

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.523

박테리아의 주화성에 의한 미세입자의 운동§

김동욱* · 김영원** · 유정열*†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 서울대학교 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단

Motion of Microbeads Propelled by Bacterial Chemotaxis

Dong Wook Kim*, Young Won Kim** and Jung Yul Yoo*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

** BK21 School for Creative Engineering Design of Next Generation Mechanical and Aerospace System, Seoul Nat'l Univ.

(Received January 7, 2010 ; Revised March 25, 2010 ; Accepted March 25, 2010)

Key Words: Bacterial Chemotaxis(박테리아 주화성), Microbead(미세입자), Microfluidic Platform(마이크로유체 역학적 플랫폼), μ-PTV(마이크로입자 추적유속계)

초록: Micro actuator의 동력원으로 박테리아 주화성을 기반으로 한 편모박테리아 운동은 널리 연구되고 있다. 본 연구에서는 마이크로입자 추적유속계(μ-PTV)를 이용하여 박테리아 주화성에 의해 추진되는 형광입자의 움직임을 분석하였다. 일반적으로 활발한 운동성을 지니고 있는 편모 박테리아 중 *Serratia marcescens*가 배양액 속에서 형광 폴리스티렌 미세입자 표면에 자발적으로 붙게 된다. 박테리아가 부착된 미세입자를 고형화된 화학적 유인물질 L-aspartate가 담겨져 있는 유체 속으로 주입하고, 시간에 따라 입자들이 서서히 L-aspartate가 높은 농도를 가지는 구역으로 이동하는 것을 관찰하였다. 본 연구의 결과로 편모박테리아가 micro actuator의 효율적인 동력원 개발에 적용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Abstract: Recently, several research groups have been investigating the motion of flagellated bacteria, with the aim of examining the feasibility of using bacterial chemotaxis as an efficient power source for microactuators. In this study, microparticle-tracking velocimetry (μ-PTV) is used for investigating the motion of fluorescent microbeads propelled by bacterial chemotaxis. Flagellated bacteria, *Serratia marcescens*, are spontaneously attached to the surface of the fluorescent polystyrene (PS) microbeads in an aqueous culture. The microbeads thus treated are injected into the test medium, which contains the solidified chemoattractant L-aspartate. With time, the particles slowly move toward the zone in which the L-aspartate concentration is high. This study shows that chemotaxis of flagellated bacteria can be applied as an efficient power source for microactuators.

- 기호설명 -

- A_λ : 파장 λ 의 흡광도 (AU)
- λ : 파장(wavelength) (nm)
- L : 빛에 노출되는 시료의 길이(cm)
- T : 투과도
- I_0 : 광도의 참조값(mW)
- I : 시료의 광도(mW)
- OD_λ : 파장 λ 의 optical density(AU/cm)

1. 서론

편모 박테리아의 활발한 운동성은 생물학, 공학의 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 이러한 박테리아에는 우리가 흔히 알고 있는 정자나, e. coli 등이 포함되는데, 이들이 가지고 있는 편모는 20개 이상의 요소로 구성된 복잡한 구조이다. 이 편모는 박테리아에서 프로펠러와 같은 역할을 하며 편모의 시작 부분을 현미경으로 확대해서 관찰하면 모터와 같은 형상을 지니고 있다. 이러한 박테리아는 편모를 회전시킴으로써 이동하는데, 앞으로 움직이기 위해서는 편모를 반시계 방향으로 움직인다. 그리고 박테리아는 이동방향을 바꾸기 위해서는 편모의 회전방향을 갑자기 시계 방향으로 바꾸

