

## 국소 자기장의 순/역 배열을 이용한 미세유체 채널 내에서의 강자성 입자 패턴 형성 §

박현향\* · 이지혜\*\* · 유영은\* · 김정엽\* · 장성환\*†

\* 한국기계연구원 나노융합기계연구본부, \*\* 국립한밭대학교 화학생명공학과

### In-situ Patterning of Magnetic Particles in Microfluidic Channels by Forward/Reverse Local Magnet Arrangement

Hyoun-Hyang Park \*, Ji Hae Lee \*\*, Yeong Eun Yoo \*, Jung-Yup Kim \* and Sunghwan Chang \*†

\* Nano-Convergence Mechanical Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials,

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

(Received January 16, 2015 ; Revised June 2, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

**Key Words:** Magnetic Particle Patterning(자성입자패터닝), Forward Magnet Arrangement(순방향 자석배열), Reverse Magnet Arrangement(역방향 자석배열), Trapped Magnetic Particle(자성입자포획)

**초록:** 유체채널 내에서의 미세입자의 패터닝은 생물 및 의료 응용분야에서 활용될 가치가 높은 응용 기술이다. 본 연구는 미세유체 채널 내에서 구조물 없이 외부 자석의 배열만을 이용한 미세입자 패터닝 방법을 제안한다. 자석의 같은 극과 서로 다른 극끼리의 배열을 이용한 일렬 배열, 적층 배열 등을 고안하여, 다양한 미세입자 패터닝에 실험적으로 적용하였다. 서로 같은 극끼리의 배열은 입자 포획에 쉽게 적용 가능하여, 독립적 배열이 가능하였다. 특히 적층 배열은 다양한 패터닝을 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 자기력 1.08 mT 수준에서까지 자석 배열에 의한 일정한 패턴을 관찰할 수 있었고, 패터닝된 입자들은 20 ml/hr 의 유체 속도에서도 안정하게 유지되었다. 본 연구는 간단하면서도 자성 입자의 다양한 패터닝을 가능케 하는 방법으로 면역자기성 입자를 이용한 의학/바이오 분야로의 폭넓은 응용을 기대케 한다.

**Abstract:** The patterning of microbead in microfluidics channel is a practical technique for application in bio and medical areas. An approach is described for a direct patterning of magnetically active microbeads in microfluidic devices without inner structure. Local magnet arrangements - flat arrangement and stack arrangement - contacting same poles or opposite poles of magnet were utilized for generating trapping magnetic fields. The arrangement of magnets contacting same poles generated isolated patterns by repelling of magnetic field. The flat arrangement of vertically reverse magnet arrays shaped trapping patterns repelling magnetic field line between same poles. Spatially, the stack compositions of magnet arrangements allow diverse isolated trapped patterns of magnetic particles. Trapped magnetic particles in fluidic channels were stable on the 18 ml/hr flow conditions and magnetic force of 1.08 mT in the all experiments. This experimental study suggests the simple and versatile methods to pattern magnetic particles, and has potential of wide application to bio and medical area.

### 1. 서론

마이크로, 나노 공학이 발달하면서 자성 미세입자의 응용이 바이오 분야를 비롯하여 미세 유체 조건에서의 적용 분야에서도 높아지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 특히 면역측정법에서는 자성 미세 입자를 단백질이나 세포에 결합 시켜 검출 시간을 단축시키고, 검출 민감도를 높이는 데 사용하고 있어, 그 응용 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있다.<sup>(3)</sup> 따라서 자기력을 기반으로 한 미세입자 포획을 위한 효과적인 방법을 개발하는 것은 중요한 응용기술의 방향 중 하나라고 판단 된다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11-14., 김대중컨벤션센터) 발표내용을 토대로 한 논문임.

