

# 평면형 ECF 펌프를 이용한 전자기기 액체냉각 시스템

서우석<sup>#</sup>, 함영복<sup>\*</sup>, 박중호<sup>\*</sup>, 윤소남<sup>\*</sup>, 양순용<sup>\*\*</sup>

## Liquid Cooling System Using Planar ECF Pump for Electronic Devices

Woo-Suk Seo<sup>#</sup>, Young-Bog Ham<sup>\*</sup>, Jung-Ho Park<sup>\*</sup>, So-Nam Yun<sup>\*</sup> and Soon-Young Yang<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This paper presents a liquid cooling concept for heat rejection of high power electronic devices existing in notebook computers etc. The design, fabrication, and performance of the planar ECF pump and forced-liquid cooling system are summarized. The electro-conjugate fluid (ECF) is a kind of dielectric and functional fluids, which generates jet flows (ECF-jets) by applying static electric field through a pair of rod-like electrodes. The ECF-jet directly acts on the working fluid, so the proposed planar ECF pump needs no moving part, produces no vibration and noise. The planar ECF pump, consists of a pump housing and electrode substrate, achieves maximum flow rate and output pressure of 5.5 cm<sup>3</sup>/s and 7.2 kPa, respectively, at an applied voltage of 2.0 kV. The forced-liquid cooling system, constructed with the planar ECF pump, liquid-cooled heat sink and thermal test chip, removes input power up to 80 W keeping the chip surface temperature below 70 °C. The experimental results demonstrate that the feasibility of forced-liquid cooling system using ECF is confirmed as an advanced cooling solution on the next-generation high power electronic devices.

**Key Words** : Electro-Conjugate Fluid (전계공역유체), Planar ECF Pump (평면형 ECF 펌프), Functional Fluids (기능성 유체), Liquid Cooling System (액체 냉각 시스템), Electronics Cooling (전자장비 냉각)

### 1. 서론

최근, 전자실장기술 등의 현저한 발전에 따라 전자기기 및 전자칩의 고집적화 및 고성능화가 급속히 진전되고 있지만, Intel<sup>®</sup> Pentium<sup>®</sup> 4 프로세서 3.4GHz CPU의 열 설계 전력(Thermal Design Power, TDP)이 103W에 이르는 등, 전자기기 및 전자칩의 발열이 문제점으로 주목받고 있다.<sup>1</sup> 국제 반도체 기술 로드맵(ITRS)에 따르면, 차세대 마이크로 프

로세서의 최대 발열량은 2010년경에는 300W를 초과할 것으로 전망되고 있다.<sup>2</sup> 특히, 노트북 컴퓨터와 같이 제한된 실장공간을 가지는 시스템에 있어 CPU 성능의 한계는 냉각 시스템에 의해 결정되며, 차세대 노트북 컴퓨터와 같은 전자기기의 냉각을 위해서는 기존의 공기 냉각방식의 한계를 극복하는 새로운 냉각시스템의 개발이 불가피하다.

고성능, 고발열 CPU를 위한 냉각 시스템에 관한 연구로서는 히트파이프의 응용 및 강제 액체냉

접수일: 2007년 2월 15일; 게재승인일: 2007년 10월 4일

# 교신저자: 한국기계연구원 나노기계연구본부

E-mail: woosseo@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7168

\* 한국기계연구원 나노기계연구본부

\*\* 울산대학교 기계자동차공학부

각 기술에 관하여 활발한 연구가 이루어지고 있다.<sup>3,5</sup> Moon 등<sup>3</sup>은 두개의 히트파이프를 이용한 노트북 컴퓨터의 냉각 시스템을 제작하였다. 그러나, 작동유체의 증발과 응축에 따른 상변화의 잠열을 이용한 히트파이프 냉각기법은 제한된 노트북 컴퓨터의 내부공간에 히트파이프의 응축부를 배치하기 위한 비교적 넓은 실장공간을 필요로 한다는 점 및 열전달 한계가 히트파이프의 직경과 길이에 의존하고 있는 점으로부터 수십 W 이상의 높은 발열량을 가지는 노트북 컴퓨터 CPU의 냉각에는 곤란하다.

Jiang 등<sup>4</sup>은 미세유로 히트싱크와 정전 삼투압 펌프를 이용한 VLSI 칩의 강제 액체냉각 시스템을 제안하고 냉각특성을 실험적으로 검토하였다. 그러나, 제안된 냉각시스템은 미세유로 히트싱크의 높은 차압으로 인하여 고 토출압력의 펌프가 요구되며, 펌프의 토출유량 4mL/min(작동유체: 물), 히트싱크의 차압 30kPa의 조건에서 약 30W의 방열능력을 보이고 있는 것으로부터, 100W 이상의 발열량을 가지는 CPU의 강제 액체냉각을 위해서는 대유량의 펌프가 필요할 것으로 생각된다. 물을 작동유체로 사용하는 경우, 발열량 200W의 전자칩을 허용표면온도(80~100°C)까지 냉각하기 위해서는 약 200mL/min의 유량이 필요한 것으로 알려져 있으며, 이 때의 펌프 토출압력은 히트싱크의 유로 및 관로의 유동저항에 의해 결정된다.

