

회귀 분석에 기반한 3차원 엮임 재료의 최적설계

김 병 모¹·심 기 찬²·하 승 현^{3†}

¹한국선급 선박해양기술팀 선임연구원, ²과학기술연합대학원대학교 선박해양공학과 박사과정, ³한국해양대학교 해양공학과 부교수

Design Optimization for 3D Woven Materials Based on Regression Analysis

Byungmo Kim¹, Kichan Sim² and Seung-Hyun Ha^{3†}

¹Deputy Senior Surveyor, Ship and Offshore Technology Team, Korean Register, Busan, 46762, Korea

²Graduate Student, Department of Ship and Ocean Engineering, Korea University of Science and Technology, Daejeon, 34113, Korea

³Associate Professor, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

Abstract

In this paper, we present the regression analysis and design optimization for improving the permeability of 3D woven materials based on numerical analysis data. First, the parametric analysis model is generated with variables that define the gap sizes between each directional wire of the woven material. Then, material properties such as bulk modulus, thermal conductivity coefficient, and permeability are calculated using numerical analysis, and these material data are used in the polynomial-based regression analysis. The Pareto optimal solution is obtained between bulk modulus and permeability by using multi-objective optimization and shows their trade-off relation. In addition, gradient-based design optimization is applied to maximize the fluid permeability for 3D woven materials, and the optimal designs are obtained according to the various minimum bulk modulus constraints. Finally, the optimal solutions from regression equations are verified to demonstrate the accuracy of the proposed method.

Keywords : 3D woven material, regression analysis, design optimization, parameterization, material property

1. 서론

메탈폼(metal foam)은 다공성(porous)의 금속으로서 가벼우면서도 비교적 강도가 높고 충격 흡수성이 좋아 자동차, 항공기, 우주 산업 등에 적용되고 있다. 또한, 단위체적당 표면적 비가 크기 때문에 우수한 열 교환 성능을 가지고 있어 열 교환기(heat exchanger) 분야에서도 적용되며 활발한 연구가 진행되고 있다(Zhao *et al.*, 2016; 2017). 메탈폼은 크게 확률적(stochastic) 구조와 주기적(periodic) 구조 두 가지로 구분되는데, 주기적 재료의 경우 우수한 열 교환 성능을 가지는 동시에 확률적 구조의 재료보다 보다 높은 강성을 가지며, 계획적인 설계가 가능하기 때문에 다양한 재료 설계 방법이 연구되고 있다. 또한, 시간 및 비용을 절감하기 위해 기존에 설계된 재료의 물성치 데이터베이스를 기반으로 회귀분석 수행 및 최적설계

기법을 적용하여 보다 향상된 성능의 재료를 도출하는 연구도 활발히 진행되고 있다(Park *et al.*, 2016).

Gao 등(2019)과 Ha 등(2019)은 위상최적설계(topology design optimization) 기법을 활용하여 주기적 구조의 다공성 재료에 대한 설계를 수행하였고, Sharp 등(2014)은 3차원 직조(weaving) 기술을 통하여 제작된 메탈폼의 부피분율(volume fraction)을 최소화하는 최적설계에 대한 연구를 수행하였으며, Dehale 등(2019)은 3차원 직조 재료에 대한 매개변수화를 수행한 후, 매개변수의 변화에 따른 재료의 성능에 대한 평가를 수행하였다. Carvalho 등(2017)과 Skibinski 등(2015)은 전산 수치해석을 이용하여 메탈폼 재료의 빈 공간의 크기에 따른 압력차를 계산하는 케이스 스터디를 수행하였으며, 결과적으로 재료의 부피분율 대비 최적의 유체투과율(permeability)을 계산하였다. 또한, Gupta 등(2015)은 시간 및 비용을 절감하기 위해 마이크로 재

†Corresponding author:

Tel: +82-51-410-5246; E-mail: shha@kmou.ac.kr
Received October 4 2022; Revised October 20 2022;
Accepted October 20 2022

