

과학위성용 자력계 탑재체 개발에 관한 연구

황승현¹ · 이 동 훈¹ · 민 경 옥² · 신 영 훈² · 이 대 희²

¹경희대학교 우주과학과, ²한국과학기술원 인공위성연구센터

최 정 립³ · Onishi Nobuhito⁴

³부산대학교 물리학과, ⁴Tierra Tecnica Company, Japan

DEVELOPMENT OF A FLUXGATE MAGNETOMETER FOR THE KITSAT-3 SATELLITE

S. H. Hwang¹, D. H. Lee¹, K. W. Min², Y. H. Shin², D. H. Lee²

¹Dept. of Astronomy & Space Science, Kyung Hee University,

²Satellite Technology Research Center, KAIST

C. R. Choi³, O. Nobuhito⁴

³Pusan National University, ⁴Tierra Tecnica Company, Japan

(Received October 31, 1997; Accepted November 20, 1997)

요 약

과학적 목적으로서 탑재되는 자력계(magnetometer)는 지구 근접 우주환경을 관측하는데 있어서 필수적인 탑재체이다. 우주환경의 직접적인 전자기적 변화는 자기장과 전기장의 측정으로 알 수 있다. 실제 관측에 있어서 전기장의 관측은 기술적으로 어렵지만 자기장은 비교적 관측이 용이하다. 따라서 자기장을 측정하는 자력계는 과학위성의 기본적인 탑재체들의 하나로 인식되어왔다. 본 연구에서는 1998년 7월경에 발사 예정인 우리별 3호의 과학 탑재체인 fluxgate 자력계를 개발한 결과를 보고한다. 우리별 1, 2호에 탑재된 자력계는 단순히 위성의 자세 제어를 위해 제작되었으나, 우리별 3호에서는 자세 제어뿐만 아니라 우주과학적인 측정을 위한 자력계가 탑재될 예정이다. 우리별 3호는 1998년 7월경에 발사 예정이며 고도는 720km, 궤도는 원형 태양 동기 궤도, 무게는 약 100kg, 전력은 최대 150W이다. 그리고 과학 탑재체로는 우주복사영향 측정기(Radiation Effect Microelectronics), 고에너지 입자 검출기(High Energy Particle Telescope), 정밀 자력계(Scientific Magnetometer), 전자 온도 측정기(Electron Temperature Probe)가 있다. 우리별 3호에 탑재 예정인 정밀 자력계는 기본적으로 우리별 1, 2호에 탑재된 자력계의 회로를 추가 보정하여 넓은 우주 공간에서 일어나는 자기장 변화 현상을 관측하기에 적절한 분해능인 5nT를 기준으로 개발하였다. 일본의 자력계 전문 회사인 Tierra Tecnica사에서 자력계의 보정(calibration)과 잡음 레벨 시험(noise level test)을 수행하였다.

ABSTRACT

The magnetometer is one of the most important payloads for scientific satellites to monitor the near-earth space environment. The electromagnetic variations of the space

environment can be observed with the electric and magnetic field measurements. In practice, it is well known that the measurement of magnetic fields needs less technical complexities than that of electric fields in space. Therefore the magnetometer has long been recognized as one of the basic payloads for the scientific satellites. In this paper, we discuss the scientific fluxgate magnetometer which will be on board the KITSAT-3. The main circuit design of the present magnetometer is based on that of KITSAT-1 and -2 but its facilities have been re-designed to improve the resolution to about 5nT for scientific purpose. The calibration and noise level test of this circuit have been performed at the laboratory of the Tierra Tecnica company in Japan.

