

# TPMS 단위체 설계에 따른 공기의 자가 순환 특성 변화 고찰

범종찬<sup>1</sup> · 이광규<sup>2</sup> · 안동규<sup>3, #</sup>

## A Study on Influence of Design of Unit Cell for TPMS on Self-circulation Characteristics of Air

J. C. Beom, K. K. Lee, and D. G. Ahn

(Received July 22, 2024 / Revised July 30, 2024 / Accepted July 31, 2024)

### Abstract

The triply periodic minimum surface (TPMS) shape with a complex geometry can easily manufactured from additive manufacturing processes. The TPMS shape has a high surface-to-volume ratio. In addition, the TPMS shape increases the possibility of the self-circulation when the fluid flows inside the TPMS structure. Due to these reason, the performance of the fluid flow filter can be greatly improved when the TPMS structure is applied to the filter. The aim of this paper is to investigate the influence of the design of the unit cell for TPMS on self-circulation characteristics of air using computational fluid dynamics (CFD). From the results of the CFD, the effects of the shape and the dimension of the unit cell for TPMS on the self-circulation pattern and the pressure difference are examined. Finally, a proper design of the TPMS is discussed from the viewpoint of self-circulation of air.

**Keywords** : Triply periodic minimal surface, Design, Computational fluid dynamics, Self-circulation, Pressure difference

### 1. 서론

적층 제조 (additive manufacturing: AM) 공정은 재료를 기저부로부터 한 층씩 쌓아 올려 3차원 형상을 가지는 제품을 제작하는 기술로서 적층 재료, 적층 원리 등에 따라 여러가지 적층 제조 공정들로 나누어진다[1]. 적층 제조 공정은 제거 가공 공정으로 제작이 용이하지 않은 기하학적 형상이 복잡한 제품을 쉽게 제작할 수 있는 장점을 가지고 있어, 최근 활발히 연구가 진행되고 있다[2]. 적층 제조 공정의 발전은 매우 복잡한 형상인 삼중 주기적 최소 곡면(triply periodic minimal surface: TPMS) 구조의 실물 제작을 가능하게 하였다[3]. TPMS 구조가 유체 유동에 적용될 경우 얇은 벽으로 나뉘어진 내부와

외부 유동 채널을 가지게 된다[4]. 또한 주기적 반복 구조로 이루어진 연속 곡면 특성에 의하여 반복적 패턴을 가진 부드러운 유체 유동이 가능하게 한다[4]. 이러한 특성들로 인해 열 교환기, 배터리 냉각, 탄소 포집 및 수소 저장 등 다양한 분야에 적용되기 시작하고 있다[5].

단위체의 크기 및 기공률 (porosity) 과 같은 TPMS 설계 변수와 유체 속도와 유체/외부 온도와 같은 입력 조건들은 TPMS 구조 내부의 유동 특성에 크게 영향을 미친다. TPMS 설계 조건과 유체 유동 입력 조건에 따른 TPMS 구조 내부의 유동 특성 변화를 분석하기 위하여 전산 유체 역학 (computational fluid dynamics: CFD) 기법이 활용되기 시작하고 있다[6-9]. Ali 등은 CFD 를 이용하여 기공율이 동일한 조건에서 TPMS 형상이 유체 투과율 (permeability)과 벽면 전단 응력에 미치는 영향을 고찰하였다[6]. Piedra 등은 CFD 를 활용하여 프리미티브 및 IWP (I-graph and wrapped package-graph) 형상을

1. 조선대학교 기계공학과, 석사과정

2. 조선대학교 기계공학과, 박사과정

3. 조선대학교 기계공학과, 교수

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

가진 단위체 내부에 공기 유동이 발생할 때, TPMS 기공률과 공기 속도가 압력 강하와 유체 투과율 변화에 미치는 영향을 분석하였다[7]. Karaman 등은 TPMS 형상과 밀도가 유체 투과율, 벽면 전단 응력 및 출구 속도에 미치는 영향을 CFD 를 이용하여 고찰하였다[8]. Lee 등은 프리미티브 및 자이로이드 형상을 가진 유체 필터 내부로 물을 유동 시킬 때, 프리미티브 및 자이로이드 형상 변수 변화에 따른 필터 내부의 유체 투과율, 유동 패턴 및 압력 강하 변화를 CFD 기법으로 분석하였다[9]. 기존 선행 연구들은 CFD를 이용하여 유체가 TPMS 형상을 가진 물체를 통과할 때, TPMS 형상과 기공률에 따른 유체 투과율, 유동 패턴, 압력 강하, 출구 속도 변화를 중점적으로 고찰하였다.

