

로봇 냉각을 위한 수냉식 냉각판의 열적 성능 평가

강상우[†]·이석원*·황규대**·김서영***

Thermal Performance Test of Liquid Cooling Type Cold Plates for Robot Cooling

Sarng Woo Karng, Suk Won Lee, Kyudae Hwang, Seo Young Kim

Key Words: Thermal resistance(열저항), overall heat transfer coefficient(총괄열전달계수), cold plate(냉각판), liquid cooling(수냉)

Abstract

In this study, we compare thermal performance between four different types of cold plates for humanoid robot cooling. Two commercially available cold plates made of copper have different dimensions and internal flow paths: One has 20×20 mm² base area with micro-channels and the other has 62.5×62.5 mm² base area with 85 round pin-fins. And two different types of cold plates of 20×20 mm² base area with 7 mm high are made of PC (polycarbonate), which aims to reduce the weight of cooling system. All cold plates are mounted on a 20×20 mm² copper block with two cartridge heaters of 30 W/cm². The overall heat transfer coefficient and thermal resistances for the liquid-cooled cold plates are obtained. The copper cold plate with micro-channels showed the best performance. Polycarbonate cold plates display fairly good thermal performance with more reduced system weight.

기호설명

A_s : 열전달 면적 (m²)
 C_p : 냉각수의 정압비열 (J/kgK)
 D_H : 수력 직경 (m)
 h : 대류 열전달계수 (W/m²K)
 k : 열전도율 (W/mK)
 \dot{m} : 냉각수의 질량 유량 (kg/s)
 R : 열저항 (K/W)
 Re : Reynolds 수
 T : 온도 (K)
 U : 총괄열전달계수 (W/m²K)

1. 서 론

전자산업의 급격한 발달로 인하여 칩의 집적도가 가속화되면서 칩당 열유속은 10⁶ W/m²에 이르고 있는 실정이다. 이러한 칩들을 냉각시키기 위한 방법으로 기존의 강제대류를 이용하는 것은 충분하지 못하기 때문에 열전달 성능이 우수한 히트파이프를 이용하여 고발열 전자장치를 냉각시키고 있다. 일반적인 전자장치들은 고정되어 스스로 움직임이 없는 것들이 대부분이기 때문에 히트파이프의 무게가 더해진다고 해도 추가적인 열적, 전기적 부하가 가중되지 않는다. 그러나 최신 전자기술의 집합체라고 할 수 있는 인간형 로봇 내부에는 CPU, DSP(Digital Signal Processor) 칩, 구동 모터와 같이 다중 열적 발열체가 산재하고 있으며, 이들은 움직임에 의한 기계적, 전기적인 부하로 인하여 발열이 가중되기 때문에 전체적인 무게를 줄이는 것이 매우 중요하다. 따라서 인간형 로봇의 적절한 냉각을 통한 안정적인 작동을 위하여 냉각장치의 무게를 고려한 냉각장

[†] 책임저자, 회원, KIST 열·유동제어연구센터

E-mail : libra@kist.re.kr

TEL : (02)958-5680 FAX : (02)958-5689

* 서울시립대학교 기계정보학과

** 유한대학 산업일어과

*** KIST 열·유동제어연구센터

치는 필수적인 요소이다.

지금까지 대부분의 냉각에 관한 연구는 금속 재질로 이루어진 냉각판이나 히트싱크(heat sink)에 관한 열적 성능의 향상에 집중되어 왔다.⁽¹⁻⁸⁾ 수냉식과 공랭식 방열판의 냉각 성능 비교 연구⁽¹⁾, 유로의 폭, 방열판 밑면의 두께, 방열판 재질의 영향에 관한 연구⁽²⁾, 겹층으로 쌓여 있는 칩셋에 관한 수냉 연구⁽³⁾, 미세유로가 있는 냉각판 성능 시험⁽⁴⁾ 그 외 방열판을 이용한 수냉식 연구가 주로 진행되어 왔다.⁽⁵⁻⁷⁾ 그러나, 비금속 재질을 이용한 냉각판에 대한 연구는 활발하지 않았다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 모사 열원을 냉각시키기 위한 냉각장치로서 우선 상품화되어 있는 제품으로 재질이 구리인 2 개의 냉각판(Mikros Technologies 사, 3R 시스템 사)과 절연성 재질인 PC(polycarbonate)로 제작된 2 종류의 냉각판을 준비하였다. 4 종류의 냉각판에 대하여 작동유체의 유량과 열유속의 변화에 따라 열저항 및 냉각판의 질량당 총괄 열전달계수를 비교 분석하였다.

