

I. 서론

정밀 자기장 측정은 의료, 광물탐사, 어뢰탐지, 비파괴 검사, 순환, 우주과학 등 실용과학 분야뿐만 아니고 전하-패리티 반전 및 시간 되짚기 대칭성의 비보존(charge parity time reversal symmetry violation)에 대한 기초물리학 측정에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다. 특히, 의료분야에서 미세자기장 정밀측정기술을 이용한 생체자기 측정 진단이 실용화되고 있으며, 매우 유망한 진단기술인 것으로 밝혀지고 있다. 최근까지, 극히 미세한 자기신호인, 생체자기의 측정에는 초전도 SQUID 센서만이 유일한 계측수단으로 알려져 왔다.

한편, 광펄핑 기술은 이미 1950 년대에 제안되었으며^{1),2)}, 광펄핑에 의한 정밀 자기장 측정의 응용이 있었다³⁾. 광펄핑 원자자력계의 기본원리는 알칼리 원자의 광학

를 넘어서서, 드디어 2003년에는 원자자력계로 수 fT(10^{15} T/ $\sqrt{\text{Hz}}$)의 감도를 달성했다는 연구가 Nature지에 보고⁶⁾되었다. 이 보고로부터, 지난 수십 년간 오직 초전도 SQUID 센서만이 접근할 수 있었던 영역의 정밀 자기장 측정 응용분야들이⁷⁾, 모두 원자자력계로 대체 가능할 것이라는 기대와 함께, 여러 그룹에서 활발한 연구활동이 전개되기 시작했다. 특히, 원자자력계는 초전도현상을 일으키기 위한 냉각이 필요 없으므로, 값비싼 액체 헬륨 등의 냉매 소모가 없고, 소형화가 가능하다. 또한, 상대적 자기장의 증감을 측정하는 SQUID에 비해, 자기공명 주파수 측정에 의한 절대자장을 측정한다는 장점들이 있다. 또한, 특정 응용에서는 픽업코일 없이 스핀 상호작용을 직접 측정할 수 있다는 장점도 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 미세자기 측정분야에서 오직 SQUID센서만이 독점하고 있던 영역 중, 가장 대표적인

특집 ─ 첨단 광학 및 광기술 이슈

원자자력계를 이용한 생체자기 측정

김기웅*

적 전이 에너지 레벨 근처에서 공명하는 파장의 빛이, 원자 바닥상태의 수명이 긴 자기모멘트(혹은 고차 자기모멘트)를 만들고, 이 자기모멘트가 자기장 하에서 Larmor 세차운동을 함에 따라 변화하는 원자매질의 흡수 및 분산특성을 광학적으로 측정함으로써 외부자기장을 측정하는 것이다. 이처럼 오래된 연구주제인 원자자력계가 최근 들어 다시 각광을 받게 된 큰 이유로는, 작고 저렴하며 신뢰성 있는 파장가변 반도체 레이저의 개발과 고밀도 원자증기의 바닥준위 완화시간을 1초 가까이까지 늘릴 수 있는 기술의 발전을 들 수 있다. 이런 기술의 발전들로 인해, 그동안 수십 pT(10^{12} T/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 정도로 제한되어 왔던 감도

분야가 생체자기측정이다. 최근 뇌기능 진단, 인지기능 연구 및 심장질환 정밀진단 등의 첨단의료 진단연구에 있어서 생체자기측정진단이 매우 유용한 것으로 밝혀졌고, 초전도 SQUID 센서를 이용한 대규모 다채널 의료용 생체자기 측정 장비가 활발히 개발되었다⁸⁾. 하지만, SQUID를 이용한 센서는 냉각이 필요하여 유지 및 관리에 전문적 지식과 막대한 비용이 요구되므로, 의료 현장에의 보급이 수월하지 않아서 새로운 기술의 도입에 의한 돌파구가 필요한 상황이다.

한국표준과학연구원 의료계측연구센터의 생체신호계측팀에서는 지난 10여 년 간, 저온 및 고온 초전도 기술을 응

* 한국표준과학연구원 의료계측연구단

원자자력계를 이용한 생체자기 측정

용하여 2세대 SQUID 센서를 개발하고, 이를 이용하여 세계 최고 수준의 뇌자도 및 심자도 시스템 및 측정분석 기술을 개발하였다. 4년 전부터는 앞에 언급한 냉각 및 냉매 소모 등의 SQUID 기반 생체자기 측정 장치의 실용적 경제력의 한계를 극복하기 위해, 당시 첨단최신기술로 등장 하였던 원자자력계 기술을 적용한 생체자기 측정 장치 개발에 착수하여, 미국 프린스턴 대학교와의 공동연구로 세계 최초의 뇌자도 청각유발신호를 측정하는 등 세계적으로 가장 앞선 기술을 개발해가고 있다. 본 원고에서는 한국표준과학연구원 및 프린스턴 대학교에서 진행되었던 연구들을 중심으로, 생체신호 측정에 사용되고 있는 몇 가지 고감도 원자자력계의 기본 원리와 특징, 그리고 뇌자도, 심자도 등의 응용기술 개발로 나누어 소개한다.

II. 원자자력계 기술

1. 자기공명과 광펄스

가. 자기공명

자기공명 방법에 의한 공명자기장의 측정 원리는 1901년의 Zeeman 효과의 발견으로부터 비롯한다. Zeeman 효과란, 외부 자기장 하에 놓여있는 원자의 특징적 주파수가 자기장의 세기에 비례한다는 것으로, 양자역학적으로는 축퇴되어있던 자기 부준위들의 에너지 레벨이 외부 자기장의 세기에 비례하여 분리되는 것으로 설명된다. 이 분리 주파수를 측정하여 외부자장의 크기를 측정할 수 있다.

