

역삼각형 모양을 갖는 마이크로 채널에서의 전기역학적 흐름전위 검출

조성식 · 박제균[†]

Electrokinetic streaming potential detection in a triangular-shaped microchannel

Seong-Sik Jo and Je-Kyun Park[†]

Abstract

We report electrokinetic streaming potential detection in a microchannel. Streaming potential, one of the representative electrokinetic phenomena, becomes noticeable either when the channel size reduces or when the concentration of electrolyte reduces. We suggest a triangular-shaped microchannel to enhance streaming potential. The triangular-shaped microchannel shows better performance than the straight one in terms of streaming potential. Couple of possible methods to enhance streaming potential is also discussed. Moreover, this type of channel and phenomenon can be applied to biological sensor application and energy transduction.

Key Words : electrokinetics, streaming potential, microfluidics

1. 서 론

미세채널에서 유체를 다루고 검출하는 기술은 최근 미세종합분석시스템(micro-total analysis system, μ TAS)에 대한 관심이 증가하며 관련 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 특히 전기삼투현상과 전기영동현상 등과 같은 전기역학적 방법은 간편하게 시료의 조작 및 처리가 가능한 수단을 제공하여 관련 연구가 폭넓게 이루어져 왔다^[3,4].

전기역학적 흐름전위(streaming potential)는 전기역학에서 발견되는 대표적인 현상으로 전기영동, 전기삼투와는 달리 유체나 입자의 운동이 전기장을 유도하는 특징이 있다. 흐름전위의 발생은 전기이중층(electrical double layer, EDL)의 형성과 밀접한 관련이 있다. EDL과 관련된 요소는 여러가지가 있으나 특히 흐름전위의 관점에서는 유체에 포함된 이온의 농도, 유체가 통과하는 미세채널의 표면전하분포 및 기하구조, 유체에 가해지는 압력과 큰 관련을 갖는다. 따라서 유체 내

의 생체시료존재 여부와 채널의 구조를 취하는 방식에 따라 생체시료의 검출이나 유체 운동에너지의 변환 등에 적용이 가능하다^[5-8].

본 논문에서는 흐름전위의 효과적인 검출을 위해서 특히 흐름전위와 압력 간의 관계에 집중하여 미세채널의 구조를 변화 시키는 방법으로써 역삼각형 형태의 채널을 제안하고 일자형태의 채널과의 비교를 통해 그 성능을 비교하였다.

2. 본 론

2.1. 흐름전위의 발생기작

미세채널내로 전해질을 포함하는 유체가 통과할 때 미세채널 벽면에 존재하는 전하와 반대 극성을 가지는 유체 내의 이온들이 채널벽면에 쿨롬 인력 등의 원인으로 흡착되면서 그림 1과 같이 스텐층(stern layer)과 확산층(diffuse layer)로 구성되는 전기이중층이 형성된다. 전기이중층의 형성에 의해 벽면 부근에 존재하는 이온과 반대 극성을 갖는 이온들의 농도 구배가 유체의 유입구와 유출구에서 교란되게 되며 반대 극성의 이온들이 유출구에 누적됨으로써 유입구-유출구 양단에는 흐름전위가 발생하게 된다.

한국과학기술원 바이오시스템학과 (Department of BioSystems, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

[†]Corresponding author: jekyun@kaist.ac.kr

(Received : December 29, 2006, Accepted : February 13, 2007)

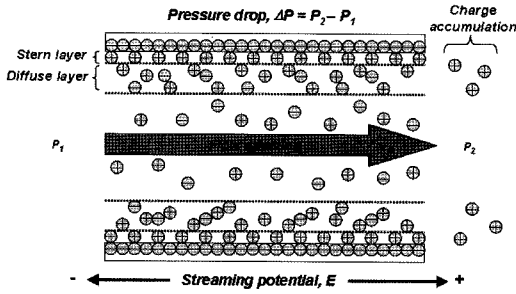


그림 1. 흐름전위 발생 기작 모식도
Fig. 1. Schematic diagram of streaming potential development.

