

전자석과 핵자기공명 자장측정기를 이용한 정밀자장의 발생

김영균 · 박포규*

한국표준과학연구원, 전자기표준연구부
대전 유성구 유성우체국사서함 102호, 305-600

박정권

(주)SET, 대전 유성구 장동 72-1, 한국에너지연구원 창업보육센터

(2002년 7월 10일 받음, 2002년 7월 30일 최종수정본 받음)

자장측정분야에서는 첨단제품 개발 등에 정밀자장 측정 및 제어기술이 요구된다. 산업체에서 사용되는 자장측정기의 교정표준기로 사용되는 전자석시스템 및 핵자기공명 자장측정기를 컴퓨터를 사용하여 자동으로 자장을 제어 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 전자석의 자장안정도는 홀효과 센서를 이용한 자장폐환 방법보다 전류변화분을 탐지하여 보상하는 전류폐환 방법이 약 2배정도 좋음을 알 수 있었다. 또한 100 mT 이상의 자장범위에서 안정도는 외부자장(지구자장, 장비에 의한 자기 잡음 등)의 영향이 거의 미치지 않고, 전류의 변화가 주요인임을 알 수 있었다. 전류 폐환장치를 사용하여 자장 측정 및 발생을 자동화시킴으로써 자장의 안정도를 10배 이상 향상 시켰으며, 연 300여건의 장비 교정시간을 약 20% 정도 단축하는 효과를 얻었다.

주제어 : 자장(자기장)측정 및 발생, 교정표준기, 자장측정기

I. 서 론

정밀자장 측정과 관련된 기술은 자성재료의 특성, 생체, 의료공학, 지구물리학, 지질학, 항공우주학 등의 첨단산업뿐만 아니라 각종 전자 및 군수산업 등에 널리 이용되고 있다. 자장측정기로는 가장 널리 사용되는 홀효과(Hall effect) 방법과 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance, NMR), 원자자기공명(Atomic Magnetic Resonance, AMR), 자기유도(magnetic induction), 자속게이트(fluxgate) 및 자기저항 등의 원리를 이용한 측정방법이 사용되고 있다[1-4]. 자장 발생기로는 전자석, 헬름홀츠 코일, 솔레노이드 및 영구자석 등을 일반적으로 사용하고 있다[5].

자속밀도(magnetic flux density, B) 단위인 테슬라(Tesla, T)는 전자기분야의 기본단위인 SI 전류(A)와 전류가 흐르는 경로의 dimension 및 NMR주파수(ω)를 측정하여 재현할 수 있다. 즉 자속밀도는 $\omega = \gamma' \cdot B$ 에서 핵자기 공명주파수 및 양성자 자기회전비율(proton gyromagnetic ratio, γ')의 정확한 값으로부터 재현 할 수 있다. 기본물리상수중의 하나인 γ' 는 자속밀도 및 전류 단위의 재현, 유지를 위해 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 1997년 γ' 값을 불확도 0.18×10^{-6} 으로 측정하였다[6-8].

일반적으로 물리적 고유현상인 자기공명을 이용한 자장측정기는 홀효과 및 자속게이트를 이용한 것보다 시간에 따른

드리프트가 거의 없고, 재현성이 우수하기 때문에 절대자장 및 정밀자장용으로 많이 사용된다. KRISS에서는 자장범위 0.05 T 이상에서는 전자석으로 표준자장을 발생하고, 물을 샘플로 사용한 NMR 자장측정기로 절대자장을 측정하여 자장표준을 유지 및 보급하고 있다. 그러나 0.05 T 이하의 자장범위에서 핵자기 공명을 이용하여 미세한 신호를 탐지하기 어렵기 때문에 헬름홀츠 코일과 솔레노이드 시스템으로 유지하고 있다[9].

