

BTMS용 열교환기의 형상에 따른 성능 비교 part 1: Offset Fin과 Dimple 타입의 비교

Performance Comparison on Heat Exchanger for BTMS part 1: Comparison between Offset Fin and Dimple Type

주영현* · 설성훈*†

Yeong-Hyeon Joo* and Sung-Hoon Seol*†

(Received 28 November 2023, Revision received 21 December 2023, Accepted 21 December 2023)

초록 : Offset fin 타입 열교환기는 우수한 열전달 성능으로 인해 소형화가 가능하다는 점 때문에 최근 활발하게 연구가 진행되고 있다. 하지만 동시에 비교적 큰 압력강하가 발생한다는 특징이 있어 설계 및 선정에 있어 면밀한 검토가 필요하다. 반면, 일반적인 Dimple 타입 열교환기는 Turbulator의 간단한 구조로 인해 이러한 압력강하는 줄이는데 상대적으로 유리하다. 열교환기를 평가함에 있어서는 열적(Thermal) 그리고 수력학적(Hydraulic) 특성을 함께 고려하는 것이 중요한데, 대표적인 방법이 Colburn j factor와 Fanning f factor이다. 본 연구에서는 상기의 두 가지 종류의 열교환기를 이러한 무차원수를 포함한 여러 가지 파라미터에 대하여 비교하였다. 주요한 결과로는 Dimple 타입의 j factor 값이 Offset fin 타입에 비해 작다는 점에서 열전달의 촉진을 위해 설치한 Dimple 타입의 Turbulator는 개선이 필요하며, 냉각수 유속을 과하게 증가시키는 Half-circuit 구조도 개선이 필요하다고 보여 진다.

키워드 : 배터리 열관리, 오프셋 핀 열교환기, 딴플 열교환기, 콜번 j 팩터, 패닝 f 팩터

Abstract : As a heat exchanger for battery thermal management system (BTMS), the offset fin is widely used to reduce the size of heat exchanger due to its substantially enhanced heat transfer. However, the large level of pressure drop occurs that needs to be considered carefully. On the other hand, the dimple type heat exchangers can be a good option to decrease pressure drop due to its relatively simple turbulator structure. When it comes to evaluate heat exchangers, it is essential to join thermal performance together with hydraulic performance by estimating Colburn j factor and Fanning f factor. This research compared two types of heat exchangers, namely an offset fin type and a dimple type, by various parameters including dimensionless numbers. As a result, presence of additionally placed turbulators of the dimple type heat exchanger seemed not practical because of still low Colburn j factor and steeper decrease of flow area goodness factor according to Reynolds number. In addition, application of half-circuit structure needs to be reconsidered due to the same reason.

Key Words : Battery Thermal Management System (BTMS), Offset Fin Ttype Hheat Exchanger, Dimple Type Heat Exchanger, Colburn j Factor, Fanning f Factor

* 설성훈(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184

*주영현(<https://orcid.org/0009-0008-2375-2586>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학전공

*† Sung-Hoon Seol(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : Assistant Professor, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184

*Yeong-Hyeon Joo(<https://orcid.org/0009-0008-2375-2586>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

| | |
|-------|--------------------------|
| A | : 열전달 면적 [m^2] |
| C_p | : 비열 [J/kgK] |
| D_h | : 수력직경 [m] |
| H | : 핀 높이 [m] |
| h | : 대류 열전달 계수 [W/m^2K] |
| k | : 열전도율 [W/mK] |
| l | : 핀 길이 [m] |
| Nu | : Nusselt 수 [-] |
| Pr | : Prandtl 수 [-] |
| Q | : 열전달률 [W] |
| Re | : Reynolds 수 [-] |
| S_M | : 모멘텀 방정식 소스 [N/m^3] |
| S_E | : 에너지 방정식 소스 [W/m^3] |
| s | : 핀 간격 [m] |
| T | : 온도 [K] |
| t | : 핀 두께 [m] |
| U | : 총괄열전달계수 [W/m^2K] |
| u | : 속도 [m/s] |
| V | : 유체 체적 [m^3] |