2. 실험

2 개의 카트리지 히터를 삽입한 구리 블럭을 칩과 같은 열원으로 모사하여 각각 4 종류의 냉각판을 올린 후, 각 냉각판의 열적 성능을 분석하기 위한 실험 장치, 전원 공급장치, 온도, 압력, 유량에 대한 측정 및 기록 장치들을 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

구리 블럭과 냉각판의 바닥면인 구리 사이의 접촉면(3 종류)은 열전도성 그리스(SINESTU, KS-612)를 사용하여 접촉저항을 감소시켰고, 가장자리에 좁은 폭만 있고 가운데가 없는 냉각판은 가장자리의 좁은 폭과 구리 블럭 사이를 실리콘 접착제(WACKER, ELASTOSIL E43)를 사용하여 부착하였다. 열원에서 발생한 열이 외기로 빠져나가는 열손실 없이 냉각판을 거쳐 냉각판 내부를 흐르고 있는 냉각수와 열교환될 수 있도록 열원과 냉각판을 석면과 유리섬유를 이용하여 외기와 단열시켰다. DC 펌프(SHURflo, 100-00-02)를 이용하여 항온조(JEIO TECH, RW-3040G)에서 15°C로 유지되고 있는 냉각수를 냉각판의 입구로 공급하였고, 열원으로부터 열을 흡수하여 온도가 상승한 냉각수를 다시 항온조로 순환시켜 항상 15°C의 냉각수가 공급되도록 하였다. 시스템 내부로 공급되는 냉각수의 유량을 조절 및 측정하기 위하여 유량계(Dwyer, RMB)를 설치하였다. 냉각판과 펌프는 유연성이 좋은 내경 6.5 mm의 타이곤(TYGON) 관을 사용하여 연결하였다.