한편, 전계공역유체(Electro-Conjugate Fluid, 이하 ECF)는 일종의 유전성 유체이면서, 액중에 삽입된 전극에 직류전압을 인가하면 전극간에 활발한 유동이 발생하는 기능성 유체이다.<sup>6,10</sup> 인가 전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF의 유동현상을 통하여 ECF는 전기적 에너지를 기계적 유체 에너지로 직접 전환이 가능하며, 다양한 유체 디바이스 및 액추에이터의 구동원으로 이용할 수 있다.<sup>7,13</sup>

Yokota 등<sup>7</sup>은 ECF의 유동현상을 모터의 구동원으로 이용한 ECF 마이크로 모터를 제안하였다. Takemura 등<sup>8</sup>은 ECF 제트를 압력원으로 한 마이크로 인공근육 액추에이터를 제안하고 구동특성을 실험적으로 검토하였다. 또한, Yokota 등<sup>9</sup>은 유체 구동형 마이크로 머신의 구동원을 실현하기 위해 ECF 제트를 SMA(Shape Memory Alloy) 액추에이터의 액체 강제 냉각 기구에 적용한 SMA 구동형 마이크로 펌프를 제안하고 ECF의 액체냉각 효과를 실험적으로 확인하였다. 이러한 ECF의 유동현상을

펌프에 적용하는 것으로 기계적 가동부가 없는 단순한 구조를 가지는 무소음, 무진동의 펌프가 실현 가능하다.<sup>10</sup>

본 연구에서는 제한된 실장공간을 가지는 차세대 노트북 컴퓨터와 같은 고발열 전자기기의 냉각을 위한 강제 액체냉각 시스템의 실현을 목적으로 한다. 이러한 액체냉각 시스템의 실현을 위해서는 실장 가능한 펌프의 개발이 요구되며, 차세대 노트북 컴퓨터의 소형화 및 슬림화를 고려하면 액체냉각 시스템의 유체 구동원으로서의 펌프는 액정패널의 뒷면 등에 배치 가능한 얇은 평면형 구조가 적합하다.

본 논문에서는 ECF를 작동유체로 한 기계적 가동부가 없는 단순한 구조의 평면형 ECF 펌프에 관하여 전극치수 및 유로높이의 변화에 따른 무부하 및 부하특성 실험을 수행한다. 또한, 평면형 ECF 펌프를 유체 구동원으로 한 강제 액체냉각 시스템을 구축하고, 냉각특성을 실험적으로 검토한다.

## 2. 전계공역유체

전계공역유체(ECF)는 일종의 기능성 유체이며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 액중에 삽입된 전극에 직류 고전압을 인가하면 전극간에 강력한 제트 유동(ECF-jet)이 발생한다. 인가전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF의 유동현상을 “ECF 효과”(ECF effect)로 부르며, 대표적인 ECF로는 Dybutyl decane-dioate(DBD), Linalyl acetate(LA), FF-1EHA2 등이 있다.<sup>11</sup> 이와 같은 ECF 제트의 발생 메커니즘은 현재 명확하게 밝혀져 있지 않지만, 광의적으로는 전기유체역학(Electrohydrodynamics: EHD)현상의 일종으로 알려져 있다.<sup>6,7</sup>

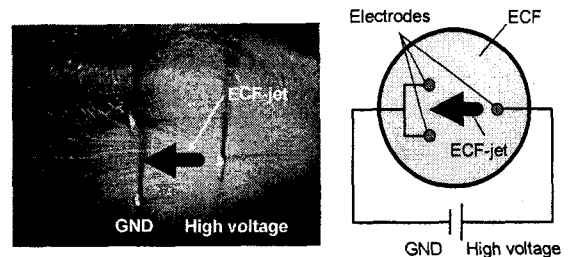


Fig. 1 Visualization and schematic diagram of the ECF-jet

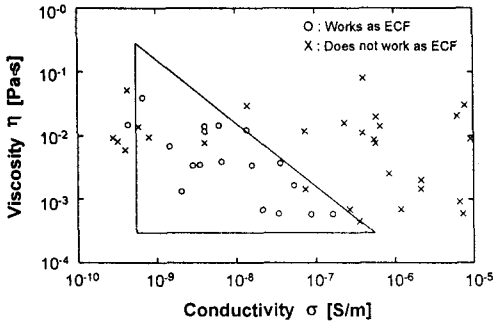


Fig. 2 ECF qualification

Fig. 2 는 약 50 종류의 유전성 유체에 관한 ECF 제트의 발생 유무를 점도와 도전율의 관계로 분류한 결과를 나타낸다.<sup>11</sup> 인가전계에 따른 ECF 효과가 발생하는 유체를 ○, 발생하지 않는 유체를 ×로 나타내고 있다. Fig. 2 의 결과로부터, ECF 효과는 점도와 도전율이 특정한 범위를 만족시키는 유전성 유체(Fig. 2 의 삼각형 내부)에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, ECF 에 관한 기존의 연구결과<sup>7-13</sup>로부터, ECF 효과에 의해 발생하는 제트의 유속은 불균일한 전계하에서 보다 증가하며, 인가전압에 거의 비례하는 것이 알려져 있다. 이와 같은 ECF 의 유동현상을 공학적으로 응용함으로써 다양한 유체 디바이스 및 액추에이터의 구동원으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. ECF를 이용한 평면형 펌프

#### 3.1 평면형 ECF 펌프의 구동 원리

Fig. 3 은 본 연구에서 제안하는 평면형 ECF 펌프의 구동 원리를 나타낸다. 기판상에 선형 전극대를 유로와 직교하여 배치하고 이 기판을 삽입한 펌프실 내부에 ECF 를 주입한다. 펌프실 내부의 전극대에 적류 고전압을 인가하면, 전극 주변의 전계에 따른 ECF 효과에 의해 고전위 측의 전극으로부터 그라운드 전극 방향으로 제트가 발생한다. 인가전계에 의해 발생하는 ECF 제트의 운동량은 정지상태인 전극 상부의 유체에 전달된다. 먼저 전극 주변의 유체가 이동하는 국소유동이 발생하고, 이 국소유동이 발전함에 따라 유로 내부의 유동이 순차적으로 형성된다.