그리스 문자

| | |
|--------------|--------------------|
| ρ | : 밀도 [kg/m^3] |
| ΔP | : 압력강하 [Pa] |
| ΔT_m | : 대수평균온도차 [K] |
| μ | : 점성계수 [kg/ms] |

하첨자

| | |
|-------|-------|
| cond | : 전도 |
| c | : 단면 |
| i | : 내부 |
| in | : 입구측 |
| o | : 외부 |
| out | : 출구측 |
| s | : 표면 |
| total | : 전체 |
| w | : 벽면 |

1. 서 론

현재의 수송분야에서의 가장 큰 변화는 역시나 기존의 내연기관 자동차에서 전기 자동차로의 전환이다. 이러한 변화로 인해 새로이 주목받아야 하는 분야는 배터리의 열관리라 할 수 있다. 전기 자동차의 리튬이온 배터리의 온도는 일반적으로 20~50℃ 수준으로 관리되어야 한다.¹⁾ 배터리의 발열을 제거하기 위해서는 수냉각 방식이 효과적이며²⁾, 순환하는 냉각수를 열교환하는 열교환기의 특성에 따라 흡방열 성능이 결정될 수 있다.

BTMS용 관형 열교환기는 대개 Chevron type, Wavy type, Dimple type, Offset fin type 등으로 나눌 수 있는데, 이 중 Offset fin은 열전달 성능이 우수하여 열교환 면적을 줄이는데 효과가 있다.³⁾ 다만, 구조의 특성상 다른 관형열교환기 종류들에 비해 압력강하가 크게 발생한다는 단점 또한 동시에 존재하기 때문에 대부분의 연구에서 열교환기의 열적(Thermal) 그리고 수력학적(Hydraulic) 성능을 함께 분석한다.

Fernandez-sera 등⁴⁾은 Offset fin 열교환기에서 물과 에틸렌글리콜 용액(10~30wt.%) 간의 단상열전달에 대한 실험적 연구를 진행하였고, Wilson plot 방법을 기반으로 상관관계를 도출하여 Reynolds수에 따른 대류 열전달 계수를 결정하였다. Yang 등⁵⁾은 Offset fin의 두께와 유효 열전달 면적을 이용하여 무차원수를 지정하였고, 이 무차원수에 따라 열적 성능을 분석하였다. Park 등⁶⁾은 Offset fin 열교환기를 사용한 실험을 기반으로 Colburn j factor와 Fanning f factor를 도출하고 다른 열교환기들과 비교하였다. 또한 해당 연구에서는 Offset fin의 열적 그리고 수력학적 분석을 위해 6개의 설계 독립변수를 사용하여 최적화를 함께 수행하였다. 실험적인 방법 이외에도 CFD를 통한 열교환기에서의 단상 열전달에 대한 해석은 Ismail 등⁷⁾과 Piper 등⁸⁾ 그리고 Mocnuk 등⁹⁾의 연구에서도 수행된 바 있다.

Dimple 타입 열교환기는 반면에 상대적으로 적은 압력강하와 적은 열교환 면적을 가지고 있는 특징이 있다.

Torre 등¹⁰⁾은 CFD 분석을 통해 1~1000 범위의

Reynolds수에서의 Offset fin 열교환기와 Dimple 타입 열교환기의 j factor와 f factor를 비교하여 제시하였다. Offset fin 열교환기는 유동 각도에 따라 두 무차원수의 변화가 유의미하게 발99생한 것에 반해 Dimple 타입에서는 유동의 각도가 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. Lotfi 등¹¹⁾과 Mocnik⁹⁾ 등은 Dimple 타입 열교환기에서의 열전달에 있어 중요한 현상으로 재순환(Recirculation) 유체를 언급하였으며, 이것을 줄임으로써 표면에서의 열전달 및 압력강하가 개선될 수 있다고 언급하였다.