1. 서 론

우주 공간의 대부분의 물질들은 플라즈마의 상태로 되어 있다. 그러므로 어떤 임의의 우주입자가 움직일 때 이 입자는 전자기적인 반응을 하게 된다. 따라서 태양으로부터 나오는 하전 입자들이 지구에 가까워짐에 따라 지구 자기장과 상호 작용을 하게 된다. 궁극적으로 이런 입자들에 의해서 상시 변화하는 지구 자기장을 측정하기 위해서 3축 fluxgate 자력계가 사용된다. 변화하는 자기장에 대한 넓은 우주 공간에 대한 정보와 시간 분해능에 따른 협소한 지역의 소규모 변화를 동시에 관측할 수 있는 이점이 있는 관계로 대부분의 자력계는 과학위성의 기본적인 탑재체로 인식되어 왔다. 예를 들어 넓은 우주 공간에 대한 정보로서 태양으로부터 발생하는 자기 폭풍, 지구 근접 환경의 전류변화들, 지구의 암면부(night side)에서 발생하는 소규모 자기 폭풍, 극지방에서 자기권과 전리층을 연결해주는 자기장 평행 전류(Birkland current)등을 관측할 수 있고 협소한 지역의 소규모 변화로서 충격과 근처에서의 여러 가지 섭동 및 우주 입자와 지구 자기장의 반응으로 발생하는 여러 가지 전자기 파들을 관측할 수 있다. 따라서, 자력계의 실험을 통하여 지구 근처의 우주환경의 물리적 구조 및 전리층과 외부 우주와의 상호 작용을 조사할 수 있다.

본 논문은 두 개의 자력계 탑재체 중에서 과학적 목적을 위한 과학위성, 우리별 3호에 탑재될 자력계 탑재체 개발과 보정(calibration), 그리고 잡음 레벨 시험(noise level test)의 수행 결과 등으로 구성되어 있다.

2. Fluxgate 자력계의 원리

자력계는 기본적으로 크게 양자 자력계와 유도 자력계의 두 가지로 나뉘게 되는데 양자 자력계는 원자의 기본적인 특성인 Zeeman splitting이나 NMR(nuclear magnetic resonance)등을 이용하는 것이고 유도 자력계는 자기 유도의 기본 법칙인 패러데이 법칙을 이용하는 것이다. 유도 자력계 중에 fluxgate 자력계가 지구 자기장 관측에 특히 많이 쓰이는데 그 이유는 다른 종류의 자력계 즉, proton precession 자력계, optically pumped 자력계 등은 자기장의 한 방향의 성분만을 측정할 수 있는 반면에 fluxgate 자력계는 자기장의 3축 방향 성분 모두를 직접 측정할 수 있기 때문이다. 우리별 3호에도 fluxgate 자력계가 탑재될 예정이다. 또한 3축 성분을 모두 측정할 수 있는 벡터 자력계 중에

표 1. 각각 다른 모양의 코어들에 대한 반자화 계수 D (Primdahl 1979).

	Dimension(mm)	D($\times 10^{-3}$)
Double-rod	L=76.2, d=0.51	0.352
Ring-core	L=38, d=0.025, h=7.1	0.658
Tube	L=40, d ₀ =3, d ₁ =2	4.74
Tube	L=144, d ₀ =4.0, d ₁ =3.8	0.170

SQUID(superconducting quantum interference device) 자력계는 뛰어난 안정성과 민감도를 갖고 있음에도 불구하고 작동을 하기 위해서는 액체 헬륨이 필요하며 가격이 비싸기 때문에 지구 자기장 관측에는 많이 쓰이지 않는다(Primdahl et al. 1991). Hall effect 자력계는 fluxgate 자력계보다 안정성과 민감성이 떨어지기 때문에 지구 자기장 관측에는 많이 쓰이지 않는다. Fluxgate 자력계의 장점은 뛰어난 안정성과 민감성이 좋고 크기가 작으며 무게도 가볍기 때문에 과학위성 탑재용으로 가장 적합하다. 그리고 광범위한 동적 범위를 측정할 수 있고 잡음 레벨이 작기 때문에 과학위성 탑재용뿐만 아니라 지상에서의 지구 자기장 측정에도 널리 사용된다. Fluxgate 자력계의 원리는 다음과 같은 기본적인 패러데이 법칙으로부터 시작한다.

$$\begin{aligned} V &= \oint E \cdot dt = -\frac{d\Phi}{dt} \\ &= -AN\frac{dB}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 E 는 전기장, B 는 자기장, Φ 는 퍼텐셜, A 는 단면적 그리고 N 은 코일의 감은 수이다. 외부의 자기장이 시간에 따라서 변하면 그에 따른 유도 기전력이 유도된다. 이 유도 기전력으로 전압 V 를 측정할 수 있다. 이 식을 기본으로 하여 fluxgate 자력계의 기본적인 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$V = \frac{ANB_{ex}(1-D)}{[1+D(\mu_r-1)]^2} \left(\frac{d\mu_r}{dt} \right) \quad (2)$$

