

# 삼중 주기적 최소 곡면을 이용한 새로운 고집적 열교환기의 설계 및 제작에 관한 연구

## A Design and Fabrication Method of New Compact Heat Exchangers Using Triply Periodic Minimal Surface

김지호<sup>1</sup>, 유동진<sup>2,#</sup>  
Jiho Kim<sup>1</sup> and Dong Jin Yoo<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 대전대학교 대학원 기계설계산업시스템학과 (Department of Mechanical Design and Industrial system, Graduate School, Daejin University)

<sup>2</sup> 대전대학교 컴퓨터응용기계공학과 (Department of Computer-aided Mechanical Engineering, Daejin University)

# Corresponding Author / E-mail: djyoo@daejin.ac.kr, TEL: +82-31-539-2031

ORCID: 0000-0002-1072-1640

KEYWORDS: Triply periodic minimal surface (삼중 주기적 최소 곡면), Compact heat exchangers (고집적 열교환기), Additive manufacturing (적층 제조), Boolean operation (불리언 연산), Three-dimensional flow pattern (3차원 유동 패턴)

*This paper describes a new design method for constructing a heat exchanger computational model comprising TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) core structures. These TPMS-Based core structures cannot be designed using the existing CAD systems, especially for heat exchangers with a high level of geometric complexity. This paper introduces a new implicit design algorithm based on the VDF (Volumetric Distance Field) calculation. All geometric components, including the TPMS-based core structures, heat exchanger exterior shapes, a set of parts for inlets and outlets, are represented by the VDF in a given design area. This enables the efficient design of computational models for the arbitrary-complex heat exchangers. The proposed design method extends the 2D flow pattern of the existing CHE into the 3D flow pattern, providing high heat transfer efficiency and low-pressure drop. Investigation of the design results and manufactured prototypes using the AM (Additive Manufacturing) technology showed that the proposed TPMS CHE design method can open a new paradigm for generating high-performance next-generation CHEs which cannot be designed and manufactured with the existing CAD and CAM technologies.*

Manuscript received: March 5, 2020 / Revised: April 3, 2020 / Accepted: April 9, 2020

### 1. 서론

오늘날 고집적 열교환기는 기계 장비의 고도화 및 소형화 기술의 핵심 부품 요소로서 그 중요성이 높아지고 있다. 따라서, 열전달 효율을 최대한 높이면서 열교환기의 크기를 축소하고, 동시에 경량화를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-4</sup> 기존의 고집적 열교환기 중 하나인 판형열교환기는 교대로 적층된 여러 개의 플레이트 사이로 저온 및 고온 유체가 흐르면서 전열판을 통하여 열교환을 수행한다. 그러나 본 연구에서 제안하는 삼중 주기적 최소 곡면(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS)을 이용한 열교환기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하나의

TPMS 곡면에 의하여 3차원 공간이 두 개의 공간으로 분리된 채널 구조를 가지고 있어, 3차원적인 열교환이 가능하게 된다.<sup>5-9</sup> 즉, TPMS로 분리된 두 공간에서 두 유체가 제각기 흐르기 때문에 서로 섞이지 않으며, 완벽한 3차원 열전달을 가능하게 한다. 또한, 단위부피당 표면적이 크고, 유체가 잘 흐를 수 있는 내부 채널 구조를 가지고 있어, 추가적인 압력 강하 없이 열전달 효율을 획기적으로 증가시킨다. 그러나 브레이징, 용접, 확산접합 등 기존의 성형기법으로는 본 연구에서 제안하고자 하는 연속적으로 연결된 TPMS 채널 구조를 가진 고집적 열교환기(Compact Heat Exchanger, CHE) 제작에 많은 제약이 있다. 따라서 빠른 시간 안에 복잡한 형상의 제품 구현이 가능하고, 부가적인 공정

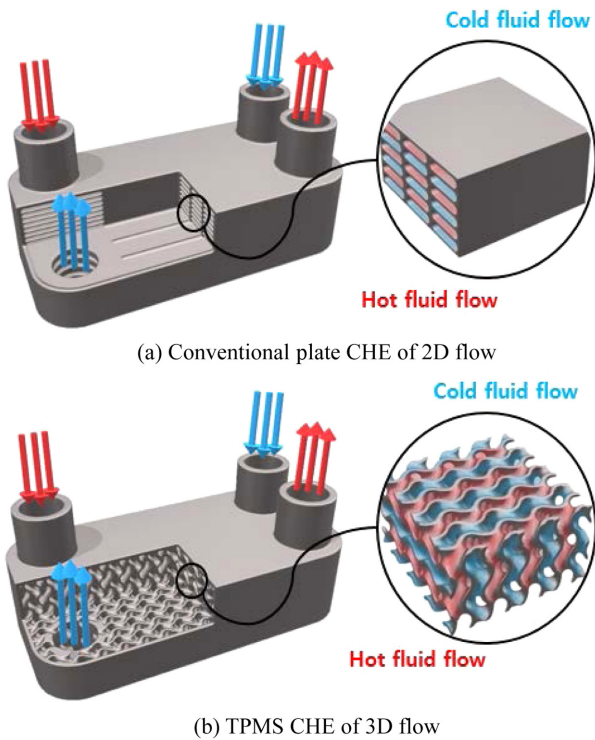


Fig. 1 Comparison of the conventional plate CHE and TPMS CHE

없이 효과적으로 제작이 가능한 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술이 필요하다.<sup>10-12</sup> AM 기술은 액체나 파우더 형태의 수지, 금속 등의 재료를 한 번에 한 층씩 겹겹이(Layer-by-Layer) 쌓아서 고체 구조물을 제조하는 방식이다. 주요 기술로는 SLA (Stereo Lithography Apparatus), DLP (Digital Light Processing), FDM (Fused Deposition Modeling), LOM (Laminated Object Manufacturing), SLS (Selective Laser Sintering) 등이 있다. 특히 벌집,<sup>13</sup> 트러스<sup>14</sup> 구조와 같이 복잡하고 내부가 비어있는 형상 제작에 적합하며, 일체형 제작(Monolithic Structures)이 가능한 AM 기술은 본 논문에서 제안하고자 하는 고집적·고효율의 열교환기 개발을 위해서는 반드시 필요한 기술이다.

본 연구에서는 TPMS와 볼륨거리장(Volumetric Distance Field, VDF)을 이용하여 설계된 TPMS 내부 채널 구조를 가지는 고집적 열교환기를 AM 기술을 이용하여 일체로 제작할 수 있는 새로운 가능성을 제시하고자 한다.<sup>5-8,15,16</sup> 아울러, 자동 설계 프로그램과 AM 기술의 융합화를 시도하여 고집적/고효율 TPMS 채널 구조를 가지는 열교환기의 설계 및 제작을 위한 CAD/CAM 시스템을 개발하고자 한다.

