

TPMS 단위체의 크기, 밀도 및 배치가 혼합형 TPMS 구조의 접촉 및 유동 면적에 미치는 영향

이광규¹ · 김현² · 안동규^{3, #}

Effects of Dimension, Density and Arrangement of the Unit Cell of the TPMS on Contact and Flow Areas of Combined TPMS Structures

K. K. Lee, H. Kim, and D. G. Ahn

(Received July 14, 2024 / Revised July 19, 2024 / Accepted July 19, 2024)

Abstract

The triply periodic minimal surface (TPMS) structure is characterized by a high surface-to-volume (S/V) ratio and the separated internal structure for flow. Combining the different TPMS structures can provide unique flow and strength characteristics. This paper investigates the effects of dimension, density and arrangement of the unit cell of the TPMS on contact and flow areas of combined TPMS structures. Several representative TPMS structures, including primitive, gyroid and diamond structures, are adopted to design gradient and heterogeneous types TPMS structures. The estimation method of contact and flow areas using an image processing technique is proposed. Python software is used to predict contact and flow area. The influence of the combination method of TPMS on contact and flow areas in the contact surface of combined TPMS structures with different shapes is investigated. Based on the results of the investigation, an appropriate combination method of TPMS structures is discussed.

Keywords : Triply periodic minimal surface, Contact area, Flow area, Combination method

1. 서론

삼중 주기적 최소 곡면(triply periodic minimal surface: TPMS)은 3차원으로 구성된 최소 주기 표면으로 매개 변수 변화를 통해 형상적 특성을 쉽게 변경할 수 있는 형상이다[1, 2]. 두 가지의 무한하고 교차하지 않는 분할된 표면으로 구성되는 TPMS형상은 다공성 제어의 편리성과 다른 형상들에 비하여 넓은 표면적을 얻을 수 있다[3]. 또한, TPMS의 독특한 형상은 경사 기능 구조 (functionally graded structure: FGS) 설계를 용이하게 한다[1, 4]. 이러한 특성으로 인해 열교환기, 방열판, 유체 혼합기, 금형

냉각 모듈 등 다양한 분야에서 TPMS 구조의 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-6]. 하지만, TPMS의 형상적 특성으로 인하여 복잡한 배열을 가진 TPMS구조의 설계가 어렵고, 이로 인하여 대부분의 선행 연구에서는 단위체 기반의 연구가 수행되었다[7-9]. TPMS의 형상적 특성을 활용하여 TPMS의 적용을 여러 분야로 확장하기 위해서는 혼합형 TPMS 구조 설계에 관한 연구가 선행되어야 한다. Lee 등은 유체 흐름 성능 향상을 위해 경사 기능 구조 기반의 TPMS 형상을 가진 채널 설계 방법을 제안하였다[4]. TPMS 형상을 가진 채널의 형태를 국부적으로 변경하였으며, 유동 해석과 유동 시각화 실험을 통해 FGS 설계가 유체 유동 저항을 감소시킬 수 있다고 보고하였다[4]. Nan 등은 이중 TPMS 형상을 천이 영역을 포함시켜 결합하는 방법을 제안하였다[10]. 이 연구에서는 생체 모방 설계를

1. 조선대학교 기계공학과, 박사과정

2. 조선대학교 기계공학과, 석사과정

3. 조선대학교 기계공학과, 교수

#Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Chosun University, E-mail: smart@chosun.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2111-300X

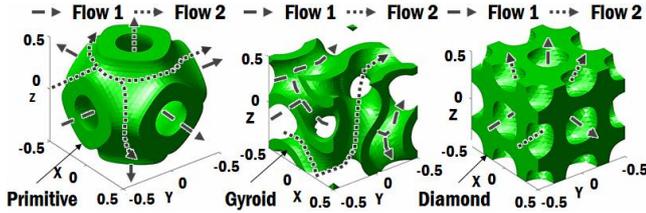


Fig. 1 Geometries for different TPMS structures

위하여 각 TPMS 형상의 특성을 고려한 부분적 결합 방법 대한 연구를 수행 하였다[10]. 또한, 이들은 제어 가능한 다공성 구조 개발을 위하여 TPMS 기반의 직접적 설계 방법을 제안하였다[11]. 이 연구에서는 하이브리드 구조, 확률적 구조, 경사 기능 구조 등 이중 형상 배치 구조를 제안하였으며, 생체 모사를 위한 공간 분할 방식을 제안하였다[11]. Ouda 등은 유동 해석을 이용하여 TPMS 형상에 따른 유체 혼합 에너지 변화에 대한 연구를 수행하였다[12].