† Corresponding Author, schang@kimm.re.kr

자기력에 기반하여 미세입자를 기계 구조물과 같이 특정 영역에 패터닝 하는 다양한 방법이 보고 되어 왔다. 스탠실을 이용한 금속 증착,<sup>(4)</sup> 폴리머 주형 위에 자성 입자 패터닝,<sup>(5)</sup> 자성 처리된 폴리머로 이루어진 미세주형<sup>(6)</sup> 등의 방법이 있었다. 이러한 방법들은 자성체를 기계적 구조물로 형성 시키는 방식이며, 설계한 모양대로 정확하게 자성체를 패터닝 할 수 있게 하는 장점이 있다. 그러나, 높은 가격이나 긴 공정 시간이 필요하게 되며, 바이오 응용을 위해서 추가적인 바이오 활성을 가질 수 있도록 표면의 후처리가 필요하다는 번거로움이 있다. 최근에는 3차원자성입자 패터닝 연구도 이루어 지고 있는데, 폴리머-폴리머 스탬핑<sup>(7)</sup>과 같은 방법에서는 자성입자를 포함한 하이드로겔을 이용하여, 자성 입자를 3차원으로 패터닝하는 방법이 보고 되었다. 그러나 이러한 방법은 폴리머 및 하이드로겔 형상화 등의 과정이 필요하므로, 구조물 제작을 위한 재료에 한계가 있다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 자석의 배열을 이용하여, 기계적 구조물 없이, 자성 미세 입자를 패터닝 하는 방법을 제안한다. 이러한 방식은 소자의 제작이 간단하고, 다양한 방법으로 미세 유로 내에서 자성 입자를 패터닝할 수 있다는 장점을 제공한다. 본 논문은 실험적인 정성적 연구로써, 다양한 외부 국부 자기장 배열을 저가의 영구 자석들의 배열을 통해 제안하여 그로 인해 발생하는 자성 입자 패터닝을 확인하였다. 또한, 미소 유로 내에 자성 입자의 패터닝을 형성한 후, 유체가 흐르는 환경에서도 패터닝이 안정적으로 유지되는 지를 확인하여, 제안한 새로운 방법론의 유효성을 확인하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 미세채널 제작

Su-8 50 을 이용하여 높이가 각 20  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ 인 미세패턴의 주형을 포토리소그래피 방식으로 제작한다. 주형에 경화제와 1:10 비율로 섞은 PDMS 를 부어 65  $^{\circ}\text{C}$ 에 3 시간 동안 굳힌 후 분리하여 20  $\mu\text{m}$ 높이의 채널을 하판, 50  $\mu\text{m}$  높이의 채널을 상판으로  $\text{O}_2$  플라즈마 처리를 통해 접합하여 미세채널을 만든다. 만든 미세채널의 입구에 튜브를 연결하여 시린지 펌프를 통해 여러 유속 조건에서 자성입자를 함유한 유체를 흘릴 수 있도록 준비한다.

