

<학술논문>

## 알루미늄 나선형 와이어로 직조된 다층 Kagome Truss PCM의 유동 및 열전달 특성에 관한 연구

주재황\* · 강보선\*\* · 강기주†

(2007년 7월 30일 접수, 2007년 10월 26일 심사완료)

### A Study on the Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics for the Wire-woven Bulk Kagome(WBK) Composed of Aluminum Helix Wires

Jai-Hwang Joo, Bo-Seon Kang and Ki-Ju Kang

**Key Words :** Ultra-lightweight Material(초경량 재료), Kagome Truss(카고메 트러스), PCMs(Periodic Cellular Metals; 규칙적 다공질금속), Forced Air Convection(강제대류)

#### Abstract

Recently, ultra-lightweight materials with open, periodic cell structures take much attention owing to its potential for multi-functionality such as load bearing, thermal dissipation, and actuation. This paper presents experimental results on the fluid flow and heat transfer characteristics for the Wire-woven Bulk Kagome (WBK) composed of aluminum 1100 wires. The overall pressure drop and heat transfer of the WBK specimen was experimentally investigated under forced air convection condition. The pressure loss and heat transfer performance of the aluminum WBK were compared with other heat dissipation media. It was shown that heat transfer characteristics depended on relative density and surface area density. Comparison with metal foams and other heat dissipation media such as packed beds, lattice frame materials, louvered fins, and others suggests that the aluminum WBK competes favorably with the best available heat dissipation media in heat transfer performance.

#### 1. 서 론

규칙적인 구조를 갖는 다공질금속인 PCM (Periodic Cellular Metal)은 높은 비강성, 비강도, 다기능성의 장점으로 인하여 최근 들어 제조기술 개발, 기계적 특성 및 열전달 성능에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup> PCM에는 단위조직(unit cell)의 형태에 따라 각주(prismatic)형, 박판(shell)형, 트러스형 등이 있으며, 이중 트러스 PCM은 개방형 조직으로 구성되어 있어 내부 공간을 활용하는

다기능성을 가질 것으로 기대되고 있다. 트러스 PCM을 이루는 구조는 피라미드(pyramid),<sup>(3)</sup> 옥테트(octet),<sup>(4)</sup> 카고메(Kagome)<sup>(5)</sup> 트러스 등이 제안되었고, 특히 카고메 트러스 PCM은 다른 트러스 PCM에 비해 소성 좌굴에 대한 저항성이 좋고 높은 소성변형 에너지와 낮은 이방성을 갖는다고 알려져 있다.

Kang & Lee<sup>(6)</sup>는 카고메 트러스와 유사한 구조를 갖는 PCM인 WBK(Wire-woven Bulk Kagome)를 제안하였다. WBK는 굴곡된 나선형 와이어(helix wire)를 이용하여 3차원 6축으로 구성되었음에도 불구하고 압축과 3점 굽힘 시험에서 직선 트러스 요소로 구성된 이상적인 카고메 트러스 구조에 버금가는 높은 강도를 보이고, 최대 강도 도달 후에도 안정적인 변형을 하여 많은 에너지를 흡수하는 바람직한 거동을 하는 것으로 보고되었다.<sup>(7)</sup>

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1679

\* 전남대학교 자동차연구소

\*\* 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

다공질금속(Cellular Metal)은 개방형 구조를 갖는 경우 기계적 하중을 지지할 수 있는 구조재(기계, 건축 등) 기능과 더불어 넓은 표면적 때문에 열전달 특성이 우수하여 방열핀, 가열장치, 열 흡수원, 전극, 화학촉매, 촉매용 지지물 등으로 활용될 수 있다.

열전달 특성이 평가된 다공질금속으로는 선재 그물망(wire-mesh screens),<sup>(8)</sup> 금속 허니컴(honeycomb),<sup>(9)</sup> 개방형 발포금속(open-celled metal foam),<sup>(10,11)</sup> 격자 프레임 금속(Lattice Frame Material; 이하 LFM)<sup>(12-14)</sup> 등이 있다. 이 중에서 금속 허니컴과 개방형 발포금속으로 제작된 다공질금속의 열전달 성능은 표면적 밀도와 공극률(porosity)에 크게 의존한다고 보고되었다. 즉 유동에 저항하는 구조물의 형상에 따라 표면적 밀도는 대류열전달률을 결정하고, 공극률은 마찰인자의 큰 요인으로 작용한다.

Tsia & Hwang<sup>(15)</sup>은 사각 관내 유동에 수직으로 다수의 평행한 알루미늄 막대(rib)를 배치한 후 표면 거칠기, 막대기 단면의 모양, 크기, 높이, 각도 등의 변화에 따른 열전달 성능 및 유동현상에 대하여 해석하였다. 이 연구는 막대 표면 거칠기가 열전달 성능에 영향을 미치는 하나의 인자임을 확인하였으며 사각관내에 막대 부착 방법에 따라 유동 형태가 확연히 다를 것을 보고하였다.

Kim 등<sup>(12,13)</sup>은 PCM의 일종인 사면체 LFM의 3차원 유동 현상을 가시화함으로써 열전달 특성 평가 방법을 한층 더 발전시켰다. 이방성 LFM의 경우 구조물로 향하는 유동 방향에 따라 마찰인자는 2배 정도 차이가 있으나 놀랍게도 열전달률은 비슷하다고 보고하였다.