이 식을 기본적인 fluxgate 방정식이라고 한다. 여기서 B_{ex} 는 외부의 자기장, μ_r 은 상대 투자율(relative permeability) 그리고 D 는 반자화 계수(demagnetizing factor)이다. D 는 표 1에서 보는 바와 같이 매우 작은 양($\ll 1$)이기 때문에 이 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ripka 1992).

$$V \cong ANB_{ex} \left(\frac{d\mu_r}{dt} \right) \quad (3)$$

따라서 측정되는 전압의 값은 외부의 직류 자기장, 단면적, 코일의 감은 수 그리고 상대 투자율의 시간 변화율에 비례한다. 그림 1은 fluxgate 자력계의 간단한 원리를 나타낸 것이다. 처음에 자기 코어에 있는 구동 코일에 코어를 여기시킬 수 있는 적당한 주파수를 갖는 전류를 인가해 주면 코어는 자체의 특성에 의하여 μ_r 값이 시간에 따라서 변하게 된다. 즉, 그림 1의 오른쪽에 있는 자기이력 곡선(hysteresis curve)을 갖게 된다. 이것을 감지 코일 쪽에서 측정하면 그림 1의 마지막 그림에서 보듯

이 자기이력 곡선의 특성에 의해 유도되어 나오는 신호는 주파수가 구동 신호의 두 배가 된다(Gordon & Brown 1972). 여기서 외부의 직류 자기장이 존재하면 측정되는 신호의 위상이 변하게 된다. 따라서, 이 위상의 차이를 측정하여 외부의 자기장을 알 수 있다. 결과적으로 자력계로부터 얻어지는 결과는 감지 코일에 유도되는 전압값이고 이 값을 적분하여 얻은 직류 전압값이 최종적인 결과 데이터 값이 된다.

3. 회로 분석

회로의 설계 목표로는 동적 측정 범위는 $\pm 60,000\text{nT}$, 분해능은 5nT 그리고 시간 분해능은 5vec-tors/sec 로 정하였다. 이러한 기준으로 설계된 자력계로 변화하는 자기장에 대한 넓은 우주 공간에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에 회로 설계의 목표로 설정하였다. 자력계의 회로는 크게 5가지로 나눌 수 있다(Primdahl 1970). 첫 번째로 외부의 자기장을 측정하는 센서부분이 있다. 두 번째로 이 센서

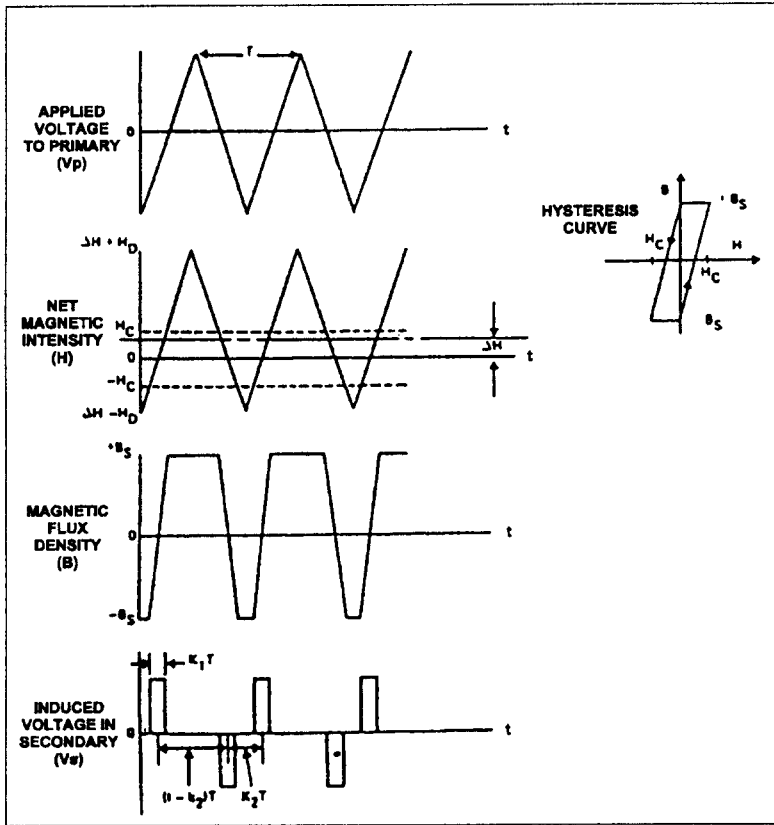


그림 1. Fluxgate 자력계의 원리.

