

## 통신장비용 앰플리파이어 액체냉각장치 및 냉각유체 분배기의 최적설계 및 성능특성

윤 린, 김 용 찬<sup>†</sup>, 김 현 종\*, 최 종 민\*\*, 천 덕 우\*\*\*  
고려대학교 기계공학과, <sup>†</sup>LG전자 DA연구소, \*\*한밭대학교 기계공학과, \*\*\*일신THE

### Optimum Design of Liquid Cooling Heat Exchangers and Cooling-Fluid Distributors for a Amplifier Cabinet of Telecommunication Equipment

Rin Yun, Yongchan Kim<sup>†</sup>, Hyunjong Kim\*, Jongmin Choi\*\*, Deokwoo Cheon\*\*\*

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*\*Digital Appliance Research Lab., LG Electronics, Seoul 152-050, Korea*

*\*\*Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

*\*\*\*Research Institute, ILSHIN Temperature Humidity Engineering, Seoul 151-014, Korea*

*(Received July 19, 2005; revision received November 16, 2005)*

**ABSTRACT:** Three liquid cooling heat exchangers for cooling of telecommunication equipment were designed and their cooling performances were tested. The liquid cooling heat exchangers had twelve rectangular channels (5×3 mm) with different flow paths of 1, 4, and 12. Silicon rubber heaters were used to provide heat flux to the test section. Heat input was varied from 75 to 400 W, while flow rate and inlet temperature of working fluid were altered from 1.2 to 4.0 liter/min and from 15 to 30°C, respectively. The 4-path heat exchanger showed lower and more uniform average inner temperatures between heaters and the surface of heat exchanger than those of the others. To obtain optimal distribution of working fluid to each channels of liquid cooling heat exchangers, 2-3-2 and 4-3 type tube distributors were designed, and their distribution performances of working fluid were numerically and experimentally investigated. The distributor of the 2-3-2 type showed superior distribution performance compared with those of the 4-3 type distributor.

**Key words:** Liquid cooling heat exchanger(액냉형 열교환기), Rack mount(랙 마운트), Internal channel(내부 채널), Flow path(유동 통로), Distributor(분배기)

#### 1. 서 론

무인통신기지국에 설치되는 통신장비는 고열유속의 발열칩을 다수 포함하고 있으므로 통신기기

의 사용량의 증가에 따라 PCB 보드의 표면온도는 급격히 상승한다. 이때, 한계점 이상으로 온도가 상승하면, 기기의 성능이 저하되며, 접속불량 등의 고장을 유발하게 되므로 적절한 냉각을 통하여 최저온도로 유지하여 주어야 한다. 그러나 현재의 일체형 냉방기를 적용한 공냉형 냉각방식으로는 60~70°C 까지 이르는 통신장비 내부의 극부적인 온도상승을 제대로 해결하지 못하고 있고,

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-921-5946; fax: +82-2-921-5946

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

이미 공냉형 방식에서 팬과 냉각핀의 성능개선은 한계점에 다다르고 있다. 따라서 통신장비를 효과적으로 냉각시킬 수 있는 대체기술의 개발이 시급한 실정이다. 이에 대한 가장 현실적이고 실용화가 빠른 대안은 개별적으로 액체냉각을 실시함으로써 장비 내부의 온도를 최적 상태로 유지할 수 있는 냉각기술을 개발하는 것이다.

