

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.4.255

고발열 CPU 냉각용 증기 압축식 냉각 시스템의 증발기 최적화

김선창[†] · 전동순* · 김영률*

(2007년 9월 15일 접수, 2008년 1월 17일 심사완료)

Optimization of Evaporator for a Vapor Compression Cooling System for High Heat Flux CPU

Seon-Chang Kim, Dong-Soon Jeon and Young-Lyoul Kim

Key Words : Evaporator(증발기), Thermal Resistance(열저항), CPU Cooling(CPU 냉각), Fractional Factorial DOE(부분요인 실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

Abstract

This paper presents the optimization process of evaporator for a vapor compression cooling system for high heat flux CPU. The CPU thermal capacity was given by 300W. Evaporating temperature and mass flow rate were 18°C and 0.00182kg/s respectively. R134a was used as a working fluid. Channel width(CW) and height(CH) were selected as design factors. And thermal resistance, surface temperature of CPU, degree of superheat, and pressure drop were taken as objective responses. Fractional factorial DOE was used in screening phase and RSM(Response Surface Method) was used in optimization phase. As a result, CW of 2.5mm, CH of 2.5mm, and CL of 484mm were taken as an optimum geometry. Surface temperature of CPU and thermal resistance were 33°C and 0.0502°C/W respectively. Thermal resistance of evaporator designed in this study was significantly lower than that of other cooling systems such as water cooling system and thermosyphon system. It was found that the evaporator considered in this work can be a excellent candidate for a high heat flux CPU cooling system.

———— 기호설명 ————

<p>A : 면적 [mm²] CH : 채널 높이 [mm] CL : 채널 길이 [mm] CW : 채널 폭 [mm] D_h : 수력직경 [mm] dT_h : 과열도 [°C] dP : 냉매 압력강하량 [kPa] F : 매개변수 [-]</p>	<p>f : 마찰계수 [-] G : 질량유속 [kg/m² · s] h : 대류열전달계수 [W/m² · °C] k : 열전도계수 [W/m · °C] L : 길이 [mm] \dot{m} : 질량유량 [kg/s] P : 압력 [kPa] Q : 발열량 [W] Q' : 냉각용량 [W] R : 열저항 [°C/W] Re : 레이놀즈수 [-] T : 온도 [°C] t_1 : 증발기 채널 벽두께 [mm] U : 총괄 열전달 계수 [W/m² · °C]</p>
---	--

[†] 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀
 E-mail : kimsc@kitech.re.kr
 TEL : (041)589-8353 FAX : (041)589-8330
 * 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

- v : 비체적 [m^3/kg]
 x : 건도 [-]

그리스문자

- η : 효율 [-]
 μ : 점도 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]

하첨자

- a : 면적 (area)
 ch : 채널 (channel)
CPU : CPU (computer processor unit)
 eva : 증발기 (evaporator)
 f : 액체 (fluid)
 fg : 기체와 액체간의 상태량 차이 (-)
 h : 균질 유동 모델에서의 평균치 (-)
 in : 증발기 입구 (inlet)
 out : 증발기 출구 (outlet)
 r : 냉매 (refrigerant)
 sat : 포화상태 (saturated state)
 TP : 이상유동 (two-phase flow)

1. 서 론

최근 반도체 산업의 눈부신 발전과 더불어 컴퓨터의 핵심인 CPU 또한 고집적 및 고성능화 되어 가고 있다. 그러나 이에 따라 CPU의 소비 전력 및 발열량 또한 증가하고 있는 추세이다. CPU 발열량의 증가는 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 수명 또한 감소시킬 수 있기 때문에, 최근에 들어 CPU의 냉각에 관한 관심이 날로 높아지고 있는 실정이다.

현재 Desktop PC용 CPU 냉각에는 방열판 (heat sink) 및 팬(fan)을 이용한 공랭식 냉각 시스템(air cooling system)이 주로 사용되고 있다. 그러나 현재 보급되고 있는 Desktop PC용 CPU의 최대 발열량은 약 130W 정도로 공랭식 냉각 시스템으로는 한계에 도달해 있다. 이에 대한 대안으로 수년전부터 공랭식 냉각 시스템에 비하여 냉각 성능이 우수한 열사이폰형 냉각 시스템(thermosiphon type cooling system)^(1,2)과 수냉식 냉각 시스템(water cooling system)^(3,4)에 대한 많은 연구가 수행된바 있으며, 이미 일부는 상용화

되어 특정 사용자 계층을 대상으로 보급되고 있는 추세이다.

그러나 지속적인 CPU의 고집적화 경향으로 미루어 볼 때, 향후 수년 이내에 CPU의 발열량은 약 300W까지 도달할 것으로 예상되며, 이와 같이 CPU의 발열량이 약 150W 이상인 경우에는 수냉식 냉각 시스템도 적절한 대안이 되지 못할 것으로 예상된다.

최근에는 고발열 Desktop PC용 CPU의 냉각 방안으로 기존의 냉동 사이클을 이용한 증기 압축식 냉각 시스템에 대한 연구^(5,6)가 증가하고 있는 추세이며, 서버급 컴퓨터용 CPU 냉각을 위한 증기 압축식 냉각 시스템의 적용 사례^(7,8)도 보고된 바 있다. Fig. 1은 서버급 컴퓨터 및 Desktop PC용 CPU의 냉각용으로 증기 압축식 냉각 시스템을 적용한 사례이다. 증기 압축식 냉각 시스템은 CPU의 온도를 실내 공기 온도보다 낮게 유지할 수 있다는 장점이 있으며, Pecht⁽⁹⁾는 CPU의 온도가 10°C 낮아질 때마다 고장률이 2배로 감소하며, 성능은 1~3% 향상된다고 발표한 바 있다.

본 연구에서는 고발열 Desktop PC용 CPU 냉각을 위한 증기 압축식 냉각시스템 개발을 위하여 냉각능력 300W급 증발기에 대한 최적화 연구를 수행 하였으며, 이에 따른 시료용 증발기를 제작하고 최적 설계값에 대한 검증 실험을 수행 하였다.

