MRI실 출입문의 자성체 탐지 장치 개발

윤덕용*, 서정선**
*공주대학교 전기전자제어공학부
**에이원FA 대표이사
e-mail : yoon3m@kongju.ac.kr

Development of Ferromagnetic Detection System for Patient Screening of MRI Room

Duck-Yong Yoon*, Jung-Sun Seo**
*Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University
**CEO of A One FA Co.

요 약

본 논문에서는 병원의 MRI실 출입문에 설치하는 도어형의 자성체 탐지 장치를 개발하였다. MRI 촬영장치는 강력한 자계를 발생하여 환자의 체내를 촬영하기 때문에 주변에 자성체가 있으면 장비의 동작이 흐트러져서 촬영된 영상을 사용할 수 없게 되며, 더우기 이들 자성체를 강하게 잡아당겨 촬영중인 환자나 의료진에게 치명적인 부상을 입히거나 촬영장치를 기계적으로 손상시키게 되므로 상당한 비용과 시간을 들여서 수리해야 한다. 이 장치에서 자성체를 탐지하는 원리는 기본적으로 자기센서가 지자기를 측정하면서 자성체가 접근할 때 지자기의 세기가 미세하게 변하는 것을 검출하여 자성체를 탐지하는 것이다. 센서 출력신호의 미세한 변화량을 측정하기 위하여 차동증폭 회로를 사용하는데, 본 논문에서는 A/D 컨버터로 측정 가능한 0~5V 범위 내에서 이 신호의 변화량을 수십배 이상까지 차동 증폭할 수 있는 새로운 방법을 제안하여 MRI실 자성체 탐지 장치의 성능을 개선하고자 하였다. 본 논문에서 개발한 결과는 시제품을 제작하고 충분한 시험을 거쳐서 검증한 이후에 제품화하여 최초의 국산 제품으로 시장에 출시할 계획이다.

1. 서론

1980년대 초부터 실용화되기 시작한 자기공명영상(MRI ; Magnetic Resonance Imaging) 촬영장치는 여러 가지의 우수한 특성을 가지고 있어서 오늘날 병원에서 사용하는 가장 중요한 영상의학 검사장비 중의 하나가 되었다. 이것은 강력한 자계(magnetic field)를 사용하여 인체의 내부를 촬영하기 때문에 방사선을 이용하는 기존의 X레이나 컴퓨터단층촬영(CT ; Computed Tomography) 방식보다 인체에 미치는 해가 적고, 여기에 초음파 진단 장치까지 추가하더라도 이 모든 것들에 비하여 해상도가 훨씬 높은 영상을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

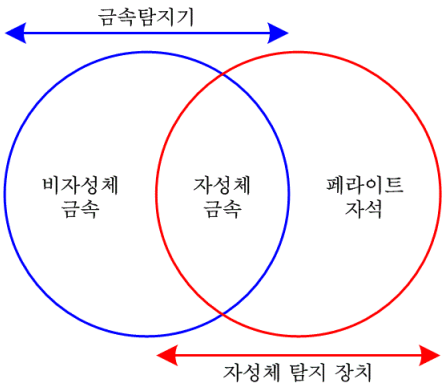
그러나, MRI는 0.3~3T(Tesla)의 강력한 자계를 사용하고 기술의 발전으로 이러한 자계의 세기는 점점 증가되는 추세이기 때문에 MRI실은 이들 자계가 외부로 나가지 못하도록 특별하게 설계해야 하며, 촬영이 수행되는 동안에는 강력한 자계가 주변의 자성체 금속을 잡아당기는 사고가 발생하기 때문에 이를 사용하는 의료진이나 환자는 절대로 지정된 안전수칙을 지켜야 한다. 그런데도 이 안전수칙을 소홀히 하거나 환자가 자성체를 지니고 촬영에 임하여 MRI 촬영장치 및 영상에 심각한 결함을 야기하거나, 이른바 미사일 효과(missile effect)에 의하여 침대, 휠체어, 산소통, 망치, 가위, 칼, 열쇠, 휴대전화 등의 자성체 금속을 포함하는 물건들이 빠른 속도로 MRI 촬영기에 빨려들어가는 치명적인 의료사고가 종종 발생하고 있다.[1][3] 이런 사고가 발생하면 환자나 의료진이 심각한 부상을 입을 수도 있고, MRI 촬영장치의 고장이 발생하여 상당한 비용과 시간을 들여서 수리해야 한다.