전자장비 냉각에 있어 액체냉각방식은 현재 많은 연구자들에 의해 연구되고 있으나 수  $\mu\text{m}$ 에서 수백  $\mu\text{m}$ 의 마이크로채널을 이용한 단일칩용 냉각방식이 주를 이루고 있고, 본 연구와 같이 수 mm의 다채널에서의 액체냉각방식에 대한 연구는 전무한 실정이다. Incropera<sup>(1)</sup>는 전자장비의 냉각을 위해 자연대류를 이용한 방식, 채널유동을 이용한 방식, 그리고 제트층들을 통한 냉각 등 다양한 액체냉각 방법을 소개하고 이와 관련된 최근의 연구동향을 설명하였다. Lee et al.<sup>(2)</sup>은 채널의 개수에 따라 채널폭을 각각 170  $\mu\text{m}$ 에서 1,000  $\mu\text{m}$ 까지 변화시킨 사각 다채널 열교환기를 제작하고 적층형 다칩모듈에 적용하여 액체냉각방식이 열저항(thermal resistance)을 크게 낮출 수 있음을 보였다. Incropera et al.<sup>(3)</sup>은 전자장비 기판을 모사하여 4열로 배열된 12개의 열원 위로 사각채널을 만들고 물 혹은 FC-72(fluorocarbon liquid)를 흘려서 분산열원에서의 열전달특성을 실험 및 수치해석을 통해 고찰하였다. Jang and Kim<sup>(4)</sup>은 통신장비의 냉각을 목적으로 내경 2, 3, 그리고 4 mm의 원형 다채널 튜브에서 단상상태의 열전달특성 및 다채널 헤더의 형상변화에 따른 열전달계수의 변화를 고찰하였다. 특히, 유체의 유량이 증가할수록 입구 헤더의 영향이 크게 증가하였다. Sturgis and Mudawar<sup>(5)</sup>는 곡선의 사각 미니채널에서의 열전달 성능 향상에 대한 연구로 곡관에서의 2차유동이 열전달 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

본 연구는 현재 통신장비의 냉각에 적용되는 기존의 공냉형 냉각기를 대신하여 냉각성능이 우

수한 액냉형 냉각기를 최적설계하고, 이의 성능을 고찰하는 것을 목적으로 한다. 또한 멀티팩 방식 통신장비의 특성상 다수의 앰플리파이어로 냉각액을 고루 분배시켜야 하므로 각 단일 냉각기로의 유량분배를 고르게 하기 위한 최적 분배기 설계에 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 액냉형 냉각기 실험

Fig. 1은 액냉형 열교환기의 실험장치를 나타낸다. 실험장치는 발열부와 액냉형 냉각기, 터빈유량계, 펌프, 그리고 항온조로 구성하였다. 액냉형 냉각기는 냉각기 내 유체의 분배형태에 따라 3가지 모델을 선정하였고 자세한 형상에 대해서는 다음 절에 설명하였다. 발열부로서  $1.0 \text{ W/cm}^2$ 의 용량을 가진 실리콘 러버히터를 냉각기 표면에 부착하였으며, 냉각유체는 10% 에틸렌 글리콜을 사용하였다. 주요 측정인자는 히터용량, 히터의 표면온도, 히터면과 열교환기 사이의 내부면

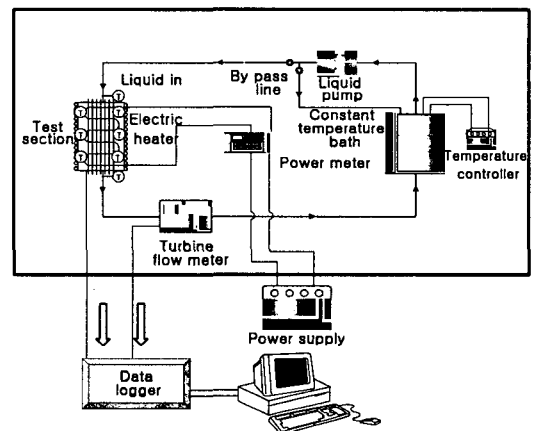


Fig. 1 Schematic of the test setup for liquid cooling heat exchanger tests.

Table 1 Specifications of test instruments

Items	Measuring scale	Accuracy
Thermocouple	- 270 ~ 400 °C	±0.1 °C
Heat input	0 ~ 600 V, 0 ~ 20 A	±0.1% of full scale
Turbine flow meter	200 to 1,200 liter/h	±0.5% of RD
Rotor meter	0 ~ 1,200 liter/h	±5% of full scale

온도, 냉각유체의 유량 및 입·출구 온도이다. 히터용량은 파워미터로 측정하였고, 모든 온도는 T형 열전대를 사용하였다. 냉각유체의 입출구 온도측정을 위해서는 삽입형 열전대를 이용하였으며, 냉각유체의 유량은 터빈유량계를 사용하였다.

Table 1은 본 시험에 사용한 계측장비의 측정범위 및 측정오차를 나타낸다. 시험 중 외기조건은 표준조건 25℃에 고정시켰고, 히터의 입력열량은 75~450 W, 냉각유체의 유량은 1.2~4.0 liter/min, 그리고 흡입유체의 온도는 15~30℃로 조건을 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 액냉형 냉각기의 성능평가 인자로는 히터의 내/외부 온도, 균일성 판단을 위한 온도분포 등을 사용하였다.