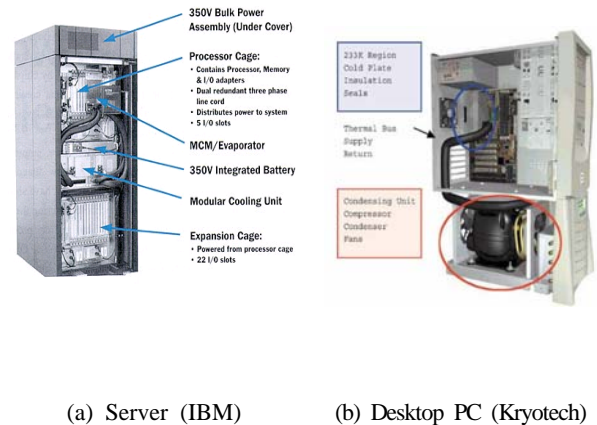


Fig. 1 Applications of vapor compression cooling system for CPU Cooling

2. 증발기 설계 최적화

2.1 증발기 설계 조건

증발기의 최적 설계를 위해서는 증기 압축식 냉각 시스템의 최적 운전 사이클에서의 증발기 작동 조건에 대한 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서는 김영률 등⁽¹⁰⁾의 사이클 해석 결과를 참조하여 증발기의 작동 조건을 선정하였으며, 최적 운전 사이클에서의 증발기 작동 조건을 Table 1에 나타내었다.

2.2 증발기 형상 및 설계인자

본 연구에서 검토한 증발기의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 증발기의 외부 치수는 현재 사용되고 있는 Desktop PC용 CPU의 치수를 고려하여 가로 50mm, 세로 50mm로 선정하였으며 높이는 4mm로 하였다. 증발기의 재질은 알루미늄이며, 내부에는 단면이 직사각형인 채널을 통하여 냉매가 흐를 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 Section A에 대한 상세 단면도이다. 증발기 설계인자는 Fig. 3에서와 같이 채널폭(CW), 채널높이(CH), CPU와 접촉되는 바닥두께(t1) 및 채널사이의 벽두께(t2)로 선정 하였다.

한편, CPU의 발열량(300W)을 증발기 바닥면을 통하여 흡수하기 위해서는 임의의 전열면적이 요구된다. 설계인자인 채널폭이 변경되면 일정 전열면적을 만족시켜 주기 위하여 채널의 길이(CL) 또한 동시에 변하게 된다. 즉, 채널폭이 좁아지면 채널길이는 길어지게 되며, 채널폭이 넓어지면 채

널길이는 짧아져야 한다. 그러나 증발기 내부에 가공될 채널길이는 증발기의 외부 치수(가로 50mm×세로 50mm)에 의해 제한을 받게 되므로 적절한 범위 내에서 채널폭과 채널길이가 선정되어야 한다. 따라서 본 연구의 설계 과정에서는 채널 길이를 반응값(설계 결과값)으로 선정하였다. 또한 채널 단면적(CW×CH)과 채널길이에 영향을 받게 되는 냉매 압력강하량(ΔP) 역시 반응값으로 선정하였으며, 증발기 설계를 위하여 Fig. 4와 같은 증발기 설계 프로그램을 구축하였다.

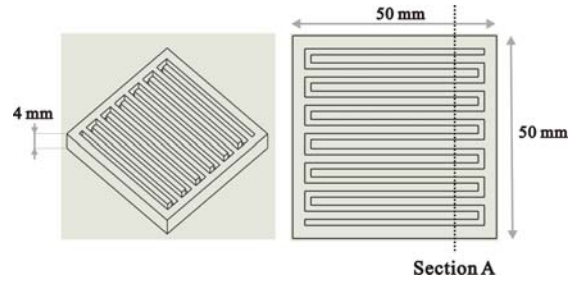


Fig. 2 Drafts of evaporator

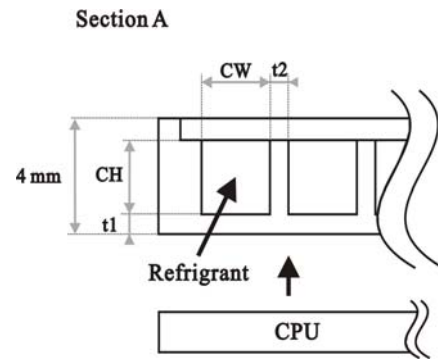


Fig. 3 Detailed cross section and design factors

Table 1 Operating conditions of evaporator at optimum operating cycle

Refrigerant Type	R134a
Evaporating temperature, T_{CPU} [°C]	18.0
Quality, x [-]	0.26
Degree of superheat, dT_h [°C]	7.5
Evaporating pressure, P_{eva} [kPa]	537.5
Refrigerant mass flowrate, \dot{m} [kg/s]	0.00182
Cooling capacity, Q' [W]	300.0

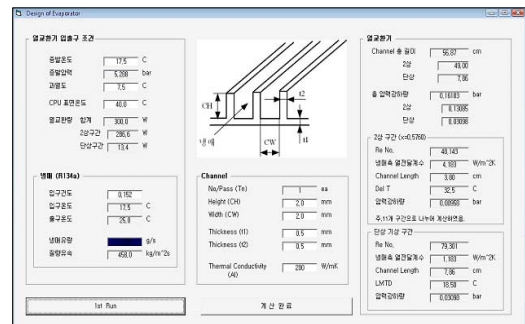


Fig. 4 Evaporator design program

본 연구에서 구축한 증발기 설계 프로그램은 주어진 증발기의 작동조건(Table 1 참조)과 입력된 각 설계인자(CW, CH, t1 및 t2)의 조건에서 채널길이와 냉매 압력강하량을 계산하여 준다. 채널길이 및 압력강하량 계산에 필요한 관계식⁽¹¹⁾들을 식 (1)~식 (5)에 나타내었다.