평면형 ECF 펌프는 기계적 가동부가 없는 얇은 평면구조이기 때문에 노트북 컴퓨터의 액정 패널

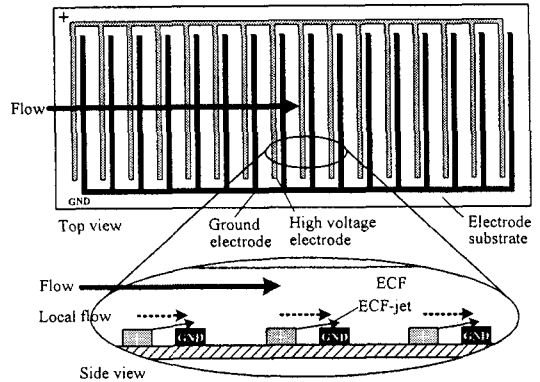


Fig. 3 Pumping principle of planar ECF pump

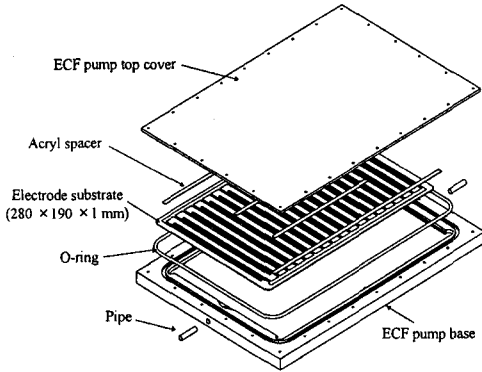
뒷면 등에 실장 가능하다. CPU 로부터 발생된 열은 ECF 에 의해 액정 패널 뒷면에 위치한 평면형 펌프까지 이동되고, 여기서 펌프의 넓은 표면적에 의해 방열 가능할 것으로 생각된다. 이 경우, 평면형 ECF 펌프는 액체냉각 시스템의 유체 구동원이 됨과 동시에 방열판의 역할도 수행 가능하다. 또한, 평면형 펌프는 기계적 가동부가 없기 때문에 무소음 및 무진동의 펌프를 실현할 수 있다. 이러한 특징을 갖는 평면형 ECF 펌프는 차세대 노트북 컴퓨터의 강제 액체냉각 시스템의 구동원으로 적합할 것으로 생각된다.

#### 3.2 설계 및 제작

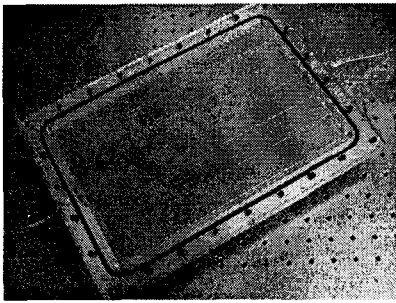
제작한 평면형 ECF 펌프의 개략도 및 사진을 Fig. 4 에 나타낸다. 본 펌프는, 향후 노트북 컴퓨터의 액체 냉각 시스템의 구동원으로서 액정 패널의 뒷면에 실장되는 것을 고려하여 펌프의 치수는 A4 사이즈(297mm×210mm)를 기준으로 설계하였다. 펌프실 내부에서 인가전계에 의해 ECF 제트를 발생시키는 전극 기판은 길이 280mm, 폭 190mm, 두께 1mm 의 글라스 에폭시 기판을 사용하였다. 펌프실 내부의 유로 높이는 전극 기판과 외부 상판 사이에 삽입되어 있는 아크릴 스페이서의 두께에 의해 유지된다. 또한, 펌프실로부터 작동유체인 ECF 의 누출을 방지하기 위해 O 링을 사용하였다.

Fig. 5 은 본 연구에서 검토하고 있는 전극치수 및 유로높이에 관한 펌프실 내부의 설계 파라미터를 나타낸다. 전극치수 파라미터는 전극두께  $t_e$ , 전극폭  $B_e$ , 고전위측 전극과 그라운드 전극간의 간격  $L_e$ , 및 한쌍의 전극대 사이의 간격  $L_p$  를 고려

한다. 또한, 전극치수와 동시에 펌프실의 유로높이



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 4 Fabricated planar ECF pump

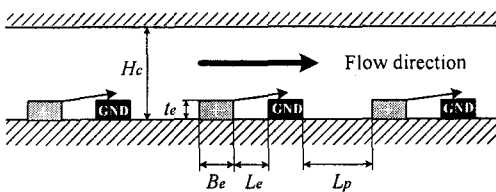


Fig. 5 Definition of design parameters

Table 1 Specification of electrode designs (see Fig. 5)

Substrate No.	$t_e$ ( $\mu\text{m}$ )	$B_e$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_e$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_p$ ( $\mu\text{m}$ )	No. of stages
1	35	100	200	900	212
2	35	100	<u>300</u>	800	212
3	<u>70</u>	100	200	900	212
4	35	<u>70</u>	200	960	212
5	35	100	200	<u>400</u>	344
6	35	100	<u>150</u>	450	344
7	35	100	150	<u>300</u>	424

$H_c$ 가 펌프출력에 미치는 영향에 대해 검토한다.

