Seong-Yeon Yoo<sup>\*</sup>, Kyu-Hyun Han<sup>\*</sup>, Hyung-Chul Kang<sup>\*</sup>, Hong-Ik Yun<sup>\*\*</sup>

**ABSTRACT:** In order to control indoor air quality and save energy, it is needed to install a suitable heat exchanger for heat recovery. A plastic heat exchanger have many advantages and can recover 50~80% of the temperature difference between supply and exhaust air. The purpose of this research is to evaluate the performance of plastic heat exchanger with different shapes. Pressure drop and heat transfer characteristics of plastic heat exchangers are investigated for various velocities.

**Key words:** Plastic heat exchanger(플라스틱 열교환기), Performance improvement(성능향상), Exhaust heat recovery(배기열회수)

### 1. 서론

현재 유래가 없는 초고유가 시대의 도래와 교토프로토콜이라 불리는 지구온난화 방지를 위한 국제협약인 기후변화협약의 발효 등으로 인해 화석에너지의 사용이 위축되고 에너지 효율기준 등에 대한 국내외 압력이 강화될 것으로 예상된다. 이에 따라서 기존 시스템의 효율 향상 등을 통한 에너지 절약의 필요성이 증대되고 있다. 지금까지 배기열 회수용 판형 열교환기로는 주로 알루미늄 열교환기를 사용해 왔지만, 낮은 가격과 우수한 가공성 그리고 부식에 염려가 적고 가

볍다는 장점 때문에 플라스틱 등 비금속 소재로 전환하고 있는 추세이다.

플라스틱은 알루미늄과 같은 다른 현열교환기 재료에 비해 낮은 열전도도를 갖지만 표면에 각종 열전달 촉진체를 설치함으로써 고효율의 열교환기를 얻을 수 있다. Yoo et al<sup>(1,2)</sup>은 열전달 촉진 기법으로 물결형, 덩플형 및 사각기둥형의 리브를 부착한 난류촉진형 열교환기를 설계하여 제작하고 성능평가를 수행하여 각각의 열교환기에 대한 열전달 특성 및 압력 손실에 관한 성능을 비교, 검토하였다. Hastroni et al<sup>(3)</sup>은 삼각채널의 플라스틱 판형 열교환기를 제작하고 성능시험을 수행하여, 핀 형상에 비해 삼각채널 형상이 70% 이상 열효율이 향상된다는 것을 밝혔다. Afansayev et al<sup>(4)</sup>은 평판에 얇은 덩플( $\delta/D=0.067$ )을 설치하여 열전달 성능과 압력손실에

† Corresponding author  
Tel.: +82-42-821-8901; fax: +82-42-821-8894  
E-mail address: maple80@cnu.ac.kr

관하여 연구하였으며, 의미 있는(30~40%) 열전달의 향상과 함께 압력손실이 커진다는 것을 알았다. Elyyan et al<sup>(5)</sup>은 두 가지 다른 형태의 딴플 형태를 통해 특정한 레이놀즈 수 범위의 (Re=200~15,000) 수치해석을 통해 층류, 전이영역, 난류영역 각각의 열유동 현상을 해석하였다. Sahiti et al<sup>(6)</sup>은 열교환기의 표면에 일반적으로 알려진 몇 가지 서로 다른 형상의 열전달 촉진체를 설치하고 각각의 열전달 성능향상 효과를 비교하였다. 또한 Zhang<sup>(7)</sup>은 박막에 기초를 둔 배기열 회수 환기장치를 통해 공기조화 성능이 향상되었으며, cross-flow 의 경우 현열 및 잠열전달이 효율적이지 못했지만, counter-flow는 현열 및 잠열, 엔탈피 효율이 증가하고 박막의 두께가 얇아수록 열 및 습기 전달이 증가한다는 것을 밝혔다. Mats<sup>(8)</sup>는 배기열 회수 열교환 소자를 이용한 환기시스템의 실험을 통해 연간 절약되는 에너지의 양을 산출하였다.

본 연구에서는 PP와 PVC 플라스틱 소재를 사용한 열교환기를 전열면 외형과 표면의 형상을 각각 다르게 설계·제작하고 이를 통한 열전달 성능 향상을 성능시험을 통해 알아보았다.

