

## 로봇 냉각을 위한 수냉식 냉각판의 성능 평가

이 석 원, 강 상 우\*, 황 규 대\*\*, 김 서 영†, 리 광 훈\*\*\*

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, \*한국과학기술연구원, \*\*유한대학 산업일본어과, \*\*\*서울시립대학교

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

Suk Won Lee, Sarng Woo Karng\*, Kyudae Hwang\*\*, Seo Young Kim†, Gwang Hoon Rhee\*\*\*

Graduated School of Mechanical Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

\*Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

\*\*Department of Industrial Japanese, Yuhan College, Gyeonggi 422-749, Korea

\*\*\*Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

(Received May 10, 2007; revision received February 1, 2008)

**ABSTRACT:** The increase of system weight due to installation of cooling devices adds electrical and mechanical loads of humanoid robot, and in return, results in much heat. Therefore, the weight of cooling system is a critical issue for robot cooling. In this study, we propose non-metallic cold plates to deal with such problems. We compare thermal performances between one metallic cold plate and five different types of non-metallic cold plates. A metallic cold plate is totally made of copper. Five non-metallic PC (polycarbonate) cold plates, which are designed to reduce the overall weight of robot cooling system, are composed of a polycarbonate cover with different types of base plate. The overall heat transfer coefficients per unit mass and thermal resistances are obtained for the cold plates. The metallic cold plate shows the best thermal performance. It is interesting to note that the PC cold plate with an aluminum base plate with 18 channels shows the best overall heat transfer coefficient per unit mass. Most polycarbonate cold plates display fairly comparable thermal performance with more reduced system weight compared to the metallic cold plate.

**Key words:** Thermal resistance(열저항), Overall heat transfer coefficient(총괄열전달계수), Cold plate(냉각판), Liquid cooling(수냉), Robot cooling(로봇 냉각)

#### 기 호 설 명

$A_c$	: 접촉 열전달 면적 [m <sup>2</sup> ]	$k$	: 열전도율 [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$A_{conv}$	: 대류 열전달 면적 [m <sup>2</sup> ]	$L$	: 냉각판의 밀면 두께 [m]
$c_p$	: 냉각수의 정압비열 [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}$	: 냉각수의 질량 유량 [kg s <sup>-1</sup> ]
$h$	: 대류 열전달계수 [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$Q_{out}$	: 냉각판의 열교환량 [W]
		$R_{total}$	: 총 열저항 [K W <sup>-1</sup> ]
		$R_{ct}$	: 접촉 열저항 [K W <sup>-1</sup> ]
		$R_{cond}$	: 전도 열저항 [K W <sup>-1</sup> ]
		$R_{conv}$	: 대류 열저항 [K W <sup>-1</sup> ]
		$T_s$	: 히터 블록의 평균 표면 온도 [K]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

- $T_{c,in}$  : 냉각수의 입구 온도 [K]  
 $T_{c,out}$  : 냉각수의 출구 온도 [K]  
 $U$  : 총괄열전달계수 [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]

## 1. 서 론

전자산업의 급격한 발달로 인하여 칩의 집적도가 가속화되면서 반도체칩에서의 열유속은  $10^6 W/m^2$ 에 이르고 있다. 이러한 고발열 칩들을 기존의 단순한 공랭형 히트싱크만을 이용하여 냉각시키는 것으로는 냉각성을 만족시키지 못하고 있다. 따라서 열이송 성능이 우수한 히트파이프를 결합하여 고발열 전자장비를 냉각시키고 있는 추세이다.

그러나 최신 기계전자 기술의 집합체라고 할 수 있는 인간형 서비스 로봇의 경우, 내부에 제어용 CPU, DSP(Digital Signal Processor)칩, 구동 모터, 모터드라이브 등 다양한 발열체가 산재되어 있다. 이러한 다중 발열체를 냉각시키기 위하여 기존의 냉각장치인 히트싱크와 히트파이프를 설치 적용하기에는 로봇내부에 공간적인 제약이 따른다. 또한 히트파이프 설치에 따른 시스템의 무게가 증가하면 로봇의 기계적, 전기적인 부하의 증가로 이어지게 된다. 따라서 인간형 서비스 로봇의 안정적인 구동을 위하여 적절한 냉각성능뿐만 아니라 냉각장치의 무게를 고려한 새로운 냉각장치의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 기술적인 문제를 해결하기 위해 수냉식 냉각판(cold plate)을 제안하고자 한다. 우선 시스템의 중량을 줄이기 위해 비금속 재질을 이용하여 새로운 냉각판을 설계하였다. 비금속 재질로 제작한 냉각판이 금속 재질 냉각판에 비하여 낮은 열적 성능을 보일 것이라고 충분히 예상되지만, 냉각장치로 인한 시스템 중량의 증가를 완화시킬 수 있다.