본 논문에서는 상기 4 개의 전극치수에 대하여, Table 1에 나타난 바와 같이 7 종류의 전극 기판에 대한 무부하 및 부하특성 실험을 행한다. 또, 펌프 두께 1mm 이하의 초박형 평면형 펌프의 실현을 목표로 유로 높이  $H_c$ 를 200 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$ , 500 $\mu\text{m}$ , 700 $\mu\text{m}$ 로 변화시켜 ECF 펌프의 출력특성에 미치는 영향에 관하여 검토한다.

#### 4. 실험장치

제작한 평면형 ECF 펌프의 토출유량, 전류 및 최대 토출압력을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 6에 나타낸다. 고전압 전원으로부터 평면형 ECF 펌프의 전극부에 0~3kV의 직류 고전압을 인가한다. 고전압 전원의 전류 출력범위는 0~10mA이다. 또한, 전원공급회로에 저항(10 $\Omega$ )을 직렬로 접속하여 펌프에 공급되는 전류를 측정한다. 무부하시의 토출유량은 메스실린더와 전자저울(최소분해능: 0.02g)을 이용하여 단위시간당 토출된 ECF의 질량을 밀도로 나누어 구한다. 부하압력은 토출구의 위치를 탱크 액면으로부터 상승시키는 것으로 인가할 수 있다. 최대 토출압력은 토출유량이 0일때의 토출구의 탱크 액면으로부터 수직 높이를 측정하는 것으로 구하였다.

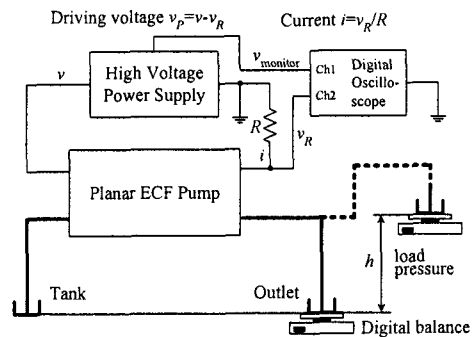


Fig. 6 Experimental apparatus for pumping characteristics of planar ECF pump

지금까지 ECF 마이크로 모터 및 마이크로 액추에이터 등에서는 DBD(Dibutyl decanedioate)가 표준적인 ECF로 사용되고 있다.<sup>6-9</sup> 본 논문에서는 평전성 액체인 FF-1<sub>EHA2</sub>를 사용한다. FF-1<sub>EHA2</sub>의 물성

치를 Table 2에 나타낸다.

Table 2 Physical properties of FF-1<sub>EHA2</sub>

Physical Property	FF-1 <sub>EHA2</sub>
Density [kg/m <sup>3</sup> ] (15℃)	1.688×10 <sup>3</sup>
Kinematic viscosity [m <sup>2</sup> /s] (30℃)	8.8×10 <sup>-6</sup>
Electric conductivity [S/m] (1kV/mm)	5×10 <sup>-9</sup>
Boiling point [℃] (1atm)	210

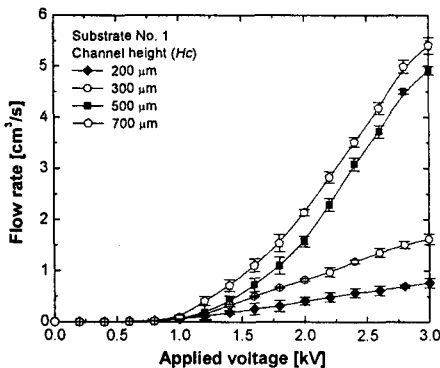
면형 ECF 펌프의 작동유체로 난연성(難燃性)을 가지며 DBD 보다 강력한 제트를 발생시키는 불소 유전성 액체인 FF-1<sub>EHA2</sub>를 사용한다. FF-1<sub>EHA2</sub>의 물성치를 Table 2에 나타낸다.

### 5. 평면형 ECF 펌프의 특성실험

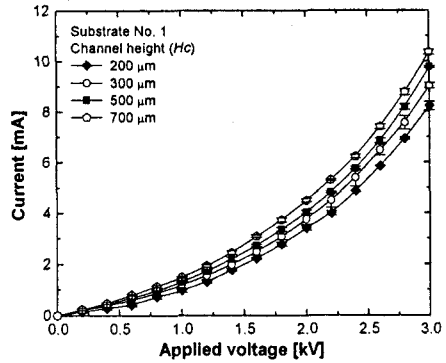
#### 5.1 유로 높이의 변화에 따른 출력특성

3.2 절에 나타낸 전극 파라미터 및 유로높이에 있어, 인가전압에 대한 평면형 ECF 펌프의 토출유량, 전류치 및 토출압력에 관한 특성실험을 수행하였다. 우선, 펌프 내부의 유로높이  $H_c$ 를 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 500 $\mu$ m, 700 $\mu$ m로 변화시켜, 유로높이의 변화가 펌프 출력특성에 미치는 영향을 조사하였다. 기관 1의 경우의 유로높이의 변화에 따른 무부하 토출유량 특성을 Fig. 7(a), 전류치를 Fig. 7(b)에 나타낸다. 모든 실험 데이터는 각각 3 회씩 측정된 실험 결과의 평균치를 나타내고 있다.

