

# 환경조절장치용 미세유로형 증발열교환기의 성능특성 연구

이형주\* · 유영준\* · 민성기\* · 황기영\*

## A Study on Performance Characteristics of an Evaporative Heat Exchanger with Mini-channels

Hyungju Lee\* · Youngjune Yoo\* · Seongki Min\* · Kiyoung Hwang\*

### ABSTRACT

An experimental study on performance characteristics of an evaporative heat exchanger based on tests for various operating conditions was presented. The heat exchanger maximizes the heat transfer rate per unit volume by applying mini-channels for both the air and coolant flow paths, and minimizes the amount of the coolant by using its latent heat of evaporation. The heat exchanger was manufactured by etching the flow paths, brazing the heat exchange plates, and welding the in/out ports of the media. The basic performance test has confirmed that the heat exchanger met its design requirements, and the results of the map test were analyzed to produce the performance characteristics quantitatively depending on the air inlet temperature, the air flow rate, and the coolant flow rate.

### 초 록

본 논문에서는 항공기 탑재용 환경조절장치에 사용하기 위한 미세유로형 증발열교환기의 성능 특성에 관한 연구결과를 제시하였다. 미세유로형 증발열교환기는 가능한 적은 양의 냉매로 고온부의 열량을 흡수할 수 있도록 저온부 냉매의 증발잠열을 이용하고 단위 체적당 열전달 면적의 극대화를 위해 미세유로를 이용하는 개념이다. 설계된 공기 및 냉각수 유로를 에칭을 통해 가공하고, 이들을 적층하여 브레이징으로 접합한 후 입출구 포트를 용접함으로써 열교환기를 제작하였다. 제작된 열교환기는 기본 성능시험을 통해 요구조건대로 설계/제작되었음을 확인하였고, 다양한 운용조건에 대한 성능 맵 시험을 수행하여 입구 공기온도, 공기 유량 및 냉각수 유량 변화에 따른 열교환 성능특성을 정량적으로 파악하였다.

Key Words: Environmental Control System(환경조절장치), Heat Exchanger(열교환기), Mini-channels(미세유로), Latent Heat of Evaporation(증발잠열)

\* 국방과학연구소 제1기술본부 5부

† 교신저자, E-mail: leehjadd@gmail.com

일반적으로 항공기에 적용되는 환경조절장치는 냉매의 상변화 과정을 이용하는 Vapor Cycle 방식과 엔진블리드 공기의 단열팽창 효과를 이용하는 Air Cycle Machine 방식으로 구분된다 [1]. 이 시스템들은 내부에서 고온의 작동유체를 냉각하기 위한 열교환기가 필수적으로 요구되는데 대부분의 열교환기들은 고온의 유체를 냉각하기 위해서 저온부에 냉각용 공기 또는 별도의 냉매를 공급하며 열교환하는 방식을 사용한다. 이와 같은 냉각시스템에서 고온부 냉각 성능에 영향을 미치는 요소는 저온부 냉매의 유량, 비열, 그리고 냉매의 입출구 온도차이다. 이들 중 저온부 냉매의 입출구 온도차는 열교환기의 배치 및 설계 결과에 크게 좌우되고, 비열은 물질 자체의 물성치이므로 냉매 선정시 가능한 한 큰 것으로 결정하기 때문에, 모든 조건이 결정된 후 능동적으로 제어가능한 유일한 변수는 냉매의 유량이 된다[2]. 따라서 고온부 유체를 충분히 냉각시키기 위해서는 효과적인 유로설계와 적절한 냉매유량 확보가 필수적이다. 그런데 일반적인 열교환기와는 달리 항공기 탑재용 환경조절장치에 사용될 열교환기는 자체의 부피 및 중량이 가능한 한 작아야 하고, 소요되는 냉매의 양 또한 최소화되어야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 조건을 만족시킴과 동시에 열교환기가 장착될 환경조절장치 시스템의 요구조건에 맞도록 설계/제작된 미세유로형 증발열교환기에 대하여, 다양한 운용 조건에서 열교환 성능 및 압력손실 특성 확인 시험을 실시하였다. 시험 결과는 1차적으로 열교환기 성능 맵 형태로 정리하였으며, 결과에 대한 심층적인 분석을 통하여 각 성능 파라미터에 대한 열교환기의 성능 변화를 정량화함으로써, 항공기용 환경조절장치 적용을 위해 새로이 설계 제작된 미세유로형 증발열교환기의 다양한 운용 조건에서의 성능 특성을 파악하여 제시하였다.