기존의 선행 연구들에서는 경사 기능 구조 및 이중 형상 배열 등 다양한 TPMS 형상 혼합에 대한 연구가 진행되었다. TPMS 형상의 혼합은 기공 패턴 변화에 따른 부분적 강도 변화와 유체 혼합 특성 변화 등의 다양한 특성을 제공할 수 있어 연구의 필요성이 매우 높다. TPMS 형상 결합부의 접촉/유동 면적은 구조 강도와 유체 혼합 특성에 영향을 줄 수 있는 주요 요소이다. 하지만, TPMS 형상 혼합 시 접촉/유동 면적 변화에 대한 선행 연구는 거의 수행 되지 않았다. 따라서, 이 연구에서는 TPMS 단위체의 크기, 밀도 (ρ) 및 배열이 혼합형 TPMS 구조의 접촉 및 유동 면적 변화에 미치는 영향을 분석/고찰하고자 한다.

2. TPMS 구조 설계 및 데이터 도출

접촉/유동 면적 변화를 고찰하기 위하여 선정된 TPMS 단위체 형상은 Fig. 1과 같이 프리미티브(Primitive), 자이로이드(Gyroid), 다이아몬드(Diamond)의 3가지를 활용하였다. 이 연구에 사용된 모든 TPMS형상은 2개의 유동 영역을 가지고 있다. TPMS 단위체의 크기는 1.0 mm^3 으로 선정하였으며, MS lattice 소프트웨어를 이용하여 TPMS 형상을 생성하였다[3]. 이 연구에 사용된 TPMS 형상 생성을 위한 함수와 밀도는 Table 1과 같다. Table 1에서 x, y 및 z 는 각 축의 좌표이다.

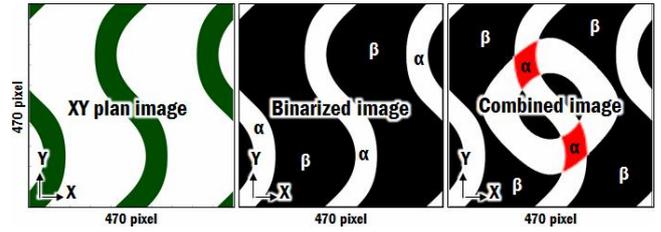


Fig. 2 Estimation method of contact and flow areas

Table 1 Equations and densities for different TPMS structures[13, 14]

| Type | Equations | Density (ρ , %) |
|-----------|---|-----------------------|
| Primitive | $\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y) + \cos(2\pi z) = \rho$ | 10-70 |
| Gyroid | $\sin(2\pi x)\cos(2\pi y) + \sin(2\pi y)\cos(2\pi z) + \sin(2\pi z)\cos(2\pi x) = \rho$ | |
| Diamond | $\cos(2\pi x)\cos(2\pi y)\cos(2\pi z) - \sin(2\pi x)\sin(2\pi y)\sin(2\pi z) = \rho$ | |

접촉 면적(contact area)과 유동 면적(flow area) 은 Fig. 2와 같이 접촉 평면인 XY 평면 데이터를 기준으로 도출하였다. 모든 데이터는 470×470 픽셀의 범위에서 모두 동일한 크기로 취득하였다. 평면 이미지는 Python 소프트웨어를 이용하여 이진화 하였다. 이진화된 이미지의 흰색과 검은색 영역을 각각 접촉 면적 (α) 과 유동 면적 (β) 으로 분류 하였다. 혼합 TPMS 구조의 접촉 및 유동 면적은 접촉면에서 두 가지 TPMS 형상의 겹친 이미지를 이용하여 도출하였다. 겹친 이미지의 접촉 면적은 빨간색 영역으로 산출 하였다. 접촉 및 유동 면적은 픽셀 개수를 이용하여 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 예측되었다.

$$\alpha = \frac{A}{P_t} \times P_n \quad (1)$$

$$\beta = \frac{A}{P_t} \times (P_t - P_n) \quad (2)$$

여기서 A, P_t 및 P_n 은 각각 단위체의 면적, 이미지의 픽셀 총 개수 및 검출된 픽셀의 개수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TPMS 단위체 특성

