

時變磁界測定用 센서에 관한 研究

(A Study on the Sensor for Measuring the Transient Magnetic Fields)

이복희* · 백용현* · 박형기* · 하성철** · 최창준*** · 임동묵****

(Bok-Hee Lee, Yong-Hyun Paek, Hyung-Ki Park, Sung-Chul Ha, Chang-Joon Choi, Dong-Mook Yim)

요 약

본 논문은 단로기의 조작 또는 전력기기의 고장시에 흐르는 급준성 대전류에 의하여 발생하는 자계의 측정이 가능한 새로운 센서의 개발에 대하여 기술한다. 동축케이블을 이용한 자기적분형 자계센서의 동작원리 및 설계방법 등에 대하여 이론적으로 해석하고, 인가된 자계에 대한 센서응답을 정확하게 결정할 수 있는 교정실험을 수행하였다. 또한, 센서의 동작원리에 상응하는 이론적 모델을 제안하였다. 시제작된 자계센서는 적분저항의 증가와 더불어 감지전압이 상승하고, 감쇠시간은 줄어드는 특성을 나타내었다. 과도대전류에 의하여 유발되는 방사자계는 거리의 제곱에 반비례하는 특성을 보였으며, 전자기기의 보호를 위한 전자차폐장치의 설계시 방사자계성분에 대한 영향을 고려하여야 됨을 확인하였다.

Abstract

This paper describes a new developed sensor by which we can measure magnetic field that occurs by the fast transient-large current that take place during the disconnecter operations and/or the power equipment faults. The operational theory and design rule of a self-integrated magnetic field sensor using by coaxial cable is analyzed. A calibration investigation is carried out, which enables a precise determination of the response of the sensor to an applied magnetic field. A theoretical model is also proposed which adequately describes the electrical operation of the sensor. As an integrating resistance increases, the sensitivity of the sensor is improved, but the decay time constant of response decreases. The radiant magnetic field generated by the transient current is inversely proportional to square of distance. It is confirmed that we should take the radiant magnetic components into the design rule of electro magnetic shields employed for protecting electronic circuits.

* : 인하대학교

** : 동국대학교

*** : Schenk-Korea Co.

**** : HEE Co.

1. 서 론

대도시에서 부하의 집중으로 송변전 설비용부지문제, 공급의 신뢰성과 전기의 양질화 및 안전성을 확보하기 위하여 특히 가스절연변전설비가 증가되고 있는 추세이다. 따라서 전력설비의 대형화와 고전압화로 전력기기에 대한 고전압, 대전류시험의 중요성이 점점 부각되고 있으며, 전력기기에 대한 개폐임펄스전압시험뿐만 아니라 급상승과도전압시험, 차단과 전압시험에 있어서 시험전압 및 특성치의高精度 측정이 요구되고 있다. 최근 뇌임펄스전압과 개폐써-지에 대한 전력계통의 絶緣協調, 가스절연개폐장치나 가스차단기, 가스절연변압기 등 고성능 전력기기의 개발과 운용의 신뢰성 향상을 위해 전자계환경에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 또한 전력설비로부터의 放射에 의한 전자파장해가 대단히 가혹해지고 있는 실정이다.^[1,4]

본 연구에서는 유도되나 직격되 및 개폐이상전압, 고장시의 과도이상전압 또는 단로기나 차단기의 조작시 혹은 고장이발생하였을 때의 대전류에 의한 자계의 측정과 평가 및 이에 대한 대책수립을 위하여 피측정 전자계의 영향을 거의 받지 않는 동축케이블을 이용한 자기적분형 자계센서에 대하여 이론적으로 해석한다. 또한 시계작된 자계센서의 단위계단 응답특성과 주파수대역등을 측정하고, 실제의 전력계통에서 발생하는 대전류에 의한 자계성분을 측정하고, 이들의 특성에 대하여 검토하였다.

2. 이 론

루우프형 자계센서의 동작원리는 다음의 맥스웰전자방정식을 기초로 한다.^[5]

$$\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

여기에서 E는 전기의 세기, B는 자속밀도 dL은 루우프의 線素, dA는 루우프의 面積素이다. 루우프형 자계센서를 신호전송용 케이블의 특성임피던스와 정합시켜 집중인덕턴스로 나타낸 경우의 등가회로를 그림 1에 나타내었다.

