

알루미늄 피라미드 트러스 심재 샌드위치의 열유동 특성에 관한 수치해석 연구

강종수¹, 김상우², 임재용^{3*}

¹자동차부품연구원 신뢰성연구본부, ²재료연구소 재료공정혁신연구본부, ³서울과학기술대학교 안전공학과

A Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Aluminum Pyramidal Truss Core Sandwich

Jong-Su Kang¹, Sang-Woo Kim², Jae-Yong Lim^{3*}

¹Reliability R&D Research Center, Korea Automotive Technology Institute

²Korea Institute of Materials Science

³Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 본 연구에서는 전산유체역학 해석을 이용하여 알루미늄 피라미드 트러스 심재 샌드위치의 열유동 특성을 분석하였다. 규칙적 다공질 금속인 피라미드 트러스 코어를 샌드위치 구조물에 채용할 경우 공기 매질이 자유롭게 유입, 유출될 수 있는 개방형 코어인 점을 고려하여 하중을 지지할 수 있는 구조적응과 함께 방열체로서 다기능성을 구현할 수 있는 구조가 된다. 따라서, 유입되는 공기의 속도변화, 설계변수인 트러스각에 따른 압력강하와 열전달 메커니즘을 확인하기 위해 ANSYS/Fluent를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 해석모델에 사용된 샌드위치 패널은 알루미늄으로 이루어져 있으며, 샌드위치 패널의 위 면재와 아래 면재 사이에는 15개의 피라미드 트러스 유닛셀이 반복되고 있다. 폭 방향으로서는 무한히 넓은 유닛셀을 모사하기 위해 대칭조건을 지정하였으며, 입구에는 균일한 속도분포를 경계조건으로 입력하였다. 해석결과 입구부와 첫 유닛셀까지의 구간에서 입구영향이 관찰되었으며, 입구영향을 배제하고 마찰계수와 누설수를 분석하였다. 공기의 속도가 증가할수록 마찰계수는 감소하였으며, 누설수는 증가하는 경향을 보인다. 한편, $V=1\text{m/s}$ 에서 5m/s 에서의 마찰계수와 누설수 변화가 확인되었으며, 이는 층류에서 난류로 유동패턴이 변하기 때문에 거시적으로 열전도보다 대류열전달의 비중이 커졌기 때문이다. 또한, 설계변수인 트러스각에 대해서는 의미가 있을 정도의 마찰계수와 누설수의 변화는 관찰되지 않았다. 따라서, 트러스각이 강도, 강성 등 구조적응에 민감한 점을 감안하면 다기능성을 염두에 둔 알루미늄 피라미드트러스 심재 설계 시 설계변수의 변화는 구조적응에 더 민감할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, the fluid flow and heat transfer characteristics within sandwich panels are investigated using computational fluid dynamics. Within the sandwich panels having periodic cellular cores, air can freely move inside the core section so that the structure is able to perform multi-functional roles such as simultaneous load bearing and heat dissipation. Thus, there needs to examine the thermal and flow analysis with respect to design variables and various conditions. In this regard, ANSYS Fluent was utilized to explore the flow and heat transfer within the pyramidal truss sandwich structures by varying the truss angle and inlet velocity. Without the entry effect in the first unitcell, the constant rate of pressure and the constant rate of Nusselt number was observed. As a result, it was demonstrated that Nusselt number increases and friction factor decreases as the inlet velocity increases. Moreover, the rate of Nusselt number and friction factor was appreciable in the range of $V=1\text{-}5\text{m/s}$ due to the transition from laminar to turbulent flow. Regarding the effect of design variable, the variation of truss angle did not significantly influence the characteristics.