## 2. 증발열교환기 설계 및 제작결과

### 2.1 개발 요구조건

Table 1. 열교환기 운용 조건

구분	고온측(공기)			저온측(냉각수)	
	유량	온도	압력	유량	온도
I	0.03 kg/s	300℃	220 kPa	2.32 g/s	99℃
II	0.03 kg/s	160℃	225 kPa	0.67 g/s	99℃

Table 2. 열교환기 성능 요구조건

구분	공기 출구온도	열교환 효율 (Effectiveness, $\epsilon$ )	공기 압력손실
I	130℃	0.846	5.0 kPa
II	110℃	0.820	5.0 kPa

항공기용 환경조절장치 탑재를 위하여 열교환기에 요구되는 기술적 극복 사항들은 다음과 같다.

- 1) 단위 부피당 열전달 면적 극대화
- 2) 압력손실 최소화
- 3) 소요냉매의 자체 탑재 및 탑재량 극소화
- 4) 구조물의 소형/경량화
- 5) 주어진 환형 공간에 대한 형상 최적화

이를 극복하기 위하여 가능한 한 적은 양의 냉매로 고온부의 열량 흡수를 최대화할 수 있도록 저온부 냉매의 증발잠열을 이용하고, 단위 체적당 열전달 면적의 극대화를 위해 미세유로를 이용하는 “미세유로형 증발열교환기” 개념을 도입하였다. 환경조절장치 시스템 성능분석을 통해 도출된 미세유로형 증발열교환기의 운용 조건 및 성능 요구조건은 다음 Table 1 및 2와 같다.

### 2.2 설계 결과

위 Table 1 및 2의 운용/성능 요구 조건을 만족시키면서 환경조절장치 허용 공간인 환형 공간에 적합한 형상을 가지는 미세유로형 증발열교환기는 다음 Fig. 1 및 2와 같이 설계되었다.

공기 유로는 유동 진행방향이 주기적으로 30°씩 꺾어져 압력 손실은 극소화하면서 공기의 유효 유로길이를 증대시킴과 동시에 지속적인 유동의 박리 현상을 유도하여 열전달 효율이 증가하도록 설계되었다. 한편 냉각수 유로는 유동 진

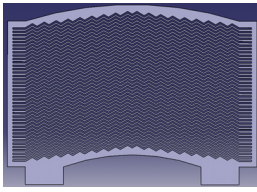


Fig. 1 공기 유로 형상설계 결과

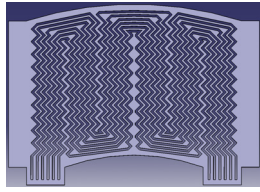


Fig. 2 냉각수 유로 형상설계 결과

행방향을 주기적으로 45°씩 꺾음으로써 냉매의 유효 유로길이를 늘리고 미세유로 내부 전열면에서의 증발현상이 촉진되도록 설계되었다. 또한 유로의 폭과 구조물(리브) 폭의 비율이 에칭 가공 및 브레이징 공정상 제작이 가능한 범위 내에서 유로의 집적도를 극대화하는 방향으로 설계되었다. 이와 같이 결정된 공기 및 냉각수 유로 형상으로 상세설계를 진행한 결과[3], 성능을 만족시키기 위한 전열 면적을 가지기 위해서는 유로 1층당 높이가 공기 유로의 경우 1.6mm, 냉각수 유로의 경우 0.8mm이고 총 적층수는 19층으로 결정되었다.