Fig. 7의 결과로부터 인가전압 및 유로높이를 상승시키면 무부하 토출유량 및 전류치는 증가하는 것을 알 수 있다. 유로높이 200 $\mu$ m를 기준으로



(a) Flow rate



(b) Current

Fig. 7 ECF pump characteristics for various channel heights (without load)

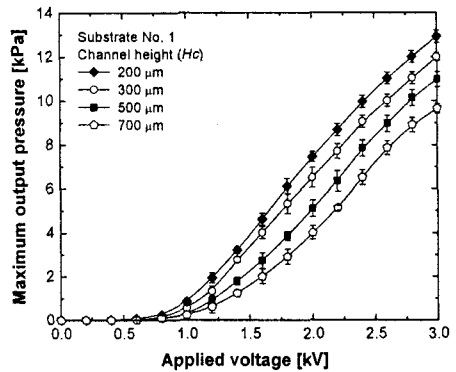


Fig. 8 Max. output pressure for various channel heights

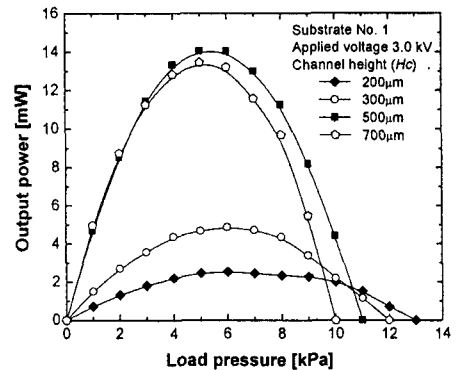


Fig. 9 Comparison of output power for various channel heights

하여 500 $\mu$ m 및 700 $\mu$ m의 경우를 비교해 보면, 유량의 대폭적인 증가에 비하여 전류의 증가폭은 적

다. 이 결과로부터, 유로높이  $H_c$  의 증가는 펌프의 고 토출유량의 관점에서 유효한 것을 알 수 있다. 단, 유로높이 500 $\mu\text{m}$  에 대한 700 $\mu\text{m}$  의 경우는 토출유량의 증가 폭이 적다. 주된 원인으로서, 3.1 절에서 논한 바와 같이, 유로높이의 증가에 대하여 국소 유동의 발전에 따른 정지상태인 유로 상부까지의 유동을 형성하는 것이 어렵기 때문이라고 생각된다.

다음으로, 유로높이의 증가에 따른 최대 토출압력에 관한 검토를 행하였다. 전극 기관 1 의 결과를 Fig. 8 에 나타낸다. 유로높이가 증가하는 것에 의해 펌프실 내부의 유동 단면적의 증가에 수반한 최대 토출압력이 감소하는 것을 알 수 있다.

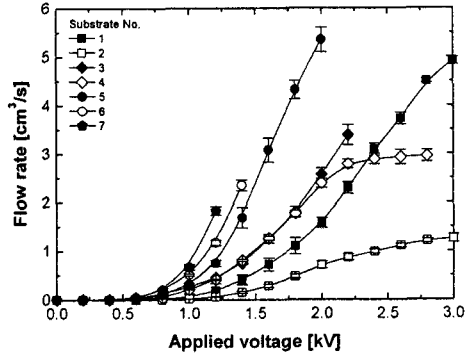
또한, Fig. 7(a)와 Fig. 8 의 결과로부터, 인가 전압 0.7kV 를 임계치로 그 이하에서는 유량 및 압력이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 ECF 제트의 유속이 인가 전압의 강도에 의존하고 있는 것으로부터 낮은 인가전압에서 발생하는 제트의 운동량이 크지 않기 때문에 유로 내부에 일정 방향의 유동을 형성시키기 어려운 것이 그 원인으로 생각된다.

Fig. 9 은 부하압력에 따른 출력 파워의 결과를 나타낸다. Fig. 9 의 결과로부터 유로높이 500 $\mu\text{m}$  의 최대 출력파워는 700 $\mu\text{m}$  의 경우보다 약간 증가하고 있으나, 정성적인 경향은 거의 동일하다. 이 결과와 유로높이의 증가에 따라 전류치는 상승하는 특성(Fig. 7(b)) 및 펌프 두께 1mm 이하의 초박형 평면형 펌프의 실현을 목표로 하는 것을 고려하면, 제작한 평면형 ECF 펌프의 유로높이는 500 $\mu\text{m}$  가 적합하다고 할 수 있다. 또한, 지면관계상 나타내지 않았으나, Table 1 에 나타낸 전극 기관 2~7 에 대한 유로높이의 변화에 따른 특성 실험에서도 유로 높이가 증가한 경우, 무부하 토출유량 및 전류의 증가, 토출압력의 감소 및 출력 파워의 경향이 전극 기관 1 과 동일한 것을 확인하였다.

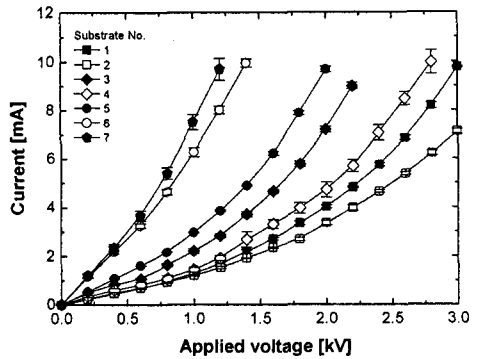
### 5.2 전극 치수의 변화에 따른 출력특성

3.2 절에서 논한 전극 치수의 변화에 대하여 인가 전압에 대한 평면형 ECF 펌프의 토출유량 및 전류에 관한 무부하 특성실험을 행하였다. 사용한 전극 기관은 Table 1 에 나타낸 바와 같은 7 종류의 전극 기관이다. Fig. 10(a)에 무부하 토출유량, Fig. 10(b)에 전류의 측정결과를 나타낸다. 또, Fig. 11 에 최대 토출압력을 나타낸다. 한편, 5.1 절에서 논한

유로높이의 변화에 따른 무부하 특성실험 결과에 근거하여, Fig. 10 및 Fig. 11 의 결과는 유로높이 500 $\mu\text{m}$  의 경우를 나타내고 있다.