여기서 L은 루우프의 자기인덕턴스이고, R은 정합용저항이다. 자계센서의 全感知面積에 대하여 자속밀도 B(Wb/m²)가 균일하다고 가정하고, 자계센서의 루우프의 감지면적을

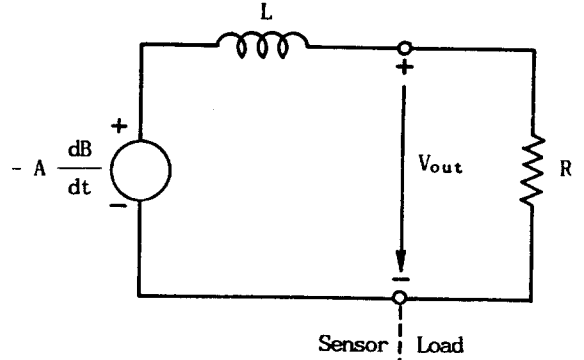


그림 1. 루우프자계센서의 전기적 등가회로
Fig. 1. Electrical equivalent circuit of the loop magnetic-field sensor

$A(m^2)$ 이라고 하면, $RI \gg L \cdot (dI/dt)$ 인 경우

$$V_{out} = - A \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

로 된다.

이와 같이 출력전압 V_{out} 가 자속밀도의 時導函數에 비례하여 동작하는 센서를 B-돋트(B-dot) 센서라고 한다.^{[2], [6]} 계단함수의 자속밀도 B_0 를 인가하는 경우는,

$$V_{out} = - \frac{RAB_0}{L} \exp(-\frac{R}{L} t) \quad (3)$$

으로 되며, 감지된 신호는 시정수 L/R 로 감쇠된다. 자계센서의 감지부인 동축케이블은 피측정자계중의 노출에 의하여 일어나게 되는 노이즈에 의한 오차를 제거하는 차폐의 역할을 한다. 즉, 전기의 접선성분에 의하여 유도된 전류에 대하여 차폐 시키기 위한 것 것이다. 실제로 전자계에 의하여 동축케이블의 내부도체에 직접 유도되는 전류는 대단히 적으며, 외부도체에 유도된 전류는 센서의 외피상을 진행할 수 있으며 내부도체상의 신호로 변환되어진다. 즉, 케이블의 외피에 유도된 신호는 내부도체에 유도된 신호보다 훨씬 크며, 이것이 감지신호로 변환되어 출력된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 자기센서의 설계와 제작

루우프센서의 직경은 측정가능한 최대주파수의 파장에 비해 작을수록 (직경 ≪ 파장) 응답의 정확도가 좋으며, 일정한 크기의 응답전류가 흐르게 된다. 이것을 수식적으로 표현하면,

$$d = \frac{U}{\pi} \cdot \tau_{rise} \quad (4)$$

여기에서 d는 루우프의 직경, U는 전자파의 진행속도, τ_{rise} 는 센서응답의 상승시간이다

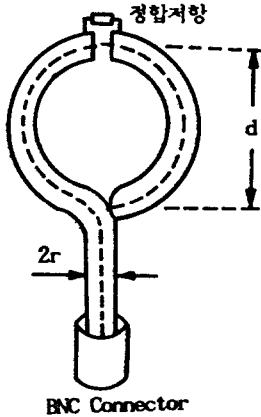


그림 2. 동축케이블을 이용한 자기적분형 자기센서의 개략도
Fig. 2. A schematic diagram of the self-integrated magnetic field sensor by using coaxial cable

동축케이블을 사용한 자기적분형 자기센서의 개략도를 그림 2에 나타내었으며, 동축케이블의 인덕턴스 L_c 는⁽⁷⁾

$$L_c = \frac{d}{2} \mu_0 \left(\ln \frac{4d}{r} - 2 \right) \quad (5)$$

로 구해진다. 여기에서 r은 동축케이블의 외측도체의 반경이다.

따라서 루우프자기센서의 인덕턴스가 구해지면 정합저항의 관계로부터 응답도와 주파수대역 등의 기본성능과약이 가능하다. 즉 직각파인 자속밀도 B_0 가 인가된 경우 센서

응답의 피크치와 감쇠시간은

$$V_{out} = (AB_0R)/L \quad (6)$$

$$\tau_{decay} = L/R \quad (7)$$

로 정해지며, R은 정합용저항이다.