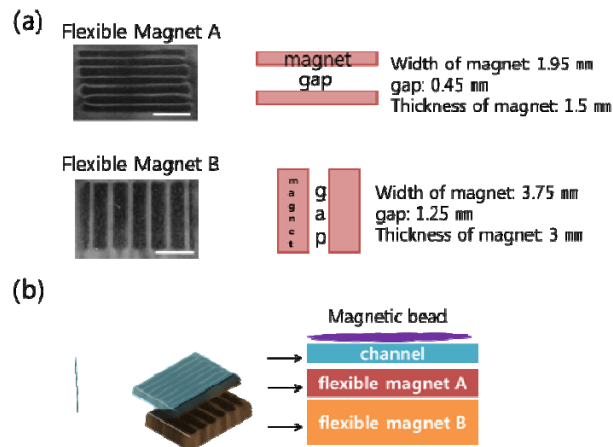
### 2.2 자석의 배열

#### 2.2.1 고무자석의 십자 적층 배열

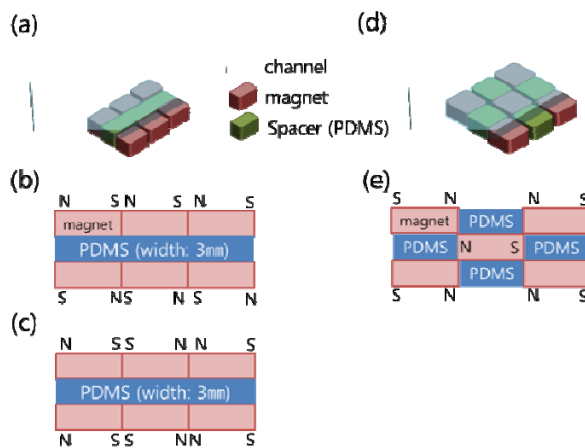
내부에 페라이트 자석이 가로로 배열된 고무자석과 세로로 배열된 고무자석을 십자형태가 되도록 상, 하로 적층한다. 고무자석 내부의 페라이트 자석은 같은 방향의 극끼리 인접한 역방향 배열로 이루어져 있다. 가로 배열의 페라이트 자석은 폭 1.95 mm, 두께 1.5 mm의 자석이 0.45 mm 간격으로 배열되어 있으며, 세로 배열의 자석은 폭 3.75 mm, 두께 3 mm의 자석이 1.25 mm간격으로 배열되어 있다(Fig. 1(a)). 자석의 자기력을 확인하기 위해 Gauss Meter (Hirst Magnetic Instruments Ltd., GM08)로 수직 방향의 자기력을 측정하였다. 가로 배열의 자석은 58.6 mT의 자기력, 세로 배열의 자석은 83.2 mT의 자기력을 가지고 있다. 수직 적층 시 자석의 세기가 작은 가로 배열 자석을 채널 바로 아래, 즉 자석 배열 시 위쪽으로 적층 하여, 배열 후의 자성입자 형상을 조절한다(Fig. 1(b)). 두 자석을 수직 적층 하였을 때의 자기력은 78.5 mT, 수직 적층 후 두께 1 mm 채널과 두께 3 mm 채널 위에서의 자기력은 각각 8.53 mT, 1.08 mT 로 측정되었다. 자석의 배열 후 나타난 자기장 세기 및 자력선의 형태를 자석 위에 위치한 채널 두께를 달리하여 조절한다. 각 배열을 Fig. 1 에 모식도로 나타내었다. 또한 각 자석 및 자석의 수직 적층에 따른 자기력 수치를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Magnetic force of magnet materials

자석종류	자석위 자기력측정 (mT)	자석 + 1 mm 두께 채널 위 자기력 측정	자석 + 3 mm 두께 채널 위 자기력 측정
페라이트가로배열 고무자석(A)	58.6	-	-
페라이트세로배열 고무자석(B)	83.2	-	-
A (상)+B (하) 적층	78.5	8.53	1.08
네오디뮴자석(5X10X1 mm)	145.1	71.1	9.7



**Fig. 1** Crisscross Arrangements of Magnet (a) View of magnet film for ferrite magnet arrangement in flexible magnet pads, flexible magnet pad A; (b) Schematics of crisscross stack of magnet pads, flexible magnet pads A (crosswise) put on the flexible magnet pads B (crosswise), and the thicknesses are 1 mm and 3 mm. (scale bar: 10 mm)



**Fig. 2** Schematics of Magnet Arrangements (a) Flat arrangement of magnet; (b) Forward magnet arrangement; (c) Reverse magnet arrangement; (d) X-shaped flat arrangement; (e) Forward and Reverse of X-shaped magnet arrangement. The width of PDMS for spacer is 3 mm

### 2.2.2 네오디뮴 자석의 순배열

가로, 세로 각각 10 mm, 5 mm, 그리고 두께 1 mm인 네오디뮴 자석을 서로 다른 극끼리 맞게 하여 일자로 2 열 배열한다. 이 규격의 네오디뮴 자석의 자기력은 145.1 mT 이며, 두께 1 mm, 3 mm 채널 위에서의 자기력은 각각 71.1 mT, 9.7 mT 로 측정되었다. 이 규격의 자석은 네오디뮴 자석 배열을 위한 모든 실험에 사용되었다. 2 열 배열된 자석 사이에는 폭 3 mm인 PDMS 를 배치한다. 흐르는 유체 내에서의 자성입자 패턴을 확인하기 위해, 배열된 자석 위에 두께 1 mm인 PDMS 채널을 올린다. Fig. 2(a), 2(b)에 모식도로 나타내었다.

