

스핀밸브를 이용한 선형 GMR 아이솔레이터의 모델링

박승영 · 조순철*

승실대학교 정보통신전자공학부
서울특별시 동작구 상도 5동 1-1, 156-743

(2004년 12월 1일 받음, 2004년 12월 15일 최종수정본 받음)

아날로그 형태의 신호를 전송하기에 적합한 특성을 보이는 선형 GMR(giant magnetoresistance) 아이솔레이터를 모델링하여 입력전류에 따른 출력전압과 전류를 조사하였다. GMR 아이솔레이터를 자기적 부분과 전기적 부분으로 나누고 선택된 스핀밸브 소자의 MR(magnetoresistance) 결과를 대입하여 출력전압을 구할 수 있는 순서도를 설정하였다. 자기적 모델링으로는 평판 코일의 3차원 모델을 FEM 방법으로 해석하여 입력전류에 의해 생성되는 자장의 세기를 구하였으며, 여기에서 자기코어층이 있는 경우 50% 이상 더 커지는 결과를 얻었다. 그리고 아이솔레이터의 출력전압파형을 계산한 결과 입력 코일 전류에 따른 궤환 코일 전류가 $I_{out} = I_{in} - 5 \text{ mA}$ 의 선형함수와 비교시 평균 $\pm 0.25 \text{ mA}$ 이내의 차이로 근사한 값으로 계산되었다. 또한 입력되는 코일 전류가 구형파일 때, 출력전압의 반응시간과 파형을 계산하였으며, 이때 최저전압에서 최대 전압까지 상승 및 하강하는 시간은 연산증폭기의 slew rate가 $0.3 \text{ V}/\mu\text{s}$ 일 때, 최저전압에서 최대 전압까지 상승 및 하강하는 시간은 $6 \mu\text{s}$ 였다.

주제어 : GMR, linear isolator, spin valves, isolator modeling

I. 서 론

전기적 아이솔레이션(isolation) 소자들은 신호원의 그라운드(ground)가 단말장치와 서로 다른 경우의 통신, 계측 그리고 의료 응용분야에서 자주 사용된다. 주요한 아이솔레이션 방법으로는 광결합 방식, 정전용량방식 또는 트랜스포머(transformer)를 이용한 기술이 있다. 광결합방식은 발광소자인 LED(light emitting diode)와 수광인 포토트랜지스터를 절연체를 사이에 두고 배열하여 빛으로 신호를 전달한다. 그리고 정전용량방식은 직류 신호를 교류 신호로 변환하여 아이솔레이션 콘덴서를 통과시키는 방법을 이용하며, 트랜스포머 방식은 전자기 유도에 의한 유도기전력을 얻는 방법을 이용한다. 그러나 이러한 방법들은 선형성이나 동작주파수 그리고 부피에 제한을 받는다[1].

GMR 아이솔레이터는 자장을 발생시킬 수 있는 마이크로 코일과 자장을 감지하는 GMR 소자가 얇은 절연막을 사이에 두고 배열되어 있으며, 이는 전술한 아이솔레이터가 가지고 있는 한계들을 극복할 수 있는 방법으로 보고 되고 있다[2, 3]. 또한 1990년대 후반부터 Nonvolatile Electronics사에서 시작된 GMR 아이솔레이터에 대한 연구[1]는 디지털신호 뿐만 아니라 아날로그 신호의 전송에도 적합하도록 선형성 및 동작주파수를 향상시키는 방향으로 현재까지 계속되고 있으며[4, 5], GMR 소자를 이용한 새로운 응용분야로 주목받고 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 GMR 아이솔레이터 가운데 선

형 아이솔레이터를 모델링 하였다. 이를 위해 아이솔레이터를 전기적 부분과 자기적 부분을 나누어 각각의 특성을 해석하고, 그 결과를 합성하는 방법이 사용되었다. 그리고 이러한 방법을 이용하여 선형성 및 동작속도를 해석하여 소자를 제조하기 전에 입력전류에 따른 출력전압 및 전류를 예측하였다.