© 2022 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

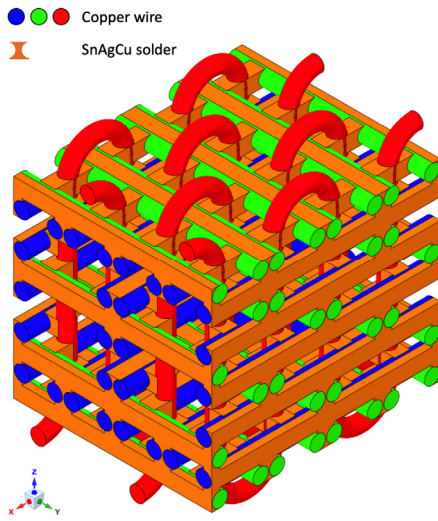


Fig. 1 Geometry of 3-D woven materials

료에 대한 데이터를 바탕으로 회귀 분석을 수행하고, 실제 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 Sim과 Ha(2020)의 선행 연구를 기반으로 3차원 엮임 재료(3-D woven material)를 구성하는 금속 와이어 사이의 간격을 조정하는 배수를 매개변수화하였고, 재료의 체적 탄성계수, 열전도 계수, 유체투과율 등과 같은 재료 물성치에 대해 각 매개변수별 전산 수치해석을 통하여 생성된 데이터베이스를 이용한 회귀 분석을 수행하였다. 높은 정확도의 회귀 분석 결과를 얻기 위해서 추정되는 회귀 방정식의 차수별로 평가지표를 이용하여 최적의 회귀 방정식을 선정하였다. 추정된 물성치 식을 이용하여 다목적함수 최적화를 수행하여 물성치 사이의 상관관계를 파악하였고, 경사도 기반의 최적 설계를 수행하여 기존 모델 대비 더 높은 유체투과율 성능을 가지는 3차원 엮임 재료의 설계 결과를 도출하였다.

2. 3차원 엮임 재료의 특성

2.1 3차원 엮임 재료

3차원 엮임 재료는 Fig. 1과 같이 3차원 직조(waving) 기술을 통해 X-축 방향으로 배치된 와이어(warp wires), Y-축 방향으로 배치된 와이어(fill wires)를 서로 직교하게 배치한 후, 이들 와이어 사이를 Z-축 방향의 와이어로 엮어 만든 재료이다. 여기서 각 와이어는 202 μ m의 직경을 가지는 구리(copper)로 만들어졌으며, 모든 와이어 사이마다 땀납(SnAgCu) 처리를 통해 재료를 더 견고하게 결속하여 제작하였다. 여기에 사용된 각 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

기존의 선행 연구를 통해서 각 와이어 사이의 간격에 따라서 재료의 물성치가 민감하게 변화하는 것을 확인하였으며,

Table 1 Material property

Material	Density (kg/m^3)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal conductivity ($W/m \cdot k$)
Copper	8,900	106	0.33	387.6
SnAgCu	7,400	50	0.36	60.0

Table 2 Reference wire spacing of woven materials (μ m)

Δx_{f-f}	Δx_{f-z}	Δy_{w-w}	Δy_{w-z}	$\Delta z_{f-z loop}$	Δz_{w-f}
16.8	67.2	16.8	16.8	33.6	33.6

이를 수치적으로 면밀히 분석하기 위해서 3차원 엮임 재료의 곡률 정보를 정확하게 구현할 수 있는 사면체 요소 기반의 파라메트릭 모델을 생성하였다(Sim and Ha, 2020).