2.2 멀티랙용 분배기 해석 및 실험

CFD 프로그램을 이용하여 멀티랙 분배기의 분배특성을 해석하였다. CFD 프로그램으로는 상용 프로그램인 Fluent v5.3을 이용하였다. 기본적으로 비압축성 유동이며 난류모델은 Standard *k-ε* 모델을 사용하였고, 공간의 이산화 방법으로는 에너지에 대하여 2차 상류차분법(upwind scheme)을 사용하였고, 압력과 속도의 연결(coupling)에는 정상상태를 고려한 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 해석에 사용된 경계조건으로 열교환기 입구는 속도입구(velocity inlet) 조건이고 열교환기 출구는 압력출구(pressure outlet) 조건이며 외벽

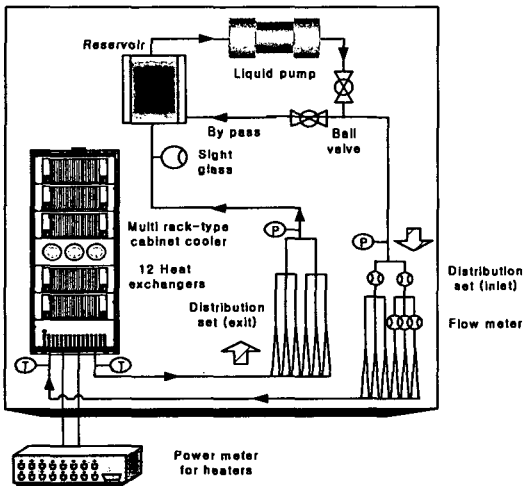


Fig. 2 Schematic of the test setup for flow distribution tests.

은 단열(adiabatic wall) 조건으로 격자수는 32만 개를 사용하였다.

이를 통해 선정된 멀티랙용 분배기의 분배특성을 살펴보기 위해서 Fig.2와 같은 분배 실험장치를 구성하였다. 6층으로 구성된 높이 2.0m의 캐비닛에 각 층마다 2개씩 총 12개의 액냉형 냉각기를 분배기와 연결하고 각 분배기에 로터유량계를 설치하여 각 냉각기로의 분배특성을 살펴보았다. 실제 멀티랙 통신시스템의 모사를 위해서 각 냉각기에는 히터를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액냉형 냉각기의 설계

3.1.1 통신장비 내부의 발열량 측정

액냉형 냉각기의 크기 및 용량을 결정하기 위하여 실제와 동일한 공냉형 냉각장비 케이스를 이용하여 통신장비 내부의 발열량을 측정하였다. 입구 공기조건은 항온실의 온도조건으로 조절하였고, 발열부는 실리콘 러버히터를 이용하였다. 발열부의 입력열량의 변화에 따른 공기의 입·출구 온도의 측정결과 370 W 부근에서 실제 통신장비 기지국에서 측정된 값과 일치하였다.

3.1.2 액냉형 열교환기의 3가지 설계

Table 2는 본 실험에 사용한 액냉형 냉각기의 사양을 나타낸다. 액냉형 냉각기의 크기는 공냉형 냉각기의 크기와 동일한 300×215 mm<sup>2</sup>에 맞추어 결정하였고, 열교환기 내부는 실제 통신장비 내부 발열체의 위치와 채널가공성을 고려하여 유량 분배 헤더를 포함한 12개의 채널로 구성하였다. 각 채널은 서로의 연결상태에 따라 Fig.3과 같이 세

Table 2 Specifications of liquid cooling heat exchangers

Items	Specifications	
Material	Aluminium 5052	
Full size	Length×width×height	300×215×16
Flow channels	Width×height	5×3
Header	Length×width×height	10×185×10
Path(s)	Model 1	12 path
	Model 2	4 path
	Model 3	1 path