### 2.3 제작 결과

증발열교환기의 구조물 재질은 운용조건을 고려하여 알루미늄으로 선정되었다. 특히, AL 3003-T6를 모재로, AL4104를 브레이징을 위한 필러로 하는 이중의 알루미늄 판에, 설계된 공기 및 냉각수 유로를 에칭 공정에 의하여 미세 가공하였다.

제작된 각 유로판은 “공기 유로판 2개 + 분리 격판 + 냉각수 유로판 1개 + 분리 격판”의 순으로 적층되어 고온의 노 내부에서 일정한 온도로 가열되어 브레이징 접합된다. 이렇게 제작된 증발열교환기의 몸체 길이는 130mm, 높이는 약 72.0mm가 되는데, Fig. 3은 브레이징 완료된 증발열교환기 코어의 형상을 보여준다. 길이 방향의 양쪽 끝으로는 공기 입출구 포트가, 전면의 양쪽 끝에는 냉각수 입출구 포트가 각각 용접되면서 제작이 완료되며 그 형상은 Fig. 4와 같다.

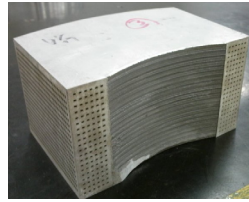


Fig. 3. 증발열교환기 코어 제작 결과



Fig. 4. 증발열교환기 최종 제작 형상

## 3. 시험 준비 및 결과

### 3.1 시험 준비

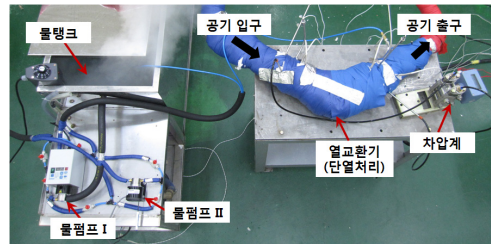


Fig. 5. 증발열교환기 시험 장면

제작된 증발열교환기는 각종 시험을 위하여 Fig. 5와 같이 설치되었다. 공기 입출구와 냉각수 입출구를 각각 고온공기 가열기와 냉각수 공급장치와 연결하여, 주어진 압력과 온도로 공기 및 냉각수의 공급이 가능하도록 하였고 각 유체의 입출구에는 성능 계측을 위한 온도 및 압력 센서와 차압계를 설치하였다. 온도 계측용으로는 RTD(Pt100 , A-class) 센서를, 압력 계측용으로는 Kulite XTEH-10LAC-190 센서를 사용하였다. 한편 공기 유량계는 OVAL 사의 Vortex Flowmeter EX-DELTA를, 냉각수 유량계는 EMERSON 사의 Micro Motion ELITE Flowmeter CMF010M을, 공기 입출구 차압계는 SPRIANO 사의 CESI-EX 모델을 사용하였으며, 시험 중 데이터는 초당 2회(2Hz)로 계측하였다.

### 3.2 기본 성능시험

기본 성능시험은 Table 1의 운용조건에 대하여 Table 2의 성능 요구조건이 달성되었는지를

Table 3. 열교환기 기본 성능시험 결과

구분	출구온도		압력손실	
	요구조건	시험결과	요구조건	시험결과
I	130℃	120℃	5.0 kPa	4.6 kPa
II	110℃	107℃	5.0 kPa	3.9 kPa

확인하기 위한 시험이다. 본 시험에서는 Table 1의 냉각수 공급온도를 99℃로 세팅하는 것이 불가능하여 상온(약 25℃)에서 시험을 실시하되, 온도차에 해당하는 만큼 냉각수 유량을 줄여서 시험하였다. 기본 성능시험 결과는 Table 3과 같으며, 조건 I과 II 모두 공기 출구온도와 압력손실의 설계 요구 조건을 만족하였다.