$$CL = \frac{A_{ch}}{2 \times (CW + CH)} \quad (1)$$

$$A_{ch} = \frac{Q_{CPU}}{U \cdot (T_{CPU} - T_{eva})} \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{\frac{T_{CPU}}{k} + \frac{1}{\eta_a \times h_r}} \quad (3)$$

$$h_r = 0.023 \left[\frac{G(1-x)D_h}{\mu_f} \right]^{0.8} \left[\frac{\mu_{cp}}{k} \right]_f^{0.4} \left(\frac{k_f}{D_h} \right) (F) \quad (4)$$

$$F = \left[\frac{Re_{TP}}{Re_f} \right]^{0.8} \quad (5)$$

$$dP = \frac{2f_h L G^2}{D_h} \left[v_f + \frac{x}{2} v_{fg} \right] + G^2 v_{fg} \quad (6)$$

Table 2 Design factors and levels

Factor	Low	High
CW, [mm]	1	3
CH, [mm]	1	3
t1, [mm]	1	2
t2, [mm]	1	2

Table 3 Experimental set of 1/2 fractional factorial DOE and responses

No.	CW [mm]	CH [mm]	t1 [mm]	t2 [mm]	CL [mm]	dP [kPa]
1	1.0	1.0	1.0	1.0	329.8	366.6
2	3.0	1.0	1.0	2.0	411.8	39.9
3	1.0	3.0	1.0	2.0	427.3	40.9
4	3.0	3.0	1.0	1.0	764.5	4.5
5	1.0	1.0	2.0	2.0	342.2	375.3
6	3.0	1.0	2.0	1.0	419.6	40.4
7	1.0	3.0	2.0	1.0	420.5	94.1
8	3.0	3.0	2.0	2.0	756.9	4.5
9	2.0	2.0	1.5	1.5	553.9	22.6

2.3 주요 설계인자 선정

앞서 언급한 4개의 설계인자 중 반응값에 가장 큰 영향을 미치는 주요 설계인자를 선정하기 위하여 스크리닝 실험계획법(screening DOE)을 사용하였다. 스크리닝 실험계획법은 인자(factor)의 수가 많은 경우, 반응값(response)에 대한 각 인자들의 주효과 분석을 통하여 각 반응값에 가장 큰 영향을 미치는 주요인자들을 선정하는 실험계획법으로 본 연구에서는 부분요인 실험계획법(fractional factorial DOE)을 사용하였다.

각 설계인자들의 수준을 Table 2에 나타내었으며, 반응값은 앞서 언급한 바와 같이 채널길이와 냉매 압력강하량으로 선정하였다.

인자의 수가 4개이고 각 인자들의 수준이 2수준 일 때, 완전요인 실험계획법(full factorial DOE)으로 실험을 수행할 경우에는 실험 횟수가 2⁴으로 총 16회가 된다.

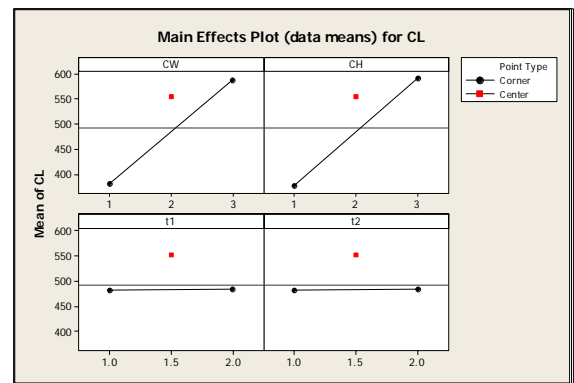


Fig. 5 Main effect plot for channel length, CL [mm]

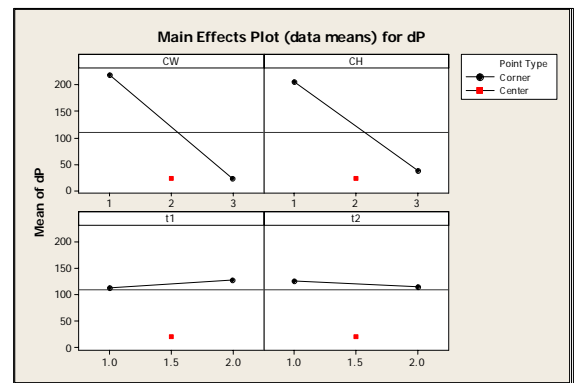


Fig. 6 Main effect plot for refrigerant side of pressure drop, dP [kPa]

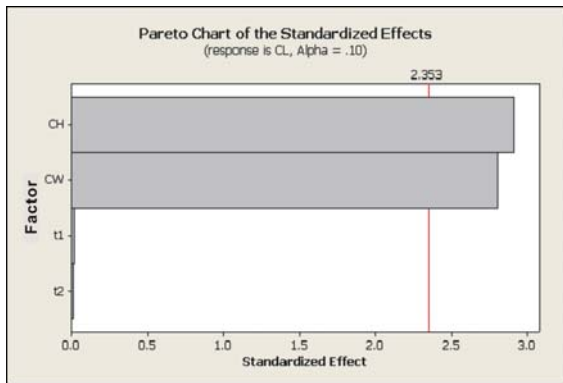


Fig. 7 Pareto chart for channel length, CL [mm]

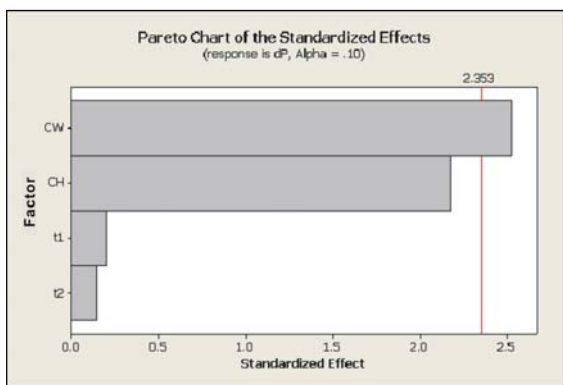


Fig. 8 Pareto chart for refrigerant side of pressure drop, dP [kPa]