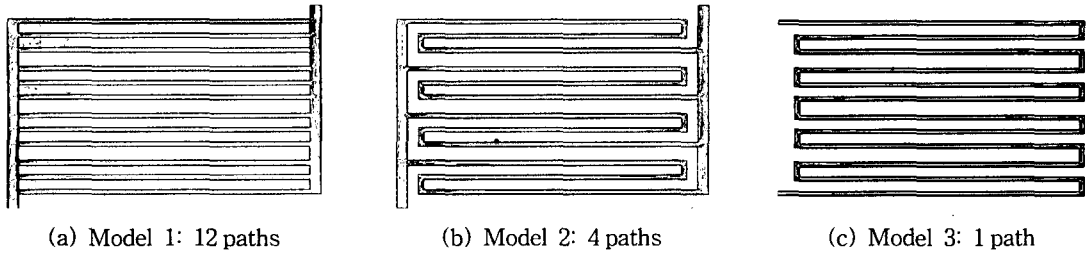


Fig. 3 Liquid cooling heat exchangers.

가지 유동방식으로 구분되며 채널면적은  $5 \times 3 \text{ mm}^2$ 으로 중횡비(aspect ratio)가 0.6이 되게 하였다.

3.1.3 액냉형 냉각기 최적형상 결정

Fig. 4는 Fig. 3에 나타낸 3가지 모델의 액냉형 냉각기에 대해서 입구압력을 동일하게 했을 때 (동일한 펌프동력) 히터용량의 변화에 따른 히터 내부면의 평균 온도변화를 나타낸다. 히터 내부면 온도는 액냉형 냉각기의 길이방향으로 4개, 폭방향으로 3개씩, 총 12개의 열전대를 각각 동일한 간격으로 설치하여 측정하였다. 액냉형 냉각기 모델 2와 3은 모델 1에 비해 우수한 열제거 능력을 나타내고 있다. 이는 시험 유량영역에서 모델 2와 3은 관내 유체의 유동이 난류영역에 도달하였으나 모델 1의 경우에는 내부분배 특성상 고른 유동분배가 이루어지지 않았을 뿐 아니라, 12개 유로로 유입되는 유속이 아직 층류영역에 머물러 있어 낮은 열제거 능력을 나타내었다.

액냉형 냉각기의 형상결정에 있어 중요하게 고려해야 할 또 한 가지 사항은 발열면 내부에서의

균일한 냉각성능에 관한 것이다. Fig. 5는 내부 표면의 평균 온도차를 나타낸다. 평균 온도차는 액냉형 냉각기의 길이방향으로 측정된 4점의 온도를 평균하여 다른 폭방향으로 평균값들과 비교하여 계산하였다. 단일패스방식의 모델 3은 우수한 열제거 성능에도 불구하고, 유체온도 상승으로 인해 흡입부에서 토출부로 갈수록 내부온도차가 심화된다. 또한, 모델 1은 과도한 내부유로의 개수로 인해 12개 유로에 유량이 균등하게 분포되지 못하고 있다. 반면에, 모델 2는 4개의 유로에 적절히 유량이 분배되어 모델 1과 3의 결점을 보완하며 시스템 구성상 한계유량을 고려하여도 모델 2의 우수성을 확인할 수 있다. 따라서 열제거 능력과 내부온도의 균일성을 고려하여 모델 2를 액냉형 냉각기의 최적모델로 선정하였다.

3.1.4 모델 2와 공냉형 냉각장비의 비교

앞선 실험결과를 바탕으로 모델 2를 이용한 액냉형 냉각방식과 기존의 공냉형 냉각방식의 냉각성능을 Fig. 6에서 비교하였다. 액냉형의 실험조건

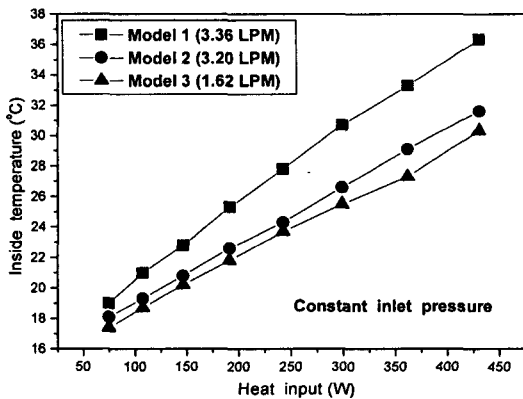


Fig. 4 Variations of heater inside temperatures with heat input.