본 연구에서는 등가반경이 5[cm]인 루우프센서를 시제작하고 응답특성을 비교검토하여 설계의 적합성과 우수한 응답특성을 가지는 조건을 설정하였다. 동축케이블로는 고주파용 RG/58U로 사용했으며, 반경이 5[cm]일 때의 인덕턴스는 0.19[μH]이다. 또한 출력단자는 센서의 감지전압을 직접 오실로스코프로 입력시키기 위해 BNC커넥터로 하였다.

3.2 교정실험계의 구성

센서의 응답도와 주파수대역 등의 기본성능의 측정이 필요하며, 직각파전류에 의한 자속의 입력을 위하여 횡전자파 전송선로를 제작하였다. 교정실험계의 개략도와 사진을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

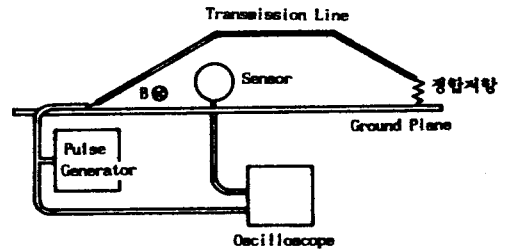


그림 3. 계단응답측정계의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the calibration experiment system

전송선로의 끝부분에서는 불평등전계가 형성되므로 단부효과를 고려하여 전송선로의 폭을 높이에 비하여 크게 하면 특성임피던스는 다음과 같은 근사식이 된다.⁽⁸⁾

$$Z_0 = \frac{377}{(\pi/h)+2} \quad (8)$$

본 연구에서는 루우프센서의 치수와 센서의 응답도인 출력전압을 고려하여 전송선로

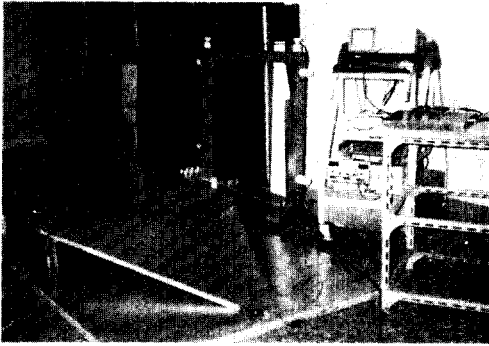


그림 4. 교정실험계의 사진
Fig. 4. Photograph of the calibration experiment system

의 높이를 18(cm), 폭을 100(cm)로 하고, 경사부분에서도 (W/h)가 일정하게 하여 특성 임피던스가 50(Ω)이 되도록 하였다.

3.3 실험방법

시제작된 센서를 자체의 측정기로 사용하기 위하여 교정실험과 적용실험을 수행하였으며, 실험방법은 다음과 같다.

전송선로의 종단부에는 입력신호의 반사파 발생을 방지하기 위하여 전송선로의 특성임피던스와 동일한 임피던스로 단말처리 하였다. 입력전원으로는 상승시간이 약 5 (ns)이고, 최대출력전압이 20(V)인 펄스발생기(Wave Tex)를 사용하였으며, 출력신호의 파형측정에는 100(MHz)의 축적형오실로스코프 (Tek., 2232)를 사용하였다. 자체 센서의 직각과응답을 정확하게 측정하기 위해 정합회로를 구성하고 신호전송용 케이블은 2중시일드 시켰다.

동축케이블을 이용한 자기적분형 자체 센서를 이론적으로 해석하여 전기적 모델을 구성 하였으며, 이 모델회로에 의한 이론적 특성치를 산출하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 계단응답특성

직각과자계를 인가시키기 위하여 전송선로에 펄스전류를 인가하여 계단상의 자계를 인가시켰으며, 적분저항이 무한대일때의 직각과전류에 의한 자속의 변화로 감지된 센서의 응답파형을 그림 5에 각각 나타내었다.