### 2.2.3 네오디뮴 자석의 역배열

가로, 세로 각각 10 mm, 5 mm, 그리고 두께 1 mm인 네오디뮴 자석을 서로 같은 극끼리 맞게 하여 일자로 2 열 배열한다. 같은 극끼리의 배열 시 자석 배열의 흐트러짐을 방지하기 위해 양면 테이프를 위치를 잡은 후 에폭시 경화를 통해 배열을 단단히 고정시킨다. 2 열 배열된 자석 사이에는 폭 3 mm인 PDMS 를 배치한다. 배열된 자석 위에 두께 1 mm인 PDMS 채널을 올린다. Fig. 2(a), 2(c)에 모식도로 나타내었다.

### 2.2.4 네오디뮴 자석의 X자 형태 배열

가로, 세로 각각 10 mm, 5 mm, 그리고 두께 1 mm인 네오디뮴 자석 5 개를 하나는 중간에 두고 나머지 네 개를

한쪽은 서로 다른 극끼리 폭 3 mm인 PDMS 를 사이에 두고 위 아래로 마주보도록 배열하고 다른 한 쪽은 동일한 형태로 같은 극끼리 마주보도록 하여 X 자 형태로 배열한다. Fig. 2(d-e)에 모식도로 나타내었다.

### 2.3 자기력 기반 미세입자의 패턴 형성

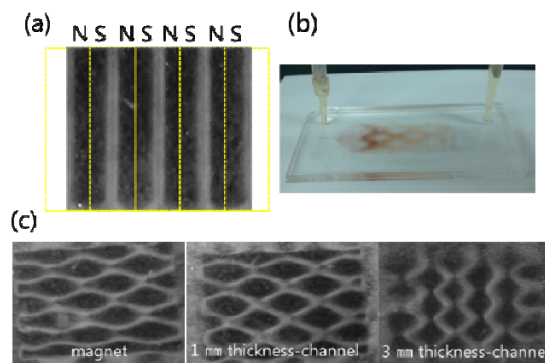
배열된 자석에서 형성되는 자기력선을 확인하기 위해 지름 4  $\mu\text{m}$ 의 Fe 입자가 함유된 증류수를 배열된 자석 위에 뿌려 자기력선을 확인하였다. 그리고 흐르는 유체 내에서의 미세입자 패턴 형성을 확인하기 위해 유속 4 ml/hr 로 50 nm의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 를 채널 내에 흘리면서 형성된 패턴을 관찰하였고 형성된 패턴의 유지를 위한 최대 유속을 보기 위해 각 자석별로 패턴이 흐트러질 때까지 유속을 높여보았다. 자성입자를 함유한 유체를 흘리기 전에는  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 를 함유한 증류수를 강하게 섞어 주어 미세입자가 유체를 따라 끌고루 흐를 수 있도록 한다. 나노 크기의 입자인 경우에는 필요 시, 초음파 처리를 통해 입자를 분산시켜서 사용한다.