(a) Flow rate



(b) Current

Fig. 10 ECF pump characteristics for various electrode dimensions (without load)

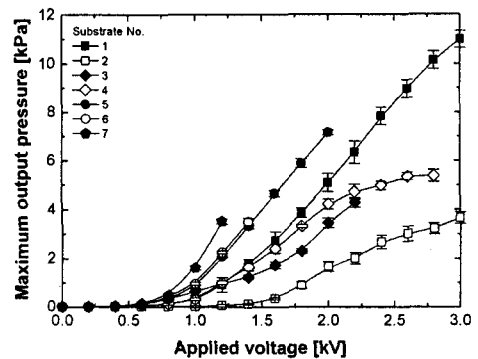


Fig. 11 Max. output pressure for various electrode dimensions

먼저, 기관 1 에 대하여 각각 한 개씩의 파라미터를 변화시킨 기관 2~5 의 특성을 기관 1 과 비교한다. Fig. 10 및 Fig. 11 의 결과로부터, 전극간의 간격  $L_e$  를 증가시킨 기관 2 의 경우는 기관 1 과 비교하여 유량 및 토출압력이 감소하는 것을 알 수 있다. 그 주된 원인으로서는 ECF 제트의 강도가 전극간의 인가 전계의 강도에 의존하고 있고, 기관 2 의 전극 간격이 기관 1 보다 넓으므로 전계 강도가 감소되었기 때문으로 생각된다. 전극 두께  $t_e$  를 증가시킨 기관 3 의 경우, 기관 1 보다 높은 유량 및 전류치를 보이는 것을 알 수 있다. 여기서, ECF 제트의 강도는 불균일한 전계분포에서 보다 강력한 제트가 발생하는 기존의 연구결과<sup>7,8</sup>로부터, 기관 3 의 경우는 전극 두께의 증가에 따른 전극 에지(edge) 근방에서의 전계 분포의 불균일성이 증가했기 때문으로 생각된다. 전극 폭  $B_e$  를 감소시킨 기관 4 의 경우, 인가전압 2kV 이하에서는 기관 1 보다 유량이 증가하고 있지만, 이것은 좁은 전극 폭에 따른 전계 분포의 불균일성의 증가가 그 원인으로 생각 되어진다. 또, 인가전압 2kV 이상에서 유량의 상승폭이 적어지는 것은 전극간에 발생하는 ECF 제트에 의해 유로 내부에서 와류 또는 역류 등이 발생한 것이 원인으로 생각된다.

전극대의 간격  $L_p$  를 감소시킨 기관 5 의 경우, 유량 및 토출압력은 기관 1 의 경우 보다 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서, 기관 1 과 기관 5 에 있어 전극대의 개수와 토출유량의 관계는 Table 1 에 나타낸 바와 같이 기관 5 의 전극대의 개수는 기관 1 보다 1.6 배 증가한 것에 대하여 토출유량은 인가전압 2.0 kV 에서 약 2.8 배 증가하고 있다. 이 결과로부터  $L_p$  의 감소에 따른 전극대 개수의 증가는 단순히 전극대의 개수에 비례하여 토출유량을 증가시키는 것이 아니라, 2.1 절에서 논한 바와 같이 국소유동의 발전에 따른 전체 유로 내부의 유동을 형성하는 것에 기여하여 보다 많은 유량을 토출 가능하게 하는 것으로 판단된다.

다음으로, 기관 5 를 기준으로 하여 기관 6, 7 에 관하여 검토한다. 기관 5 와 동일한 전극대의 개수를 가지고 전극간의 간격  $L_e$  를 감소시킨 기관 6 의 경우, 기관 5 의 출력과 비교하여 전류치가 크게 증가한다. 이것은 전극 간격의 감소에 따른 전극간의 전기저항의 감소에 의해 전류가 상승되었다고 생각 되어진다. 전계강도의 증가에 대하여 토출유량 및 압력치는 거의 동일한 것을 알 수 있다. 또,

기관 5 보다 전극대의 간격  $L_p$  를 감소시킨 기관 7 의 경우, 전극대 개수의 증가에 의한 유량 및 토출압력의 증가가 보이지만, 기관 6 의 결과와 같이 전류가 큰 폭으로 증가한다.

본 실험을 통하여 제안된 평면형 ECF 펌프의 고출력화를 실현할 수 있는 전극치수 및 유로높이의 최적치가 존재하는 것을 확인하였다. 실험 결과로부터, 기관 5, 유로높이 500 $\mu$ m 의 경우, 인가전압 2kV 에서 무부하 토출유량 5.5cm<sup>3</sup>/s, 최대 토출압력 7.2kPa 을 얻을 수 있고, 펌프의 고출력화의 관점에서 유효한 것이 확인되었다.

### 5.3 부하특성

제안된 평면형 ECF 펌프의 부하압력에 대한 유량특성 실험을 수행하였다. 고려된 유로높이 및 전극 파라미터는 5.1 절 및 5.2 절과 동일하다. ECF 펌프에 인가하는 부하압력은 탱크의 액면에서 토출구까지의 수직높이를 변화시키는 것으로 인가하였다. ECF 펌프의 작동유체인 FF-1<sub>EHA2</sub> 의 경우, 밀도는 1.69 $\times 10^3$ kg/m<sup>3</sup> 이므로 1kPa 의 부하압력은 60mm 의 토출구 수직높이 변화에 의해 인가할 수 있다.