## 2. TPMS CHE의 설계

TPMS 채널 구조를 가지는 CHE의 설계는 채널 내부의 열교환 효율을 최대한 높이는 동시에 열교환기의 크기를 축소하여

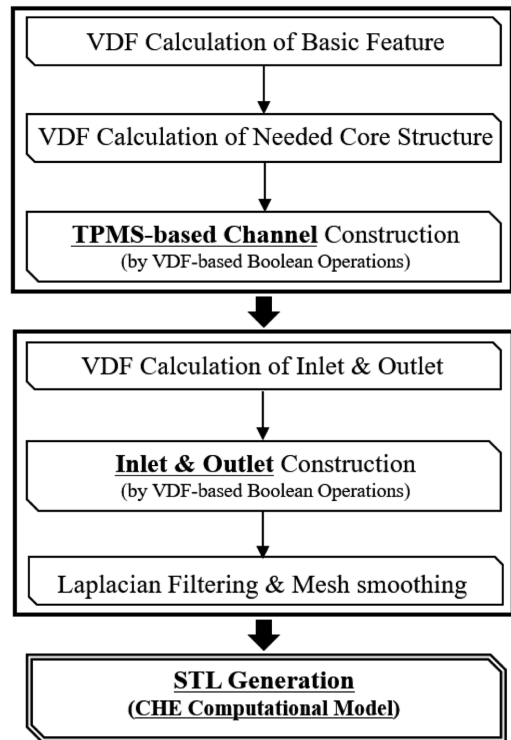


Fig. 2 An overview of the CHE computational model construction process

경량화 및 소형화하는데 그 목적이 있다. 열교환기의 열교환 효율은 채널 내부의 유체 흐름과 밀접한 관계가 있다. 많은 연구를 통하여 정상유체흐름(Laminar Fluid Flow)보다 난류유체흐름(Turbulent Fluid Flow)이 열전달에 효율적이라고 알려져 있다.<sup>17,18</sup> 따라서 본 연구를 통하여 개발하고자 하는 TPMS 채널 구조를 가지는 고집적 열교환기의 채널 구조는 유체의 흐름을 2차원에서 3차원으로 확장시킴으로써, 3차원 유동 특성과 면적 집적도가 극대화되어 열전달 효율을 높이는 효과를 가져온다.

TPMS CHE의 설계 과정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 크게 두 단계로 나뉘어 수행된다. 첫번째 단계에서는 TPMS 기반 채널 구조를 구축하고, 두 번째 단계에서는 유체의 유동을 위한 입구와 출구를 생성하여, TPMS CHE가 완성된다.

### 2.1 TPMS의 수식적 표현

본 연구의 핵심요소인 TPMS는 음함수 형태의 간단한 삼각함수에 관한 식으로 표현될 수 있다. 이런 음함수 형태로 표현된 곡면은 마칭큐브알고리즘(Marching Cube Algorithm, MCA)과 메시 유연화(Mesh Smoothing) 과정을 거쳐 가시화될 수 있다.<sup>16</sup> 많은 TPMS 중 본 논문에서는 CHE 생성 방법을 쉽고 명확하게 전달하고자 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가장 널리 사용되는 TPMS의 기본 곡면인 G (Gyroid)-Surface, D (Diamond)-Surface, P (Primitive)-Surface를 이용하여 설계 방법과 관련된 알고리즘을 기술하고자 한다.

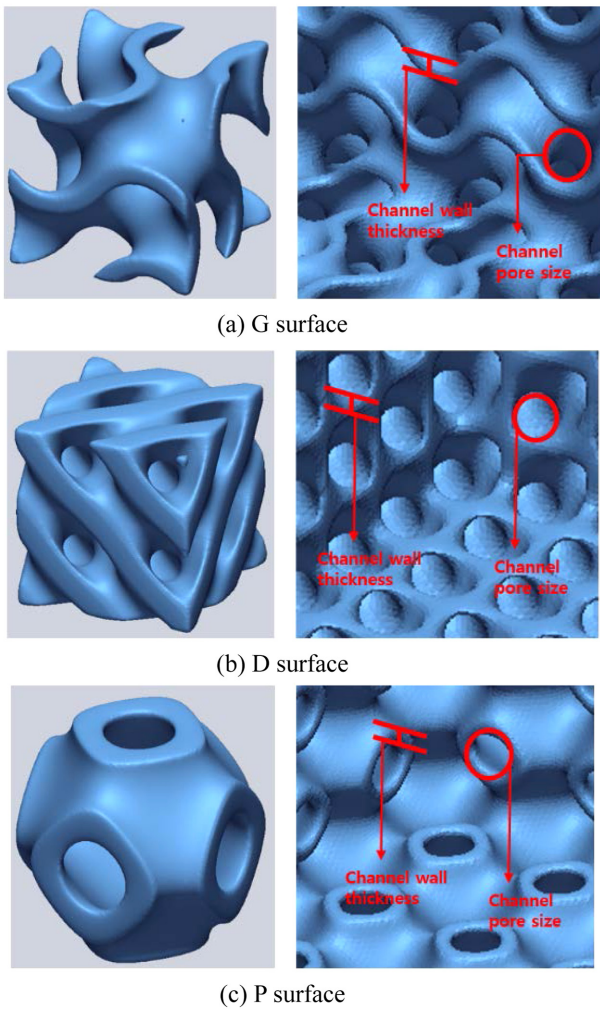


Fig. 3 TPMS-based channel topologies of CHEs

$$\begin{aligned}
 \varphi_G(x, y, z) &: \text{Gyroid-surface} \\
 &= \sin(X) \cos(Y) + \sin(Z) \cos(X) + \sin(Y) \cos(Z) + K \\
 \varphi_D(x, y, z) &: \text{Diamond-surface} \\
 &= \cos(X) \cos(Y) \cos(Z) - \sin(X) \sin(Y) \sin(Z) + K \\
 \varphi_P(x, y, z) &: \text{Primitive-surface} \\
 &= \cos(X) + \cos(Y) + \cos(Z) + K
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $X = 2\pi\zeta N_\zeta$ ,  $Y = 2\pi\eta N_\eta$ ,  $Z = 2\pi\xi N_\xi$ 이다. 자연좌표계  $\zeta, \eta, \xi$ 는 TPMS 코어 형상에 따라 다양한 형태의 함수로 표현될 수 있다. 식(1)에서 파라미터  $K$ 는 TPMS 공극의 크기를 조절하고, 제어 상수  $N_\zeta, N_\eta, N_\xi$ 는 공극의 개수를 변화시키는 역할을 한다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 TPMS에 의하여 한 공간은 두 개의 부공간으로 나뉘어지는데, 이 두 개의 부공간은 두 유체가 분리되어 흐를 수 있는 유동 채널로 이용되고, TPMS 자체는 CHE의 전열벽으로 사용된다. 여기서  $\varphi > 0$ 은 속이 꽉 찬 솔리드(Solid)를,  $\varphi < 0$ 은 공극(Pore)을,  $\varphi = 0$ 은 TPMS 자체를 의미한다. Fig. 4의 단위구조가 주기적으로 반복되어 생성된 CHE의 코어