이러한 다공질금속 구조물에서의 열전달 경로는 발열원으로부터 내부 트러스 요소로의 열전도가 이루어지면서 동시에 트러스 표면적을 통하여 대류열전달이 발생한다. 따라서, 공극률이 높은 (>0.94) 이방성 LFM 구조의 경우 트러스 요소 표면적이 일정하다면 열전도도가 높은 재료를 이용하는 것이 열전달 성능을 향상시키는 방안이다. 그러나, 내부 공극률의 변화에 따른 열전달 특성 평가는 아직 미진하다.

본 연구에서는 기계적 특성이 우수한 덩어리 카고메 PCM으로서 최근 소개된, 알루미늄 와이어로 직조된 WBK(Wire woven Bulk Kagome)의 열교환기 핀으로서의 사용 가능성을 평가하였다. 강체 대류 조건하에서 측정된 유동 및 열전달 특성에 대하여 실험 결과를 관계식으로 표현하였으며, 다른 PCM, 발포금속 및 우수한 열소멸 매체와 비교·평가하였다.

2. 실험장치

2.1 시 편

카고메 트러스와 유사한 구조를 갖는 PCM인 WBK 시편을 Aluminum 1100-O 나선형 와이어로 제작하였다. 화학조성비와 열적 물성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.1.1 시편형상

WBK는 나선형 와이어를 3차원공간에서 6축 방향으로 조립하여 Fig. 1과 같이 제작한다. 나선형 선재는 나선의 골과 마찬가지로 원주 방향으로 회전하는 모양을 하고 있고 옆에서 보면 사인 곡선의 형상을 하고 있다. 또한, 나선형이 나가는 방향은 와이어를 비틀 때의 회전방향에 의해 결정된다.

본 연구에서 사용된 나선형 와이어는 모두 오른 나사 방향의 와이어를 사용하였다. 피치(P)는 14.7 mm, 진폭(A)는 0.6 mm, 와이어의 반경(R)은 0.5 mm이다. 또한, 유동방향에 따른 유동 및 열전달 특성을 고찰하기 위하여 유동방향 O-A를 90도 회전시킨 유동방향 O-B에서 실험을 수행하였으며, 각 방향에서 바라본 구조물의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 각 방향의 유동 면적 변화는 채널 단면적에 대한 유동 방향으로의 시편 투영 면적의 비로 나타낼 수 있으며 유동방향 O-A는 0.75, O-B는 0.62이며, 유동방향 O-B가 유동 면적이 많이 감소했음을 알 수 있다.

Table 1 Composition of Aluminum 1100-O

Component	Al	Cu	Mn	Other, total	Si+Fe	Zn
Wt. %	Min 99	0.05 ~0.2	Max 0.05	Max 0.15	Max 0.95	Max 0.1

Table 2 Thermal properties of Aluminum 1100-O

Coefficient of Thermal Expansion, Linear 250°C	25.5 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.904 J/g °C
Thermal Conductivity	222 W/m K
Melting Point	643~657 °C

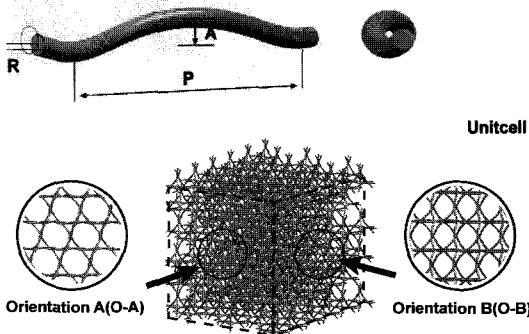


Fig. 1 Bulk Kagome truss PCMs woven of metal wires

2.1.2 상대 밀도(relative density)

상대밀도는 강제대류 유동에서 압력강하의 주요인이다. 모든 트러스 요소가 직선이며 서로 교차하지 않고 부피가 볼 조인트로 연결된 이상적인 트러스 구조인 것으로 가정하여 상대 밀도, 즉 단위셀이 차지하는 전체 내부 부피에 대한 트러스가 차지하는 부피의 비,  $\rho_{rel}$  는 식 (1)과 같다.

$$\rho_{rel} = \frac{3\sqrt{2}\pi \left(\frac{d}{a}\right)^2}{8} \quad (1)$$

여기서,  $a$  는  $P/2$ ,  $P$  는 피치,  $d$  는 와이어 직경이다. 일반적으로 상대밀도와 공극률,  $\varepsilon$  과는 다음 관계가 있다.

$$\varepsilon = 1 - \rho_{rel} \quad (2)$$

2.1.3 표면적 밀도(surface area density)

열전달 해석에서 중요한 인자인 표면적 밀도, 즉 단위셀이 차지하는 부피에 대한 트러스의 표면적의 비,  $\alpha_A$  는 이상적인 직선 트러스에 대하여 식 (3)과 같다.

$$\alpha_A = \frac{3\sqrt{2}\pi \left(\frac{d}{a^2}\right)}{2} = \rho_{rel} \left(\frac{4}{d}\right) \quad (3)$$

큰 표면적 밀도는 대류 열전달률을 증대시키는 중요한 역할을 한다. 그러나, 상대적으로 마찰인자는 증가됨으로 인하여 열효율은 감소하게 된다. 본 연구에서 사용한 WBK의 상대밀도는 0.03, 공극률은 0.97, 표면적 밀도는 123.36 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>이다.