TPMS 형상은 내부 구조가 반복되는 연속적 곡면으로 이루어져 있다. 이로 인하여 유체가 TPMS 형상 내부로 유입될 경우, 유체와 TPMS 벽면 사이의 점성/마찰에 의하여 채널 내부에 있는 유체에 자가순환 (self-circulation) 유동이 발생할 가능성이 높다. TPMS 형상은 비표면적 (surface to volume ratio) 이 매우 높다[10]. 이로 인하여 TPMS 구조를 필터로 사용할 경우, 유체와 필터 표면이 접촉할 수 있는 확률이 증가한다[10]. TPMS 형상의 높은 자가순환 유동 유도 가능성과 비표면적은 유체 필터들의 성능 향상에 크게 기여할 수 있다[10]. 하지만, 선행 연구들에서는 TPMS 구조에 유체 유동이 부과되었을 때 TPMS 형상에 따른 유체 자가순환 특성 변화에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았다.

이 연구에서는 TPMS 단위체 내부에 공기가 유입되었을 때 TPMS 형상과 크기에 따른 공기의 자가순환 유동 특성 변화를 고찰하고자 한다. CFD 를 이용하여 TPMS 형상과 한 변 길이 ( $D_u$ ) 에 따른 자가순환 유동 패턴 및 압력 차이 변화를 분석하였다. 이 결과를 이용하여 자가순환 특성이 우수한 적정 TPMS 형상과 크기를 고찰하였다.

## 2. 설계 및 유동 해석

### 2.1 TPMS 형상 설계 및 데이터 변환

프리미티브, 자이로이드 및 다이아몬드의 3가지 TPMS 형상을 박판 입체 (sheet solid) 로 상용 소프트웨어인 nTopology 를 사용하여 생성하였다. 이 형상은 CFD 해석에서 고체 영역으로 사용되었다. Fig.

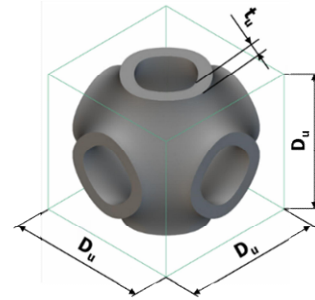


Fig. 1 Representative of unit cell for TPMS[10]

Table 1 Design conditions of unit cell for TPMS

TPMS structure	$D_u$ (mm)	$t_u$ (mm)
Primitive, Gyroid, Diamond	5 – 20	0.9

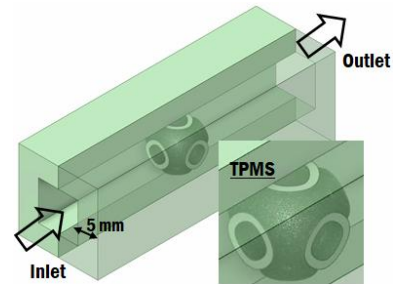


Fig. 2 Concept of CFD model ( $D_u = 10$  mm)

1은 TPMS 단위체 형상과 단위체 한 변 길이와 단위체 벽 두께( $t_u$ )의 개념도이다. TPMS 형상 설계 조건은 Table 1과 같다. nTopology 에서 생성된 모든 TPMS 단위체 형상들은 .stl 파일로 저장된다. CFD 소프트웨어인 Ansys V2024 R1을 이용하여 유동 해석을 수행하였다. CFD 에서는 입체 형상 데이터인 스텝 (step: .stp) 파일이 요구되어, ANSYS SpaceClaim 소프트웨어를 이용하여 .stl 파일 형식의 TPMS 형상 데이터를 .stp 형식의 입체 데이터로 변환하였다.

### 2.2 유동 해석 모델링

Fig. 2와 같이 TPMS 형상이 포함된 사각형 관 내부에서 공기가 유동하는 것을 기준으로 유동 해석 모델을 설정하였다. 유동 해석과 모델링은 상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent 를 사용하였다. 길이가 60 mm 이고 두께가 5 mm 인 사각관 중심에 TPMS 단위체 형상을 위치 시켰다.