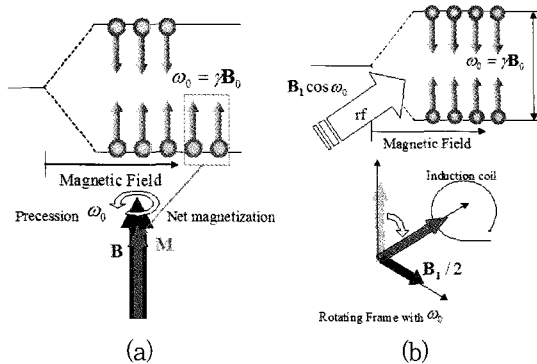


Fig. 1 (a) Zeeman splitting induced by the applied magnetic field and the Larmor frequency (b) Absorption of the resonance rf magnetic field.

이처럼 물리적인 고유현상을 이용하는 자기공명 방법은 홀 효과(Hall effect)나 fluxgate magnetometer 방법보다 시간에 따른 드리프트가 적고, 재현성이 우수하여 정밀 자장 측정에 활용된다.

보통 사용되는 전자기유도를 이용한 핵자기 공명 방법을 살펴보자 (Fig. 1). 원자계에 자기장이 인가되면, 축퇴되어있던 두 에너지 준위는 외부 자기장(B)에 비례하여 갈라진다. 자기장 하에서 갈라진 각각의 에너지 준위에 있는 원자들은 볼츠만 분포에 의해 열적평형상태에 이르게 되고, 에너지 준위간의 population의 근소한 차이를 나타내며, 이 차이는 각각 자기모멘트들의 알짜 합으로 거시적인 자화(M)를 생성한다.

생성된 자기 모멘트는, 마치 회전하는 팽이가 중력의 축을 중심으로 돌듯이, 외부 자기장(B)을 축으로 세차운동을 하는데, 이 세차운동의 주파수가 Larmor 주파수(ω_l)로서 핵자의 자기회전비(γ)와 외부 자장에 비례한다. 이 상태에서 외부 자기장에 수직하고 Larmor 주파수(ω_l)로 진동하는 자기장(B₁)이 원자계에 가해질 경우를 생각해보자. 진동하는 자기장은 각속도 ω_l로 왼쪽으로 회전하는 자장과 오른쪽으로 회전하는 자장으로 나눌 수 있다. 이것을 Larmor 주파수로 회전하는 회전좌표계에서 보면 좌표계와 같은 방향으로 회전하는 자기장은 정지되어있고, 다른 쪽은 매우 빨리 회전하는 것으로 보일 것이다. 공명조건에서 벗어나는 빠른 자장을 눈외로 하면, 생성된 자화는 고정된 B₁/2의 자장을 중심으로 세차운동을 할 것이다. 즉, 거시적 자화(M)는 외부자장에 수직한 방향으로 놓게 되고, 이것은 원자 상태의 분포밀도가 rf 자기장(B₁)을 흡수

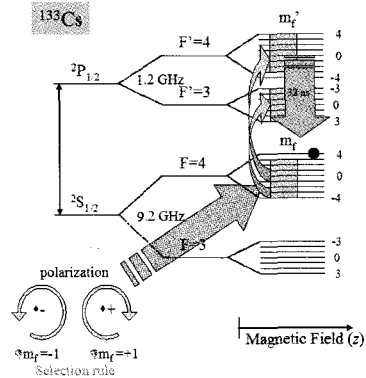
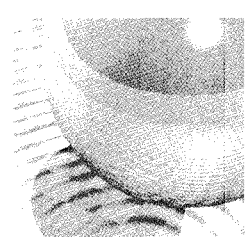


Fig. 2 Energy levels of Cesium atoms and the selection rules of transition.



하여 재분포된 것으로 설명할 수 있다(Fig. 1(b)). rf 자기장에 평행한 축을 갖는 유도 코일을 설치하면, 회전하는 자화로 인해 자기공명 신호를 측정할 수 있다. 즉, 정확한 rf 주파수(자기공명 주파수)를 인가할 때만 원자계가 에너지를 흡수하여 공명신호를 보이게 된다. 따라서 흡수가 일어나는 rf 주파수를 측정하면 외부 자기장의 정확한 크기를 알 수 있다.

나. 알칼리족 금속원자에서의 광펌핑

알칼리족 원자는 최외각 전자가 한 개뿐인 수소형 원자이고, 바닥상태의 궤도전자의 각운동량의 합이 0이므로 전자의 스핀에 의해서만 총 각운동량이 정해진다. 기본적으로 알칼리 원자는 모두 원자자력계에 사용할 수 있으나, 이 절에서는 세슘(Cs) 원자를 예로 설명한다. 왜냐하면, 세슘의 경우 광펌핑 자력계 구성에 필요한 최적 증기압이 알칼리족 금속 중 가장 낮아서 약 30°C이다. 인체에서 나오는 미소자장을 측정하기 위해서는 근접 측정이 필수적인데, 루비듐(Rb)이나 소듐(Na), 포타슘(K)의 경우는 60°C에서 140°C까지 이므로 화상을 피하도록 별도의 방열장치를 구성해야 한다. 세슘은 바닥상태의 Larmor 주파수가 350 kHz/G 이고 원자핵 스핀은 7/2이다. Fig. 2는 세슘의 에너지 준위를 나타낸 것으로 $6^2S_{1/2}$ 과 $6^2P_{1/2}$ 사이의 전자의 각운동량에 의한 미세구조로 나누어지고, 원자핵과 외각전자 스핀에 의해 $F=I \pm J$ ($7/2 \pm 1/2$; 4, 3)의 초미세 준위로 나뉘어져 있다. 우리는 외부 자기장과 원자의 상호작용이 전자와 원자핵의 상호작용 에너지보다 훨씬 작은 경우를 다루고 있으므로, 외부 자기장에 의한 Zeeman 갈라짐은 $2F+1$ 개의 자기 부준위(m_F)로 나누어진다. 세슘원자의 바닥상태와 들뜬상태의 에너지 준위에서 $6^2S_{1/2}$ 과 $6^2P_{1/2}$ 사이의 에너지 차이를 파장으로 환산하면 894 nm이고, D₁라인이라고 부른다. 다음절에 소개될 심자도 센서 개발 연구에서는 광펌핑과 측정에 D₁라인을 사용하였고, 광원인 Laser source의 파장도 894 nm에 안정화하였다. D₁파장을 이용하여 바닥상태($F=3, 4$)에서 들뜬상태($F'=3, 4$)로 펌핑하는데, 들뜬 상태에서는 머무는 시간이 매우 짧으므로 (32 ns), spontaneous emission 과정을 통해 바닥상태로 되돌아온다. 단, 이때의 천이(transition)는 전기 쌍극자 천이이므로, 펌핑광의 전기장의 방향과 원자에 인가된 자장의 방향에 따라 다음과 같은 선택규칙이 정해진다.