## 2. 성능시험장치 및 성능시험방법

### 2.1. 성능시험장치

#### 2.1.1. 플라스틱 열교환기

본 연구에서는 플라스틱 열교환기의 모델로 Fig. 1에서 보는 것과 같이 사각 평판형(square plate), 육각 평판형(hexagon plate), 사각 딴플형(square dimple), 육각 딴플형(hexagon dimple), 그리고 육각 물결형(hexagon corrugate) 등 5가지를 설계·제작하였다. 플라스틱은 두께 0.4mm의 PP와 PVC를 사용하였다.

사각 평판형은 다른 모델의 열전달 성능 향상 효과를 알아보기 위한 기준모델로서, 전열면을 아무런 조작성이 없는 평판의 PP 소재를 사용하였다. 유동을 분리하고 외형을 유지하기 위한 프레임은 양쪽은 폭 5mm, 중앙은 폭 2mm의 아크릴을 사용하였다. 육각 평판형은 사각 평판형과 마찬가지로 전열면의 아무런 조작성이 없는 플라스틱 필름을 사용하여 제작되었으며, 열전달이 이루어지는 유동의 형태를 직교류와 대향류의 특성을

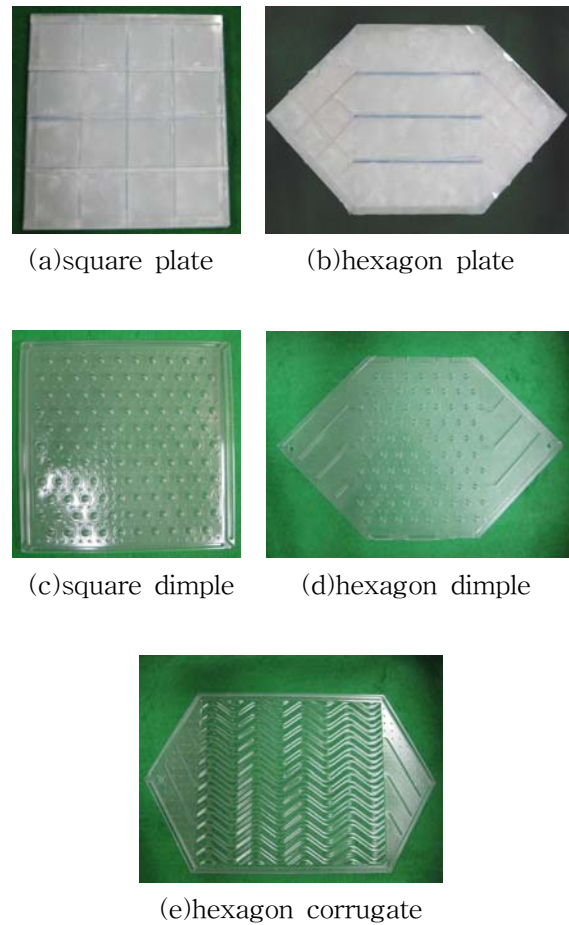
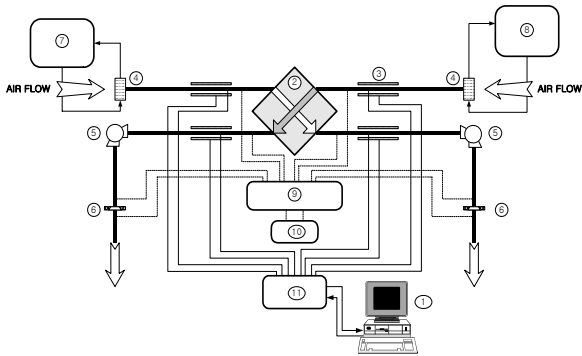


Fig. 1 Photo of plastic heat exchanger.

동시에 갖는 육각형의 전열면으로 제작하였다. 사각 딴플형 열교환기는 전열면의 형태는 유동이 직교류를 형성하는 사각형의 모양을 가지면서, 전열면에 두가지 크기의 반구형 딴플이 엇갈림 배치되어 있는 모델이다. 이를 통해 난류를 촉진하고 와류를 발생시켜 높은 열전달 성능을 기대할 수 있는 모델로 큰딴플이 4mm, 작은 딴플이 1mm의 반지름을 가진다. 육각 딴플형 열교환기는 딴플이 설치되어 있으며, 육각형으로 제작되었다. 육각 물결형은 육각형의 전열면을 가지며, 산업용 열교환기에서 많이 사용되는 herringbone형 열교환기의 형상을 응용하여 전열면을 물결모양의 요철로 형성한 열교환기이다.