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, jyoo@snu.ac.kr

며 원래의 방향에서 몸체를 구른 다음 방향을 조정한다. 이러한 박테리아는 다른 동물들이 먹이가 많은 곳으로 이동하는 것과 마찬가지로 자신의 음식을 찾아서 이동한다. 이러한 박테리아의 움직임은 화학적 유인물질에 의해서도 유발시킬 수 있으며 박테리아는 화학적 유인물질의 농도가 높은 쪽으로 이동한다. 이를 박테리아의 주화성(bacterial chemotaxis)이라고 한다. 박테리아의 주화성은 그 성질에 따라서 양성과 음성으로 나뉘는데, 박테리아로 하여금 원하는 물질이 있는 방향으로 이동을 촉진하는 성질을 양의 주화성, 원하지 않는 물질로부터 멀어지는 방향으로 이동하는 성질을 음의 주화성이라고 한다. 이러한 성질을 지닌 박테리아 중에서 *Serratia marcescens*는 가장 강력한 움직임을 가지는 박테리아 중 하나로 알려져 있으며, 다른 편모 박테리아와 마찬가지로 편모를 회전시켜 스스로 추진한다. 박테리아의 운동성과 주화성은 이미 널리 연구가 되어 오고 있다. 그 중에서 특히 박테리아의 주화성은 박테리아의 성질 중 하나로, 많은 연구에서 박테리아 실험의 동기가 되고 있다. Park 등⁽⁵⁾은 박테리아의 주화성을 이용하여 박테리아를 원하는 곳으로 이동가능케 하는 제어기술의 가능성을 보였다. 어떤 특정한 위치에 화학적 물질을 위치시키고 박테리아들이 이 화학적 물질로 이동하는 것을 보였는데, 특히 이 연구에서는 박테리아가 미로와 같은 복잡한 채널 내부에서도 화학적 물질의 냄새를 맡고 찾아갈 수 있다는 것을 실험을 통해 보였다. 이러한 박테리아의 주화성을 통해 Pandey and Jain⁽⁶⁾은 환경오염물질을 제어할 수 있는 가능성이 있다는 것을 보였으며, Kim and Breuer⁽⁴⁾은 마이크로플루이딕 시스템 내부에서 편모 박테리아를 이용한 마이크로펌프를 선보이기도 하였다. 특히 Jeon 등⁽³⁾은 마이크로 채널 내에서 화학적 유인물질의 농도구배를 생성하여 농도가 높은 쪽으로 박테리아들이 이동하는 것을 보였으며, Steager 등⁽⁷⁾은 주화성 뿐만 아니라 자외선을 통해서도 박테리아의 움직임을 제어할 수 있다는 것을 보였다. Steager 등⁽⁷⁾은 박테리아가 소수성 표면인 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 좋아한다는 성질에 착안하여 박테리아를 PDMS 조각에 붙여서 PDMS 조각을 박테리아를 통해 움직이게 하고 회전하게도 하였다. 또한 박테리아가 자외선을 싫어한다는 성질을 이용하여 순간적인 자외선 노출을 통해서 이 조각의 움직임을 멈추게도 하였다. 또한 Behkam and Sitti⁽²⁾는 Steager 등⁽⁷⁾이 했

던 방법과 달리 PDMS 조각이 아닌 흔히 실험에 사용되고 있는 폴리스티렌 미세입자를 이용하였다. 이들은 박테리아 배양액 속에 이 미세입자를 넣어 박테리아들의 움직임에 따른 미세입자의 이동을 관찰하기도 하였으며, 플라즈마를 이용하여 미세입자의 표면에 박테리아가 거의 절반 정도만 붙게끔 하고 전체적으로 붙을 수 있게끔 하여 미세입자를 운동시키는데 성공하기도 하였다.