II. 모델링

Fig. 1(a)는 스핀밸브를 이용한 선형 아이솔레이터의 회로도이고[2], Fig. 1(b)는 평판코일의 전형적인 RLC 등가회로이다[6]. 스핀밸브 소자들은 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge) 형태로 결선되어 있으며, 그 위에는 절연박막과 평판 코일(planar coil)이 차례로 위치하고 있다. 선형 아이솔레이터는 입력 코일 전류가 흐르는 평판코일과 궤환 코일 전류가 흐르는 궤환 평판 코일로 두개의 평판 코일을 가지고 있다. 입력단에 위치한 평판코일은 신호 전류(I_{in})를 받아들여 자장을 발생시키며, 이때 발생된 자장에 의해 저항 R_1 과 R_4 가 동시에 동일한 크기로 변화된다. 이때 V_A 가 직렬저항의 전압분배법칙에 따라 식 (1)에 의해 결정되며, V_B 는 직렬로 연결된 R_2 , R_4 의 전압분배법칙에 따라 식 (2)와 같이 결정된다. 그리고 이렇게 생성된 V_A 와 V_B 의 전압차는 연산증폭기에서 $(V_A - V_B)/A_v$ 만큼의 전압으로 출력된다. 그리고 다이오드를 통과하여 최종적으로 식(3)과 같은 크기의 전압으로 출력된다. 이때 V_s 은 다이오드의 built in 전압이며, 체저항(body resistance)은 무시하였다. 이는 궤환 저항의 크기에 반비례하는 전류(I_{out})가 궤환 코일에 입력되고, 이때 발생된 자장에 의해 저항 R_2 와

*Tel: (02) 820-0636, E-mail: jschul@ssu.ac.kr

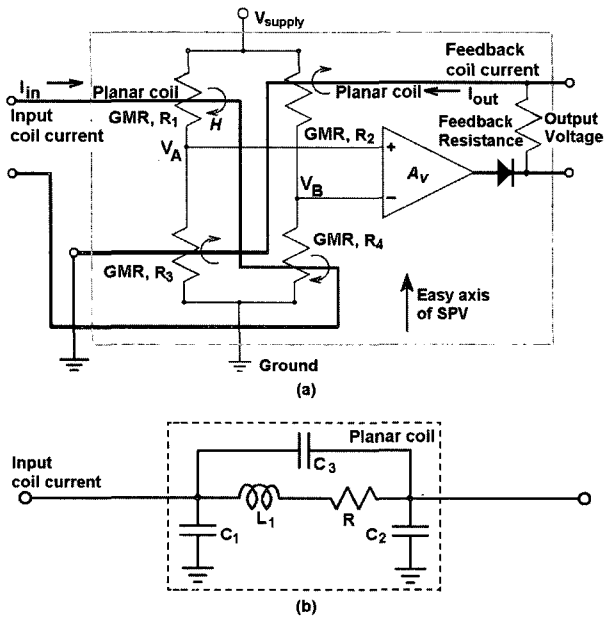


Fig. 1. Electrical model of (a) GMR linear isolator including the planar coil indicated as a straight line and (b) equivalent RLC circuit of the planar coil.

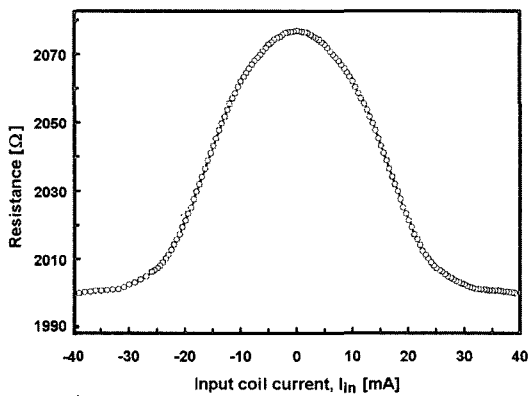


Fig. 2. Magnetoresistive characteristics of single GMR element model.