[그림 1] 도어형의 자성체 탐지 장치

MRI실에서 자성체에 의한 이러한 안전사고가 발생하는 것을 방지하려면 MRI실의 출입문에 보안설비로서 자성체 탐지장치(FMDS ; Ferromagnetic Detection System)를 설치하는 것이 바람직하므로 현재는 이러한 보안설비를 사용하는 경우가 점점 많아지고 있으며, 향후에는 모든 MRI실에 이를 의무적으로 설치하도록 법제화될 것으로 전망되고 있다. FMDS

설비에는 휴대용과 벽면 설치형도 있으나 그림 1과 같은 도어형이 정확성이나 인력 절감의 측면에서 가장 바람직한 것으로 평가되고 있다.

흔히 공항 또는 터미널 등의 보안검색대에서 사용하는 도어형 금속탐지기(metal detector)나 지뢰 탐지용으로 사용되는 휴대용 금속탐지기를 MRI실에서도 사용하면 될 것으로 착각하기 쉬우나 이는 불가능하다. MRI실에서는 모든 자성체를 탐지하여 경보를 울림으로써 이것들이 MRI실에 유입되지 않도록 철저하게 막아야 하는데, 그림 2에 보인 것처럼 기존의 금속탐지기는 금속만을 검출하므로 페라이트 자석처럼 금속이 아닌 영구자석을 탐지하지 못하기 때문이다.



[그림 2] 금속탐지기와 자성체 탐지 장치의 차이

본 논문에서는 MRI실 출입문에 도어형으로 설치하여 사용하기 위한 자성체 탐지 장치를 개발하고, 이것의 성능을 극대화할 수 있는 방법을 제안하며, 시제품을 제작하여 시험함으로써 제안된 방법의 성능을 확인한다.

2. 자성체 탐지 장치의 개발

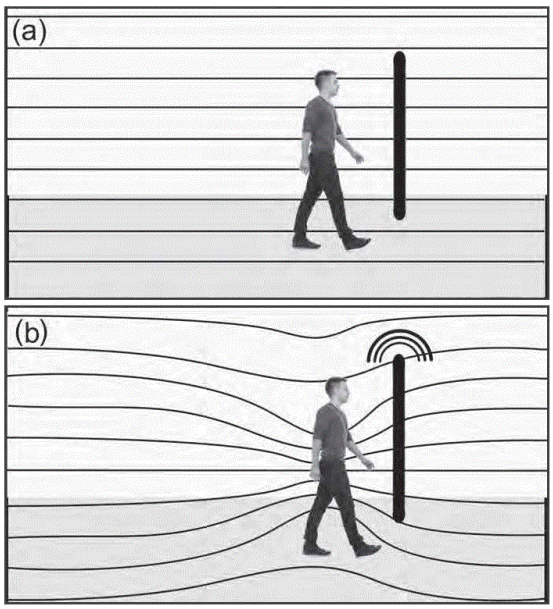
2.1 자성체 탐지 장치의 원리

지구자기장(earth's magnetic field)의 세기는 지구상의 위치에 따라 25~65μT 정도의 크기로 달라지는데, 우리나라에서는 대략 남북방향으로 최고 49μT의 값까지 측정되는 것으로 알려져 있다. MRI실의 자성체 탐지 장치는 기본적으로 이러한 지자기 특성을 이용하기 때문에 수십 μT 정도의 자계를 측정할 수 있는 정밀한 자기센서가 필요하다.

현재 자계의 세기를 측정할 수 있는 센서에는 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)형, 검색 코일(search coil)형, 플럭스게이트(Fluxgate)형에서부터 AMR/GMR (Anisotropic / Giant Magnetoresistance), 홀센서 등과 같은 반도체 방식 등 여러 가지 종류가 개발되어 왔다.[2] 이 중에서 SQUID 방식은 가장 측정 정밀도가 높으나 측정 범위가 수μT 이하로 작아서 MRI용으로 사용하기 어렵고, 검색 코일 방식은 파라데이의 전자유도 현상을 이용하기 때문에 정자계(static magnetic filed)를 측정하는데는 사용하지 못하며, 홀센서 방식은 측정 분해능이 낮아서 수십 μT의 지자기를 측정하는데는 별로 좋지 않다. 따라서, MRI실에서 지자기를 측정하는 방식으로 자성체를 탐지하는 용도로는 플럭스게이트 방식의 자기센서나 AMR/GMR과 같은 자기저항 방식의 자기센서가 주로 사용되고 있는데, 이중에서 플럭스게이트 방식의 분해능이 좀더 우수한 것으로 알려져 있다.