2.2 파라메트릭 해석

선행 연구를 통해 개발된 파라메트릭 모델에서는 X, Y, Z 각 축 방향의 와이어 사이의 간격을 나타내는 변수 6개(Δx_{f-f} , Δx_{f-z} , Δy_{w-w} , Δy_{w-z} , $\Delta z_{f-z loop}$, Δz_{w-f})를 통해 3차원 엮임 재료의 단위 구조(unit cell)를 정의하였다. 여기서 Δx 는 fill-fill 및 fill-Z 와이어 간격의 크기, Δy 는 warp-warp 및 warp-Z 와이어 간격의 크기, 그리고 Δz 는 fill-Z loop 및 warp-fill 와이어 간격의 크기를 각각 나타낸다. 한편 파라메트릭 해석의 편의성을 위해서 위의 변수 6개를 직접 변화시키는 대신에, 실제 실험 시편을 측정한 값을 기반으로 하여 Table 2와 같이 기준값을 정의한 후에, 각 축 방향 배율을 나타내는 계수 k_x , k_y , k_z 를 Δx , Δy , Δz 에 각각 곱하여 실제 와이어 사이의 간격을 결정하였다. 여기서 계수 k_x , k_y , k_z 는 모두 0.5에서 3.0까지 0.5의 간격으로 변화시켜 가면서 모델링하였으며, 선행 연구를 통해 k_x 및 k_y 변화에 따른 체적 탄성계수(bulk modulus), 전단 계수(shear modulus), 열전도 계수(thermal conductivity) 및 유체투과율(permeability)의 파라메트릭 해석 결과는 다음의 Fig. 2와 같다. 그리고 모든 해석 결과를 데이터베이스화 하여 다음의 회귀 분석에서의 입력값으로 사용하였다.

3. 재료 물성치에 대한 다변수 회귀 분석

와이어 사이의 간격을 정의하는 매개변수 k_x , k_y , k_z 의 변화에 대한 3차원 엮임 재료의 다양한 물성치를 예측하고 최종적으로는 이를 최적 설계에 활용하기 위해서 선행 연구를 통해 얻어진 구조해석 및 유체해석 데이터를 바탕으로 하여 재료 물성치에 대한 회귀 분석을 수행하였다. 이를 통해 주어진 매개변수 구간 내의 3차원 엮임 재료 모델에 대한 수치해석 결과들을

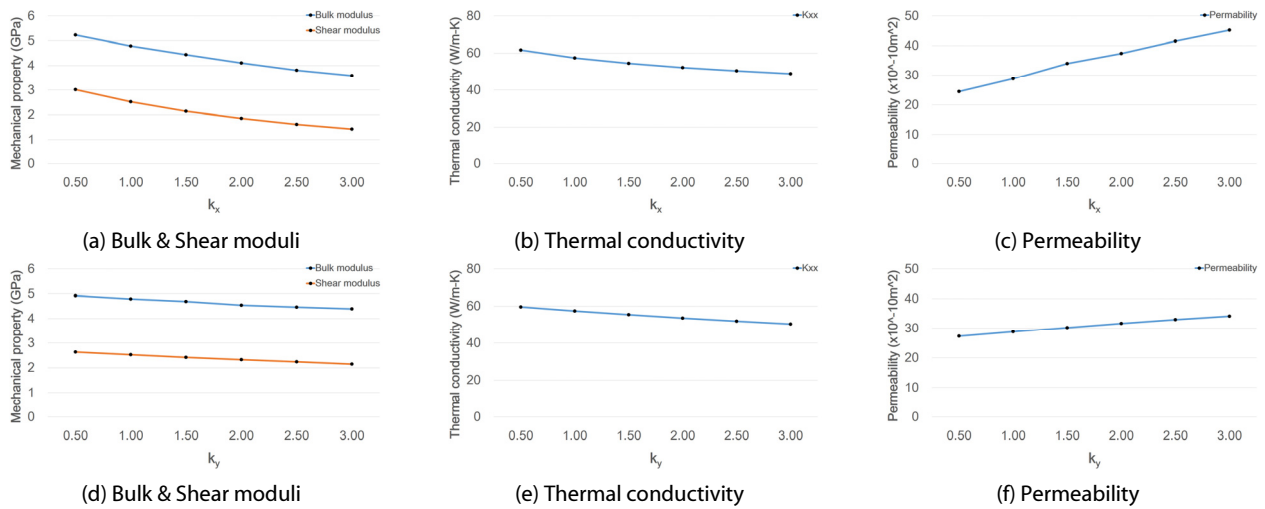


Fig. 2 Results of mechanical(a, d), thermal(b, e), and fluidic(c, f) properties for each parameterized model(Sim and Ha, 2020)

바탕으로 각각의 재료 물성치를 회귀 방정식으로 표현할 수 있다. 추정된 방정식을 통해 본 연구에서 설정한 매개변수의 범위인 0.5~3.0 내의 모든 설계점에 대한 재료 물성치를 추정할 수 있고, 이를 통해 최종적으로 최적설계 과정에서 소요되는 전산 수치해석의 계산 비용을 크게 줄일 수 있다.