지금까지 대부분의 전자장치 냉각기술에 관한 연구는 금속 재질로 이루어진 냉각판이나 히트싱크(heat sink)의 열적 성능 향상에 집중되어 왔다.<sup>(1-7)</sup> 수냉식과 공랭식 방열판의 냉각 성능 비교 연구,<sup>(1)</sup> 유로의 폭, 방열판 밑면의 두께, 방열판 재질의 영향에 관한 연구,<sup>(2)</sup> 겹층으로 쌓여 있는 칩셋에 관한 수냉 연구,<sup>(3)</sup> 미세유로가 있는 냉각판 성능 시험,<sup>(4)</sup> 볼의 격자 배열(ball grid array)을 사용한 냉각판 성능 향상에 대한 연구,<sup>(5)</sup> 다공성 물질을 이

용한 냉각판 성능 실험,<sup>(6)</sup> 그 외 방열판을 이용한 수냉식 연구가 주로 진행되어 왔다.<sup>(7-9)</sup> 그러나, 비금속 재질을 이용한 냉각판에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 로봇 발열체를 모사한 열원을 냉각시키기 위한 냉각장치로서 1종류의 구리 재질 냉각판과 절연성 비금속 재질인 PC(polycarbonate)로 5종류의 냉각판을 설계 제작하였다. 총 6종류의 냉각판에 대하여 작동유체의 유량과 열유속의 변화에 따라 열저항 및 냉각판의 질량당 총괄열전달계수를 비교 분석하였다.

## 2. 실험

2개의 카트리지 히터를 삽입한 구리 블럭을 열원으로 모사하여 각각 6종류의 냉각판을 설치한 후, 각 냉각판의 열적 성능을 측정, 분석하였다. 실험장치, 전원 공급장치, 온도, 압력, 유량에 필요한 측정 및 기록 장치들을 Fig. 1에 개략도로 나타내었다.

본 실험을 위하여 제작한 6종류의 냉각판을 Fig. 2에 나타내었다. 각 냉각판은 Fig. 3에서 보듯이 냉각판 덮개와 베이스, 2부분으로 나누어져 있으며, 냉각수가 누수되지 않도록 실리콘 접착제(WACKER, ELASTOSIL E43)를 사용하여 접착하였다. 냉각판 베이스의 바닥면과 발열 블럭의 접촉면은 접촉저항을 최소화하기 위하여 열전도성 그리스(SINESTU, KS-612)를 사용하였다. 열원에서 발생한 열이 외기로 빠져나가는 열손실 없이 냉각판을 거쳐 냉각판 내부를 흐르고 있는 냉각수와 열교환될 수 있도록 열원과 냉각판을 석면과 유리섬유를 이용하여 외기와 단열시켰다.

