

로봇제어기 냉각시스템분석을 위한 열유동 해석

조기주* · 박성원*

Flow and Thermal Analyses for Evaluation of a Robot Controller Cooling System

K. J. Cho, S. W. Park

Key Words: Robot Controller(로봇 제어기), Cooling System(냉각시스템), Heat Exchanger(열교환기).

Abstract

Flow and thermal characteristics of cooling system for the robot controller were numerically as well as experimentally investigated.

To obtain the overall flows within controller, the system level solutions were analysed at first and then the board level solutions were pursued to understand the detailed flow and temperature fields near the main board which have a significant influence on the cooling of electronic components.

The evaluation for a performance of the heat exchanger was conducted on the basis of the obtained flow and temperature patterns. The results showed that the heat exchanger made a small contribution to the cooling of controller and caused an increase of the temperature in CPU.

1. 서론

전자산업의 발전에 따라 전자 기기 및 그 구성 부품들은 점점 소규모, 집적화되고 있으며 이에 상응하여 단위면적당 발생하는 열량이 증가하고 있다. 따라서 이러한 발열을 효과적으로 제거하기 위한 냉각시스템의 설계 및 확보는 전자기기의 열적 안정성 확보를 위해 필수적인 사항이 되고 있다⁽¹⁾.

로봇제어기 역시 각종 전자부품들로 이루어진 전자기기로서 열적 측면에서의 고려가 요구되는

시스템이라고 할 수 있다. 특히 심한 먼지나 고온과 같은 열악한 환경에서 작동해야하는 로봇제어기의 경우 각 부품의 보호를 위해 제어기 내부는 외기와 완전히 차단되어 있는 밀폐구조로 구성되어 있기 때문에 적절한 내부 냉각대책이 반드시 병행되어야 한다.

로봇제어기를 열시스템의 관점에서 간단히 나타내면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

제어기 내부의 주발열원은 rack에 부착되어 있는 기판 위의 전자소자들과 앰프부의 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)이다. 그리고 이를 냉각시키기 위해 그림과 같이 rack의 하단부에 2개, 앰프의 상단부에 1개의 팬이 위치하여 내부 공기를 강제 순환시킨다. 또한 열교환기가 제어기의 뒷면에 설치되어 내부공기가 발열원으로부터 흡수한 열을 외기로 방출시킨다. 그리고 앰프부의 쪽에는 IGBT냉각을 위한 평판 핀(Plate fin) 형의 히트싱크가 장착되어 있다.

살펴본 바와 같이 로봇 제어기는 많은 수의 발

* 현대중공업 산업기술연구소

열원이 존재하고 이의 냉각을 위해 3개의 팬과

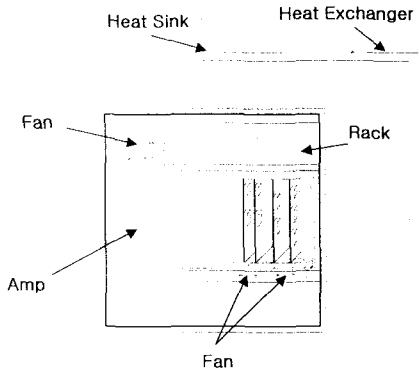


Fig. 1 Schematic diagram of the robot controller

히트싱크, 열교환기가 장착되어 작동하고 있는 복잡한 열시스템이라고 할 수 있다. 따라서 방열 시스템 설계에 있어 내부 구조 및 발열 소자의 변화에 따른 체계적인 열해석이 적용되지 않을 경우 비효율적인 시스템이 될 수 있다.

이번 연구에서는 로봇 제어기의 최적 냉각시스템 확립의 일환으로 시스템의 주요 구성 요소인 열교환기의 효율성을 수치 및 실험적인 방법으로 분석하였다.

2. 수치해석 및 온도 실측

2.1 제어기 내부 열유동장의 수치해석

내부 팬에 의해 야기되는 제어기 내부의 공기 유동장을 수치적으로 해석하였다. 기판위의 소자를 포함하여 제어기 전체를 한번에 모델링하여 해석하는 것은 상당히 많은 수의 격자를 요구하므로 능률적이지 못하다. 따라서 제어기 내부의 전반적인 유동 구조파악을 위한 시스템레벨의 해석을 개략적인 모델링을 이용하여 진행하고 이를 바탕으로 상세 모델을 이용한 기판 주위의 유동 및 열전달 특성을 조사하였다. 이러한 수치해석 기법은 전자기기 내부의 열유동해석에 있어 Wong⁽²⁾에 의해 적용된 바가 있다.