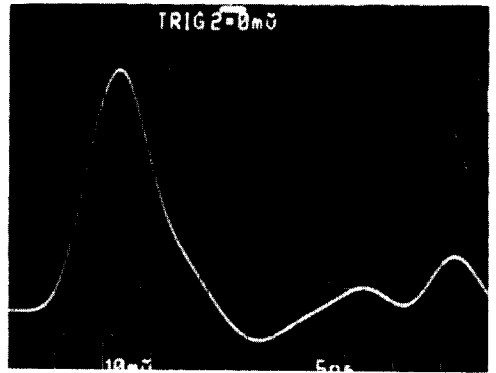


그림 5. 센서의 계단응답파형
Fig. 5. Waveform of the step response of the sensor

이 응답파형의 상승시간은 약 4.8(ns)이며 감쇠시정수는 약 6(ns)이다. 따라서 고역축차단주파수는 약 73(MHz)임을 알 수 있다. 파미부분에 진동성분이 포함되어 있으며, 감쇠시정수의 측정치는 이론적인 값 7(ns) 보다 적게 나타났다. 이것은 센서의 정전용량에 의한 오우버슈트로 급속한 감쇠가 일어났기 때문이라고 여겨진다.

4.2 자기적분특성실험

적분저항 값을 5(Ω), 10(Ω), 20(Ω), 50 (Ω), 무한대로 변화시켜 가면서 계단입력에 대한 센서의 응답파형을 관측하였다. 입력 파형을 그림 6, 적분저항이 5(Ω)일 때의 출

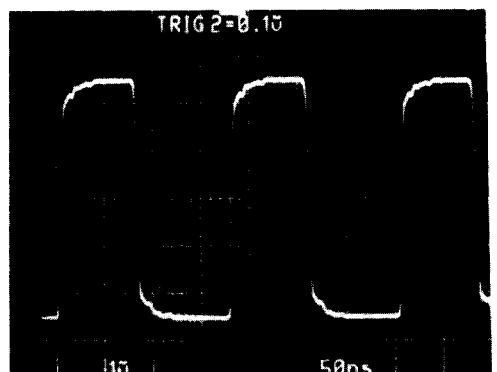


그림 6. 구형파 입력파형
Fig. 6. Waveform of the square input

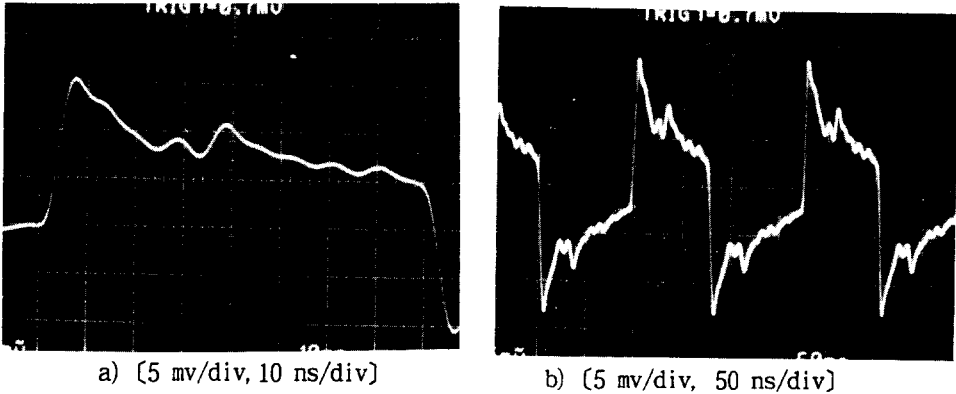


그림 7. 정합저항이 5(Ω)일때의 응답파형
 Fig. 7. Response waveform when the integrating resistance is 5(Ω)

력파형을 그림 7에 나타내었다. 입력전원의 파형에는 전송선로의 발단처리와 입력부분에서의 임피던스정합이 정확하게 이루어지지 않아 다소 계단상의 파형이 나타났으며 출력 파형에도 진동성분이 포함되어 있다.

감쇠시정수의 산출에 있어서는 감쇠부분에 상당한 진동성분이 포함되어 있으므로 정확한 감쇠시간의 결정은 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 감쇠시간의 평균치를 취하기 위하여 그림 8에 나타난 바와 같이 각각의 응답에 대하여 감쇠특성을 규격화시킨 후 최소자승법을 적용하여 감쇠시정수를 산출하였다.