본 연구에서는 회귀 모델에서 오차 값을 최소화시키는 회귀 계수 값을 최소 자승법(least square method)를 이용하여 계산하였다(Cecen, 2020). 또한 추정 방정식의 최대 차수를 1차에서 5차까지 변화시켜 가면서 각 방정식 차수마다의 적합도를 평가하였는데, 그 평가는 식 (1)의 결정계수(R^2) 및 식 (2)의 평균 절대 오차(mean absolute error, MAE)를 기준으로 수행하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (2)$$

여기서, n 은 데이터의 수, y_i 는 실제 데이터의 결과 값, \hat{y}_i 는 회귀분석 결과 값 그리고 \bar{y} 는 실제 데이터의 평균값이다. 3차원 엮임 재료의 밀도, 체적 탄성계수, 열전도 계수, X-방향 유체투과율과 같은 재료 물성치에 대해 회귀분석을 회귀 방정식의 차수별로 수행하였으며 각각의 결정 계수 R^2 를 계산하였다. 그 결과 위의 네 가지 재료 물성치 모두 회귀 방정식의 최대 차수가 식 (3)과 같은 2차식일 때 가장 큰 결정계수 값을 가졌으며, 평균 절대 오차 역시 가장 작은 것을 확인하였다.

Table 3 Result for regression analysis

Coefficient	Density (kg/m^3)	Bulk modulus (GPa)	Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)	Permeability ($\times 10^{-10} m^2$)
β_0	3694.30	6.56	76.57	14.40
β_1	-425.26	-1.16	-9.85	7.10
β_2	-88.06	-0.30	-4.41	1.37
β_3	-265.19	-0.57	-7.78	3.33
β_4	3.39	0.06	0.34	1.12
β_5	0.78	-0.01	0.24	0.84
β_6	23.70	0.06	0.76	1.55
β_7	36.70	0.11	1.08	-0.42
β_8	1.74	0.01	0.02	-0.19
β_9	15.70	0.03	0.42	-0.21
R^2	0.9999	0.9976	0.9989	0.9999
MAE	0.0060	0.0306	0.0254	0.0059

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 k_x + \beta_2 k_y + \beta_3 k_z + \beta_4 k_x k_y + \beta_5 k_y k_z + \beta_6 k_z k_x + \beta_7 k_x^2 + \beta_8 k_y^2 + \beta_9 k_z^2 + \epsilon \quad (3)$$

여기서, $\beta_0 \sim \beta_9$ 는 회귀 방정식에 사용된 계수들이고 ϵ 는 오차이다. 2차 방정식으로 추정된 재료 물성치의 회귀 분석 결과는 Table 3과 같으며, 결정계수는 모두 0.99 이상, 평균 절대 오차는 약 0.03 이내로 모두 높은 적합도가 얻어졌음을 할 수 있다.

4. 3차원 엮임 재료의 최적 설계

4.1 파레토 최적 설계

지난 3장에서는 본 연구에 사용된 3차원 엮임 재료의 다양한 재료 물성치에 대해 전산 수치해석을 바탕으로 회귀 분석을

통해 재료 물성치를 추정할 수 있는 회귀 방정식을 도출하였다. 3차원 엮임 재료는 다른 다공성 물질보다 상대적으로 높은 강성을 가지고 있으며, 위상최적설계를 통해 유체 투과율에 대한 성능도 개선되어 있기 때문에 열교환기로서의 적용에 있어 효과적이라고 할 수 있다(Ha *et al.*, 2019). 따라서 본 연구에서는 본 재료의 열교환기로서의 성능을 보다 향상시키기 위해 재료의 물성치 중 체적 탄성계수와 X-방향 유체투과율을 대상으로 한 회귀 방정식을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 회귀 방정식을 이용하면 수치해석을 수행하지 않고 재료의 특성치를 계산할 수 있어 시간적 비용을 절약할 수 있고, 경사도 기반의 최적설계기법을 이용할 수 있어 효율적인 설계를 수행할 수 있다.