시스템 레벨 해석에서는 제어기의 주요 구성품

들이 단순화되어 모델링 되었는데 특히 각종 전자 소자가 위치하고 있는 기판은 소자의 평균높이(4mm)를 거칠기로 하는 평판으로 근사하였다⁽³⁾. 그리고 내부에 위치하는 3개의 팬은 특성 곡선을 근사화한 다항함수를 이용하여 모델링하였으며 열교환기의 압력강하 특성은 실측치를 적용하였다.

반면 CPU가 장착되어 있는 메인보드 주위의 세부 열유동 특성 파악을 위한 상세 모델링에서는 각종 전자소자를 균일 발열체로 가정하여 기판위에 분포시켰으며 다층 구조로 이루어진 기판(FR-4 PWB)은 높이 방향과 및 수평방향으로의 열전도도를 다르게 하여 열전도의 비등방성 효과도 고려하였다⁽⁴⁾. 이 때 수평방향으로는 35W/m²°C, 높이방향으로는 3.5W/m²°C의 열전도도를 각각 지정하였다. Fig. 2에서는 기판 주위 상세해석을 위한 계산영역 및 기판 모델을 보여주고 있다.

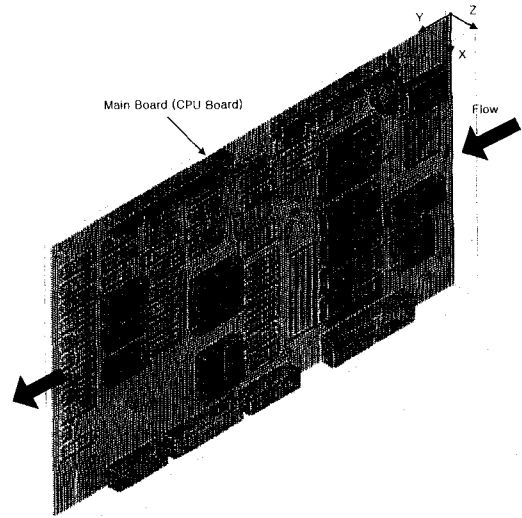


Fig. 2 Main(CPU) board model

CPU가 존재하는 메인보드는 $z=0$ 평면에 위치하고 있다. 냉각 공기의 입구($y=0$) 및 측면 경계에서는 시스템 레벨의 해석결과로부터 주어지는 유속 분포를 지정하였고 제어기 벽면에 해당하는 $x=0$ 면에서는 점착 및 단열조건을 사용하였다.

그리고 주요 발열 소자인 CPU 및 74F245의 발열량은 소자 공급업체의 열저항 자료와 소자의 표면온도 측정값을 이용하여 추정하였는데 CPU(i8096)는 약 1.5W, 74F245는 약 0.5W 정도의 전력 소모 즉 열손실이 발생하는 것으로 나타났다. 나머지 소자들의 발열량은 기관의 소비전력에 근거하여 균일하게 분포한다고 가정하였다. rack 하단의 팬에 의해 야기되는 유량과 두 기관 사이의 폭을 유동 특성값으로 하여 레이놀즈 수를 정의하면 약 4700으로 유동 상태는 난류에 해당한다. 따라서 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하여 3차원 정상상태의 난류유동 지배방정식 즉 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류운동에너지 소산율방정식, 에너지 방정식의 해를 상용코드인 FLUENT를 이용하여 구하였다.

2.2 제어기 작동시의 내부 온도 실측

최대하중(120Kg) 인가 상태에서의 로봇작동시 제어기 내부의 공기 및 주요 발열소자인 CPU 표면온도 상승폭을 실측하였는데 항온실내에서 제어기 외부온도를 45℃로 일정하게 유지시킨 상태에서 T-type 열전대(thermocouple)를 이용하여

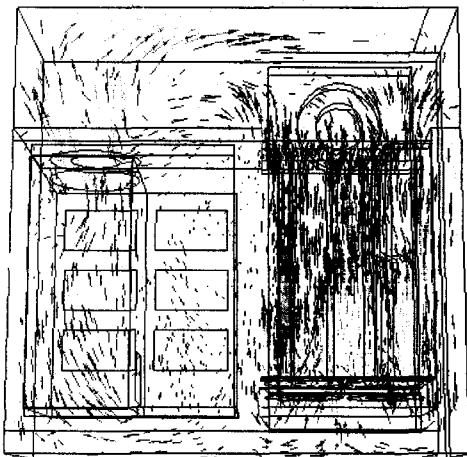
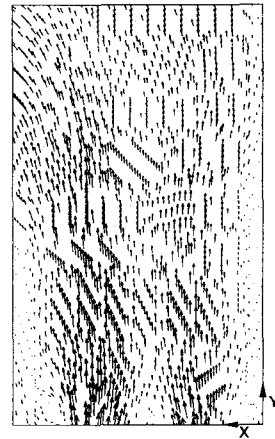