사각형 관 내부에 유동하는 유체와 TPMS 단위체의 재질은 각각 공기와 폴리카보네이트 (polycarbonate:

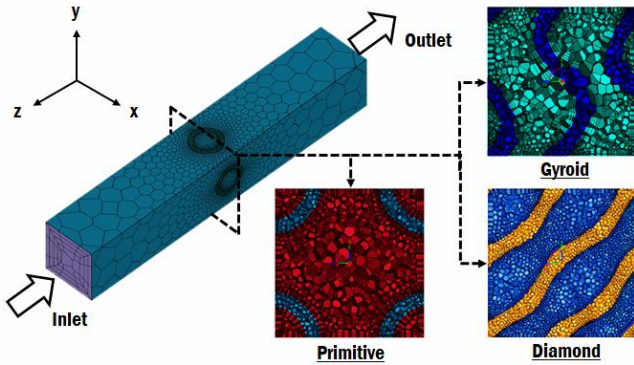


Fig. 3 Meshes of flow and structure regions ( $D_u = 10$  mm)

PC)로 선정하였다. 유동 해석 모델링에서는 공기와 PC의 물성을 입력하였다. 유동 격자와 구조 격자는 체적 격자인 polyhexcore를 적용하였다. 사각 파이프 내부의 유동 영역과 TPMS의 유동/구조 영역에만 유동 격자와 구조 격자를 생성하였다. 유동 해석 모델에서 입구 유속과 출구 기압은 각각 1 m/s과 대기압을 적용하였다. 유동 해석은 정상 상태 조건을 가정하였다. 점성 모델은 유체와 고체의 경계면 및 자유 흐름 영역에서 높은 정확도와 신뢰도를 가지는 SST (shear stress transport) k-omega 난류 모델을 사용하였다. SST k-omega 모델은 식 (1) 및 (2)와 같이 표현된다[11]. 식 (1)에서  $\Delta k : \Delta \omega$ 는 식 (2)와 같이 표현된다[11].

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{v_i} P_k - C_\mu \rho \omega^2 + (1 - F_1) \frac{2\rho \sigma_\omega^2}{\omega} \Delta k : \Delta \omega \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ ,  $\varepsilon$ ,  $t$ ,  $x_i$ ,  $U$ ,  $\mu$ ,  $\mu_t$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $\gamma$ ,  $v_i$ ,  $P_k$ ,  $k$  및  $\omega$  각각 밀도, 난류 소산율, 시간, 좌표, 유체 속도, 유체 점성 계수, 난류 점성 계수, 난류 프란틀 수 (Prandtl number), 비중량, 난류 동점성 계수, 평균 속도에 의한 난류 운동에너지 생산율, 난류 운동에너지 및 비 난류 소산율이다. 또한,  $C_\mu$ 와  $\sigma_\omega$ 는 모델 상수로 각각 0.09와 2이고,  $F_1$ 은 혼합 함수 (blending function)이다.

$$\Delta k : \Delta \omega = \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2)$$

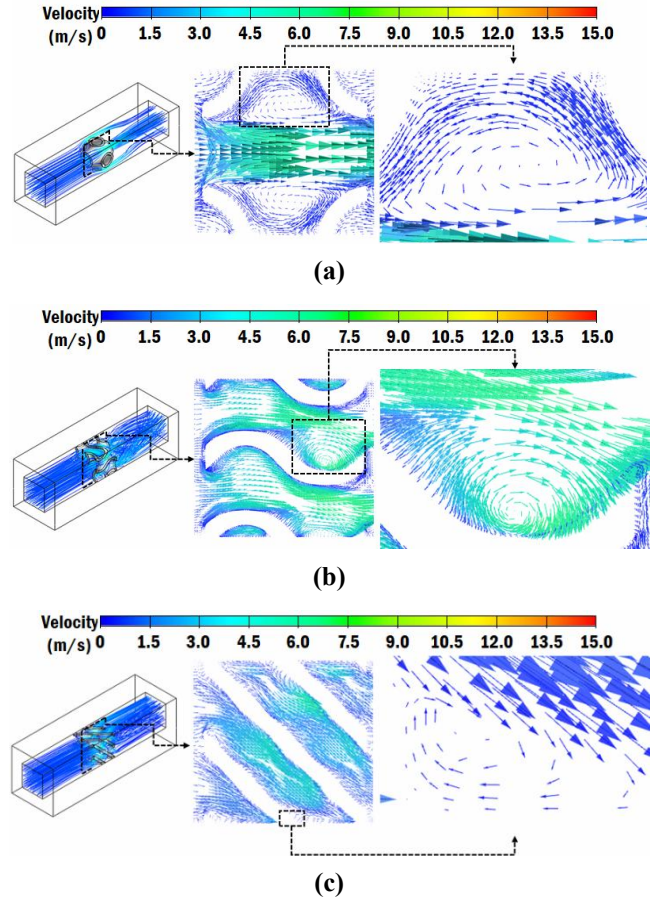


Fig. 4 (a) Flow pattern of primitive shape ( $D_u = 10$  mm); (b) Flow pattern of gyroid shape ( $D_u = 10$  mm); (c) Flow pattern of diamond shape ( $D_u = 10$  mm)