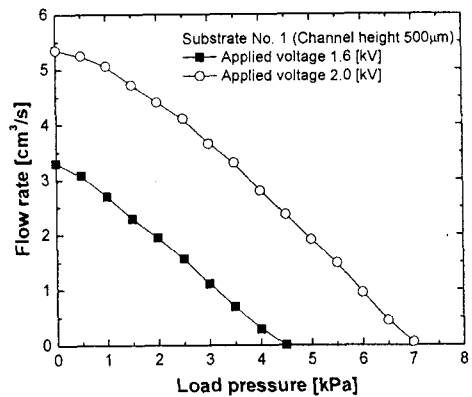


Fig. 12 Flow rate versus load pressure characteristics

평면형 ECF 펌프의 유로높이 및 전극치수의 변화에 따른 무부하 특성실험에 관한 실험적 검토 결과로부터, 유로높이 500 $\mu$ m, 전극 기관 5 의 경우의 인가전압 1.6 kV 와 2.0 kV 에 대한 부하특성 실험결과를 Fig. 12 에 나타낸다. Fig. 12 의 결과로부터 부하압력과 토출유량의 관계는 거의 선형적인 것을 알 수 있으며, 최대 출력파워는 인가전압

2.0kV 에서 11.6mW 가 얻어졌다. 그러나, 제안된 평면형 ECF 펌프는 약 20W 의 높은 소비전력(기판 5 의 경우, 인가전압 2kV, 전류치 10mA)을 요구함에 따라 매우 낮은 펌핑 효율을 보이고 있으며, 향후, 저소비전력 및 고효율 평면형 ECF 펌프에 관한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### 6. ECF 강제 액체냉각 시스템

5 장에서 논한 평면형 ECF 펌프를 유체 구동원으로 한 강제 액체냉각 시스템을 구성하고, 그 냉각 특성을 실험적으로 검토하였다. Fig. 13 에 액체냉각 실험장치의 구성을 나타낸다. 제안하는 강제 액체냉각 시스템은 평면형 ECF 펌프, 액냉 히트싱크(Alphacool GmbH, NexXxos XP, 50×50 mm<sup>2</sup>), 및 모의 CPU 로 구성되어 있다. 열원의 역할을 하는 모의 CPU 는 히터(Kryotherm Inc., DRIFT-0.8, 40×40mm<sup>2</sup>) 와 히트 스프레더(황동, 43×43 mm<sup>2</sup>)로 구성되어 있으며, 외부의 직류 전원장치로부터 히터에 0~80W 의 전력이 공급된다. 히터, 히트 스프레더, 및 액냉 히트싱크의 접촉부에는 열저항을 감소시키기 위해 열 콤파운드(Thermal compound)가 도포되어 있다. 모의 CPU 의 표면 및 작동유체의 온도는 K 형 열전대(직경  $\phi$ 0.1mm)를 이용하여 측정한다. 또한, 액냉 히트싱크의 입/출구 양단의 차압은 2 개의 압력센서로 측정한다.

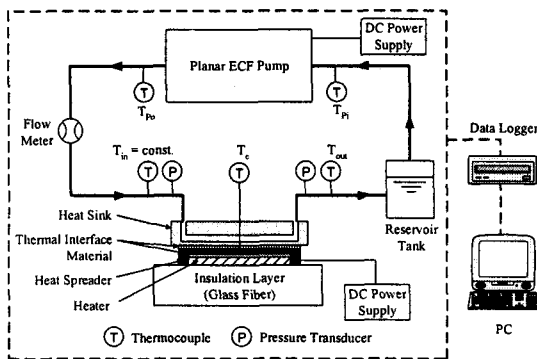


Fig. 13 Experimental apparatus for characterization of forced liquid cooling system

한편, 본 연구에서 검토하는 강제 액체냉각 시스템에 있어, 평면형 ECF 펌프는 3 장에서 논한 바와 같이 액체냉각 시스템의 유체 구동원과 동시에

넓은 표면적에 의해 방열판의 역할도 동시에 수행이 가능하지만, 본 논문에서는 강제 액체냉각 시스템에 작동유체를 공급하는 구동원으로서 평면형 ECF 펌프의 성능만을 고려한다. 즉, 평면형 ECF 펌프로부터 공급되는 작동유체의 온도는 등온조건으로 하고, 모의 CPU 의 발열량(공급 전력)에 대하여 펌프의 출력 특성(토출유량 및 압력)에 의존하는 모의 CPU 의 표면온도를 평가한다.

먼저, 모의 CPU 에 공급되는 전력 0W, 40W, 80W 에 대하여 펌프의 토출 유량에 따른 히트싱크의 차압 측정 결과를 Fig. 14 에 나타낸다. 유량이 증가함에 따라 차압은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 유량에 대하여, 모의 CPU 의 공급 전력이 증가하는 것에 의해 차압은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 공급 전력의 상승에 따른 작동유체의 온도가 상승한 결과 작동유체의 점도가 감소하였기 때문이다.