#### 2.1.2 성능시험 장치

플라스틱 판형 열교환기의 성능시험을 위해 본 연구에서 설계·제작한 시험장치를 Fig. 2에 나



1: PC 2: heat exchanger 3: insulated wall 4: heat exchanger 5: fan 6: flow meter 7: hot water 8: cool water 9: scanning box 10: micro-manometer 11: data acquisition system  
 ⋯: pressure measuring —: temperature measuring

Fig. 2 Schematic of test apparatus.

타냈으며, 송풍기, 덕트, 가열·냉각기, 열교환기 시험부, 측정 및 제어장치, 자료획득장치 등으로 구성되어 있다.

각각의 항온조로부터 설정된 온도의 뜨거운 물과 찬물을 열교환기에 순환시켜 입구 공기와 열전달을 통해 일정한 온도의 공기를 유입시키도록 하였으며, 항온조에서의 온도제어를 통해 입구 공기 온도를 조절할 수 있게 하였다. 유량측정을 위해서 송풍기의 출구 측에 노즐을 설치하여 평균유량을 측정할 수 있도록 하였으며, 인버터를 이용하여 유량을 조절할 수 있도록 하였다.

압력손실을 측정하기 위해 열교환기 입·출구 덕트 위·아래 부분과 노즐에 압력측정 탭을 설치했다. 온도 측정에는 T-type 열전대가 사용되었다.

## 2.2 성능시험방법

같은 유동 조건에서 열전달 성능시험은 압력손실 측정 시험과 병행하여 수행되었다. 두 유체간의 온도차는 20°C로 설정하여, 두 입구에서의 공기 입구 온도를 25°C와 45°C로 하였다. 시험을 수행하기에 앞서 일정시간 동안 예비운전을 하여 정상상태로 만들었으며, 설정된 유속에 대한 열교환기내의 정상상태를 만들기 위해 10분간의 작동 후 2분간의 측정값을 평균값으로 하여 대표온도로 하였다.

열전달 성능시험은 열교환기 입·출구에서의 온도를 T-type 열전대(thermocouple)를 이용하여

측정하였으며, 면 풍속은 0.3~3m/s 범위에서 변화시키면서 측정하였다. 이때 두 채널에서의 속도는 같게 하였다.

## 3. 성능시험 결과 및 고찰

### 3.1 압력손실

열교환기에 대한 압력손실 측정 실험과 열전달 성능시험은 열교환기에서의 입구속도를 변화시키면서 함께 수행하였다. Fig. 3은 속도의 변화에 대한 열교환기 내에서의 압력손실을 측정한 것으로 압력손실은 속도가 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 경향을 보여주고 있다. 압력손실은 열교환기의 복잡성에 비례하며, 사각 평판형의 경우 전열면이 단순하고 유동이 방해물 없이 일직선으로 빠져 나가므로 가장 낮은 압력손실을 나타낸다. 육각 평판형의 경우에는 전열면 조각이 없지만 사각의 형상과는 달리 유동이 격이는 부분이 존재하기 때문에 압력손실이 사각에 비해 증가함을 알 수 있다. 다음으로 전열면에 덤플이 있는 덤플형 열교환기가 평판형에 비해 높은 압력손실을 보인다. 이때 사각 덤플형이 육각 덤플형에 비해 압력손실이 크게 나타나는데, 그것은 육각형태의 경우에는 입출구에 덤플이 없는 부분이 존재하는데 비해 사각 덤플의 경우에는 더 많은 열전달 촉진체가 삽입되어 있기 때문이다. 또한 형상이 가장 복잡한 육각 물결형의 압력손실이 가장 높게 나타났다.