2.2 강제대류 실험장치

본 연구에서는 개방형 풍동을 이용하여 강제대류 열전달 실험을 하였다. 풍동과 실험채널의 개략도는 Fig. 2에 도시하였다. 실험채널의 길이(L1)는 2 m, 시편 가열판 길이(L)은 145 mm, 채널 높이(H)는 60 mm, 깊이(W)는 150 mm이다. 비교적 긴 사

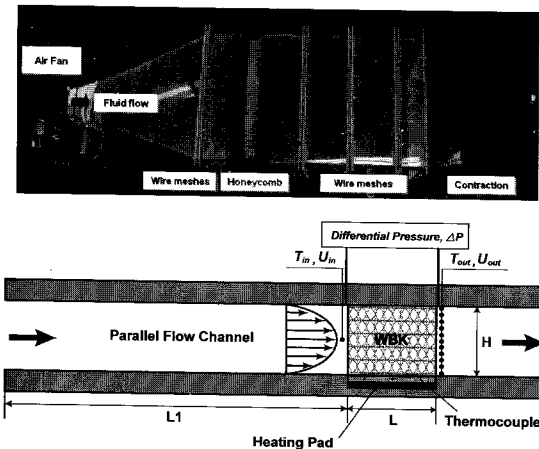


Fig. 2 Experimental set-up: open type forced air convection test rig

각채널을 사용하여(L1/H=33.3), 시편 입구에서 완전 발달된 유동이 되도록 하였다.

가열판은 Watlow사의 유리섬유가 강화된 실리콘 고무 가열판(fiberglass-reinforced silicone rubber heater)를 사용하였으며 최대 작동온도는 260℃, 두께는 1.9 mm(wire-wound: 1.4 mm, etched foil: 0.5 mm)이다. 가열판 위에 두께 2 mm의 동판을 위치시켰으며 알루미늄 WBK 시편과 구리판은 접촉점 주위에 순동 접착제를 도포하여, 동판과 알루미늄 WBK와의 열전도가 잘 이루어질 수 있도록 하였다. 가열판은 일정한 전력을 공급하여 구리판에서 공기로의 열전달이 일정 표면 열유속 조건이 되도록 하였다. 측정채널의 열손실을 방지하기 위하여 가열부 아래와 채널 상부는 단열시켰으며, 측정 속도별로 가열판 위 구리판의 온도가 일정하게 유지될 때까지 충분히 유지시켰다. 입구와 출구의 공기속도, 압력은 디지털 마노미터(Furness Controls 사, FCO520)를 이용하여 측정하였으며 정밀도는 ±0.25% FSD ±1 digit이다. 온도 측정은 T형 열전대를 사용하여 구리판의 입구 및 출구의 온도, 입구와 출구에서 채널의 높이에 따른 공기 온도를 측정하였다. 모든 실험은 정상상태 조건하에서 반복 측정하였으며 실험조건은 Table 3에 나타내었다.  $U_c$ 는 채널 중심에서의 속도,  $U_m$ 은 채널 단면에서의 평균속도,  $T_m$ 은 채널 단면에서의 평균온도이다. Re 수는 시편 입구의 평균속도, 채널의 높이를 사용하여 계산하였으며, 유동방향 O-A와 O-B의 Re 수가 다른 이유는 실험시 공기온도가 변화하여 물성치가 변하였기 때문이다.

3. 열유동 특성

3.1 마찰인자(friction factor)

채널유동에서 완전 발달된 층류와 난류의 속도

Table 3 Experimental conditions

No.	$U_c$ (m/s)	$U_m$ (m/s)				$Re_H$ ( $\times 10^4$ )		$T_{m,in}$ (°C)	
		Inlet		Outlet		O-A	O-B	O-A	O-B
		O-A	O-B	O-A	O-B				
1	2.0	1.3	0.8	1.7	0.54	0.52	16.6	24.3	
2	2.7	2.0	1.2	1.9	0.82	0.79	16.6	24.1	
3	3.5	2.7	1.6	2.0	1.1	1.1	19.9	24.1	
4	3.8	3.0	1.7	2.1	1.2	1.2	15.9	23.9	
5	4.5	3.7	2.2	2.2	1.5	1.5	15.9	23.9	
6	5.2	4.3	2.3	2.4	1.8	1.7	15.4	24.6	
7	6.9	5.9	3.3	3.0	2.5	2.3	15.6	25.8	
8	7.5	6.5	3.4	3.3	2.7	2.5	15.8	25.9	
9	8.3	7.3	3.9	3.6	3.0	2.8	16.1	27.8	
10	9	7.9	4.3	4.0	3.3	3.1	16.1	27.7	

분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Laminar flow : } U = U_c \left( 1 - \frac{y^2}{H^2} \right) \quad (4a)$$

$$\text{Turbulent flow : } U = U_c \left( 1 - \frac{y}{H} \right)^{1/7} \quad (4b)$$

