

# 온도차를 이용한 유도형 마이크로 EHD 펌프에 관한 연구

윤 용규\*, 김 용권  
서울대학교 전기공학과

## A Study of Micro Induction-type EHD Pump with Temperature Gradient

Yongkyu Youn, Yongkweon Kim  
Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

### Abstract

This paper presents the characteristics of micro induction EHD ( ElectroHydroDynamic ) pump in which the fluid has a temperature gradient to the transverse direction of a traveling wave. The effects of the channel depth, the wave length and wave form of the traveling wave has been investigated in micro pump. The effect of temperature gradient also has been investigated. The fluid velocity becomes large as the wave length becomes small and the temperature gradient becomes high. The channel depth has little influence on the fluid velocity. The EHD pump driven by the square wave has the larger fluid velocity than that driven by the sinusoidal wave.

### 1. 서론

EHD 펌프는 전장과 유체속에 유도된 전하들간의 상호 작용으로 구동되며, EHD 펌프의 특징으로서는 전기력이 직접유체에 작용하기 때문에 기계적 운동부가 필요없다는 것이다. 따라서, 구조가 간단하여 제작이 간편하며, 기계적 마모가 거의 없기 때문에 수명이 반 영구적이다. 마모에 의한 유체의 오염이 없으므로 동작에의 높은 신뢰성을 기대할 수 있다.

EHD 펌프에는 유도형 (Induction type)<sup>[1,2,4,5]</sup> 과 주사형 (Injection type)<sup>[3]</sup> 이 있다. 주사형은 두전극 (Emitter 와 Collector) 사이의 유체에 자유전하를 흘림으로써 구동 되는데, 이 경우 흘러들어가 전하가 유체의 절연성에 영향을 줄 수가 있다. 이에 반해 유도형 EHD 펌프의 경우는 직접 전하를 유체를 통해 흘려주지 않으므로 유체의 절연성이 그대로 유지되며, 특히 유도형 펌프의 경우 펌프구간 전체를 통해 전기력이 유체에 작용하게되므로 펌프작용시 다른 펌프에 비해 낮은 압력이 의외에 작용한다.

유도형 EHD 펌프의 동작을 위해서는 유체의 진행방향과 수직인 방향으로 전기전도도나 유전율의 변화( $\Delta\sigma, \Delta\epsilon$ )가 필요하다. 이것을 발생시키는 한가지 방법으로서는 gas-liquid 경계면에서의 전기전도도나 유전율의 불연속을 이용한 방법(두유체모델)<sup>[6]</sup>이 있으며, 또 다른 방법으로는 절연 유체의 전기 전도도가 온도의 함수임을 이용하여 펌프의 채널 양단에 온도차를 주는 방법(일유체모델)<sup>[1]</sup>이 있다. 본 논문에서는 후자의 방법을 이용한 펌프의 동작을 채널 단면이 직사각형인 경우에 관해서 알아보았다.

기존의 EHD 펌프는 변압기 또는 지중케이블의 냉각용 등으로 응용되었으며, 이에 반하여 초소형 EHD 펌프는 고밀도 집적회로등의 냉각장치에 응용될 수 있으며, 또는 정밀한 유량 이동 또는 유압 밸브나 스위치 등의 역추에 이터로도 이용될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 마이크로 펌프의 구동시 구동전압이 정형파와 구형파일 경우의 속도를 비교해 보고, 진행파 전압의 파장과 채널의 높이가 유속에 미치는 영향을 살펴본다. 또한 채널 양단의 온도차이의 크기가 유속에 미치는 영향을 알아본다.