이렇듯 편모 박테리아를 이용하는 연구는 박테리아의 운동특성을 토대로 하여 마이크로 로봇 등의 actuator로 사용할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 또한 bio-actuator는 기존의 기계적 actuator들보다 훨씬 작고, 복잡한 움직임의 구현이 가능하며, 아주 효율적으로 화학적 에너지를 기계적 에너지로 변환시킨다는 점에서 장점을 가지고 있다. 그러나 박테리아를 직접적인 동력원으로 하는 연구는 현재까지 널리 연구되지 않고 있다. 한편, 이러한 박테리아를 이용하여 작은 물질을 단순하게 이동시키고 움직임을 멈추게 하는 정도의 연구는 성공적으로 이루어졌다. 그러나 작은 물체를 원하는 방향으로 이동시키는 연구는 현재까지 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 박테리아를 동력원으로 하여 미세입자를 원하는 방향으로 이동해 보고자 한다. 이를 통하여 화학적 유인물질을 이용하여 미세입자가 박테리아에 의해 방향이 제어될 수 있음을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

2.1.1 박테리아 배양

실험에 사용된 박테리아는 *Serratia marcescens*로 진한 붉은색의 색소를 생산하는 잡세균의 하나이다. 동물성·식물성 식품에 생기는 균으로, 면역학적으로 손상받은 환자에서는 심내막염 및 폐렴 따위를 일으킨다. 하지만 편모운동을 기반으로 하는 연구에서는 강력한 편모운동을 하는 박테리아 중 하나로 많이 이용되고 있다. 박테리아를 배양하기 앞서서 동결건조된 박테리아가 요구되며, 이는 앰플 형태로 존재한다. 이런 동결건조된 *S. marcescens*의 앰플은 서울대학교 미생물연구소(IMSNU-13029)에서 구입하였다. 동결건조된 박테리아는 배양기 안에서 배양되며 Nutrient

broth(N7519-250G, Sigma, USA) 에서 37°C, 150 rpm 로 6시간 정도 배양한 후 다시 Nutrient agar plate(213000, Difco, France)에서 37°C로 50시간 정도 배양한다. 이 후 실험에 사용할 박테리아는 Nutrient agar plate, 고체배지에서 배양된 박테리아 중에서 일부를 따서 액체배지(Nutrient broth)에서 다시 배양한다. 배양시에는 처음에 동결건조된 박테리아를 배양할 때와 마찬가지로 37°C, 150 rpm로 배양하며, 12시간 정도 배양하면 실험에 사용될 만큼 성장한다. 실험에 사용될 *S. marcescens*는 박테리아가 배양되고 있는 액체배지의 OD(optical density)값에 근거하였다. OD값은 박테리아 움직임의 지표로 사용되며 0.8 일 때 박테리아의 움직임이 가장 활발하다. 그리하여 박테리아는 주로 OD값이 0.1 에서 0.8 정도 사이에서 Nutrient broth 안에서 배양된다. OD값의 측정을 위해 헬륨-네온(He-Ne) 레이저 (633-nm wavelength)가 사용되고 비교매체로써는 증류수(DI water)가 사용되었다. OD값 측정의 실험장치는 Fig. 1과 같은데, OD값은 다음과 같이 정의된다.

$$OD_{\lambda} = \frac{A_{\lambda}}{L} = -\frac{1}{L} \log_{10} T = \frac{1}{L} \log_{10} \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

여기에서 A_{λ} 는 파장 λ 의 흡광도, I 는 시료의 광도, L 은 빛에 노출되는 시료의 길이, T 는 투과도를 뜻하며, I_0 는 광도의 참조값이다.

2.1.2 미세입자 위 박테리아 부착

먼저, 입자의 표면세척을 위해서 DI water와 IPA(Isopropyl alcohol, Sigma Aldrich, USA) 을 1:1로 섞은 용액으로 입자를 초음파 처리하여 세척하고 원심분리기를 통하여 입자와 세척액을 분리하였다. 그 후 DI water로 초음파 처리를 통해 입자를 세척해주고 원심분리기로 다시 입자와 용액을 분리하였다. 이 과정을 5회 정도 반복하여 입자의 표면을 세척한 후 입자는 DI water에 보관한다. 이제 박테리아를 Nutrient broth에 배양하고 이를 tissue culture dish(20101, SPL, Korea)에 옮긴 후 그 위에 투입하였다.