Keywords : Computational Fluid Dynamics, Heat Dissipation, Multi-Functional Applications, Pyramidal Truss Core, Sandwich Structures

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 사업[10076429, 고강도 및 방열특성을 갖는 경량 다기능 PCM설계 및 제조기술개발]과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호 : NRF-2017R1C1B5017363)을 받아 수행된 연구임

*Corresponding Author : Jae-Yong Lim(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6388 email: jaeyong.lim@gmail.com

Received November 6, 2018

Revised December 11, 2018

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

1. 서론

규칙적 다공질 금속은 기계가공을 통해 인위적으로 트러스 구조나 프리즈매틱 구조 형태로 제작되어 샌드위치 구조물의 심재로 적용된다. 최근의 연구들에서 트러스 심재나 프리즈매틱 심재를 채용한 경량 샌드위치 구조가 적은 무게로도 하중 지지에 효과적임을 입증한 바 있다. 또한, 규칙적 다공질 금속을 채용한 샌드위치에서는 면재와 면재 사이의 심재부가 개방되어 있는 특성을 이용하여 프리즈매틱 코어는 유체가 일방향의 개방형 채널의 역할을 할 수 있으며, 트러스 심재의 경우 2차원 평면상에서 유체가 자유롭게 이동할 수 있는 특성을 지니고 있다. 따라서, 하중지지 역할과 동시에 열교환기, 방열구조 등의 역할을 효과적으로 수행하여 다기능 적용에 응용될 수 있다.

이러한 점을 이용하여 Lu 등[1,2]은 여러 코어형상들에 대해서 수치해석을 통해 유동특성을 고찰하였으며, Valdevit 등[3]은 프리즈매틱 코어를 채용한 샌드위치 패널의 최적 냉각성능을 도출하기 위해 최적설계를 진행한 바 있다. 한편, 국내에서도 Joo[4] 등은 Kagome 샌드위치 패널에 대한 강제대류 열전달 특성을 실험적으로 분석하였으며, 속도가 낮은 저레이놀즈영역에서는 마찰저항(Skin friction)이 주압력손실 인자이며, 속도가 높고 레이놀즈영역에서는 형상저항(Form drag)으로 인한 압력손실이 일어남을 밝혔다. 한편, 트러스 코어의 오리엔테이션이 누셀수와 압력강하에 큰 영향을 끼침을 보였다. Kim 등 [5]은 Tetragonal lattice truss 재료에 있어서 향상된 열전달 특성과 압력강하 특성은 유동이 심재를 통과면서 트러스 스트럿이 모이는 지점인 노드 근방의 와류(Vortex)로 인해 열유동 특성이 향상됨을 밝힌바 있다. 이외에도, Yan 등[6]은 X-type lattice 심재의 열유동 특성을 이용하여 디스크브레이크의 냉각성능을 향상시키는 실제적인 응용 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 알루미늄 소재의 피라미드트러스샌드위치 구조체의 열유동 특성을 알아보고자 한다. 이를 바탕으로 하중지지기능과 열전달 기능을 동시에 수행할 수 있는 다기능성 구조물을 설계하는데 기본정보를 제공하고자 한다. 하지만, 하중지지를 위한 피라미드 트러스 구조 설계를 관한 연구 [7-9]는 활발히 진행되었으나, 설계변수, 특히 트러스각에 대한 열유동특성에 미치는 영향을 평가한 연구는 제한적이다. 따라서, 본 연구에서는 전

산유체역학해석 (CFD)을 이용하여 설계변수, 특히 트러스각과 유입공기속도에 따른 열유동 특성을 탐색해보고자 한다.

2. CFD 해석모델

2.1 문제 개요

본 연구에서 고려한 샌드위치는 알루미늄 합금으로 이루어져 있으며, 그림 1(a)에서 나타낸 바와 같이 위 면재와 아래 면재 사이에 규칙적으로 반복되는 피라미드 트러스가 위치한다. 그림 1(b)에는 규칙적으로 반복되는 유닛셀(Unitcell)을 도시하였다.