Fig. 3 Overall flow pattern in the robot controller

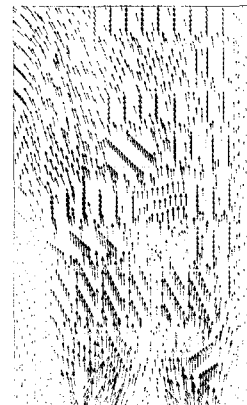
측정하였다. 제어기의 냉각시스템 (열교환기, 히트싱크, 내부 팬)이 모두 작동할 때는 정상상태로의 도달시간이 약 1시간, 열교환기가 작동하지 않을 경우에는 약 2시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

로봇제어기 내부에서 rack 하단부와 앰프 상단



(a)



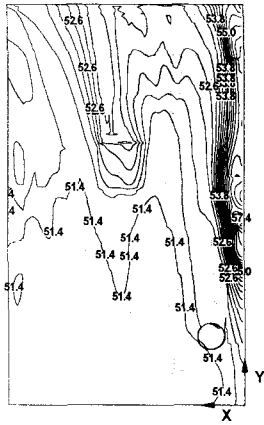
(b)

Fig. 4. Flow patterns in x-y plane ($z=15\text{mm}$). (a) with heat exchanger, (b) without heat exchanger.

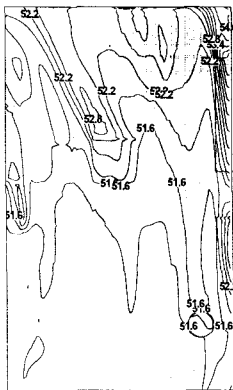
부의 팬 그리고 열교환기 입구 측의 팬에 의해 야기되는 공기 유동장의 분포가 Fig. 3에 주어졌다. 램프 및 rack 측 팬이 모두 제어기 하단에서 상단으로 유동을 형성하도록 설치되어 있기 때문에 공기는 각종 발열 소자를 냉각시키면서 상단으로 유입된다. 열교환기 흡입팬이 rack 상

를 통하여 공기를 제어기 내부로 재유입시킨다. 또한 rack 하단의 팬은 기관의 직접적인 강제대류 냉각을 위한 공기 흐름을 야기시키는 반면 램프부의 팬은 제어기 내부 전체의 원활한 흐름을 유도하는 역할을 하고 있음을 수치계산 결과로부터 확인 할 수 있다.

전자 소자의 냉각에는 기관 주위를 통과하는 공기 유동형태가 중요한 영향을 미칠 것이다. Fig. 4에서 이에 대한 수치해석 결과로서 $z=15\text{mm}$ 면에서의 유동 분포를 보여주고 있다. 이 때 제어기 냉각시스템 구성요소의 효과 분석을 위해 열교환기가 작동하는 경우[Fig. 4(a)]와 작동하지 않는 경우[Fig. 4(b)]에 대한 수치해석이 진행되었다. 팬이 위치하고 있는 하단 경계면($y=0$)에서는 시스템 해석(Fig. 3)에서 얻어지는 속도 분포를 이용하였으며 보드 뒷면에서 역시 시스템 해석에서 예측되는 열전달계수값을 이용하였다. 수치해석에는 약 185000여개의 육면 격자계가 이용되었으며 격자수 변화에 대한 해의 민감도 조사를 위해 격자수를 2배로 하였을 경우 약 3%의 CPU 온도변화가 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Isotherms in x-y plane ($z=15\text{mm}$). (a) with heat exchanger, (b) without heat exchanger.