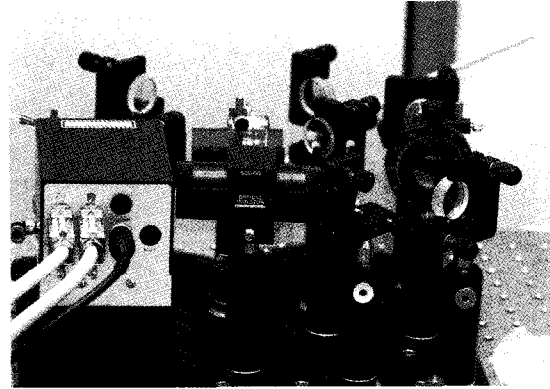


Fig. 3 Absorption-saturation wavelength stabilizer.

- (1) 선편광펌핑, 전기장//외부자기장: π 천이 ($m_F' - m_F$)=0
- (2) 우선원편광, 입사광축//자장: $\sigma+$ 천이 ($m_F' - m_F$)=+1
- (3) 좌선원편광, 입사광축//자장: $\sigma-$ 천이 ($m_F' - m_F$)=-1

흡수포화방법에 의한 레이저 주파수 안정화를 하면, 도플러 확장선폭의 중심에 수 MHz의 선폭 이내로 레이저 주파수를 한정할 수 있다. 세슘에서는 $F=4 - F'=3$ 의 흡수가 가장 크므로 외부공진기 반도체레이저의 주파수를 흡수포화안정화 장치의 세슘기준셀의 $F=4 - F'=3$ 에 맞추어 안정화하였다(Fig. 3). 자력계는 미세한 생체자기 측정을 위해서 자기 차폐실 내에 설치되는데, 차폐실 내부에서는 지자장이 상쇄된다(잔여자장: < 10 nT). 이 상황에서 상용 정밀 위상검파기(Lock-in 증폭기; < 0.001 degree 검출)를 사용하기 위해서 5 μ T (17.5 kHz) 정도의 외부자기장을 인가한다. 레이저 펌핑에 의해 모든 바닥준위가 여기될 수 있으나, 레이저 광의 편광에 따라서 앞의 선택규칙을 따르므로, 펌핑과 자발방출의 반복과정으로 인해서 특정 자기부준위로 모이게 된다; 예를 들어 $F=4 - F'=3$ 에서의 $\sigma+$ 천이의 경우 $m_F=3, 4$ 준위는 상위 $m_F'=4, 5$ 준위가 존재하지 않으므로 천이가 금지되지만, 나머지 모든 준위는 들뜬 준위로 여기되고, 충돌 등의 완화과정에 의해 빠른 시간(32 ns)안에 바닥의 모든 준위로 같은 확률로 돌아오게 된다. 이 과정을 반복하면 $m_F=3, 4$ 준위에 모든 population이 모이게 된다. 결과적으로 한 쪽 방향으로 정렬된 알짜 자화를 생성한다. 포타슘이나

원자자력계를 이용한 생체자기 측정

루비듐에서도 같은 원리로 광학적인 수단을 사용하여, 원자스핀상태를 하나의 준위로 모아 알짜 자화를 생성할 수 있으며, 이것을 광펌핑이라고 한다.

다. 광펌핑에 의한 자기공명 자기장 측정

유도코일 방법에 의한 핵자기공명 주파수의 측정은 양성자의 자기회전비(gyromagnetic ratio)의 불확도에 해당하는 0.3 ppm 이하의 오차로 자기장을 정밀 측정하는 것이 가능토록 하였다. 하지만 수십 mT 이하의 자기장의 측정에 있어서는 낮은 주파수의 신호가 유도코일에 인가되므로 신호의 크기가 측정자기장의 제곱에 반비례하여 감소하기 때문에 정밀 측정에 어려움이 있다. 광펌핑은 원자 에너지 준위의 분극밀도를 조절하는 한 방법으로 사용될 수 있다. 보통 광펌핑에 의해서 얻을 수 있는 분극은 핵의 열완화 평형상태의 분극 크기의 수백 배 이상이다. 따라서 저자장의 측정에 있어서는 루비듐, 세슘 등의 알칼리계 금속원자에 광펌핑을 이용하여 분극을 증폭하여 신호를 측정한다. 주파수 역시 광펌핑의 경우가 핵자기공명 보다 수백 배 크므로 감도 및 정확도가 높다. 그리고 광의 세기로 공명을 측정하므로 잡음과 자장의 크기와 상관없이 된다.

광펌핑 원자자력계의 측정방식은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 자기공명에서의 광의 흡수를 측정하는 방법이고, 두 번째는 광학적 공명선에서 detune된 광을 조사하여, 광펌핑 및 외부자기장에 의해서 유도된 매질의 굴절률 변화에 따른 편광변화를 측정하는 방법이다. 첫 번째 방법에 의한 자기공명 자기장 측정과정을 Fig. 4에 보였다. 앞 단원의 설명처럼 외부자장이 걸린 상황에서는 세슘 셀 내부의 원자는 원편광된 빛을 흡수하여 자화를 형성한다(Fig. 4(a)). 광원이 충분하다면 흡수는 포화되어 자화는 최대값이 되고, 세슘 셀은 더 이상 빛을 흡수하지 못하고 투과하여 광측정기는 큰 신호를 출력한다(Fig. 4(b)). 공명주파수에 해당하는 rf 자기장이 인가되면, $F=4$ 준위 안의 자기부준위들 간에 ± 1 의 전이가 발생한다. $m_F = 3, 4$ 이외의 부준위로 내려간 원자들은 다시 빛을 흡수할 수 있으므로, 세슘 셀을 통과하는 빛의 광량이 줄어서 광측정기의 출력이 감소한다(Fig. 4(c)).