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 형상에 따른 자가 순환 특성 변화

TPMS 형상에 따른 TPMS 구조 내부의 공기 유동 특성 변화 분석에서는 한 변의 길이가 10 mm인 프리미티브, 자이로이드 및 다이아몬드 형상을 적용하였다. Figs. 4(a)-(c)는 유동 해석 결과 예측된 TPMS 형상에 따른 TPMS 내부에서의 유동 패턴 변화이다.

프리미티브 형상 내부에 공기가 유입 되었을 때, Fig. 4(a)와 같이 중앙부에서는 유입된 공기의 유동이 거의 그대로 유지되는 것을 알 수 있었다. 중앙부의 유속은 유입된 공기의 초기 유속 보다 약 5배 이상 증가된 유속으로 예측되었다. 이 현상은 공기 유동이 프리미티브 형상 내부로 들어오는 입구의 단면적이 파이프 단면적도 현저히 감소하기 때문으로 사료된다. 프리미티브 형상의 중심에서 입구부 반경

만큼 떨어진 영역 밖에서는 자가 순환 유동이 발생하였다. 자가 순환이 발생하는 영역의 유속은 1.5 m/s 이하로 중심부 유동에 비하여 상대적으로 낮은 유속 범위를 나타내었다. 이 결과로 프리미티브 형상을 사용할 경우 공기의 대부분이 중심부의 주 유동 (main flow) 에 의하여 프리미티브 형상을 통과하고 일부분의 공기 유량만이 프리미티브 형상 내부에서 자가 순환 유동을 발생시키며 순환하는 것을 알 수 있었다.

자이로이드 형상 내부에 공기가 유입 되었을 때, Fig. 4(b)와 같이 파이프 직경보다 좁아진 자이로이드 입구부 단면적에 의하여 자이로이드 내부의 공기 유속이 유입된 공기 유속보다 약 5배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다. 유동 방향으로 자이로이드의 첫번째 곡면부에서는 거의 자가 순환이 발생하지 않았다. 그러나 두번째 곡면부로 들어가면서 많은 량의 자가 유동이 발생하였다. 이 현상은 자이로이드 형상의 연속적 곡면 형상에 의하여 유입된 공기 유동이 자이로이드 형상 벽면의 곡률부와 연속적으로 접촉하면서 압력 역구배가 경계층 내에서 계속적으로 증가하고 공기 유동이 유동 경계층으로부터 분리되는 박리 (separation) 현상을 증가시켜 회전 유동으로 천이 되어 공기의 유량이 증가하기 때문으로 사료된다. 특히 자가 순환이 발생하는 영역의 유속이 약 3-6 m/s의 범위로 프리미티브 보다 유속이 매우 높게 나타났다. 이 결과들로부터 자이로이드 형상을 자가 순환 유동을 활용하는 미세 먼지 포집 필터 (capture filter), 이산화탄소 포집 필터, 정적 혼합기 (static mixer) 등에 적용할 경우 필터 또는 혼합기 성능이 우수할 것으로 사료된다.

다이아몬드 형상 내부에 공기가 유입 되었을 때, Fig. 4(c)와 같이 다이아몬드 형상 입구에서 유동 방향이 급격히 변경됨에 따라 유동 에너지가 많이 소실되어 채널 내부에서 유동하는 공기의 유속이 현저히 감소하였다. 다이아몬드 형상 내부에서는 공기의 자가 순환 유동이 거의 발생하지 않았다.