자력계(magnetometer)에서는 자계의 세기를 절대값으로 정확하게 측정해야 하지만, MRI실의 FMDS에서는 자성체가 없을 때 지자기에 의한 자계 측정값에 비하여 자성체가 접근하였을 때의 자계 측정값이 달라지는 특성을 이용하기 때문에 자계의 세기를 측정한 절대값은 그다지 중요하지 않다. 그러나, 자성체가 없을 때의 자계는 지자기 값이 되며, 자성체가 접근하면 그것의 영향을 받아 이 값이 상대적으로 증가하거나 감소하므로 기본적으로 여기에 사용되는 자기센서는 지자기 값을 매우 정밀하게 측정할 수 있는 성능과 측정 범위를 가져야 한다. 부피가 크거나 강한 자성체가 접근한다면 지자기 측정값의 변화량도 크겠지만, 작은 부피의 자성체나 약한 자성체가 접근하면 지자기 측정값의 변화폭도 작게 되므로 이 자기센서의 분해능이 좋아 정밀한 것이 바람직하다.

이와 같은 MRI실 자성체 탐지 장치의 원리를 그림으로 설명하면 그림 3과 같다.[3] 이 그림의 (a)처럼 자성체를 지니지 않은 사람이 센서에 접근할 때는 이 사람이 지자기에 영향을 주지 않으므로 센서의 측정값에 거의 변화가 없다. 그러나, 그림의 (b)처럼 자성체를 지닌 사람이 센서에 접근할 때는 자성체가 지자기의 흐름에 영향을 주게 되고, 이 자성체의 특성 및 위치에 따라 자계가 더 세지거나 약해지므로 자기센서로 측정하는 값이 달라져서 자성체를 탐지할 수 있게 된다.

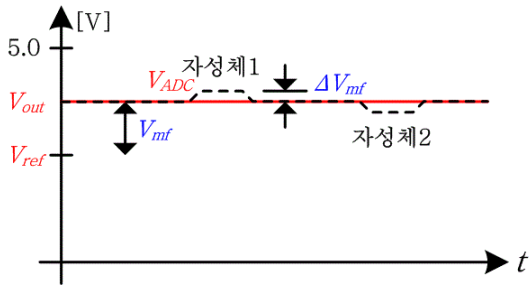


[그림 3] 지자기를 사용한 자성체 탐지 장치의 원리

2.2 자성체 탐지 장치의 차동증폭 회로

본 논문에서는 자기센서로서 측정 범위가 ±100μT이며,

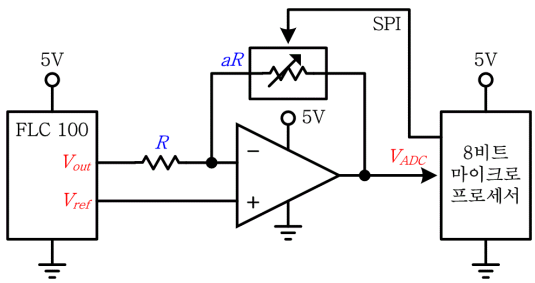
+5V 전원을 사용할 때 출력 신호 V_{out}이 그림 4에 보인 것처럼 V_{ref} = +2.5V를 기준으로 하는 차동 전압으로 나오는 센서 모듈 FLC 100을 사용하였다.[4] 여기서 측정하려는 자계의 세기에 따른 출력전압은 $V_{mf} = V_{out} - V_{ref}$ 가 되는데, 센서의 방향이 북쪽을 향하여 N극을 측정하는 경우에는 가장 큰 양(+)의 값으로 나타나고, 남쪽을 향하여 S극을 측정하는 경우에는 가장 작은 음(-)의 값으로 나타난다. 이 센서의 출력 특성은 ±1V/50μT로 표시되기 때문에 우리나라에서 지자기의 세기가 최대 49μT라는 것을 고려하면 센서의 출력전압 범위는 V_{mf} = ±0.98V가 되고, 따라서 센서가 동서남북에 대하여 어떤 방향으로 놓이는지에 따라 출력 신호는 V_{out} = 2.5V ± 0.98V = 1.52 ~ 3.48V로 다르게 나타난다.



[그림 4] 자기센서 FLC 100의 출력 신호

이때 이 센서의 주위에 자성체가 접근하면 그림 3(b)에서 설명한 것처럼 지자기에 의한 자속이 흐트러져서 그림 4에 보인 것처럼 출력전압 신호 V_{out}에 수 mV 또는 그 이하의 미세한 변화가 나타난다. 이 전압을 측정하여 평상시의 누적 평균값과 비교하면 자성체의 접근 여부를 탐지할 수 있다.