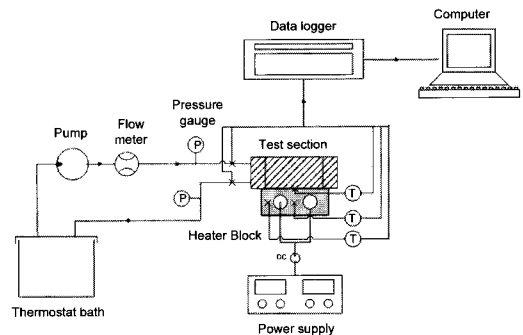


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

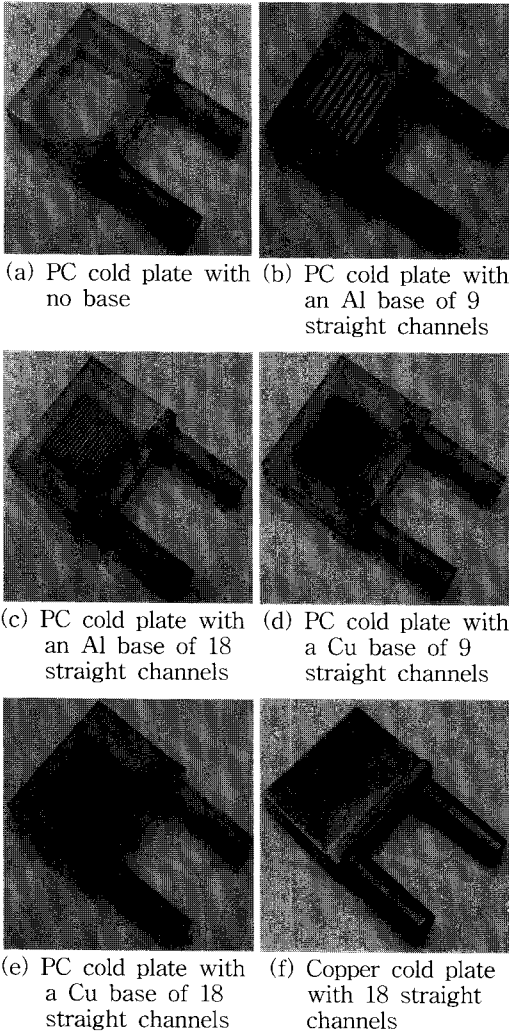


Fig. 2 Six types of cold plates.

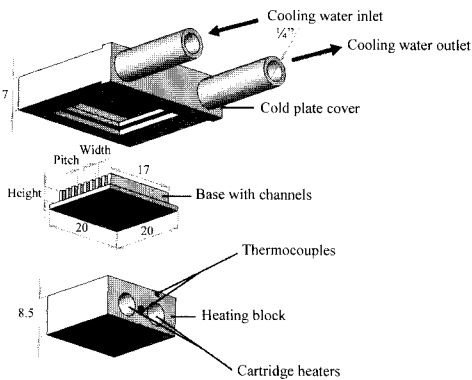


Fig. 3 Cold plate configuration.

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 타이콘(TYGON)관을 사용하여 연결하였다.

### 2.1 모사 발열체

로봇에서의 발열체를 모사하기 위하여 단면적  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ , 높이 8.5 mm의 구리 블럭에 내경 5 mm 구멍 2개를 뚫어 각각 60 W(2 A, 30 V) 용량의 카트리지 히터를 삽입하여 최대 120 W, 즉  $30 \text{ W/cm}^2$ 의 열유속이 발생할 수 있도록 제작한 발열 블럭을 Fig. 3의 하부에 나타내었다. 카트리지 히터는 2개의 연결단자를 갖고 있는 직류 전원공급 장치(TOYOTECH, SDP-30-03TP)에 연결시켜 입력전력을 제어하여 발열체의 열유속을 조절하였다.

### 2.2 냉각판(Cold plate)

Fig. 2에 구리 재료의 냉각판 1종류와 PC로 제작한 베이스의 형상이 다른 냉각판 5종류를 나타내었다. 베이스의 종류는 Fig. 2(a)~Fig. 2(f)에 각각 나타나 있다. 6종류의 냉각판은 Fig. 3과 같이 2 부분으로 이루어져 있다. 냉각판 덮개 부분의 아래면은  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ , 높이가 7 mm이며, 구리와 PC 재료의 2종류로 제작하였으며, 외경이 1/4"인 입구와 출구를 가지고 있다.

Fig. 2(a)~Fig. 2(e)의 5종류의 PC 냉각판은 냉각판의 무게를 줄이기 위하여 냉각판 덮개 부분을 PC로 제작하였으며, 베이스의 5가지 형태에 있어서 Fig. 2(a)의 직접 접촉식 PC 냉각판은 직접 열저항을 없애기 위하여 베이스 없이 냉각판 덮개 부분과 히터 블럭을 직접 부착하였다. Fig. 2(b), Fig. 2(c)는 구리보다 열전도성은 떨어지나 구리에 비하여 가볍고 가공성이 우수한 알루미늄으로 제작하고, Fig. 2(d), Fig. 2(e), Fig. 2(f)는 열전도성이 좋은 구리로 베이스를 제작하여 부착