결국 광측정기의 출력은 광축방향으로 정렬된 자화의 크기에 비례하게 되고, 우리는 공명조건에서 자화의 크기가 바뀌는 것을 세슘셀의 광투과율로부터 측정할 수 있게 된다. 이때의 공명주파수는 외부자장의 세기에 비례한다.

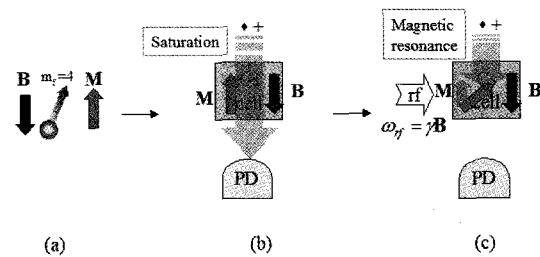


Fig. 4 (a) Magnetization generated from optical pumping governed by the selection rules. (b) Saturated absorption by the selection rule. (c) When the resonance rf field is applied to the Cs cell, the transition among the magnetic sub-levels happens and the photon-absorbable states are regenerated.

2. Auto-oscillation M_x -magnetometer

이 방법은 자화의 M_x 성분을 측정하는 방식으로서, 장치가 간단하고 측정안정도가 우수하며 위상검출에 의한 측정이므로 반응 속도가 빠르다⁸⁾. 따라서, 심자도 측정 시스템에 적합하고 경제적인 센서를 만드는 것이 가능하다. 자기발전형 자력계의 원리를 Fig. 5에 보였다. 펌핑광에 의해 광축(z축)으로 자화를 형성하고, 측정은 x 축방향의 자화를 측정광에 의해서 측정한다. 앞 절에서 논의한 바대로, 투과광은 빔 방향의 자화의 크기에 비례하므로, 공명 rf 자기장을 흡수하여 x 축으로 누운 자화가 외부자기장 B를 축으로 세차 운동하면서 측정광의 투과도를 Larmor 주파수로 변조한다. 이렇게 자체 공명주파수에서 발생한 변조를 rf 코일에 적당한 위상(90°)을 추가하여 되먹임 하면

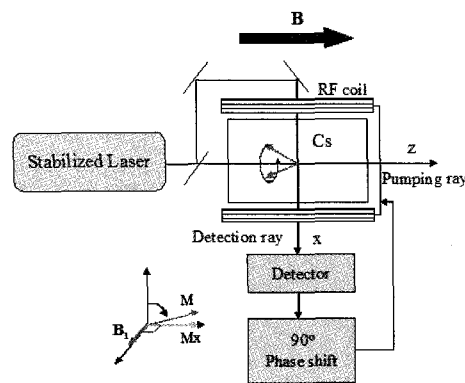
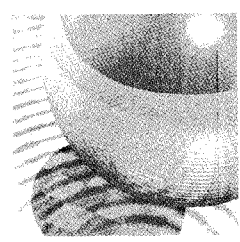


Fig. 5 Auto-oscillating magnetometry.



시스템은 공명주파수에서 auto-oscillation을 일으킨다. 이때의 주파수를 측정하면 외부 자기장의 세기를 알 수 있다.

장치를 보다 단순화 하는 방법으로써, Fig. 5에서의 펌핑광과 측정광을 같이 쓰는 방법이 있다. 바로 광축을 자기장 방향에 45°로 비스듬히 구성하는 것으로, 하나의 광이 두 개의 직교성분을 구성하여 각각 펌핑광과 측정광으로 활용된다. 단, 이 방법은 자기장 방향에 대한 센서의 각도에 의한 통계적 오차가 크다는 단점이 있다. 하지만, 심지어 측정에서는 외부에서 심지어 신호보다 훨씬 큰 바이어스 자장을 인가하여 자장의 방향을 고정함으로써 이러한 문제를 해결 할 수 있다.

3. Spin-exchange relaxation-free (SERF) magnetometer

원자자력계의 감도는 원자의 자기모멘트의 크기에 비례하고, 측정에 기여하는 원자의 수의 제곱근과 스핀완화시간의 제곱근에 각각 비례한다. 결국, 원자자력계의 감도를 높이는 방법은 원자밀도와 스핀완화시간을 증가시키는 것이다. 스핀완화에 관련된 기작은 여러 가지가 있지만 가장 지배적인 요소는 벽과의 충돌이다. 따라서 유리벽에 파라핀 코팅 등을 함으로써, 스핀완화시간을 늘리는 것이 가능하다. 좋은 코팅의 경우 10,000번의 충돌에도 탈분극화되지 않지만, 거꾸로 말하면, 약간의 결함에도 성능이 급격하게 떨어진다는 것을 의미한다. 특히, 원자의 밀도를 높이기 위해서 알칼리금속을 80°C 이상으로 가열하게 되면, 파라핀 코팅은 녹아버리므로 효과가 없다. 이 경우 버퍼가스를 사용하며, 밀도가 아주 높아질 경우는 결국 알칼리금속간의 충돌이 스핀완화를 일으키는 지배적 요소가 된다. 이 충돌은 총 각운동량은 보존하지만, 스핀 coherence가 손실되는 스핀교환과정을 일으킨다. 모든 원자는 총 각운동량 $F=I \pm 1/2$ 을 가지며, 스핀의 세차운동 방향은 총 각운동량의 방향에 대한 전자 스핀의 상대적 방향에 의해 결정되므로, 자기장 하에서 서로 반대 방향으로 회전한다. 따라서, 충돌 시 발생하는 스핀교환은 스핀이완을 일으킨다. 하지만, 자기장이 충분히 작아서 Larmor 주파수가 스핀교환속도보다 훨씬 작다면, 빈번한 충돌로 인해 상대적으로 재분포 시간이 긴 $F=I+1/2$ 상태의 세차운동 방향으로, 유효하게 모든 스핀들이 함께 돌면서 스핀교환이완을 없앨 수 있다⁹⁾. 이런 현상이 일어나는 조건을 '스핀교환이