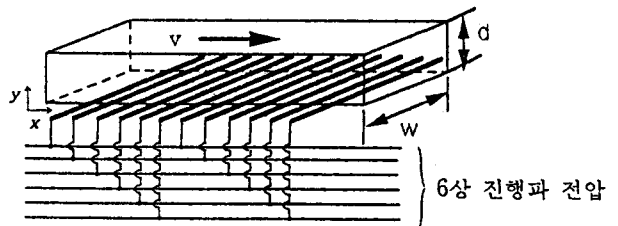


그림1 유도형 EHD 펌프의 구조도

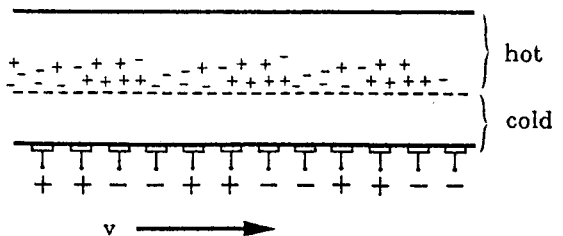


그림2 온도차를 이용한 EHD 펌프의 기본 개념도

## 2. 본론

### 2.1 기본 메카니즘의 이해

그림1 처럼 채널의 아래부분에 전극이 있으며, 각 6상마다 같은 전압을 인가하는 경우를 생각하자. 이때 전극 구조에 따른 파장  $\lambda$  와 전압구동 주파수  $f$  에 의해 진행 속도  $v = f \lambda$  인 진행파 전압이 전극에 가해진다. 한편, 채널내부의 유체가 진행파의 수직방향으로 온도 변화를 가질 경우에는 채널의 높이에 따른 전기전도도  $\sigma$  의 차이를 가진다. 간단히 그림2 에서와 같이 유체의 위쪽이 고온이고 아래쪽이 저온인 경우에는 채널의 위쪽이 온도가 높고 아래쪽이 낮은 아래쪽보다 더 나은 도전체로 볼수 있다. 전극에 전압이 인가될 경우 유체내부에 전극의 반대 극성의 전하가 유기되며, 전극쪽으로 이동하려고 할 것이다. 이때 이 전하는 아래쪽의 절연성이 높은 부분(온도 낮은 유체부분)의 유체에 가로 막혀 그 경계 부분에 전하가 쌓일 것이다. 그러는 동안 전압의 진행파가 진행하므로 경계에 유기된 전하는 진행파에 끌려 진행하게 된다. 전하의 이동시 유체를 함께 끌게 되므로 유체가 운동하게 된다. 채널 아래 위의 온도가 반대로 되어 있을 경우에는 위와 비슷한 과정에 의해서 진행파의 방향과 반대로 유체가 흘러가게 된다.

### 2.2 기본식

진행파 전압을  $\text{Re}(V \exp(\omega t - kx))$  로 인가 했을 때  $x$  방향의 속도를  $v_x$  라면,<sup>[1]</sup>

$$v_x(\zeta) = D \cdot d \cdot F \int_0^1 \frac{1}{\mu(\zeta)} d\zeta - \int_0^1 \frac{f(\zeta)}{\mu(\zeta)} d\zeta \quad [\text{mm/s}] \quad \text{---(1)}$$

$$\text{여기서, } F = \int_0^1 \frac{f(\zeta)}{\mu(\zeta)} d\zeta / \int_0^1 \frac{1}{\mu(\zeta)} d\zeta$$

$$f(\zeta) = \exp(-a_f \zeta) \times [b_r \sin(b_r \zeta) - b_i \sinh(b_r \zeta) + a_i (\cosh(b_r \zeta) - \cos(b_r \zeta))]$$

$$D = ekV^2 / [4d (\cosh(b_r) - \cos(b_i))]$$

$$a_f = \eta(1+S^2), \quad a_i = \eta S / (1+S^2)$$

$$b_r = A \cos(\frac{\theta}{2}), \quad b_i = -A \sin(\frac{\theta}{2})$$

$$A = [4(kd)^2 + \eta^2(1-S^2)/(1+S^2)^2 + 2\eta^2 S/(1+S^2)^2]^{1/4}$$

$$\theta = \tan^{-1} [2\eta^2 S/(1+S^2)^2 / 4(kd)^2 + \eta^2(1-S^2)/(1+S^2)^2]$$

$$\eta = \sigma_1 / \sigma_0, \quad S = \omega \epsilon / \sigma_0, \quad \zeta = y/d$$