WBK 시편 입구에서의 완전 발달된 속도 분포를 Fig. 3에 도시하였다. 속도는 유체 중심속도 2.6~9.0 m/s에 대하여 채널 높이에 따라 11 점의 속도를 측정하였다. 실선은 층류 속도, 점선은 난류 속도분포를 나타낸다. 중심속도가 2.6 m/s인 경우, 층류 속도분포와 잘 일치하였으며, 중심속도 5.1 m/s에서 난류 속도분포 (4b)와 근사적으로 잘 일치하였다. 식 (4b)의 지수 값은 매끄러운 관의

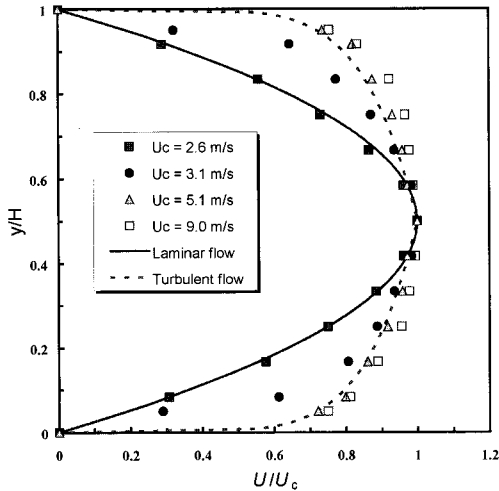


Fig. 3 Measured inlet flow velocity profile along the channel height

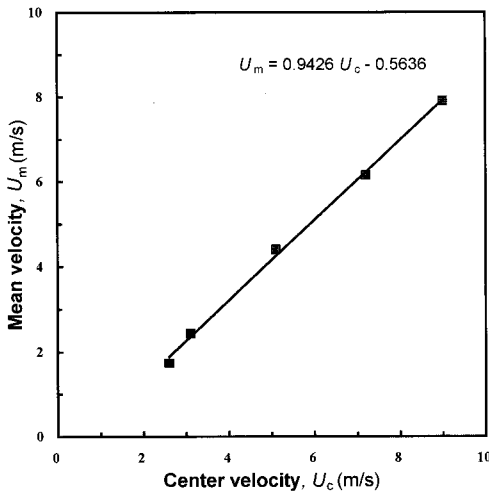


Fig. 4 Relation between mean velocity and center velocity

경우, 관의 표면 거칠기와 직경에 따라 1/6~1/10 까지 변화하며 보편적으로 1/7을 사용한다. 지수 값이 1/10로 되면 5.1 m/s 이상인 경우의 속도분포와도 잘 일치한다.

평균속도는 채널 높이에 따라 측정된 11 점의 속도를 면적에 대하여 적분하여 구하였다. 평균속도,  $U_m$ 과 중심속도,  $U_c$ 와의 관계식은 다음과 같으며 Fig. 4에 도시하였다.

$$U_m = 0.9426 U_c - 0.5636 \quad (5)$$

압력강하는 펌프나 팬의 요구동력을 결정한다. 이상적인 소형열교환기의 설계는 높은 열전달률, 낮은 압력강하에 의한 요구펌핑동력의 저하를 만족하도록 하는 것이다.

내부유동의 압력강하( $\Delta p/L$ )를 결정하는 무차원 변수인 마찰인자,  $f$ 는<sup>(8,12,13,16)</sup> 다음과 같이 정의된다.

$$f = \left( \frac{\Delta p}{L} \cdot H \right) \cdot \left( \frac{1}{\rho_f U_m^2 / 2} \right) \quad (6)$$

알루미늄 WBK 시편을 이용하여 측정된 마찰인자를  $Re$  수에 대하여 Fig. 5에 도시하였으며, 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

1) 유동방향 O-A

$$f = -0.2608 \ln(Re_H) + 3.0116, \quad 5.5 \times 10^3 \leq Re_H \leq 1.8 \times 10^4$$

$$f = 0.0645 \ln(Re_H) - 0.1847, \quad 1.8 \times 10^4 \leq Re_H \leq 3.3 \times 10^4$$

2) 유동방향 O-B

$$f = -0.8049 \ln(Re_H) + 8.2254, \quad 5.2 \times 10^3 \leq Re_H \leq 1.7 \times 10^4$$

$$f = -0.2165 \ln(Re_H) + 2.5497, \quad 1.7 \times 10^4 \leq Re_H \leq 2.5 \times 10^4$$

$$f = 0.0585 \ln(Re_H) - 0.2570, \quad 2.5 \times 10^4 \leq Re_H \leq 3.1 \times 10^4$$

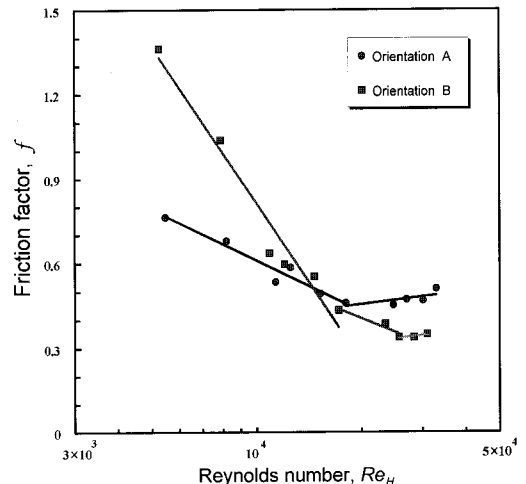


Fig. 5 Measured friction factor as a function of Reynolds number based on the channel height