완없는' (Spin-exchange relaxation free; SERF) 조건이라고 한다. SERF 영역에서의 주요한 완화효과는 스핀과 피 효과인데, 알칼리 금속 중에서는 포타슘(K)이 스핀과 피단면적이 가장 작으므로, 고감도 센서를 만들기 위해 사용된다. SERF에서 공명주파수는 부준위 분포상태에 영향을 받으므로, 펌핑으로 'stretched state'에 들 필요가 있다. 예를 들어, 고밀도 ($\sim 10^{14} / \text{cm}^3$) 포타슘의 경우, 10 μT 에서 3 kHz 정도의 선폭을 갖는데, stretched state로 펌핑을 하면 약 1/10로 선폭을 줄일 수 있고, 자기장을 nT 급으로 낮추어 SERF 영역으로 가져가면, 1/1000 정도의 선폭을 얻는 것이 가능하다. SERF 영역을 이용하여 프린스턴 대학의 Romalis 그룹은 단채널 감도 7 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 미분계 감도 0.5 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 의 실험결과를 얻어, 원자자력계가 기존의 SQUID 센서와 충분히 경쟁할 수 있음을 보였다¹⁰⁾.

4. Non-linear magneto-optical rotation (NMOR) magnetometer

비선형광자기회전(Non-linear magneto-optical rotation: NMOR) 자력계는, 원자증기셀 내부에서의, 두 원편광 성분의 각각 다른 굴절률 변화로부터의 측정광의 편광각도의 회전을 측정하는 방식이다. 선편광은 크기가 같고 반대방향으로 회전하는 두 원편광의 합으로 생각할 수 있기 때문에 선편광의 빛이 자기부준위를 가진 원자매질을 통과하게 되면, 서로 coherent한 두 원편광 성분에 의해서 자기부준위 사이에 coherent한 중첩이 생긴다. 이러한 상태를 coherent population trapping(CPT) 상태 또는 dark state라고 하고, 포화에 의한 흩어짐이 아닌, electromagnetically induced transparency(EIT)가 매우 좁은 선폭으로 나타난다¹⁰⁾. EIT가 유도되는 매질에 자기장이 가해지면, 자기부준위의 에너지가 이동하고, 이로 인해서 두 원편광 성분의 굴절률 변화가 반대방향으로 나타난다. 따라서, 두 성분의 전파속도 차이에 의해서 출력되는 빛의 편광각은 회전하게 된다. EIT로 인해서 만들어진 큰 분산은 두 원편광의 위상차이를 매우 크게 만들 수 있기 때문에 외부자기장에 대해서 민감하게 반응하고, 이것으로 미세 자기장을 측정할 수 있다. 그리고 이 방법은 레이저의 세기에 따라서 편광의 회전 정도가 달라지기 때문에 비선형 광자기 회전이라고 한다¹¹⁾. 약한 광에서는 선형이색성을 가지던 원자 매질이, 광강도를 높임에 따라 빛의

원자자력계를 이용한 생체자기 측정

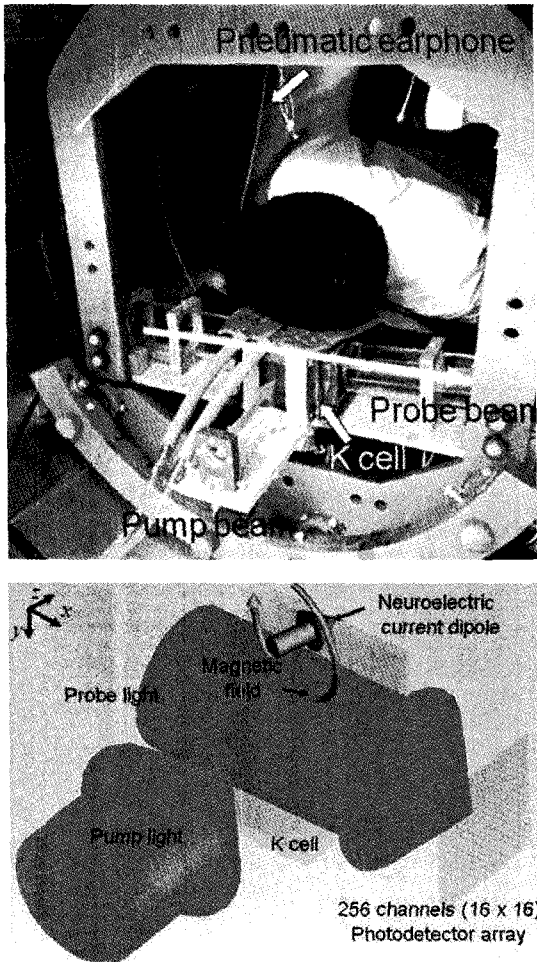


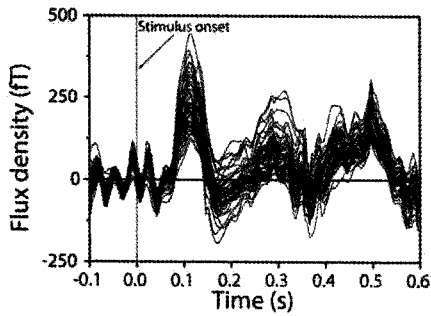
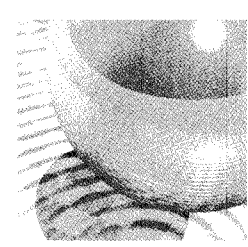
Fig. 6 Spin-exchange relaxation free brain atomic magnetometer.

전기장에 의한 효과가 나타나기 시작한다. 그 과정에서 선형이색성이 원형복굴절현상으로 옮겨가면서, EIT의 편광 각 회전 효과를 증폭한다. 특히, 자기부준위의 대칭성에 의해서, 광량이 클 경우 나타나는 AC Stark 효과가 대칭으로 상쇄되므로, 이에 의한 선폭 확대효과가 없다는 장점이 있다. Budker 등은 Rb 원자를 이용하여 약 1 Hz의 매우 좁은 공진 선폭을 갖는 NMOR 신호를 얻었고, 이러한 결과에서 예상되는 자기장 측정 한계는 원리적으로 0.3 fT/√Hz에 도달할 수 있는 것으로 보고하였다¹²⁾.