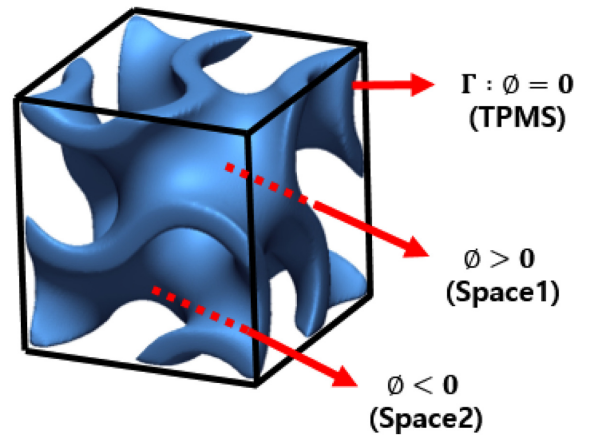


Fig. 4 A schematic view representing a TPMS that separates a space into two sub-spaces

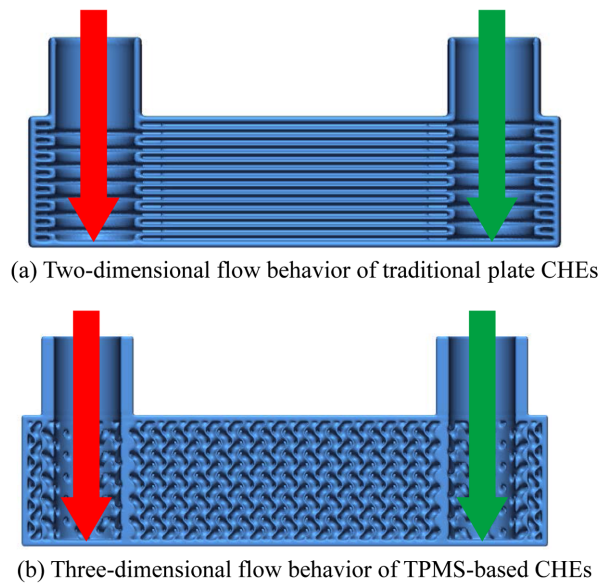


Fig. 5 Differences in flow behaviors between the traditional plate CHE and newly proposed TPMS-based CHE

채널 구조는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하나의 TPMS 경계 곡면(Singly-Connected Boundary Surface)으로 열교환기의 내부 공간을 두 개의 공간으로 분리할 수 있기 때문에 기존의 2차원적인 유체 흐름을 3차원적인 유체 흐름으로 변화시킬 수 있다.

### 2.2 TPMS CHE Core 설계

VDF는 형상 모델을 둘러싸고있는 공간상의 모든 점에서 형상까지의 최소 거리를 구해 스칼라장(Scalar Field) 형태로 정의해놓은 것으로 형상을 효과적으로 표현하는 방법이다.<sup>19-21</sup> 본 연구에서 사용한 VDF 계산 방법은 형상을 포함하고 있는 3차원 공간을 복셀 격자(Voxel Grid)로 분할하여 거리를 계산한다. 본 논문에서는 CHE 형상 및 TPMS 코어를 VDF로 정의한 후 거리장들 간의 불리언 연산을 이용하여 TPMS 채널 구조를 생성

하는 방법을 제안하고자 한다.<sup>22</sup> 두 형상 A와 B 간의 불리언 연산은 VDF의 최대(Maximum), 최소(Minimum)함수를 통해 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

Union :

$$\varphi_{i,j,k}(A) \cup \varphi_{i,j,k}(B) = \max(\varphi_{i,j,k}(A), \varphi_{i,j,k}(B))$$

Intersection :

$$\varphi_{i,j,k}(A) \cap \varphi_{i,j,k}(B) = \min(\varphi_{i,j,k}(A), \varphi_{i,j,k}(B)) \quad (2)$$

Subtraction :

$$\varphi_{i,j,k}(A) - \varphi_{i,j,k}(B) = \min(\varphi_{i,j,k}(A), -\varphi_{i,j,k}(B))$$

여기서  $\varphi_{i,j,k}(A)$ 와  $\varphi_{i,j,k}(B)$ 는 두 형상 A와 B의 볼륨거리장이다. CHE 모델을 계산할 때 식(2)와 같이 거리장을 이용한 불리언 연산을 사용하면 시간이 오래 걸리는 트림 및 매쉬 재생성을 완전히 생략할 수 있다. 본 연구에서는 TPMS CHE 형상을 수식적으로 표현하기 위해서 식(3)과 식(4)와 같은 해석적 형상 함수를 사용하였다. 직육면체 형상의 TPMS CHE 설계를 위해서는 다음과 같이 두 가지 형상(직육면체, 원기둥)에 대한 VDF를 정의한 후, 불리언 연산을 이용하여 설계하여야 한다.

첫 번째로 직육면체 형상의 VDF는 다음 식(3)과 같이 정의된다. 식(3)에서 WX, WY, WZ는 x, y, z 방향의 직육면체의 크기를,  $x_c, y_c, z_c$ 는 직육면체의 중심 좌표를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \varphi_{box} &= \varphi_{box_x} \cap \varphi_{box_y} \cap \varphi_{box_z} \\ &= \min(\varphi_{box_x}, \min(\varphi_{box_y}, \varphi_{box_z})) \\ \varphi_{box_x} &= x - x_c - 0.5WX \quad x \geq x_c \\ \varphi_{box_x} &= -0.5WX - (x - x_c) \quad x < x_c \\ \varphi_{box_y} &= y - y_c - 0.5WY \quad y \geq y_c \\ \varphi_{box_y} &= -0.5WY - (y - y_c) \quad y < y_c \\ \varphi_{box_z} &= z - z_c - 0.5WZ \quad z \geq z_c \\ \varphi_{box_z} &= -0.5WZ - (z - z_c) \quad z < z_c \end{aligned} \quad (3)$$

두 번째로 원기둥 형상의 VDF 또한 앞서 표현한 직육면체 형상의 VDF와 유사한 방법으로 정의할 수 있다. 식(4)에서  $\varphi_{plane_x}$ 는 x축과 수직인 평면의 거리장을, H, r은 원기둥의 높이와 반지름을,  $x_c, y_c, z_c$ 는 원기둥의 중심 좌표를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \varphi_{cylinder_x} &= \varphi_{circle_x} \cap \varphi_{plane_x} \\ &= \min(\varphi_{circle_x}, \varphi_{plane_x}) \\ \varphi_{plane_x} &= x - x_c - 0.5H \quad x \geq x_c \\ \varphi_{plane_x} &= -0.5H - (x - x_c) \quad x < x_c \\ \varphi_{circle_x} &= \sqrt{(y - y_c)^2 + (z - z_c)^2} - r \end{aligned} \quad (4)$$

식(1)로부터 TPMS 채널 구조에 관한 VDF를 계산하고, 식(3)으로부터 열교환기 외부 형상에 관한 VDF를 계산한 후, 두 거리장들 간의 불리언 연산을 통하여 TPMS 구조를 가지는 CHE의

채널 구조를 생성할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 설계 알고리즘을 쉽게 이해하기 위해서 우선 형상이 비교적 간단한 직육면체 형태의 CHE 설계 과정을 서술하도록 하고, 알고리즘의 일반성 및 확장성을 보이기 위해서 다음 절에서는 좀 더 복잡한 형태의 CHE 설계 알고리즘에 대하여 추가적으로 기술하고자 한다.