자장표준기의 노후화로 인하여 전 장치들을 여러 해에 걸쳐 교체함으로써 특성은 비슷하지만 제작회사와 제어방법이 서로 다르므로, 표준 자장을 측정 및 발생시키기 위해서는 수동으로 조절하므로, 교정에 많은 시간이 많이 소요되었다. 그러므로 본 연구는 전자석 및 NMR 자장측정기로 유지 및 보급되고 있는 0.05 T 이상의 자장표준 범위에서 교정불확도 향상 및 교정시간을 단축하기 위하여 교정 자동화를 실시하였다. 자장 표준기의 자장 발생 및 측정을 컴퓨터를 이용하여 제어하는 프로그램을 개발하여 자동화시킴으로써 교정시간의 단축은 물론 안정도를 향상시킬 수 있었다.

II. 장치 구성

전자석에 의해 발생하는 자장의 안정도는 전자석에 흘러주는 전류의 안정도에 따라 변화므로 무엇보다도 먼저 전자석에 인가하는 전류를 안정시키는 것이 필요하다. 전류폐환(current feedback) 및 자장폐환(field feedback) 방법을 이용하여 인가 전류의 안정도를 실험하였다. 전류폐환 방법은 전자석과 직렬

*Tel: (042)868-5163, E-mail: pggpark@kriss.re.kr

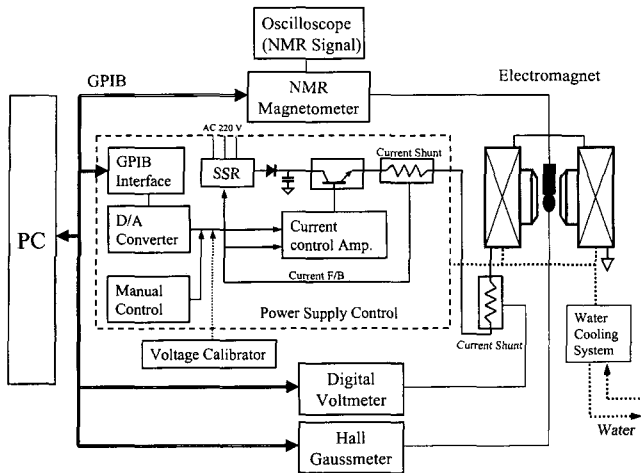


Fig. 1. Block diagram of apparatus.

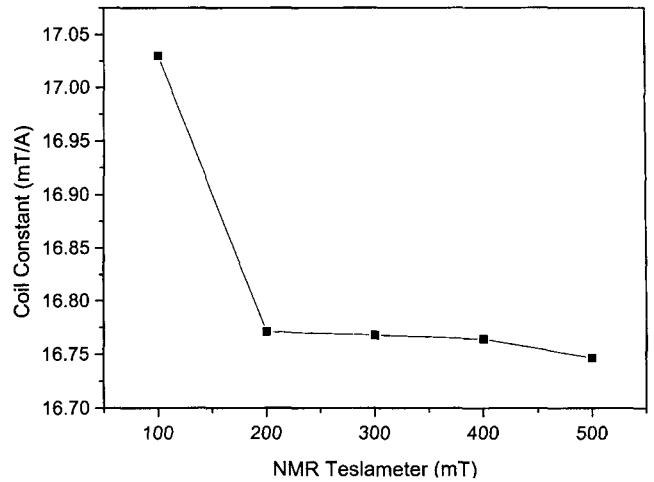


Fig. 2. Measurement of electromagnet coil constant.