그러나 본 연구에서는 1/2부분요인 실험계획법(1/2 fractional factorial DOE)을 통하여 각 인자들의 수준조합에 대한 8개의 실험조건과 한 개의 중심값 조건을 포함한 총 9개의 실험조건만을 생성하여 실험을 수행하였으며, 1/2부분요인 실험계획법에 의한 실험조건 및 각 실험조건에서의 실험결과로 얻은 반응값들을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 5는 앞서 언급한 4개의 설계인자가 채널길이에 미치는 효과를 나타내는 주효과도(main effect plot)이다. 그림에 의하면 채널폭 및 채널높이는 그 값이 증가함에 따라 채널길이가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 바닥두께 및 벽두께의 경우에는 채널길이에 거의 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 4개의 설계인자가 냉매 압력강하량에 미치는 효과를 나타내는 주효과도로 채널폭 및

채널높이가 증가함에 따라 냉매 압력강하량은 큰 폭으로 감소하는 경향을 보이고 있으나 바닥두께 및 벽두께는 냉매 압력강하량에 미치는 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

Fig. 7은 4개의 설계인자가 채널길이에 미치는 영향의 정도를 나타낸 파레토차트(pareto chart)이다. 파레토차트는 각 인자들이 반응값에 미치는 영향의 정도를 비교하고 유의수준(α)을 기준으로 반응값에 큰 영향을 미치는 주요인자가 무엇인지를 보여주는 그래프이다. 본 스크리닝 단계에서는 유의수준을 0.1로 선정 하였다. 그림에 의하면 채널폭과 채널높이가 반응값인 채널길이에 미치는 영향이 가장 크며 바닥두께와 벽두께는 상대적으로 그 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

Fig. 8은 4개의 설계인자가 냉매 압력강하량에 미치는 영향의 정도를 나타낸 파레토차트로서 Fig. 7의 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 4개의 설계인자 중에서 채널폭 및 채널높이를 주요 설계인자로 선정 하였다.

2.4 주요 설계인자의 최적화

본 연구에서는 스크리닝 단계에서 주요 설계인자로 선정된 채널폭과 채널높이에 대한 최적화를 위하여 반응표면법(RSM ; responsible surface method)을 이용한 실험계획 및 분석을 수행 하였다. 실험조건의 생성은 반응표면법의 중심합성계획법(central composite design)을 사용하였다. 중심합성 실험계획법에서는 인자의 수가 2개인 경우, 각 인자별 수준의 조합과 각 인자의 중심값에 대한 반복실험을 포함한 총 13회 실험조건을 생성하여 각 인자의 수준은 5수준으로 설정하여 준다.

Table 4에 중심합성계획법에 의해 생성된 실험조건 및 실험결과로부터 얻은 반응값들을 나타내었다. 반응값은 스크리닝 단계에서와 동일하게 채널길이 및 냉매 압력강하량으로 선정 하였다.

Fig. 9는 반응표면 분석결과를 종합적으로 보여주는 중첩등고선도(overlaid contour plot)이다. 중첩등고선도는 반응값의 수가 다수인 경우 각 반응값들의 규격을 동시에 만족시켜 주는 인자

들의 범위를 나타내주는 그림이다. 본 연구에서는 반응값인 채널길이나 냉매 압력강하량에 대한 규격을 각각 500~600mm와 0~30kPa로 선정하였다. 반응표면 분석결과 두 반응값에 대한 규격을 동시에 만족시켜주는 채널폭과 채널높이의 영역이 등고선의 흰색 부분으로 중첩되어 나타났다. 즉, 채널길이나 냉매 압력강하량의 요구 조건을 동시에 만족시켜주는 채널폭과 채널높이의 최적 설계값은 중첩등고선상의 흰색 중첩영역에 포함되는 다수의 조합으로 얻을 수 있다.

또한 다수의 채널폭과 채널높이의 조합중 반응값의 규격을 가장 잘 만족시켜주는 채널폭과 채널높이를 찾기 위하여 Fig. 10에 나타난 반응최적기(response optimizer)를 이용하였다. 반응최적기는 반응표면 분석결과를 통해서 얻어진 각 반응값들에 대한 회귀식을 이용하여 최적의 반응값을 예측하는 도구이다. 설계 최적화 단계에서 반응최적기를 실행한 결과 채널폭 및 채널높이에 대한 최적 설계값은 모두 2.0mm로 나타났으며, 이때 반응값인 채널길이는 555.6mm, 냉매 압력강하량은 22.6kPa로 예측되었다.

Table 4 Experimental set of central composite design in RSM and responses

No.	CW [mm]	CH [mm]	CL [mm]	dP [kPa]
1	1	1	329.8	366.6
2	3	1	392.4	90.1
3	1	3	447.8	42.1
4	3	3	764.5	4.5
5	0.59	2	305.5	275.7
6	3.41	2	649.4	7.8
7	2	0.59	281.1	261.4
8	2	3.41	673.2	7.9
9	2	2	555.6	22.6
10	2	2	555.6	22.6
11	2	2	555.6	22.6
12	2	2	555.6	22.6
13	2	2	555.6	22.6

3. 최적 설계값 검증 실험

3.1 시료용 증발기 제작

본 연구에서는 증발기의 최적 설계값에 대한 검증을 위하여 시료용 증발기를 제작하고 이에 대한 성능 실험을 수행하였다. 시료용 증발기의 설계인자로는 채널폭, 채널높이 및 채널길이를 선정하였다. 채널폭 및 채널높이에 대한 수준은 최적설계를 통하여 얻은 2.0mm를 중심값으로 한 1.5mm~2.5mm로 선정하였으며, 채널길이는 50mm×50mm인 증발기의 크기와 스크리닝 단계에서 예측된 값을 고려하여 484mm~660mm로 선정되었다.