$\sigma_1$ : 유체의 전기전도도 차이 (채널 양단)

$\sigma_0$ : 전기 전도도의 평균값

$\epsilon$ : 유체의 유전율

$\mu$ : 유체의 점성계수

$k$ : 진행파전압의 파수

$\omega$ : 진행파 전압의 각속도

$d$ : 채널의 높이

$\zeta$ : 채널 높이의 normalized 값 ( $y/d$ )

$V$ : 정현파 전압의 최대값

여기에서, 전기전도도  $\sigma$  와 점성계수  $\mu$  는 온도의 함수로서 채널의 높이에 따라 선형적으로 변한다고 보았다.

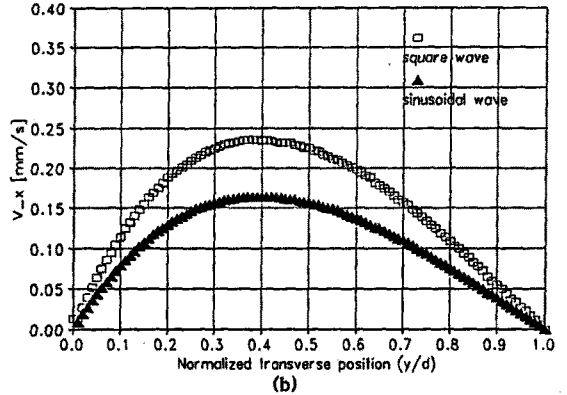
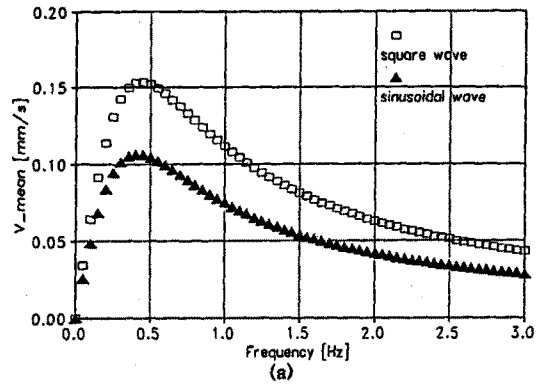


그림3 구형파와 정현파 전압 구동에 의한 유속

(a) 주파수와 유속 관계 (b)  $f=0.5$  인 때의 유속 단면도

채널 위아래 온도차:  $5^\circ\text{C}$ , 최대전압: 100 V

파장: 600  $\mu\text{m}$ , 채널높이: 100  $\mu\text{m}$

위에 나타난 유속의 식은 채널 높이에 관한 함수이다.

여기서 유속의 평균을 구해보면 다음과 같다.

$$v_{\text{mean}} = \int_0^1 v_x(\zeta) d\zeta \quad [\text{mm/s}] \quad \text{---(2)}$$

따라서, 단위시간당의 유량  $Q$ 는 개략적으로 식(3)과 같이 구한다.

$$Q = w \times d \times v_{\text{mean}} \times 60 \quad [\mu\text{l}/\text{min}] \quad \text{---(3)}$$

여기서,  $w$ : 채널의 폭 [mm]

$d$ : 채널의 높이 [mm]

### 2.3 계산 결과

그림3 은 구형파 전압과 정현파 전압을 인가했을 때의 유속을 나타낸다. corn oil 의 물질상수를 이용했으며 다음과 같다.