샌드위치 패널에 삽입된 피라미드 트러스는 α , t_c , W_c , l_c 등 다양한 설계변수가 있는데, 본 연구에서는 $t_c=1$, $W_c=12\text{mm}$, $b_c=1.414\text{mm}$ 로 고정하였으며, 유의미할 것이라 생각되는 트러스각을 $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 로 변화시켜 트러스각 설계변수에 대한 열유동 특성을 고찰하였다. 이 때, 심재를 채운 정도인 상대밀도 $\bar{\rho}_c$ 는 다음 식 (1), (2)에 의해 설계변수 트러스각 α , t_c , W_c , l_c 로 표현이 가능하며, 약, 3.77-4.97%범위를 갖는다.

$$\bar{\rho}_c \approx \frac{(2b_c^2 t_c + 4l_c t_c)}{(\sqrt{2}l_c \cos\alpha + 2b_c)^2 (l_c \sin\alpha + t_c)} \quad (1)$$

$$2\sqrt{2}b_c + 2l_c \cos\alpha = \sqrt{2}W_c \quad (2)$$

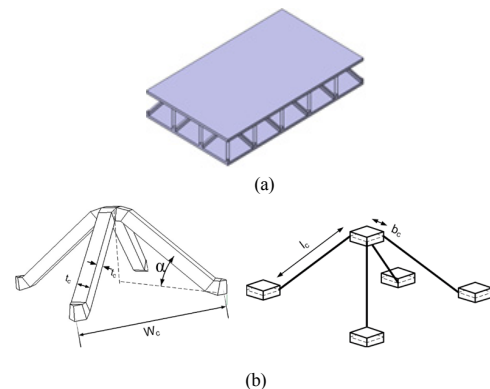


Fig. 1. Pyramidal Sandwich Structures (a) Sandwich panel (b) Unitcell of pyramidal truss

샌드위치 패널의 아래 면재의 하부에는 $Q=8000\text{W/m}^2$ 의 열원이 위치해 있으며, 아래 면재를 통해 유입된 열의 일부가 전도를 통해 피라미드 트러스를 거쳐 위 면재를 통해 방출되고, 유입부(Inlet)를 통해 유입된 공기는 샌드위치 심재의 빈 공간을 거쳐 지나가게 된다. 이 때, 공기의 유입속도는 $V=1\text{-}30\text{m/s}$ 까지로 변화하며 관찰하였다.

이 때, 샌드위치 패널의 열유동특성은 정상상태(Steady-state)에서의 열유동특성을 대상으로 하였으며, 샌드위치 패널의 폭(Width)방향으로 무한대로 넓은 패널을 가정하여 폭방향 변동성을 무시하도록 하였다.

2.2 열유동모델의 구성

2.1절에서 언급한 피라미드트러스 샌드위치 패널의 열유동특성을 탐색하기 위해 본 연구에서는 ANSYS/Fluent를 사용하였다. 해석 모델은 패널의 폭방향과 길이방향으로 각각 3개와 5개의 피라미드트러스 유니셀을 위치시켰으며, CATIA를 사용하여 고체부(샌드위치패널)과 유체부(공기유동공간)의 3D모델을 생성시켰다. 이를 그림 2에 나타내었다.

생성된 CAD 기하모델은 ANSYS/Fluent에 입력되어 고체부는 헥사요소(Hexahedral element), 유체부는 테트라요소(Tetrahedral element)를 사용하였으며, $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 모델인 경우에 각각 1100만, 1300만, 1500만, 1700만개의 요소가 사용되었다.

사용된 알루미늄 재료의 물성은 Callister[10]로부터 인용하였으며, 밀도, 비열, 열전도도를 각각 $\rho_s = 2700\text{ kg/m}^3$, $C_p=896\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $k_s=180\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 사용하였다. 유입되는 매질인 공기의 열물성은 Fluent에서 default로 제공하는 물성을 사용하였으며, $\rho_f = 1.225\text{ kg/m}^3$, $C_p=1006.4\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $k_f=0.0242\text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\mu_f=1.7894\times 10^{-05}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 로 지정하였다.

경계조건은 그림 3과 같이 지정하였다. 열전달 매질인 공기의 유입부(Inlet)와 유출부(Outlet)를 지정하였으며, 문제의 단순화를 위해 공기유입부에는 깊이방향에 대해서 균일한 속도분포(Uniform distribution)를 가지는 것으로 가정하였다. 한편, 샌드위치 패널 밑면에는 열유속(Heat flux) $Q=8000\text{W/m}^2$ 을 지정하였으며, 무한대로 넓은 폭을 구현하기 위해 옆면에는 대칭조건(symmetry condition)을 부과하였다.