### 3.3 성능 맵 시험

성능 맵 시험은 다양한 열교환기 운용 조건에서 성능시험을 실시하여 제품의 전반적인 특성을 파악하고 그 결과를 표준화하여 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램에 열교환기 성능 데이터로 반영하기 위해 수행한다. 본 증발열교환기에 대한 맵 시험 조건은 다음 표와 같다.

Figure 6에는 공기 입구압력이 200 kPa일 때 공기 입구온도에 따른 공기 유량 및 냉각수 유량별 열교환 효율(Effectiveness,  $\epsilon$ ) 맵이 도시되어 있다. 결과를 살펴보면 모든 실험조건에서 효율은 예상대로 냉각수 유량( $\dot{m}_{water}$ )이 증가하고, 공기 유량( $\dot{m}_{air}$ )이 감소함에 따라 증가한다. 또한, 높은 공기 유량( $\dot{m}_{air} = 0.03$  kg/s)에서는 냉

Table 4. 성능 맵 시험 조건

구분	파라미터	설정값
1	공기 입구온도, $T_{air\ in}$	150℃, 300℃, 450℃
2	공기 입구압력, $P_{air\ in}$	50, 100, 200, 300 kPa
3	공기유량, $\dot{m}_{air}$	0.01, 0.02, 0.03 kg/s
4	냉각수 유량, $\dot{m}_{water}$	0.6, 1.5, 2.3 g/s

각수 유량 증가에 대한 효율 증가 효과가 다른 조건에 비하여 명확하게 나타남을 알 수 있다. 열교환 성능에 이어서 제작품별 압력손실 특성을 비교한 맵은 다음 Fig. 7과 같다. 앞에서와 마찬가지로 공기 입구압력 200 kPa 조건에서 입구 온도 변화에 따른 압력손실 특성을 볼 수 있는데, 공기유량이 증가할수록 압력손실이 커지는 특성을 확실히 알 수 있다. 한편, 대체적으로 냉각수 유량이 증가하면 압력손실이 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 냉각수 유량 증가에 따른 열교환기 내부 평균공기온도가 하강하여 평균공기밀도가 상승함으로써 평균속도가 감소했기 때문이다. 또한 공기 공급온도( $T_{air\ in}$ )가 감소하면 압력손실이 감소하였는데, 이 현상도 공기 온도 하강에 따른 열교환기 내부 평균 공기밀도 상승과 이에 따른 평균속도 감소 때문이다.

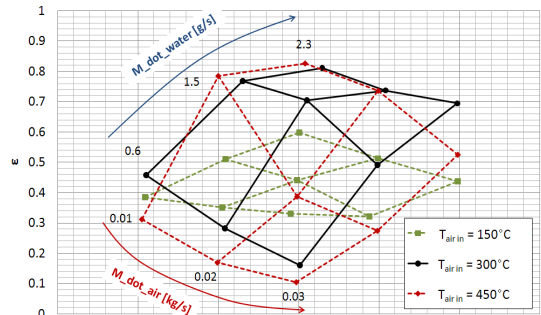


Fig. 6 공기 입구압력  $P_{air\ in} = 200$  kPa 조건에서의 공기 입구온도( $T_{air\ in}$ )별 열교환 성능 맵