일반적으로 단상 열전달에서 냉각수의 유량은 열교환기의 열적 그리고 수력학적 성능에 크게 영향을 미치게 된다. 또한 Offset 열교환기와 Dimple 열교환기 모두 Turbulator의 구성을 달리함에 따라 다른 결과가 나타날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 압력강하를 줄이기 위한 0° 방향으로의 Offset fin 열교환기와 열전달을 촉진하기 위한 Dimple turbulator가 추가된 Dimple type 열교환기를 다양한 유량 조건에서 분석하는 것을 목표로 한다. 또한 기하학적 형상이 서로 다른 두 열교환기를 비교하기 위해 다양한 Reynolds수 조건에서 두 무차원수 Colburn j factor와 Fanning f factor를 산출하여 각 열교환기의 특성을 종합하고자 한다.

2. CFD 모델 및 해석이론

2.1 열교환기 모델

Offset fin 열교환기는 압력강하가 일반적으로 크게 나타나기 때문에 상대적으로 압력강하의 수준이 낮으나 열전달률이 떨어지는 0° 모델로 구성하였고, Dimple type에서는 큰 확산형 Turbulator 사이사이에 작은 원통형 Turbulator를 설치하여 대류열전달을 촉진하였다. 또한 열전달의 촉진을 도모하고자 유체의 흐름을 U자 형태의 Half-circuit으로 구성하였다. 단상열전달 상관식을 도출하기 위해서 냉각수 입출구 온도차이가 Offset fin 타입 기준 약 3~15°C가 되는 범위에서의 냉각수 질량 유량을 변화시켰다. 본 연구에서는 냉매의 증발은 구현하지 않았으며, 대신 일정 값의 비등 열전달 계수와 냉매 스트림의 포화 온도를 경계조건으로

사용하여 해석을 간소화하였다. 냉각수는 물(40%)와 에틸렌글리콜(60%)로 구현하였으며, 온도에 따라 변화정도가 큰 점성계수는 온도의 함수로 반영하여 해석을 진행하였다.

2.2 해석이론

아래의 식 (1)~(3)은 각각 CFD 해석에 사용된 Mass, momentum 그리고 energy conservation equation을 나타낸다.¹⁰⁾

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f u_f}{\partial t} + \nabla (\rho_f u_f u_f) = \rho_f g - \nabla \sigma + S_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_s c_s T_s}{\partial t} = \rho_s Q_s + \nabla (k_s \nabla T_s) + S_E \quad (3)$$

유동해석을 통해 계산된 열전달률 및 냉각수의 입출구 온도정보를 통해 아래의 식 (4)~(7)에서 냉각수측 대류열전달 계수를 산출한다.¹²⁾

$$Q = UA \Delta T_m \quad (4)$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln\left(\frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}}\right)} \quad (5)$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + R_{cond} \quad (6)$$

$$h_i = \left(\frac{1}{UA} - \frac{1}{h_o A_o} - R_{cond}\right)^{-1} / A_i \quad (7)$$

열교환기 성능 비교를 위한 두 가지의 무차원수 j 와 f factor의 계산을 위해 식 (8)~(11)을 사용하였다.

$$Nu = \frac{h_i D_h}{k} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (9)$$

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{\frac{1}{3}}} = \frac{h}{\rho u C_p} Pr^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

$$f = \frac{A_c}{A_{total}} \frac{2\Delta P}{\rho u^2} = \frac{D_h}{2L} \frac{\Delta P}{\rho u^2} \quad (11)$$

이때, Offset fin 타입과 Dimple 타입 열교환기의 수력직경은 각각 식 (12)와 식 (13)을 사용하였다.