정상상태 k-ε standard 모델을 사용하였으며, Continuity, Momentum, Energy equation의 수렴조건을 각각 $1.0\text{E-}06$,

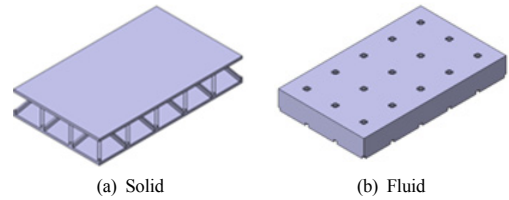


Fig. 2. 3D geometry model construction

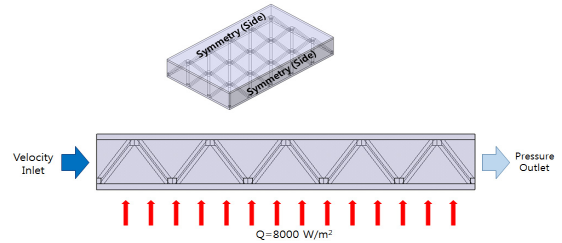


Fig. 3. Boundary conditions

Table 1. Summary of CFD analysis

No.	W_c (mm)	t_c (mm)	α (°)	V (m/s)	Q (W/m^2)
1	12	1	30	10	8000
2	12	1	35	10	8000
3	12	1	40	10	8000
4	12	1	45	10	8000
5	12	1	35	1	8000
6	12	1	35	5	8000
7	12	1	35	15	8000
8	12	1	35	30	8000
9	12	1	40	1	8000
10	12	1	40	5	8000
11	12	1	40	15	8000
12	12	1	40	30	8000

$1.0\text{E-}03$, $1.0\text{E-}06$ 으로 지정하였다. 본 연구에서 수행한 해석 12케이스를 표1과 같이 요약하여 나타내었다.

2.3 무차원 파라미터

해석결과를 분석하기 위해, 열전달에서 자주 사용되는 무차원 파라미터를 정의한다. 유체의 관성과 점성비로서, 층류와 난류의 경계를 구분하는 파라미터인 레이놀즈 수 Re 는

$$Re = \frac{\rho_f V H_c}{\mu} \quad (3)$$

과 같이 정의된다. 이 때, H_c 는 샌드위치 패널의 높이로서, $H_c \sim \frac{L}{\sqrt{2}} \tan \alpha$ 의 관계를 가지고 있다. 즉, 공기의 유입속도가 빨라질수록 레이놀즈수 Re 는 증가되어 층류

에서 난류로 전환된다.

압력강하와 관련이 있는 마찰계수는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$f = \frac{\Delta P}{L} D \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \rho_f V^2\right)} \quad (4)$$

한편, 유체의 열전달 모드, 열전도와 대류열전달의 비로 표현되는 누셀수는 다음과 같이 표현되며, 이때, h 는 고체표면에서의 대류열전달계수를 의미한다.

$$Nu = \frac{hH_c}{k} \quad (5)$$

3. 해석 결과

3.1 압력강하, 유속, 너셀수, 온도분포 특징

본 절에서는 해석결과를 분석하기에 앞서 열유동에서 공통적으로 나타나는 특징에 대해 설명하고, 3.2절에서 사용될 데이터 처리 방법에 대해 언급하도록 하였다.

해석 결과 #2 ($\alpha=35^\circ$, $V=10\text{m/s}$)에 대한 결과이다. 그림 4에는 네 경로에 대해 길이방향으로 압력강하를 나타내었다. 이는 그림 4(a)에 도시한 바와 같이 폭방향 중앙의 중앙높이, 3/4높이, 그리고 최외곽면(대칭면)의 중앙높이, 3/4높이에서의 길이방향에 대한 압력강하이며, 그림 4(b)에는 검정색 실선, 검정색 점선, 붉은색 실선, 붉은색 점선으로 표시된 바와 같다.