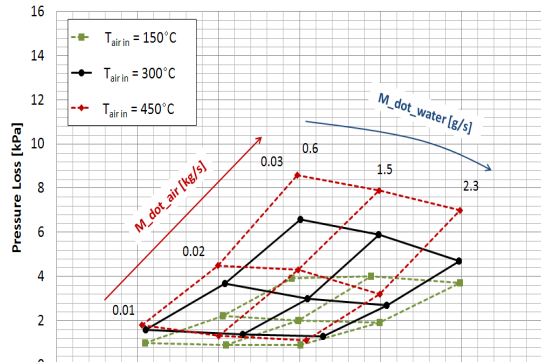


Fig. 7 공기 입구압력  $P_{air\ in} = 200$  kPa 조건에서의 공기 입구온도( $T_{air\ in}$ )별 압력손실 맵

#### 4. 결과 분석 및 성능특성 확인

앞 절의 성능맵 시험 결과에서는 열교환 효율( $\epsilon$ )에 영향을 미치는 변수로 공기 온도, 공기 압력, 공기 유량 및 냉각수 유량의 4가지 파라미터를 사용하였으며, 그 중 공기 유량과 냉각수 유량이 열교환 성능에 미치는 영향을 확실히 알 수 있다. 즉, 공기 유량이 증가하면  $\epsilon$ 는 감소하고 냉각수 유량이 증가하면  $\epsilon$ 가 증가하므로, 이 관계를 정량화하기 위하여 무차원 변수인 냉각수 유량 대 공기 유량 비를 다음과 같이 도입하였다.

$$W/A = \frac{m_{water, 99^\circ C}}{m_{air}} \quad (1)$$

Equation 1의 무차원 변수  $W/A$ 를 이용하여 각 공기 입구온도별  $\epsilon$ 를 나타내면 다음 Fig. 8과 같이 일정한 경향성을 보인다. 그림에 의하면  $\epsilon$ 와  $W/A$ 의 관계는 공기온도에 따라 달라지므로, 다른 조건이 동일한 경우 공기온도의 효과가 크게 작용함을 알 수 있다.

공기 입구압력이  $\epsilon$ 에 미치는 영향을 확인하기 위해  $T_{air\ in} = 300^\circ C$ 일 때 각 공기 압력별  $\epsilon$ 와  $W/A$ 의 관계를 나타낸 그림은 다음 Fig. 9와 같다. 그림에 보이는 바와 같이 공기 공급압력은  $\epsilon$ 와  $W/A$ 의 관계에 미치는 영향이 미미한 것으로 파악되며, 따라서 이후의 분석에서 공기 압력의 영향은 무시하였다.

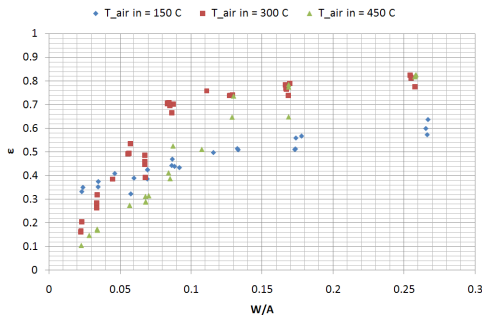


Fig. 8 냉각수-공기 유량비( $W/A$ )에 따른 각 공기 입구온도( $T_{air\ in}$ )별 열교환 효율( $\epsilon$ )

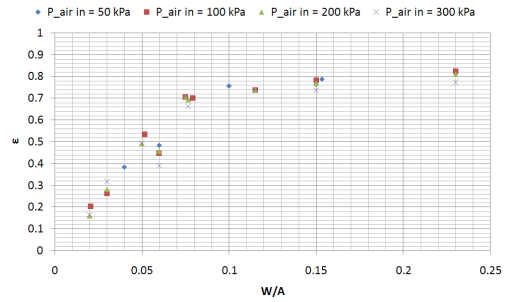


Fig. 9 공기 입구온도  $T_{air\ in} = 300^\circ C$ 일 때 냉각수-공기 유량비( $W/A$ )에 따른 각 공기 입구압력( $P_{air\ in}$ )별 열교환 효율( $\epsilon$ )

위 결과를 토대로 각 공기 입구온도별  $\epsilon$ 와  $W/A$ 의 관계를 로그함수의 형태로 근사(curve fitting)하면 다음 Fig. 10과 같다.