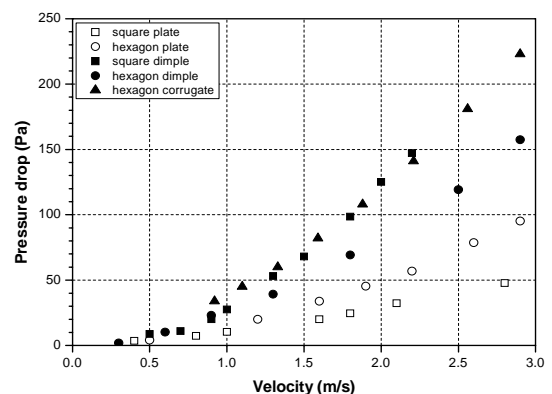
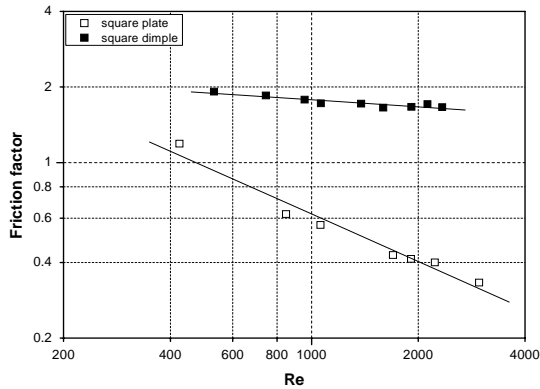
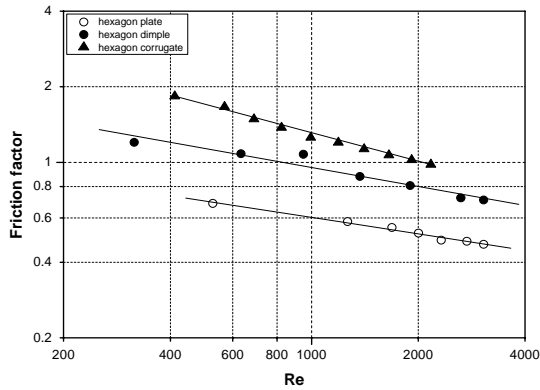


Fig. 3 Variation of pressure drop with velocities.



(a) square



(b) hexagon

Fig. 4 Variation of friction factor with velocities.

다섯 가지의 서로 다른 열교환기에서 측정된 압력손실의 정량적인 비교를 위해 마찰계수로 무차원화하여 Re 수와의 관계로 비교하였다. 마찰계수  $f$ 는 압력강하와 관로의 형상에 의해 결정되며 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \cdot \frac{D_h}{L} \quad (1)$$

이때, 수력직경은 다음과 같이 유로의 단면적  $A$ 와 접수길이  $P_w$  (wetted perimeter)의 비로 정의된다.

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (2)$$

마찰계수  $f$ 를 Re 수의 함수로 비교한 결과를

Fig. 4에 나타내었다. 마찰계수는 Re 수의 지수승에 대하여 선형적으로 감소하였으며, 물결형 열교환기의 마찰계수가 전영역에서 가장 큰 분포를 보이며, 평판형 열교환기가 가장 작은 분포를 보인다. 다른 열교환기의 마찰계수변화와는 달리 물결형 열교환기의 경우 Re 수의 증가에 대하여 급격하게 감소하는 경향을 보이며, 사각 뒹플형의 경우에는 감소폭이 가장 작게 나타났다.

### 3.2 열전달 성능

판형 열교환기에서 두 유체가 주고받은 열량은 손실을 고려하지 않을 경우 서로 같게 되며 이때 각각의 열량은

$$Q_h = \dot{m}_h c_h (T_{hi} - T_{ho}) \quad (3)$$

$$Q_c = \dot{m}_c c_c (T_{co} - T_{ci}) \quad (4)$$

이다. 또한, 두 유체 사이의 열전달량은 두 유체가 수직으로 교차하는 직교류(cross flow)이므로

$$Q = UAF\Delta T_m \quad (5)$$

대수평균온도차는 향류에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}} \quad (6)$$

제작된 열교환기의 유로는 향류가 아닌 직교류이므로 향류에 대하여 정의된 식 (5)는 수정계수  $F$ 를 곱하여 수정된 값을 이용하게 된다. 수정계수  $F$ 는 열교환기의 기하학적 형상과 고온 및 저온 유체의 입출구온도에 의존한다. Bowman, Mueller 등이 제시한 수정계수 차트에서 두 유체가 모두 비혼합인 단일통로 직교류에 해당하는 그래프에 실험으로부터 얻어진 입출구온도를 대입하여 수정계수  $F$  값을 구하여 사용하였다.