유동방향 O-A의 마찰인자는 0.45~0.76, 유동방향 O-B의 마찰인자는 0.34~1.36 범위로 측정되었다. 두 유동방향 모두 층류 유동에서는 마찰인자가 감소하였으며, 난류 유동으로 전이되면서부터 조금씩 증가하는 경향을 나타내었다. 천이 영역을 제외한 Re 수가 낮은 층류 영역에서는 유동방향 O-A보다는 O-B의 마찰인자가 훨씬 크게 나타났는데, 이는 유동방향 O-B가 Fig. 1에 나타난 것처럼 공기 유동에 대한 구조물의 저항이 크기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 열전달 특성

대류열전달 특성을 나타내는 열전달계수의 무차원 수인 Nu 수는 다음과 같이 정의된다.<sup>(8,12,13,16)</sup>

$$h = \frac{Q}{A \Delta T} = \frac{q}{T_w - T_{f,mean}}, \quad Nu_H = \frac{h \cdot H}{k_f} \quad (7)$$

여기서  $A$ 는 구리판의 면적,  $Q$ 는 열전달률 [ $\dot{m} c_p (T_{m,out} - T_{m,in})$ ],  $T_w$ 는 구리판의 평균온도,  $T_{f,mean}$ 은 입출구 유체의 평균온도의 평균,  $k_f$ 는 유체의 열전도도이다. 채널 임의 단면에서의 유체의 평균온도  $T_m$ 은 유체가 단면을 통과하여 지나갈 때 이송되는 열에너지에 의하여 정의되며 질량유속과 단위 질량당 내부에너지의 곱을 미소면적에 대하여 적분함으로써 구할 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$T_m = \frac{1}{AU_m} \sum U_i T_i dA \quad (8)$$

위 정의를 이용하여 채널면적을 높이방향으로 13등분하여 평균온도를 계산하였다. 유동방향 O-A 조건에서 채널의 높이에 따른 출구에서의 온도분포를 Fig. 6에, 입구와 출구의 평균온도를 Fig. 7에 나타내었다. 유체 속도가 낮은 경우는 출구에서의 유체의 평균온도가 많이 높아져, 입출구에서의 평균온도 차이가 크지만 약 4.25 m/s 이상부터는 거의 일정하였다. 이는 속도의 증가로 가열시켜야 할 유체의 유량이 증가한 때문으로 판단된다.

알루미늄 WBK의 Re 수에 따른 열전달 특성을 Fig. 8에 나타내었으며, 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

1) 유동방향 O-A

$$Nu_H = 0.183 Re_H^{0.8} Pr^{0.4}, \quad 5.4 \times 10^3 \leq Re_H \leq 1.8 \times 10^4$$

$$Nu_H = 0.205 Re_H^{0.8} Pr^{0.4}, \quad 1.8 \times 10^4 \leq Re_H \leq 3.3 \times 10^4$$

2) 유동방향 O-B

$$Nu_H = 0.212 Re_H^{0.8} Pr^{0.4}, \quad 5.2 \times 10^3 \leq Re_H \leq 3.1 \times 10^4$$