## 3. 결과

### 3.1 자석 배열에 따른 패턴의 형성

#### 3.1.1 고무자석의 십자 적층 배열

자석의 방향을 십자로 하여 적층한 배열은 최종적으로 계란판과 같은 패턴을 형성한다. Fig. 3(a)는 내부에 페라이트가 가로, 세로로 배열된 고무 자석판 위에 자기력선을 확인할 수 있는 자기관찰 필름을 올려 고무자석 내부의 페라이트 자석의 배열을 확인한 것이다. 자석의 극이 있는 곳은 검게, 자석의 극 가장자리는 희게 표시된다. 고무자석 내부가 서로 같은 극끼리 인접하여 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)는 가로, 세로로 배열된 각각의 고무 자석을 적층한 후 그 위에 올려진 채널의 두께에 따른 자기력선을 자기력 관찰 필름으로 확인한 것이다. 가로 배열의 자석과 세로 배열 자석의 자기력선이 중합, 상쇄되면서 나타나는 형태이며 자석 위에 놓여진 채널 두께에 따라 패턴의 형태가 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 자석의 자기력이 약해지면서 자석 배열에 의한 자성 입자 패턴의 효과가 감소하는 것을 말한다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(c)의 두번째 그림과 같은 방법으로 1 mm 두께의 채널에 50 nm of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 를 4 ml/hr 로 흘려서 얻은 결과이다. 이 두께의 채널 상에서의 자기력은 8.53 mT 으로 측정되었다. 흐르는 유로 내에서도 자기력 관찰 필름과 동일한 형태로 미세입자가 패턴닝된 것을 볼 수 있으며 유속 20 ml/hr 조건에서도 안정감 있게 패턴이 유지되는 것을 확인하였다. 채널 두께 3 mm 상에서의 자력은 1.08 mT 로, 이는 자석 배열에 의한 패턴형성을 위해 필요한 최소의 자력으로 확인되어, 이 자력값 이하에서는 자석 배열에 의한 자성 입자의 패턴을 보기에 한계가 있다(Fig. 3(c)의 세번째 그림). 배열된 자석을 적층하여 미세입자를 패턴닝하는 방법은 한 층으로 배열된 자석보다 훨씬 다양한 자기력선을 구현할 수 있어 응용 범위가 넓을 것으로 기대한다. 또한 적층 후 자석과 미세입자 간의 간격 조절을 이용하여 흐트러진 자기력선을 유도할 수 있으며 이것으로 다양한 자기력선의 형태를 얻을 수 있어 자성 입자나 세포를 비롯한 바이오 물질 및 나노/마이크로 물질들의 자력 기반한 다양한 패턴 형성이 가능할 것이다.



**Fig. 3** Crisscross stack of flexible magnet pads (a) View of magnet film for ferrite magnet (yellow-dot rectangle) arrangements within magnet pads; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  of 50 nm in flow channel on the magnet pads, the thickness of PDMS channel is 1 mm; (c) View of magnet film of crisscross-stacked magnet pads on magnet, 1 mm-thickness channel (8.53 mT), and 3 mm-thickness channel (1.08 mT). Flow rate is 4~20 ml/hr. White region is a pole edge, and black region is a pole in magnetic view film

3.1.2 네오디뮴 자석의 순방향 배열

순방향 배열이란 다른 극끼리 자연스럽게 배열되는 일반적인 자석 배열을 지칭한 것이다. 이 경우, 인접한 다른 극 사이에서 형성되는 인력에 의한 자기력선에 따라 미세입자가 패턴을 형성한다. 따라서 인접한 두 자석 사이에 미세입자가 패턴을 이루며 자석의 내부에는 패턴이 형성 되지 않는다. Fig. 4(a) 상부 사진에서 보는 것은 4  $\mu\text{m}$ 의 Fe 입자를 함유한 증류수를 배열된 자석 위에 뿌려서 관찰한 것으로 자석 배열에 따른 미세입자의 패턴을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)의 하부 사진은 50 nm 사이즈의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  를 유속 4~20 ml/hr 로 흘려서 관찰한 결과로 자석의 자기력 채널의 입구에서부터 영향을 미쳐 채널 입구에서부터 미세입자가 패터닝됨으로 인해 채널 입구쪽이 채널 출구쪽보다 더 많은 입자가 패터닝된 것을 볼 수 있다. 유체를 흘려줌에도 불구하고, 자석간의 인력으로 인한 입자 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 자성입자가 유입되는 입구 쪽에서 자성입자가 더 많이 포획되는 문제는 유속을 높여도 정도의 차이만 보이고 동일하게 나타나는 것으로, 이 문제를 해결하기 위한 소자적인 개선이 후속 실험에서 필요할 것이다. 자석의 배열에 의해 패터닝된 자성입자들은 유속 20 ml/hr 조건에서도 안정감 있게 패턴이 유지되는 것을 확인하였다. 또한 PDMS 로 간격을 둔 자석 사이에서도 자석 간 인력이 작용하여 미세입자 양이 많아지면 입자의 패턴이 자기력선을 따라 확장되면서 패턴을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 이는 독립적으로 구분된 미세입자의 패턴 형성은 어려울지라도 서로 다른 극의 자석 배열을 통해 다양한 형태의 입자 패턴을 구현할 수 있을 것이다.