$$D_h = \frac{4slH}{2(sl+lH+tH)+ts} \quad (12)$$

$$D_h = \frac{V}{A_s} \quad (13)$$

3. CFD 해석 결과 및 고찰

Fig. 1은 Offset fin 타입 열교환기에서의 열전달률과 압력강하를 나타내며, Fig. 2는 Dimple 타입 열교환기에서의 해당 정보들을 나타낸다. 먼저 열량의 비교에 있어 절대적인 수치의 차이가 명확하게 드러남을 확인할 수 있다. Offset fin 타입의 경우 넓은 전열면적의 효과로 인해 열전달률이 최소 유량 기준 약 5.35kW인데 반해 Dimple 타입은 약 1.69kW로 큰 차이가 발생하였다. 또 한 가지 주목할 점은 냉각수 유량의 증가에 따른 열량 변화의 기울기인데, Offset fin 타입은 전 유량범위에서 유의미한 증가가 확인되지만, Dimple 타입은 일정 수준 증가 이후 수렴에 가까운 형태를 보인다. 이는 냉매측과 냉각수측의 열저항의 상대적 크기가 원인으로 사료된다. Offset fin 타입의 경우 전열면적이 넓기 때문에 $h_o=1,500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 가정한 상태에서 냉매측 열저항이 상대적으로 낮게 나타날 수 있다. 반면, Dimple 타입은 표면적이 작아 냉매측 열저항이 냉각수측 열저항에 비해 상대적으로 지배적이며, 따라서 냉각수측 유량을 증대시켜 열전달을 개선하여도 효과가 상대적으로

미미할 것으로 분석된다.

압력강하의 비교에서는 다소 의외의 결과가 도출되었는데, 일반적으로 Dimple 타입의 경우 압력강하가 상대적으로 작다는 장점이 있는데 반해 현재의 모델에서는 압력강하가 상당히 크게 나타났다. 이에 대한 원인으로서는 크게 두 가지를 꼽을 수 있다. 첫째는, 해석모델 형상의 특징이다. 본 연구에서 해석한 Dimple 타입 열교환기는 화산형의 큰 Turbulator 사이사이에 작은 원통형 Turbulator가 설치되어 있는 형상이다. 큰 압력강하는 이 작은 원통형 Turbulator가 냉각수의 유동을 방해하여 발생하는 것이며, 이것의 개수와 직경 등의 기하학적 특징에 크게 좌우될 것으로 짐작할 수 있다. 다른 하나의 원인은, 마찬가지로 해석모델의 특징이나 Turbulator가 아닌 유로의 형상

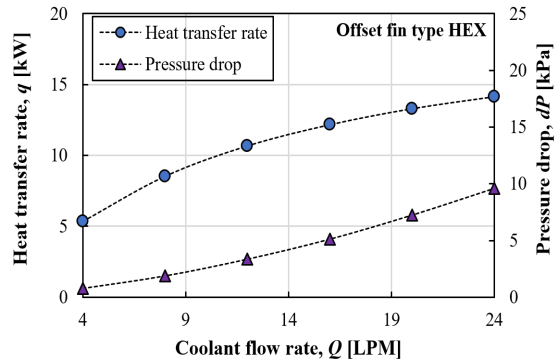


Fig. 1 Heat transfer rate and pressure drop (Offset fin type)

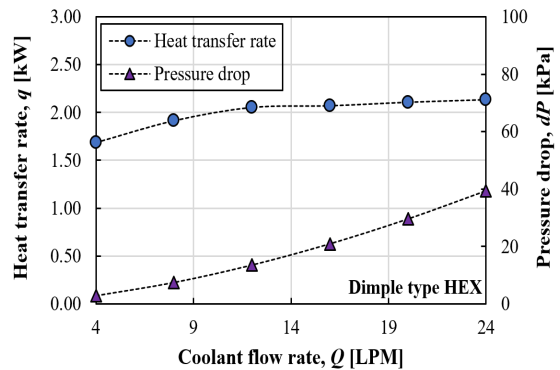


Fig. 2 Heat transfer rate and pressure drop (Dimple type)

때문으로 사료된다. 본 연구에 사용된 Dimple 타입 열교환기는 Half-circuit형태로써 일반적인 Full-circuit에 비해 유속이 약 2배 가량 빠르다는 특징이 있다. 뿐만 아니라 식 (11)에 나타난 바와 같이 압력강하 수준을 결정하는 또 다른 요소인 유동 채널의 길이 또한 두 배가 되므로 압력강하 수준이 상당히 커짐을 짐작할 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 두 타입의 열교환기에서의 냉각수 유동 벡터를 나타내며, 이를 통해 앞서 주장한 높은 압력강하의 원인 중 Turbulator에 의한 높은 압력강하 발생을 확인할 수 있다. Fin 혹은 Turbulator를 향하는 벡터의 방향이 수직에 가까울수록 압력강하는 크게 발생한다는 점을 고려할 때 Turbulator의 형상이 압력강하에 영향을 주고