2.1.3 기타 장비

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 현미경(IX50, Olympus Corp., Japan) 에 Cooled-CCD 카메라(SENSICAM, PCO Corp., Germany)를 연결하였으며 10배와 40배의 대물렌즈(UPlanFL NA 0.3, Olympus Corp., Japan)을 사용하여 실시간 영

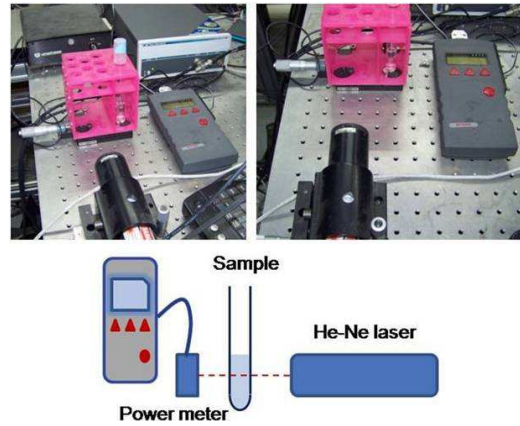


Fig. 1 Experimental set-up of optical density measurement

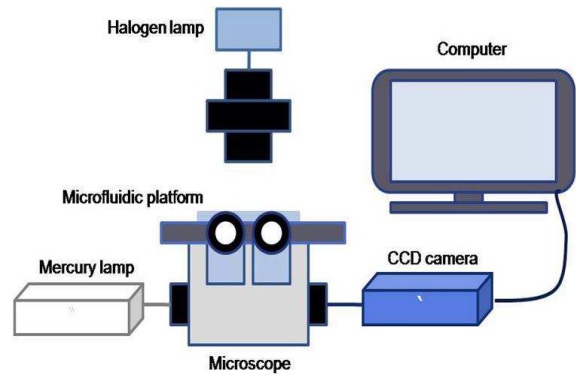


Fig. 2 Experimental Set-up

상을 확인 및 기록하기 위해서 컴퓨터를 통해서 제어하였다. 형광 입자를 발광할 수 있게 하는 수은 램프(U-LH100HG 100-W, Olympus Corp., Japan)를 사용하고 할로겐램프도 함께 사용하였다.

2.2 실험 조건

실험 조건은 Table 1에 나타나 있다. 이 실험에서는 박테리아의 움직임을 직접적으로 추적하는 것이 아니기 때문에 녹색광에 발현하는 박테리아를 직접 이용할 필요는 없다. 하지만 입자의 움직임을 추적해야 하기 때문에 청색광에 발현하는 크기가 5 μ m인 형광입자를 사용하였다. 실험에 사용된 마이크로플루이딕 플랫폼은 PDMS와 slide glass로 만들어졌으며, 내부 웰의 크기는 가로 10 mm, 세로 10 mm, 높이 2 mm이다. 박테리아 배양액으로 Nutrient broth(SIGMA)를 사용하였고, 이를 웰 내부에 주입하였다. 화학적 유인물질은 박테리아가 좋아한다고 알려져 있는 L. aspartate와 Nutrient agar를 혼합하여 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Particle	green fluorescent polymer
Particle diameter	$d = 5 \mu\text{m}$ ($\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$)
Bacteria	<i>Serratia marcescens</i>
Test platform	square well
Property of well	PDMS, slide glass
Culture medium	Nutrient broth (SIGMA)
Chemoattractant	<i>L. aspartate</i> & Nutrient agar
Light source	Mercury lamp (Olympus)