직육면체 형태의 CHE를 설계하려면 우선 식(3)을 이용하여 외부 형상( $\varphi_{outer\_box}$ )과 내부 형상( $\varphi_{inner\_box}$ )의 거리장을 구한 후, 내부 채널 구조의 정밀한 모델링을 위하여 CHE의 셸(Shell) 형상이 정의되어야 한다.

$$\begin{aligned} \varphi_{shell} &= \varphi_{outer\_box} - \varphi_{inner\_box} \\ &= \min(\varphi_{outer\_box}, -\varphi_{inner\_box}) \end{aligned} \quad (5)$$

다음 단계에서는 두 유체가 흐를 수 있는 TPMS 채널 구조를 생성한다. 외부 직육면체 형상과 첫 번째 TPMS 채널 구조와의 불리언 연산에 의하여 첫 번째 TPMS 코어의 거리장을 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{outer\_TPMS\_1} &= \varphi_{outer\_box} \cap \varphi_{TPMS\_1} \\ &= \min(\varphi_{outer\_box}, \varphi_{TPMS\_1}) \end{aligned} \quad (6)$$

같은 방법으로 두 번째 TPMS 코어의 거리장을 계산한다.

$$\begin{aligned} \varphi_{outer\_TPMS\_2} &= \varphi_{outer\_box} \cap \varphi_{TPMS\_2} \\ &= \min(\varphi_{outer\_box}, \varphi_{TPMS\_2}) \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)에서의  $\varphi_{TPMS\_1}$ 과  $\varphi_{TPMS\_2}$ 는 레벨상수  $K_1$ 과  $K_2$ 를 이용하여 G-Surface의 경우 다음 식(8)과 식(9)와 같이 표현된다.

$$\varphi_{TPMS\_1} = \sin(X)\cos(Y) + \sin(Z)\cos(X) + \sin(Y)\cos(Z) + K_1 \quad (8)$$

$$\varphi_{TPMS\_2} = -[\sin(X)\cos(Y) + \sin(Z)\cos(X) + \sin(Y)\cos(Z) + K_2] \quad (9)$$

레벨상수  $K_1$ 과  $K_2$ 를 조절하면 전열벽의 두께를 자유롭게 변화시킬 수 있다. 앞에서 구한 두 개의 코어에 대한 볼륨거리장을 내부 측 형상과의 불리언 연산에 의하여 다음 식(10)과 식(11)과 같이 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{TPMS\_core\_1} &= \varphi_{outer\_TPMS\_1} \cap \varphi_{inner\_box} \\ &= \min(\varphi_{outer\_TPMS\_1}, \varphi_{inner\_box}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{TPMS\_core\_2} &= \varphi_{outer\_TPMS\_2} \cap \varphi_{inner\_box} \\ &= \min(\varphi_{outer\_TPMS\_2}, \varphi_{inner\_box}) \end{aligned} \quad (11)$$

최종적으로 변경된 TPMS 코어 거리장들과 외부측 형상의 불리언 차연산 과정을 거쳐, TPMS 채널 구조를 가지는 CHE 코어 구조를 생성할 수 있다. Fig. 6은 본 절에서 기술한 TPMS CHE 코어 구조의 설계 알고리즘의 이해를 돕기 위한 개략도이다.

$$\varphi_{CHE\_core} = \varphi_{outer\_box} - \varphi_{TPMS\_core\_1} - \varphi_{TPMS\_core\_2} \quad (12)$$

Fig. 7은 완성된 G-Surface 채널 구조를 가진 CHE 코어 구조를 보여주고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 제어상수  $N_\zeta, N_\eta,$

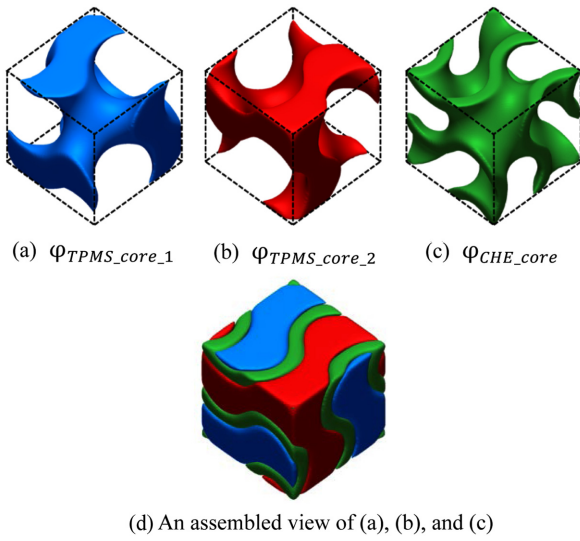


Fig. 6 The core structure construction process

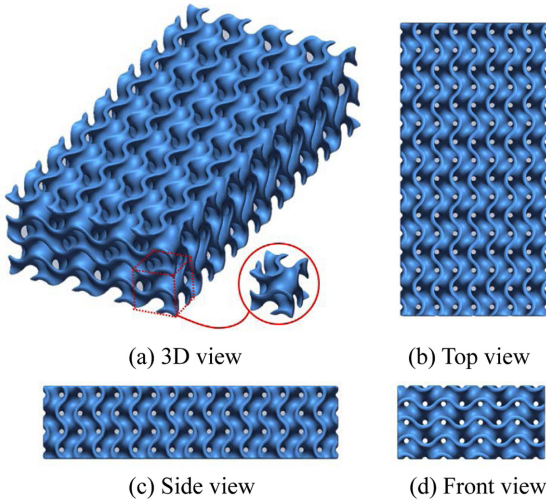


Fig. 7 Computational models for the TPMS-based CHE core structures

$N_\zeta$ 를 변화시키면 용도에 적합한 다양한 형태의 코어 채널 구조를 얻을 수 있다. 본 논문의 가장 큰 목적은 수학적 도구인 TPMS를 채널 구조를 사용함으로써 CHE 설계 및 제작기술을 모든 연구자들이 공유하고 소통할 수 있는 표준화된 기술로 변화시키고자 하는 것이다.