위 결과들로부터 TPMS 형상을 자가 순환 유동 개념을 이용하는 미세 먼지 포집 필터, 이산화탄소 포집 필터, 정적 혼합기 등의 설계에 활용할 경우, 이 연구에서 고려한 3가지 TPMS 형상 중 자이로이드 형상을 적용하면 필터와 혼합기의 성능을 적절히 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

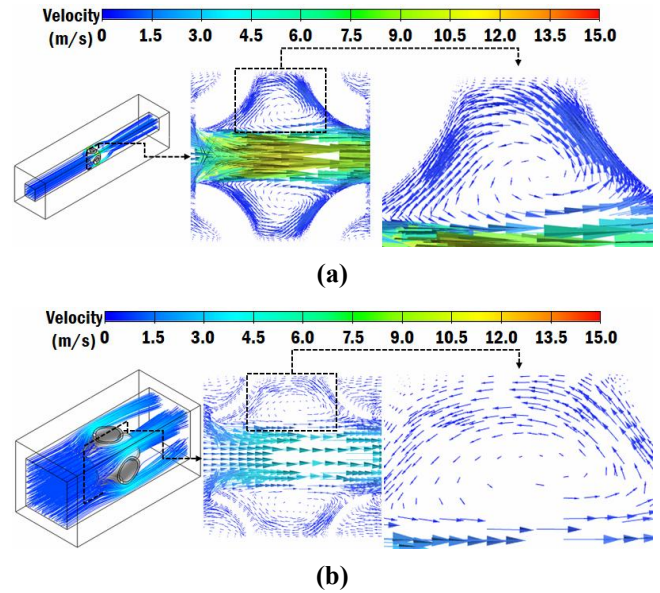


Fig. 5 (a) Flow pattern of primitive shape ( $D_u = 5$  mm);  
(b) Flow pattern of primitive shape ( $D_u = 20$  mm)

### 3.2 $D_u$ 에 따른 자가 순환 특성 변화

Figs. 5-7은 유동 해석 결과 예측된 TPMS 형상별 한 변 길이에 따른 유동 패턴 변화이다.

프리미티브 형상의 내부에서는 Figs. 4(a), 5(a) 및 5(b)와 같이 프리미티브의 한 변의 길이가 감소할수록 중앙부 주 유동부의 유속은 증가하는 경향이 나타났다. 프리미티브의 한 변의 길이가 감소함에 따라 자가 순환 유동이 발생하는 영역에서의 공기 유속과 유량 분율이 증가하였다. 그러나 자가 순환 유동이 발생하는 영역에서의 공기 유속은 프리미티브 형상의 단위체 크기에 관계없이 1.5 m/s 이하로 예측되었다.

다이아몬드 형상의 내부에서는 Figs. 4(c), 6(a) 및 6(b)와 같이 다이아몬드 형상의 한 변의 길이가 감소할수록 주 유동부의 유속과 자가 순환 유량이 증가하였다. 그러나 다이아몬드 형상 내부의 자가 순환 유량은 상대적으로 매우 작은 영역에서만 발생하며, 다이아몬드 형상의 크기가 증가할수록 자가 순환 유동 발생율이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 다이아몬드 형상에서는 자가 순환이 발생하는 영역에서의 공기 유속은 프리미티브 형상보다 느리게 예측되었다.

자이로이드 형상의 내부에서는 Figs. 4(b), 7(a) 및 7(b)와 같이 한 변의 길이가 감소할수록 유속은 현저히 증가하는 현상이 나타났다. 또한 자이로이드

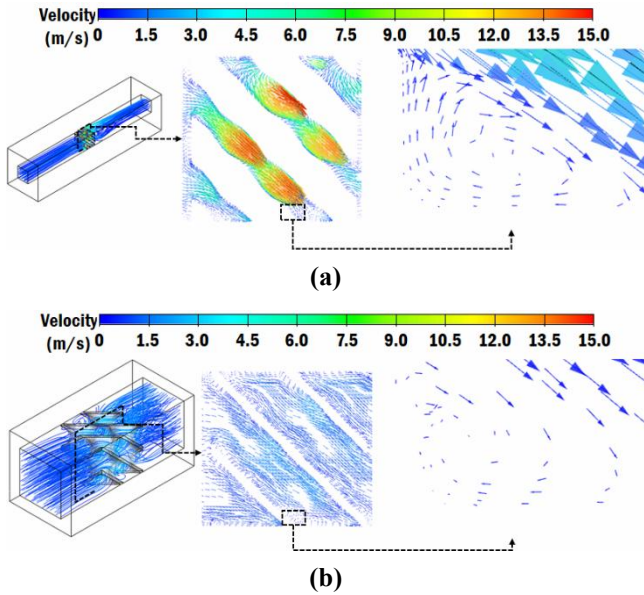


Fig. 6 (a) Flow pattern of diamond shape ( $D_u = 5$  mm); (b) Flow pattern of diamond shape ( $D_u = 20$  mm)