그림 4(b)에서 확인할 수 있듯이 압력강하가 계단식으로 감소하였으며, 이는 유닛셀이 길이방향으로 5개가 분포되어 있어 각 피라미드 트러스 유닛셀을 지날 때마다 계단식으로 감소되는 것으로 추정된다. 특히, 압력강하의 추세는 첫 번째 피라미드 트러스($0 < X < 12\text{mm}$)를 지나는 동안 더 뚜렷한 압력강하가 진행되었으며, 두 번째 이후의 유닛셀을 지나는 동안 같은 비율로 감소된다. 이는 해석을 수행한 12가지 모든 케이스에서 공통적으로 발견되는 현상인 입구효과(Entry effect)로서 균일속도의 유동이 진행되다가 첫 번째 트러스 코어를 만나면서 유동의 양상이 급격히 변화했기 때문이다. 따라서 마찰계수에 대한 데이터 처리 시에 이러한 입구영향을 배제하고 2-5번째 유닛셀을 지나는 압력강하 추세를 이용하여 마찰계수를 계산하였다.

유속이 진행되어 감에 따라 즉, $X=30\text{mm}$, 60mm 에서의 유속의 분포를 그림 5에 나타내었다. 유동이 진행될

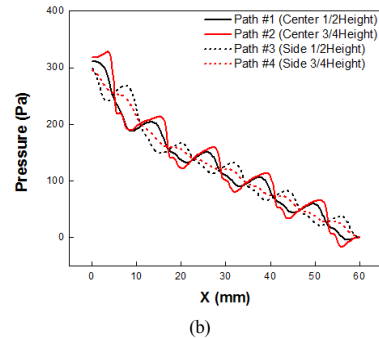
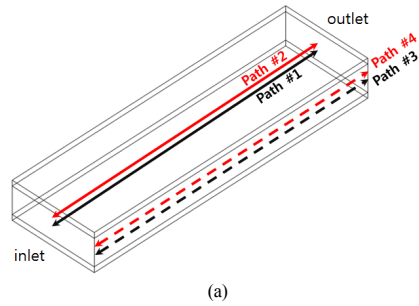


Fig. 4. Pressure Drop (Simulation #2)

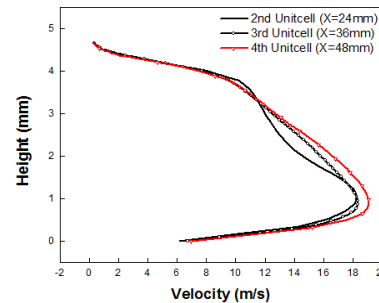


Fig. 5. Velocity Distribution (Simulation #2)

수록 포물선에 가까운 곡선으로 바뀌게 되며, 이는 완전 발달된 유동 (Fully developed flow) 형상과 비슷하지만, 아래 면재에 가까운 부분에서 최고 유속이 발생한다. 이는 위 면재쪽에 트러스코어의 노드가 존재하고 있어 이에 대한 유동이 방해받는 것으로 추정할 수 있다.

그림 6에는 위면재와 아래면재의 온도분포를 나타내었다. 공기가 유입되는 입구에서 두 면재(Facesheet)에서는 x방향으로 온도가 높아짐을 알 수 있다. 그리고, 위 면재에서는 트러스코어와 접합된 노드부분이 주위에 비해 온도가 더 높았으나, 아래 면재에서는 노드부분이 접합되지 않은 부분에 비해 온도가 더 낮아짐을 알 수 있다. 트러스코어 노드부분과 접합된 면재의 부분이 온도

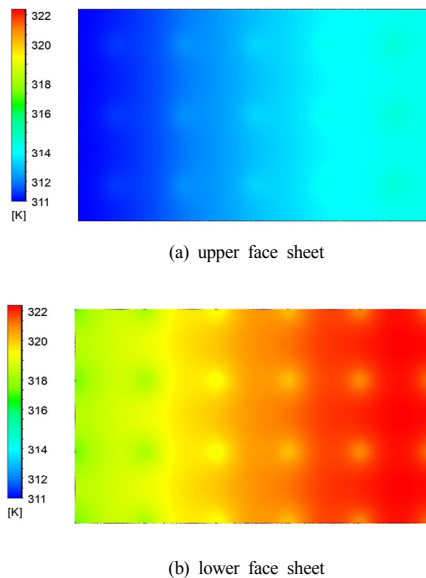


Fig. 6. Temperature Distribution (Simulation #2)

