

다공성 유리 슬릿 EO펌프 기초 성능 측정 연구

서상태*·박철우†

Study on Basic Performance Test of Electroosmotic Pump with Porous Glass Slit.

Sang Tae, Seo and Cheol Woo, Park

Abstract

The basic concept and preliminary performance results of a miniaturized electroosmotic (EO) pump with diaphragms were included in the present study. The separation of an electroosmotic pumping liquid from a drug using diaphragms is mainly to have a freedom in choosing an electroosmotic pumping liquid and to achieve the optimal drug delivery, and, preferably its precise control. We performed maximum flow rate, maximum pressure, and maximum current measurements with and without diaphragm designs. As a result, the effect of diaphragms on pump performance at the maximum condition is small. However, the presence of diaphragms does not allow indefinite continuous pumping.

Key Words : Electroosmotic (전기삼투), Porous Glass(다공성유리), Buffer(버퍼), Diaphragm(막)
Electrical double layer(전기적 이중층), Zeta-Potential(제타전위), Drug Delivery (약물전달)

기호설명

E =Electric field

I =Current

L =Frit thickness

T =temperature

P =Pressure

Q =Flow rate

k =Boltzmann constant

V_{app} =Applied potential

V_{eff} =Effective potential

V_{dec} =Decomposition potential

ϵ =Electron charge

λ_D =Debye shielding length

μ =Permittivity

ζ =Zeta Potential.

ρ =Density

1. 서론

요즘 미세유체역학(Micro-Fluidics)의 중요성에 따라 응용분야가 다양하게 활용되고 있다. 특히, 생명공학 분야에서 생체분자의 작용 메커니즘과 혈관 내부 유동 현상의 해석과 제어, 혈관의 수축으로 인한 각종 질환 (당뇨병, 뇌출혈, 심장마비, 등)에 서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 현재 국내외 에서 혈관의 수축으로 인한 사망이 계속 증가하 고 이에 대한 연구와 장비가 상당한 수준에 이르 고 있다.⁽¹⁾ 이에 미세유체역학에서 Bio-MEMS (Micro Electro Mechanical System)가 새로운 연구 분야 로 떠오르고 있는 이유 중 하나이다. Bio-MEMS에서 미세 구조물 내부를 흐르는 유체 유동에 대한 정보는 미세구조물의 설계나 여기서 발생하는 문제점 해결에 도 활용할 수 있다.⁽²⁾

* 경북대학교 대학원 기계공학과

† 경북대학교 기계공학부

E-mail : chwoopark@knu.ac.kr

TEL : (053)950-7569 FAX : (053)950-6550

특히 MEMS 기술을 활용하는 Lab On a Chip(LOC)과 DNA칩의 경우, 마이크로 채널을 통해 혈액용액이나 시료를 운반할 수 있다.⁽³⁾ 본 연구에서는 소형 의료용 펌프에 전기삼투 방식을 적용하는 펌프를 제작하였다. 전기삼투펌프(Electro-osmotic Pump, EO pump)는 미세다공성유리(Porous Glass)에 전기장을 가해서 이온의 이동에 의해 액체의 이동이 발생하도록 하는 원리이다. EO펌프는 유체의 속도, 유량, 전류와 압력을 자유롭게 조절할 수 있다는 점과 특히, 다른 압력 구동펌프와 달리 진동이나 소음이 전혀 없다는 것이 가장 큰 장점이다.⁽⁴⁾

2. 이론적 배경

2.1 전기삼투전위장

전해질(Electrolyte)이 다공성유리(SiO₂-80% 함유)와 같은 고체표면과 접하게 되면 표면 일부의 기(Group)가 이온화되거나, 고체표면에 존재하는 결정격자를 구성하는 이온이 주변의 다른 이온과 동형 치환(Isomorphous substitution)을 하게 되어 표면이 전하를 띠게 된다. 고체표면이 전하를 띠게 되면 전해질 내부의 반이온(Counter ion)들은 고체 표면 근처로 끌어당겨서 표면에 전기적 이중층(EDL, Electrical double layer)을 자연스럽게 형성하게 된다.⁽⁵⁾