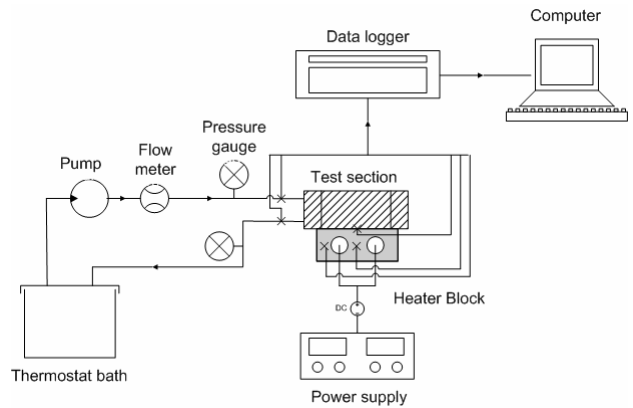


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

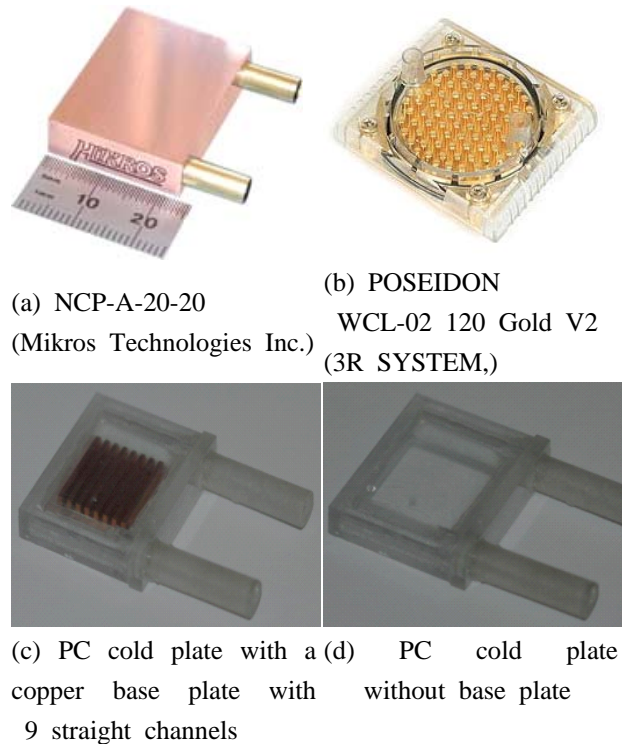


Fig. 2 Four types of cold plates

2.1 열원모사

로봇에서의 열원을 모사하기 위해 20×20 mm²의 면적과 6 mm 높이를 가지는 구리 블럭에 내경 5 mm 구멍 2 개를 뚫어 각각 60 W(2 A, 30 V) 용량의 카트리지 히터를 삽입하여 최대 120 W, 즉 30 W/cm²의 열유속이 발생할 수 있도록 제작하였다. 카트리지 히터는 2 개의 연결단자를 갖고 있는 직류 전원공급 장치(TOYOTECH, SDP-30-03TP)에 연결시켜 입력되는 전류와 전압을 제어함으로써 열원의 열유속을 조절하였다.

2.2 냉각판(Cold plate)

Fig. 2에 구리 재질의 기존 제품인 냉각판 2 종류와 PC로 제작한 냉각판 2 종류를 나타내었다. 기존 제품은 Mikros Technologies 사(NCP-A-20-20)와 3R 시스템 사(POSEIDON WCL-02 120 Gold V2)의 것으로, Mikros 사 제품은 열원과 접촉할 수 있는 면적이 $20 \times 20 \text{ mm}^2$, 높이가 7 mm이며, 외경이 1/4"인 입구와 출구를 가지고 있다. 내부의 구조는 열원과 접촉하는 쪽에 얇은 다공성 물질을 삽입하였고, 다공성 물질 위에는 미세한 유로들을 가지는 구조로 유체의 흐름에 대한 압력 강하를 줄이면서도 열전달 성능을 향상시키는 형태이다. 3R 시스템 사의 제품은 열원과의 접촉하는 밑면의 면적이 $62.5 \times 62.5 \text{ mm}^2$ 이며, 냉각수와 접촉하는 부위는 높이 6 mm, Φ 2.5(천정)- Φ 3.5(바닥)인 원추형 핀 85 개로 이루어져 있다. 9 mm의 바닥면의 두께는 전도 열저항을 줄이기 위하여 6 mm로 수정하였다.

재질이 PC(polycarbonate)인 2 개의 냉각판 크기와 형태는 Mikros Technologies 사의 것과 같이 $20(\text{W}) \times 20(\text{D}) \times 7(\text{H}) \text{ mm}^3$ 으로 제작하였다. PC 재질 냉각판은 열원과의 열전달이 용이하도록 열원과 접촉하는 바닥면은 열전도성이 좋은 구리로 제작하여 부착시켰다. 하나는 9 개의 유로를 가진 바닥면을 구리로 가공하였다. 유로의 크기는 폭 1 mm, 높이 3 mm, 길이 17 mm이다. 다른 하나는 열원과 냉각판 사이의 접촉저항을 없애기 위하여 냉각수가 열원과 직접 닿을 수 있도록 제작하였다. 열원과의 접촉하는 바닥 부분을 가장자리의 폭 1.5 mm 만을 남겨두고 가운데 부분을 모두 없앴다.