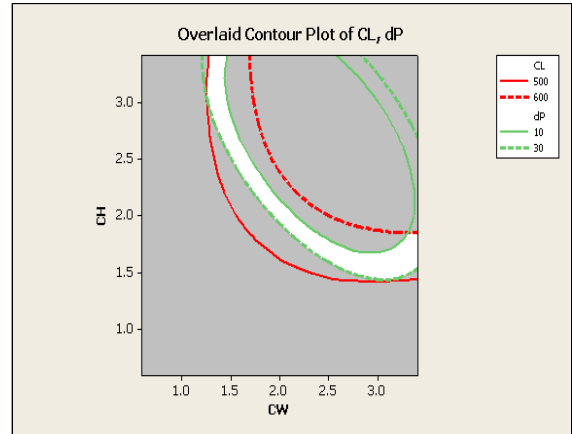


Fig. 9 Overlaid contour plot of channel length, CL [mm] and refrigerant side of pressure drop, dP [kPa]

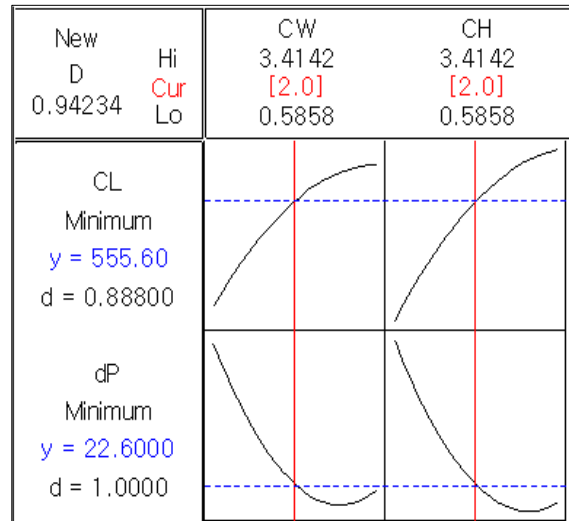


Fig. 10 Expected result of response optimizer

Table 5 Experimental set of central composite design in RSM

No.	CW [mm]	CH [mm]	CL [mm]
1	1.5	1.5	484
2	2.5	1.5	484
3	1.5	2.5	484
4	2.5	2.5	484
5	1.5	1.5	660
6	2.5	1.5	660
7	1.5	2.5	660
8	2.5	2.5	660
9	1.5	2.0	572
10	2.5	2.0	572
11	2.0	1.5	572
12	2.0	2.5	572
13	2.0	2.0	484
14	2.0	2.0	660
15	2.0	2.0	572

이때 바닥면 두께는 1.5mm로 고정 하였으며 채널 사이의 벽두께는 채널길이에 따라 0.5mm~2.8mm의 범위를 갖도록 하였다. 50mm × 50mm의 제한된 크기에서는 채널길이의 변화에 따라 채널 굴곡부의 수 즉, 채널의 수가 달라지게 되며 증발기의 폭이 고정되어 있으므로 채널 사이의 벽두께가 달라지게 된다. 위와 같은 3개의 설계인자들과 각 인자들의 수준에 대하여 반응표면법을 이용한 실험설계를 수행한 결과 Table 5와 같은 인자들의 서로 다른 수준 조합을 얻을 수 있었으며, 이를 바탕으로 하여 총 15개의 시료용 증발기를 제작하였다.

Fig. 11은 본 연구에서 제작한 시료용 증발기의 사진이다. 시료용 증발기는 냉매 채널이 형성되어 있는 하판과 냉매의 입출구 배관이 설치되어 있는 상판으로 이루어져 있으며, 상판과 하판은 브레이징 접합을 하였다.

3.2 실험장치

본 연구에서 증발기 성능실험을 위하여 구축된

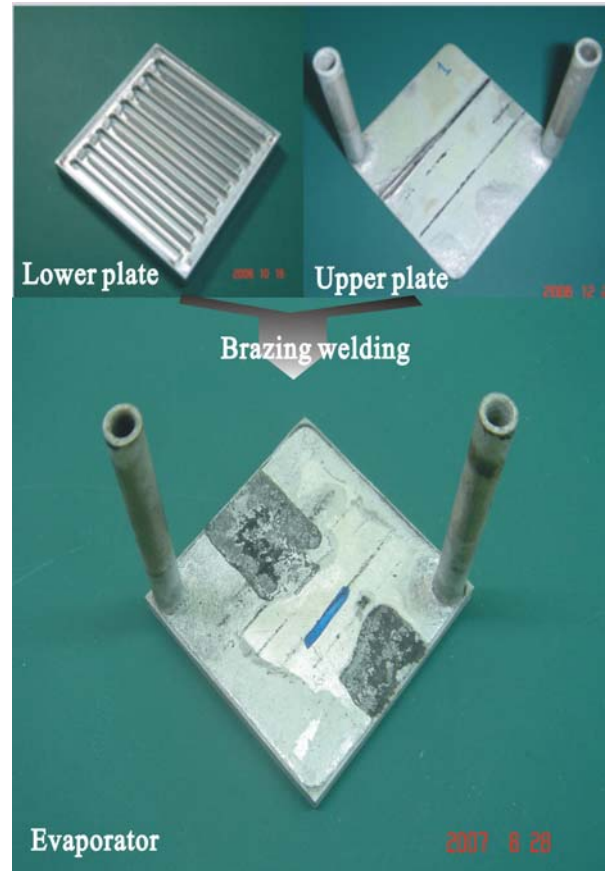


Fig. 11 Picture of a evaporator

실험장치의 개략도를 Fig. 12에 나타내었다. 증발기 성능실험장치는 냉매 저장용기(receiver), 마그네틱 기어펌프(magnetic gear pump), 예열기(pre-heater), 히트블럭(heat block) 및 냉각기(subcooler) 등으로 구성되어 있다. 예열기는 증발기 입구에서 냉매의 온도를 조절하는 용도로서 전기히터 및 온도 조절장치로 구성되어 있다. Fig. 13의 (a) 및 (b)는 각각 본 연구에서 제작한 히트블럭 및 카트리지 히터의 사진이다. 히트블럭은 CPU의 발열량 모사를 위한 것으로 동으로 만든 직육면체 블럭에 원통형 카트리지 히트를 삽입하여 제작하였다. 히트블럭 상부에는 온도 측정을 위한 열전대 부착용 홈을 가공하여 3개의 T형 열전대(T-type thermocouple)를 부착하였으며, 이 때 측정된 온도의 평균값을 CPU의 표면 온도로 가정하였다.