2.3 TPMS CHE의 입구 및 출구 설계

이번 단계에서는 앞에서 생성된 코어 구조에 VDF에 의한 불리언 연산을 적용하여, 두 작동 유체의 입구와 출구를 생성한다. 우선 식(13)과 같이 쉘과 필요한 입구 및 출구 형상과의 불리언 교차 연산으로 시작된다.

$$\begin{aligned} \varphi_{inlet\_shell\_1} &= \varphi_{inlet\_shape\_1} \cap \varphi_{shell} \\ \varphi_{outlet\_shell\_1} &= \varphi_{outlet\_shape\_1} \cap \varphi_{shell} \end{aligned} \quad (13)$$

이러한 불리언 연산 과정은 다음 단계에서 필요한 입구 및

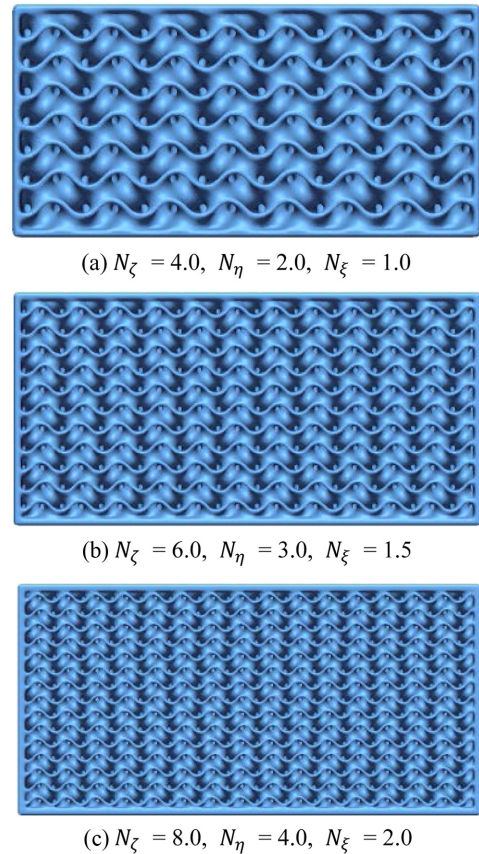


Fig. 8 Easy and accurate control for the internal core structures

출구 생성을 위한 기본 지지대를 구축하는 것이다. 첫 번째 유체의 입구와 출구는 식(13)의 기본 지지대와 앞에서 생성한 TPMS 코어 구조 사이의 불리언 연산을 사용하여 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{inlet\_1} &= \varphi_{inlet\_shell\_1} \cap \varphi_{outlet\_TPMS\_1} \\ \varphi_{outlet\_1} &= \varphi_{outlet\_shell\_1} \cap \varphi_{outer\_TPMS\_1} \end{aligned} \quad (14)$$

마찬가지로 두 번째 유체의 입구 및 출구도 같은 방법으로 생성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{inlet\_shell\_2} &= \varphi_{inlet\_shape\_2} \cap \varphi_{shell} \\ \varphi_{outlet\_shell\_2} &= \varphi_{outlet\_shape\_2} \cap \varphi_{shell} \\ \varphi_{inlet\_2} &= \varphi_{inlet\_shell\_2} \cap \varphi_{outer\_TPMS\_2} \\ \varphi_{outlet\_2} &= \varphi_{outlet\_shell\_2} \cap \varphi_{outer\_TPMS\_2} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서,  $\varphi_{CHE\_core}$ 의 식(12)를 다음 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\varphi_{CHE\_core} = \varphi_{CHE\_core} - \varphi_{inlet\_1} - \varphi_{outlet\_1} - \varphi_{inlet\_2} - \varphi_{outlet\_2} \quad (16)$$

Fig. 9는 생성된 입구와 출구를 나타내며, 유체의 원활한 흐름을 위해서 입구 및 출구에 파이프를 추가하면(i.e.  $\varphi_{CHE} = \varphi_{CHE\_core} \cup \varphi_{pipes}$ ) 완전한 TPMS CHE 모델을 얻을 수 있다.

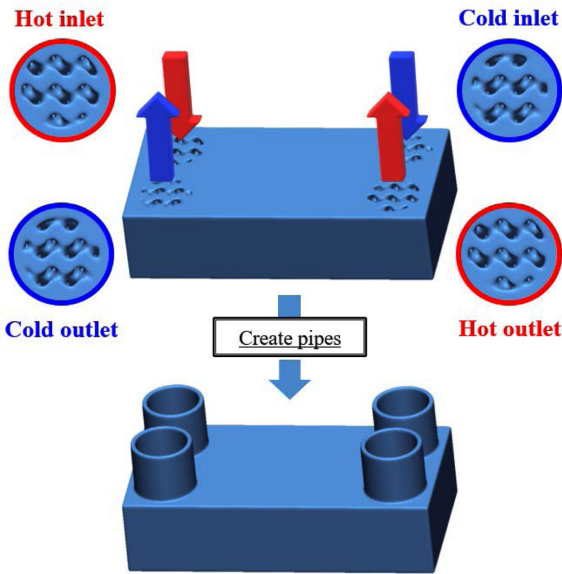


Fig. 9 A complete CHE model with inlet and outlet pipes

### 3. 복잡한 형상의 TPMS CHE 설계

지금까지 비교적 단순한 직육면체 형상의 CHE 설계 방법을 기술하였다. 그러나 기계장치의 특성상 공간의 제약이 있는 경우에는 직육면체, 원기둥과 같은 간단한 형상 함수로는 복잡한 3차원 형상의 열교환기를 효율적으로 설계할 수 없다. 이러한 열교환기의 특수한 기하학적 특성 때문에 TPMS 채널 구조와 CHE 외부 형상 생성과 관련된 복잡한 불리언 연산 과정은 정교하게 설계된 컴퓨터 프로그램에 의해서 자동으로 처리될 때 그 효율성이 극대화된다. 즉, 복잡한 형상의 VDF와 불리언 연산 과정을 이용하면 최적의 조건으로 열교환 시스템 효율을 높일 수 있는 CHE 형상을 설계할 수 있다. 복잡한 외부 형상 중 본 논문에서는 나선 형상의 TPMS CHE 설계 방법을 설명하고자 한다.

나선 형상은 Fig. 10에서와 같이 서로 다른 세 개의 링으로 구성된다. 이와 같은 경우 기하학적인 구성을 고려하여, 외부 형상과 내부 형상에 대한 VDF를 다음 식(17)과 같이 수정해야 한다.

$$\begin{aligned} \varphi_{outer} &= \varphi_{outer\_ring\_A} \cup \varphi_{outer\_ring\_B} \cup \varphi_{outer\_ring\_C} \\ \varphi_{inner} &= \varphi_{inner\_ring\_A} \cup \varphi_{inner\_ring\_B} \cup \varphi_{inner\_ring\_C} \end{aligned} \quad (17)$$

이와 유사한 방법으로, 두 개의 TPMS 구조의 VDF를 다음 식(18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{outer\_TPMS\_1} &= (\varphi_{outer\_cube\_A} \cap \varphi_{TPMS\_1}^{outer\_ring\_A}) \\ &\cup (\varphi_{outer\_ring\_B} \cap \varphi_{TPMS\_1}^{outer\_ring\_B}) \\ &\cup (\varphi_{outer\_ring\_C} \cap \varphi_{TPMS\_1}^{outer\_ring\_C}) \\ \varphi_{outer\_TPMS\_2} &= (\varphi_{outer\_cube\_A} \cap \varphi_{TPMS\_2}^{outer\_ring\_A}) \\ &\cup (\varphi_{outer\_ring\_B} \cap \varphi_{TPMS\_2}^{outer\_ring\_B}) \\ &\cup (\varphi_{outer\_ring\_C} \cap \varphi_{TPMS\_2}^{outer\_ring\_C}) \end{aligned} \quad (18)$$