로 션트 저항을 연결하여 저항의 양단에 유도되는 전압의 변화량을 탐지하여 전자석의 입력 단에 다시 가하여 안정시키는 방법이고, 자장궤환 방법은 전자석 중심부에 홀효과 자장 센서를 설치하여 자장변화량에 따른 출력을 전자석 입력에 인가하여 전류 변화 분을 상쇄시키는 방법이다. 전류궤환 방법은 외란 자장의 변화는 보상하지 못하고 단지 전자석에 인가되는 전류의 변화분만 보상하는 단점이 있으며, 자장궤환 방법은 전류변화 및 외란자장 변화를 동시에 탐지하여 보상하는 장점이 있다. 그러나 전류궤환 방법이 자장궤환 방법보다 2배 이상 안정도가 좋게 측정되었다. 그 이유는 자장변화량을 탐지하는 홀효과 자장측정기의 측정 분해능이 NMR 자장측정기보다 나쁘기 때문으로 사료된다. 또한 100 mT 이상의 자장범위에서 안정도는 외부자장(지구자장, 장비에 의한 자기 잡음 등)의 영향이 거의 미치지 않고, 전류의 변화가 주요인임을 알 수 있었다. 이상의 결과를 종합하여 자장안정도를 향상시키기 위하여 전류궤환 방법을 사용하였다.

장치의 구성도는 Fig. 1과 같이 전자석, 전류원, NMR 자장측정기, DVM, 션트 저항 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며, 모든 장비는 GPIB 인터페이스 및 Labview 프로그램을 이용하여 측정하고, 제어하도록 설계되었다[10]. 일반적으로 0.05 T 이상의 자장을 장시간동안 지속적으로 발생시키고자 할 때 냉각시스템이 갖추어진 전자석을 많이 사용한다. 전자석은 철심으로 된 요크, 코일 및 냉각 시스템으로 구성되어 있으며, 발생하는 자장은 전류에 의해 생기는 자장(μH)과 철심에 의해 생기는 자장(μM)이 합해지기 때문에 크다[11]. 그러므로 전자석의 코일상수(전류에 다른 자장 비율)는 공심 솔레노이드나 헬름홀츠 코일처럼 일정한 값이 아니고 인가전류에 따라 Fig. 2와 같이 약간의 차이가 발생한다. 전류에 따라 코일상수의 차이가 생기므로, 자동화 프로그램은 코일상수를 고정시키지 못하고, NMR 자장측정기로 현재의 자장값을 읽은 후

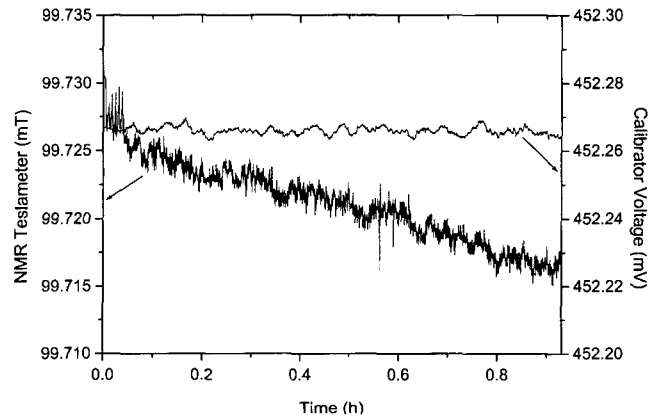


Fig. 3. Stability of current in 100 mT.

비교하여 조정하므로 목표치에 도달하는데 시간이 소요된다. 또한 Fig. 3은 전자석의 입력 단에 정밀전압을 인가하여 0.1 T의 자장을 발생시킨 상태에서 전류원의 안정도를 측정함으로써, 시간에 따라 드리프트(0.01 mT/h)가 발생함을 알 수 있다. 그 이유는 온도에 의한 션트 저항값의 변화가 주요인으로 생각된다.

이러한 여러 가지 변수를 때문에 전자석에서 발생하는 자장의 크기를 NMR 자장측정기를 사용하여 측정하고 이에 비례하는 전류로 환산하여 전류원에 다시 인가하여 자장을 안정시키는 방법을 사용하였다.

III. 컴퓨터를 사용한 자동화 프로그램

자장측정기를 교정하기 위한 정밀자장 발생 및 측정을 제조회사, 제어방법이 서로 다른 장비를 컴퓨터를 사용하여 제어하는 자동화 프로그램을 GPIB 인터페이스 및 Labview 프로그램을 이용하여 개발하였다.