Table 6에는 측정항목 및 본 실험에서 사용한 측정기기의 사양을 나타내었으며, 모든 측정값들은 데이터 수집장치(MV200, Yokogawa(日))를 통하여 기록 저장하였다.

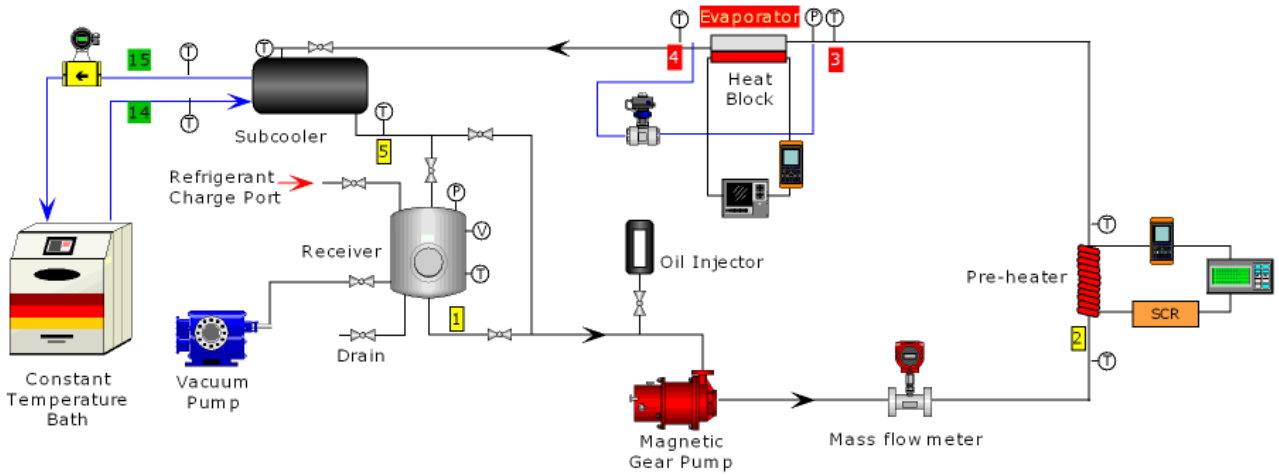
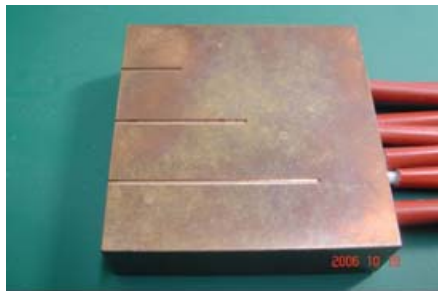


Fig. 12 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Heat block



(b) Cartridge heater

Fig. 13 Pictures of heat block and cartridge heater

Table 6 Measuring items & instruments

Item	Instrument (Model)	Accuracy	
Refrigerant	Mass flowrate	Mass flow meter (RHM 015M & RHE 08)	0.2%
	Temperature	RTD, Pt-100Ω	±0.1℃
		Thermocouple, T-type	±0.5℃
	Pressure	Pressure transmitter (Keller series 33X)	0.15%
Pressure drop	Diff. pressure transmitter (ABB FUCA33V4L.AAY)	±0.03%	
Electric Power applied to heat block	Power meter (Yokogawa WT230)	±0.1%	

3.3 실험결과 및 분석

증발기 성능 실험을 위한 실험조건은 Table 1에서 언급한 최적 운전 사이클에서의 증발기 작동조건과 동일하게 적용하였다. 단 증발기 입구에서의 냉매는 포화액 상태로 건도는 0으로 하였다.

Table 7에 중심합성계획법에 의해 설계된 실험조건과 각 실험 조건에서의 반응값들을 나타내었다. 최적화 단계에서의 반응값으로는 CPU 표면온도(T_{CPU}), 증발기 출구에서의 냉매 과열도(dT_h), 열저항(R) 및 냉매 압력강하량을 선정 하였다.

CPU의 표면온도는 앞 절에서 언급한 바와 같이 히트블럭의 표면온도로 가정 하였으며, 냉매 과열도는 식 (6)과 같이 구하였다.

$$dT_h = T_{out} - T_{sat} \tag{6}$$

열저항은 식 (7)과 같이 정의되며, Q_{CPU} 는 히트블럭에 투입된 전력량으로 본 실험에서는 300 W로 고정 하였다.

$$R = \frac{T_{CPU} - T_{in}}{Q_{CPU}} \tag{7}$$

Table 7에서 실험조건 1번부터 15번까지는 각 인자들의 서로 다른 수준 조합으로 생성된 실험조건이며, 실험조건 16번부터 20번 까지는 각 인자들의 중심값에 대한 반복실험이다. 단 실험조건 1번과 5번

은 채널의 단면적이 가장 작은 조건으로 증발기 입출구의 과도한 차압으로 실험을 실시하지 못하였다.

Fig. 14는 채널폭 및 채널높이에 따른 CPU 표면 온도에 대한 반응표면 분석 결과를 등고선도(contour plot)로 나타낸 것이다. 등고선도에 나타난 바와 같이 채널폭이 증가함에 따라 CPU 표면온도도 증가함을 알 수 있으며, 채널높이는 채널폭에 따라 서로 다른 임의에 임계점이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 15는 채널폭 및 채널높이에 따른 냉매 압력강하량에 대한 등고선도이다. 그림에서와 같이 냉매 압력강하량은 채널폭 및 채널높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 16은 채널길이가 484mm로 고정된 경우 채널폭 및 채널높이의 변화에 따른 4개의 반응값에 대한 중첩등고선도이다. 중첩등고선도는 앞서 언급한 바와 같이 반응값이 다수인 경우 각 반응값의 규격을 동시에 만족시켜 주는 인자들의 범위를 나타내주는 그림으로 각 반응값에 대한 규격 상한값과 하한값을 Table 8에 나타내었다.