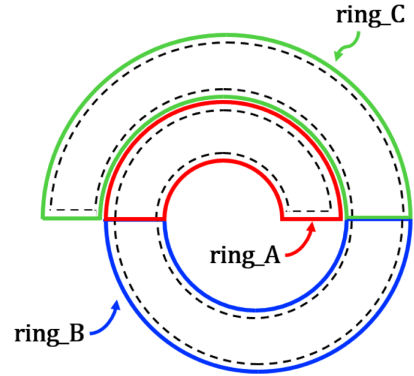


Fig. 10 Geometrical configuration of a spiral-shaped CHE

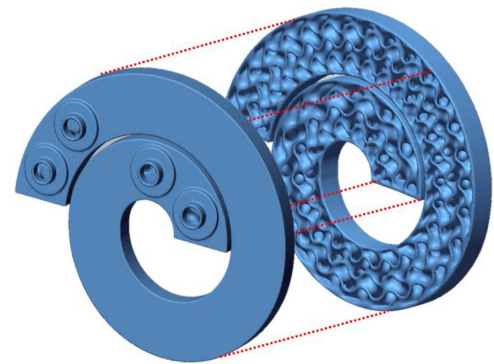


Fig. 11 A spiral-shaped G-surface CHE computational model

Fig. 11은 G-Surface 내부 채널 구조를 가지는 나선 형상의 CHE 모델이다. 식(17)과 식(18)로 주어진 외부 형상과 TPMS 채널 구조에 대해서 VDF를 정의한 후, 최종적으로 불리언 연산 과정을 거치면 완전한 TPMS CHE 모델을 생성할 수 있다.

본 연구에서는 TPMS 공극 구조를 종래의 열교환기 채널 구조 설계 기술에 접목하기 위한 컴퓨터 알고리즘들을 전용 프로그램화하였다. 따라서 전문 CAD 작업자가 아니더라도 원하는 사양의 열교환기를 신속하고 용이하게 설계할 수 있다. 이 프로그램은 MATLAB 코드를 사용하여 데이터 계산에서부터 출력까지의 전 과정을 자동화할 수 있게 프로그래밍하였으며, Intel® i7-8700 K CPU @ 3.70 GHz 16 GB에서 구현하였다. 전체적인 프로그램의 구성은 확장성과 유용성을 고려하여 설계하였다. 이를 통해 현장에서 접할 수 있는 복잡한 TPMS CHE의 설계가 가능하도록 다양한 형상에 대한 VDF 계산 알고리즘 및 코어 채널 구조 생성 알고리즘을 개발하였다. STL 파일은 MCA 및 매시 유연화 작업을 이용하여 생성하였다.

## 4. TPMS CHE 시제품 제작 및 성능 실험

### 4.1 TPMS CHE 시제품 제작

본 논문에서는 액체 상태의 광경화성 수지가 담긴 용기 안에

Table 1 Specifications of 3D printer

Property	Value
Printing technology	SLA
Build size [mm]	600 × 600 × 500
Temperature[°C]	22-26
Layer thickness[mm]	0.05-0.25
Laser type	Solid-state laser Nd: YVO <sub>4</sub>
Laser wavelength [nm]	354.7

Table 2 Geometric specifications and computational results of four CHE prototypes

Model	Plate-CHE	G-CHE	D-CHE	P-CHE
Size [mm]	150 × 75 × 60			
Unit cell	10	16 × 8 × 4		
Area [m <sup>2</sup> ]	0.147	0.157	0.146	0.104
Triangle	5,090,168	8,692,744	8,300,576	6,626,664
Vertex	2,544,904	4,335,882	4,140,984	3,310,020
Time [s]	1391	1392	1295	1113
.STL [KB]	248,544	424,451	405,302	323,568

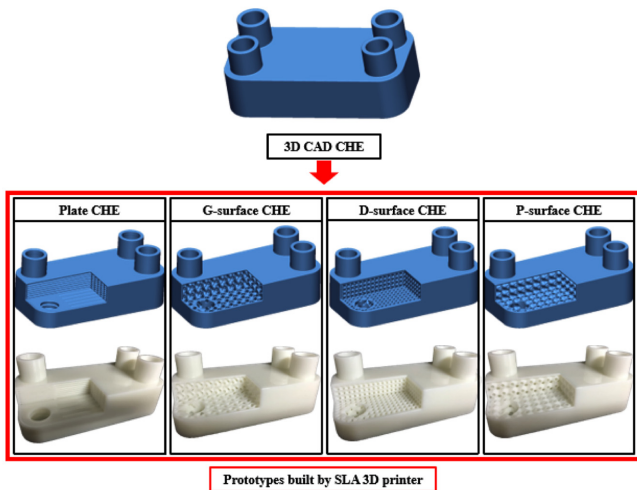


Fig. 12 CHEs prototypes fabricated using 3D Printer

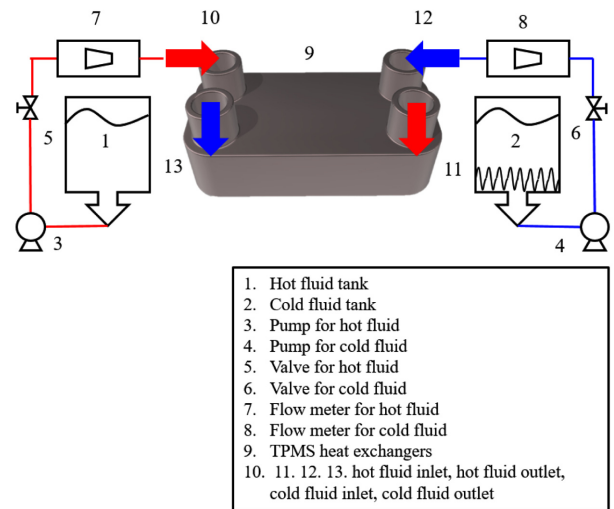


Fig. 13 Schematic diagram of experimental apparatus

레이저를 출력하여 원하는 모델을 적층하는 SLA 방식의 3D Printer RSPRO-600을 사용하였으며, 소재는 Photosensitive Resin을 사용하여 CHE 시제품을 제작하여, 성능 실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 프린터의 사양은 Table 1과 같다.