**Fig. 3** Well design

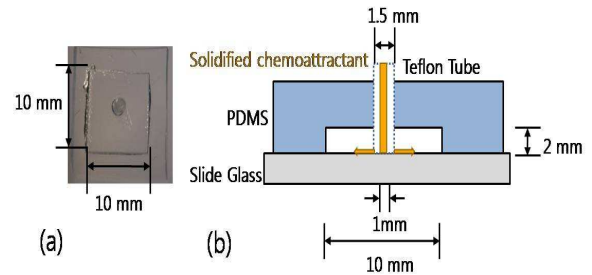
2.3 실험 방법

2.3.1 Well 제작

먼저 가로 10 mm, 세로 10 mm, 높이 2 mm 아크릴 조각을 여러 개 만든다. 이 아크릴 조각을 petri dish에 에폭시 본드를 이용하여 붙인다. 이 때 아크릴 조각 밑 부분 일부만 본드를 붙이지 말고 아크릴 조각 바닥 부분에 골고루 에폭시를 바르고 petri dish와 틈이 생기지 않도록 결합시킨다. 에폭시 본드가 경화되고 petri dish와 결합이 끝난 이후에 petri dish에 PDMS를 붓는다. 진공을 가하여 PDMS에서 기포를 모두 제거한 후 70°C oven에서 2시간 정도 두면 PDMS가 굳는다. 이 굳은 PDMS를 petri dish에서 분리한다. 분리된 PDMS에서 웰 크기보다 가로, 세로 5 mm 정도 더 크게 자른다. 잘라진 PDMS 조각의 정 가운데에 1.5 mm 구멍을 뚫는다. 이후 이 PDMS 조각을 plasma bonding을 통해서, 테슬러 코일을 사용하여 표면을 실란올기로 산화시켜 slide glass와 밀착시킨 다음 4시간 정도 방치하여 접합시킨다. 완성된 well 그림은 Fig. 3와 같으며, 웰 가운데는 화학적 유인물질을 삽입하기 위한 테플론 튜브를 끼워놓았다.

2.3.2 화학적 유인물질 제작

*L. aspartate*는 박테리아 유인물질로 알려져 있

**Fig. 4** (a) Dimension of well, (b) Sideview of well

다. Park 등⁽⁶⁾의 논문에 따르면 박테리아를 유인할 수 있는 여러 물질들(*L. threonine*, *L. glutamate*, *glycine*, *alanine*)이 있는데, *L. aspartate* 역시 편모박테리아를 유인할 수 있는 좋은 화학물질 중의 하나라고 밝혔다. 화학적 유인물질인 *L. aspartate*는 *L. aspartate acid*로 사용하는데, 이는 액상이기 때문에 박테리아가 활동하는 배양액 속에서 급속하게 빠른 속도로 확산을 일으킨다. 그렇기 때문에 아주 짧은 시간 동안 농도 구배만 생긴다. 따라서 액상의 *L. aspartate*의 사용은 실험 상의 한계를 가져온다. 또한 고형의 *L. aspartate*도 배양액 속에서 굉장히 빠른 속도로 녹기 때문에 빠른 확산에 의해 실험에 어려움을 겪는다. 따라서 이런 확산의 문제를 해결하기 위해서 박테리아 고체 배지로 알려져 있는 Nutrient agar를 사용한다. Agar는 젤리 상태의 물질을 의미한다. 고체배지는 단단한 고체 상태도 아니고, 액상도 아니기 때문에 일단 배양액 속에서 빠르게 용해되지 않는다. 이 점에 착안하여 Nutrient agar 가루와 *L. aspartate*를 혼합하여 DI water에 용해한 후, 높은 온도로 가열하여 균을 제거하여 액상으로 만든다. 이후 뜨거운 액상의 혼합물을 petri dish에 담는다. Petri dish에 담긴 *L. aspartate*와 nutrient agar 혼합물을 자외선에 한시간 정도 노출시키고 응고시킨다. 이 때 실험에 사용될 1 cm 가량의 테플론 튜브를 petri dish에 넣는다. 이후 시간이 지나면 혼합물의 온도가 서서히 떨어지면서 젤리 형태의 혼합물이 완성되며, 테플론 튜브 속에 *L. aspartate*와 nutrient agar 혼합물이 들어있는 상태로 화학적 유인물질이 완성된다.