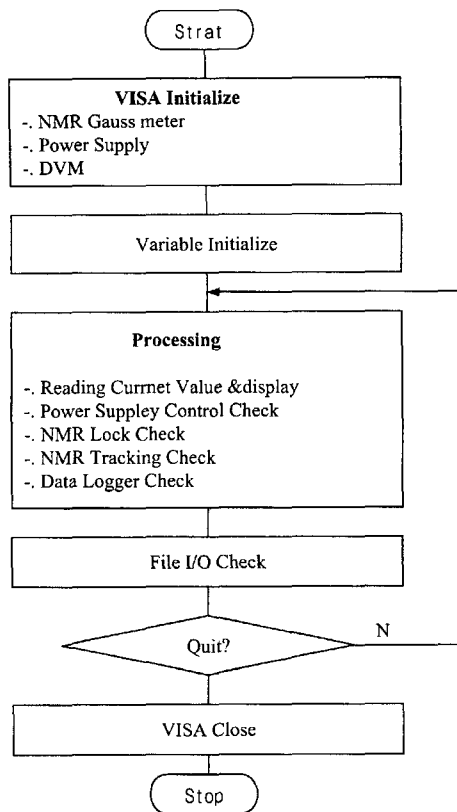


Fig. 4. Flowchart of program.

Fig. 2에서 측정된 전자석의 코일상수를 이용하여 목표치 자장을 발생시키도록 전자석에 인가하는 전류를 가하고, NMR 자장측정기로 발생한 자장을 측정하여 목표치와 비교한 다음, 그 차이를 전류로 환산해서 다시 전자석에 인가하여 전류를 조정하는 전류제한 방법을 사용하였다. 또한 자장의 안정도를 모니터링하기 위하여 전자석에 홀 자장측정기를 설치하여 자장 변화량을 측정하였다.

교정에 소요되는 시간을 단축하기 위하여, 사용되는 장비들을 GPIB 인터페이스를 사용하여 제어를 단일화하였다. 장비들간의 유기적인 연결로 보다 안정적인 자장을 유지함은 물론, 교정 환경을 주기적으로 점검하여 이를 데이터화 함으로써 효율적인 교정업무를 수행할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 프로그램의 개략적인 flowchart를 나타내는데, 먼저 VISA 및 변수들을 초기화 시키고, 각 장비들을 제어하는 과정을 거치고, 명령치의 전송시 일시에 많은 값의 변화는 기기의 손상이나 과도한 자장의 변화가 야기되므로 이를 적정 step으로 분리하여 제어할 필요가 있으므로, 본 프로그램에서는 soft on/off 기능을 구현하여 급격한 변화를 방지하였다.

여러 종류의 장비들간의 인터페이스는 NI-VISA(Virtual Instrument Software Architecture)를 이용한 GPIB 통신을 사용하였다. NI-VISA는 여러 종류의 계측기기를 GPIB로 통