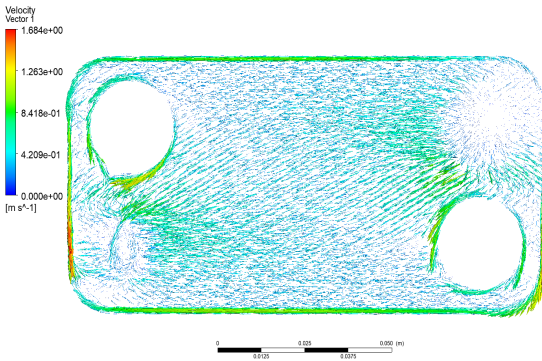


Fig. 3 Coolant velocity vectors to describe pressure drop (Offset fin type)

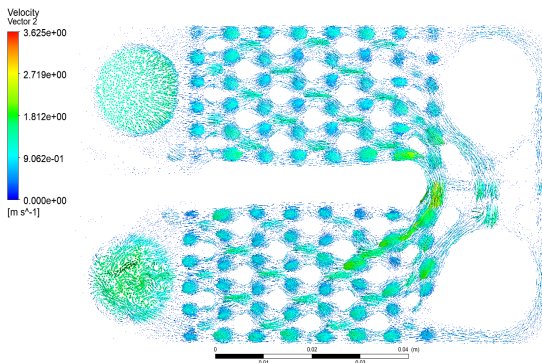


Fig. 4 Coolant velocity vectors to describe pressure drop (Dimple type)

있음을 유추할 수 있다. 압력손실에 영향을 주는 열교환기 평면의 유속 분포 또한 Dimple 타입의 경우가 높은 수준으로 나타났는데, 이는 전술한 바와 같이 Half-circuit 구조에 따른 차이와 수력직경의 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 냉각수 유량에 따른 두 타입의 열교환기의 대류열전달계수 변화를 나타낸다. 동일한 냉각수 유량 조건이라도 Dimple 타입은 Half-circuit 구조를 가지고 있어 이미 유속이 상대적으로 빠르기 때문에 유속의 증가와도 같은 유량을 늘렸을 때 얻을 수 있는 열전달의 긍정적인 효과가 미미한 것으로 보여진다. 반면, Offset fin 열교환기는 상대적으로 가파른 기울기를 보이며 대류열전달 계수가 증가하는 형태를 보였고, 이로 인해 앞선 유량 증가에 따른 전열량의 비교에서

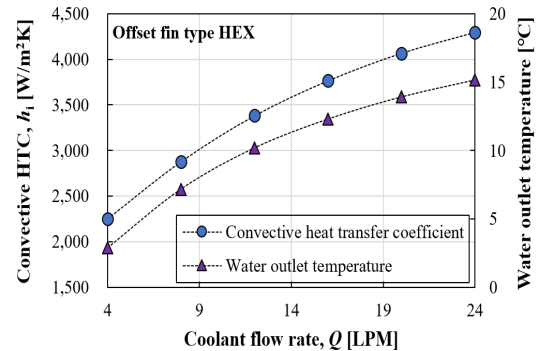


Fig. 5 Heat transfer coefficient and water outlet temperature (Offset fin type)

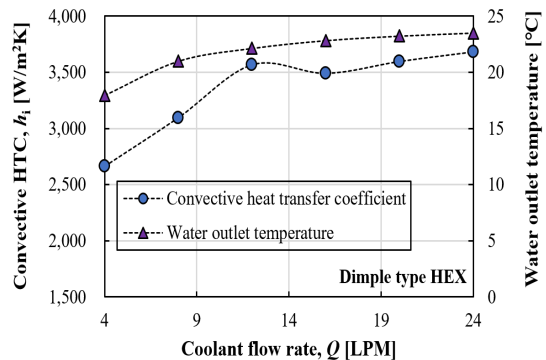


Fig. 6 Heat transfer coefficient and water outlet temperature (Dimple type)