2.3 측정장치

카트리지 히터가 삽입된 구리 블럭에 4개의 열전쌍을 설치하여 구리 블럭의 온도분포를 측정하였고, 냉각판과 접촉하는 구리 블럭의 표면에 깊이 0.5 mm의 홈 2개를 파고, 그 홈 안에 열전쌍 2 개를 납땜으로 접합시켜 구리 블럭 표면의 온도를 측정하였다. 냉각판으로 공급되는 냉각수가 열원으로부터 흡수하는 열전달량을 측정하기 위하여 냉각판의 입출구에 열전쌍을 각각 설치하였다. 또한 외부 공기 온도의 영향을 배제하기 위하여 온도가 일정하게 유지되는 항온실 내에서 실험을 수행하였다. 열전쌍은 모두 T 형을 사용하였다. 모든 열전쌍들은 data logger(Yogokawa 사, DR230)에 연결하였고, data logger는 컴퓨터와 연결되어 온도분포를 기록 저장하였다.

전원공급 장치(GoldStar, GP-1505D)를 조절함으

로써 항온조로부터 펌프에 의하여 공급되는 냉각수의 유량을 조절하였으며, 냉각판의 출구 쪽에 유량계(Dwyer, RMB)를 설치하여 냉각수 유량을 측정하였다. 보다 정확한 질량유량을 측정하기 위하여 1 분 동안 비이커로 받은 냉각수의 질량을 저울(CAS Co. Ltd., AD-25)로 측정하였다.

2.4 실험방법

성능 시험할 냉각판을 카트리지 히터를 삽입한 구리 블럭 윗면에 부착한 후, 항온조의 온도를 15°C 로 맞추고, 3 시간 정도가 지나면 항온조의 온도가 15°C 로 이르게 된다. 펌프에 공급되는 직류 전원공급 장치를 조절함으로써 펌프가 토출하는 냉각수의 유량을 0.4~1.2 l/min 범위에서 0.2 l/min 간격으로 조절하였다. 냉각수의 유량을 맞춘 다음 히터에 공급되는 직류 전원공급 장치의 전압을 조절하여 히터의 발생 열량을 조절하였고, 20~100 W 범위에서 20 W씩 증가시켰다. 각각의 경우에서 3분 동안 온도의 변화가 없을 때를 정상상태로 간주하여 각각의 온도를 기록 저장하였다.

3. 성능 평가

입력 열량, Q_{input} 에 대하여 냉각판을 지나는 냉각수의 평균 온도와 히터 표면 온도로 냉각판의 전체 열저항, R_{total} 을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R_{total} = \frac{T_s - T_m}{Q_{input}} \quad (1)$$

여기서, Q_{input} 은 구리 블럭에서의 입력 열량이며, T_s 는 구리 블럭의 표면 온도, T_m 은 냉각판 입구와 출구에서의 냉각수 평균온도를 의미한다.

전체 열저항은 각 열저항의 합으로 표현할 수 있으며, 각각의 열저항은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R_{total} = R_{ct} + R_{sp} + R_{cond} + R_{conv} \quad (2a)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA_{cond}} \quad (2b)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_{conv}} \quad (2c)$$

$$R_{sp} = \frac{\sqrt{A_s} - \sqrt{A_c}}{k\sqrt{\pi A_s A_c}} \frac{\lambda k A_s R_{conv} + \tanh \lambda t}{1 + \lambda k A_s R_{conv} \tanh \lambda t} \quad (2d)$$

$$\lambda = \frac{\pi^{3/2}}{\sqrt{A_s}} + \frac{1}{\sqrt{A_c}}$$

여기서, R_{ct} 는 접촉 열저항, R_{sp} 은 확산 열저항⁽¹⁰⁾, R_{cond} 은 전도 열저항, R_{conv} 은 대류 열저항을 각각 의미한다. L 은 냉각판 밀면의 두께이며, A_{cond} 은 히터 블럭과 냉각판의 접촉면적, A_{conv} 은 냉각판 내부에서 냉각수와 접촉면적이다.

에너지 평형을 평가하기 위하여 냉각판의 열교환량을 계산하였다.

$$Q_{out} = \dot{m}_c C_p (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad (3)$$

여기서, \dot{m}_c 는 냉각수의 질량 유량, C_p 는 냉각수의 비열을 각각 의미한다. T_{outlet} 과 T_{inlet} 은 각각 냉각수의 입구와 출구에서의 온도이다.

