

# 적혈구 포획용 마이크로 턴코일 제작과 전산모사를 이용한 자기장 분포 특성 연구

정현준<sup>1</sup>, 박지수<sup>1</sup>, 김누리<sup>1</sup>, 황도근<sup>1</sup>, 이장로<sup>2</sup>, 이상석<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 83, 220-702

<sup>2</sup>숙명여자대학교 나노물리학과, 서울, 140-742

적혈구는 직경 8  $\mu\text{m}$ , 중심부는 1  $\mu\text{m}$ , 가장자리 두께 2  $\mu\text{m}$  이며 중앙부분은 움푹 들어간 팬-케이크형태를 띠고 헤모글로빈이라는 단백질을 갖고 있는 산소 운반을 위해 특화된 세포이다[1]. 실제로 인체의 혈액을 원심 분리하여 정제된 적혈구만 추출하여 생리 식염수에 넣어서 관찰해 본 것을 토대로 도시한 결과 Fig. 1(a)처럼 적혈구는 그 중심 부분이 움푹 들어간 전형적인 팬케이크 모양이었다. 1 ml 당 50 mg의 밀도를 갖는 1  $\mu\text{m}$ 의 초상자성체 자성비드(Co-Si-OH)는 추출된 적혈구에 분자적인 생체전자장 영향을 받아 붙을 것으로 예상하였다. Fig. 1(a)처럼 코발트(Co) 분자를 고르게 함유하는 적혈구는 1  $\mu\text{m}$  크기의 자성비드 여러 개들과 자기쌍극자 모멘트 배열을 이루어 자성비드가 적혈구의 움푹 들어간 부분에 등방적으로 붙은 모양으로 존재하는 것과는 다르게 나타났다[2]. 즉, 광학현미경으로 관찰한 결과 적혈구의 가장자리 부근에 자성비드가 등방적으로 붙어있는 모양을 띠어 순수한 적혈구에 자성비드가 결합된 새로운 형태를 띠고 있음을 보여 주었다.

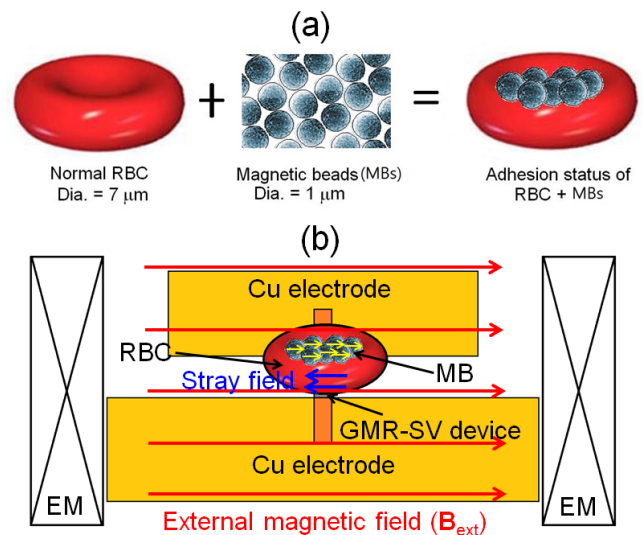


Fig. 1

Fig. 2은 10번 감은  $\mu$ -코일을 800배 배율로 확대하여 나타낸 모습입니다. Fig. 2에 표시한 화살표 방향으로 코일 폭 2  $\mu\text{m}$ 에 AC 전류(I) 0.2 mA가 흐를 때 생성되는 자기장의 분포를 점선 부분으로 표시하였다. 한편 Fig. 3에서는 전자기 유한요소법, 비오-사바트 법칙 (Bio-Savart's law)과 암페어법칙(Ampere's law) OPERA-3D/SCALA SW 프로그램을 이용하여 코일의 직경 내부에서의 자기장 분포를 영역별로 분석하였다.