이와 같은 결과가 도출된 것으로 분석된다. 냉각수의 입구 온도가 25℃일 때, 냉각수의 출구 온도는 Offset fin 타입이 약 2.87~15.15℃, Dimple 타입이 약 17.96~23.52℃ 수준으로 분석된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 냉각수 유량에 따른 총괄열전달 계수와 유체의 평균 유동 속도를 나타내었다. 총괄열전달 계수는 앞서 언급한 열전달률과 대류 열전달 계수와 같은 이유로 Offset fin 타입에서 완만한 증가를 보이는 반면 Dimple 타입에서는 냉각수 유량에 관계없는 추세를 보인다. 참고로, 총괄열전달 계수의 기울기와 열전달률의 기울기에서 다소 차이가 있는데, 이것은 냉각수 유량 증가에 따라 대수평균 온도차가 증가함에 따라 발생하는 차이로 사료된다. 본 결과로부터 열교환기의 성능 비교를 위한 두 가지의 무차원수(j , f factor)를 도출하였다.

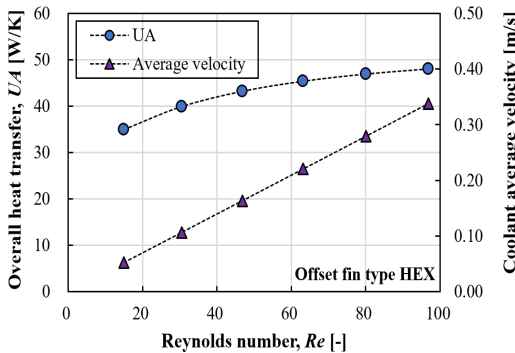


Fig. 7 Overall heat transfer coefficient and coolant average velocity (Offset fin type)

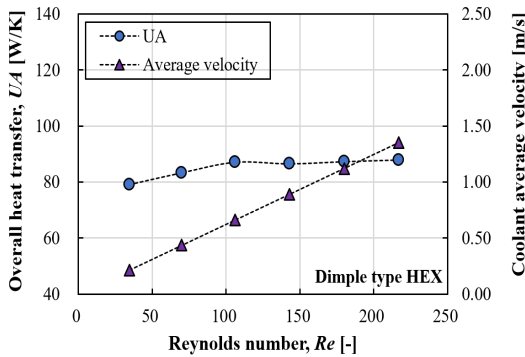


Fig. 8 Overall heat transfer coefficient and coolant average velocity (Dimple type)

Fig. 9와 Fig. 10은 각 열교환기 타입에서의 Nusselt number와 Colburn j factor를 나타낸다. 먼저 두 열교환기 모두 작은 수력직경($D_{h,Offset}$: 1.17mm, $D_{h,Dimple}$: 0.66mm)과 비교적 느린 유속 때문에 Reynolds number가 낮은 층류 형태의 유동을 보임을 확인할 수 있다. Offset fin 타입의 경우가 동일한 Reynolds 수에서 2배 이상의 Nusselt number를 보여 높은 열전달 성능을 보였으며, j factor의 정의에 따라 당연히 j 값도 높게 나타났다. 도출된 j factor는 타 열교환기와의 성능을 비교할 수 있는 지표로서 활용도가 높다고 할 수 있다.

열교환기의 평가 지표 중 하나인 “Flow area goodness factor”로써 i factor/ j factor로 정의할 수 있다. 해당 무차원수의 정의에 따라 낮은 Flow

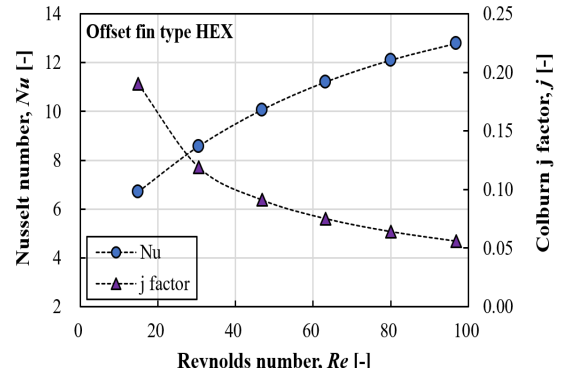


Fig. 9 Nusselt number and colburn j factor (Offset fin type)