R_3 가 동시에 동일한 크기로 변화된다. 따라서 Fig. 1(a)는 입력전류의 크기만큼의 전류가 궤환 코일에 흘러 휘트스톤 브리지를 평형상태로 유지시킬 수 있도록 고안된 회로이다. 그리고 이때 사용된 연산증폭기의 전압 이득은 33, slew rate는 $0.3 \text{ V}/\mu\text{s}$ 였고 다이오드의 built in 전압은 0.4 V 였다.

$$V_A = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_{supply} \quad (1)$$

$$V_B = \frac{R_4}{R_2 + R_4} V_{supply} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{output voltage} &= (V_A - V_B)A_V - V_r \\ &= \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} V_{supply} \right) A_V - V_r \end{aligned} \quad (3)$$

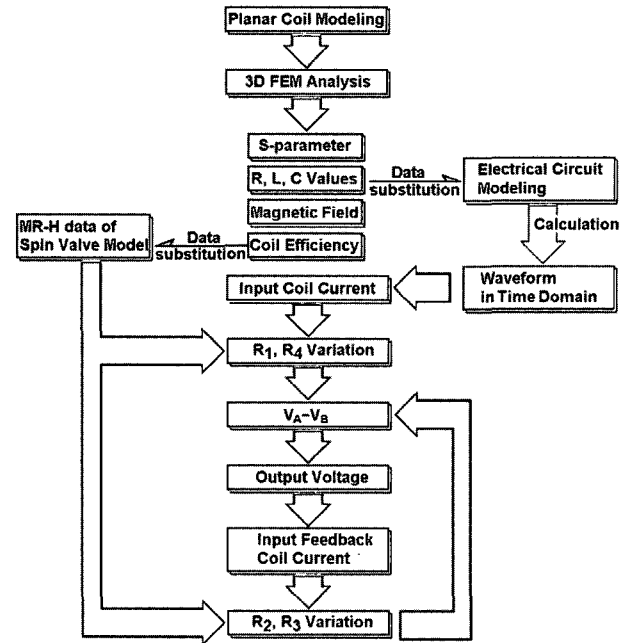


Fig. 3. Flow chart of GMR linear isolator modeling.

여기에서, $R_1 = R_4$ 이고, $R_2 = R_3$ 이다.

Fig. 2는 Ta/NiFeCo/CoFe/Cu/CoFe/NiFeCo/Ta 구조로 제조된 스핀밸브 소자의 자기저항 특성을 입력 코일전류에 따라 나타낸 그림으로 기존에 보고된 자료[2]를 인용한 것이다. 이를 0.25 mA 표본간격으로 수집하여 스핀밸브의 모델로 이용하였다.

Fig. 3은 평균 코일의 자기적 모델을 중심으로 스핀밸브의 MR 변화비와 전기회로 모델을 합성한 모델링 방법을 순서대로 작성하여 보인 그림이다. 평균 코일에 의해 발생하는 코일의 효율 및 기생 L, C 성분은 3차원 유한요소법을 사용하는 프로그램에 의해 해석하였다. 이는 MR-H 곡선의 가로축에 해당하는 자장의 세기 대신 전류의 세기로 표현이 되었다. 또한 RLC 등가회로를 이용하여 수 MHz 이상의 동작주파수에서 왜곡되는 전류파형을 해석하였다. 이렇게 구해진 자기저항 변화 자료를 입력 전류파형에 적용하여 입력전류 변화에 따른 휘트스톤 브리지의 V_A 와 V_B 를 식(1)과 식(2)처럼 구하였다. 또한 식(3)과 같이 연산증폭기의 출력전압을 구하였다. 이때 R_1, R_4 와 R_2, R_3 는 동시에 변화하지 않고, 반응시간이 연산증폭기의 slew rate의 크기에 반비례한다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 4는 입력전류의 크기에 따라 평균코일에서 생성되는 자장의 세기, 즉 코일 효율을 턴수의 변화에 따라 보인 것이다. 평균코일과 스핀밸브 사이의 거리는 $5 \mu\text{m}$ 와 $10 \mu\text{m}$ 로 변