$$\text{Find } X = \{k_x, k_y, k_z\} \quad (4)$$

$$\text{Maximize } \alpha \times \text{Bulk modulus} + (1 - \alpha) \times X - \text{Permeability}$$

$$\text{Subject to } 0.5 \leq k_x, k_y, k_z \leq 3.0$$

먼저, 식 (4)와 같이 체적 탄성계수, X-방향 유체투과율의 두 가지 물성치를 모두 목적함수로 가지는 다목적함수 최적설계를 수행하여 파레토(pareto) 최적해를 계산하였다. 사용된 최적 설계 기법은 가중치법(Weighted Sum Method)으로, 각각의 목적함수에 가중치를 곱한 후 모두 더하여 하나의 목적함수로서 최적화를 수행하는 방법이다. 가중치법은 가장 많이 사용되지만 최적해가 형성하는 곡선이 이상적으로 볼록하지 않고 목적함수 값의 분포가 균일한 파레토 최적해를 보장하지는 않는다. 하지만 이번 3차원 엮임 재료의 경우에는 앞선 Fig. 2와 같이 매개변수와 물성치들 사이의 관계가 비교적 단순하고 특이점이 없어 가중치법을 쉽게 적용할 수 있다. 목적 함수의 가중치 α 는 0부터 1까지 0.01 간격으로 증가시키며 최적설계를 수행하였으며, 매개변수에 대한 제약조건은 3차원 엮임 재료의 물성치 데이터베이스가 형성하고 있는 매개변수의 범위를 그대로 적용하였다.

다목적함수 최적설계 수행을 통해 Fig. 3과 같은 파레토 최적해를 얻었으며, 두 목적함수가 이루는 곡선이 볼록한 형태로 형성되었다. 유체투과율이 최대가 되는 최적해는 매개변수의 크기가 모두 3.0일 때 얻어지며, 체적 탄성계수가 최대가 되는 최적해는 매개변수가 모두 0.5일 때 얻어진다. 두 최적해 사이에 서로 증감하며 볼록한 파레토 경계를 형성하고 있어 두 물성치는 상충 관계에 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 열교환기 소재로서 3차원 엮임 재료에 요구되는 각각의 물성치의 수준을 고려하여 파레토 최적해 중에서 선택하여 재료의 설계가 가능하다.

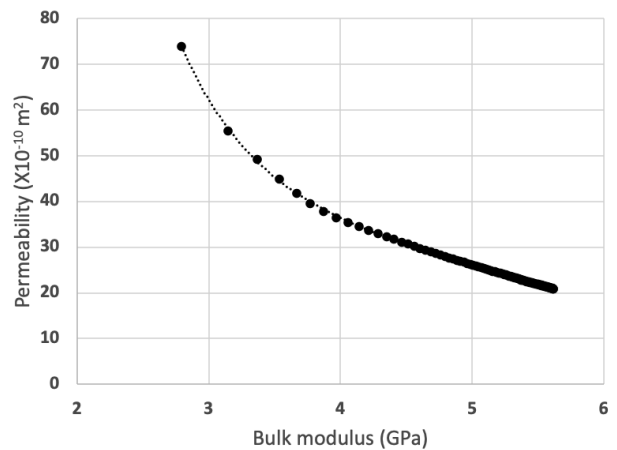


Fig. 3 Pareto optimal graph

4.2 최대 유체투과율 설계

실제 환경에 사용하기 위한 재료를 설계하기 위해서는 다양한 조건을 고려해야 한다. 각 설치되는 환경마다 부하되는 하중, 요구되는 성능이 모두 다르기 때문에 그에 맞는 조건을 만족하기 위한 설계를 수행하여야 한다. 따라서, 설치 및 운용 환경에 따라 최적화 문제정식화가 달라지게 된다.