에 구동 신호를 인가하기 위해서 파형을 발생시키는 파형 발생기(Frequency generator)가 있고 세 번째로 센서를 여기시킬 수 있도록 적당한 주파수의 신호를 만들어주는 파형 분주기(Frequency divider)가 있다. 네 번째로 파형 분주기에서 발생하는 신호의 주파수가 두 배가 되는 신호와 감지 코일에서 감지되는 신호를 비교하는 위상 측정기(Phase detector)가 있다. 마지막으로 다섯 번째는 결과적으로 출력되는 신호를 적분해주는 적분 회로(Integrator)가 있다. 그림 2는 대략적인 fluxgate형 자력계의 개략도(block diagram)를 나타내고 있다. 먼저 파형 발생기에서는 센서를 여기시키기 위한 파형을 만들어 낸다. 본 회로에 쓰인 구동 신호는 15.6KHz의 주파수를 사용하기 때문에 일반적으로 수정 발진기에서 발생하는 신호를 나누어서 사용한다. 본 회로에 사용한 발진기의 주파수는 2MHz이고 이를 2진 카운터(C4060)에서 1/16배로 나눈 후 파형 분주기로 신호를 보낸다.

파형 분주기는 앞단의 파형 발생기에서 보내주는 신호를 받아서 센서를 적절하게 여기시킬 수 있는 주파수인 15.6KHz를 갖는 신호로 만든다. 파형 분주기로 쓰이는 IC는 D-type 플립플롭(C4013)이다. 이 D-type 플립플롭을 거쳐 주파수가 15.6KHz가 되는 신호와 감지 코일에서 감지되는 신호를 비교하기 위해서 구동 주파수의 두 배가 되는, 즉 주파수가 31.2KHz인 신호를 같이 만들어준다. 위상 측정기에서는 파형 분주기로부터 만들어진 신호와 감지 코일에서 감지되는 신호를 비교하여 외부 자기장이 변한 만큼의 위상의 변화량만 검출하게 된다. 이 위상의 차이를 검출하기 위해서 사용된 IC는 C4016이다. 위상 측정기에서 검출된 신호들이 적분회로를 거쳐서 결과적으로 0에서 5V의 결과 데이터가 나오게 된다. 이 적분회로는 전자 회로에서 많이 쓰이는 OP-amp(OP400)를 사용하여 구성하였다.

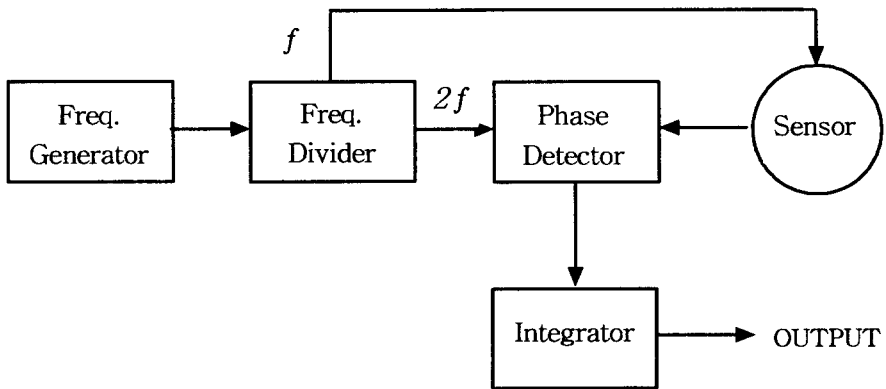


그림 2. Fluxgate 자력계의 개략도.

표 2. 각 축에 대한 보정 결과.

축	nT/V
X	9967 nT/V
Y	8698 nT/V
Z	9382.4 nT/V

4. 보정 및 잡음 레벨 시험 결과 분석

본 자력계의 보정과 잡음 레벨 시험은 일본의 자력계 제작 전문 회사인 Tierra Tecnica사의 실험실에서 수행하였다. 실험 방법은 실험실 안에 위치한 무자장 케이스에 자력계 센서를 넣고 $\pm 12V$ 와 $+5V$ 전원을 회로에 인가하여 나오는 결과 데이터를 얻는다. 이때의 데이터는 1초에 한 개의 결과 데이터를 얻은 것이며 짧은 기간(5분 이내)의 데이터만을 분석하였다. 표 2는 1V 근처에서의 각 축에 대한 보정 결과를 나타내고 있다. 결국 위성에서 받는 데이터는 0~5V의 전압값을 갖는데 위성에서 받는 데이터를 이와 같은 보정에 의한 값에 대입하여 자기장의 변화된 양을 계산할 수 있다.