Table 1 Particulars of cold plates

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Base material	-	Al	Al	Cu	Cu	Cu
No. of channels	-	9	18	9	18	18
Pitch (mm)	-	2	1	2	1	1
Height (mm)	-	3	3	3	3	3
Width (mm)	-	1	0.5	1	0.5	0.5

하였다. 특히 Fig. 2(f)의 금속 냉각판은 냉각판 뒷개 부분과 베이스 부분이 모두 구리로 제작되었다. 냉각판의 대류열저항을 감소시키기 위하여 Fig. 2(b), Fig. 2(d)는 폭 1 mm, 피치 2 mm, 높이 3 mm, 길이 17 mm의 유로 9개를 가공하였고 Fig. 2(c), Fig. 2(e), Fig. 2(f)는 폭 0.5 mm, 피치 1 mm의 유로 18개가 같은 높이와 같은 길이로 가공하여, 유로의 재질과 피치 변화에 따른 열적 특성을 비교하고자 하였다. 냉각판의 형상 및 재질은 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

### 2.3 측정 장치

카드리지 히터가 삽입된 구리 블럭에 4개의 열전대를 설치하여 구리 블럭의 온도분포를 측정하였다. 냉각판과 접촉하는 구리 블럭의 표면에 깊이 0.5 mm의 홈 1개를 파고, 그 홈 안에 열전대 1개를 전도성 컴파운드(ACC Silocones, AS1607)로 접합시켜 구리 블럭의 표면 온도를 측정하였다. 냉각판으로 공급되는 냉각수가 열원으로부터 흡수하는 열전달량을 측정하기 위하여 냉각판 유로의 입출구에 열전대를 각각 설치하였다. 또한 외부 공기 온도의 영향을 배제하기 위하여 온도가 일정하게 유지되는 항온실 내에서 실험을 수행하였다. 모든 열전대들은 T형을 사용하였고, data logger(Yogokawa, DR230)에 연결하여 온도를 기록 저장하였다.

전원공급 장치(GoldStar, GP-1505D)를 조절함으로써 항온조로부터 펌프에 의하여 공급되는 냉각수의 유량을 조절하였으며, 냉각판의 출구 쪽에 유량계(Dwyer, RMB)를 설치하여 냉각수 유

Table 2 Estimated uncertainties

Parameter	Uncertainty
Temperature	± 0.51%
Mass flow rate	± 1.23%
Pressure	± 2.45%

량을 측정하였다. 보다 정확한 질량유량을 측정하기 위하여 1분 동안 비커로 받은 냉각수의 질량을 저울(CAS Co. Ltd., AD-25)로 측정하여 비교하였다.

### 2.4 실험방법

발열 히터블럭 윗면에 시험할 냉각판을 부착한 후, 순환펌프로 냉각수를 냉각판으로 공급하였다. 냉각수의 유량은 펌프의 입력 전압을 조절하여 0.4~1.2 l/min 범위에서 0.2 l/min씩 증가시켰다. 냉각수의 유량을 맞춘 다음 히터에 공급되는 직류 전원공급 장치의 전압을 조절함으로써 히터의 발열 열량을 조절하였다. 열량은 20~100 W 범위에서 20 W씩을 증가시켰다. 각각의 경우에서 3분 동안 온도의 변화가 없으면 정상상태로 간주하여 각각의 온도를 기록 및 저장하였다. 각 지점에서의 온도, 유량, 압력 측정값에 대한 불확실도를 Table 2에 나타내었다.<sup>(11)</sup>

### 3. 성능 평가

입력 열량,  $Q_{input}$ 에 대하여 냉각판에 유입되는 냉각수의 입구 온도,  $T_{c, in}$ 와 발열체 표면 온도,  $T_s$ 를 이용하여 냉각판의 총 열저항,  $R_{total}$ 을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R_{total} = \frac{T_s - T_{c, in}}{Q_{input}} \quad (1)$$

여기서,  $Q_{input}$ 은 구리 블럭에서의 입력 열량이다. 총 열저항은 각 열저항의 합으로 표현할 수 있으며, 각각의 열저항은 아래와 같이 정의할 수 있다.