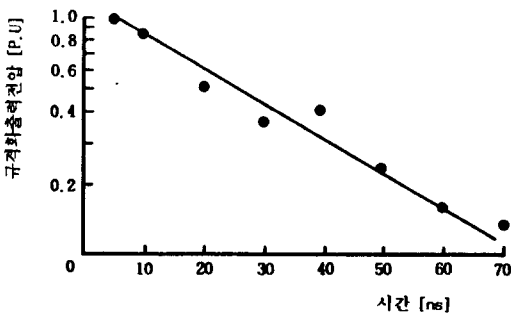


그림 8. 규격화 응답특성
 Fig. 8. Normalized response characteristic

동축케이블은 2중루우프로 되어 있기 때문에 이들 루우프로 의한 전체 감쇠시정수는 이론적으로 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$\tau = \frac{L_{inner}}{50} + \frac{L_{outer}}{R} \quad (9)$$

또한, 그림 2에 나타낸 자계센서의 전기적 등가회로는 그림 9와 같으며, 이 회로의 전압방정식을 세우고 출력전압 V_{out} 를 구하면,

$$V_{out} = -AB_0 \frac{R_1}{L_1} \cdot \exp\left(-\frac{R_1}{L_1} \cdot t\right) + AB_0 \frac{L_1}{L_2} \frac{R_1 \cdot R_2}{L_2 R_1 - L_1 R_2} \left\{ \exp\left(-\frac{R_1}{L_1} \cdot t\right) - \left(\exp - \frac{R_2}{L_2} \cdot t\right) \right\} \quad (10)$$

로 된다. 자속밀도가 B_0 인 직각파자계에 의한 출력전압의 피크치는 이론적으로

$$V_{out(peak)} = \pi r^2 B_0 \frac{R}{L} \quad (11)$$

와 같이 표현된다. 또한 자속밀도 B_0 (Wb/m²)와 전기계의 세기 E (V/m) 사이에는⁽⁵⁾

$$B_0 = \epsilon E \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (12)$$

의 관계가 성립되므로 전송선로의 높이와 인가전압으로부터 입력자속밀도의 계산이 가능하다. 이때 전송선로의 높이가 18(cm)이고, 인가전압이 5(V)이므로 인가전기계의 세기는 27.8(V/m)이다. 따라서 입력자속밀도의 피이

크치 $B_0=92 \times 10^{-8}$ [Wb/m²]이고, 정합저항이 50[Ω]일 때 감지전압의 피크크치는 약 180 [mV]이다. 이론적으로 산출한 결과와 적분저항의 변화에 따른 센서응답의 피크 크기와 감쇠시간특성을 각각 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

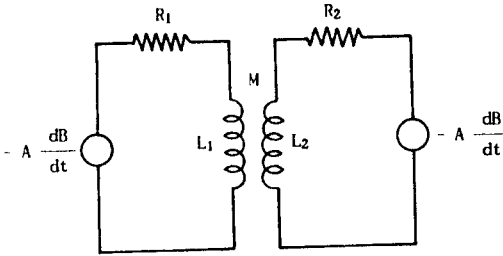


그림 9. 동축케이블을 사용한 자기적분형 자계센서의 등가회로
 Fig. 9. Electrical model of the self-integrated magnetic field sensor by using coaxial cable

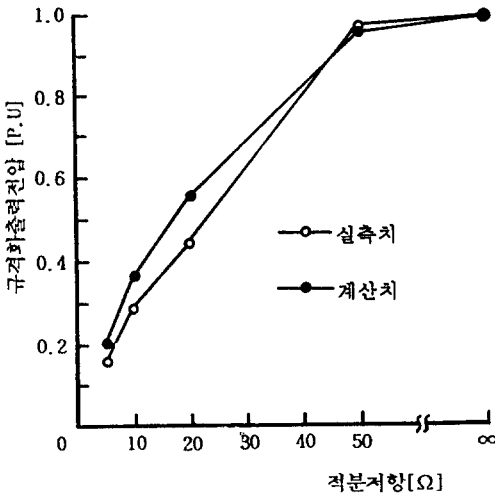


그림 10. 적분저항에 대한 응답도의 변화
 Fig. 10. Variations of the sensitivity according to integrating resistance