Fig. 3은 밀도에 따른 TPMS 단위체의 형상 변화이다. TPMS 생성 함수의 밀도를 증가할 경우 단위체

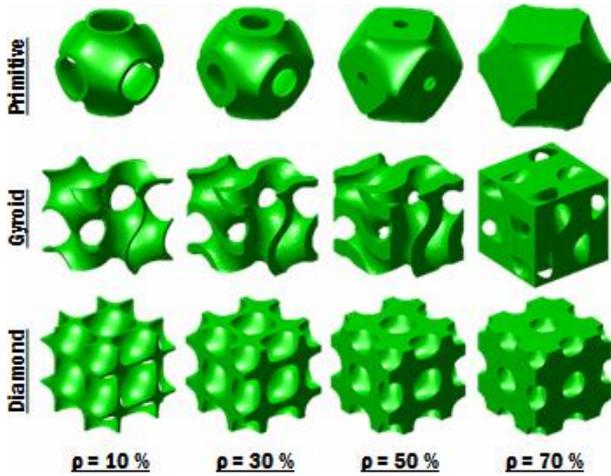


Fig. 3 TPMS structure for different shapes and densities

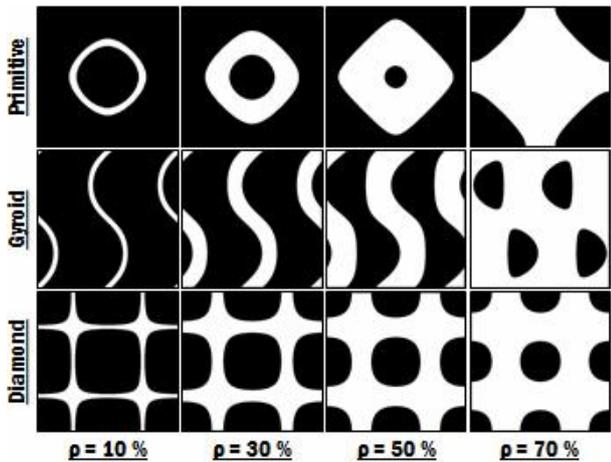
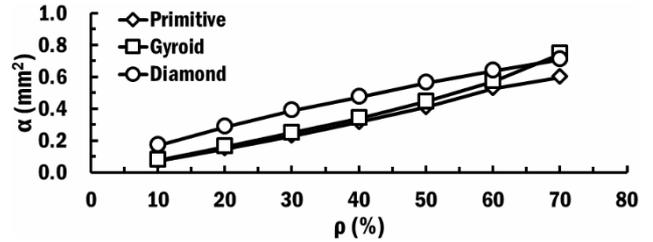
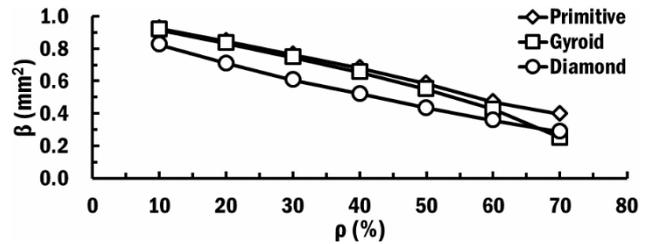


Fig. 4 Binarized sections for different designs of TPMS

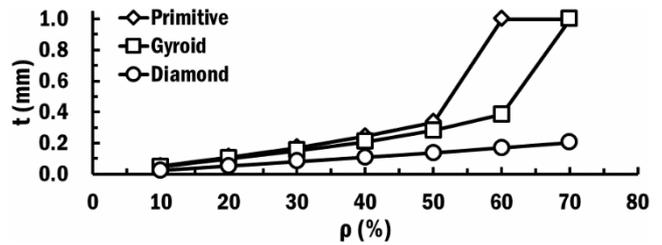
의 벽 두께(t)가 증가하였다. 이로 인하여 TPMS의 밀도를 매우 증가 시킬 경우 단위체 내부에 유동 영역이 생성되지 않았다. TPMS 형상에 따라 TPMS 내부에 유동 영역이 생성되지 않는 밀도는 상이하였다. 그러나 이 연구에 적용된 3가지 TPMS 형상에서는 밀도가 50 % 를 초과할 경우 단위체 내부에 유동 영역이 현저히 감소하여 TPMS 형상이 유동 관련 부품에 적용하기가 어려울 것으로 사료되었다. Fig. 4는 밀도에 따른 각 TPMS 단위체 형상의 XY 평면 이미지를 이진화 한 결과이다. 프리미티브와 자이로이드 형상의 경우 밀도를 50 % 이상 부여할 경우 유동 영역이 거의 생성되지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 다이아몬드의 경우에는 밀도가 70 % 가 되어도 유동 영역이 약간 생성되는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 (a) Contact areas for different designs of TPMS; (b) Flow areas for different designs of TPMS; (c) Wall thicknesses for different designs of TPMS