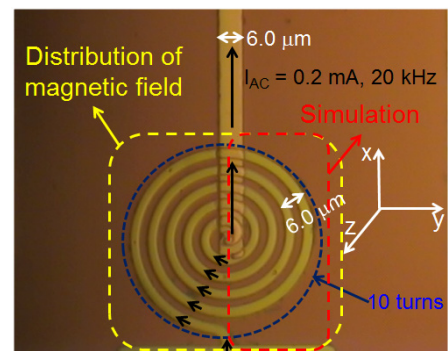


Fig. 2

Fig. 3(a)는 10번 감은 코일의 전산모사 결과 자기장 분포를 나타내었다. 적혈구의 AC 교류 자기장의 인가에 따른 적혈구의 흐름과 운동과 막변형 모양을 관찰하기 위한 시스템을 구현하도록 최적화 자기장을 위해 주파수 20 kHz인 AC 교류장의 인가에 따른 전산모사 결과를 적용하였다. Fig. 1(b)에서 보여 주었듯이 여러 개의 자성비드가 붙은 적혈구 자성 측정 바이오소자 중심부에 1  $\mu\text{m}$ 이하의 선폭 크기를 갖는 GMR-SV 바이오 소자 가장자리에 외부 자기장을 인가할 수 있는  $\mu$ -턴 코일을 구성하며, 박막소자 면에서 Fig. 3(b)은 y-축의 수평방향과 Fig. 3(c)은 z-축의 수직방향에서 자기장 분포의 특성을 분석하

면 수직 성분의 자기장이 실제로 적혈구를 포획하는 데 사용될 수 있다.  $\mu$ -턴 코일에 인가된 전류에 의해 계산된 수직방향의 자기장은 인접해 있는 GMR-SV 소자가 감지하는 수평방향의 미세자기장 영향을 미치지 못하고, 자성비드에서 발생하는 수평방향의 누설 자기장과 간섭에 의한 효과로 실제 적혈구 포획의 제어에 따른 검출능력이 결정된다고 볼 수 있다.

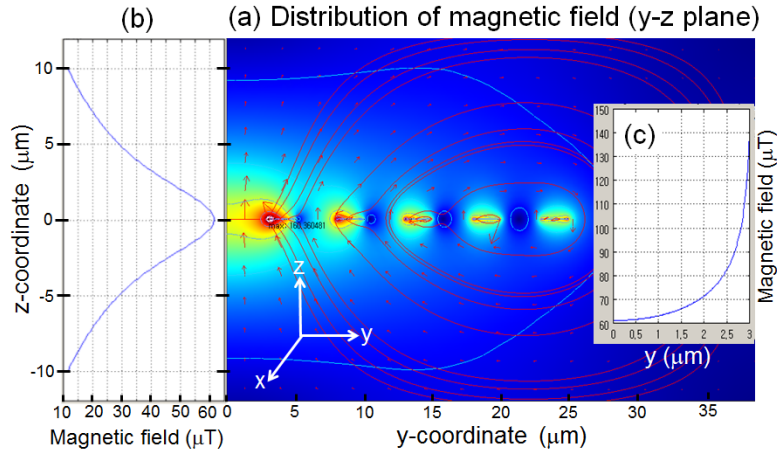


Fig. 3

Fig. 2에서 도시하였던 y-z 평면상에서 10번 감은  $\mu$ -코일로 흐르는 전류에 따른 자기장 분포를 분석하였다. 코일 중심을 지나는 수직축의 위치에 따른 자기장의 값을 전산모사한 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 주파수 20 kHz인 AC 전류와 DC 전류가 0.1 mA, 0.2 mA, 1.0 mA, 10.0 mA로 각각 흐를 때 코일 중심점에서 생성된 자기장과 중심에서 높이 10  $\mu\text{m}$ 로 떨어진 점에서 자기장을 비교해 보았다. 0.1 mA의 DC 전류가 흐를 때와 100 배인 10.0 mA 흐를 때의 생성된 자기장은 각각 3090  $\mu\text{T} = 30.9 \text{ Oe}$ 와 31  $\mu\text{T} = 0.31 \text{ Oe}$ 로 약 100배로 증가한 전류 값에 비례하여 증가하였다.