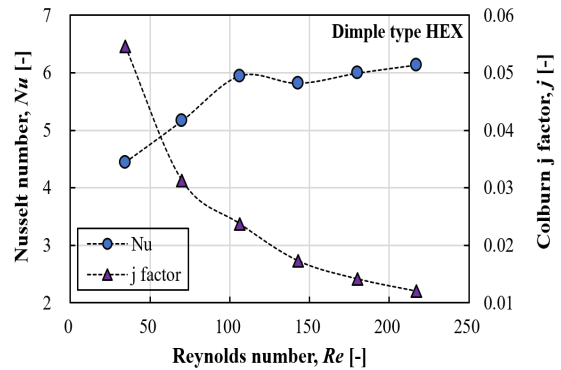


Fig. 10 Nusselt number and colburn j factor (Dimple type)

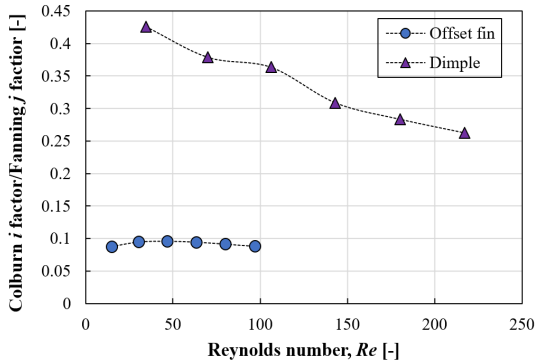


Fig. 11 Flow area goodness factor according to Reynolds number

area goodness factor는 열전달에 비해 압력강하가 크다는 뜻이며, 검토와 개선이 필요하다는 해석을 할 수 있다. 앞선 결과들에서 Dimple 타입 열교환기의 압력강하가 상당히 크게 나타났고, 열전달률이 상대적으로 작았던 것에 반해 Fig. 11에 나타난 무차원수는 Dimple 타입의 경우가 훨씬 크게 나타났다. 이는, Dimple 타입에서의 큰 압력강하의 요인이 f factor가 컸기 때문이라기보다는 식 (11)에서의 유속과 채널 길이 그리고 상대적으로 작은 수력직경으로부터 기인하였음을 짐작하게 한다. ij factor 무차원수는 일반적으로 Reynolds number의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는데, Dimple 타입의 감소 기울기가 Offset fin 타입에 비해 가파르다는 점을 감안하였을 때, 열교환기 성능 개선을 위해 냉각수 유량을 증대시키는 것은 무의미하다는 해석이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 가지 종류의 BTMS용 열교환기의 성능 비교를 위해 CFD 분석을 실시하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 냉각수 유량의 증가에 따라 Offset fin 타입의 열전달률은 비교적 선형적으로 증가하였지만 Dimple 타입의 경우는 일정 값에서 수렴하는 형태를 보였으며. 이는 단상 대류열저항의 크기가 총괄 열저항에서 얼마나 지배적인지에 따라 달라

짐을 확인하였다.

2) ij 무차원수의 비교에서 Dimple 타입의 값이 전 Reynolds number 구간에서 크게 나타났으며, 이는 Dimple 타입에서 더 큰 압력강하가 발생하고 있는 것은 Fanning f factor 값이 크다기보다는 Half-circuit 특성 상 긴 유동 채널의 길이와 빠른 유속에 의존함을 확인하였다.

3) Dimple 타입의 Colburn j factor 값이 Offset fin 타입에 비해 현저히 작다는 점에서 열전달의 촉진을 위해 설치한 Dimple 타입의 Turbulator는 개선이 필요하며, 냉각수 유량을 증가시킴에 따라 ij 무차원수의 감소 기울기가 가파른 것으로 보아 유량 증대를 위한 Half-circuit 구조도 개선이 필요하다고 판단된다.