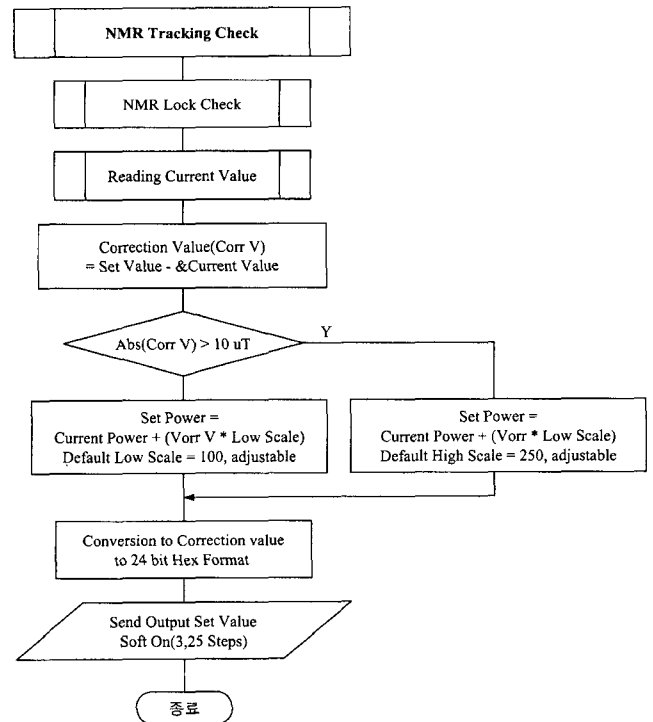


Fig. 5. Flowchart of NMR lock program.

신하기 위해 표준화된 platform을 제공하는 소프트웨어 구조로서 각종의 계측기를 각각의 드라이버로 통해서 메시지 베이스로 통신한다. VISA를 이용하기 위해서는 각 장비에 해당하는 GPIB 주소로 session을 열고, 이를 프로그램 내부에서 포인터로 이용, 각 계측기와의 통신을 일괄 관리하게 된다[10].

자장의 변화는 기본적으로 전자석에 공급되는 전류의 변화에 의한 것이므로 NMR 자장측정기로 정밀한 자장의 변화를 측정하여 그 변화분을 제한하여 보정하는 과정을 반복하여 일정한 자장을 유지하도록 제어하였다.

초기에 설정한 자장을 제어하기 위해서는 Fig. 5와 같이, 전류원의 제어 요소들과 실제 발생하는 자장과의 관계를 식으로 계산하여 전류원의 출력을 근사치에 스텝을 주어 인가한 후, fine tuning 단계를 거치도록 하였다. 전류원의 출력을 근사치로 출력한 후 NMR 자장측정기를 해당 자장에 lock 시키는 과정을 거친 후 설정자장에 가장 근사한 값이 되도록 fine tuning하는 과정은 같은 조건에서 10회를 측정하여 평균하였다. 보정치(설정치-현재치)는 자장에 대한 보정치이므로 이를 전류원의 제어 변수로 사용하기 위해서는 일정한 변환과정을 거치게 되는데 이 프로그램에서는 이를 두 단계화하여 보다 미세조정 할 경우를 고려하였다. 두 단계의 기준은 보정치가 10 T 보다 큰 경우와 작은 경우를 분리하여 각각의 scale을 씌우므로써 fine tuning과 coarse tuning 과정의