3D 프린터를 이용하여 TPMS CHE의 외부 형상과 내부 채널 구조를 한번에 일체형으로 직접 제작하여, 열교환기의 압력 강하 및 열전달 성능 시험을 검증하였다. Plate CHE와 TPMS CHE의 정확한 비교를 위해서 동일한 외형의 크기(150 × 75 × 60 mm)로 제작하였다(Fig. 12). Plate CHE의 내부 채널 구조는 고온부 채널 5장과 저온부 채널 5장, 총 10장의 전열판을 z 방향으로 적층하여 구성하였다. TPMS CHE의 내부 채널 구조는 Plate CHE 내부 채널 구조와 비슷한 전열 면적을 가질 수 있도록, 단위 유닛의 개수를 x, y, z 방향으로 16 × 8 × 4로 설계하였다. Plate CHE와 TPMS CHE의 stl 파일의 비교 데이터는 Table 2와 같다. 비슷한 전열 면적을 가지지만 Plate CHE보다 TPMS CHE (G-Surface)의 삼각형과 점의 수가 1.7배 많고 그 만큼 stl 파일의 크기가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 TPMS CHE 성능 실험

Fig. 13은 TPMS CHE의 열전달 및 압력 강하 특성을 측정하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 고온 탱크에서 가열된 유체는 펌프를 통해서 열교환기로 공급되고 다시 고온 탱크로 순환되며,

저온 탱크에서는 일정한 온도의 유체가 공급이 된다. 열교환기와 직접적으로 연결된 부분은 단열재를 이용하여 열 손실을 최소화하였으며 유량계, 압력계, 온도계를 설치하였다. 본 실험에서는 CHE의 저온부와 고온부 각각의 입출구에서 온도 및 압력을 측정하여 열전달 계수를 구하였다. 또한 입구 온도를 일정하게 유지하며, 유량의 변화와 열교환기의 채널 형상(Plate, G-Surface, D-Surface, P-Surface)에 따른 열전달과 압력 강하 특성을 측정하였다. 이때 저온 입구 온도는 17°C, 고온 입구 온도 40°C로 일정하게 고정하고 유량은 0.03-0.16 m<sup>3</sup>/s로 변화시키며 실험을 수행하였다. 측정된 결과값은 PC를 통해 종합적인 데이터를 실시간으로 처리하였다.

본 논문에서는 열전달 해석 방법 중 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)를 사용하여 서로 다른 채널 구조에 대한 열전달 특성을 비교하였다.

저온-고온의 열전달률은 식(19)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,in} - T_{c,out}) \\
 Q_h &= \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out})
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

LMTD는 열교환기의 저온 및 고온의 입, 출구 온도를 이용하여 다음 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

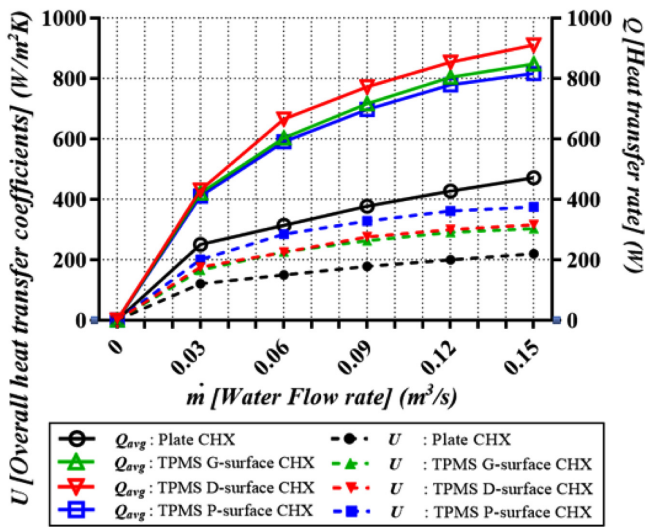


Fig. 14 Heat flow rate versus mass flow rate

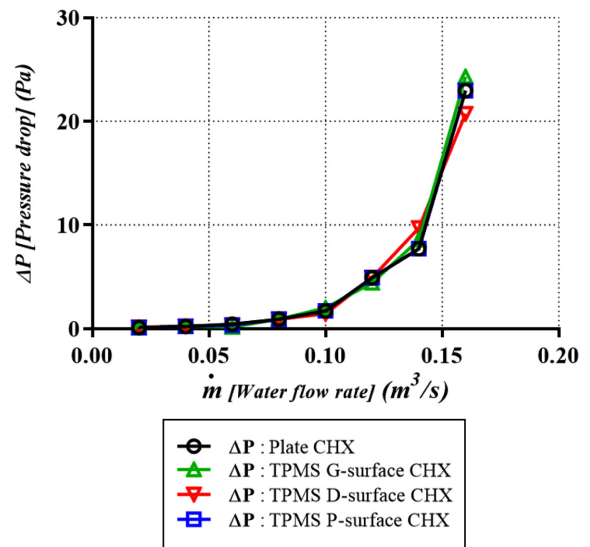


Fig. 15 Pressure drop across heat exchangers

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}}\right)} \quad (20)$$

평균 열전달량은 총괄 열전달 계수와 LMTD 그리고 전열 면적을 사용하여, 다음 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{avg} = UA\Delta T_{LMTD} \left( Q_{avg} = \frac{Q_c + Q_h}{2} \right) \quad (21)$$

Fig. 14에서는 TPMS CHE와 Plate CHE에 대해서 유량 변화에 따른 열전달 성능을 나타내고 있다. 일반적인 열교환기의 열전달 특성과 마찬가지로, 유량이 증가함에 따라 평균 열전달률이 증가한다. 또한 낮은 유량에서는 열전달률이 급격히 증가하지만, 점점 그 증가량이 완만해짐을 확인할 수 있다. TPMS 채널 구조 CHE의 경우 일반적인 Plate CHE에 비해 약 1.7-2.0배 높은 열전달률을 나타내고 있으며, 특히 D-Surface CHE의 경우 기존의 Plate CHE보다 200% 높은 열전달 효율을 보여주고 있다.

Plate CHE의 경우 저온 유체와 고온 유체가 전열판 사이로 교대로 흐르며, 유체가 상대적으로 넓은 전열 면적을 확보하지 못하기 때문에 효과적으로 열교환이 이루어지지 못하는 단점이 있다. 하지만 TPMS CHE는 Plate에 비해 큰 단위부피당 표면적을 가지며, 모든 전열면이 유체와 접촉하면서 열전달에 기여하기 때문에 기존의 열교환기에 비하여 높은 열전달 효율을 얻을 수 있음을 실험 결과로부터 확인할 수 있었다. 이러한 TPMS CHE의 우수한 열전달 성능은 TPMS의 3차원 채널 구조의 영향으로 채널과 채널 사이에 와류를 발생시킴으로써, 난류 열전달을 촉진시키기 때문이다.<sup>17,18</sup> 이렇게 발생한 와류가 성장하면서 유체를 혼합시켜 3차원적인 유동 교란이 가능하게 한다. 이로 인해 작동유체의 열을 활발하게 전달시키게 되어 열전달 성능을 향상시키는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 유량의 변화에 따른 압력 강하 특성을 보여주고

있다. 유량이 점점 증가하면 압력 강하량 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 낮은 유량에 비해 높은 유량에서는 내부 채널에서 평균유속이 증가하므로 압력 강하가 급격히 증가하게 된다. TPMS 채널 구조 CHE의 경우 Plate CHE보다 최대 2배 이상의 열전달률을 보여주는 반면에 거의 유사한 압력 강하를 보여주고 있다.