열교환기의 성능해석과 설계를 위해서는 총합 열전달계수  $U$ 를 구해야 하며 이를 이용하여 열

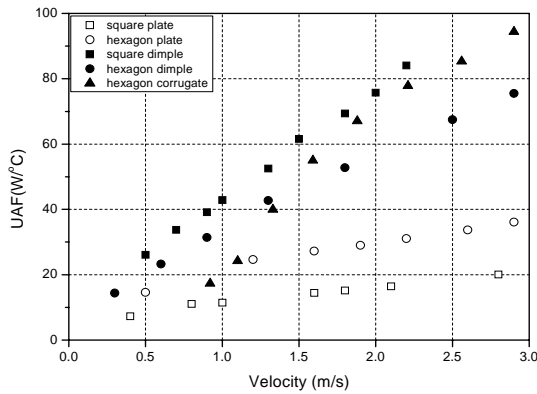


Fig. 5 Variation of UAF with velocities.

교환기의 열전달 향상 및 성능평가를 내릴 수 있다. 판형 열교환기의 경우 총합열전달계수는 식 (7)과 같이 각 요소에서의 열저항의 합으로 나타내어 총합열전달계수를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_c} \quad (7)$$

열교환기의 열성능을 좌우하는 대류열전달계수는 판의 형상과 크기, 유체의 유동조건에 따라 달라지며 실험식을 사용하여 계산하거나 실제 실험을 통하여 얻게된다. 식 (7)의 우변 첫 번째 항과 세 번째 항은 대류열저항이고 두 번째 항은 전도열저항을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 플라스틱의 열전도계수  $k$ 는 0.12W/mK 이다.

열교환기의 성능평가 및 해석에서 많이 사용하는 유용도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\text{실제 열전달량}}{\text{가능한 최대의 열전달량}} = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} \quad (8)$$

열교환기에서의 열전달량은 뜨거운 공기와 찬 공기 사이의 온도차와 유량에 따라 달라지게 되므로 열전달량을 이용한 열교환기의 열전달 성능 비교는 적절하지 못하다. 따라서 열교환기에서의 열전달 능력은 총합열전달계수  $U$ 와 열전달면적  $A$ 의 곱인  $UAF$ 로 나타낼 수 있다. 실험을 통해 측정된 유량과 열교환기 입·출구에서의 온도를 통해  $UAF$  값을 구하였다. 이러한  $UAF$  값을 유속에 따른 변화량으로 Fig. 5에 나타내었다.

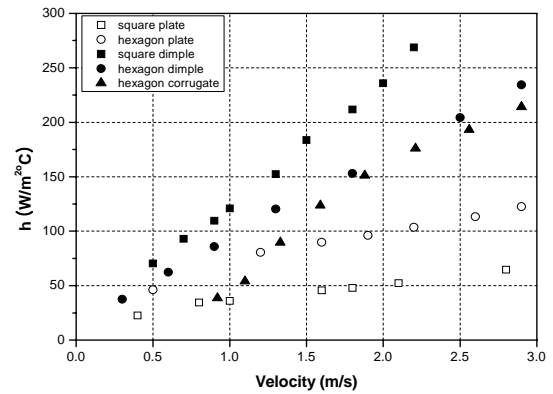


Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient with velocities.

$UAF$  값은 속도의 변화에 따라서는 사각 뒤편형과 육각 물결형이 거의 비슷하게 가장 높은 값을 나타냈으며, 육각 뒤편형이 그보다 다소 낮게 나타났고, 육각 평판형과 사각 평판형의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. 사각 평판형에 비해 육각 평판형이 높은 값을 보이는 것은 전열면이 대향류의 특징을 가지고 있기 때문에 열전달이 촉진되었기 때문이다. 또한 뒤편형의 경우 평판형에 비해 열전달 촉진의 정도가 큰 것으로 나타났으며, 사각 뒤편형이 육각 뒤편형에 비해 더 많은 뒤편의 설치됨으로 인하여 육각 뒤편형이 대향류의 열교환 형태를 가지고 있음에서 불구하고 더 높은 값을 보였다. 또한 유동이 가장 복잡하고 열교환의 형태가 대향류의 특징을 가질 뿐만 아니라, 전열면적의 크기가 가장 큰 육각 물결형 열교환기의  $UAF$ 값이 가장 크게 나타났다.

열교환기의 열교환 용량을 가늠할 수 있는 인자가  $UAF$ 라면 평균 열전달계수  $h$ 는 열교환기의 열전달 성능을 나타내는 주요 인자라고 할 수 있다. 열교환기의 양쪽 유로가 모두 같은 형상을 하고 있으므로 식 (7)에서  $h_c$ 와  $h_h$ 는 서로 같다고 볼 수 있다. 따라서 평균열전달계수는 얻어진  $UAF$  값을 식 (7)에 적용하여 구하였다.