Fig. 5는 이진화 된 이미지에서 산출된 TPMS 형상과 밀도에 따른 접촉 면적, 유동 면적 및 벽 두께 변화이다. Fig. 5(a)와 같이 밀도가 증가 할수록 TPMS 구조의 접촉 면적은 증가하는 것을 알 수 있었다. 다이아몬드 형상에서 접촉 면적이 가장 크게 예측되었다. 밀도가 70 % 일 경우에는 자이로이드 형상과 다이아몬드 형상의 접촉 면적이 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 접촉 면적 증가 측면에서는 다이아몬드 형상이 상대적으로 적합한 것을 알 수 있었다.

Fig. 5(b)와 같이 TPMS 형상 내부의 유동 면적은 밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

이 연구에서 사용된 3가지 TPMS 형상들 중에서 다이아몬드 형상에서 유동 면적이 가장 작게 예측되었다. 밀도가 70 % 인 경우에는 자이로이드 형상과 다이아몬드 형상의 유동 면적이 유사한 것을 알 수 있었다. Fig. 5(b)와 같이 프리미티브 형상과 자이

로이드 형상은 밀도가 50 % 이하인 경우 50 % 이상의 유동 영역을 생성 시킬 수 있었다. 다이아몬드 형상은 밀도가 40 % 이하이어야 50 % 이상의 유동 면적을 얻을 수 있었다.

단위체의 벽 두께는 XY 평면의 Y 축 중앙부의 픽셀 개수를 이용하여 산출하였으며, 예측된 벽 두께는 Fig. 5(c)와 같다. 밀도를 증가시킬 경우 TPMS 형상의 벽 두께는 증가하였다. 프리미티브 형상에서 벽 두께가 가장 크게 예측되었다. TPMS 단위체 한 변의 길이가 1.0 mm 인 것을 기준으로 프리미티브 형상과 자이로이드 형상의 경우 밀도를 20 % 이상 설정하고, 다이아몬드 형상에서 밀도를 40 % 이상 설정하여야 0.1 mm 이상의 벽 두께를 가지는 단위체 제작이 가능한 것을 알 수 있었다. 적층 제조 공정으로 TPMS 형상을 제작할 경우, 벽 두께가 얇아지면 TPMS 제작성이 현저히 감소한다. 그러므로 이 연구에서 예측된 결과를 이용하여 벽 두께를 기준의 TPMS 형상의 최소 단위체 크기 및 밀도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 경사형 TPMS 구조 특성

밀도가 동일하고 한변의 크기가 다른 TPMS 단위체들의 경사 배치가 적용된 경사형(gradient type) TPMS 구조에 대한 접촉부 인근의 겹침 현상을 Fig. 6과 같이 고찰하였다. Fig. 6은 단위체 밀도와 TPMS 형상에 따른 겹침이 발생하는 영역의 변화를 나타내었다. 경사형 TPMS 구조를 생성하기 위하여 단위체 유동 영역이 50 % 이상인 밀도 조건을 기준으로 동일 밀도를 가지는 1개의 대형 구조(large structure: LS)에 4개의 소형 구조(small structure: SS)가 결합되도록 설계하였다.

이미지 분석 결과 Fig. 6과 같이 이 연구에서 사용된 모든 TPMS 형상에서는 밀도 증가함에 따라 단위체간의 접촉 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 단일 TPMS 형상의 경우 내부와 외부 유동 영역으로 명확히 구분되어 있어, 유체가 TPMS 형상 내에 유입될 경우 내부와 외부 유동의 혼합이 발생하지 않는다. 그러나 경사형 TPMS 구조를 활용할 경우 Fig. 6과 같이 내부와 외부 유동으로 분리되었던 유체 유동을 내외부가 혼합된 혼합 유동으로 변경되게 할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7(a)는 경사형 TPMS 구조에서 TPMS 형상과 밀도에 따른 접촉 면적의 변화이다. 경사형 TPMS