이는 Plate CHE와 TPMS CHE의 채널 특성 때문이다. Plate CHE의 경우, 유체가 단일 방향의 유로를 통해 흐르며 수축과 팽창을 통해 마찰 저항이 증가하여 유속이 느려지게 된다. 이럴 경우 전체적으로 균등한 속도를 갖지 못하여 열교환기의 성능을 저하시킨다. 하지만 TPMS CHE는 일반적인 CHE와는 다르게 모든 방향(3차원)으로 동일한 형상이 주기적으로 반복되고, 모든 부분이 연속적으로 연결되어 있다. 즉, 채널 표면 전체에 걸쳐 부드럽게 연결이 되어 유동 경로의 급격한 방향 변화를 피하며 흐르기 때문에, 마찰 저항이 낮아져 압력 강하가 최소화되는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 기존 열교환기 대비 열교환 효율을 높이기 위한 방안으로 삼중 주기적 최소 곡면을 이용하여 고집적 열교환기를 설계 및 제작한 후 열전달 및 압력 강하 특성을 알아보기 위해서 유체 유동 실험을 수행하였다.

TPMS CHE는 단위부피당 큰 전열 면적을 가지므로 소형화 및 경량화에 유리하다. 또한 TPMS 곡면의 기하학적 특성을 가진 채널 구조 때문에 3차원 유체 흐름에 의한 난류 생성이 용이하여 열전달 계수를 높이며, 추가적인 압력 강하 없이 뛰어난 열전달 성능을 가진다. 열교환기의 성능 실험을 위해서 SLA 방식의 3D Printer를 이용하여 Plate CHE와 TPMS CHE를 외부

형상과 내부 채널 구조를 일체화하여 설계 및 제작하였다. TPMS 채널 구조를 갖는 열교환기가 기존의 Plate CHE보다 1.7-2.0배 높은 열전달 성능을 나타내었다. 또한 TPMS CHE가 높은 열전달 효율에 비해 Plate CHE와 비슷한 압력 강하를 나타내고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 TPMS CHE의 설계 및 제작기술은 기존의 2차원적인 열전달 형태를 3차원적으로 변화시킬 수 있는 혁신적인 기술로서 열교환기뿐만 아니라 히트 파이프, 히트 싱크 등의 관련 연구 분야에서 활용도를 찾을 수 있을 것이다. 또한 함수거리장의 계산 및 불리언 연산 기술은 AM과 관련한 소프트웨어 및 장비 개발 분야에 있어서도 기술적/산업적 파급효과가 클 것으로 예상된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. NRF-2015R1D1A1A01056784).

## REFERENCES

- Wang, C. C., Lee, W. S., and Sheu, W. J., "A Comparative Study of Compact Enhanced Fin-and-Tube Heat Exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 18, pp. 3565-3573, 2001.
- Wang, L. and Sunden, B., "Optimal Design of Plate Heat Exchangers with and without Pressure Drop Specifications," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 295-311, 2003.
- Khan, T., Khan, M., Chyu, M. C., and Ayub, Z., "Experimental Investigation of Single Phase Convective Heat Transfer Coefficient in a Corrugated Plate Heat Exchanger for Multiple Plate Configurations," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, Nos. 8-9, pp. 1058-1065, 2010.
- Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., and Haglind, F., "A Review of Heat Transfer Enhancement Techniques in Plate Heat Exchangers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101, pp. 305-328, 2019.
- Yoo, D. J., "Porous Scaffold Design Using the Distance Field and Triply Periodic Minimal Surface Models," *Biomaterials*, Vol. 32, No. 31, pp. 7741-7754, 2011.
- Yoo, D. J., "Computer-Aided Porous Scaffold Design for Tissue Engineering Using Triply Periodic Minimal Surfaces," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 1, pp. 61-71, 2011.
- Yoo, D. J., "Heterogeneous Porous Scaffold Design for Tissue Engineering Using Triply Periodic Minimal Surfaces," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 527-537, 2012.
- Yoo, D. J., "Heterogeneous Porous Scaffold Design Using the Continuous Transformations of Triply Periodic Minimal Surface Models," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 10, pp. 1743-1753, 2013.
- Abueidda, D. W., Bakir, M., Al-Rub, R. K. A., Bergström, J. S., Sobh, N. A., et al., "Mechanical Properties of 3D Printed Polymeric Cellular Materials with Triply Periodic Minimal Surface Architectures," *Materials & Design*, Vol. 122, pp. 255-267, 2017.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., and Hui, D., "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- Cooke, M. N., Fisher, J. P., Dean, D., Rimnac, C., and Mikos, A. G., "Use of Stereolithography to Manufacture Critical-Sized 3D Biodegradable Scaffolds for Bone Ingrowth," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, Vol. 64, No. 2, pp. 65-69, 2003.
- Melchels, F. P., Domingos, M. A., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., et al., "Additive Manufacturing of Tissues and Organs," *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, No. 8, pp. 1079-1104, 2012.
- Lu, T., "Heat Transfer Efficiency of Metal Honeycombs," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 11, pp. 2031-2040, 1999.
- Maloney, K. J., Fink, K. D., Schaedler, T. A., Kolodziejska, J. A., Jacobsen, A. J., et al., "Multifunctional Heat Exchangers Derived from Three-Dimensional Micro-Lattice Structures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Nos. 9-10, pp. 2486-2493, 2012.
- Yoo, D. J., "Heterogeneous Minimal Surface Porous Scaffold Design Using the Distance Field and Radial Basis Functions," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 34, No. 5, pp. 625-639, 2012.
- Yoo, D. J., "Advanced Projection Image Generation Algorithm for Fabrication of a Tissue Scaffold Using Volumetric Distance Field," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, No. 10, pp. 2117-2126, 2014.
- Biswas, G., Torii, K., Fujii, D., and Nishino, K., "Numerical and Experimental Determination of Flow Structure and Heat Transfer Effects of Longitudinal Vortices in a Channel Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 16, pp. 3441-3451, 1996.
- Everts, M. and Meyer, J. P., "Heat Transfer of Developing and Fully Developed Flow in Smooth Horizontal Tubes in the Transitional Flow Regime," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp. 1331-1351, 2018.
- Bærentzen, J. A. and Aanaes, H., "Signed Distance Computation Using the Angle Weighted Pseudonormal," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, No. 3, pp. 243-253, 2005.

20. Guezlec, A., "Meshsweeper: Dynamic Point-to-Polygonal Mesh Distance and Applications," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 7, No. 1, pp. 47-61, 2001.
21. Yoo, D. J., "General 3D Offsetting of a Triangular Net Using an Implicit Function and the Distance Fields," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 4, pp. 131-142, 2009.
22. Yoo, D. J., "Three-Dimensional Surface Reconstruction of Human Bone Using a B-Spline Based Interpolation Approach," Computer-Aided Design, Vol. 43, No. 8, pp. 934-947, 2011.

**Jiho Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Design and Industrial system, Daejin University. His main research is compact heat exchangers using triply periodic minimal surfaces.

E-mail: jihok1129@gmail.com

**Dong Jin Yoo**

Professor in the Department of Computer-aided Mechanical Engineering, Daejin University. He is interested in intelligent CAD, scaffold design, and design & fabrication of compact heat exchangers using triply periodic minimal surfaces.

E-mail: djyoo@daejin.ac.kr