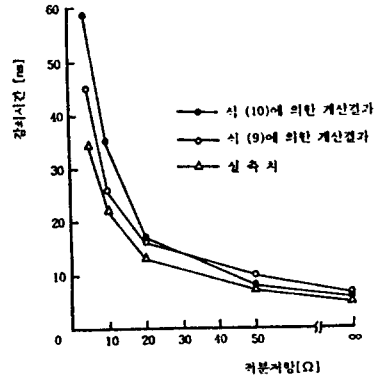


그림 11. 적분저항에 대한 센서응답의 감쇠시간특성

Fig. 11. Decay time characteristics of the sensor response according to integrating resistance

그림 10에서 적분저항의 변화에 따른 센서응답의 피크크치는 이론치보다 다소 작게 나작게 타났으며, 이는 센서를 포함한 측정회로의 전압강하에 의한 것으로 여겨진다. 또한 그림 11의 감쇠시정수도 동일한 경향이 며, 실측치가 이론적 계산치보다 작게 나타나는 이유는 동축케이블의 분포정전용량에 의한 감쇠가 포함되기 때문인 것으로 해석된다.

진반적으로 보면 적분저항을 증가시키면 응답의 피크크치는 증가하여 감지능력은 향상되지만 감쇠시간이 짧아져 주파수대역이 좁아지므로 적정의 적분저항을 사용함이 바람직하다.

4.3 적용실험

R-L-C 직렬회로를 이용하여 '대전류발생장치'를 설계 제작하였으며, 그림 12에 이의 회로도를 나타내었다. 콘덴서로는 DC전압 6300[V]용 0.2[μF] 5개를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 인덕터로는 TDK제품 3[μH] 가포화리액터를 이용하였다.

4.3.1 자계센서의 거리-응답특성

시제작한 대전류발생장치로부터 일정거리만큼 이격된 거리에서의 센서의 응답 즉, 자계의 세기를 측정하였다. 측정위치 및 자계

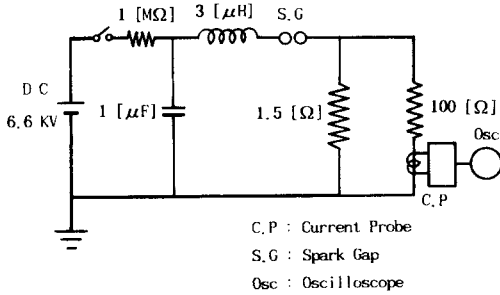


그림 12. 대전류발생장치의 회로도

Fig. 12. Circuit diagram of the large current generating apparatus

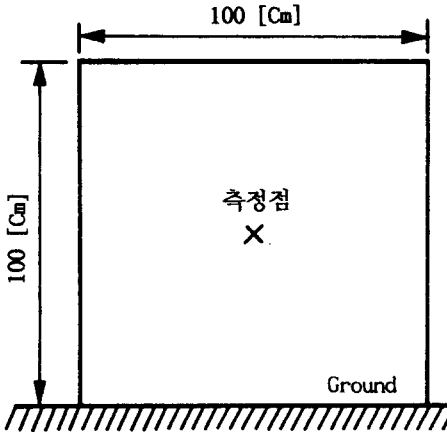


그림 13. 자계의 측정위치

Fig. 13. Measuring position of the magnetic fields

발생계통에 대하여는 그림 13에 나타냈으며, 자계의 측정은 대전류발생장치의 중앙점으로부터 0.5(m), 1(m), 2(m), 3(m), 4(m) 이격된 점에서 측정하였다. 실험에서 사용한 파형을 그림 14에 나타내었다. 센서의 응답실험에는 센서를 수평배치(자계의 수직성분)와 수직배치(자계의 수평성분)상태에서의 측정을 수행하였다. 그림 15에 수평배치의 응답파형의 예를 나타내었다. 또한, 그림 16에는 이의 특성을 대수그래프로 표시하였다. 수평배치의 경우는 수직배치의 경우보다 거리의존도가 현저하게 나타났다. 이것은 주변에 배열되어 있는 각종 시설물과 영상분의 영향 때문에 변화가 둔화되어 나타난 것으로 판단된다. 센서의 응답전압 즉, 자계의 세기는