미세채널 내부의 전위 분포는 다음과 같은 Poisson-Boltzmann 방정식으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\nabla^2 \Psi = \kappa^2 \sinh \Psi \quad (1)$$

이때 κ 는 드바이거리(Debye length) 역수로서 EDL의 두께이며 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{2n_b Z^2 e^3}{\epsilon k T} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

여기서 n_b 는 전해질 내의 이온 농도, Z 는 이온의 원자가, e 는 전자의 전하가, ϵ 는 전해질용액의 유전상수이며 k 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도이다.

또한 Ψ 는 정규화된 채널 내의 전기포텐셜로서 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi = Ze\psi/kT \quad (3)$$

여기서 ψ 는 EDL 효과에 의해 유기되는 전기포텐셜이다.

흐름전위와 유체에 가해지는 압력 간의 관계는 가장 간략한 형태의 Helmholtz-Smoluchowski 방정식으로써 다음과 같이 표현할 수 있다¹⁰⁾.

$$E = \frac{\epsilon \zeta}{\eta \lambda_0} \Delta P \quad (4)$$

여기서 ζ 는 제타전위, η 는 유체의 점도, λ_0 는 유체의 전기전도도이다.

이상의 논의로부터 유체 내의 이온 농도, 미세채널의 기하구조, 유체의 압력 구배 등이 흐름전위에 영향을 미치는 중요한 요소들임을 알 수 있다. 본 논문에서는 poly(dimethyl-siloxane)(PDMS)-유리로 이루어진 미세채널을 구성하고 흐름전위와 압력 간의 관계에 집중하여 미세채널의 구조를 변화 시키는 방법을 통해 흐름전위의 크기를 향상시키고자 하였다.

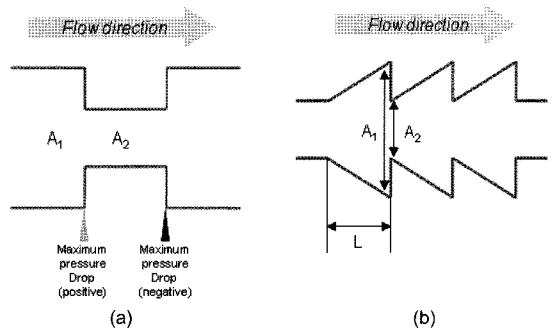


그림 2. 유체압력강화를 위한 이론적 구조: (a) 노즐 구조, (b) 역삼각형 구조

Fig. 2. Theoretical structures for enhanced pressure drop: (a) nozzle structure and (b) triangular structure.

2.2. 채널 설계

큰 압력강화를 유도하기 위해서 역삼각형 형태의 채널구조를 적용하였다. 이론적으로 그림 2(a)와 같은 노즐구조가 채널 단면적이 급격히 변화하는 노즐단에서 최대유체저항을 구성하게 된다. 이때의 최대유체저항은 간략히 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$R_{nozzle} = k \left[\left(\frac{1}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{A_1} \right)^2 \right] \quad (5)$$

여기서 k 는 유체의 밀도와 유량을 포함하는 상수이다. 식 (5)로부터 채널구조의 변화에 의해 유도되는 유체저항은 채널의 단면적의 역수의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 노즐구조를 연속적으로 배열한다고 가정하였을 때 유체저항이 최대화된 후 다음 단에서 바로 부의 유체저항을 구성하게 되어 효과가 상쇄되므로 전체 유체저항은 단순히 채널의 단면적과 길이에만 관계되고 구조에 의한 효과가 사라지게됨을 알 수 있다. 이러한 효과를 막기 위하여 그림 2(b)와 같은 역삼각형 구조를 고안하였다. 역삼각형 구조는 유체저항이 부의 값을 갖지 않으면서 삼각형 양변의 기울기에 비례하여 일차함수적으로 변화하므로 급격한 저항의 변화를 막을 수 있다. 더불어 전체 저항은 채널단면적과 길이에 의해 형성되는 저항과 노즐단에서 유도되는 유체저항의 합으로 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$R_{total} = n \left[\alpha \int_0^L \frac{dl}{A^2} + R_{nozzle} \right] \quad (6)$$

여기서 n 은 역삼각형의 반복회수, α 는 유체의 점성과 채널단면형태에 관계된 상수이며, A 는 채널단면적을 일변화한 변수로 채널유�효반지름의 함수로서 채널내의 위치에 따라 변화하고, l 은 채널내에서의 위치이다.