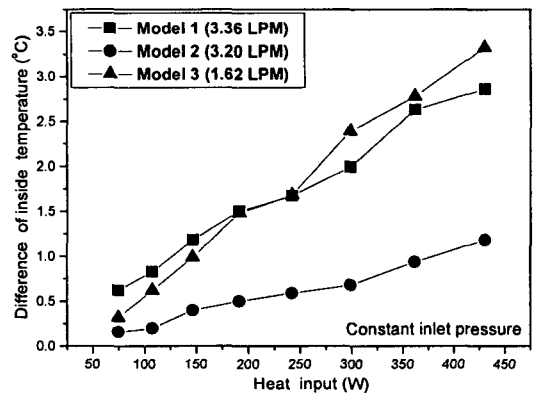


Fig. 5 Difference of inside temperatures of the heater with heat input.

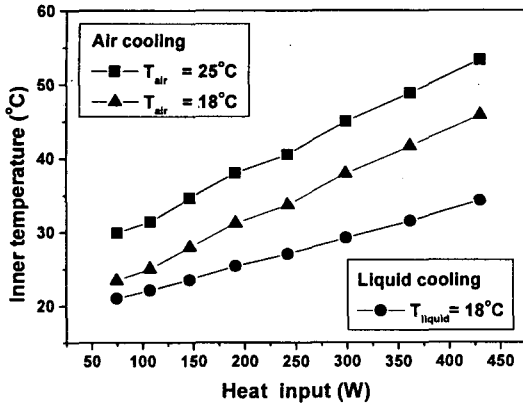


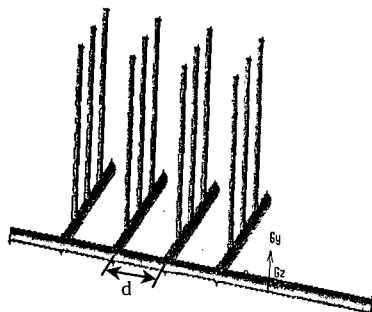
Fig. 6 Comparison of inside temperature in air cooling with that in liquid cooling.

은 유량 3.2 LPM, 유체온도 18°C였으며, 공냉형의 실험조건은 기지국의 외기조건으로 25°C인 상태와 액냉형의 유체온도조건과 동일한 외기온도 18°C의 두 가지 경우이다. 액냉형 냉각기의 히터면 내 부온도는 입구공기온도가 25°C인 공냉형 냉각기에 비해 평균 14°C 낮은 값을 보였고, 입구공기온도가 18°C인 경우보다도 7°C 낮은 우수한 성능을 나타냈다. 또한 액냉형 냉각장치는 기존 공냉형 냉각장치의 부피를 83%, 무게를 64% 감소시키는 효과를 나타냈다.

3.2 멀티랙용 액냉형 냉각기의 분배기 설계

3.2.1 액냉형 열교환기 분배기의 해석적 설계

본 연구에서는 총 12개의 분지관을 설정하였고, 분배기 입구 관경은 15mm로, 최종 분지관은 열교환기의 헤더 크기인 9mm로 고정하였다. 그



(a) 4-3 type distributor

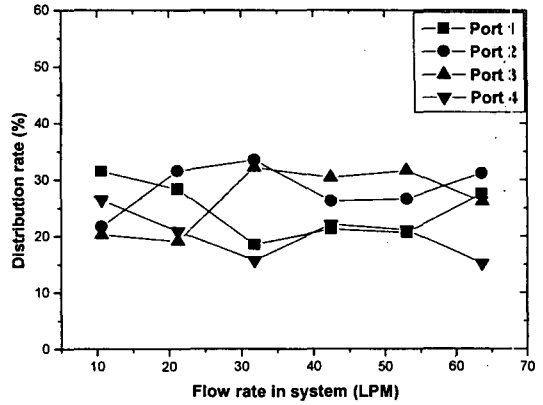


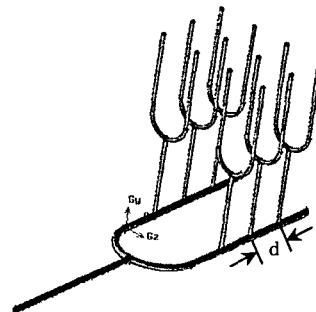
Fig. 8 Flow distribution rate of the 4-3 type (one-side inlet type,  $d=200$  mm).