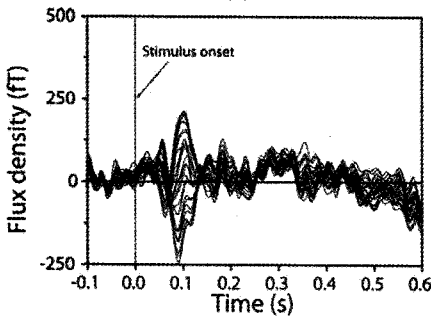
III. 생체자기측정에서의 응용

1. 뇌자도 (magnetoencephalography)

뇌자도는, 뇌신경의 흥분으로부터 발생하는 전기활동이 두개골의 낮은 전도율로부터 크게 왜곡되는 뇌전도와는 달리, 인체는 자기장에 대해 투명하므로, 신경전류 주위로부터 발생하는 자기장을 측정함으로써 정확한 뇌기능 측정을 할 수 있는 기술이다. 최근에는 고차 인지기능의 측정 및 수술전 뇌기능 매핑, 간질발생부위 추정 등에 뇌자도가 적극적으로 활용되고 있다. 하지만, 뇌신경전류로부터 발생하는 자기장의 크기는 자극유발신호의 경우 약 100 fT 정도로 매우 미약하여, 초고감도 자기장 센서로만이 측정 가능하다. 현재까지 개발된 원자자력계 기술로는 앞서 소개한 SERF 자력계가 실질적인 실험조건에서 유일하게 뇌자도 측정이 가능하다. 특히, 버피 기체압에 의해 스핀확산 효과를 줄여, 독립된 측정광을 3 mm 이하의 간격으로 배치할 수 있으므로, 하나의 대형 셀에서 다채널 측정을 하여 자기장의 공간적인 분포를 얻는 것이 가능하다. 표준원은 SERF 자력계의 최첨단기술을 보유한 프린스턴 대학교와 공동연구로 뇌자도 원자자력계 시스템을 개발하여 최초의 유발뇌자도 측정에 성공하였다. Fig. 6에 SERF 뇌자도 측정장치를 보였다. 외부자기장을 차단하기 위해 세 겹의 원통형 뮤메탈 자기차폐구조를 구성하고, 내부에 포타슘 글래스 셀과 피측정인이 위치한다. 원평광 펌핑빔을 조사하여 z 축 방향으로 자화를 생성하면, 뇌에서 발생하는 y 축 방향의 자기장에 의해 자화가 회전하여 x 축 방향의 자화성분을 형성한다. x 축을 따라 진행되는 선형편광인 측정광은 x 축 방향의 자화 성분의 크기에 비례하여 회전하며, 이 측정광을 16x16의 256채널 광센서 array로 측정하면 y-z 평면 상의 B_y 자기장의 분포를 측정할 수 있다. 비자성 청진기를 통해 피측정인의 우측 귀에 500 Hz의 단음 자극을 제시하고, 자극제시 시점을 기준으로 250회 평균함으로써, 뇌자도 청각유발 신호를 측정하는데 성공하였다 (Fig. 7(a)). 자극 제시 후 100 ms 이후에 뇌측두엽 일차 청각령의 흥분으로부터 나타나는 N100m 피크를 신호대잡음비 10 이상으로 측정할 수 있었다. 비교를 위해 SQUID 기반 뇌자도 장치로 측정된 청각유발 신호를 Fig. 7(b)에 보였다. 원자자력계 뇌자도 측정 감도는 충분히 SQUID 기반 장치와 경쟁 가능한 것을 볼 수 있다. 단, SQUID 기반 장치의 신호가 양극성인 반면, 원자자력계의 경우는 측정 영역이 부족하여, 전류쌍극자 주위의 한 극성만이 측정되어 단극성의 신호만을 보이는 것을 볼 수 있다. 뇌자도의 목적이 자기장의 분포로부터



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Auditory evoked fields measured with a brain atomic magnetometer.

(b) Auditory evoked fields measured with a SQUID magnetometer system.

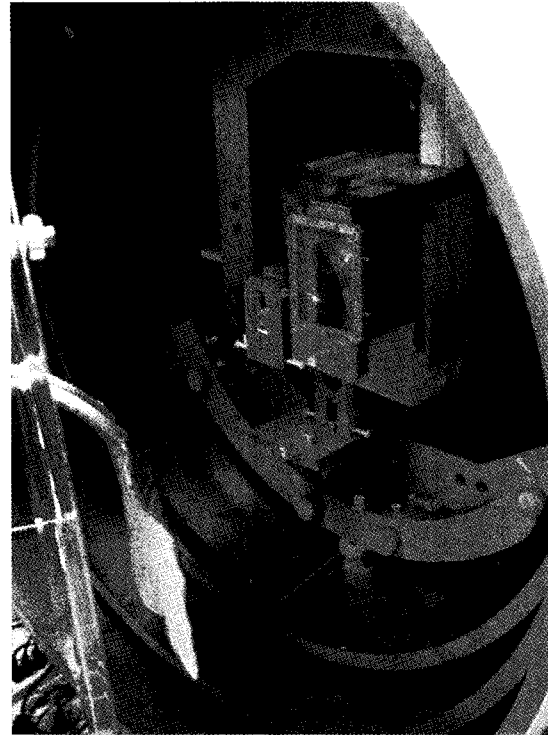


Fig. 8 Wide-coverage source localizable brain atomic magnetometer.

터 신호원을 추정하는데 있으므로, 충분한 영역의 자기장 분포를 얻을 수 있어야 한다. 또한, 측정광 방향으로의 자기장의 공간적 분포는 모두 적분되어 하나의 신호로 나타나므로, x-축 방향으로의 자기장의 공간적 분포정보가 사라진다. 이러한 단점을 보완하기 위해서, 한 변의 길이가 12 cm인 대형 팬케익형 포타슘 셀을 제작하고, 자기장의 직교하는 두 접선방향 성분을 reflect-back 방식의 측정광학계를 설계하여, 뇌자도 전류원의 국지화가 가능한 원자 자력계를 개발 중이다(Fig. 8)^[12].