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

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

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

여기서,  $R_{ct}$ 는 접촉 열저항,  $R_{cond}$ 은 전도열저항,  $R_{conv}$ 은 대류열저항을 각각 의미한다.  $L$ 은 전도 열전달 방향의 길이인 냉각판 베이스의 두께이며,  $A_c$ 는 히터 블럭과 냉각판 사이의 접촉 열전달 면적,  $A_{conv}$ 은 냉각판 내부에서 유로와 냉각수와의 대류 열전달 면적이다.

에너지 평형을 평가하기 위하여 냉각판의 열교환량을 다음 식으로 계산하였다.

$$Q_{out} = \dot{m}_c c_p (T_{c.out} - T_{c.in}) \quad (3)$$

여기서,  $\dot{m}_c$ 는 냉각수의 질량 유량,  $c_p$ 는 냉각수의 정압비열을 각각 의미한다.  $T_{c.in}$ 과  $T_{c.out}$ 은 각각 냉각수의 입구와 출구 온도이다.

총괄열전달계수를 이용하여 냉각판의 성능을 평가하였다.

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

여기서,  $\Delta T_{LMTD}$ 는 대수평균온도차를 의미한다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{T_{c.in} - T_{c.out}}{\ln \frac{T_s - T_{c.out}}{T_s - T_{c.in}}} \quad (5)$$

#### 4. 실험결과 및 고찰

실험결과의 타당성을 검증하기 위하여 발열량과 냉각수에 의하여 교환된 열량의 에너지 평형 상태를 비교하였다.

냉각수 유량을 0.8 l/min으로 고정하고 20~100 W까지 입력 열량을 변화시켰을 때의 에너지 평형 상태를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 에너지 평형 상태를 보면 유로가 없는 직접 접촉식 PC 냉각판의 경우는 약 25%의 열손실이 있지만 나머지 냉각판의 경우의 열평형은 10% 이내로 잘 맞고 있음을 보여주고 있다. 직접 접촉식 PC 냉

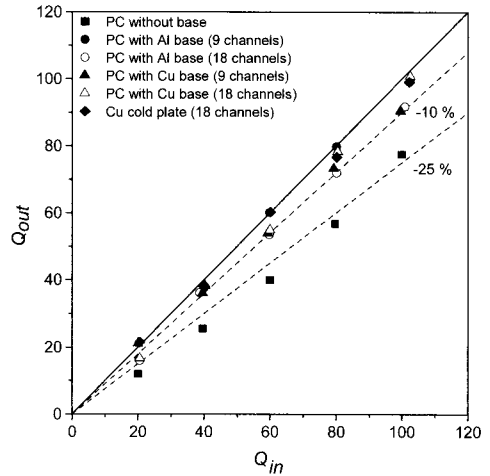


Fig. 4 Energy balance at flow rate of 0.8 l/min.

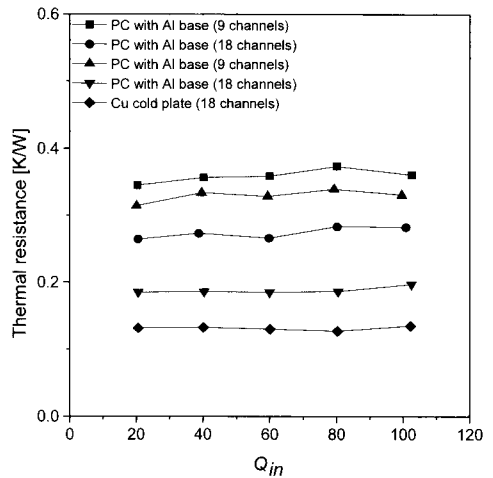


Fig. 5 Thermal resistances on heat inputs at 0.8 l/min.

각판의 냉각수 열교환량이 상대적으로 적은 이유는 냉각판 내부에서 냉각수와 냉각판이 충분히 열교환할 수 있도록 유도하는 유로 구조가 없어 냉각판 내부의 열전달면적이 부족하기 때문이다. 즉 냉각판을 흐르는 냉각유체가 발열체의 열을 충분히 흡수하여 냉각판을 나올 수 없으며, 이로 인하여 발열체 표면의 온도가 높아지고 외부로의 열손실이 증가하는 것이다.