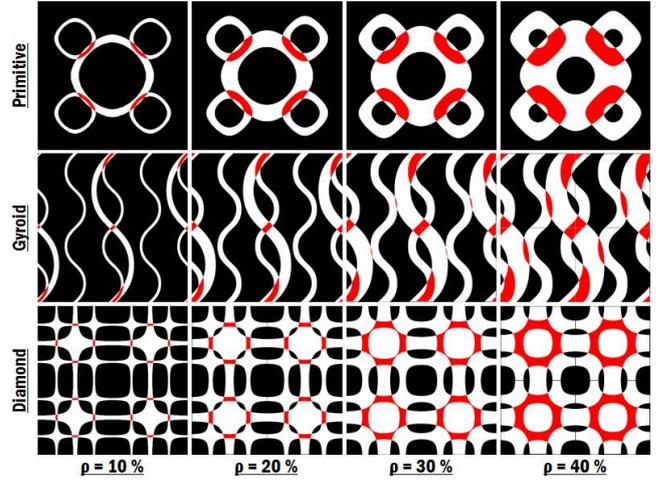


Fig. 6 Images of overlapped regions for different designs of gradient type TPMS structures

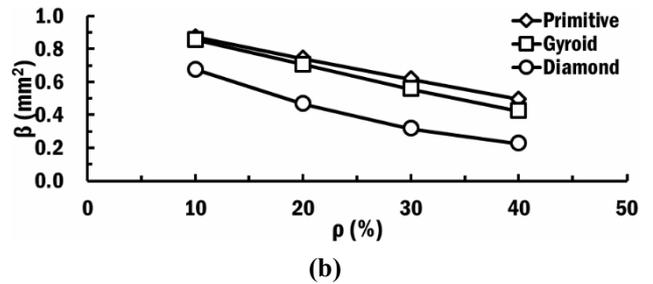
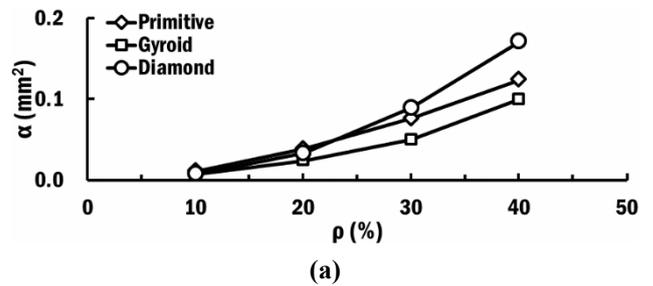


Fig. 7 (a) Contact areas for different designs of gradient type TPMS structures; (b) Flow areas for different designs of gradient type TPMS structures

구조에서도 단위체 분석 결과와 같이 밀도가 증가할수록 대형 구조와 소형 구조의 접촉 면적이 증가하였다. 그러나 경사형 TPMS 구조에서 단위체의 연속 배치와 달리 대형 구조와 소형 구조 사이의 접촉 면적이 현저히 적게 예측되었다. 또한, 경사형 TPMS 구조를 사용할 경우 단위체 분석 결과와 달리, 프리미티브 형상이 자이로이드 형상보다 접촉 면적이 크게 예측되는 것을 알 수 있었다. Fig. 7(b)

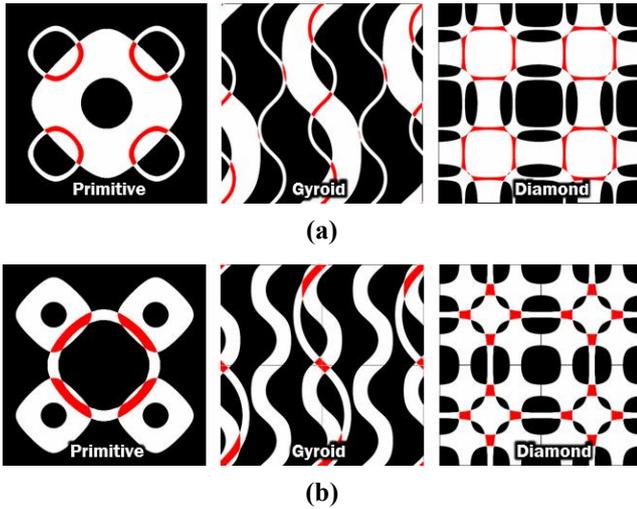


Fig. 8 (a) Images of overlapped regions for different designs of gradient type TPMS structures ($\rho_{LS} = 40\%$ and $\rho_{SS} = 10\%$); (b) Images of overlapped regions for different designs of gradient type TPMS structures ($\rho_{LS} = 10\%$ and $\rho_{SS} = 40\%$)