2. 심자도 (magnetocardiography)

심자도는 심근의 흥분으로부터 발생하는 심근 전류를 심전도 대신 비접촉, 비침습적으로 측정하는 기술이다. 관상 동맥 질환에 의한 허혈-심근경색으로부터의 괴사조직, 심방 및 심실 부정맥의 원인이 되는 심근확장에 비정상적 상저조직, 청년층 급사를 일으키는 브루가다 증후군의 원인인 유전적 미발달 조직 등의 원인으로 심근의 전기적 특

성이 비균질적인 경우, 병적인 회귀성 파동이 발생한다. 이 경우, 복잡한 파동의 진행으로부터 발생하는 맴돌이 전류는 divergence가 0이므로 전위를 측정하는 심전도로는 검출이 불가능하지만, curl은 유한한 값을 가지므로, 자기장을 측정하면 이런 병적인 요소를 검출하여, 사전에 심장 질환을 진단할 수 있는 장점이 있다. 하지만, SQUID기반의 장치는 냉각이 필요하여, 시장 점유에 있어서 저렴한 심전도 장치에 비해 경제적으로 불리하다. 심자도 신호의 대표적인 피크인 R peak의 크기는 약 100 pT 정도 되므로, 앞서 소개한 자가발전식 원자자력계나, NMOR 자력계로 장치를 구성할 수 있다. Fig. 9에 자가발전식 원자자력계 심자도 장치의 구성도와 센서 사진, 자기차폐실내 설치 사진, 센서잡음으로부터 계산한 심근 전류원 추정가능 영역을 보였다.

이 장치의 특징은 앞 절에서 언급한 바와 같이 외부자장과 광의 방향을 45도로 배치하여, 광원을 하나만 사용하여 장치를 단순화 하였으며, 동일한 세슘-버퍼가스 셀 두 개를 사용하여, 미분계를 구성한 점을 들 수 있다. 자기진

원자자력계를 이용한 생체자기 측정

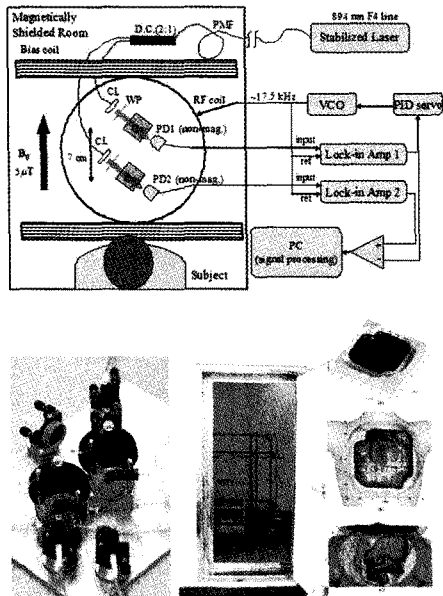


Fig. 9 Auto-oscillation magnetocardiograph.

동을 일으키는 주파수는, 가슴에서 멀리 떨어진 셀의 위치에서의 자기장의 공명주파수가 되며, 이 주파수와 가슴에 가까이 위치한 셀에서의 공명주파수(위상)의 차이가 심자도 신호로 기록되도록 되어있다. 먼 곳의 자기 잡음원로부터 발생된 자기장의 공간적 구배는 완만하므로, 두 셀에서의 공명주파수의 차이가 크지 않아 상쇄되고, 근접한 심장으로부터의 신호는 큰 차이로 기록된다. 이 장치의 감도는 약 $5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로, 좌심실 전면부의 병변을 진단하는 것이 가능하다^[13].

CPT-NMOR 자력계의 경우는 심자도 측정 가능성 타진을 위해서 세 겹의 뮤메탈로 제작한 작은 차폐구조 안에서 민감도 시험을 하였고, 50 pT 크기의 시험자장을 측정하는 것이 가능하였다(Fig. 10). 현재, NMOR 자력계 연구는 부산대학교에서 이어서 계속 진행하고 있다.

3. 기타 응용

한국표준과학연구원에서는 현재, 포타슘 SERF 원자자력계를 기반으로 심자도, 뇌자도 측정 이외에, 단백질 구조 분석을 위한 저자장 핵자기공명 장치, 제약-약물효과의 in-vivo 분석을 위한 소동물용 뇌자도-심자도 장치, 자성

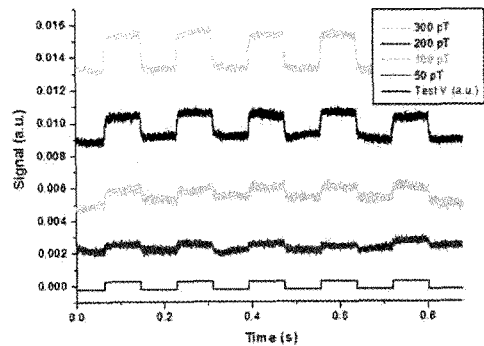
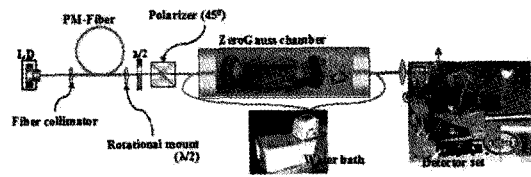


Fig. 10 Nonlinear magneto-optical rotation magnetometer and the sensitivity.

나노입자를 이용한 초고감도 생체분자 검출장치^[14, 15](Fig. 11) 등을 개발하고 있다.

IV. 결론

선진국의 연구개발 현황은 최근 원자자력계를 이용한 기술의 정밀도를 향상하여 상용 기술화하기 위한 지속적인 연구개발이 이루어지고 있는 실정이다.