Table 3 Conduction thermal resistance of the cold plates

Case	conduction resistance [K/W]
PC without base	-
PC with Cu base	0.0065
PC with Al base	0.0106
Cu cold plate	0.0065

Table 4 Mass and mass ratio of the cold plates.

Case	Mass [g]	Mass ratio
PC without base	5.5	0.20
PC with Al base (9 channels)	7.6	0.27
PC with Al base (18 channels)	7.7	0.28
PC with Cu base (9 channels)	12.2	0.44
PC with Cu base (18 channels)	12.5	0.45
Cu cold plate	28.0	1.00

Fig. 5는 열전달 촉진을 위해 냉각판의 베이스에 설치한 유로 개수 증가에 따른 열저항을 구리 재질 냉각판의 열저항과 비교한 것이다. PC 냉각판의 경우, 냉각판 베이스의 재질에 관계없이 유로 개수가 증가함에 따라서 열저항이 감소하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 전체 열저항에 있어서 전도열저항의 크기는 매우 작고 대류열저항이 전체 열저항에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 유로의 개수가 증가함에 따라서 열전달면적이 증가하므로 대류열저항이 감소하고 그로 인하여 전체 열저항이 감소한다. 열저항이 낮은 18개 유로의 경우, 구리 재질 냉각판에 비하여 알루미늄 베이스의 PC 냉각판은 109%, 구리 베이스의 PC 냉각판은 43%의 열저항이 증가하였다. 반면 Table 4에 나타난 바와 같이 구리 재질 냉각판에 비하여 알루미늄 베이스의 PC 냉각판은 72.5%, 구리 베이스의 PC 냉각판은 55.4%의 중량이 감소하였다. 구리 재질 냉각판에 비하여 열저항은

증가하였지만 상당한 중량 감소 효과를 보였다.

냉각판을 지나는 냉각수의 압력강하를 Fig. 6에 나타내었다. 9개의 유로를 갖는 같은 형상의 냉각판인 알루미늄 베이스 PC 냉각판과 구리 베이스 PC 냉각판은 18개의 유로가 있는 경우보다 유동저항이 작아서 보다 낮은 압력강하를 보이고 있다. 유로의 개수가 같은 경우에는 재질에 관계없이 비슷한 압력 강하를 보이고 있음을 확인하였다.

재질에 대한 영향을 알아보기 위하여 직접 접촉식 PC 냉각판과 냉각판 베이스의 유로 개수가 18개인 경우의 재질이 각각 다른 Fig. 2(c), Fig. 2(e), Fig. 2(f)의 전체 열저항을 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. Fig. 7의 전체 열저항을 보면 전도열저항이 낮은 구리 재질 냉각판이 가장 좋은 성능을 나타내었고, 구리 베이스 PC 냉각판, 알루미늄 베이스의 PC 냉각판, 직접 접촉식 PC 냉각판 순으로 전체 열저항 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 직접접촉식 PC 냉각판의 경우, 질량 유량 0.006 kg/s에서 총 열저항이 0.7 K/W로, 이는 100 W 발열시 70℃의 온도상승을 의미하는 것으로 냉각유체의 유입온도가 30℃라면 발열체의 표면온도가 100℃에 이르게 되어 반도체칩의 허용 작동온도범위를 넘게 된다. 일반적으로 반도체의 허용 표면온도가 70℃ 정도임을 감안하면 총 열저항은 0.4 K/W보다 낮아야 한다. 본 실험의 유

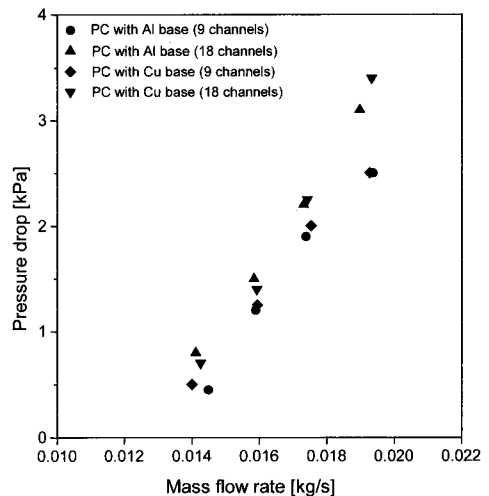


Fig. 6 Pressure drops through the cold plates.