이와 같은 방법으로 자성체를 탐지하기 위한 장치의 하드웨어 구성을 그림 5에 보였다. 여기서 Op Amp에 고정 입력 저항 R과 가변 피드백 저항 aR을 사용한 차동증폭 회로의 출력전압 식은 $V_{ADC} = V_{ref} + a(V_{ref} - V_{out})$ 로 표시된다.[5] 피드백 저항에는 디지털 포텐쇼미터를 사용하고, 마이크로프로세서가 SPI 직렬통신을 통하여 이 저항값을 가변함으로써 차동증폭기의 증폭률 a를 원하는 값으로 설정하게 된다.

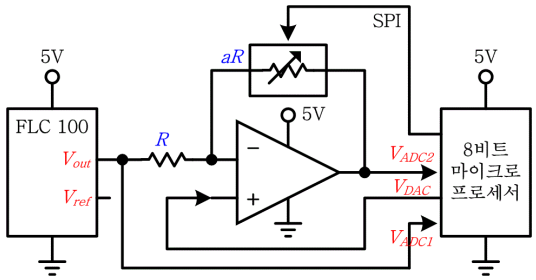


[그림 5] 자성체를 탐지하기 위한 자기센서의 차동증폭 회로

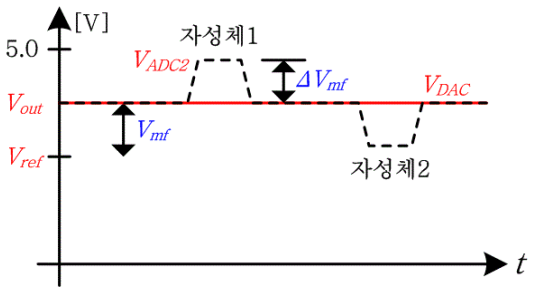
이렇게 증폭된 출력 신호는 8비트 마이크로프로세서에서 A/D 컨버터를 사용하여 읽어들이며, 이 측정값의 누적 평균값에 비하여 현재의 측정값이 얼마나 달라졌는지를 소프트웨어적으로 비교하여 자성체를 탐지한다. 그러나, 자성체의 접근에 의한 출력 신호의 변화량 ΔV_{mf}는 매우 작아서 차동증폭기를 사용하여 이를 증폭하게 되는데, 여기서 사용하는 차동증폭 회로는 V_{mf}까지 포함한 $V_{mf} \pm \Delta V_{mf}$를 차동 증폭하게 되므로 증폭률을 불과 2~3배 정도로 작게 설정하더라도 출력 신호 V_{out}이 전원전압 5V보다 커지거나 0V보다 작아지는 문제가 발생할 수 있으므로 ΔV_{mf}의 크기가 너무 작아서 자성체 접근 여부를 판단하는데 어려움이 있다.

2.3 차동증폭 회로의 개선

앞에서 설명한 것처럼 그림 5와 같은 방식의 차동증폭 회로는 자성체 접근에 의한 출력 신호의 변화폭 ΔV_{mf}만을 증폭하지 못하고 $V_{mf} \pm \Delta V_{mf}$ 전체를 증폭하기 때문에 출력 신호가 0~5V의 한계를 벗어나지 않도록 증폭률을 낮게 설정해야 하므로 자성체 탐지 성능이 매우 낮아서 현실적으로 사용하기 어렵다. 본 논문에서는 이를 개선하여 ΔV_{mf}만을 증폭할 수 있는 새로운 차동증폭 회로를 그림 6과 같이 제안한다.



[그림 6] 자기센서의 개선된 차동증폭 회로



[그림 7] 개선된 차동증폭 회로의 출력 신호

제안된 개선 회로는 센서의 출력 V_{out}을 V_{ADC1} 신호로 A/D 컨버터를 통하여 읽어서 충분한 시간동안 누적 평균을 구하고, 이 값을 D/A 컨버터로 출력하여 차동증폭기의 기준전압으로 사용함으로써 차동증폭기는 ΔV_{mf}의 값만을 증폭하게 되며 이 신호는 수 mV나 그 이하로 작기 때문에 수십배 이상까지 증폭하더라도 출력 신호가 0~5V의 한계를 벗어나지 않게 된다. 이와 같이 개선된 차동증폭 회로의 출력 신호는 $V_{ADC2} = V_{DAC} + a(V_{DAC} - V_{out}) = V_{DAC} + \Delta V_{mf}$ 로 표시되고, 여기서 증폭률 a를 수십배 이상으로 크게 설정할 경우 자성체 접근에 따른 변화폭 ΔV_{mf}가 매우 커지므로 이를 A/D 컨버터로 읽어서 쉽게 자성체 접근 여부를 탐지할 수 있게 된다.