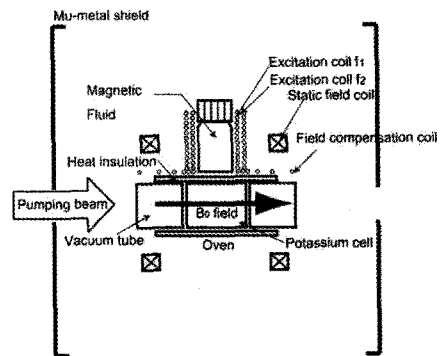
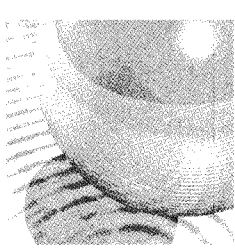


Fig. 11 Atomic susceptometer for magnetically-labeled immunoassay.



현재 SERF 원자자력계의 최고 기술을 보유한 Princeton 대학의 Romalis 그룹은 unshielded 환경에서 사용할 수 있는 고감도 포터블 자기센서, 대륙이동의 증거획득을 위한 바위 자력계, 폭발물 검출을 위한 NQR 측정장치, Table-top CPT violation 검출장치, Electric dipole moment 실험 장치 등, 완성된 수준의 고감도 자력계를, 각종 실용적 응용 및 기본물리 법칙의 연구를 위해 적극적으로 활용하고 있다. 기타 스위스의 Fribourg 대학은 원자자력계 심장도 장치를 개발하여 기업과 손잡고 상용화할 것을 계획 중이며, 미국표준기관인 NIST에서는 VCSEL 레이저 위에 증기셀을 바로 쌓아 올려, 칩 형태의 초소형 정밀 자기 센서를 개발하고 있다. 기타, 로스알라모스국립연구소, 위스콘신 대학교, 버클리 대학교 등지에서, 저자장 NMR, 태아 심장도 측정, Hyperpolarized NMR 등의 연구에 고감도 원자자력계를 활용하는 연구를 진행하고 있다. 이론적으로 원자자력계는 SQUID 센서를 능가하는 감도를 얻는 것이 가능하고, 냉매의 손실이 없다는 점에서 아주 매력적인 기술이다. 하지만, 아직까지는 지난 수십 년간 집중적으로 개발되어온 SQUID 기술에 비교해서, 실용적 측면에서의 안정성이나 활용성이 떨어져서, 더욱 개발해야 할 여지가 있다. 특히, 원자자력계의 의료 및 생체 자기 측정 분야에서의 활용은, 그 효용이 뛰어난데도 불구하고, 고가의 장비 및 냉매 소모로 인해 널리 보급되지 못했던, 생체 자기 측정 진단 장비의 확산에 기여하여, 인류의 삶의 질을 한 단계 높일 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

- (1) A. Kastler, "Some suggestions concerning the production and detection by optical means of inequalities in the populations of levels of spatial quantization in atoms. Application to the Stern and Gerlach and magnetic resonance experiments", J. Phys. Radium 11, 255-265 (1950).
- (2) H. Dehmelt, "Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms", Phys. Rev. 105, 1924-1925 (1957).
- (3) W. Bell and A. Bloom, "Optical detection of magnetic resonance in alkali metal vapor", Phys. Rev. 107, 1559-1565 (1957).
- (4) W. Bell and A. Bloom, "Optically driven spin precession", Phys. Rev. Lett. 6, 280-281 (1961).
- (5) A. Bloom, "Principles of operation of the rubidium vapor magnetometer", Appl. Opt. 1, 61-68 (1962).

- (6) I. K.ominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis, "A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer", Nature 422, 596-599 (2003).
- (7) J. Clarke and A. I. Braginski, The SQUID Handbook (Wiley-VCH, Weinheim, 2004).
- (8) E. B. Alexandrov and V. A. Bonch-Bruевич, Opt. Eng. 31, 711 (1992).
- (9) W. Happer and H. Tang, "Spin-exchange shift and narrowing of magnetic resonance lines in optically pumped alkali vapors", Phys. Rev. Lett. 31, 273-276 (1973).
- (10) K. J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, "Observation of electromagnetically induced transparency", Phys. Rev. Lett. 66, no. 1, 2593-2596 (1991).
- (11) I. Novikova, A. B. Matsko, V. L. Velichansky, M. O. Scully, and G. R. Welch, "Compensation of ac Stark shift in optical magnetometry", Phys. Rev. A, Vol. 63, 063802-1 (2001).
- (12) D. Budker, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk and M. Zolotarev, "Sensitive magnetometry based on nonlinear magneto-optical rotation", Phys. Rev. A 62, 043403 (2000).
- (13) K. Kim, H. Xia, S. K. Lee and M. V. Romalis, "Development of a Wide-coverage Atomic Brain Magnetometer System", International Conference on Biomagnetism 2008, Sapporo, Japan, 232 (2008).
- (14) K. Kim, W. K. Lee, I. S. Kim, and H. S. Moon, "Atomic Vector Gradiometer System Using Cesium Vapor Cells for Magnetocardiography: Perspective on Practical Application", IEEE Trans. Instru. Meas., 56(2), 458-462 (2007).
- (15) 김기웅 외, "원자자력계를 이용한 초고감도 투자율 검출장치 및 그 이용방법", 대한민국특허 10-2008-0054638
- (16) K. Kim, Y. H. Lee, H. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park, "Ultra-sensitive Susceptibility Detection Apparatus of Anharmonic Resonance Measurement Type Using Atomic Magnetometer, and Method of Using Same", United States Patent 12/266,726

약 력



김기웅

- | | |
|-------------------|------------------------------|
| 1995. 2 | KAIST 물리학과 이학사 (고출력레이저광학) |
| 1997. 2 | KAIST 물리학과 이학석사 (비선형동역학) |
| 2002. 2 | KAIST 물리학과 이학박사 (자성체물리학) |
| 2002. 4 ~ 현재 | 한국표준과학연구원 선임연구원 |
| 2006. 7 ~ 2007. 9 | 미국 프린스턴대학교 물리학과 객원연구원 (원자물리) |
| 2006. 3 ~ 2008. 2 | 과학기술연합대학원대학 의학물리학과 조교수 |
| 2008. 3 ~ 현재 | 과학기술연합대학원대학 의학물리학과 부교수 |