한편 AC 전류가 0.1 mA 흐를 때와 100 배인 10.0 mA가 흐를 때에 생성된 자기장은 각각 30.6  $\mu\text{T} = 0.306 \text{ Oe}$ 와 3060  $\mu\text{T} = 30.6 \text{ Oe}$ 이 되어 약 100배로 증가한 전류에 비례하여 증가하였으며, 이것은 DC 전류의 경우와 동일한 경향을 보여주었다. 이러한 자기장 분포의 특성은 높이 10  $\mu\text{m}$ 에서는 0.1 mA와 10.0 mA의 DC 전류가 흐를 때 생성된 자기장은 각각 6  $\mu\text{T} = 0.06 \text{ Oe}$ 와 570  $\mu\text{T} = 5.7 \text{ Oe}$ 로 중심에서 나타난 자기장의 특성처럼 역시 약 100배의 값으로 증가하였다. 한편 0.1 mA와 10.0 mA의 AC 전류가 흐를 때 생성된 자기장은 각각 5.9  $\mu\text{T} = 0.059 \text{ Oe}$ 와 510  $\mu\text{T} = 5.1 \text{ Oe}$ 로 약 100배의 값으로 증가한 전류 값에 비례하여 나타났다.

**Table 1.** The values of perpendicular magnetic field( $B_{\perp}$ ) at the position of  $z = 0, 10 \mu\text{m}$  in the multi turn coils according to the applied AC and DC currents(I) of 0.1 mA~10 mA.

Applied current(I)	Perpendicular magnetic field( $B_{\perp}$ ) of multi turn coils			
	DC		AC <sup>(a)</sup>	
	$z = 0 \mu\text{m}$	$z = 10 \mu\text{m}$	$z = 0 \mu\text{m}$	$z = 10 \mu\text{m}$
0.1 mA	31 $\mu\text{T}$ <sup>(b)</sup>	6 $\mu\text{T}$	30 $\mu\text{T}$	5.9 $\mu\text{T}$
0.2 mA	61 $\mu\text{T}$	12 $\mu\text{T}$	60 $\mu\text{T}$	11 $\mu\text{T}$
1.0 mA	307 $\mu\text{T}$	56 $\mu\text{T}$	306 $\mu\text{T}$	51 $\mu\text{T}$
10.0 mA	3090 $\mu\text{T}$	570 $\mu\text{T}$	3060 $\mu\text{T}$	510 $\mu\text{T}$

<sup>(a)</sup>The frequency of AC current is 20 kHz.

<sup>(b)</sup>The value of 1.0  $\mu\text{T}$  equals to 0.01 Oe.

여기서 특이한 현상은  $z = 10 \mu\text{m}$ 에서 생성된 자기장이  $z = 0 \mu\text{m}$ 인 중심에서 생성된 자기장보다 대략 1/6배로 줄어들었다. 이러한 전산모사에 의한 자기장의 분포를 통하여 인가된 AC와 DC 자기장은 자성비드가 붙은 적혈구 포획에 충분한 자기장의 크기로 생각된다. 또한 소자 위에 놓일 적혈구는  $\mu$ -턴 코일의 x-y 평면에 수직으로만 자기장이 생성하므로 적혈구 포획에만 기여하게 된다. 이러한 결과는 자성비드를 결합한 적혈구의 막 변형에 따른 운동 특성을 분석하는 바이오센서로 활용할 수 있음을 보여 주었다.

## 참고문헌

- [1] Y. I. Cho, J. Y. Yoo, S. H. Seo, B. K. Lee, S. J. Lee, and H. M. Kwon, *Bio Fluid Mechanics*, Yasmedia, Seoul. pp. 1-82 (2006).
- [2] J. Y. Lee, M. J. Kim, J. K. Rhee, and S. S. Lee, *J. Kor. Magn. Soc.* **24**, 101 (2014).
- [3] J. S. Park, N. R. Kim, H. J. Chung, and S. S. Lee, *J. Kor. Magn. Soc.* **25**, 16 (2015).