는 경사형 TPMS 구조에서 TPMS 형상과 밀도에 따른 유동 면적 변화 예측 결과이다. 경사형 TPMS 구조를 적용할 경우 동일 단위체 연속 배치를 가지는 TPMS 구조 보다 유동 면적이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 경사형 TPMS 구조를 사용할 경우에는 유동 면적은 감소하지만 유동 영역의 변경과 유체의 혼합이 가능한 것을 알 수 있었다. 단위체 결과와 유사하게 프리미티브, 자이로이드, 다이아몬드 순으로 유동 면적이 작게 나타났다. 또한, 프리미티브와 자이로이드의 유동 면적은 거의 유사한 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 경사형 TPMS 구조의 대형 구조와 소형 구조의 밀도를 달리 하였을 때 두가지 구조의 접촉부에 대한 단면 이미지이다. Fig. 8(a)는 대형 구조의 밀도(ρ_{LS})와 소형 구조의 밀도(ρ_{SS})가 각각 40%와 10%인 경우에 대하여 예측된 대형 구조와 소형 구조 접촉부의 단면 이미지이다. Fig. 8(b)는 대형 및 소형 구조의 밀도가 각각 10%와 40%인 경우에 대하여 예측된 접촉부의 단면 이미지이다.

Fig. 8과 같이 대형과 소형 구조의 밀도를 달리하는 경사형 TPMS 구조 설계에서 접촉 면적은 밀도가 작은 구조에 의해서 결정되고, 유동 면적은 밀도가 큰 구조에 매우 의존적임을 알 수 있었다.

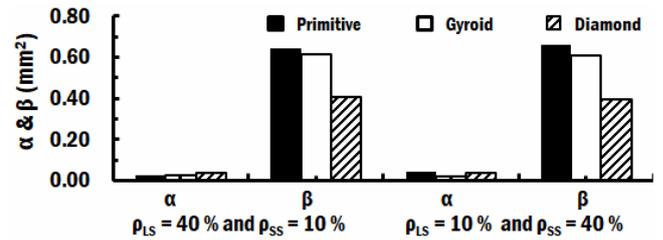


Fig. 9 Influence of densities of LS and SS on contact and flow areas of gradient type TPMS structures

Fig. 9는 경사형 TPMS 구조의 대형 구조와 소형 구조의 밀도를 달리한 경우에 대하여 예측된 접촉 면적과 유동 면적이다. 이 경우에는 유동 면적이 접촉 면적 보다 10-32배 정도 크게 형성되는 것을 알 수 있었다. 대형 구조의 밀도가 40%이고 소형 구조의 밀도가 10%인 경우에는 다이아몬드 형상을 가진 TPMS 구조의 접촉 면적이 가장 크게 예측되었으나, 대형 구조의 밀도가 10%이고 소형 구조의 밀도가 40%인 경우에는 프리미티브 형상을 가진 TPMS 형상의 접촉 면적이 가장 크게 산출되었다. 대형 구조와 소형 구조의 밀도 조합에 상관없이 프리미티브, 자이로이드, 다이아몬드 순으로 유동 면적이 크게 예측되었다. 또한 대형 구조와 소형 구조의 밀도가 상호 변경되어도 유동 면적의 변화는 거의 없는 것을 알 수 있었다.

3.3 이종 형상 배치형 TPMS 구조 특성

밀도가 동일하고 이종 형상 TPMS 단위체가 연속 배치된 이종 형상 배치형 (heterogeneous type) TPMS 구조에 대한 접촉부 인근의 겹침 현상을 Fig. 10과 같이 고찰하였다. Fig. 10은 이종 형상 배치가 적용된 TPMS 구조에서 겹침이 발생하는 접촉부의 단면 이미지이다. 단위체의 밀도는 모두 30%를 적용하였다. 자이로이드 형상과 자이로이드를 90° 회전한 자이로이드 90 (gyroid90) 형상의 두가지 형상이 이종 형상 연속 배치형 TPMS 구조 설계에 적용되었다. Fig. 10과 같이 총 6가지의 조합으로 이종 형상 배치형 TPMS 구조를 설계하였다. 접촉부 단면 이미지 분석을 통해 단일 형상이 연속적으로 배치된 TPMS 구조의 입구에서 내부 유동과 외부 유동이 분리되며 TPMS 구조 출구까지 계속적으로 분리된 유동 영역에서 유동이 발생하지만, 이종 형상 배치형 TPMS 구조를 적용할 경우 TPMS 구조 내부에서 내/외부 유동이 혼합되거나 유동 경로가 변경될 수 있