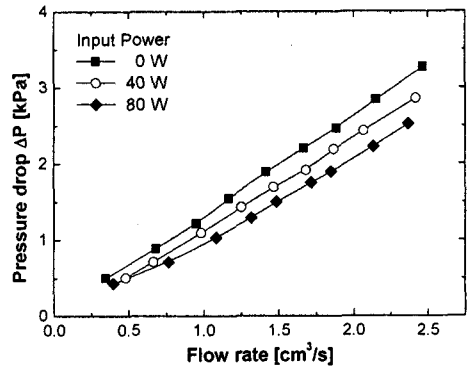


Fig. 14 Measured pressure drop of heat sink

다음으로, 공급 유량의 변화에 따른 모의 CPU 의 표면온도의 측정결과를 Fig. 15 에 나타낸다. Fig. 15 의 결과로부터, 히트싱크가 없는 경우(□)의 모의 CPU 의 표면온도는 공급 전력이 상승하는 것에 의해 급격히 증가하고 있지만, 공급 유량이 증가(■→○→●→◇)할수록 모의 CPU 의 표면온도의 증가는 감소하는 것을 알 수 있다. 본 실험 결과로부터, 평면형 ECF 펌프의 공급유량 2.0cm<sup>3</sup>/s 의 경우, 80W 의 공급 전력에 대한 모의 CPU 의 표면 온도는 70℃ 이하로 유지 가능한 것을 확인할 수 있었다. 이 경우, 평면형 ECF 펌프에 인가된 전압은 1.35 kV, 전류치는 5.0 mA 가 측정되었다.



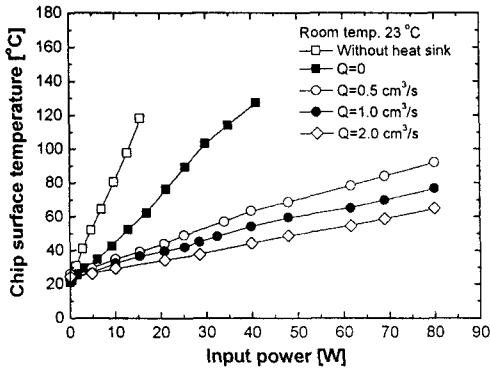


Fig. 15 Measured surface temperature of dummy CPU

## 7. 결론

본 논문에서는 제한된 실장공간을 가지는 차세대 노트북 컴퓨터와 같은 고발열 전자기기를 위한 강제 액체냉각 시스템의 실현을 목적으로, 선형 전극대에 직류전압을 인가하면 활발한 유동이 발생하는 ECF를 작동유체로 한 가동부가 없는 무소음, 무진동의 평면형 ECF 펌프를 개발하고, 평면형 ECF 펌프를 유체 구동원으로 한 강제 액체냉각 시스템을 구축하였다. 또한, 제작된 평면형 ECF 펌프 및 강제 액체냉각 시스템의 출력특성 및 냉각특성을 실험적으로 검토하였다. 향후, 평면형 ECF 펌프의 방열특성 및 소비전력의 개선을 위한 펌프 성능의 향상에 관한 검토를 수행할 예정이다.

## 참고문헌

1. <http://developer.intel.com>, Intel® Pentium® 4 data sheet. Tech. Report.
2. SIA Int. Roadmap Committee, "International Technology Roadmap for Semiconductors," Semiconductor Industry Association, pp. 11-17, 2004.
3. Moon, S. H., Hwang, G., Yun, H. G., Choy, T. G. and Kang, I. Y., "Improving thermal performance of miniature heat pipe for notebook PC cooling," *Microelectron. Reliab.*, Vol. 42, Issue 1, pp. 135-140, 2002.
4. Jiang, L., Mikkelsen, J., Koo, J. M., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou, P., Maveety, J. G., Prasher, R., Santiago, J. G., Kenny, T. W. and Goodson, K. E., "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits," *IEEE Trans. Comp. Packag. Technol.*, Vol. 25, No. 3, pp. 347-355, 2002.
5. Darabi, J. and Ekula, K., "Development of a chip-integrated micro cooling device," *Microelectronics Journal*, Vol. 34, Issue 11, pp. 1607-1074, 2003.
6. Otsubo, Y. and Edamura, K., "Dielectric fluid motors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, No. 3, pp. 318-320, 1997.
7. Yokota, S., Kondoh, Y., Sadamoto, A., Otsubo, Y. and Edamura, K., "A Micro Motor Using Electro-conjugate Fluids (ECF)," *Int. Journal of JSME (C)*, Vol. 44, No. 3, pp. 756-762, 2001.
8. Takemura, K., Yokota, S. and Edamura, K., "Development and control of a micro artificial muscle cell using electro-conjugate fluid," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, Issue 2, pp. 493-499, 2007.
9. Yokota, S., Yoshida, K., Okayasu, T., Kawae, T., Otsubo, Y. and Edamura, K., "An SMA-Driven Micropump Using ECF Jet Cooling," *Trans. of JSME (C)*, Vol. 66, No. 650, pp. 3516-3522, 2000.
10. Yokota, S., Seo, W. S., Yoshida, K. and Edamura, K., "A Thin-Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluid (ECF) for Liquid Cooling of Electronic Chips," *Trans. of JSME (C)*, Vol. 71, No. 709, pp. 2798-2804, 2005.
11. Seo, W. S., "Development of a planar pump using electro-conjugate fluid and its application to forced-liquid cooling system for electronic chips," Ph.D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology, pp. 22-40, 2006.
12. Seo, W. S., Yoshida, K., Yokota, S. and Edamura, K., "A high performance planar pump using electro-conjugate fluid with improved electrode patterns," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 134, Issue 2, pp. 606-614, 2007.
13. Seo, W. S., Yang, S. Y., Lee, B. R., Ahn, K. K. and Ham, Y. B., "Design, Fabrication and Experimental Investigation of a Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluid," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 8, pp. 1320-1327, 2007.