3.1.3 네오디뮴 자석의 역방향 배열

역방향 배열은 순방향 배열과 비교하기 위해 자석의 같은 극끼리 배열한 것이다. 이 배열에서는 자석의 같은 극끼리의 척력으로 인해 각 자석의 자기장이 센 가장자리부터 미세입자가 포획되어 패턴을 이룬다. Fig. 4(b)의 상단 사진에서 보는 것과 같이 각 자석 간 인력의 작용으로 인해 자석의 가장자리에 집중적으로 4  $\mu\text{m}$ 의 Fe 가 패턴을 이루는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)의 하부 사진에서도 유속이 있는 채널 내부에서 50 nm의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  가 Fig. 4(b)의 상부 사진과 동일한 패턴을 이루는 것을 볼 수 있으며 자석의 영향을 먼저 받는 채널 입구 쪽에 입자가 더 많이 포획된 것을 관찰할 수 있고 역시 20 ml/hr의 유속에서도 형성된 패턴이 안정감 있게 유지되는 것을 관찰할 수 있었다. 이 배열은 인접한 자석끼리의 척력에 의해 순방향 배열보다 훨씬 독립적으로 패턴이 구분되어 미세입자가 포획되며 이는 미세입자의 패턴 형성과 함께 포획된 미세입자의 독립적인 분리를 위해 더욱 효과적인 자석 배열로 보인다. 이러한 독립적인 미세입자의 포획은 향후 세포나 바이오 물질 포획 후 추가적인 약물 처리 등의 응용에 효과적일 것으로 기대한다.

3.1.4 네오디뮴 자석의 X자 형태 배열

Fig. 5(a)는 배열된 자석 위에 4  $\mu\text{m}$ 의 Fe 입자를 함유한 증류수를 올려서 입자의 패턴을 관찰한 것이며 Fig. 5(b)는 50 nm의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  를 채널 내부에 흘리면서 관찰한 결과이다. 각 그림의 왼쪽은 네오디뮴 자석을 같은 극끼리 인접하게 배열한 결과이며 오른쪽은 네오디뮴 자석을 다른 극끼리 인접하게 배열한 결과이다.

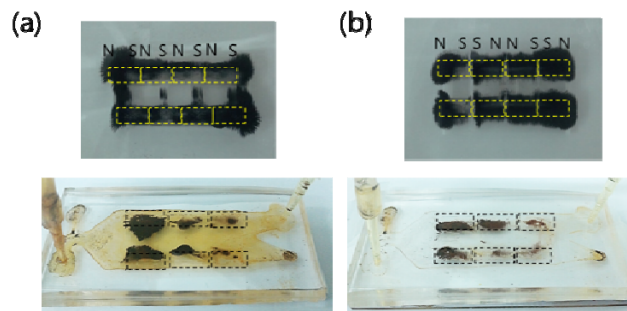
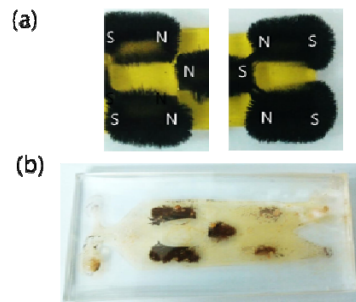


Fig. 4 (a) Flat arrangement of vertically forward magnet and (b) vertically reverse magnet arrangement. Upper, Fe particles of 4  $\mu\text{m}$  on magnet arrangements; bottom,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  of 50 nm in flow of 4~20 ml/hr-rate. Thickness of PDMS channel is 1 mm (71.1 mT).