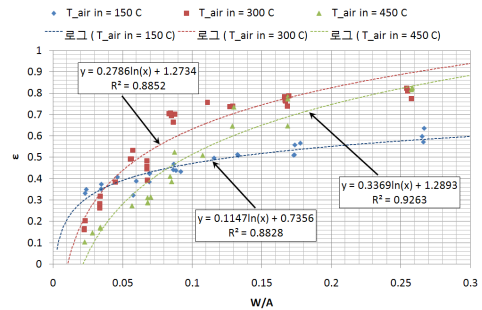


Fig. 10 각 공기 입구온도( $T_{air\ in}$ )별  $\epsilon$ 와  $W/A$ 의 관계 및 로그함수를 이용한 curve fitting 결과

위 결과에 의하면  $\epsilon$ 과  $W/A$  사이의 관계는 다음 Eq. 2의 형태를 가진다.

$$\epsilon = C_1 \ln(W/A) + C_2 \quad (2)$$

여기에서 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 는 공기 공급온도에 따라 변화하는데, 공기 공급온도에 따른 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 의 변화를 구한 결과는 다음 Table 5와 같으며, 이를 공기 공급온도에 따라 그려보면 다음 Fig. 11 및 12와 같이 로그함수의 관계를 가진다.

Table 5.  $\epsilon$ 과 W/A 사이의 관계식 계수

$T_{air\ in} [^{\circ}C]$	$C_1$	$C_2$
150	0.1147	0.7356
300	0.2786	1.2734
450	0.3369	1.2893

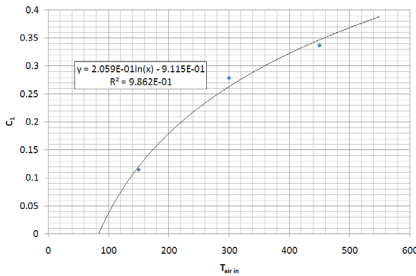


Fig. 11. 계수  $C_1$ 과 공기 공급온도  $T_{air\ in}$ 의 관계 및 로그함수를 이용한 curve fitting 결과

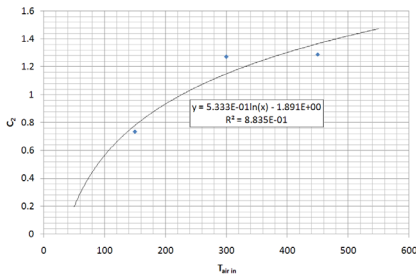


Fig. 12. 계수  $C_2$ 와 공기 공급온도  $T_{air\ in}$ 의 관계 및 로그함수를 이용한 curve fitting 결과

따라서 공기 공급온도  $T_{air\ in}$ 의 효과는 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 에 다음의 Eq. (3)의 관계로 반영될 수 있으며, 임의의 공기온도 조건에서의  $\epsilon$ 는 다음식에 의해 내삽(interpolation)되어 구해진다.

$$C_1 = 0.2059 \ln(T_{air\ in}) - 0.9115 \quad (3-1)$$

$$C_2 = 0.5333 \ln(T_{air\ in}) - 1.891 \quad (3-2)$$

위에서 도출된  $\epsilon$ 와 W/A 사이의 관계식, 계수  $C_1$  및  $C_2$ 와  $T_{air\ in}$ 사이의 관계식을 이용하여 계산된 결과와 실험 결과를 비교해 보면 Fig. 13 및

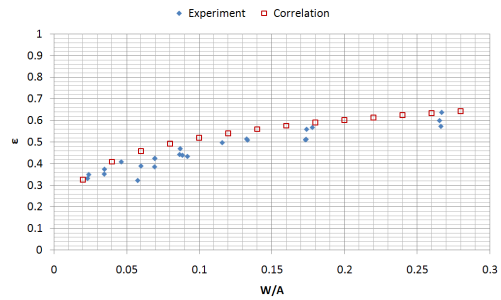


Fig. 13. 공기 입구온도  $T_{air\ in} = 150^{\circ}C$ 일 때 냉각수-공기 유량비(W/A)에 따른 열교환 효율( $\epsilon$ )의 실험 결과와 Correlation 결과 비교