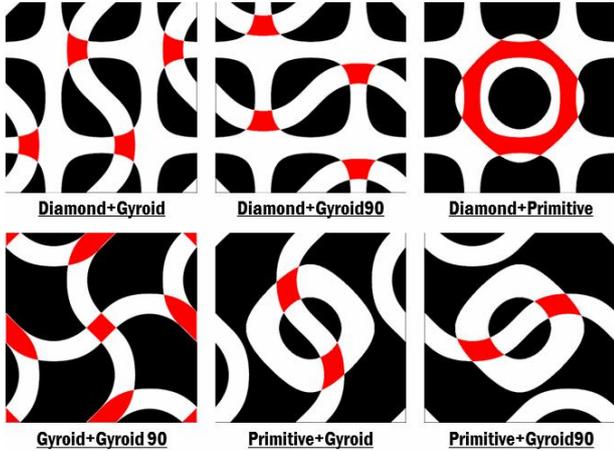


Fig. 10 Images of overlapped regions for different designs of heterogeneous type TPMS structures

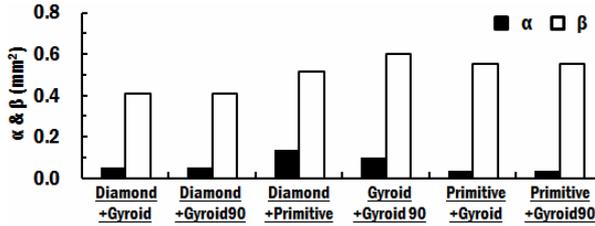


Fig. 11 Estimated contact and flow areas for different designs of heterogeneous type TPMS structures

음을 알 수 있었다. 이결과로부터 이중 형상 배치형 TPMS 구조를 사용할 경우, 유체의 혼합 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

Fig. 11은 이중 형상 배치형 TPMS 구조 설계에 따른 접촉 면적과 유동 면적 변화를 예측한 결과이다. 다이아몬드 형상과 프리미티브 형상의 조합과 자이로이드 형상과 자이로이드 90 형상의 조합으로 구성된 이중 형상 배치형 TPMS 구조를 사용할 경우 다른 형상 조합에 비하여 접촉 면적이 상대적으로 크게 예측되었다. 자이로이드 형상과 자이로이드 90 형상의 조합, 프리미티브와 자이로이드 형상의 조합, 프리미티브와 자이로이드 90 형상의 조합으로 구성된 이중 형상 배치형 TPMS 구조를 사용할 경우, 다른 이중 형상 조합에 의한 TPMS 구조 보다 유동 면적이 상대적으로 크게 예측되었다. 프리미티브 형상을 사용하는 경우에는 유동 면적이 증가하고 접촉 면적이 감소하는 반면, 다이아몬드 형상을 적용할 경우에는 유동 면적은 감소하고 접촉 면적이 증가하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

TPMS 단위체의 크기, 밀도 및 배열이 혼합형 TPMS 구조의 접촉 및 유동 면적 변화에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 동일 형상과 밀도를 가진 TPMS 단위체를 연속적으로 배치하여 TPMS 구조를 생성할 경우, 접촉 면적 감소와 유동 면적 증가를 위하여 밀도를 증가시켜야 함을 알 수 있었다. 유동 면적을 증가시키기 위해 프리미티브와 자이로이드 형상을 선정하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다. 전체 면적에서 유동 면적을 50 % 이상 얻기 위해서는 밀도가 40 % 이하로 적용되어야 하고, 벽 두께를 0.1 mm 이상 생성하기 위해서는 프리미티브와 자이로이드의 경우 밀도가 20 % 이상 적용되어야 할 것으로 사료되었다.

둘째, 경사형 TPMS 구조를 적용할 경우 단일 형상 TPMS 구조보다 접촉/유동 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 TPMS 구조를 적용할 경우 단일 형상 TPMS 구조로 달리 내/외부 유동이 혼합되는 혼합 유동 및 유동 경로 변경을 유도 할 수 있을 것으로 사료되었다. 경사형 TPMS 구조의 대형 구조와 소형 구조의 밀도 조절을 통하여 유동 면적을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 이중 형상 배치형 TPMS 구조를 사용할 경우 경사형 TPMS 구조와 같이 내/외부 유체 유동이 혼합되는 혼합 유동과 유로 변경이 유도 될 수 있음을 알 수 있었다. 접촉 면적 증대를 위해서는 다이아몬드와 프리미티브 형상 조합형 TPMS 구조를 선정하는 것이 바람직 할 것으로 사료되었다. 그러나 유동 면적 증대 측면에서는 자이로이드와 프리미티브 형상 조합형 TPMS 구조 설계를 적용하여 함을 알 수 있었다.