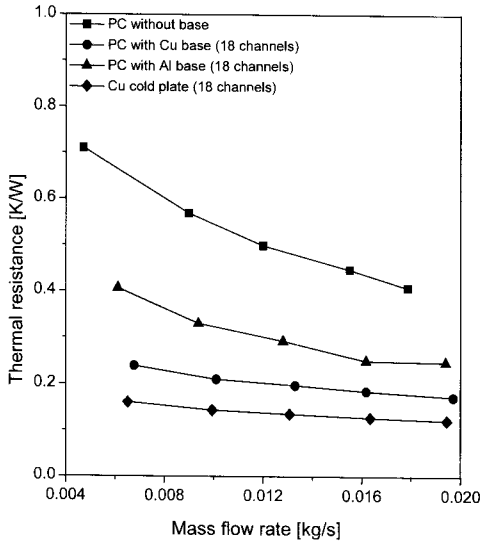


Fig. 7 Thermal resistances at 100 W.

량범위에서는 구리 베이스 PC 냉각판과 알루미늄 베이스 PC 냉각판, 구리 재질 냉각판이 이러한 성능을 만족하고 있다.

냉각판 내 열전달계수는 Re 수에 따라서 변화하기 때문에 질량당 총괄열전달계수 또한 Re 수에 비례한다. 최대 발열량인 100 W일 때 질량 유량에 따른 총괄열전달계수,  $U$ 와 단위 질량당 총괄열전달계수,  $U/m$ 을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타냈다. 구리 재질 냉각판은 효과적인 열전달 면적이 크기 때문에 알루미늄 베이스 PC 냉각판보다 55%, 구리 베이스 PC 냉각판보다 32%의 높은 총괄열전달계수를 보였다. 구리 재질 냉각판은 총괄열전달계수가 가장 높지만, 6종류의 냉각판 중 가장 무겁기 때문에 질량당 총괄열전달계수는 구리 베이스 PC 냉각판과 알루미늄 베이스 PC 냉각판보다 낮다. 구리 재질 냉각판에 비하여 구리 베이스 PC 냉각판은 약 50%, 알루미늄 베이스 PC 냉각판은 약 58% 정도 높은 단위 질량당 총괄열전달계수 값을 보이고 있다. 단위 질량당 총괄열전달계수는 냉각판의 질량에 큰 영향을 받기 때문에 높은 단위 질량당 총괄열전달계수가 항상 냉각판의 높은 냉각 성능을 의미하지 않는다. 따라서 냉각판의 적절한 냉각성능을 평가하기 위하여 열저항도 동시에 고려하여야 한다. 로봇의 안정적이고 지속적인 구동을 위해 냉각판의 열저항은 0.4 K/W 이하를 유지해야 하며,

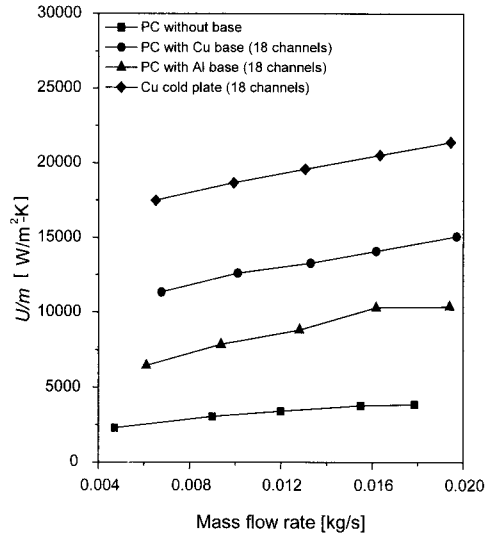


Fig. 8 The overall heat transfer coefficients at 100 W.