2.3. 채널 제작

채널구조에 따른 흐름전위 발생 양상을 관찰하기 위하여 역삼각형 형태가 반복적으로 나타나는 구조를 갖는 채널과 일자 형태의 채널을 제작하였다. 미세채널의 제작을 위하여 소프트 리소그래피 방법을 사용하였다. 채널 몰드의 제작을 위해 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8을 이용한 채널 구조를 형성하였다. 완성된 몰드에 PDMS를 부어 채널을 형성하였다. PDMS를 이용해 제작한 채널은 슬라이드 글래스에 부착하였다. 완성된 채널의 형상은 그림 3와 같다. 채널의 크기는 일자채널의 경우 높이 5 μm , 폭 10 μm , 길이 6 mm이며, 역삼각형 채널의 경우 높이 5 μm , 최장폭 50 μm , 최단폭 10 μm , 길이 6 mm이다.

흐름전위를 검출하기 위하여 한 쌍의 Ag/AgCl 전극을 채널의 양끝단에 삽입하였다. Ag/AgCl 전극은 실험실에서 직경 100 μm 의 은선(99.99% Ag wire, Nilaco corp. Japan)을 이용하여 직접 제작하였다. Ag/AgCl 전극의 제작을 위해 은선과 백금(Pt)전극을 500 mM KCl 수용액에 담그고 20 mA/cm²의 전류를 20분간 흘려주었다.

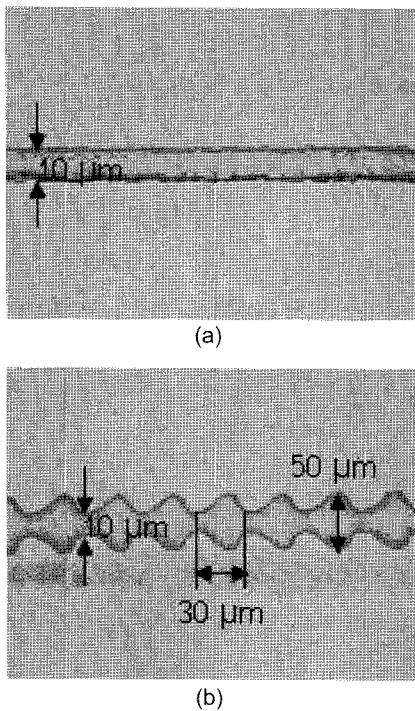


그림 3. 미세채널의 형태. 채널 높이는 5 μm 이다: (a) 일자 채널, (b) 역삼각형 채널
Fig. 3. The shapes of the microchannel: (a) the straight channel and (b) the triangular-shaped channel.

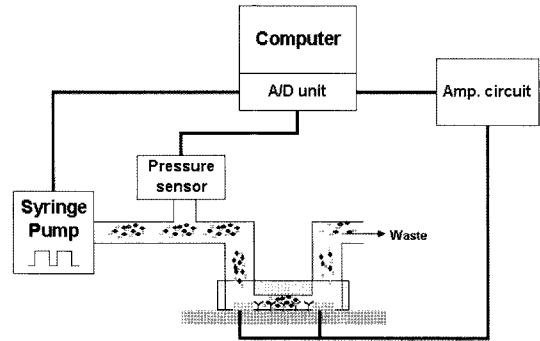


그림 4. 흐름전위 검출을 위한 실험 구성
Fig. 4. Experimental setup for streaming potential detection.

2.4. 실험 장치의 구성

흐름전위의 검출을 위하여 그림 4과 같은 시스템을 구성하였다. 유체는 시린지 펌프(Pico plus; Harvard apparatus, USA)를 통해 PDMS 채널 내로 주입되며 이 때 발생하는 흐름전위는 Ag/AgCl 전극을 통해 측정되었으며, signal conditioning 및 증폭을 위한 증폭 회로를 거쳐 측정되었다. 연속적인 측정을 위하여 AD 변환 유닛(DAQPad-6016; National Instruments, USA)을 사용하여 컴퓨터를 통해 데이터를 수집하였다.