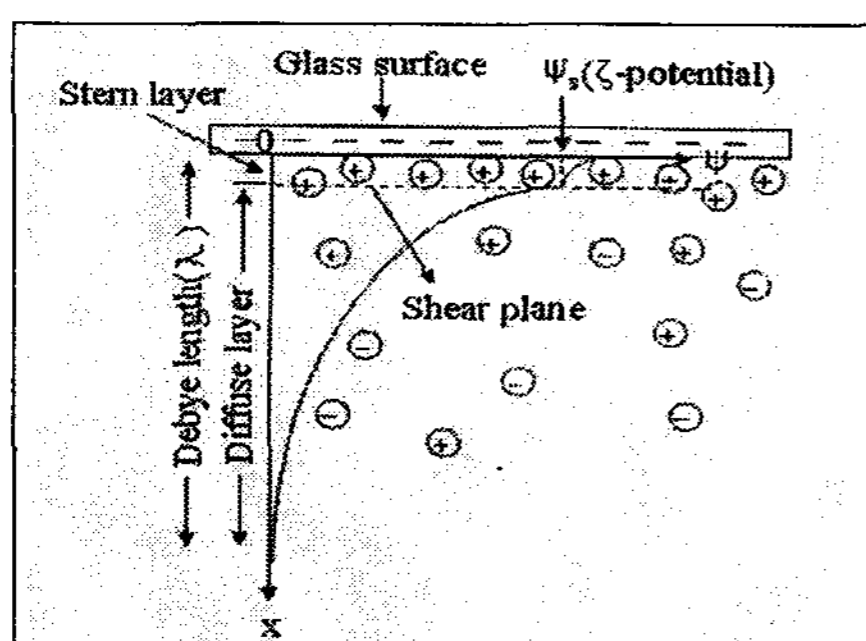


Fig.1 Micro-Channel에서의 전기적 이중층 전위장

전기적 이중층(EDL)의 전기적 특성을 결정하는 중요한 인자는 스텐층(Stern layer)과 확산층(Diffuse layer)사이의 전기삼투전위인 제타 전위(ζ, Zeta Potential)이다⁽⁶⁻⁷⁾.

제타-전위와 다바이실딩길이(λ_D)를 포함한 EDL의 특성들은 이온의 전도성, pH, 농도와 고체/액체 표면에 화학적인 성질에 제한 받는다. 전기삼

투는 전해질의 체적운동에 연관이 있고, 그 전해질은 외부적으로 적용된 전기장에서 EDL에 가해진 쿨링 힘에 의해 발생된 것이다. EO펌프는 다공성 유리의 micron size로 전기삼투효과를 얻도록 평행한 다채널로 구성되어 있다.

2.2 수소와 산소의 촉매 재결합(Sodium borate buffer)

단순한 디자인을 하기 위해, 저농도인 수성버퍼(Aqueous Buffers)와 비활성인 백금전극을 사용하였다. 전극반응을 위해서 2H₂O → 2H₂(g) + O₂(g)의 반응에서 물의 전기분해를 단순하게 한다. 이 가스는 시스템을 통한 부피유량의 작은 부분이라는 것을 주의한다. 가스상(Gas Phase)에서 온도T, 압력P 조건에서 펌프내 H₂와 O₂의 부피유량은 유도전류에 의하여 평가되어진다.

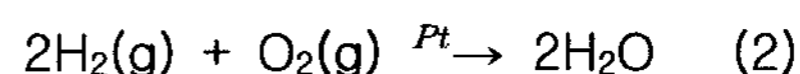
$$Q_{H_2} = \frac{1kT}{2eP}, \quad Q_{O_2} = \frac{1kT}{4eP},$$

γ는 펌프에서 물의 부피유량에 가스의 총 부피유량비를 사용했다.

$$\gamma = \frac{3\mu\sigma_{\infty}kT}{4\epsilon\zeta ePg} \quad (1)$$

1mM(Sodium ion concentration, pH9.2정도)붕산나트륨버퍼와 30V의 제타-전위값, 부피유량은 0.04(작동조건 20℃와 1 대기압으로 가정)에서 기공지름 1.1μm를 가진 EO펌프이다. 액체유량에 수소부피 유량비는 2.6%이다. 가스유량의 보존성 평가(conservation estimates)는 전해액에서 가스용해를 무시한다는 것을 주의한다.