단에 위치하여 공기를 흡입하고 외부 공기와의 열교환을 통해 냉각한 다음 rack 하부의 토출구

	Temperature of CPU(°C)	
	Numerical analysis	Experimental measurement
With heat exchanger	66.1	65.2
Without heat exchanger	65.8	64.6

Table 1 Comparison of CPU temperature for numerical and experimental results

팬이 위치하는 입구($y=0$)에서 유입된 공기는 기관을 통과하여 출구 및 제어기 내부쪽으로 개방되어 있는 좌측 상부로 빠져 나감을 알 수 있으며 기관 장착을 위한 슬롯 형상에 의해 입구 경계 부근에서 재순환 영역이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 열교환기가 작동하는 경우 [Fig. 4(a)] 제어기 벽면 쪽인 기관의 우측면

($x=0$)부근에서 냉각공기의 흐름이 미약한 재순환 영역이 형성되는 반면 열교환기의 미작동시[Fig. 4(b)]에는 이 영역이 존재하지 않음을 볼 수 있다. 재순환 영역에서는 주유동과의 혼합이 단절되기 때문에 강제 대류 냉각에서 아주 비효율적인 영역이 되며 특히 Lee⁽³⁾의 연구 결과에 의하면 핫스팟(hot-spot)이라고 불리는 고온 영역이 재순환 영역에서 발생한다고 알려져 있다. Fig. 5에서는 Fig. 4과 동일한 단면에서의 온도 분포 해석 결과를 보이고 있다. 여기서 각 등온선의 간격은 0.3°C이다. 온도분포 해석시 입구(Fig. 2의 $y=0$ 면)에서의 경계조건으로 제어기 내부에서 실측된 값을 지정하였으며 외기온도는 수치해석 및 실측에서 모두 45°C로 유지하였다. 예상된 바와 같이 공기 온도의 최고점이 재순환 영역과 일치함[Fig. 5(a)]을 확인할 수 있으며 그 온도 상승치는 입구 온도에 비하여 약 7°C 정도이다. 반면 열교환기가 작동하지 않는 경우에는 최대 온도 상승값이 약 4°C 정도인 것으로 나타났다. 또한 Fig. 5(a)에서 재순환 영역의 영향에 의한 고온 영역이 벽면에 인접한 전자 소자가 위치하는 지점까지 형성되어 있음을 확인할 수 있는 데 이는 대류 열전달에 의한 소자 냉각에 있어 바람직하지 못한 현상이다. Table 1에서는 열교환기 작동 유무에 따른 CPU소자 표면의 온도상승값에 대한 수치해석 및 실측 결과를 보여주고 있는 데 열교환기가 작동하는 경우 CPU의 온도가 작동하지 않는 경우에 비해 오히려 상승한다는 사실을 알 수 있다. 이는 열교환기 작동시 야기되는 공기 유동의 재순환 영역의 영향에 의한 것으로 생각되며 실험 및 수치 해석 결과가 2% 이내로 일치한다는 점으로부터 수치해석의 타당성을 검증하였다. 반면 제어기 내부의 평균공기 온도를 실측하여 본 결과 열교환기의 작동에 의해 내부 공기온도는 약 2°C 정도 낮아짐을 확인하였다. 이로부터 열교환기는 제어기 내부 전체의 냉각에는 효과가 있으나 시스템의 신뢰성에 결정적 역할을 하는 CPU의 냉각 효율은 감소시킨다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

이번 연구에서는 로봇 제어기 최적 냉각 시스템구축의 기본 연구로서 냉각 시스템 중의 한 요소인 열교환기의 작동 유무에 따른 제어기 내부 유동장 및 냉각특성 변화를 조사하였다.

현재와 같이 rack 하단부로 냉각된 공기를 토출하는 형태의 열교환기는 냉각시스템 전체의 열방출능력 향상에는 기여를 하지만 기관 위를 통과하는 유동장에 재순환 영역을 형성시켜 CPU 온도의 상승을 초래하였다. 따라서 열교환기의 효율성을 극대화 시킬 수 있는 연구가 현재 진행중에 있으며 이외에도 냉각시스템의 구성요소인 내부 팬이나 히트싱크와의 상호 연관성을 고려한 최적 냉각시스템 구축을 위한 연구가 요구된다.

참고문헌

- (1) 노홍구, 임경빈, 박만홍, 2000, "히트 스프레더가 탑재된 노트북 PC의 냉각특성 연구", 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 B, pp 77-82.
- (2) H. Wong and T. Lee, 1996, "Thermal Evaluation of a PowerPC 620 Microprocessor in a Multiprocessor Computer", *IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. Vol 19, No.4* pp. 469 - 477.
- (3) T. Lee, 1994, "Application of a CFD Tool for System-Level Thermal Simulation", *IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. Vol. 17, No. 4* pp. 64 - 572.
- (4) D. S. Steinberg, 1991, *Cooling Techniques for Electronic Equipment*, Wiley, New York.