총괄열전달계수를 이용하여 냉각판의 성능을 평가하였다.

$$U = \frac{Q_{out}}{A_{cond} \Delta T_{LMTD}} \quad (4)$$

여기서, ΔT_{LMTD} 는 대수평균온도차를 의미한다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{T_{inlet} - T_{outlet}}{\ln \frac{T_s - T_{outlet}}{T_s - T_{inlet}}} \quad (5)$$

냉각판을 지나는 평균 유속, V_{mean} 와 수력직경, D_H 을 사용하여 Reynolds 수를 정의하였다⁽⁹⁾.

$$Re = \frac{\rho_f V_{mean} D_H}{\mu_f} \quad (6)$$

4. 실험결과 및 고찰

실험의 정확도를 확인하기 위하여 전기로 발생된 열량과 냉각수에 의하여 교환된 열량을 비교하여 에너지 평형 상태를 확인하였다. 냉각수 유량의 실험범위 0.4~1.2 l/min에서 가운데 값인 0.8 l/min일 때의 에너지 균형 상태를 대표 값으로 간주하여 Fig. 3에 나타내었다. 직접 접촉식 PC 냉각판의 경우는 약 25%의 열손실이 있지만 나머지 냉각판의 경우의 열손실은 -10% 이내로 잘 맞고 있음을 보여주고 있다. 직접 접촉식 PC 냉각판의 냉각수 열교환량이 상대적으로 적은 이유는 냉각판 내부에서 냉각수와 냉각판이 충분히 열교환할 수 있도록 유도하는 유로 구조가 하나도 없으므로 인하여 냉각판 가운데 영역에서 재순환영역(recirculation region)이 발생하여 냉각판의 주변영역으로만 냉각수의 유동이 생겨서 냉각판 가운데 영역이 주변 영역보다 상대적으로 높

은 온도로 유지되어 두 영역 사이의 열교환이 충분하지 않았기 때문이다.

냉각판의 무게를 줄이기 위하여 PC로 제작된 2 종류의 냉각판과 이미 상품화된 2 종류, 총 4개 냉각판의 열적성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 냉각판으로 공급되는 냉각수의 유량을 변화시키면서 입력열량에 따른 열저항과 냉각판의 질량당 총괄전달계수를 산출하여 입력 열량에 따라 Fig. 4 (a~d)에 각각 나타내었다. 열저항을 보면 Mikros 사의 냉각판이 가장 좋은 성능을 나타내었고, 3R 사의 냉각판, 밀면에 구리 유로를 장착한 PC 냉각판, 냉각수와 직접 접촉한 PC 냉각판의 순으로 전체 열저항 값이 작다는 것을 알 수 있다.

전체 열저항을 구성하고 있는 각 열저항의 비례를 알아보기 위하여 Table 1에 전도 열저항과 확산 열저항 값을 나타내었다. Table 1을 보면 Mikros사의 냉각판은 구리 블럭과 접촉하는 면의

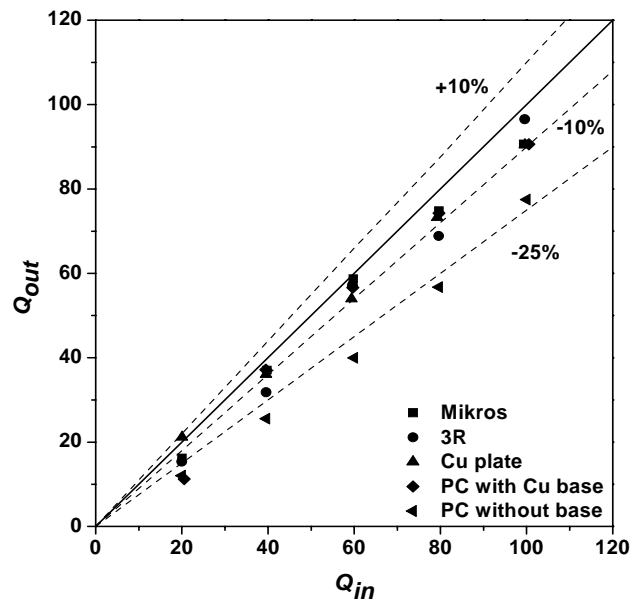


Fig. 3 Energy balance at flow rate of 0.8 l/min.