전기분해가스는 Open System에서 배출되고, 이 반응은 작동액체로 결국 소멸될 것이다. Closed System에서 차단된 가스는 펌프의 압력이 증가하고, 전류와 질량유량을 차단할 수 있다. 가스의 발생 문제를 다루기 위해, 액체에서 수소와 산소의 재결합시키기 위해 백금촉매를 사용하는 촉매 재결합방식을 발전 시켰다.⁽⁴⁾



2.3 유효 펌프의 전압

DC모드로 Power Supply에서 공급된 펌프의 전위를 설명하면, 제타-전위는 Dybye-Huckel의 근

사가 유효한 정도로 낮고 (~50mV or Less), 시스템의 평행한 판을 가정한 EO펌프 채널의 모서리 근처에서만 유효하지 않아서, 주어진 이런 가정으로 스토크스(Stokes)유동에 관한 방정식을 가지고 시작한다.⁽⁸⁾

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

경계조건들은

$$BC1: u(0) = u(2h) = \frac{-\epsilon\zeta E}{\mu}$$

$$BC2: \frac{\partial u}{\partial y}(h) = 0$$

그 경계면(slip plane)에서의 전기상투속도로 알려져 있고 최대속도는 ζ -전위와 전기장E에 의해 달성된다. 그리고 한 채널에서의 유동속도는 (per parallel plate width, w) 유한한 압력 강하를 가정한다.

$$\frac{dp}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{Q}{w} = \frac{-2h^2}{3\mu} \frac{dp}{dx} - \frac{2\epsilon\zeta V_{eff}h}{\mu L}$$

여기서 Q는 유량, h는 채널높이의 반, μ 는 점도, ϵ 는 전해질의 유전율, L은 채널길이(pump thickness), 그리고 V_{eff} 는 유효전위(Effective potential)이다. EO펌프에 적용된 유효전위는

$$V_{eff} = V_{app} - V_{dec} - 2R_d I_{Eo} \quad (5)$$

여기서 V_{app} 는 적용된 전위(Applied potential)이고, V_{dec} 는 펌프의 전극/전해질에 전극반응과 결합된 분해전위(Decomposition potential)이고, R_d 은 펌프 저항에 대한 전극이고, I_{Eo} 는 EO펌프를 통과하는 전류다.

$$V_{app} = V_{cat} - V_{an} + V_0 \quad (6)$$

여기서 V_{cat} 와 V_{an} 는 각각 양극(anode)과 음극(cathode)에서의 Faraday Current 원리에서 이론적 전위차이다. V_0 는 전극/전해질에서 결합과 분해반응을 시작하여 실행이 요구된 추가적 전위(overvoltage or overpotential)이다. 전극/버퍼 결합을 위해서 ($V_{cat} - V_{an}$)의 크기는 V_{dec} 와 비교하여 전형적으로 작다. 우리는 펌프성능을 평가하기 위해 압력과 유량의 측정을 비교하여 펌프의 전류 I_{Eo} , 결합전위 V_{dec} 의 측정된 값을 식(5)와 식(6)에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 다공성유리를 사용한 소형 EO펌프를 제작하여 실험을 수행하였다. EO펌프는 일반적으로 부피나 적용 전압이 클수록 유체의 속도, 유량, 전류와 압력이 증가한다고 알려져 있다. 그러나 본 연구의 목적은 휴대용 펌프 제작에 중점을 두고 있고 전압 및 펌프 크기가 작아짐을 목적으로 하였으므로 다공성유리의 평균 기공 지름을 0.25-2.0 μ m의 중간인 1.1 μ m를 선택하였다.