여기서 잡음 레벨 시험은 잡음을 제거하는 필터를 사용하기 전과 후의 잡음 레벨에 대해 비교하였다. 잡음 중에 회로에 가장 영향을 많이 미치는 위상 측정기부의 잡음과 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꿔주는 아날로그/디지털 변환기 내부에서 발생하는 잡음을 줄이기 위한 필터들을 사용하였다. 또한 회로의 아날로그 부분과 디지털 부분이 결합된 회로로 실험하였다.

다음 그림 3~5는 잡음 제거 시험의 결과 데이터를 각 축별로 나타내고 있다. 이 데이터는 센서가 무자장 케이스 안에 있을 때 즉, 외부의 자기장이 없을 때 결과적으로 0V가 나오는 것이 이상적이다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 필터를 사용하기 전에는 직류값이 아닌 교류값이 나타남을 볼 수 있고 0V가 아니라 회로 자체의 오프셋 전압이 상당한 수준인 것을 볼 수 있는 반면에 필터를 사용한 후의 데이터에서는 회로 자체의 잡음 레벨과 오프셋 전압이 현저히 감소함을 볼 수 있다. 표 3은 회로

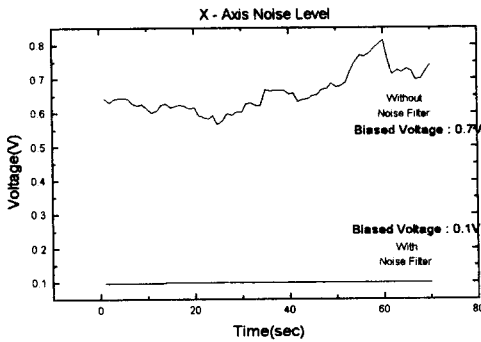


그림 3. X축에 대한 잡음 레벨.

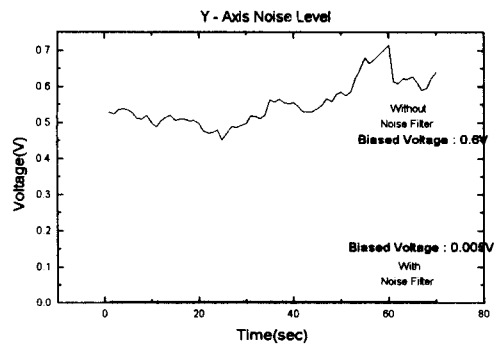


그림 4. Y축에 대한 잡음 레벨.

표 3. 각 축에 대한 peak-to-peak 잡음 레벨.

축	Without Noise Filter(V_{p-p})	With Noise Filter(V_{p-p})	With Noise Filter(nT)
X	0.24923	0.00129	12.86
Y	0.26387	0.00122	10.61
Z	0.20568	0.00187	17.55

의 오프셋 전압을 고려하지 않고 잡음의 최대값과 최소값의 차이를 나타내고 있다. 또한 필터를 사용한 후의 잡음 레벨을 nT값으로 환산해서 보여주고 있다. 본 회로에서는 필터를 사용했음에도 불구하고 잡음 레벨이 10nT 이상이 나오는 것은 회로내의 아날로그 부분과 디지털 부분이 완전하게 분리되지 않았기 때문이다. 그림 6은 회로의 아날로그 부분과 디지털 부분을 완전히 분리한 후 한 개의 축에 대한 아날로그 부분의 잡음 레벨을 측정 한 결과이다. 최대의 잡음 레벨을 자기장 값으로 환산하면 2nT 이하가 된다. 따라서 디지털 부분에 의한 잡음이 없을 경우 아날로그 부분에 한해서 원하는 분해능인 5nT를 얻는데 아무런 문제가 없었다.