2.3.3 기타 실험 장비 구성

Fig. 4는 완성된 well의 바닥 형상 및 측면도를 보여준다. 완성된 well에 우선 실험을 하기 위해 박테리아가 부착된 미세입자를 포함하고 있는 용액을 넣는다. 이렇게 웰 내부에 실험에 사용될 용액을

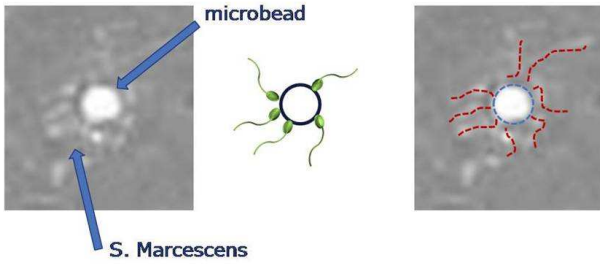


Fig. 5 The microbead attached with bacteria

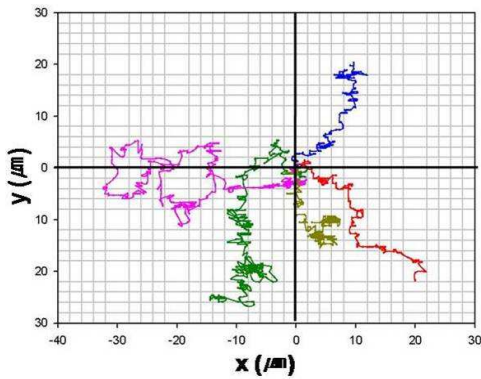


Fig. 6 Tracks of microbeads in the absence of chemoattractant

가득 채운 후 화학적 유인물질이 들어있는 테플론 튜브를 웰의 가운데 구멍에 삽입한다. 테플론 튜브는 slide glass가 닿을 때까지 밀어넣는다.

3. 결과

3.1 화학적 유인물질이 없는 경우

모든 실험에 앞서서 우선 미세입자에 박테리아가 부착되어 있는지 현미경을 통해서 관찰하였다. Fig. 5를 보면 알 수 있듯이 미세입자 주위에 붙어있는 것들이 박테리아이다. 박테리아가 뽁뽁하게 미세입자에 붙으면 더욱 뛰어난 운동성을 보일 수 있을 것으로 예상되나, 본 실험에서는 미세입자에 그리 많은 수의 박테리아가 부착되지 않았다.

그 이후, 실험에서 나온 결과 값을 효율적으로 비교하기 위해서 웰에 유인물질이 없을 때의 미세입자의 움직임을 추적하였다. 입자의 움직임을 더욱 쉽게 가시화하기 위해서 수은 램프로 입자를 발현 시켜서 촬영하기도 하였다. 이렇게 촬영한 미세입자들의 움직임을 각기 다른 색을 이용하여 Fig. 6에 표현하였으며, 이 미세입자들의 움직임은 입자들의 초기 위치를 원점으로 가정하여 표현하였다. Fig. 6을 통해서 알 수 있듯이 유인물질이 없을 때 미세

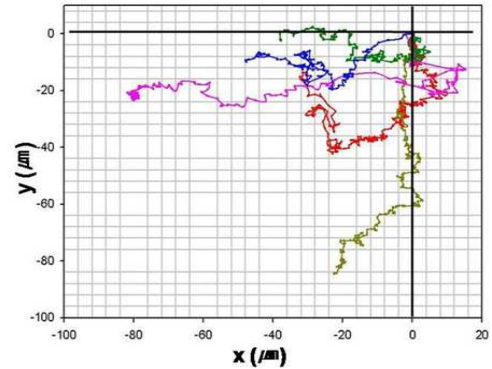


Fig. 7 Tracks of microbeads in the presence of chemoattractant which is located at the west side of the observation window