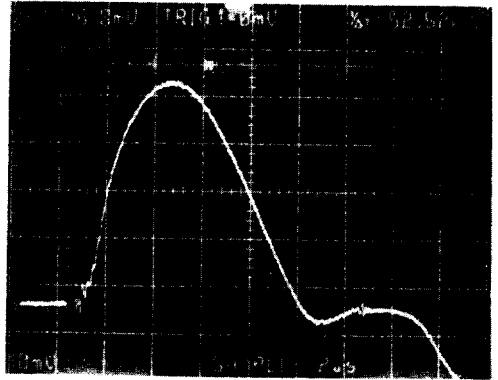
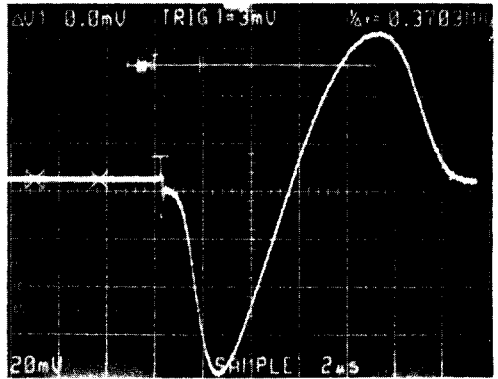
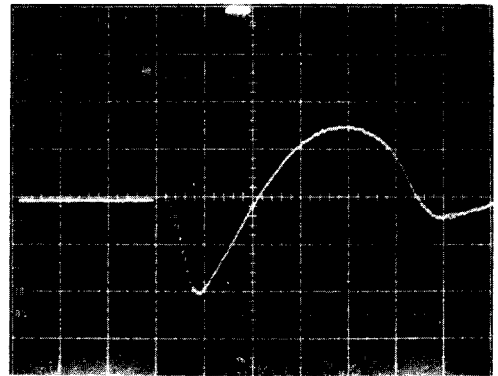


그림 14. 자계측정에 적용한 대전류파형
 Fig. 14. Waveform of the large current applied to the magnetic field measurement



(a) 0.5 m



(b) 1 m

· 그림 15. 수평배치의 응답파형
 Fig. 15. Response waveform of the horizontal arrangement

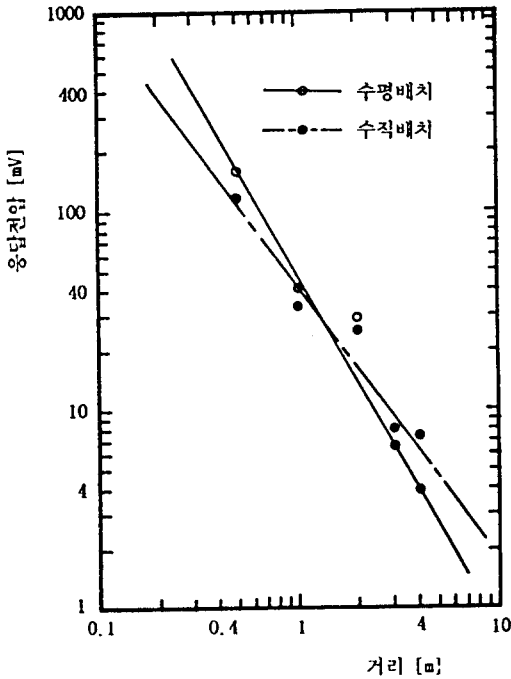


그림 16. 자기적분형 자계센서의 거리-응답 특성

Fig. 16. Distance-response characteristics of the self-integrated magnetic field sensor

전반적으로 거리의 제곱에 반비례하는 특성을 나타냈으며, 이는 준정상자계성분보다는 방사자계가 중점적으로 나타남을 알 수 있다. 따라서 전력기기 또는 전력계통의 고장에 의하여 발생하는 시변자계성분은 방사자계가 주로 발생함을 알 수 있었으며, 이에 대한 차폐의 실현과 대책이 약전류용 제어기기의 보호 및 신뢰성 향상에 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

4. 3. 2 자계센서의 주파수응답특성

본 연구에서의 자계센서는 시변자계에 대한 감지전압이 자계의 시도함수에 의하여 동작되므로 주파수에 따라 응답전압이 바뀌게 되어 자계의 주파수에 대한 응답도의 측정이 필요하다. 평행평판형 전송선로에 공급전압 20(V) 전류 400(mA)를 공급하였을 때 자기적분형 루