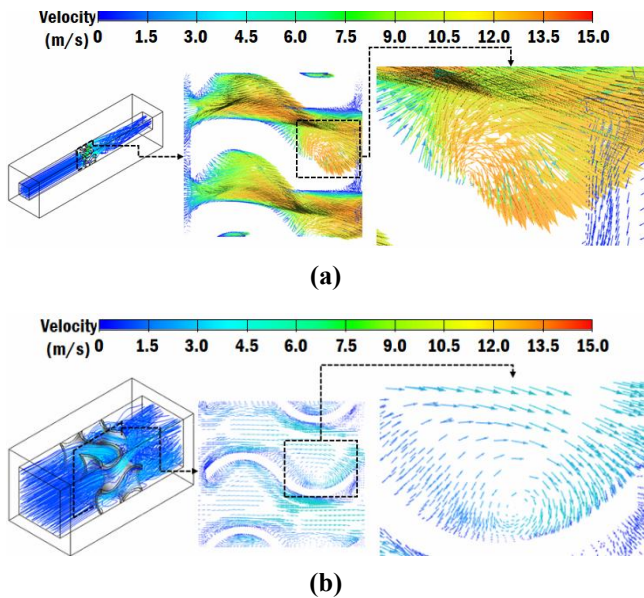


Fig. 7 (a) Flow pattern of gyroid shape ( $D_u = 5$  mm); (b) Flow pattern of gyroid shape ( $D_u = 20$  mm)

단위체 형상의 한 변 길이가 감소할수록 자가 순환 유동이 발생하는 유량, 유량 분율 및 유속이 현저히 증가하였다. 상용 소프트웨어인 CFD-POST 를 이용하여 자이로이드 형상의 한 변의 길이에 대한 자가 순환 영역에서 자가 순환하는 공기의 평균 유속을 예측하였다. 자가 순환하는 공기의 평균 유속은 Fig. 8과 같이 자가 순환 유동의 중심으로부터 자이로이

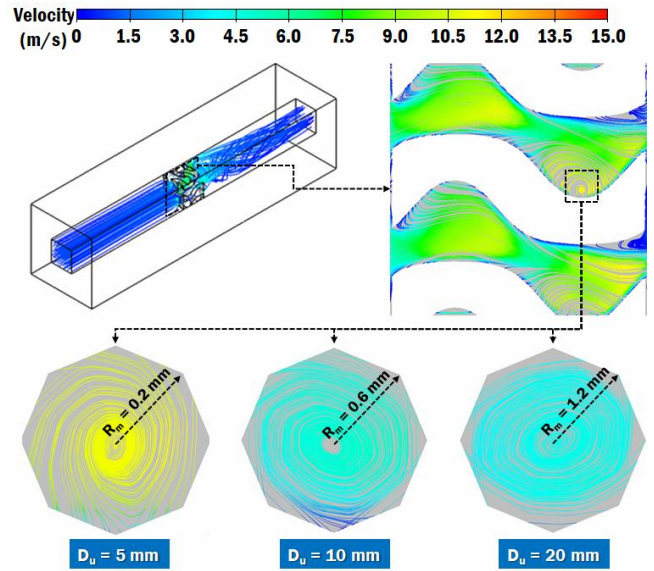


Fig. 8 Region to estimate mean velocity for self-circulated flow (gyroid)

드 형상의 벽면까지 원을 생성하여, 이 원 내부에 있는 공기의 유속을 평균하여 산출하였다. 자이로이드 단위체 한 변의 길이가 5 mm, 10 mm 및 20 mm 일때 평균 유속 측정을 위한 원의 반경 ( $R_m$ ) 은 각각 0.2 mm, 0.6 mm 및 1.2 mm 이다. 자이로이드 단위체의 한 변 길이가 5 mm, 10 mm 및 20 mm 인 형상에서 생성된 자가 순환 영역의 공기의 평균 유속을 각각 10.4 m/s, 4.3 m/s 및 4.1 m/s 로 예측되었다. 이 결과로부터 자이로이드 형상의 한 변의 크기가 10 mm 이상인 경우에는 자가 순환 유동의 단위 면적당 유량, 유속 및 유량 분율이 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 TPMS 설계에 따른 차압 특성 변화

공기가 TPMS 형상을 통과하면서 발생하는 에너지 손실을 간접적으로 비교하기 위하여 Fig. 9와 같이 TPMS 단위체 형상과 크기에 따른 공기 유동의 차압 ( $\Delta P$ ) 변화를 예측하였다. 차압의 크기는 유동의 운동 에너지와 열의 소산율과 비례한다[12]. 그러므로, 입구와 출구에서의 공기 유동 차압이 증가할수록 에너지 손실이 증가한다[12]. 차압은 식 (3)과 같이 사각형 관의 입구와 출구 압력의 차이로 정의하였다.