향후 추가적인 유동 해석과 실험을 통하여 최적 TPMS 설계 및 배열 기법을 도출할 예정이다.

후 기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00219369)

REFERENCES

- [1] W. Jiang, W. Liao, T. Liu, X. Shi, C. Wang, J. Qi, Y. Chen, Z. Wang, C. Zhang, 2021, A Voxel-based Method of Multiscale Mechanical Property Optimization for the Design of Graded TPMS Structures, *Mater. Des.*, Vol. 204, 109655. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109655>
- [2] L. Han, S. Che, 2018, An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems, *Adv. Mater.*, Vol. 30, No. 17, 1705708. <https://doi.org/10.1002/adma.201705708>
- [3] A. M. Abou-Ali, O. Al-Ketan, D. W. Lee, R. Rowshan, R. K. A. Al-Rub, 2020, Mechanical Behavior of Polymeric Selective Laser Sintered Ligament and Sheet Based Lattices of Triply Periodic Minimal Surface Architectures, *Mater. Des.*, Vol. 196, 109100. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109100>
- [4] S. H. Oh, C. J. An, B. M. Seo, J. W. Kim, C. Y. Park, K. Park, 2023, Functional Morphology Change of TPMS Structures for Design and Additive Manufacturing of Compact Heat Exchangers, *Addit. Manuf.*, Vol. 76, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103778>
- [5] M. Alteneiji, M. I. H. Ali, K. A. Khan, R. K. A. Al-Rub, 2022, Heat Transfer Effectiveness Characteristics Maps for Additively Manufactured TPMS Compact Heat Exchangers, *Energy Storage and Saving*, Vol. 1, No. 3, pp. 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.04.005>
- [6] J. H. You, K. Park, 2021, Design and Additive Manufacturing of Thermal Metamaterial with High Thermal Resistance and Cooling Capability, *Addit. Manuf.*, Vol. 41, 101947. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101947>
- [7] J. H. Kim, D. J. Yoo, 2020, A Design and Fabrication Method of New Compact Heat Exchangers Using Triply Periodic Minimal Surface, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 37, No. 7, pp. 509-518. <http://doi.org/10.7736/JKSPE.020.025>
- [8] N. Novak, D. Kytir, V. Rada, T. Doktor, O. Al-Ketan, R. Rowshan, M. Vesenjok, Z. Ren, 2022, Compression Behaviour of TPMS-filled Stainless Steel Tubes, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 852, 143680. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143680>
- [9] Y. Cao, S. Lai, W. Wu, L. Sang, Y. Lin, T. Liu, C. Liang, W. Liu, Y. Zhao, 2023, Design and Mechanical Evaluation of Additively-manufactured Graded TPMS Lattices with Biodegradable Polymer Composites, *J. Mater. Res. Technol.-JMRT*, Vol. 23, pp. 2868-2880. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.221>
- [10] N. Yang, Y. Tian, D. Zhang, 2015, Novel Real Function Based Method to Construct Heterogeneous Porous Scaffolds and Additive Manufacturing for Use in Medical Engineering, *Med. Eng. Phys.*, Vol. 37, No. 11, pp. 1037-1046. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.08.006>
- [11] N. Yang, Z. Quan, D. Zhang, Y. Tian, 2014, Multi-morphology Transition Hybridization CAD Design of Minimal Surface Porous Structures for Use in Tissue Engineering, *Comput.-Aided Des.*, Vol. 56, pp. 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.06.006>
- [12] M. Ouda, O. Al-Ketan, N. Sreedhar, M. I. H. Ali, R. K. A. Al-Rub, S. K. Hong, H. A. Arafat, 2020, Novel Static Mixers Based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Architectures, *J. Environ. Chem. Eng.*, Vol. 8, No. 5, 104289. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104289>
- [13] S. AlMahri, R. Santiago, D. W. Lee, H. Ramos, H. Alabdouli, M. Alteneiji, Z. Guan, W. Chatwell, M. Alves, 2021, Evaluation of the Dynamic Response of Triply Periodic Minimal Surfaces Subjected to High Strain-Rate Compression, *Addit. Manuf.*, Vol. 46, 102220. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102220>
- [14] Y. Cao, S. Lai, W. Wu, L. Sang, Y. Lin, T. Liu, C. Liang, W. Liu, Y. Zhao, 2021, Design and Mechanical Evaluation of Additively-manufactured Graded TPMS Lattices with Biodegradable Polymer Composites, *J. Mater. Res. Technol.-JMRT*, Vol. 23, pp. 2868-2880. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.221>