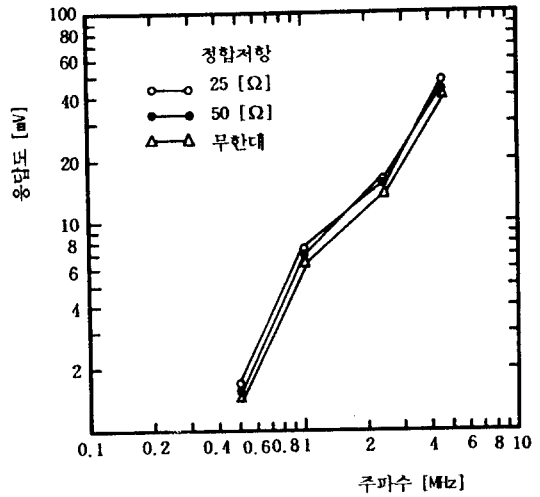


그림 17. 자기적분형 자계센서의 주파수응답 특성

Fig. 17. Frequency response characteristics of the self-integrated magnetic field sensor

우프센서의 적분저항 25(Ω), 50(Ω), 무한대인경우의 주파수응답특성을 그림 17에 나타내었다. 이의 결과에서 보면 주파수에 대한 센서의 감지전압은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 감지전압의 변화는 적분저항이 적어질수록 응답도가 크게 나타나고 적분효과는 커지게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 시변성자계를 측정할 수 있는 자기적분형 자계센서의 실현과 교정시스템의 개발을 목적으로 이의 동작원리에 대한 이론적 해석과 설계기법 및 교정실험에 대한 연구를 수행하였으며, 시제작된 센서의 성능평가를 위한 모의실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 적분저항의 증가와 더불어 감지전압은 상승하였으나 감쇠시간은 감소되는 경향을 나타내었다.
- (2) 제안된 전기적 모델을 이론적으로 해석한 결과는 실험치와 잘 일치하였다.
- (3) 전력기기의 고장전류와 같은 급준성 대전류에 의한 자계의 방사성분이 주로 나타났다.

- (4) 급준성 대전류에 의하여 발생하는 방사 자계는 거리의 제곱에 반비례하는 특성으로 나타났다.

본 연구는 1991년도 산학협동재단 학술 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 1). W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel : Magnetic Sensors, Vol. 5, pp. 205-253 (1989)
- 2). Thomas F. Trost and Klaus P. Zaefel: "Broadband Electromagnetic Sensors for Aircraft Lightning Research", NASA Conf. pp. 131 - 152, (1980)
- 3). John D. Dyson : " Measurement of near Fields of Antennas and Scatters". IEEE, Trans., No. 4, pp 446-452 (1973)
- 4). Dr. James, A. Cameron : "The Effects of Induced Cable Currents on Electric and Magnetic Fields Measurements", IEEE, CH, 2116-2, pp 296-299, (1985)
- 5). W. H. Hayt : Engineering Electromagnetics, International Student Edition Co., pp 322-326 (1989)
- 6). R. Malewski, et al : " Measurements of the Transient Electric and Magnetic Field Components in HL Lab. ", IEEE Trans., PAS-101, No 12, pp. 4452-4457 (1982)
- 7). 副島光積, 堀内和夫: 電磁氣學, コロナ社 1964, pp 231-286
- 8). 백용현, 이복희, 전덕규, "광대역 고전압 및 전계측정용 센서", 한국전기전자재료학회지, Vol. 5, No. 1, pp 89-98, (1992) (1992년 9월 30일 접수)



이복희

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988~89년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 현재 인하대 전기공학과 조교수, 당 학회 학술이사.



백용현

1927년 5월 5일생. 1952년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973~76년 일본 게이오대학 대학원 졸업(공박). 1986~87년 대한전기학회 회장. 1992년 현재 인하대 공대 전기공학과 명예교수, 당 학회 회장.



박형기

1964년 8월 20일생. 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 현재 인하대 공대 전기공학과 석사과정. 공업진흥청 전자환경연구실 연구생



하성철

1940년 12월 25일생. 1968년 2월 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 2월 명지대 전기공학과 졸업(공박) 1992년 현재 동국대 전기공학과 부교수, 당 학회 편수이사.



최창준

1954년 3월 18일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 주식회사 범진 입사. 1983~84년 CAR L Schenck 근무. 1992년 현재 Schenck-Korea Co., Ltd. 이사.



임동묵

1953년 9월 30일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 PSV(공박). 1985~88년 PIE 근무. 88년~현재 HEE Co. 근무.