가 다른 이유는 노드를 통해 열전도가 이루어지기 때문이며, x방향에 따라 온도분포를 보이는 이유는 공기가 입구 초반에 열을 빼앗지만, 이 때문에 공기의 온도가 상승하여 대류의 효과가 적어지기 때문인 것으로 사료된다. 위 면재와 아래 면재 사이의 온도차는 약 7도 가량으로 고려한 모든 해석 케이스(#1-#12)에서 대략 10도 내외의 온도 차이를 보였다.

3.2 공기유속의 영향

트러스각 $\alpha=35^\circ$ 의 피라미드 트러스 샌드위치패널에 관하여 속도에 대한 압력강하와 누셀수를 그림 7과 같이 도시하였다. 속도가 낮은 $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$) 영역에서의 마찰계수(Friction factor)가 속도가 높은 영역 ($V=5\text{-}30\text{m/s}$)에 비해 훨씬 크게 관측되어 마찰에 의한 손실이 큼을 알 수 있다. 속도가 $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$)에서 $V=5\text{m/s}$ ($Re=1950$)로 증가함에 따라 마찰계수는 50% 이상 감소하였으며, $V=10\text{m/s}$ ($Re=3900$)에서 $V=30\text{m/s}$ ($Re=11700$)로 증가하는 동안의 마찰계수의 감소량은 $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$)에서의 마찰계수값 ($f=1.085$)의 약 5%만이 감소하였다. 한편, 누셀수를 나타낸 그림 7(b)에 나타내었다. $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$)에서는 다른 속도 영역대보다 작은 누셀수가 관찰되었으며, $V=1\text{-}5\text{m/s}$ 에서 그 증가폭이 커지지만, $V=5\text{m/s}$ ($Re=1950$) 이상에서는 누셀수의 증가폭은 둔화된다. $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$)에서의 누셀수에

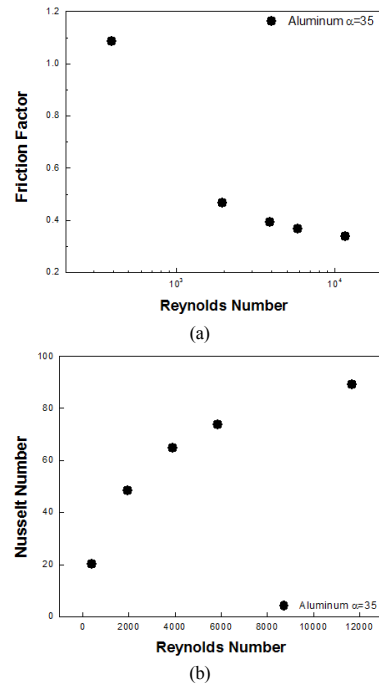


Fig. 7. Friction factor and Nusselt number with respect to Reynolds number

비해 $V=5\text{m/s}$ ($Re=1950$)의 누셀수는 2배 이상 증가하였으며, $V=5\text{-}30\text{m/s}$ 구간에서도 약 2배 증가하였다. $V=5\text{m/s}$ ($Re=1950$) 이상에서 층류에서 난류로 전환되어 그에 대한 효과로 인해 전도열전달 보다는 대류열전달로 인한 열소산 효과가 크다고 볼 수 있다.

이를 확인하기 위해 해석 #5($V=1\text{m/s}$)와 해석 #2($V=10\text{m/s}$) 케이스로부터 Pyramidal truss 노드 부근의 유동현상을 그림 8에 도시하였다. $V=1\text{m/s}$ ($Re=390$)의 저속일 경우에는 노드 부근의 유동이 층류형태로 관찰된다. 하지만, 유동속도가 높아지게 되면 노드부근에서 Vortex가 일어남을 확인할 수 있으며, 이러한 현상이 열전달을 더 촉진하는 것으로 판단된다. 이와 같은 공기 유입속도에 대한 열전달 메카니즘의 변화는 $\alpha=40^\circ$ 에서도 공통적으로 발견된다.