5. 결 론

본 연구의 목적은 과학위성용 자력계 탑재체를 개발하는데 있다. 우리별 1, 2호에 탑재된 자력계는 과학적인 목적보다는 단순히 자세 제어를 위해 제작되었다. 우리별 3호에 탑재될 자력계는 우리별 1, 2호에 탑재된 자력계에 기반을 두고 개발되었고 과학 측정용과 자세 제어용의 2개를 따로 제작하여 탑재될 예정이다. 과학 측정용 탑재체의 목적은 태양에서 발생하는 자기 폭풍 등과 같은 변화하는 자기장에 대한 넓은 우주 공간에서 일어나는 현상을 관측하는 것이다. 따라서 위성 측정시 일반적인 소규모 자기 폭풍과 고위도 지역 전류에 의한 유도 자기장의 크기는 약 100nT이므로 분해능은 5nT정도로서 정량적인 측정이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 다른 과학적 탑재체들과 함께 데이

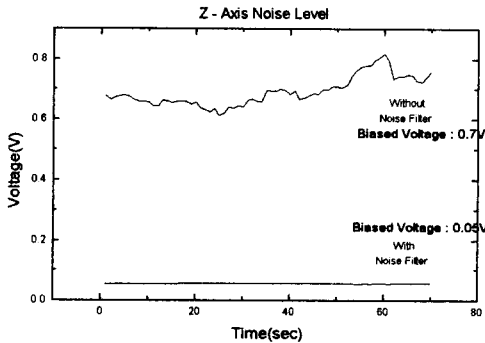


그림 5. Z축에 대한 잡음 레벨.

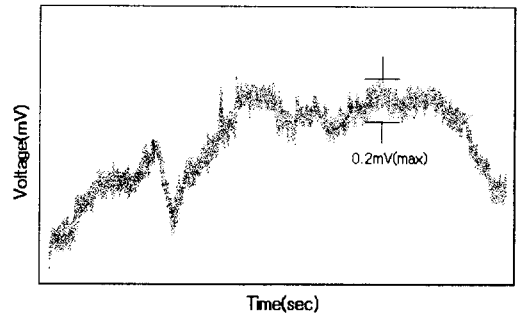


그림 6. 디지털 부분과 분리된 아날로그 부분의 잡음 레벨.

터를 공유하여 우주입자 속도 분포의 피치각(pitch angle) 측정 실험을 수행하기 위한 기준 실험자료(reference data)로도 쓰일 것이다. 우리별 1, 2호에 탑재된 자력계는 위성의 자세 제어를 목적으로 탑재되었기 때문에 센서부분이 위성의 내부에 장착되거나 위성 몸체 가까이 장착되어 정밀한 자료를 얻을 수 없었으나 우리별 3호의 과학 측정용 자력계의 센서는 위성 몸체에서 약 60cm정도 떨어진 태양 전지판(solar panel)에 장착될 예정이므로 위성 몸체에서 발생하는 유도 자기장의 영향을 제거할 수 있다. 따라서, 우리별 1, 2호때보다 위성 몸체나 본체 표면에서 발생하는 유도 전류의 영향을 적게 받게 되므로 우리별 1, 2호때보다 좋은 과학적 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

본 연구를 통하여 개발된 자력계는 우주 공간의 넓은 지역에 대한 변화들을 관측하는데 충분하다. 그러나 우주 공간에서의 섭동이나 전자기적 파동 현상들 같은 좀더 순수한 과학적 목적을 수행하기 위해서는 위성에 탑재될 자력계의 분해능이 1nT이하가 돼야만 한다. 이를 실현하기 위해서는 회로 자체를 과학적 목적에 맞게 설계해야 된다. 이는 구체적으로 아날로그와 디지털의 회로를 완전히 분리하고 각 아날로그와 디지털의 회로 자체에서 발생하는 잡음을 최대한 줄여야 된다. 또한 위성 자체에서 발생하는 유도 전류의 영향과 우주 공간에서의 온도에 의한 영향 등을 충분히 고려하여 회로를 설계해야 된다. 이런 점들이 보완된다면 향후 과학위성에 탑재되어 우주 공간 환경에 대한 좀더 자세한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Gordon, D. I. & Brown, R. E. 1972, IEEE Trans. Magnetics., Vol. MAG-8, No.1, 76
 Primdahl, F. 1970, IEEE Trans. Magnetics., Vol. MAG-6, No. 2, 376
 Primdahl, F. 1979, J. Phys. E: Sci. Instrum., 12, 241
 Primdahl, F., Ripka, P., Petersen, J. R. & Nielsen, O. V. 1991, Meas. Sci. Technol., 2, 1039
 Ripka, P. 1992, Sensors and Actuators. A., 33