$$\epsilon = 3.1 \epsilon_0$$

$$\sigma_1 = 7.9 \times 10^{-11} \text{ mho/m}$$

$$\sigma_0 = 6.9 \times 10^{-11} \text{ mho/m}$$

$$\mu = (7.7 - 5.25 \zeta) \times 10^{-2} \text{ kg/ms}$$

$$k = 5236 \text{ (파장 : } 1200 \mu\text{m 에 해당)}$$

$$d = 100 \mu\text{m}$$

$$V = 100 \text{ V}$$

그림3 (a)에서는 주파수에 따른 유속을 나타내었는데, 최대 유속을 비교해보면, 주파수  $f = 0.5$  부근에서 구형파와 정현파는 각각 0.155 mm/s, 0.108 mm/s 의 유속을 나

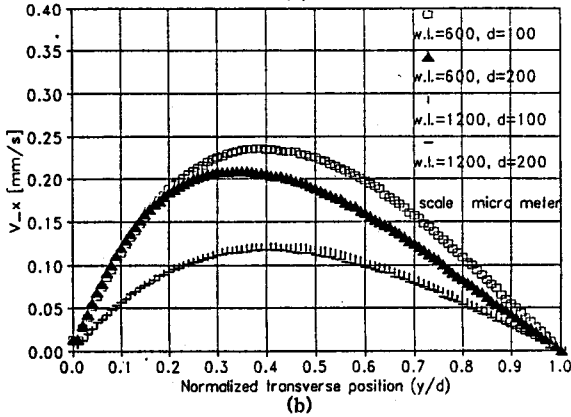
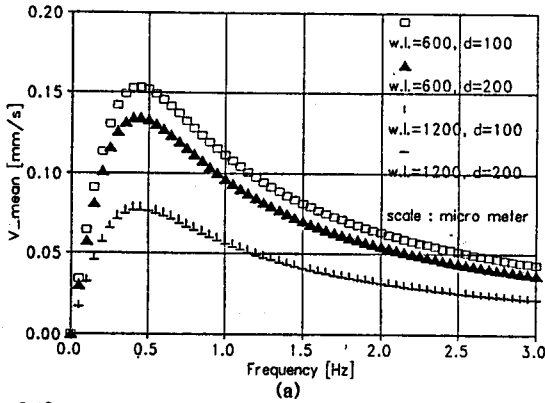


그림4 진행파의 파장과 채널의 높이에 따른 유속  
(a)주파수와 유속 관계 (b)  $f=0.5$  일 때의 유속 단면도  
채널 위아래 온도차:  $5^\circ\text{C}$ , 전압: 구형파 100 V

타낸다. 따라서, 같은 peak 값을 가지는 정현파와 구형파에 의한 구동에서는 구형파가 정현파에 비해 1.45 배 정도 빠른 유속을 발생시킴을 알 수 있다. 그림3 (b)는 주파수  $f = 0.5$  일때 유속의 profile을 나타낸다.

그림4는 진행파전압의 파장과 채널의 높이  $d$ 가 유속에 미치는 영향을 나타내었다. 진행파의 파수  $k$ 와 채널의 높이  $d$ 를 제외한 물질상수는 그림3의 경우와 같다. 이때 진행파 전압의 파장이 작을수록 (즉,  $k$ 의 값이 클수록) 유속이 빨라짐을 알 수 있다. 또, 채널의 폭  $w = 2\text{mm}$  일때 주파수  $f = 0.5$  에서 1분당의 유량을 계산하면 다음 표1과 같다.

한편 위의 결과에서 채널의 높이는 유속에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 최대유량의 수송을 위해서는 표1의 2의 경우와 같이 짧은 파장(높은  $k$  값)에 채널 높이가 높은 것을 이용하는 것이 좋으며 ( $v_{\text{mean}} \propto k$ ), 다소 정밀한 미소량을 수송하는 데는 3의 경우와 같이 긴 파장에 낮은 채널 높이의 펌프가 적당하다고 볼 수 있다.