Table 1 Conduction and spreading resistance

Case	conduction resistance [K/W]	spreading resistance [K/W]	conduction + spreading [K/W]
Mikros	0.0033	-	0.0033
3R	0.022	0.072	0.094
PC with Cu base	0.0065	-	0.0065
PC without base	-	-	-

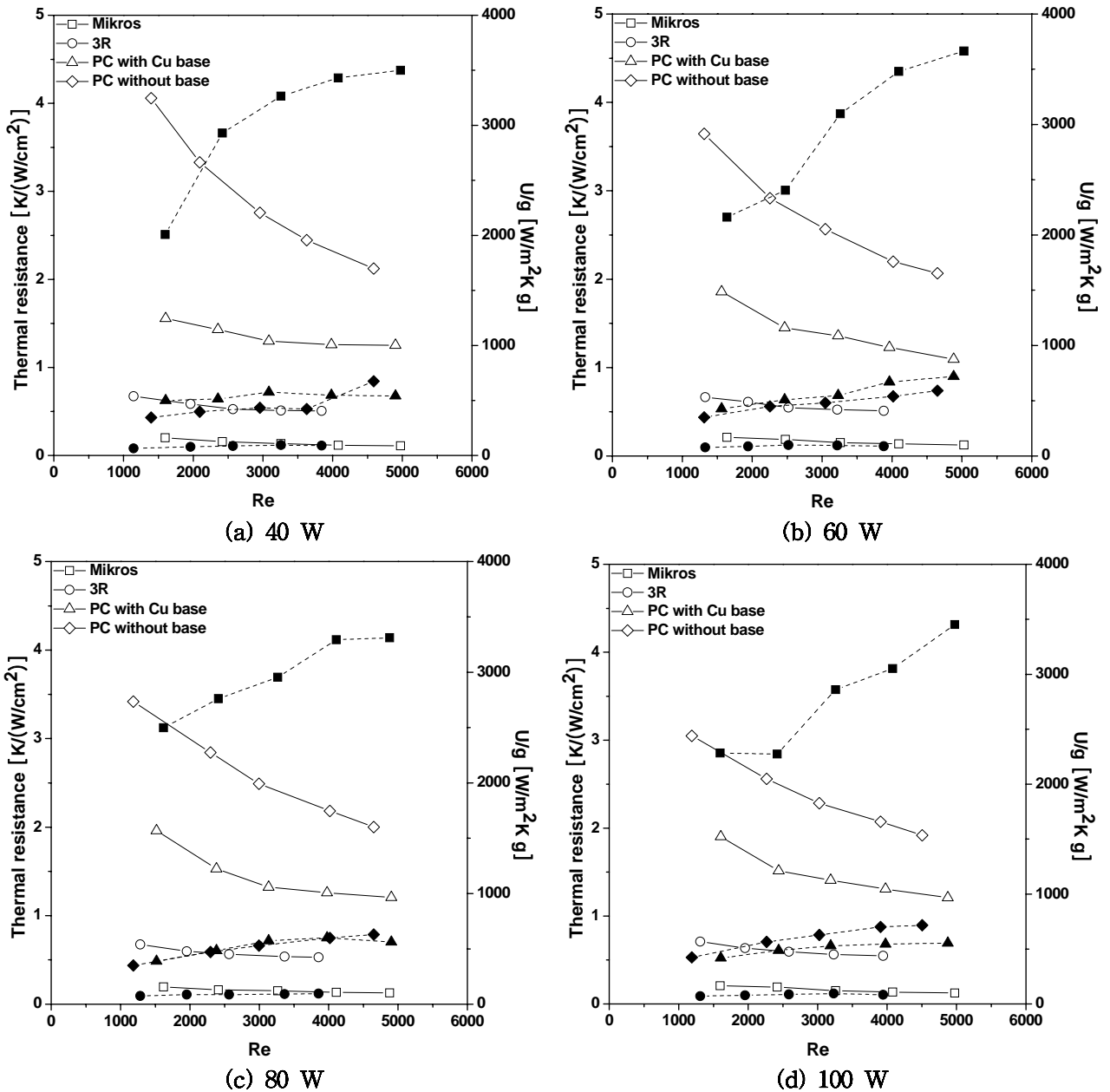


Fig. 4 Thermal resistances(—, with open symbols) and overall heat transfer coefficients(---, with solid symbols) of four kinds of cold plates according to Reynolds numbers on input powers

두께를 0.5 mm로 하여 0.0033 K/W의 낮은 전도 열저항을 갖으며, 냉각판 내부의 미세유로 구조로 대류 열전달 면적을 크게 늘림으로써 가장 좋은 열적 성능을 보이는 것을 Fig. 4를 통해서 알 수 있다. 3R 사의 냉각판은 구리 블럭과 접촉하는 면의 두께가 6 mm로 전도 열저항이 0.022 K/W로 Mikros 사의 냉각판보다 약 7 배 정도 더 크다. 또한 밀면의 크기가 $62.5 \times 62.5 \text{ mm}^2$ 으로 열원인 구리 블럭보다 크기 때문에 0.072 K/W의 확산 열저항도 추가로 발생한다. 면이 구리로 되어 있는 PC 냉각판은 1 mm 두께로 0.0065 K/W

의 전도 열저항을 갖는다. 직접 접촉한 PC 냉각판은 냉각수가 열원과 직접 접촉하기 때문에 전도 열저항과 확산 열저항이 모두 없다. 전도 열저항과 확산 열저항만을 보면 직접 접촉 PC 냉각판이 가장 좋고, 3R 사의 냉각판이 가장 높은 열저항을 갖는다. 그러나 3R 사의 냉각판의 전도 열저항과 확산 열저항의 합이 가장 큰 값을 가지지만, 두 개의 저항값이 없거나 훨씬 작은 2 종류의 PC 냉각판보다 전체 열저항이 작게 나온 이유(Fig. 4)는 3R 사의 냉각판의 대류 열전달면적이 가장 넓어서 대류 열저항이 급격하게 낮아