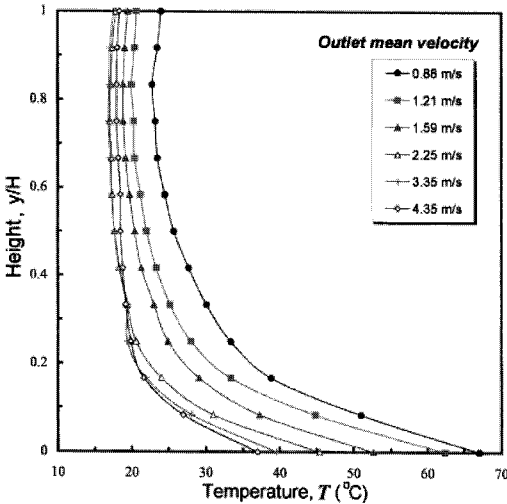


Fig. 6 Temperature profile along the channel height at outlet

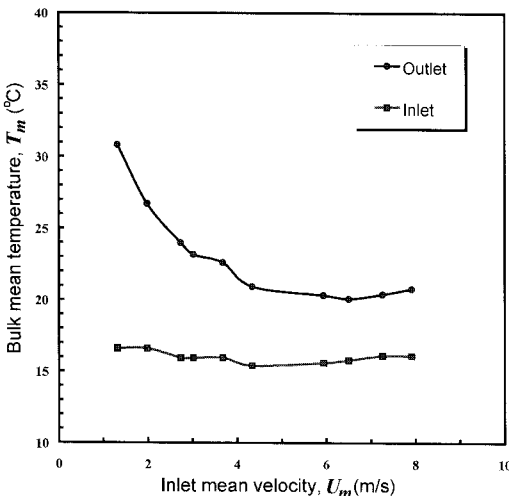


Fig. 7 Bulk mean temperatures at inlet and outlet

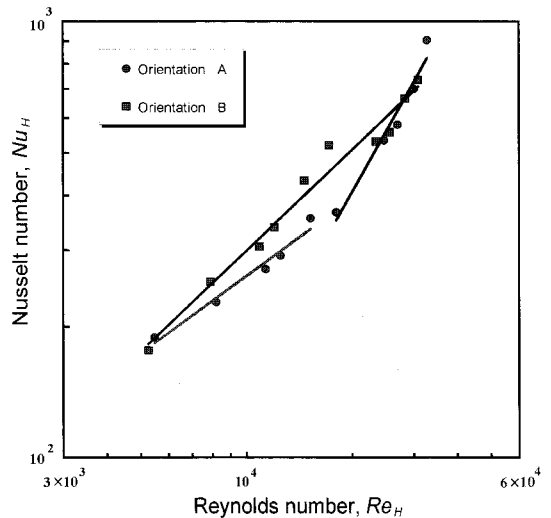


Fig. 8 Measured Nusselt number as a function of Reynolds number based on the channel height

여기서, Pr 수는 공기에 대한 값 0.7을 적용하였다. 알루미늄 WBK의 유동방향 O-A와 O-B를 모두 고려하면 Nu 수는 171~906 범위이다. 전반적으로 유동방향 O-B의 Nu 수가 유동방향 O-A보다 약간 높게 나타났는데, 이는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 축방향 공기유동과 충돌하는 와이어가 유동방향 O-B가 O-A보다 많기 때문으로 판단된다.

3.3 열효율(thermal efficiency)

기하학적 변화에 따른 열효율 효과를 평가하기 위한 열효율 지수는 대개 Nu 수와 마찰인자를 이용하여  $Nu_H/f$  로 정의한다. 그러나, 여러 가지 재료의 변화 및 기하학적 형상변화에 따른 열효율 평가에 이 지수는 잘 맞지 않음이 보고되었다.<sup>(8,16)</sup> 예를 들면, 빈 채널과 주름진 사각관 핀은 낮은 압력손실로 인하여 성능지수가 매우 큰 반면, 발포금속은 열전달률은 높지만 높은 유동저항으로 인하여 가장 낮은 값이 산출된다. 또한, 발포금속과 구리 직조 구조체는 빈 채널보다 낮은 열효율 지수가 산출되었다. 따라서 위에서 정의한 지수는 열효율 평가에 문제점이 있다고 판단되어, 다음과 같은 수정된 열효율 지수가 제안되었다.<sup>(8)</sup>

일정 열유속을 갖는 내부유동에서 전체 열유속, 압력강하, 펌핑동력은 다음과 같이 표현된다.

$$Q \approx Nu_H \Delta T k_f (WL/H) \tag{9}$$

$$\Delta p \approx (f Re^2) \left( \frac{\mu_f^2}{\rho_f} \right) (LH^{-3}) \tag{10}$$

$$P \approx \Delta p WHU_m \approx (f Re^3) \left( \frac{\mu_f^3}{\rho_f^2} \right) (WLH^{-3}) \tag{11}$$

여기서,  $\Delta T$  는 유체의 온도변화이다. 따라서, 단

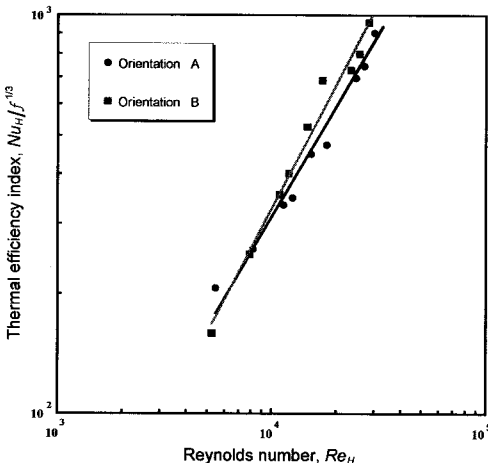


Fig. 9 Measured thermal efficiency index as a function of Reynolds number based on the channel height

위 온도변화, 단위펌핑동력에 대한 열전달률은

$$\frac{Q}{\Delta TP} \approx \left( \frac{Nu}{f Re^3} \right) \left( \frac{k_f \rho_f^2}{\mu_f^3} \right) (H^2) \tag{12}$$

로 표현되며, 단위온도변화, 단위펌핑동력에 대해서 열전달을 최대화시키기 위해서는  $Nu/f Re^3$  을 최대화해야 한다. 따라서, 이를 고려한 새로운 열효율 지수는 다음과 같이 정의된다.

$$Thermal\ Efficiency\ Index = \frac{Nu_H}{f^{1/3}} \tag{13}$$

Fig. 9는 Re 수에 따른 두 유동방향의 열효율지수를 나타내고 있다. 알루미늄 WBK의 열효율지수는 154~1134 범위이며, Re 수가 커짐에 따라 유동방향 O-B가 약간 높은 값을 갖지만, 전반적으로 유동방향에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다.