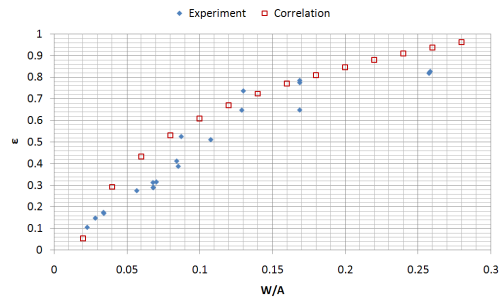


Fig. 14. 공기 입구온도  $T_{air\ in} = 450^{\circ}C$ 일 때 냉각수-공기 유량비(W/A)에 따른 열교환 효율( $\epsilon$ )의 실험 결과와 Correlation 결과 비교

14와 같다. 아래 결과에 의하면  $T_{air\ in} = 150^{\circ}C$ 와  $450^{\circ}C$ 일 때 모두  $W/A = 0.05 \sim 0.15$  사이에서 실험치와 Correlation 사이의 오차가 다소 크지만, 그 외의 조건에서는 전반적으로 Correlation에 의해 구해진  $\epsilon$ 값이 실험치와 유사하였다.

따라서 본 Correlation은 제작된 미세유로형 증발열교환기의 전반적인 성능 특성을 포함하므로 공기 입구온도, 공기 유량 및 냉각수 유량에 따른 열교환 효율을 예측할 수 있으며, 이 결과는 특히 본 열교환기가 장착되는 환경조절장치 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램에 열교환기 성능 데이터로 반영하는 것이 가능하다.

## 5. 결 론

항공기 탑재용 환경조절장치의 주요 구성품으

로 개발된 미세유로형 증발열교환기는 가능한 적은 양의 냉매로 고온부의 열량을 흡수할 수 있도록 저온부 냉매의 증발잠열을 이용하고 단위 체적당 열전달 면적의 극대화를 위해 미세유로를 이용하는 개념이 도입되었다. 설계된 공기 및 냉각수 유로를 에칭 가공하고, 가공된 유로 판들을 적층하여 브레이징으로 접합한 후 입출구 포트를 용접함으로써 열교환기를 제작하였다. 기본 성능시험을 통해 주어진 운용 조건에서 공기 출구온도와 공기 압력손실 등이 개발 요구조건을 만족하는 것으로 확인되었다. 한편 다양한 운용조건에 대한 성능 맵 시험을 수행하여 입구 공기온도, 공기 유량 및 냉각수 유량 변화에 따른 열교환 성능특성을 정량적으로 파악하였다.

성능 맵 시험 결과 열교환 성능 및 압력손실 특성이 공기 공급온도에 따라 크게 영향을 받고 있음을 확인하였다. 그리고, 맵시험의 주요 변수인 공기 공급온도, 공기 공급압력, 공기 유량, 냉각수 유량에 따른 열교환 효율( $\varepsilon$ ) 변화를 분석한 결과, 공기 공급압력의 효과는 미미하였고 다른 변수들은 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이로부터 무차원 변수인 냉각수-공기 유

량비  $W/A$ 를 도입하고  $\varepsilon$ 과의 관계를 분석함으로써  $W/A$ 는  $\varepsilon$ 과 일정한 함수 관계를 가짐을 실험 결과로부터 확인하였다. 이는 열교환 효율( $\varepsilon$ )이 공기 유량, 냉각수 유량 및 공기 입구온도와 밀접하게 관계되어 있음을 의미하며, 이 결과는 특히 본 열교환기가 장착되는 환경조절장치 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램에 열교환기의 대표적인 성능 데이터로 반영하는 것이 가능하다.

### 참 고 문 헌

1. 유영준, 민성기, 임진식 “모델링을 활용한 환경조절시스템의 개념설계 연구”, 2009 유도무기 학술대회, 2009
2. 이형주, 유영준, 민성기 “물의 증발잠열을 이용하는 미니채널 열교환기의 실험적 연구”, 한국추진공학회 2010 추계학술대회, 2010
3. 이형주, 유영준, 민성기, 황기영 “물의 증발잠열을 이용하는 미세유로 열교환기의 설계 기법 연구”, 2010 유도무기 학술대회, 2010