진 반면, PC 냉각판들의 상대적으로 열악한 대류 열전달면적에 의한 대류 열저항의 급격한 상승 때문이다. 각 냉각판의 A_{conv} 를 보면 내부에 미세유로를 가지고 있는 Mikros 사의 냉각판은 40.2 cm^2 , 3R 사의 냉각판은 원추형 핀-핀을 이용한 67 cm^2 의 넓은 표면적을 가지고 있지만, 밀면이 구리 유로로 되어 있는 PC 냉각판은 11.05 cm^2 , 직접 접촉식 PC 냉각판은 2.8 cm^2 으로 냉각수와의 열전달 면적이 상대적으로 매우 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 전체 열저항에 있어서 접촉 면적이 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

식 (3)을 이용하여 4 종류의 냉각판에 대하여 단위 질량당 총괄열전달계수를 계산하였고, Fig. 4의 오른쪽에 각각 나타내었다. 그 결과 Mikros사의 냉각판, 밀면에 구리 유로를 갖는 PC 냉각판, 직접 접촉 PC 냉각판, 3R 사의 냉각판 순으로 단위 질량당 총괄열전달계수가 큰 값을 갖는 것을 알 수 있었다. Mikros 사의 냉각판은 전체가 구리로 되어 있고 미세유로로 인하여 가장 좋은 열적 성능을 보여주고 있다. 반면 3R 사의 냉각판은 비교적 낮은 열저항을 보여주지만 가장 넓은 대류 열전달면적으로 인하여 무게가 178 g로 다른 3 종류의 냉각판보다 가장 무겁기 때문에 단위 질량당 총괄열전달계수는 가장 낮은 값을 갖는다. 반면에 PC 재료의 냉각판들은 비금속 재료로 무게가 매우 가볍기 때문에 3R 사보다 더 높은 단위 질량당 총괄열전달계수의 값을 보여준다.