3.4 비교평가

다른 다공질금속들과 알루미늄 WBK의 유동 및 열전달 특성을 비교하기 위하여, 관련 문헌을 참조하여 비교대상의 공극률, 마찰인자, Nu 수, 열효율지수를 Table 4와 Figs. 10~12에 나타내었다.<sup>(8,12,16)</sup>

Fig. 10은 유동 특성인 마찰인자를 나타내며, 알루미늄 WBK의 마찰인자는 0.34~1.36 범위로 사각 주름관, 차량용 방열핀보다는 높지만, 격자구조금속(LFMs), 주조 카고메와는 비슷하며, 알루미늄 발포금속, FeCrAlY 발포금속, 와이어 스크린보다는 현저히 낮음을 알 수 있다. 마찰인자, 즉 압력강하는 주로 구조물의 상대밀도와 공극률의 영향을 받기 때문에, 알루미늄 WBK의 공극률과 비슷한 값을 갖는 주조 카고메, 알루미늄 LFM의 마찰인자가 비슷한 것으로 판단된다.

Table 4 Performance data for all materials used in comparison

Material	Porosity	f	Nu <sub>H</sub>	Nu <sub>H</sub> /f <sup>1/3</sup>
Aluminum WBK	0.97	0.3-1.4	171-906	154-1134
Brazed Copper Wire screens	0.69-0.80	5-15	70-500	35-144
Sintered FeCrAlY Foams	0.82-0.92	4-80	57-217	22-120
Sintered Copper Foams	0.88-0.94	13-88	35-332	20-141
LFM Aluminum Alloy	0.94	0.61	57-220	67-259
Kagome(BeCu)	0.93-0.97	0.3-0.64	50-257	58-383
Aluminum Foams	0.92	6.1-13.5	39-140	16-77
Packed beds	0.44	221-833	45-12164	5-2013
Aluminum louvered fins		0.06-0.4	8-53.5	17-147
Corrugated ducts		0.22-0.4	9-30	12-50

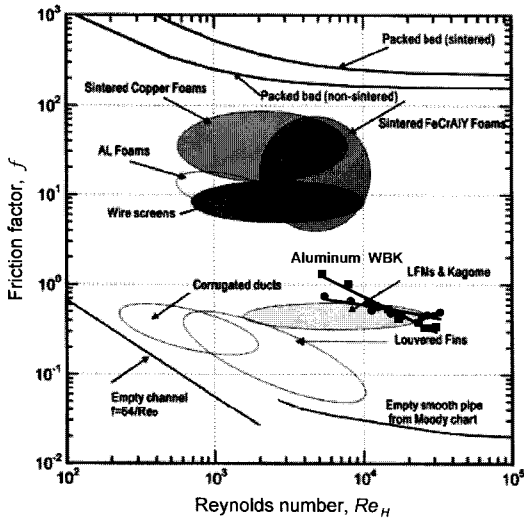


Fig. 10 Comparison of friction factor with metal foams and other heat dissipation media<sup>(8,12,13,16)</sup>

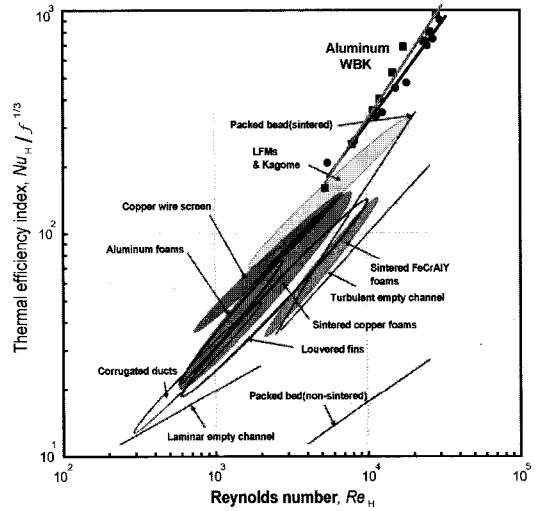


Fig. 12 Comparison of thermal efficiency index with metal foams and other heat dissipation media<sup>(8,12,13,16)</sup>

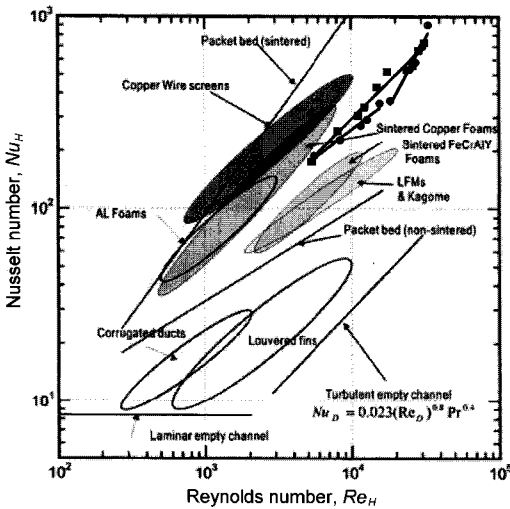


Fig. 11 Comparison of Nusselt number with metal foams and other heat dissipation media<sup>(8,12,13,16)</sup>

다른 초경량 금속 재료들과 WBK의 열전달 특인 Nu 수를 Fig. 11에 비교하였다. WBK는 LFM, 주조 카고메 구조물보다는 대류열전달 성능이 높는데, 이는 WBK의 상대밀도가 주조 카고메, LFM보다 낮고 표면적 밀도는 상대적으로 높기 때문으로 판단된다. 반면에 구리 와이어스크린, 구리 발포금속보다는 열전달 특성이 낮는데, 이는 구리 와이어 스크린 및 구리 발포금속의 열전도도가 385 W/mK로 알루미늄에 비해 1.7 배나 더 높기 때문으로 판단된다.