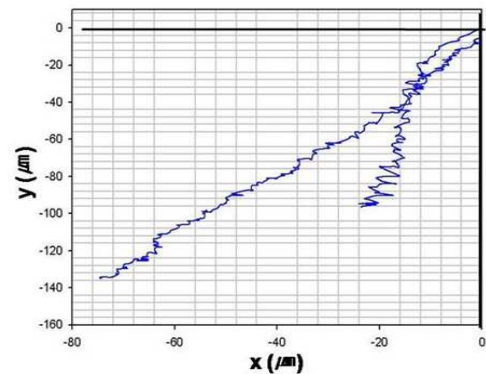


Fig. 8 Tracks of microbeads in the presence of chemoattractant which is located at the southwest side of the observation window

입자의 움직임은 방향에 대한 일정한 경향성이 없이 무작위로 움직인다는 것을 알 수 있다.

3.2 화학적 유인물질이 있는 경우

시간의 흐름에 따라 봤을 때 입자들은 전반적으로 화학적 유인 물질이 있는 좌측으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이를 Fig. 7을 통해서 그래프로 표현하였다. 이 때 입자의 위치는 초기 위치 즉, 제일 첫 사진의 위치를 원점으로 가정하여 위치를 시간에 따라서 표시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 입자들은 화학적 유인물질이 있는 좌측으로 이동하는 것을 확인 할 수 있었다. 유인물질의 입자들에 비해서 좌측 하단에 있을 경우에는 시간의 흐름에 따라서 입자들이 우측 상단에서 좌측 하단 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 이를 Fig. 8과 같이 그래프로 다시 표현하였다. Fig. 8에서도 Fig. 7에서와 마찬가지로 입자의 초기 위치를 원점으로 하여 입자들의 위치를 추적하였다. Fig. 8의 그래프를 통해서 입자는

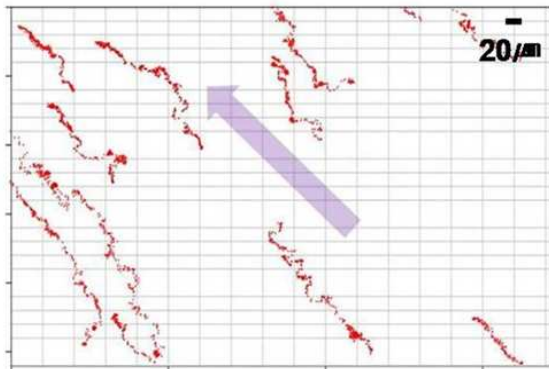


Fig. 9 Tracking particles from their respective starting positions

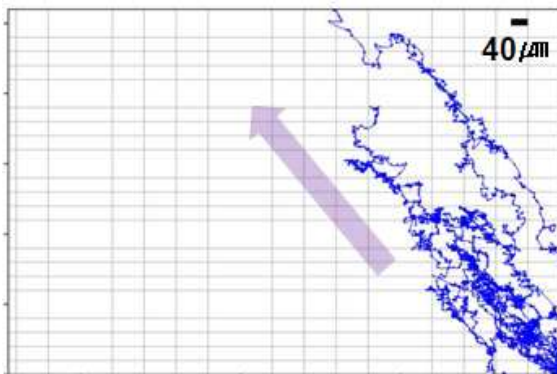


Fig. 10 Tracking particles from their respective starting positions which are gathered at a single point

화학적 유인물질이 존재하는 좌측하단으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

방향에 대한 일정한 경향성을 찾아볼 수 없었던 화학적 유인물질이 없을 때의 결과와는 다르게 화학적 유인물질이 존재할 경우에는 방향에 대한 일정한 경향성이 나타났다. 즉, 화학적 유인물질이 존재할 경우 입자들의 움직임은 웰의 중앙에 위치하고 있는 유인물질을 향해서 이동한다는 것을 확인할 수 있다.