Fig. 6은 각 열교환기의 평균열전달계수의 크기를 나타낸 결과이다. 그 결과는  $UAF$  값의 분포와 유사하지만 육각 물결형의 경우 다른 열교환기와는 달리 다소 낮은  $h$  값을 나타내는데, 그것은 육각 물결형 열교환기의 전열면적이 다른

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하고 에너지관리공단에서 관리하는 에너지·자원기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Yoo, S. Y., Jung, M. H. and Lee, Y. M., 2005, A Study on the Factors Affecting the Performance of Plastic Plate Heat Exchanger, J. of SAREK, Vol. 17, No. 9, pp. 839 -848.
2. Yoo, S. Y., Jung, M. H., Kim, K. H. and Lee, Y. M., 2005, An Experimental Study on the Performance of Plastic Plate Heat Exchanger, J. of SAREK, Vol. 17, No. 2, pp. 117 -124.
3. Hetsroni, G. and Moyak, A., 1996, Comparison of several heat transfer enhancement technologies for gas heat exchangers, Trans. of ASME, J. of Heat transfer, Vol. 118, pp. 897-902.
4. Afanasyev, V. N., Chudnovsky, Ya. P., Leontiev, A. I. and Roganov, P. S., 1993, Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate, Exp. Thermal Fluid Science, Vol.7, No. 1, pp. 1-7.
5. Elyyan, M. A., Rozati, A. and Tafti, D. K., 2008, Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement in compact heat exchangers, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 11, pp. 2950-2966.
6. Sahiti, N., Durst, F. and Dewan, A., 2006, Strategy for selection of enhancements for heat transfer enhancement, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 3392-3400.
7. Zhang, L. and Jiang, Y., 2000, Analysis of thermal performance and energy heat mass transfer in a membrane based energy recovery ventilator, Energy, Vol. 25, pp. 515-527.
8. Mats, F., 2002, Exhaust air heat recovery in buildings, Int. J. of Refrigeration, Vol. 25, pp. 439-449.

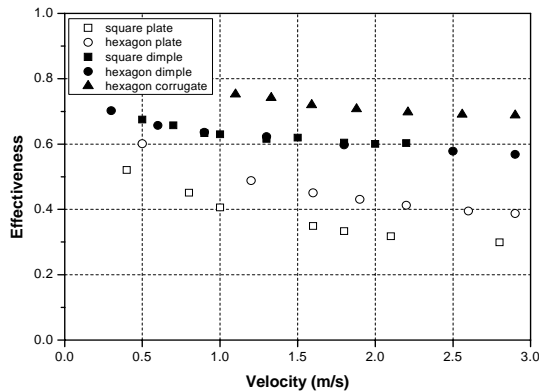


Fig. 7 Variation of effectiveness with velocities.

열교환기에 비해 상대적으로 크기 때문이다.

Fig. 7은 식 (8)로 정의된 열교환기의 유용도를 이용하여 열교환기의 열전달 성능을 비교한 결과이다. 형상에 대한 유용도의 비교에서는 속도를 기준으로 살펴 보았을 때, 육각 물결형 열교환기에서 가장 높은 유용도를 보였다. 사각 뎀플형과 육각 뎀플형은 거의 비슷한 값을 나타냈으며, 육각 평판형이 사각 평판형 보다는 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 평판형 열교환기와 비교했을 때, 2.5m/s 기준으로 육각 물결형, 사각 뎀플형, 육각 뎀플형, 육각 평판형이 각각 125%, 95%, 93%, 30% 가량 증가된 유용도 값을 보였다. 유용도의 값은 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며 감소의 폭은 육각 평판형과 사각 평판형 열교환기에서는 상대적으로 크고, 나머지 열교환기의 경우 작은 것으로 나타났다.

## 4. 결론

- (1) 열교환기의 압력손실은 형상이 복잡할수록 높게 나타났으며, 육각 물결형이 가장 높고 사각 평판형이 가장 낮게 나타났다.
- (2) 열전달 성능은 대향류의 형태에 가까운 육각형의 유로를 갖고 있으며, 뎀플과 물결형상등 전 열면이 복잡해짐에 따라 높아지는 것을 알았다.
- (3) 사각 평판형과 비교했을 때, 2.5m/s 기준으로 육각 물결형, 사각 뎀플형, 육각 뎀플형, 육각 평판형이 각각 125%, 95%, 93%, 30% 가량 증가된 유용도 값을 보였다.