3.3 설계변수 트러스각의 영향

그림 9에는 해석결과 #1, #2, #3, #4를 이용하여 트러스각에 대한 열유동특성을 분석하였다. 모든 조건에서 $V=10\text{m/s}$ 이며, 트러스각 $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 에 대한 마찰계수와 누셀수를 계산하였다. 같은 유동속도 V 에 대해 마찰계수는 트러스각 α 가 15° 변하는 동안 2%의 차이

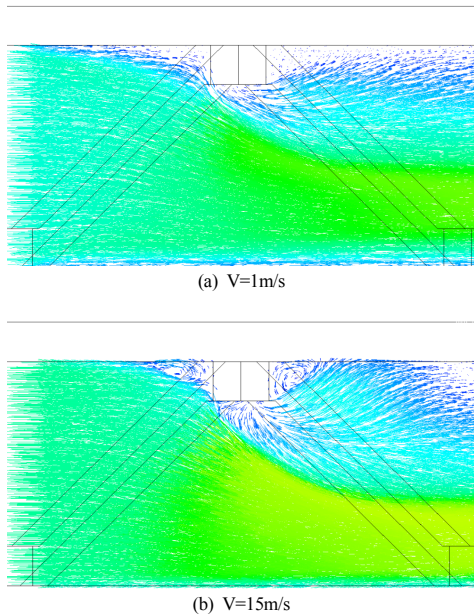


Fig. 8. Flow pattern around a pyramidal truss core of $\alpha = 35^\circ$, (a) $V=1\text{m/s}$, (b) $V=15\text{m/s}$.

를 보였으며, 누셀수는 트러스각이 커지면서 증가하는 경향을 보였다. 트러스각 $\alpha=45^\circ$ 일 때의 누셀수에 비해 $\alpha=30^\circ$ 의 누셀수는 약 65%이며, 이 차이는 모두 설계변수 민감도 영향이라기보다는 동일유동속도 V 에 대해 레이놀즈수 Re 의 증가영향도 포함된다. 설계변수인 트러스각 α 가 변화하게 되면 샌드위치의 높이 H_c 가 증가하게 되어 레이놀즈수 Re 는 증가하게 되는데, 3.2절에서 관찰한 바와 같이 Re 가 증가함에 따라 누셀수는 완만하게 증가하는 경향을 보이기 때문이다. 따라서, 분석 결과 설계변수에 대한 열유동과라미터는 중대한 유의미한 변화를 보이지 않는다.

강도 및 강성 등 기계적 성능이 트러스각에 대해 상당히 민감한데 반해, 열유동 특성은 기계적 특성에 비해 크게 민감하지 않다. 따라서, 피라미드 트러스 심재를 채용한 샌드위치 구조를 사용하여 하중지지와 열교환성을 동시에 구현하는 다기능성 구조물을 설계할 경우 열교환 특성보다는 구조특성에 더 초점을 맞추어 최적설계를 할 필요성이 있을 것이다.

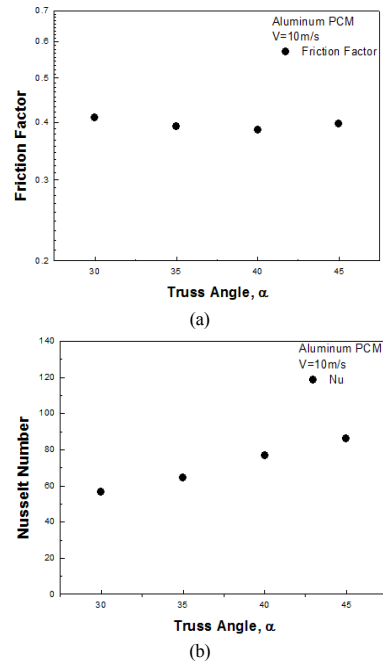


Fig. 9. Friction factor and Nusselt number with respect to truss angle.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 피라미드트러스를 채용한 샌드위치 구조물의 열유동특성을 분석하기 위해 ANSYS/Fluent를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

샌드위치 패널에 공기가 균일 속도로 유입되면, 첫 피라미드트러스 유닛셀을 지나는 동안 뚜렷한 압력강화와 누셀수의 증가가 일어나는 입구효과가 관찰되었다. 이는 곧 두 번째 유닛셀 통과 이후 안정화된다.