$$\Delta P = |P_{in} - P_{out}| \quad (2)$$

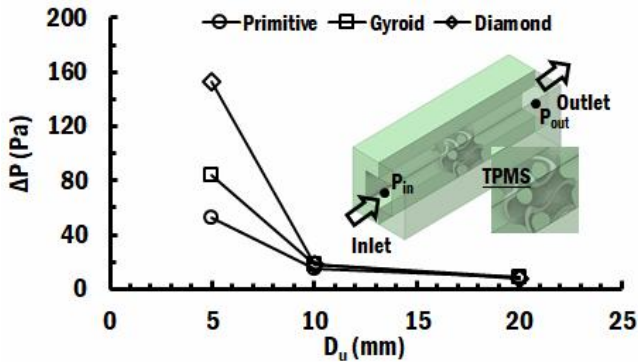


Fig. 9 Influence of TPMS design on pressure difference

여기서,  $P_{in}$  과  $P_{out}$  은 각각 Fig. 9와 같이 각각 입구와 출구에서의 정압(static pressure)이다.

TPMS 형상의 한 변 길이가 5 mm 인 경우에는 다이아몬드, 자이로이드 및 프리미티브 형상 순으로 차압이 낮게 나타났다. 이때, 다이아몬드 형상과 자이로이드 형상의 차압 차이 및 다이아몬드 형상과 프리미티브 형상의 차압 차이는 각각 70.0 Pa 및 100.6 Pa 로 매우 크게 산출되었다. 이 결과로부터 TPMS 단위체 형상이 작을 경우 다이아몬드 형상에서 공기 유동의 수두 손실이 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

TPMS 형상의 한 변 길이가 10 mm 인 경우에는 자이로이드, 다이아몬드 및 프리미티브 형상 순으로 차압이 낮게 나타났다. 이때, 자이로이드 형상과 다이아몬드 형상의 차압 차이 및 자이로이드 형상과 프리미티브 형상의 차압 차이는 각각 0.7 Pa 및 3.8 Pa 로 매우 작게 예측되었다. TPMS 형상의 한 변 길이가 20 mm 인 경우에는 자이로이드, 프리미티브 및 다이아몬드 형상 순으로 차압이 낮게 예측되었다. 이때, 자이로이드 형상과 프리미티브 형상의 차압 차이 및 자이로이드 형상과 다이아몬드 형상의 차압 차이는 각각 0.4 Pa 과 1.1 Pa 로 TPMS 단위체 한 변의 길이가 10 mm 일때 보다 작게 예측되었다. 이 결과들로부터 TPMS 형상의 한 변의 길이가 10 mm 미만일 경우에는 공기가 TPMS 형상을 통과할 때 유동의 수두 손실이 크게 발생하지만, 한 변의 길이가 10 mm 이상인 경우에는 공기가 TPMS 형상을 통과함에 따라 유동의 수두 손실이 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있었다.

TPMS 단위체의 형상이 동일하고 한 변 길이가 증가할수록 차압이 감소하는 것을 알 수 있었다. 특

히 TPMS 단위체의 한 변의 길이가 5 mm 에서 10 mm 로 감소 할 때, 차압의 감소량이 현저히 크게 나타났다. 이 결과로부터 TPMS 단위체의 한 변의 길이가 감소할수록 공기 유동에 대한 수두 손실이 증가하는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 TPMS 단위체 내부에 공기가 유입되었을 때 TPMS 형상과 크기에 따른 공기의 자가 순환 유동 특성 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, TPMS 중에서 자이로이드 형상에서 자가 순환 유동이 가장 잘 발생하는 것을 알 수 있었다. 자이로이드 형상 내부에 공기가 유입될 경우 자가 순환이 발생하는 유량 분율과 유속이 다른 TPMS 형상 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 고려한 3가지 TPMS 구조 중 자이로이드 형상을 사용하면 필터와 혼합기의 성능을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