본 연구에서는 열교환기 소재로 사용 가능한 3차원 엮임 재료의 X-방향 유체투과율 성능을 목적함수로 하여 이를 최대화하는 방향으로 최적 설계를 수행하였다. 최적설계 정식화는 다음의 식 (5)와 같이 설정하였는데, 설계 변수는 축 방향별 와이어 사이 간격의 배수인 k_x, k_y, k_z 이고 제약 조건으로는 재료의 구조 강성을 일정 이상으로 유지하기 위해서 체적 탄성계수 값이 K_{min} 이상이 되도록 설정하였다. 매트랩의 `fmincon` 함수를 통해 최적설계를 수행하였으며, 앞서 구한 회귀 방정식의 미분식을 통해서 설계 민감도 값을 계산하였다(Mathworks, 2020).

$$\text{Find } \mathbf{X} = \{k_x, k_y, k_z\} \quad (5)$$

$$\text{Maximize } X - \text{Permeability}(k_x, k_y, k_z)$$

$$\text{Subject to } K_{min} \leq \text{Bulk modulus}(k_x, k_y, k_z) \\ 0.5 \leq k_x, k_y, k_z \leq 3.0$$

지난 4.1절에서 파레토 최적설계를 통해 얻어진 체적 탄성계수의 최소값과 최대값이 각각 2.76GPa과 5.77GPa인 것을 감안하여, 제약조건인 K_{min} 값을 3GPa부터 5GPa까지 1GPa 간격으로 설정하여 세 가지의 조건으로 최적설계를 수행하였다.

우선 Table 4는 K_{min} 값의 변화에 따른 최적설계 변수의 크기와 부피분율(Volume fraction)을 나타내고 있다. 설계 변수의 크기가 작아지게 되면 와이어 사이의 간격이 줄어들기 때문

Table 4 Results for the optimized models

K_{\min} (GPa)	k_x	k_y	k_z	Volume fraction
Reference	1.00	1.00	1.00	0.3476
3.0	3.00	3.00	2.23	0.2547
4.0	1.76	3.00	0.78	0.3113
5.0	0.75	1.20	0.93	0.3577

Table 5 Material properties of the optimized models

K_{\min} (GPa)	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)	Permeability ($\times 10^{-10} m^2$)
Reference	2,983.3	57.42	28.79
3.0	2,151.2	38.47	66.79
4.0	2,647.0	47.43	40.54
5.0	3,073.3	59.14	26.78

Table 6 Material properties for the optimized models calculated from direct analysis

K_{\min} (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)	Permeability ($\times 10^{-10} m^2$)
3.0	2.9359	2,151.9	38.35	66.55
4.0	3.9696	2,650.1	47.80	40.41
5.0	5.0131	3,070.0	58.90	26.50

에 부피분율과 체적 탄성계수가 모두 증가하게 되며, 반대로 유체투과율은 감소하게 된다. 기존 참조모델의 체적 탄성계수 값이 4.8GPa이기 때문에, K_{\min} 값이 3 및 4GPa인 경우에는 전반적으로 와이어 사이의 간격이 늘어나 부피분율이 감소하였으며, 반대로 K_{\min} 값이 5GPa인 경우에는 y축 방향 와이어 간격은 다소 늘어났으나 x축 및 z축 방향 간격이 줄어들면서 부피분율이 늘어난 것을 확인할 수 있다.

Table 5는 앞서 최적화된 3차원 엮임 재료 모델에 대한 물성치 해석 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 K_{\min} 값이 3 및 4GPa인 경우에는 부피분율이 감소하면서 밀도 및 열전도도 역시 감소하지만, 반대로 유체투과율은 증가하게 된다. 특히 기존 참고모델 대비 최적 모델의 체적 탄성계수는 각각 37.5% 및 16.7% 감소하였지만, 유체투과율은 각각 132% 및 40.8% 증가하였음을 알 수 있는데, 이는 최적설계 과정에서 체적 탄성계수보다는 유체투과율이 훨씬 민감하게 변화한다는 것을 나타낸다. 반면 K_{\min} 값이 5GPa인 경우에는 거꾸로 체적 탄성계수 값이 4.2% 증가하였으나, 유체투과율은 7.0% 감소하였다.