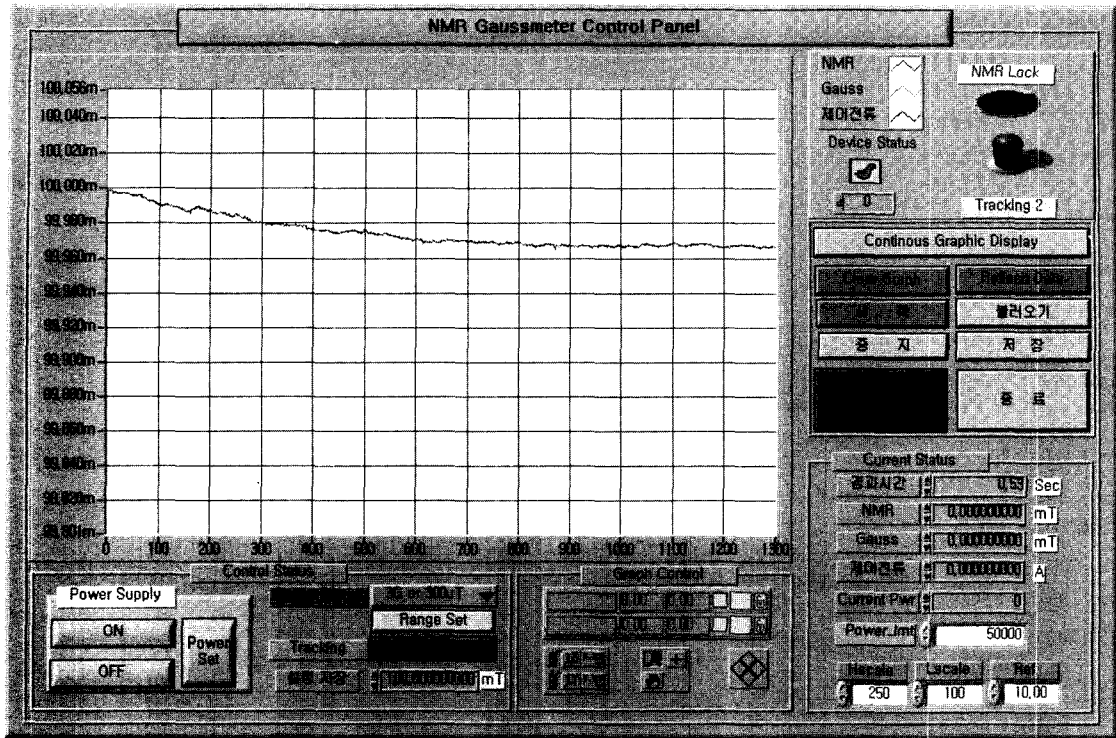


Fig. 6. Display of the main program.

시간을 단축시킬 수 있었다.

Fig. 6은 본 시스템을 제어하는 main user interface로서 현재 획득되는 값을 그래프와 각 변수명으로 표현함은 물론 각 device제어 기능까지 구현하여 보다 간편하게 조작할 수 있도록 하였다. 각 부분을 세부적으로 나누어 보면, control 부와 display부, 그래프 제어부로 나눌 수 있다. Display 부는 자장측정기의 NMR lock status를 표현하는 부분과, NMR tracking을 할 것인지를 결정하는 toggle 스위치로 되어있으며, 그래프에 나타나는 선의 색상과 모양을 결정 할 수 있도록 하였다, 또한 현재 GPIB의 상태를 알 수 있도록 status indicator를 두었다. 그래프 제어부는 현재 표현된 그래프를 제어하는 아이콘들로 특정부분을 확대 혹은 축소하거나, 그래프상의 좌표를 보다 정밀하게 판독 할 수 있도록 cursor를 제어하는 아이콘을 두었다. Control 부는 전류원을 원격제어 하는 부분과 NMR 자장측정기의 probe 및 range 선택부, NMR lock tracking control 아이콘으로 구성되어있다. 전류원의 제어는 on/off와 특정 값으로의 설정되어 있는데, 설정자장 난에 원하는 자장값을 mT 단위로 입력하고, Power set 아이콘을 클릭하면 원하는 값으로 자장이 형성 될 수 있도록 전류원을 제어한다. 자장측정기의 range는 probe의 종류에 의해 결정되는데, 이를 원격으로 설정 할 수 있도록 pull-down 아이콘으로 디자인하였다. Tracking 아이콘은 자장환경이 변하여 NMR 자장측정기의 lock이 해제되었을 경우, 이를 다시 tracking하

도록 하는 아이콘이다.

시작/중지는 현재 획득되는 각종 값을 local memory에 저장여부를 결정하고, 불러오기/저장은 현재까지 측정된 값을 저장하거나 기 저장된 데이터를 불러오는데 쓰이는 아이콘이다. Clear graph/ re-flash data는 그래프에 표현 된 데이터를 수동 갱신하거나 삭제하는 기능을 한다. 비상정지 아이콘은 돌발 상황을 대비하기 위한 것으로 전류원의 전원을 해제하는 기능을 수행한다.

기본적으로 획득되는 전 데이터는 local memory에 기록이 되며 사용자에게 의해 clear되거나 하드디스크에 파일의 형태로 저장 될 수 있으며, 이를 다시 읽어 분석 가능하도록 되어있다. 화면에 표현되는 각 device의 현재 값은 변수의 형태로 화면에 표현되며, 또한 그래프로 표현되어 이를 확대/축소 할 수 있도록 하여 보다 효율적으로 장비를 이용 할 수 있도록 하였다.