이후 박테리아가 붙은 입자들의 전반적인 움직임 또한 확인하였다. 이 경우에는 배율 10의 렌즈를 통해서 $5 \mu\text{m}$ 입자들의 움직임을 전체적으로 관찰하였다. 유인물질이 있는 곳에서 우측하단을 관찰하였는데, 이 때 입자들은 유인물질이 있는 좌측상단을 향해서 이동함을 볼 수 있었다. 전반적인 이동 양상을 Fig. 9을 통해서 표현하였다. Fig. 9에서는 입자의 초기 위치를 기준으로 하여 입자의 위치를 한꺼번에 추적하였다.

또한 Fig. 10에서는 입자의 초기 위치를 원점으로 가정하여 입자의 위치를 추적하였다. Fig. 10

에서 보면 확실하게 입자들이 다른 방향이 아니고, 유인물질이 존재하고 있는 웰의 가운데 부분, 좌측 상단으로 가고 있다는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 박테리아가 붙은 미세입자는 화학적 유인물질이 존재하는 웰의 중앙으로 이동하는 경향성이 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

편모 박테리아는 활발한 운동성을 지니고 있어서 바이오공학분야에서 추진체의 새로운 동력원이 될 수 있을 것이라 많은 기대를 받고 있다. 이러한 편모 박테리아를 이용한 실험은 기존의 동력원들과 달리 생물체를 직접 이용한다는 측면에서 여러 분야에 응용될 것으로 기대된다.

이번 실험에서 화학적 유인물질이 없을 때, 실험에 사용된 *Serratia marcescens*가 붙은 미세입자는 이전 연구들의 결과와 일치하게 방향성이 없는 움직임을 보였다. 각기 어떠한 방향으로 이동하는 것처럼 보이지만 움직이는 입자들간에는 아무런 상관관계가 존재하지 않았다. 그러나 박테리아가 존재하는 공간안에 화학적 유인물질이 존재할 경우 편모박테리아는 박테리아의 주화성에 의해서 화학적 유인물질이 있는 곳으로 이동하는 것을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 편모박테리아가 부착된 미세입자 또한 화학적 유인물질이 있는 방향으로 움직이는 경향성이 있음을 이번 실험을 통해서 밝힐 수 있었다. 또한 박테리아의 주화성을 이용해서 단순히 박테리아 뿐만 아니라 작은 물체들도 원하는 방향으로 이동시킬 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 추후, 이번 실험에서 중점적으로 관찰했던 웰의 우측 뿐만 아니라 웰의 여러 다른 부분에 존재하는 미세입자들의 움직임을 후속연구를 통해서 더 정밀하게 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-0420-20080089)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Behkam, B. and Sitti, M., 2007, "Bacterial Flagella-based Propulsion and On/off Motion Control

- of Microscale Objects," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 2, 023902.
- (2) Behkam, B. and Sitti, M., 2008, "Effect of Quantity and Configuration of Attached Bacteria on Bacterial Propulsion of Microbeads," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 93, No. 22, 223901.
- (3) Jeon, H., Lee, Y., Jin, S., Koo, S., Lee, C., Yoo, J., 2009, "Quantitative Analysis of Single Bacterial Chemotaxis Using a Linear Concentration Gradient Microchannel," *Biomed. Microdevices*, Vol. 11, No. 5, pp. 1135~1143.
- (4) Kim, M. J. and Breuer, K. S., 2008, "Microfluidic Pump Powered by Self-Organizing Bacteria," *Small*, Vol. 4, No. 1, pp. 111~118.
- (5) Park, S., Wolanin, P. M., Yuzbashyan, E. A., Lin, H., Darnton, N. C., Stock, J. B., 2003, "Influence of Topology on Bacterial Social Interaction," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 100, No. 24, pp. 13910~13915.
- (6) Pandey, G. and Jain, R. K., 2002, "Bacterial Chemotaxis toward Environmental Pollutants: Role in Bioremediation," *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 68, No. 12, pp. 5789-5795.
- (7) Steager, E., Kim, C., Patel, J., Bith, S., Naik, C., 2007, "Control of Microfabricated Structures Powered by Flagellated Bacteria Using Phototaxis," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 26, 263901.