표1 진행파 전압의 파장과 높이에 따른 유속과 유량

	유속 $v_{\text{mean}}$ [mm/s]	유량 $Q$ [ $\mu\text{l}/\text{min}$ ]
1. $\lambda: 600 \mu\text{m}, d: 100 \mu\text{m}$	0.15	1.8
2. $\lambda: 600 \mu\text{m}, d: 200 \mu\text{m}$	0.13	3.1
3. $\lambda: 1200 \mu\text{m}, d: 100 \mu\text{m}$	0.08	0.96
4. $\lambda: 1200 \mu\text{m}, d: 200 \mu\text{m}$	0.08	1.9

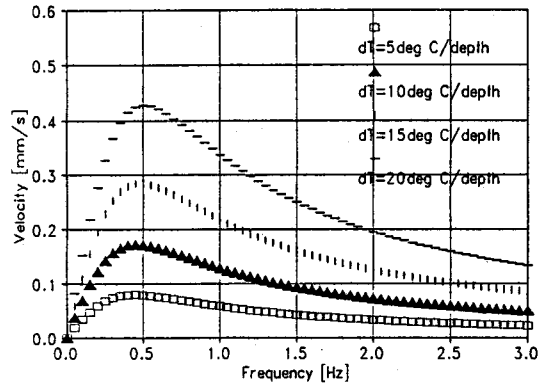


그림5 온도차에 따른 유속의 변화

전압: 구형파 100 V, 파장:  $1200 \mu\text{m}$ , 채널높이:  $100 \mu\text{m}$

앞의 계산에서는 채널 양단의 온도차가  $5^\circ\text{C}$  인 경우를 고려했는데, 그림5에서는 유속의 채널 양단의 온도차에 의한 영향을 알아보기 위해서 양단의 온도차가 각각  $5^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  인 경우에 대해 계산해 보았다. 역시 여기서 유체의 전기전도도  $\sigma$ 와 점성계수  $\mu$ 는 채널의 높이에 따라 선형적으로 변한다고 보았다. 그 결과 채널 양단의 온도차가 클수록 더 빠른 유속을 나타냄을 알 수 있다.

### 3. 결론

앞에서 우리는 온도차를 이용한 마이크로 EHD 펌프의 구동에 관하여 그 구동 메커니즘을 이해하고 수식계산을 통하여 특성을 살펴보았다.

더 빠른 유속을 얻기 위해서는 정현파 보다는 구형파에 의한 구동이 유리하며, 채널 양단의 온도차가 높을수록 유리함을 알 수 있다. 또한, 진행파 전압의 파장이  $600 \mu\text{m}$ 의 경우가  $1200 \mu\text{m}$ 의 경우보다 최대유속이 약 2배 정도 빠름을 알 수 있는데, 이로부터 펌프의 유속이 파장에 반비례(진행파의 파수  $k$ 에 비례)함을 알 수 있다. 이에 반해 채널의 높이는 유속에 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

이상의 결과를 기초로 하여 실험을 계획하고 있다.

### Reference

- [1] J.R.Melcher, M.S.Firebaugh, "Traveling-Wave Bulk Electroconvection Induced across a Temperature Gradient", *Phy.Fluid*, 1967, pp 1178-1185.
- [2] S.F.Bart, L.S.Tavrow, M.Mehregany, J.H.Lang, "Microfabricated Electrohydrodynamic Pumps", *Sensors and Actuators A21-A23 (1990)*, pp 193-197.
- [3] A.Richter, H.Sandmaier, "An Electrohydrodynamic Micropump", *Proc. MEMS 1990*, pp 99-104.
- [4] G.Fuhr, R.Hagedorn, T.Müller, W.Benecke, B.Wagner, "Pumping of Water Solution in Microfabricated Electrohydrodynamic Systems", *Proc. MEMS 1992*, pp 25-30.
- [5] 윤용규, 김용진, "유도형 EHD 펌프의 소형화에 관한 연구", *대한전기학회 추계종합학술대회 논문집 1992*, pp 133-135.