2.5. 실험 결과

흐름전위의 측정을 위해 1:1 전해질인 KCl 수용액을 사용하였으며 농도 및 유속의 변화에 따른 흐름전위의 발생 양상을 관찰하였다.

1 mM, 100 μm , 10 μm , 1 μm , 100 nM의 농도를 갖는 KCl 수용액을 각각 0.1 ml/hr, 0.4 ml/hr, 0.7 ml/hr, 1 ml/hr의 유속으로 흘려보냈을 때 발생하는 흐름전위를 측정하였다. 삼각형 형태의 채널에서 측정한 결과가 그림 5(a)이며 일자채널에서의 결과가 그림 5(b)이다. 결과에서 볼 수 있듯이 동일 유속, 동일 농도에서 역삼각형 형태 채널에서의 흐름전위가 25~100% 정도 향상된 것을 알 수 있다. 이는 유체저항은 큰 채널에서 작은 채널로 연결되는 부위에서 극대화되며, 역삼각형 형태가 이러한 특성을 지니기 때문이다. 즉 삼각형 형태가 압력을 강제로 강하하는 효과를 내고, 결과적으로 같은 길이를 갖는 일자채널에 대해서 더 큰 유체 저항을 구성함으로써 압력 구배가 더 크게 나타나기 때문이다.

단위길이에서 발생하는 유체저항을 개략적으로 계산해봄으로써 실제적인 효과를 알 수 있다. 유체저항은 역삼각형 채널에서 발생할 수 있는 와류 효과를 무시했을 때 동일 유체에 대하여 채널단면적과 길이에 의해서만 변화한다. 따라서 유체의 점성, 밀도 등과 같은

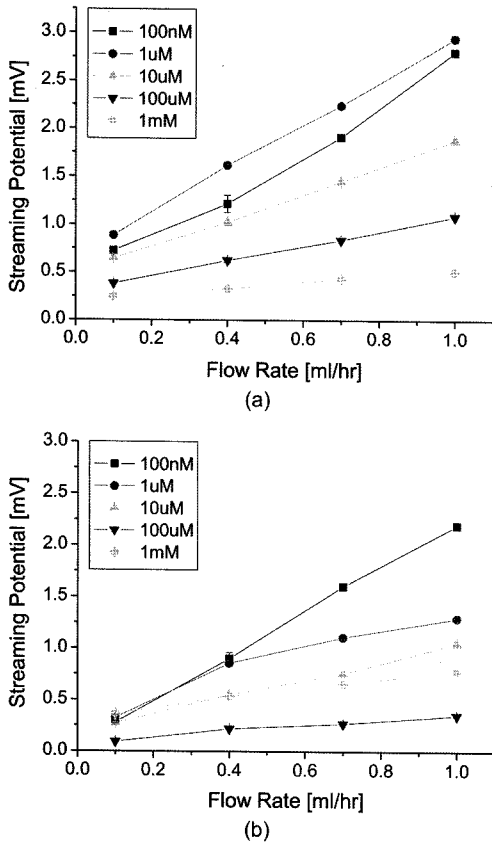


그림 5. 역삼각형 형태 채널과 일자 채널에서 발생하는 흐름전위의 비교: (a) 역삼각형 형태 채널에서 발생하는 흐름전위, (b) 일자 형태 채널에서 발생하는 흐름전위

Fig. 5. Comparison between the triangular-shaped channel and the straight channel: (a) The streaming potential in the triangular-shaped channel and (b) The streaming potential in the straight channel.

다른 물리량들을 상수로 두고 식 (6)을 이용하면 개략적으로 그 비율을 계산할 수 있다. 유체의 유속을 Q 라 하고 $30\ \mu\text{m}$ 길이에 대해서 각 채널구조의 유체저항을 계산해보면 일자채널에 대해서는 약 1.20, 역삼각형 채널에서는 약 $(1.21 + 0.05Q)$ 의 값을 얻을 수 있다. 즉 역삼각형 채널에서 유도되는 유체저항은 유량에 따라 변화하는 양의 값을 가지게 되어 유속이 빨라질수록 일자채널보다 더 큰 압력강하를 가져오게 된다.