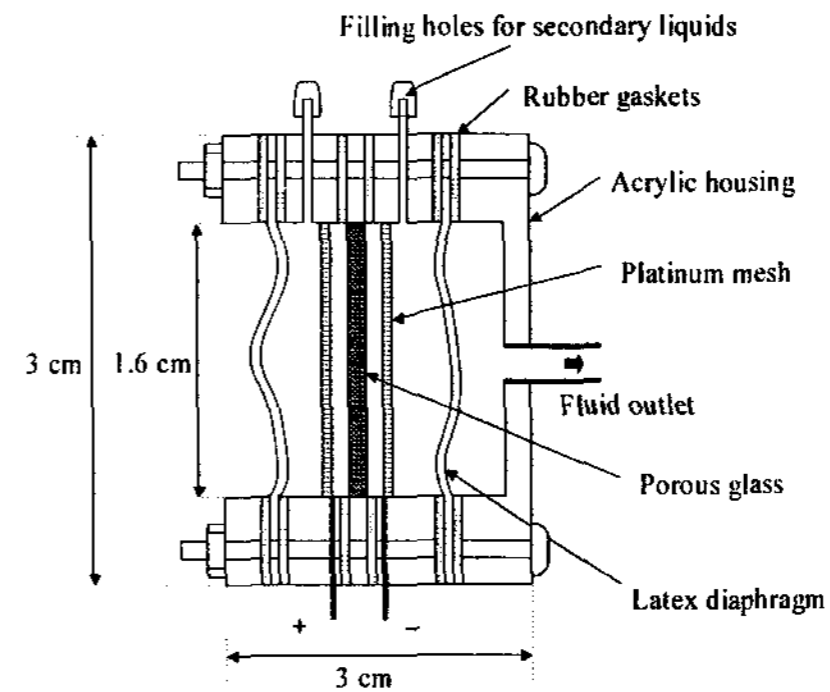


Fig. 2 EO pump시스템의 개략도

막(Latex Diaphragm)은 전해액과 약품을 분리한다. 양극(anode)부분은 저압력이 되고 음극(cathode)부분은 고압력이 된다. 그래서 내부 압력의 증가로 약물이 배출구로 이동하게 된다.