이와 같이 개선된 자성체 탐지 장치의 차동증폭 회로에 의한 출력 신호를 도시하면 그림 7과 같다. 그림 4와 그림7에서는 센서의 방향이 북쪽을 향하여 출력 신호 V_{out}이 기준전압 V_{ref} = 2.5V 보다 크게 나타나는 경우만을 보였지만, 이와 반대로 센서의 방향이 남쪽을 향하여 출력 신호가 기준전압보다 작은 경우에도 출력 신호의 한계가 5V 대신에 0V라는 것을 제외하면 유사한 방식으로 동작한다.

3. 성능 시험 및 결과

현재 저자들은 본 논문에서 제안한 자성체 탐지 장치의 성능을 확인하기 위한 시험을 실시하고 있다. 이 시험에서 데이터를 정리하는 판단 기준은 다음과 같이 4가지로 분류하며, 이 탐지 장치의 감도(sensitivity)는 TP/(TP + FN)으로 정의하고 특이성(specificity)은 TN/(TN + FP)로 정의한다.[6] 현재 시중에서 판매되고 있는 MRI실 자성체 탐지 시스템의 감도는 92% 수준이고, 특이성은 100%를 나타낸다.

① TP(True-Positive) : 자성체를 가진 사람이 접근하는 경우에 이를 정상적으로 탐지하여 경보를 울리는 횟수
② FN(False-Negative) : 자성체를 가진 사람이 접근하는 경우 이를 탐지하지 못하여 경보를 울리지 않는 횟수
③ TN(True-Negative) : 자성체를 가지지 않은 사람이 접근하는 경우 정상적으로 경보를 울리지 않는 횟수
④ FP(False-Positive) : 자성체를 가지지 않은 사람이 접근하는 경우 이를 잘못 탐지하여 경보를 울리는 횟수

[그림 8] 탐지 시험을 위한 4가지의 자성체

시험 대상인 자성체는 그림 8에 보인 것처럼 끝이 자화(磁化)된 ⊕자형 스크류 드라이버, 펜치, 의료용 가위, 문구용 커터칼 등의 4가지이다. 현재까지의 탐지 시험 결과를 대략적으로 보면 스크류 드라이버와 펜치의 탐지 감도는 100%이며, 의료용 가위와 문구용 커터칼의 탐지 감도는 92%를 상회한다. 이처럼 본 논문에서 개발한 MRI실 자성체 탐지 장치의 탐지 성능은 매우 우수한 것으로 확인되고 있으나 이를 체계적으로 시험하여 기존의 상업용 제품들과 성능을 수치적으로 비교하는 작업은 현재 진행중이다.

4. 결론

본 논문에서는 새로운 도어형의 MRI실 자성체 탐지 장치를 개발하고 이것의 성능을 크게 높일 수 있도록 개선된 차동증폭 회로를 제안하였다. 시험 결과 이것은 현재 상업용으로 판매되고 있는 다른 제품들에 비하여 서로 유사하거나 더 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 이 논문의 연구개발 결과는 제품화 과정을 거쳐서 최초의 국산 MRI실 자성체 탐지 장치로 출시할 계획이다.

참고문헌

[1] Lisa Mittendorff, Adrienne Young, and Jenny Sim, “A narrative review of current and emerging MRI safety issues : What every MRI technologist(radiographer) needs to know”, *Journal of Medical Radiation Sciences*, Vol. 69, No. 2, pp. 250-260, 2022

[2] James Lenz and Alan S. Edelstein, “Magnetic Sensors and Their Applications”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6, No. 3, June 2006

[3] Mark N. Kinne, “Using Ferromagnetic Detection Systems in the MRI Environment”, *SMRT Home Studies Educational Seminars*, Vol. 18, No. 1, 2014

[4] datasheet, “Magnetic Field Sensor FLC 100”, Stefan Mayer Instruments, 2009

[5] Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, *Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits* (6th Ed.), Prentice Hall, pp. 69-71, 2001

[6] Frank G. Shellock and Alexandra M. Karacozoff, “Detection of Implants and Other Objects Using a Ferromagnetic Detection System : Implications for Patient Screening Before MRI”, American Journal of Roentgenology, Vol. 201, No. 4, pp. 720-725, Oct. 2013