역삼각형 채널의 경우에 특히 $1\ \mu\text{M}$ 과 $100\ \text{nM}$ 의 농도에서 흐름전위의 발생양이 뒤집힌 것을 알 수 있다. 이는 역삼각형 형태에서 예상되는 와류현상에 의한 것으로 보인다. 또한 흐름전위의 향상도와 채널구조와의 관계를 명확히 하기 위해서는 이러한 와류현상 뿐 아

니라 채널벽면에서 발생하는 전해질과 표면의 상호작용에 대한 추가적인 연구 및 고려가 필요하다.

흐름전위의 크기를 향상시키기 위한 방법으로써 본 논문에서는 채널 구조에 변화를 주는 방법을 이용하였으나 이 외에도 몇 가지 방안을 더 생각해 볼 수 있다.

우선 이론적인 측면을 살펴보기 위해 앞서 기술한 Poisson-Boltzmann 방정식에 Poisson 방정식의 원래 형태를 대입해보면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\kappa^2 \sinh \Psi = -\rho_e / \epsilon = -\nabla^2 \Psi \approx \nabla \cdot (\nabla \Psi) \approx -\nabla \cdot E \quad (7)$$

여기서 ρ_e 는 표면전하밀도, E 는 전계를 나타낸다. 위 식의 왼쪽 부분은 Boltzmann 방정식이고 오른쪽 부분은 Poisson 방정식이다. Poisson 방정식의 전하밀도 표현을 이용하여 Boltzmann 방정식과 전하밀도와의 관계와 매질 및 채널재료와의 상관관계를 얻을 수 있다. 또한 전계 변형식을 통해서 Boltzmann 방정식과 전계와의 상관관계를 얻을 수 있다. 위 방정식으로부터 흐름전위의 크기를 향상시킬 수 있는 두 가지 단서를 얻을 수 있다:

- 1) 표면의 전하밀도 또는 매질의 유전상수를 바꿈으로써,
 - 2) 외부의 전계 인가를 통해 채널 내부의 전계 변화를 유도함으로써 흐름전위를 변화시킬 수 있다는 점이다.
- 표면의 전하밀도에 대해서는 채널 내벽의 변조 또는 기능화를 통해 이와 같은 효과를 기대할 수 있으며, 매질에 대해서는 전해질의 선택 문제를 고려해볼 수 있다. 외부전계인가에 대해서는 유체 흐름에 수직인 방향의 전계 인가를 통해 전기이중층의 특성에 변화를 줄 수 있다는 점을 고려할 수 있다.

이상의 논의로부터 흐름전위 향상을 위한 방안을 정리해보면 본 논문에서 시도한바와 같은 구조적인 변형을 가하는 방법, 표면전하에 변화를 주는 방법, 전해질의 선택, 외부 전계 인가를 통한 전기이중층의 변형 등으로 요약할 수 있다. 구조적인 변화를 주는 방법으로는 본 논문에서 시도한 바와 같이 채널의 기하구조를 바꾸는 방법과 나노규모의 채널을 사용함으로써 전기이중층의 강제적인 겹침 효과를 고려해 볼 수 있다. 그러나 나노규모의 채널을 사용하는 경우에는 전기이중층이 전하를 띤 입자의 흐름을 방해할 수 있으므로 바이오센서와 같은 목적으로의 사용을 위해서는 추가적인 고려가 필요할 것으로 본다. 표면전하에 변화를 주는 방법으로는 채널을 구성하는 물질의 선택을 달리하거나 채널 내벽의 변조 또는 기능화 하는 방법을 검토할 수 있다. 전해질의 선택에 대해서는 본 논문에서는 1:1 전해질을 사용하였으나 다가의 이온(multivalent ion)을 갖는 전해질을 사용하거나 이온의 이동도 차이를 고려한 전해질의 선택을 검토할 수 있다. 외부 전계를