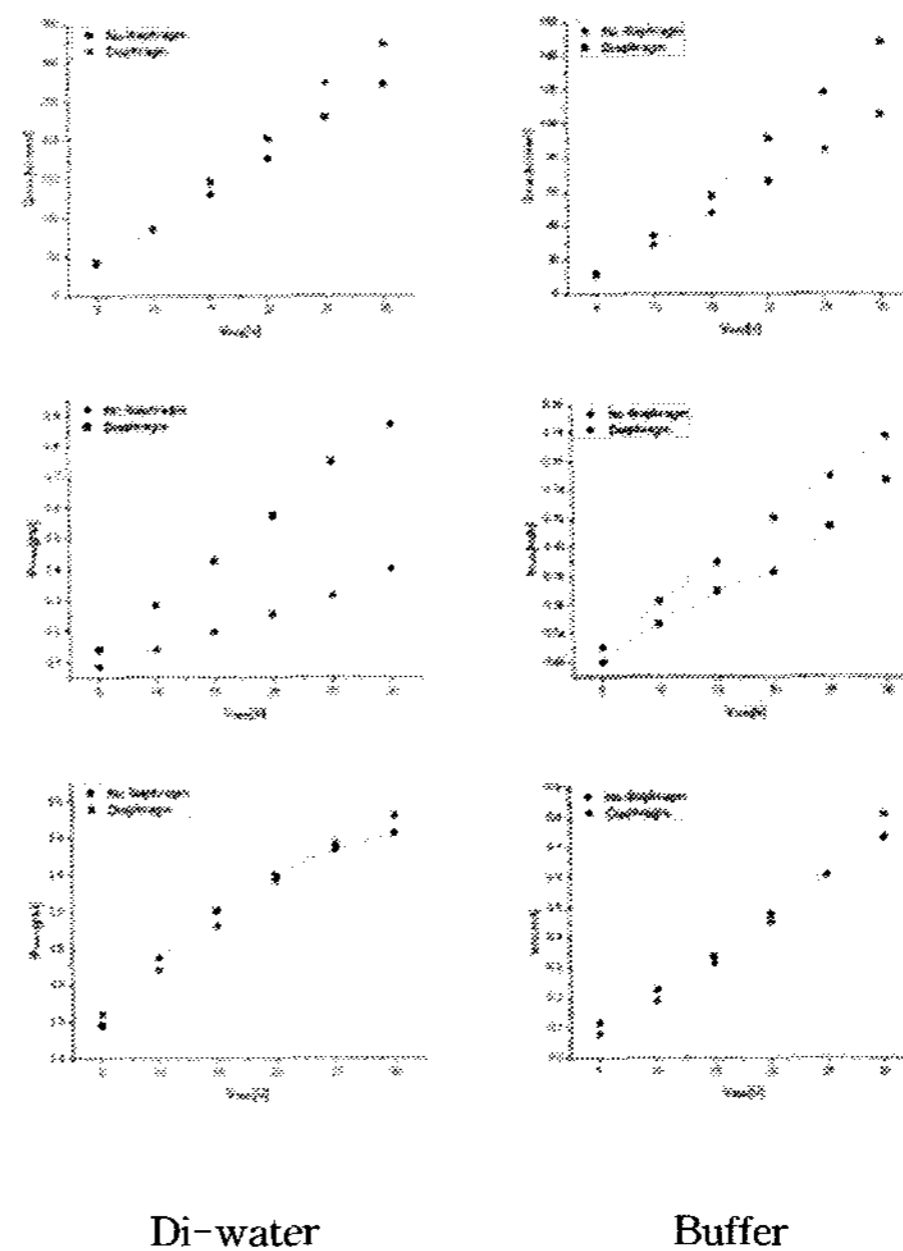


Fig.3 EO Pump 성능 그래프

그것은 기공의 사이즈가 압력, 유량, 전류에 큰 영향을 미치기 때문이다. 즉 기공사이즈가 크면 고압력을 얻을 수 있고 반대로 기공사이즈가 작을수록 유량과 전류의 값이 증가한다. 이러한 원리를 기초로 EO펌프를 약물이송용 펌프로 적용할 수 있을 것이다. 작동유체 조건으로는 탈이온수(Deionized water, DI)로 단순 구동할 때와 버퍼(Buffer, pH9.2)를 사용했을 때에 대하여 약물전달을 위한 격막(latex diaphragm)의 유무에 대해 실험을 수행하였다.

여기서 격막을 사용한 이유는 Fig. 2 에서 양극에 있는 부분은 대기압부(빈공간)이고 음극에 있는 부분이 약물저장부이다. 우리가 성능을 측정할 결과 격막이 있을 때와 없을 때, 모두 전압 상승에 따른 유량과 압력, 전류가 증가하였음을 알 수 있었다. 또한 격막이 있을 경우가 전압에 따른 수치들이 높았지만, DI-Water(No Diaphragm)에서의 전압에 따른 전류 값에서는 격막이 없는 경우가 높은 수치를 나타남을 알 수 있다. 미세펌프의 제작 목적으로 DI-Water와 Buffer에서 저전압의 성능을 평가하면 유량은 같지만, 격막이 있을 때 압력의 수치가 크고, 격막이 없을 때는 전류의 수치가 큼을 알 수 있었다.

유효전압(V_{eff})은 공급된 전압의 20-25%로 나타나고 전압이 클수록 유효전압은 조금씩 낮아지며 그 수치는 무시할 수 있을 정도이다. 여기서 제타 전위의 측정 수치를 정확하게 얻지 못하였지만, 고압의 조건일수록 제타 전위의 수치가 집중적으로 높아진다. 실험에서 버퍼를 사용함으로써 펌프의 유량, 전류 및 압력이 향상됨을 알 수 있다. 다공성 유리의 두께가 얇으면 유량은 증가하더라도 압력 및 전류에 미치는 영향은 적을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 다공성 유리 슬릿 EO펌프 기

초 성능 측정 실험에서 버퍼를 사용함으로써 펌프의 유량, 전류 및 압력 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 향후 앞으로 다공성유리 또는 격막(latex diaphragm)의 영향에 대한 보다 체계적인 성능 평가 및 최적화가 연구가 필요하며, 또한 휴대용 디자인을 위해 초소형화 제작을 통해 부피를 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

■ 참고문헌 ■

- (1) Probstein, R. F., 1994, Physicochemical hydrodynamics, Wiley, New York.
- (2) D.H. kim, 2004, Microfluidic Systems, State of the Art.
- (3) Li. D. Q., 2004, Electrokinetics in microfluidics, Academic, Oxford.
- (4) S. Yao. David E. Hertzog., 2003, Porous glass electroosmotic pump; design and experiment, Journal of Colloid and interface Science 268, pp. 143-153.
- (5) A. Brask, H. Bruus, J.P. Kutter, Long-term stability for frit-based EO pumps under varying load conditions using ion exchange membranes with controlled diffusion layer width, Proceedings of the Micro-Tas 2004, 2, Malm, Sweden, pp. 136-138.
- (6) S.D. Han and S. J. Lee, 2006 Measurement of Zeta-potential of Electroosmotic Flow of a Micro-channel.
- (7) A. Szymczyk, P. Fievet, M. Mullet, J.C. Reggiani, J. Pagetti, 1998, Comparison of two Electokinetic Methods- Electroosmosis and Streaming Potential- to Determine the Zeta-potential of plane ceramic Membranes, Journal of Membrane Science, 143. pp. 189-195.
- (8) R.B. Cellen, B. Yoav, T. Chuyang, 2006, A Microfabricated Direct Methanol Fuel cell with Integrated Electroosmotic Pump. pp. 398-941.