접촉 열저항을 없애기 위하여 냉각판의 밀면을 없앤 냉각판의 경우, 중앙에서의 재순환영역과 열악한 대류 열전달면적으로 인하여 좋은 열적 성능을 보여주지는 못하였으나 약간의 유로 설치를 통하여 대류 열전달면적도 넓이면서 재순환영역도 없앤다면 좋은 열적 성능을 보일 것으로 기대된다.

5. 결론

냉각판의 무게를 줄이기 위하여 PC로 제작된 2 종류의 냉각판과 이미 상품화된 2 종류, 총 4 종류의 냉각판에 대하여 열원에 가해지는 열량을 변화시켜 Re 수에 따른 냉각판들의 열저항과 질량당 총괄열전달계수를 비교 분석하였다.

냉각판의 열저항과 단위 질량당 총괄열전달계수에 있어서 Mikros사 냉각판이 가장 좋은 열적 성능을 보였다. 그리고 3R사의 냉각판은 가장 넓은 열전달 면적으로 인하여 열저항 측면에서는 좋은 성능을 보인 반면, 단위 질량당 총괄열전달계수에 있어서는 가장 나쁜 열적성능을 보여주었

다. 비금속 재료로 제작된 밀면이 9 개의 구리 유로를 갖는 PC 냉각판과 직접 접촉 PC 냉각판들은 비록 가장 좋은 열적 성능을 보여주진 못했지만 금속 재료의 미세유로를 가지고 있는 Mikros 사의 열적 성능에 대략 50~60% 정도의 단위 질량당 총괄열전달계수의 값을 보임에 따라 무게에 민감한 로봇 냉각의 사용에 적절한 대안이 될 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

- (1.) H.Y. Zhang, D. Pinjala and Poi-Siong Teo, 2003, "Thermal management of High Power Dissipation Electronic Packages : from Air cooling to Liquid Cooling", *Electronics Packaging Technology Conference*, pp.620-625.
- (2.) H.Y. Zhang, D. Pinjala, Y. K. Joshi, T.N. Wong, K.C. Toh, 2003, "Thermal Modeling and Design of Liquid Cooled Heat Sinks Assembled with Flip Chip Ball Grid Array Packages", *Electronics Packaging Technology Conference*, pp.432-437.
- (3.) X.Y. Chen, K.C. Toh, T.N. Wong, J.C. Chai, 2004, "Direct Liquid Cooling of a Stacked MCM", *Inter Society Conference on thermal Phenomena*, pp.199-206.
- (4.) Jae Young Chang, Hee Sung Park, Jong In Jo, Julia, S., 2006, "A System Design of Liquid Cooling Computer Based on the Micro Cooling Technology", *ITherm2006*, pp.157-160.
- (5.) D. Copeland, 2005, "Review of Low Profile Cold Plate Technology for High Density Servers", *ElectronicsCooling Online*.
- (6.) D.W. Copeland, 2003, "Fundamental Performance of Heatsinks", *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 125, No. 2, June 2003, pp. 221-225.
- (7.) G.M. Harpole, and J. E. Eninger, 1991, "Micro-Channel Heat Exchanger Optimization", *Proceedings of the 7th IEEE Semi-Therm Symposium*, Phoenix AZ, pp. 59-63.
- (8.) H. Lee, Y. Jeong, J. Shin, J. Baek, M. Kang, K. Chun, 2004, "Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module", *Sensors and Actuators A 114 (2004)*, pp. 204-211.
- (9.) Frank P. Incropera and David P. Dewitt, 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5Th Edition, John Willey and Sons.
- (10) S. Lee, S. Song, V. Au, and K.P. Moran, 1995, Constriction/Spreading resistance model for electronic packaging, *Proceeding of the 4th ASME /JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 4, pp. 199-206.