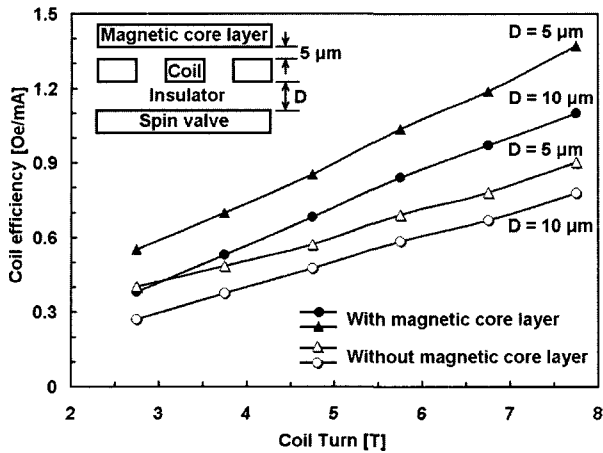


Fig. 4. Coil efficiency at the SPV depending on coil turn, existence of magnetic core layer and the distance between the planar coil and SPV (D).

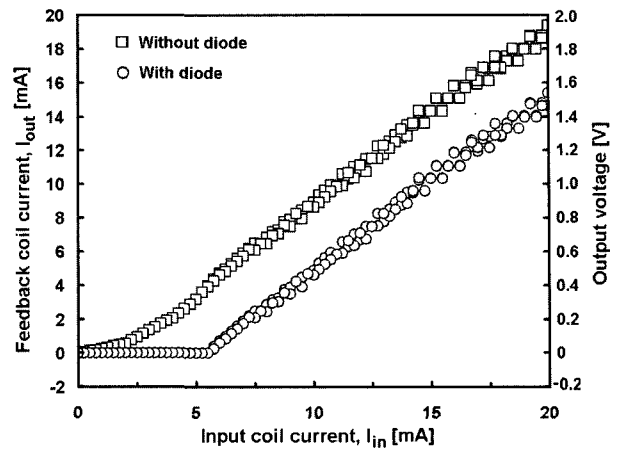


Fig. 6. Linear response of GMR linear isolator. Feedback coil current was calculated as a function of input coil current.

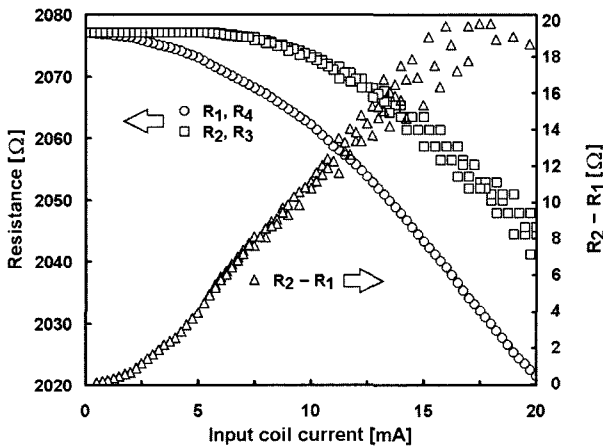


Fig. 5. Resistance variations of SPV elements depending on the input coil current and differences between R_2 and R_1 .

화시켰고, 평판코일과 자기 코어층간의 거리는 $5 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 코일의 효율은 코일의 턴수가 증가함에 따라 선형에 가까운 모습으로 증가하였다. 자기 코어층이 있고, 코일의 턴수가 7.75 턴일 때 절연층의 두께가 $5 \mu\text{m}$ 일 경우에는 1.4 Oe/mA 였고, $10 \mu\text{m}$ 일 경우에는 1.1 Oe/mA 였다. 절연층의 두께는 얻고자 하는 절연 파괴전압의 크기에 따라 조절될 수 있다. 평판 코일의 효율은 자기 코어층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 1.5배 높다는 계산 결과를 얻었다.