Table 7 Experimental set of central composite design in RSM and responses

No.	CW [mm]	CH [mm]	CL [mm]	T_{CPU} [°C]	dT_h [°C]	R [°C/W]	dP [kPa]
1	1.5	1.5	484				
2	2.5	1.5	484	42.6	0.3	0.08	90.74
3	1.5	2.5	484	31.3	0.3	0.05	116.52
4	2.5	2.5	484	33.2	0.2	0.05	33.18
5	1.5	1.5	660				
6	2.5	1.5	660	43.5	0.3	0.09	133.49
7	1.5	2.5	660	32.2	0.3	0.05	104.78
8	2.5	2.5	660	34.40	0.2	0.06	42.30
9	1.5	2.0	572	33.7	0.2	0.05	162.18
10	2.5	2.0	572	43.1	0.3	0.08	53.64
11	2.0	1.5	572	41.6	0.6	0.08	172.31
12	2.0	2.5	572	30.8	0.2	0.04	47.39
13	2.0	2.0	484	36.2	0.1	0.06	72.89
14	2.0	2.0	660	34.7	0.1	0.06	99.51
15	2.0	2.0	572	39.4	0.3	0.10	80.04
16	2.0	2.0	572	39.7	0.2	0.07	80.08
17	2.0	2.0	572	39.2	0.2	0.07	81.41
18	2.0	2.0	572	39.0	0.2	0.07	83.67
19	2.0	2.0	572	39.1	0.2	0.07	83.36
20	2.0	2.0	572	36.1	0.2	0.09	85.05

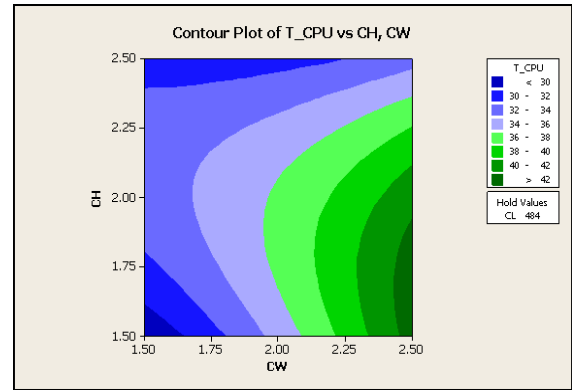


Fig. 14 Contour plot of surface temperature of CPU, T_{CPU} [°C] versus channel height, CH [mm] and width, CW [mm]

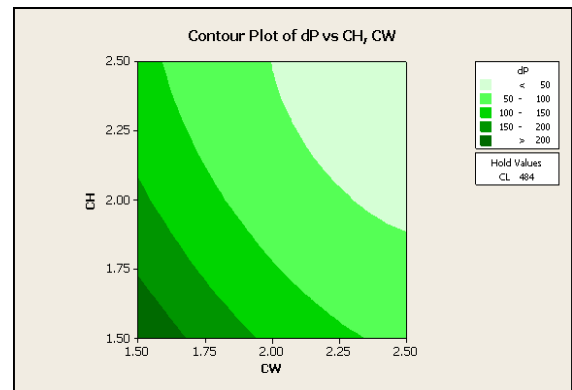


Fig. 15 Contour plot of refrigerant side pressure drop, dP [kPa] versus channel height, CH [mm] and width, CW [mm]

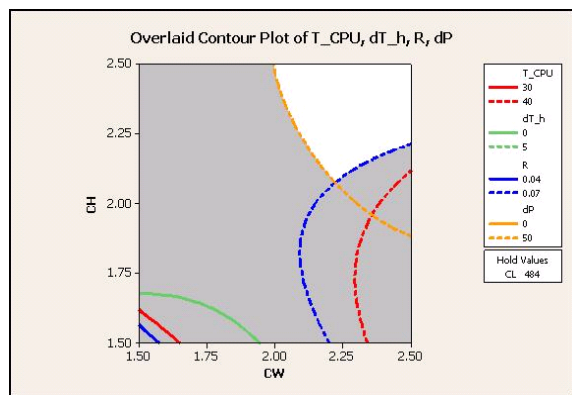


Fig. 16 Overlaid contour Plot of surface temperature of CPU, T_{CPU} [°C], degree of superheat, dT_h [°C], thermal resistance, R [°C/W] refrigerant side pressure drop, dP [kPa]

Table 8 Lower and upper specification limits of responses

Response	Lower spec. limit	Upper spec. limit
Surface Temperature of CPU, T_{CPU} (°C)	30	40
Degree of superheat, dT_h (°C)	0	5
Thermal resistance, R (°C/W)	0.04	0.07
Pressure drop, dP (kPa)	0	50

Fig. 16에 의하면 4개의 반응값에 대한 규격을 동시에 만족시켜주는 채널폭과 채널높이의 범위는 두 인자 모두 2.0mm이상인 영역으로 나타났다.

또한, 4개의 반응값을 동시에 만족 시켜주는 중첩영역 내에서의 최적 설계점을 찾기 위하여 반응 최적기를 이용하였으며 그 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 반응최적기 실행을 통하여 채널폭, 채널높이 및 채널길이에 대한 최적 설계값으로 각각 2.5mm, 2.5mm 및 484mm를 얻을 수 있었다. 이때의 CPU 표면온도는 33.5°C, 과열도는 0.1973°C, 열저항값은 0.050°C/W 그리고 냉매 압력강하량은 33.4kPa로 예측되었다.

반응최적기 실행결과로 얻어진 4개의 반응값들은 실제 실험결과가 아닌 반응표면 분석결과로 얻어진 회기식을 이용하여 예측한 결과이다. 따라서 본 연구에서는 설계최적화 과정을 통하여 얻어진 최적 설계값의 검증용 위하여 최적화된 증발기에 대한 7회의 반복실험을 수행하였다.

Table 9에 반응최적기를 이용한 예측값과 7회 반복 실험에 대한 평균값을 비교하여 나타내었다. 표에서와 같이 반응최적기를 이용한 예측값은 실험값과 잘 일치함을 알 수 있었다.