Fig. 12는 열효율 지수를 층류 및 난류관, LFM, 주름진 사각관, 자동차용 방열핀, 발포금속 등과 비교하였다. 알루미늄 WBK는 다른 초경량 구조

물에 비해서 열효율이 매우 우수함을 확인할 수 있다. WBK의 높은 열효율은 다른 구조형상에 비하여 낮은 압력 강하, 다른 다공질 재료에 비해 낮은 상대밀도와 상대밀도 대비 넓은 표면적 등으로 인한 높은 열전달률에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 알루미늄 WBK의 유동과 열전달 특성을 고려해 볼 때, 열소멸 매체 및 열교환기 설계 및 제작에 응용될 수 있는 대체 재료로서 충분한 타당성이 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

굴곡된 나선형 와이어로 제조된 알루미늄 WBK를 사용하여 강제대류 조건하에서 유동 및 열전달 특성을 실험적으로 측정하고 다른 PCM, 다공질 금속 및 우수한 열전달 매체와 비교해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 알루미늄 WBK의 상대밀도는 0.03, 공극률이 0.97로 아주 높으며, 낮은 상대밀도에 비하여 표면적 밀도는 123.36 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>으로 높은 편이다.
- (2) 마찰인자는 0.34~1.36 범위이며 주조 카고메, 격자 구조 금속(LFM)과 비슷하고 발포금속, 와이어 스크린보다는 현저히 낮다.
- (3) Nu 수는 171~906 범위이며 LFM, 주조카고메에 비해서 2 배 이상 우수한 성능을 갖는다.
- (4) Nu<sub>H</sub>/f<sup>1/3</sup>으로 정의된 열효율 지수는 154~1134 범위이며 구리 와이어 스크린, LFM에 비하여 1.4 배 이상 열효율이 우수하다.
- (5) 유동방향의 변화에 따라 마찰인자는 낮은 Re

수에서 최대 2 배 정도 차이가 있으나 열전달 특성과 열효율은 거의 비슷하였다.

(6) 따라서, 알루미늄 WBK 는 새로운 열교환기 재료로서 높은 잠재성을 가지고 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구사업(R0A-2006-000-10249-0)지원을 받아 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Wadley, H. N. G., 2006, "Multifunctional Periodic Cellular Metals," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 364, pp. 31~68.
- (2) Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., 2003, "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures," *Composite Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2331~2343.
- (3) Zok, F. W., Waltner, S. A., Z. Wei, Rathbun, H. J., McMeeking, R. M. and Evans, A. G., 2004, "A Protocol for Characterizing the Structural Performance of Metallic Sandwich Panels: Application to Pyramidal Truss Cores," *International J. of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 6249~6271.
- (4) Sypeck, D. J. and Wadley, H. N. G., 2001, "Cellular Metal Truss Core Sandwich Structures," *Proceedings of the 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2001)* Edited by J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, pp. 381~386.
- (5) Hyun, S., Karlsson, A. M., Torquato, S. and Evans, A. G., 2003, "Simulated Properties of Kagome and Tetragonal Truss Core Panel," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6989~6998.
- (6) Kang, K. J. and Lee, Y. H., 2004, "Three-Dimensional Cellular Light Structures Directly Woven by Continuous Wires and the Manufacturing Method of the Same," Patent Pending PCT/KR2004/002864 /05 November.
- (7) Lee, Y. H., Choi, J. E. and Kang, K. J., 2006, "A New Periodic Cellular Metal with Kagome Trusses and Its Performance," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, USA*, No. IMECE2006-15467, November.
- (8) Tian, J., Kim, T., Lu, T. J., Hodson, H. P., Queheillalt, D. T., Sypeck, D. J. and Wadley, H. N. G., 2004, "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.
- (9) Lu, T. J., 1999, "Heat Transfer Efficiency of Metal Honeycombs," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2031~2040.
- (10) Lu, T. J., Stone, H. A. and Ashby, M. F., 1998, "Heat Transfer in Open-cell Metal Forms," *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 10, pp. 3619~3635.
- (11) Zhao, C. J., Lu, T. J., Hodson, H. P. and Jackson, J. D., 2004, "The Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Open-celled Steel Alloy Foams," *Materials Science and Engineering A* 367, pp. 123~131.
- (12) Kim, T., Hodson, H. P. and Lu, T. J., 2004, "Fluid-flow and Endwall Heat-transfer Characteristics of an Ultralight Lattice-frame Material," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1129~1140.
- (13) Kim, T., Hodson, H. P. and Lu, T. J., 2005, "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. 4243~4264.
- (14) Kim, T., Zhao, C. J., Lu, T. J. and Hodson, H. P., 2004, "Convective Heat Dissipation with Lattice-frame Materials," *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 767~780.
- (15) Tsia, J. P. and Hwang, J. J., 1999, "Measurements of Heat Transfer and Fluid and Fluid Flow in a Rectangular Duct with Alternate Attached-detached Rib-arrays," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2071~2083.
- (16) Lu, T. J., Valdevit, L. and Evans, A. G., 2005, "Active Cooling by Metallic Sandwich Structures with Periodic Cores," *Progress in Materials Science*, Vol. 50, pp. 789~815.