인가하는 방법을 위해서는 MEMS 공정을 통해 전극을 배치함으로써 유체의 흐름과 수직한 방향으로 전계를 가하여 전기 이중층의 두께를 변조하거나 극성을 바꾸는 방법을 고려할 수 있다. 이상의 방법들을 통해 채널에 발생하는 흐름전위의 크기 향상을 도모할 수 있으며 응용목적 및 방법에 따라 적합한 방법을 선택할 수 있을 것으로 생각한다. 다만 각 방법의 효과 및 효율성에 대해서는 추가적인 연구를 통한 검증이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기역학적 흐름전위의 효과적인 검출을 위하여 역삼각형 형태의 채널을 제안하였다. 역삼각형 형태의 채널에서 발생 발생하는 흐름전위의 크기는 전해질의 농도와 상관없이 일자 형태 채널과 비교하여 약간 높은 값을 보임으로써 향상된 흐름전위를 검출할 수 있었다. 흐름전위의 크기를 향상시키기 위한 방법으로는 채널의 구조적인 변화, 채널 표면전하의 변화, 전해질의 선택, 외부 전계 인가 등의 방법을 고려할 수 있으며 각 방법의 효과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 본 논문에서 제안한 채널형태는 향후 바이오센서나 에너지 변환 등의 목적으로 응용될 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한국생명공학연구원의 기본사업에 의하여 수행중인 초빙연구과제(사업) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] K. S. Yun, D. Lee, H. S. Kim, and E. Yoon, "Microbead-

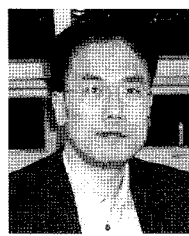
based bio-assay using quantum dot fluorescence in a microfluidic chip", *J. Kor. Sens. Soc.*, vol. 14, no. 5, pp. 308-312, 2005.

- [2] Y. K. Hahn, J. H. Kang, K. S. Kim, and J. K. Park, "Microfluidic immunoassay using superparamagnetic nanoparticles in an enhanced magnetic field gradient", *J. Kor. Sens. Soc.*, vol. 15, no. 3, pp. 158-163, 2006.
- [3] D. Reyes, D. Iossifidis, P. Auroux, and A. Manz, "Micro total analysis systems. 1. Introduction, theory, and technology", *Anal. Chem.*, vol. 74, pp. 2623-2636, 2002.
- [4] D. Reyes, D. Iossifidis, P. Auroux, and A. Manz, "Micro total analysis systems. 2. Analytical standard operations and applications", *Anal. Chem.*, vol. 74, pp. 2637-2652, 2002.
- [5] M. Ueda, Y. Takamura, Y. Horike, and Y. Baba, "Molecular detection in a microfluidic device by streaming current measurements", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, pp. L1275-L1277, 2002.
- [6] A. Miyabayashi and B. Mattiasson, "A dual streaming potential device used as an affinity sensor for monitoring hybridoma cell cultivations", *Anal. Biochem.*, vol. 184, pp. 165-171, 1990.
- [7] J. Yang, F. Lu, L. Kostiuik, and D. Kwok, "Electrokinetic microchannel battery by means of electrokinetic and microfluidic phenomena", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 963-970, 2003.
- [8] M. Chun, M. Shim, and N. Choi, "Fabrication and validation of a multi-channel type microfluidic chip for electrokinetic streaming potential devices", *Lab Chip*, vol. 6, pp. 302-309, 2006.
- [9] S. Levine, J. Marriott, G. Neale, and N. Epstein, "Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries of high zeta-potentials", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 52, pp. 136-149, 1975.
- [10] R. Probstein, *Physicochemical Hydrodynamics 2nd ed.*, Wiley & Sons, New York, pp. 230-233, 2003.



조 성 식

- 1973년 12월 31일생
- 1998년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
- 2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 (전기 및 전자공학전공) 졸업(공학석사)
- 현재 한국과학기술원 바이오시스템학과 박사과정 재학중
- 주관심분야 : 바이오센서, microfluidics, MEMS 디스플레이, 유기전자



박 제 균

- 1986년 서울대학교 식품공학과 졸업 (농학사)
- 1988년 서울대학교 식품공학과 졸업 (농학석사)
- 1992년 한국과학기술원 생물공학과 졸업 (이학박사)
- 현재 한국과학기술원 바이오시스템학과 부교수
- 주관심분야 : 나노바이오센서, BioMEMS, Microfluidics