한편, 현재 Desktop PC용 CPU의 발열량은 최대 130W 정도이며, 기존의 공기냉각시스템 및 수냉식 냉각시스템의 열저항은 각각 0.2~0.4°C/W 및 0.1~0.3°C/W로 이때의 CPU 표면온도는 대략 50~60°C 정도로 유지되는 것으로 알려져 있다. 본 연구를 통하여 제작된 증발기는 CPU 발열량이 300W일 때의 열저항이 0.053°C/W이며, 이때 CPU 표면온도를 33.4°C로 유지할 수 있었다.

Table 9 Comparison between RSM and experimental result

Response	Response optimizer	Experiment
Surface Temperature of CPU, T_{CPU} (°C)	33.1	33.4
Degree of superheat, dT_h (°C)	0.2	0.1
Thermal resistance, R (°C/W)	0.050	0.053
Pressure drop, dP (kPa)	33.4	30.9

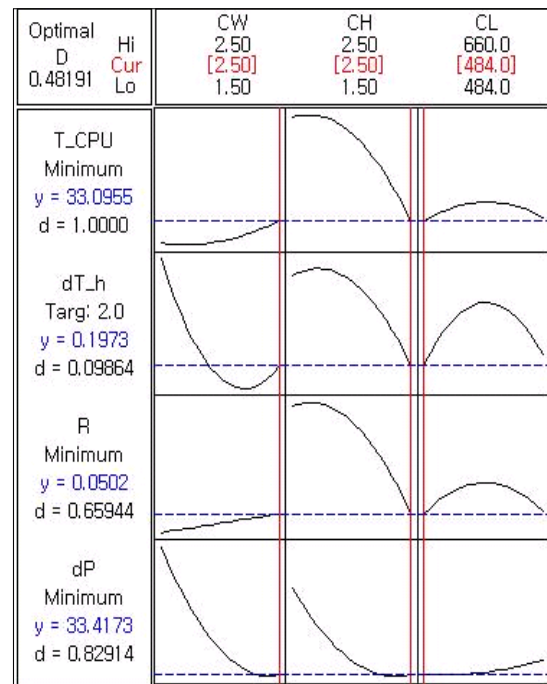


Fig. 17 Result of response optimizer

4. 결 론

본 연구에서는 고발열 CPU 냉각용 증기 압축식 냉각 시스템의 증발기 최적화에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) 본 연구의 스크리닝 단계에서는 부분요인 실험계획법에 따른 실험 및 분석을 통하여 증발기의 설계인자인 바닥두께, 채널 벽면두께, 채널폭 및 채널높이 중에서 채널폭 및 채널높이

가 반응값인 채널길이에 대한 압력강하에 주요한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

(2) 최적화 단계에서는 반응표면법을 이용하였으면 반응표면법에 의한 실험 및 분석결과 증발기의 최적 설계값으로 채널폭 및 채널높이는 모두 2.5mm이고 채널길이는 484mm로 나타났다. 이 경우 반응최적기를 통한 CPU 표면온도, 과열도, 열저항 및 냉매 압력강하량에 대한 예측값들은 각각 33.1°C, 0.2°C, 0.050°C/W 및 33.4kPa로 나타났다.

(3) 최적 설계값에 대한 검증은 위하여 최적 증발기에 대한 반복실험을 수행하였으며, 그 결과 반응최적기에 의한 예측값은 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

(4) 본 연구를 통하여 최적화된 증발기는 열저항이 0.053°C/W로, 기존의 공기냉각시스템(0.2~0.4°C/W) 및 수냉식 냉각시스템(0.1~0.3°C/W)의 열저항에 비하여 매우 작은 값을 얻을 수 있었으며, 300W의 고발열 조건에서도 기존의 냉각방식에 비하여 매우 낮은 CPU의 온도(약 33.4°C)를 유지할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가과학기술위원회산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Rhi, S. H., Shin, D. R. and Lim, T. K., 2006, "Development of Nanofluidic Thermosyphon Heat Sink," *SAREK Journal*, Vol. 10, pp. 826-834.

- (2) Lee, J. and Mudawar, I., 2005, "Two Phase Flow in High Heat Flux Micro-channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications Part II-Heat Transfer Characteristics," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 941-955.
- (3) Kwon, O. K., Choi, M. J., Cha, D. A. and Yun, J. H., 2007, "A Study on Thermal Performance of Microchannel Waterblock," *SAREK Journal*, S-200, pp. 1242-1247.
- (4) Choi, M. J., Kwon, O. K., Cha, D. A. and Lee, C., 2007, "A Numerical Analysis on Cooling Performance of Microchannel Waterblock for Electronic Device Cooling," *2007 The Annual Spring Conference of The Korea Society of Mechanical Engineers*, pp. 2426-2431.
- (5) Kim, M. S., Yoon, J. S. and Choi, J. W., 2006, "A Study in the Micro Vapor Compressor Based on Micro Fabrication Process for the Application to the Micro Miniature Refrigeration System," *SAREK Journal*, S-075, pp. 477-482.
- (6) Aqwu Nnanna, A. G., 2006, "Application of Refrigeration System in Electronics Cooling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 18-27.
- (7) Schmidt, R. R. and Notohardjono, B. D., 2002, "High-end Server Low-temperature Cooling," *IBM J. RES. & DE*, NOVEMBER Vol. 46, No. 6.
- (8) Goth, G. F., Kearney, D. J., Meyer, U. D. and Porter, W., 2004, "Hybrid Cooling with Cycle Steering in the IBM EServer Z990," *IBM J. RES. & DE*, MAY/JULY Vol. 48, No. 3/4.
- (9) Pecht, M., 1990, *Handbook of Electronics Package Design*, Marcel Dekker inc., pp. 40-43.
- (10) Kim, Y. L., Kim, S. C., Park, S. S. and Jeon, D. S., 2007, "Optimization of Vapor Compression Cooling Cycle for a High Heat Flux CPU," *KITECH Journal of Industrial Technology*, Vol. 16, pp. 41-50.
- (11) Collier, G. J., 1981, *Convective Boiling and Condensation*, Mcgraw-hill inc.