**Fig. 5** X-shaped flat arrangement of vertically reverse magnet. (a) Iron particles of 4  $\mu\text{m}$  on X-shaped flat arrangement of vertically forward(right) and reverse(left) magnet; (b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  of 50 nm in flow channel on -shaped flat arrangement of vertically reverse magnet. Thickness of PDMS channel is 1 mm, and flow rate is 4~20 ml/hr

같은 극끼리 배열된 곳은 자석의 척력이 작용하는 배열로 자석에서 가장 자기장이 센 부분으로 미세 입자가 독립적으로 구분되어 포획된다. 반면 자석의 인력이 작용하는 배열에서는 미세입자가 각 자석 간 자기력선을 따라 연결되어 패턴을 형성한다. 이는 독립적인 미세입자 포획에는 부적당하나 연결된 미세입자 패턴을 위해 응용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 외부 극부 자기장을, 저가의 영구자석을 배열하여 제작하고, 이를 통해, 자성 입자를 미세 유로 내에서 패턴하는 연구를 수행하였다. 자석의 적층 배열이나 N 극과 S 극의 순/역배열은 극 사이에 형성되는 자력선에 의하여 서로 다른 미세입자 패턴을 보였다. 자석의 방향을 달리하여 적층한 배열은 각 층의 자석의 배열과 자석의 적층 배열, 적층된 자석과 채널 사이의 간격에 따라 다양한 패턴 형태를 얻을 수 있어 자기표지를 이용한 세포 패턴 등 적용을 기대하게 한다. 또한 자석의 수평적 배열은 자석 사이의 인력과 장력에 따라 독립된 미세입자의 포획 및 다양한 패턴 디자인을 가능케 하며 특히 역배열의 경우는 순배열의 자석배치에 비해 더욱 효과적인 독립된 포획 패턴을 얻을 수 있어 목적 물질을 구분된 포획하는 패턴으로 사용될 수 있을 것이다. 자석의 배열을 이용하여, 기계적 구조물 없이, 자성 미세 입자를 패턴하는 본 연구의 방법은 소자의 제작이 간단하고, 다양한 방법으로 미세 유로 내에서 자성 입자를 패턴할 수 있는 장점을 제공하므로, 생물 및 의료 분야에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 판단한다.

#### 후 기

이 논문은 정부 미래창조과학부의 재원으로 신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 2014048791)

#### 참고문헌 (References)

- (1) Baier, T., Mohanty, S., Drese, K. S., Rampf, F., Kim, J. and Schonfeld, F., 2009, "Modelling Immunomagnetic Cell Capture in CFD," *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 7, pp. 205~216.
- (2) Furlani, E. P., Sahoo, Y., Ng, K. C., Wortman, J. C. and Monk, T. E., 2007, "A Model for Predicting Magnetic Particle Capture in a Microfluidic Bioseparator," *Biomed. Microdevices*, Vol. 9, pp. 451~463.
- (3) Aytur, T., Foley, J., Anwar, M., Boser, B., Harris, E., Beatty, P.R., 2006, "A Novel Magnetic Bead Bioassay Platform Using a Microchip-Based Sensor for Infectious Disease Diagnosis.," *J. Immunol. Methods*, Vol. 314, pp. 21~29.

- (4) Deng, T., Prentiss, M. and Whitesides, G. M., 2002, "Fabrication of Magnetic Microfiltration Systems Using Soft Lithography," *Appl. Phys. Lett.* vol. 80, pp. 461~463.
- (5) Lyles, B. F., Terrot, M. S., Hammond, P. T. and Gast, A. P., 2004, "Directed Patterned Adsorption of Magnetic Beads on Polyelectrolyte Multilayers on Glass," *Langmuir*, Vol. 20, No. 8, pp.3028~3031.
- (6) Campbell, C. J. and Grzybowski, B. A., "Microfluidic Mixers: From Microfabricated to Self-Assembled Devices," 2004, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 362, pp. 1069-1086.
- (7) Kim, H., Doh, J., Irvine, D. J., Cohen, R. E. and Hammond, P. T., 2004, "Large Area Two-Dimensional B Cell Arrays for Sensing and Cell-Sorting Applications," *Biomacromolecules*, Vol. 5, pp. 822~827.
- (8) Pregibon, D. C., Toner, M. and Doyle, P. S., 2006, "Magnetically and Biologically Active Bead-Patterned Hydrogels," *Langmuir*, Vol. 22, pp. 5122~5128.