4) Dimple 타입 Turbulator의 아랫면 오목한 부분에서의 유동 또한 높은 압력강하에 기여한 것으로 사료되므로, 향후 오목한 부분의 유무에 따른 전열특성 및 압력강하 특성 비교가 필요하다고 보여 진다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (202205250002).

Author contributions

S. H. Seol; Conceptualization. Y. H. Joo; Data curation. Y. H. Joo; Formal analysis. S. H. Seol; Funding acquisition. S. H. Seol; Investigation. Y. H. Joo; Methodology. S. H. Seol; Project administration. Y. H. Joo; Resources. Y. H. Joo; Software. S. H. Seol; Supervision. S. H. Seol; Validation. S. H. Seol; Visualization. S. H. Seol; Writing-original draft. S. H. Seol; Writing-review & editing.

References

1. L. He, H. Jing, Y. Zhang, P. Li and Z. Gu,

- 2023, “Review of thermal management system for battery electric vehicle”, *Journal of Energy Storage*, 59, 106443.
(DOI:10.1016/j.est.2022.106443)
2. M. Akbarzadeh, T. Kalogiannis, J. Jaguemont, L. Jin, H. Behi, D. Karimi, H. Beheshti, J. V. Mierlo and M. Bercibar, 2021, “A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for a high-energy lithium-ion battery module”, *Applied Thermal Engineering*, 198, 117503.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2021.117503)
 3. X. Zhenga and Z. Qi, 2018, “A comprehensive review of offset strip fin and its applications”, *Applied Thermal Engineering*, 139, 61-75.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.101)
 4. J. Fernández-Seara, R. Diz and F. J. Uhía, 2013, “Pressure drop and heat transfer characteristics of a titanium brazed plate-fin heat exchanger with offset strip fins”, *Applied Thermal Engineering*, 51, 502-511.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2012.08.066)
 5. Y. Yang, S. Li and H. Liu, 2023, “Experimental investigation on the heat transfer behavior of water in offset strip fin channels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 202, 123656.
(DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123656)
 6. Y. Park, J. Kim, J. Oh, U. Han and H. Lee, 2023, “Multi-objective optimization of an offset strip fin heat exchanger for waste heat recovery in electric vehicles”, *Applied Thermal Engineering*, 228, 120533.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120533)
 7. L. S. Ismail, C. Ranganayakulu and R. K. Shah, 2009, “Numerical study of flow patterns of compact plate-fin heat exchangers and generation of design data for offset and wavy fins”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3972-3983.
(DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.026)
 8. M. Piper, A. Zibart, E. Djakow, R. Springer, W. Homberg and E. Y. Kenig, 2019, “Heat transfer enhancement in pillow-plate heat exchangers with dimpled surfaces: A numerical study”, *Applied Thermal Engineering*, 153, 142-146.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.082)
 9. U. Močnik, B. Blagojevič and S. Muhič, 2020, “Numerical analysis with experimental validation of single-phase fluid flow in a dimple pattern heat exchanger channel”, *Stroj. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 66, 544-553.
(DOI:10.5545/sv-jme.2020.6776)
 10. A. Della Torre, G. Montenegro, A. Onorati, S. Khadilkar and R. Icarelli, 2019, “Multi-scale CFD modeling of plate heat exchangers including offset-strip fins and dimple-type turbulators for automotive applications”, *Energies*, 12(15), 2965.
(DOI:10.3390/en12152965)
 11. B. Lotfi and B. Sundén, 2019, “Thermo-hydraulic performance enhancement of finned elliptical tube heat exchangers by utilizing innovative dimple turbulators”, *Heat Transfer Engineering*.
(DOI:10.1080/01457632.2019.161132)
 12. Z. Wang, R. Wang, Z. Li, M. Wang and L. Wan, 2023, “Numerical investigation on the effect of cylindrical turbulator on performance of corrugated plate-fin heat exchanger”, *Applied Thermal Engineering*, 230, 120726.
(DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120726)