Fig. 5는 휘트스톤 브리지 형태로 결선된 스핀밸브 소자들의 저항 R_1, R_4 그리고 R_2, R_3 가 입력 전류의 세기에 따라 변화하는 추세와 R_2 와 R_1 의 차이를 보인 그림이다. R_1, R_4 는 입력 코일 전류의 세기가 증가함에 따라 Fig. 2와 같은 추세로 저항이 감소한다. 그리고 R_2 와 R_1 의 차이에 상응하는 만큼의 출력전류 I_{out} 이 궤환 코일에 입력되어 R_2, R_3 가 변화한다. 이때 R_2 와 R_1 의 차이는 개개의 스핀밸브 소자들의 비선형적

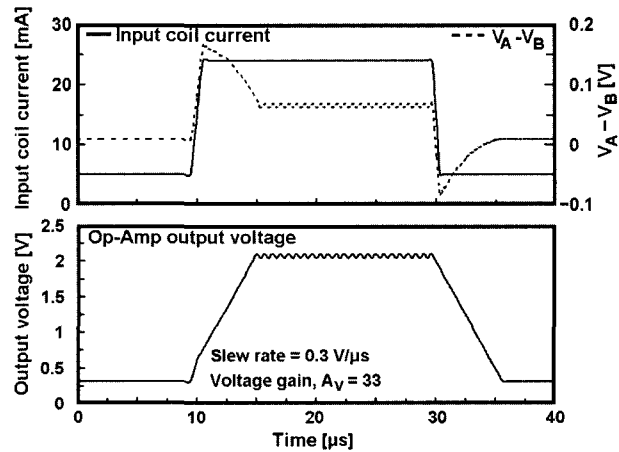


Fig. 7. Square wave response of the GMR isolator. Input coil current and op-amp output voltage waveforms are plotted.

인 저항변화 추세와 대조적으로 선형성이 증가하였음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 아이솔레이터의 선형 응답특성을 나타낸 그림이다. 이때 코일의 턴수는 7.75 턴이고, 절연층의 두께가 $10 \mu\text{m}$ 이며 자기 코어층이 있다고 가정할 경우 1.1 Oe/mA 의 코일 효율을 대입하여 계산한 결과이다. 입력 코일 전류(I_{in})가 5 mA부터 20 mA 까지 변화할 때, 입력 코일 전류에 의존하여 궤환 코일에 입력되는 전류(I_{out})는 0 mA부터 15 mA 까지 변화하였다. 이때 입력 코일 전류와 궤환 코일 전류 사이의 관계는 $I_{out} = I_{in} - 5 \text{ mA}$ 의 선형함수와 비교시 평균 $\pm 0.25 \text{ mA}$ 이내의 차이로 근사한 결과가 계산되었다. 이러한 오차는 주로 스핀밸브의 모델과 선형 응답특성 계산의 설정한 표본간격에 따른 양자화 잡음(quantization noise)에 의한 것으로, 표본간격을 줄이면 오차 또한 감소할 수 있다. 그리고 연산증폭기 출력단에 연결된 다이오드의 built-in 전압에 의해 연산증폭기의

출력이 다이오드가 없을 경우에 비해 0.4 V 낮게 출력되며, 이는 I_{out} 이 I_{in} 보다 5 mA 만큼 작게 나타나는 이유가 된다. 또한 I_{in} 이 20 mA를 초과하면 포화되기 시작하여 선형성이 더 이상 유지되지 않는다.