리고 분지관 사이의 간격은 50, 100, 그리고 200 mm로 변화시켜 해석을 수행하였다.

Fig. 7의 (a)는 4-3 분배방식의 멀티랙용 유량 분배기를 나타낸다. 작동유체는 하나의 모관에서 4개의 중간관으로 분배되고, 다시 이들은 각각 3개의 분지관을 통해 총 12개의 열교환기로 연결된다. 전산해석은 모관에서 4개의 중간관으로 분배되는 부분을 실시하였다. Fig. 7의 (b)는 2-3-2 분배방식의 멀티랙용 유량분배기를 나타낸다. 전산해석은 중간관에서 3개로 분지되는 부분에 대하여 실시하였다.

3.2.2 CFD 모델링 및 실험결과

Fig. 8은 4-3 분배방식의 단방향 흡입에 대하여 해석적 연구를 통하여 구한 각 분지 포트의 분배도를 나타낸다. 분지관 사이의 거리가 200mm일 때 최적의 분배성능을 나타냈다. 저유량 범위에



(b) 2-3-2 type distributor

Fig. 7 Distributor models for CFD simulation.

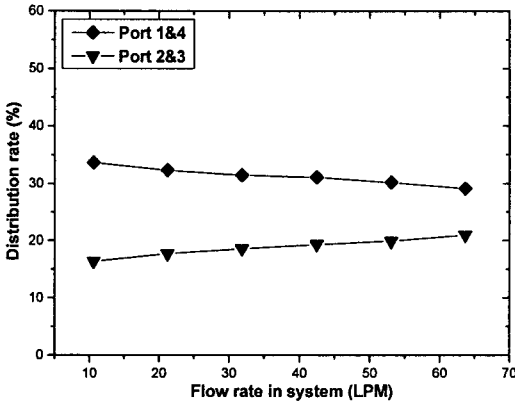


Fig. 9 Flow distribution rate of the 4-3 type (both-side inlet type,  $d=50$  mm).

서는 입구와 가까운 포트 1로 대부분 작동유체가 흐르고, 포트 4로는 매우 적게 흐르는 반면, 고유량 범위로 갈수록 점차 끝부분에 위치한 포트 4로 작동유체가 몰려 흐르는 경향이 있다. 중간포트 2와 3은 이러한 경향성에 맞게 포트 1과 4의 사이 범위에서 분배도가 형성된다. 목표가 되는 유량범위에서 분배도가 좋지 않고, 분배도의 출력거리의 폭이 커서 시스템의 신뢰성 구축에 문제가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 양방향 흡입식 4-3 분배방식에 대한 각 분지 포트에서 분배도의 해석결과를 나타낸다. 단방향과 비교할 때 유량증가에 따라 출력거리가 없이 안정된 증가폭을 이루지만, 포트 1과 4로 분배된 유량과 포트 2와 3으로 분배된 유량 사이에

일정한 간격이 지속적으로 존재하게 된다.

Fig. 10은 2-3-2 분배방식에 대한 각 분지 포트에서 분배도의 해석결과를 나타낸다. 최적의 분배 성능은 분지관 사이의 거리가 100 mm일 때 나타났다. 분배기의 형상 특성으로 분지 포트는 3개이다. 따라서 단방향 흡입방식만을 취하였다. 포트 1은 저유량에서는 분배율이 크다가 높은 유량범위로 가면서 감소하는 경향을 가지고, 포트 3은 저유량에서는 분배율이 상대적으로 작다가 높은 유량에서 분배율이 커지는 경향성을 띤다. 목표 유량범위에서는 각 분지관의 유량 분배가 2.3~6.1%의 차이를 나타내면서 비교적 우수한 유량 분배율을 나타냈다. 또한, 각각의 분지관은 Y자 분지관을 통해 거의 균일하게 분지시킬 수 있다는 점에서 지속적인 분배 효과를 고려해 볼 수 있다.