둘째, TPMS 형상의 크기가 감소할수록 공기 유속과 자가 순환 유량이 증가하고, 자이로이드 형상에서는 이러한 현상이 두드러지는 것을 알 수 있었다. 자이로이드 형상의 한 변 길이가 5 mm 인 경우 매우 많은 유량이 자가 순환 유동으로 천이 되지만, 한 변의 길이가 10 mm 이상인 경우에는 자가 순환 유동의 평균 유속이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 공기가 TPMS 단위체를 통과할 때 TPMS 의 크기가 감소할수록 차압이 커지는 것을 알 수 있었다. TPMS 단위체 한 변의 크기가 10 mm 이상인 경우는 TPMS 형상이 차압의 크기에 미치는 영향이 매우 적으나, TPMS 단위체 한 변의 크기가 10 mm 미만인 경우는 TPMS 형상이 차압의 크기에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었다. TPMS 단위체 한 변의 크기가 5 mm인 경우에 다이아몬드, 자이로이드, 프리미티브 순서로 차압이 적게 발생하였다.

향후, TPMS 형상에 따른 차압 특성 분석 실험 및 추가적인 유동 해석을 수행하여 적정 TPMS 형상 설계를 도출할 예정이다. 또한, TPMS 단위체 형상의 조합인 TPMS 구조에 대한 유동 해석/실험을 수행하여 유동 효율이 우수한 TPMS 구조를 선정하고자 한다.

## 후 기

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

## REFERENCES

- [1] H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, 2016, Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 83, pp. 389-405.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [2] N. Guo, M. C. Leu, 2013, Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs, *Front. Mech. Eng.*, Vol. 8, pp. 215-243.  
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- [3] M. Jin, Q. Feng, X. Fan, Z. Luo, Q. Tang, J. Song, S. Ma, Y. Nie, P. Jin, M. Zhao, 2022, Investigation on The Mechanical Properties of TPMS Porous Structures Fabricated by Laser Powder Bed Fusion, *J. Manuf. Processes*, Vol. 76, pp. 559-574.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.035>
- [4] N. C. Ellebracht, P. Roy, T. Moore, A. E. Gongora, D. I. Oyarzun, J. K. Stolaroff, D. T. Nguyen, 2023, 3D Printed Triply Periodic Minimal Surfaces as Advanced Structured Packings for Solvent-Based CO<sub>2</sub> Capture, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 16, No. 4, pp. 1752-1762.  
<https://doi.org/10.1039/D2EE03658D>
- [5] M. G. Gado, O. Al - Ketan, M. Aziz, R. A. Al - Rub, S. Ookawara, 2024, Triply Periodic Minimal Surface Structures: Design, Fabrication, 3D Printing Techniques, State - of - the - Art Studies, and Prospective Thermal Applications for Efficient Energy Utilization. *Energy Technol.*, Vol. 12, No. 5.  
<https://doi.org/10.1002/ente.202301287>
- [6] D. Ali, M. Ozalp, S. B. Blanquer, S. Onel, 2020, Permeability and fluid flow-induced wall shear stress in bone scaffolds with TPMS and lattice architectures: A CFD analysis. *Eur. J. Mech. B Fluids*, Vol. 79, pp. 376-385.  
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.09.015>
- [7] S. Piedra, A. Gómez-Ortega, J. Pérez-Barrera, 2023, Prediction of Flow Properties of Porous Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Structures, *Fluids* 2023, Vol. 8, No. 12.  
<https://doi.org/10.3390/fluids8120312>
- [8] Karaman, D., Asl, H. G., 2023, The effects of sheet and network solid structures of similar TPMS scaffold architectures on permeability, wall shear stress, and velocity: A CFD analysis, *Med. Eng. Phys.*, Vol. 118.  
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.104024>
- [9] J. W. Lee, S. H. Oh, E. Jeon, J. Kim, K. Park, 2022, Functional Gradation of The Morphological Properties of TPMS Channel for Enhanced Flow Performance, *Mater. Des.*, Vol. 224.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111413>
- [10] H. Kim, K. K. Lee, D. G. Ahn, 2024, A Study on Design and Fabrication Characteristics of TPMS Structures, *J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng.*, Vol. 23, No. 2, pp. 52-60.  
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.2.052>
- [11] H. David, D. Vincenz, P. Johannes, F. Ales, D. Anatol, 2023, K-Omega Turbulence Models.  
<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>.
- [12] I. Kaur, P. Singh, 2021, Flow and Thermal Transport Characteristics of Triply-Periodic Minimal Surface (TPMS)-Based Gyroid and Schwarz-P Cellular Materials, *Int. J. Comput. Methods.*, Vol. 79, No. 8, pp. 553-569.  
<https://doi.org/10.1080/10407782.2021.1872260>