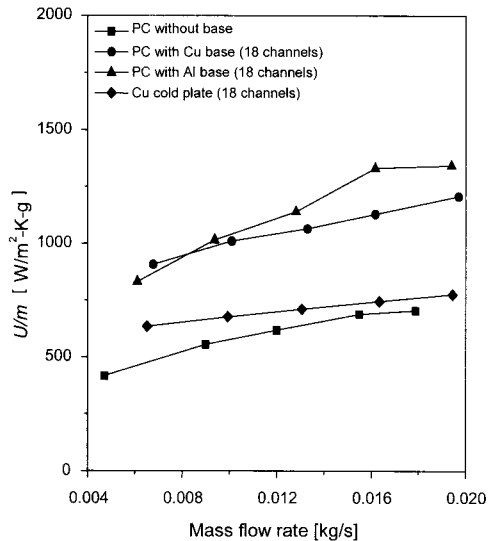


Fig. 9 The overall heat transfer coefficients per unit mass at 100 W.

단위질량당 총괄열전달계수가 높은 냉각판을 선정하여야 한다.

결과적으로 알루미늄 유로가 가공된 베이스를 가지는 PC 냉각판이 가벼운 무게와 적절한 수준의 열적 성능을 갖추고 있으므로 냉각장치로 인한 시스템의 중량 증가가 매우 제한적인 인간형

로봇의 열적 문제를 해결할 수 있는 매우 적절한 대안임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지능로봇 적용을 위하여 냉각관의 무게를 줄이고 공간적 제약이 적은 냉각장치로서 비금속 재질인 PC로 제작된 5종류의 냉각관과 구리 재질 냉각관 1종류, 총 6종류의 냉각관을 제작하여 열저항과 냉각 시스템 무게를 고려한 단위 질량당 총괄열전달계수를 산출하여 열전달 성능을 비교 분석하였다.

내부에 18개의 유로가 가공된 구리 재질 냉각관이 열저항 측면에서 가장 좋은 성능을 보인 반면, 18개의 유로가 가공된 알루미늄 베이스 PC 냉각관이 구리 재질 냉각관보다 높은 질량당 총괄열전달계수를 보였다. 따라서 비금속 재질로 제작된 알루미늄 베이스의 PC 냉각관이 시스템의 중량저감이 필수적인 인간형 서비스 로봇 냉각 시스템에 적절한 대안이 될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 인간기능 생활지원 사업단의 지능 로봇 기술개발사업의 지원으로 수행된 연구(2M20260)입니다.

## 참고문헌

- Zhang, H. Y., Pinjala, D., Teo and Poi-Siong, 2003, Thermal management of high power dissipation electronic packages : from air cooling to liquid cooling, Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, pp. 620-625.
- Zhang, H. Y., Pinjala, D., Joshi, Y. K., Wong, T. N. and Toh, K. C., 2003, Thermal modeling and design of liquid cooled heat sinks assembled with flip chip ball grid array packages, Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, pp. 432-437.
- Chen, X. Y., Toh, K. C., Wong, T. N. and Chai, J. C., 2004, Direct liquid cooling of a stacked MCM, Inter Society Conference on thermal Phenomena, Las Vegas, pp. 199-206.
- Chang, J. Y., Park, H. S., Jo, J. I. and Julia, S., 2006, A system design of liquid cooling computer based on the micro cooling technology, IT herm 2006, San Diego, pp. 157-160.
- Zhang, H. Y., Pinjala, D., Wong, T. N., Toh, K. C. and Joshi, Y. K., 2005, Single phase liquid cooled microchannel heat sink for electronic packages, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1472-1487.
- Zhang, H. Y., Pinjala, D., Wong, T. N., Toh, K. C. and Joshi, Y. K., 2005, Fluid flow and heat transfer in liquid cooled foam heat sinks for electronic packages, IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies, Vol. 28, pp. 272-280.
- Copeland, D., 2005, Review of low profile cold plate technology for high density servers, Electronics Cooling Online.
- Copeland, D. W., 2003, Fundamental performance of heatsinks, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 125, No. 2, pp. 221-225.
- Harpole, G. M., and Eninger, J. E., 1991, Micro-channel heat exchanger optimization, Proceedings of the 7th IEEE Semi-Therm Symposium, Phoenix AZ, pp. 59-63.
- Lee, H., Jeong, Y., Shin, J., Baek, J., Kang, M. and Chun, K., 2004, Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module, Sensors and Actuators A 114, pp. 204-211.
- Holman, J. P., 2000, Experimental Method for Engineer, 7th ed., McGraw-Hill, pp. 51-60.
- Incropera, Frank P. and DeWitt, David P., 2002, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed., John Wiley and Sons.