Fig. 11은 해석을 통해 우수한 분배성능을 나타낸 2-3-2 분배방식을 최종 모델로 선정하고, 이의 분배성능을 실험을 통하여 측정된 결과를 나타낸다. 실제 멀티랙용 캐비닛 시스템에 연결되어 전산해석에서 설정한 조건보다 출구압력조건이 더 크다. 또한, 기타 관경 및 간격 등의 미세한 차이 등으로 인해 Fig. 10과 비교해서 분지포트 1의 유량이 더 크고, 수렴되는 유량범위가 다소 고유량 방향으로 후퇴한 점이 차이가 있다. 그러나 시뮬레이션 및 실험결과는 시스템의 목표 유량범위인 36~40 LPM에서 2~3%의 분배율 오차가 있었지만, 예측값보다 실험값의 분배도의 편차가 작게 나타났다.

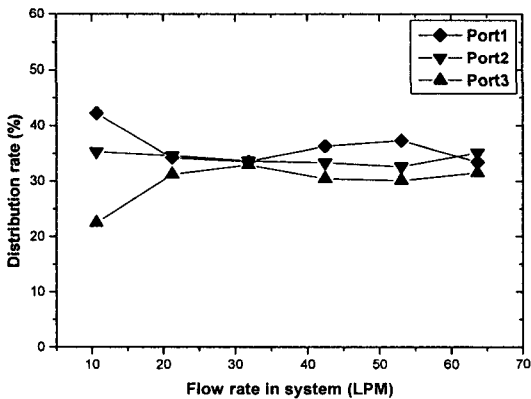


Fig. 10 Flow distribution rate with the 2-3-2 type ( $d=100$  mm).

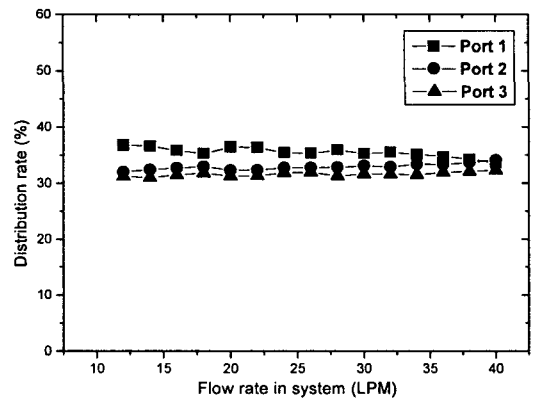


Fig. 11 Measured flow distribution rate of the 2-3-2 type ( $d=100$  mm).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3가지 모델의 통신장비용 액냉형 냉각기를 설계 및 제작하고, 이들의 냉각성능을 측정하였으며, 총 12개의 액냉형 냉각기로 구성된 멀티랙 액체냉각장치에 대하여 분배성능을 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 액냉형 냉각기의 경우 4개의 분배유로를 가진 모델 2의 경우가 히터 내부면의 평균 온도가 다른 모델에 비해 가장 낮았고, 발열면 전체에 걸쳐 가장 균일한 냉각성능을 나타냈다.

(2) 액냉형 냉각기의 작동유체의 유량을 3.2 lpm, 온도를 18℃로 설정하였을 때, 기존 공냉형 냉각기에 비해 발열부 내부의 평균 온도를 14℃ 더 낮출 수 있었다. 이는 통신장비 부품의 고발열로 인해 불가능했던 장비의 고밀도화를 가능하게 할 것이다.

(3) 총 12개의 개별 액냉형 냉각기로 구성된 멀티랙 냉각장치에서 2-3-2 형식의 분배기가 해석 및 실험에서 가장 우수한 작동유체 분배성능을 나타냈다.

#### 후 기

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었으며(KRF-2004-042-D00023), 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Incropera, F. P., 1995, Liquid cooling of electronic devices by single-phase convection, Jone Willy & Sons, Inc.
2. 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, Vol. 114, pp. 204-211.
3. Incropera, F. P., Kerby, J. S., Moffatt, D. F. and Ramadhyani, S., 1986, Convection heat transfer from discrete heat sources in a rectangular channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 7, pp. 1051-1058.
4. Jang, Y. H. and Kim, Y., 2004, Study on thermal and hydraulic characteristics of liquid cooling device for electronic equipments under high heat fluxes, Proceedings of Summer Conference of Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers in Korea, pp. 122-127.
5. Sturgis, J. C. and Mudawar, I., 1999, Single-phase heat transfer enhancement in a curved, rectangular channel subjected to concave heating, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1255-1272.