이와 같이 3차원 엮임 재료에서 와이어 사이의 간격을 변수로 하는 최적설계를 수행함으로써 설계자가 구조적으로 원하는 크기의 체적 탄성계수를 가지면서 효과적인 열전달을 위해

유체투과율을 최대화 하는 최적설계를 얻을 수 있었으며, 앞으로 설치 환경에 따른 다양한 제약조건을 만족하며 원하는 물성치의 최대 또는 최소값을 가지는 재료의 설계를 수행할 수 있을 것으로 보인다.

끝으로 Table 6에서는 회귀 방정식을 사용해 얻어진 최적 설계 결과의 정확도를 검증하기 위해서, Table 4의 설계 변수 값들을 가지는 수치 모델을 생성하고 이에 대한 물성치 해석을 직접 수행하여 Table 5의 물성치 값들과 비교하였다. 먼저 실제로 계산된 체적 탄성계수 값을 설계 제약조건인 K_{\min} 값과 비교해보면 최대 오차 2.2% 이내로 정확하게 계산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 밀도, 열전도계수, 유체투과율 역시 최대 1.9% 이내의 오차로 정확하게 얻어진 것을 확인할 수 있다. 즉, 회귀 분석을 사용해서 최적설계를 진행하였을 때, 최적설계에 소요되는 계산 비용을 크게 줄이면서도 수치 해석 대비 높은 정확도를 가지는 최적 모델을 효율적으로 얻어낼 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 3차원 엮임 재료를 대상으로 여러 물성치에 대한 다항식 기반의 회귀 분석을 수행하고, 이를 활용하여 최적설계를 수행하였다. 먼저 3차원 엮임 재료를 구성하는 와이어 사이의 간격들로 정의된 파라메트릭 수치 모델을 통해 계산된 여러 물성치 데이터를 이용해서 회귀 분석을 수행하였고, 그 결과 각각의 물성치에 대해서 모두 0.99 이상의 결정계수를 가지는 2차식의 회귀 방정식을 도출하였다.