Fig. 7은 0.5 μ s의 표본간격으로 아이솔레이터의 구형파 응답특성을 계산한 그림이다. 이때 입력 코일 전류는 상승시간과 하강시간이 0.5 μ s인 구형파이다. V_A 와 V_B 의 전위차는 입력 코일 전류가 급격하게 변화하는 부분에서 입력 코일 전류의 급격한 변화에 따라 수 ns 정도의 지연으로 빠르고 크게 나타났다. 그리고 연산증폭기의 출력전압이 상승함에 따라 V_A 와 V_B 의 전위차는 차차 줄어들어 V_B 가 V_A 전압의 50% 수준까지 도달하면 더 이상 줄어들지 않는다. 또한 연산증폭기의 출력전압은 모델링에 사용된 연산증폭기의 slew rate(0.3 V/ μ s)에 의해 최저 전압 0.3 V에서 최대 전압 2.1 V 까지 상승 및 하강하는 시간은 6 μ s였다. 따라서 보다 큰 slew rate 특성을 보이는 연산증폭기를 사용하면 이에 비례하는 만큼 빠른 동작속도를 보일 수 있을 것이라 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 아날로그 신호를 전송하기에 적합한 특성을 보이는 선형 GMR 아이솔레이터를 모델링하여 입력전류에 따른 출력전압과 전류를 조사하였다. GMR 아이솔레이터를 자기적 부분과 전기적 부분으로 나누고 선택된 스핀밸브 소자의 MR-H 결과를 대입하여 출력전압을 구할 수 있는 모델링 순서도를 설정하였다.

자기적 모델링으로는 평판 코일의 3차원 모델을 FEM 방법으로 해석하여 입력전류에 의해 생성되는 자장의 세기를 구

하였다. 입력전류에 의해 생성되는 자장의 세기가 자기 코어 층이 있는 경우가 없는 경우에 비해 50% 이상 더 커지는 결과를 얻었다.

선형특성을 나타낼 수 있도록 휘트스톤 브리지와 궤환 코일을 이용한 회로를 이용하였고, 이때 입력 코일 전류에 따른 궤환 코일 전류가 $I_{out} = I_{in} - 5$ mA의 선형함수와 비교시 평균 ± 0.25 mA 이내의 차이로 근사한 결과가 계산되었다. 또한 입력되는 코일 전류가 구형파일 때, 출력전압의 반응시간과 파형을 보였다. 또한 구형파 응답특성을 계산하였으며, 연산증폭기의 slew rate가 0.3 V/ μ s일 때, 최저전압에서 최대 전압까지 상승 및 하강하는 시간은 6 μ s였다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] W. C. Black Jr., T. H. Hermann, S. Hui, Circuits and Systems, IEEE 39th Midwest symposium, 1, 127(1996).
- [2] T. M. Hermann, W. C. Black, S. Hui, IEEE Trans. Magn. 33(5), 4029(1997).
- [3] J. M. Daughton, IEEE Trans. Magn. 36(5), 2773(2000).
- [4] S. Park, J. Kim, S. Jo, paper GS-06, presented at the 49th MMM Conference(2004).
- [5] R. Fayfield, T. Hazelton, T. Popple, F. Williamson, University/Government/Industry Microelectronics Symposium, Proceedings of the Thirteenth Biennial, 165(1999).
- [6] B. Piernas, K. Nishikawa, K. Kamogawa, T. Nakagawa, K. Araki, IEEE Trans. Microwave theory Tech., 50(8), 1942(2002).

Modeling of a linear GMR Isolator Utilizing Spin Valves

S. Park, S. Jo*

School of Electronic Engineering, Soongsil University, 1-1, Sangdo-5Dong, Dongjak-Ku, Seoul 156-743, Korea

Linear GMR isolator which is profitable for transmitting analog signal was modeled and the output voltage and current in relation to the input current were investigated. GMR isolator modeling was divided into two parts, namely magnetic and electric parts. The flow chart of the modeling was drawn in which the MR curve of the spin valves were incorporated to obtain the electrical voltage output. For magnetic modeling, 3-dimensional model of planar coil was analyzed by FEM method to obtain the magnetic field strength corresponding to the input current. Coil efficiency of the planar coil having magnetic core layer was shown to have about 1.5 times larger than that of the coil without the magnetic core layer. The feedback coil current(output current) corresponding to the input coil current was calculated to be within ± 0.25 mA of the linear fitting function of $I_{out} = I_{in} - 5$ mA. Also, the response time and output waveforms were obtained when the coil current was a rectangular waveform. The rise time and fall time was 6 μ s, respectively when the slew rate of the op-amp was 0.3 V/ μ s.

Key words : GMR, linear isolator, spin valves, modeling