입구로 진입하는 공기의 속도가 증가할수록 마찰계수는 감소하였으며, 누셀수는 증가한다. 하지만, $V=5\text{m/s}$ 이상에서는 그 감소폭과 증가폭의 변화가 작았는데 이는 층류에서 난류로 유동양상이 전환되면서 열전달 모드가 전도에서 대류로 그 비중이 증가하였기 때문이다.

피라미드 트러스 심재의 설계변수인 트러스각에 의 변화에 대한 마찰계수와 누셀수의 변화를 분석 결과, 고려한 트러스각 $\alpha=30^\circ-45^\circ$ 범위에서의 마찰계수와 누셀수의 변화는 확인하지 않았다. 이를 통해 열전달과 구조 성능의 다기능성 구조물 설계 시 설계변수의 변화는 구조 성능에 더 민감할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Tian, T. Kim, T.J. Lu, H.P. Hodson, D.Q. Queheillat, D.J. Sypeck, H.N.G. Wadley, "The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3171-3186, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.010>
- [2] T.J. Lu, L. Valdevit, A.G. Evans, "Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores", *Progress in Materials Science*, Vol. 50, pp.789-815, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.03.001>
- [3] L. Valdevit, A. Pantano, H.A. Stone, A.G. Evans, "Optimal active cooling performance of metallic sandwich panels with prismatic cores", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 3819-3830, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.03.042>
- [4] J.H. Joo, K.J. Kang, T. Kim, T.J. Lu, "Forced convective heat transfer in all metallic wire-woven bulk Kagome sandwich panels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 5658-5662, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.018>
- [5] T. Kim, H.P. Hodson, T.J. Lu, "Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultralightweight lattice material", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 4243-4246, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.026>
- [6] H.B. Yan, Q.C. Zhang, T.J. Lu, "An X-type lattice cored ventilated brake disc with enhanced cooling performance", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, pp. 458-468, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.060>
- [7] F. W. Zok, S.A. Waltner, Z. Wei, H.J. Rathbun, R.M. McMeeking, A.G. Evans, "A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels :application to pyramidal truss core", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 6249-6271, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.05.045>
- [8] J. Xiong, L. Ma, S. Pan, L. Wu, J. Papadopoulos, A. Vaziri, "Shear and bending performance of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores", *Acta Materialia*, Vol. 60, pp. 1455-1466, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.11.028>
- [9] C.J. Yungwirth, H.N.G. Wadley, J.H. OConnor, A.Z. Zakraysek, V.S. Deshpande, "Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 920-936, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.07.001>
- [10] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering 9E SI version*, Wiley, 2014.

강 종 수(Jong-Su Kang)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한양대학교 기계공학 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2004년 6월 : ㈜삼성항공 연구원
- 2004년 7월 ~ 2006년 3월 : ㈜현대위아 연구원
- 2006년 4월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 선임연구원

<관심분야>

자동차, 기계시스템

김 상 우(Sang-Woo Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과 (항공우주공학석사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과 (항공우주공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 재료연구소 책임연구원

<관심분야>

PCM, 소성가공, 금속 3D 프린팅

임 재 용(Jae-Yong Lim)

[종신회원]



- 1999년 2월 : KAIST 기계공학(공학사)
- 2001년 2월 : KAIST 기계공학(공학석사)
- 2012년 12월 : University of Virginia 기계항공공학 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 안전공학과 조교수

<관심분야>

기계안전, 구조경량화 및 경량재료, 피로 및 충격거동