다음으로 열교환기 재료로서의 열전달 성능을 향상시키기 위해서 3차원 엮임 재료를 통과하는 유체의 유체투과율을 높이기 위한 최적설계를 수행하였다. 우선 다목적함수 기반 최적 설계를 통해서 유체투과율과 체적 탄성계수 사이의 파레토 최적해를 얻었으며, 두 물성치 사이의 상충 관계를 확인하였다. 또한 다양한 크기의 체적 탄성계수를 제한 조건으로 갖는 최적설계 문제를 통해서 최대의 유체투과율을 가지는 3차원 엮임 재료의 설계를 도출하였다. 한편 얻어진 최적설계의 정확도를 검증하기 위해서 회귀 분석 기반의 최적설계를 통해서 도출된 설계를 새롭게 모델링하여 수치 해석을 수행하였고, 그 결과 최적화된 3차원 엮임 재료의 모든 물성치들이 회귀 분석을 통한 추정치에 매우 근접한 것을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 한국해양대학교 연구년 전임교원 교내 연구비 및 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2021R1F1A1048396)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- Carvalho, T.P., Morvan, H.P., Hargreaves, D.M., Oun, H. Kennedy, A.** (2017) Pore-scale Numerical Investigation of Pressure Drop Behavior Across Open-cell Metal Foams, *Transp. Porous Media*, 117(3), pp.311~336.
- Cecen, A.** (2020) Multivariate Polynomial Regression <https://github.com/ahmetcecen/MultiPolyRegress-MatlabCentral>
- Dehale, M., Neale, G., Lupicini, R., Cascone, L., McGarrigle, C.** (2019) Effect of Weave Parameters on the Mechanical Properties of 3D Woven Glass Composites, *Compos. Struct.*, 223, pp.1~9.
- Gao, J., Luo, Z., Li, H., Gao, L.** (2019) Topology Optimization for Multiscale Design of Porous Composites with Multi-domain Microstructure, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 344, pp.451~476.
- Gupta, A., Cecen, A., Goyal, S., Singh, A.K., Kalidindi, S.R.** (2015) Structure-Property Linkages Using a Data Science Approach: Application to a Non-metallic Inclusion/Steel Composite System, *Acta Mater.*, 91(1), pp.239~254.
- Ha, S.-H., Lee, H.Y., Hemker, K.J., Guest, J.K.** (2019) Topology Optimization of Three-Dimensional Woven Materials Using a Ground Structure Design Variable Representation, *J. Mech. Des.*, 141(6), pp.061403-1~10.
- Mathworks Inc.** (2020) *Optimization Toolbox User's Guide*, p.1308.
- Park, J.W., Yoon, J.S., Kim, J., Kang, B.S.** (2016) Shape Prediction of Flexibly-reconfigurable Roll Forming Using Regression Analysis, *Trans. Mater. Proc.*, 25(3), pp.182~188.
- Sharp, K., Mungalov, D., Brown, J.** (2014) Metallic Cellular Materials Produced by 3D Weaving, *Poc. Mater. Sci.*, 4, pp.15~20.
- Sim, K., Ha, S.-H.** (2020) Parametric Modeling and Numerical Simulation of 3-D Woven Materials, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 33(5), pp.331~338.
- Skibinski, J., Cwieka, K., Kowalkowski, T., Wysocki, B., Wejrzanowski, T.** (2015) The Influence of Pore Size Variation on the Pressure Drop in Open-cell Foams, *Mater. & Des.*, 87(15), pp.650~655.
- Zhao, L., Ryan, M.S., Lin, S., Xue, J., Ha, S.-H.** (2017) Combining a Distributed Flow Manifold and 3D Woven Metallic Lattices to Enhance Fluidic and Thermal Properties for Heat Transfer Applications, *Int. J. Heat & Mass Trans.*, 108, pp.2169~2180.
- Zhao, L., Ryan, S.M., Ortega, J.K., Ha, S.-H., Sharp, K.W.** (2016) Experimental Investigation of 3D Woven Cu Lattices for Heat Exchanger Applications, *Int. J. Heat & Mass Trans.*, 96, pp.296~311.

요 지

본 논문에서는 3차원 엮임 재료의 유체투과율 향상을 목적으로 수치해석 데이터 기반의 물성치 회귀 분석 및 최적설계를 소개한다. 우선 3차원 엮임 재료를 구성하는 와이어 사이의 간격을 결정하는 배율 계수를 매개변수화 하여 다양한 배율 조합을 가지는 수치 모델을 생성하였고, 전산 수치해석을 통해 계산된 각 모델의 체적 탄성계수, 열전도 계수, 유체투과율 데이터를 이용하여 다항식 기반의 회귀 분석을 수행하였다. 이를 사용해서 체적 탄성계수와 유체투과율 사이의 다목적함수 최적설계를 통한 파레토 최적해를 도출하였으며, 두 물성치가 서로 상충 관계에 있음을 확인하였다. 한편 3차원 엮임 재료의 열전달 효율을 높이기 위해서 유체투과율을 최대화 시키는 것을 목적으로 경사도 기반 최적설계를 수행하였고, 제약조건인 체적 탄성계수의 크기별 유체투과율의 변화율을 분석하였다. 그 결과 설계자가 원하는 최소한의 강성을 가지는 최대 유체투과율 설계 모델을 얻어낼 수 있음을 확인하였으며, 회귀 방정식을 통해서 얻어진 설계가 높은 정확도를 가지고 있음을 추가적으로 검증하였다.

핵심용어 : 3차원 엮임 재료, 회귀 분석, 최적설계, 매개변수화, 재료 물성치