VI. 결과 및 논의

Fig. 7은 수동으로 전자석에서 100 mT의 자장을 발생시키고, NMR 자장측정기를 이용하여 1시간동안 케환없이 자장 변화량을 측정한 것으로, 그 변화량은 약 6.0×10^{-4} 이였으며, 오른쪽의 값은 전류를 발생시키는 전자석 입력단의 전압을 측정 한 것으로, 전압의 변화에 따라 자장이 변함을 알 수 있다.

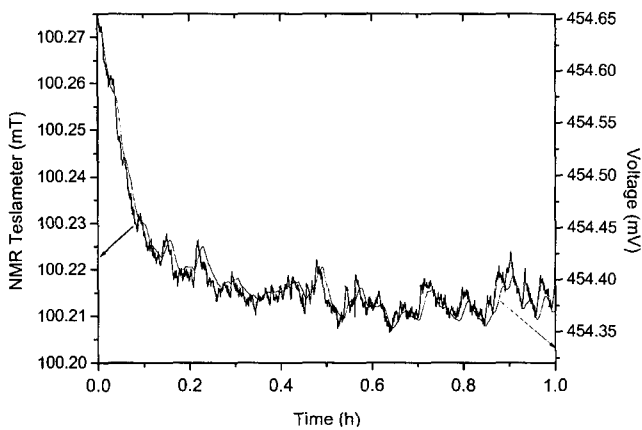


Fig. 7. Stability of magnetic field without current feedback.

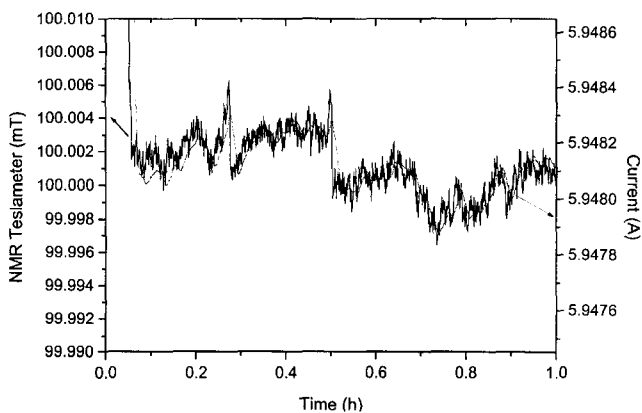


Fig. 8. Stability of magnetic field with current feedback.

Fig. 8은 자동화 프로그램을 이용하여 전자석으로 100 mT의 자장을 발생시키고, 그 값을 NMR 자장측정기로 읽고, 그 값의 차이만큼을 전자석 입력단에 전류를 인가하여 보상하는 전류궤환을 이용하여 측정한 결과로써 1시간동안 변화량은 6.0×10^{-5} 이고, 약 10배 정도 안정도가 향상되었음을 알 수 있다.

전류원의 D/A 보드의 분해능과 선트 저항의 온도에 의한 영향을 줄일 수 있다면 자장안정도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

V. 결 론

산업이 고도화됨에 따라 정밀 측정분야에 대한 관심이 고조되고 있다. 자장측정분야에서는 첨단제품 개발 등에 정밀자장 측정 및 제어기술이 요구된다. 산업체에서 사용되는 자장 측정기의 교정표준기로 사용되는 전자석 시스템 및 NMR 자장측정기를 컴퓨터를 사용하여 자동으로 자장을 제어 할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

전자석에 의해 발생하는 자장의 안정도가 홀효과 센서를 이용한 자장궤환 방법보다 전류변화분을 탐지하여 보상하는 전류궤환 방법이 약 2배정도 좋음을 알 수 있었다. 또한 자장의 안정도에 외부 자장(지구자장, 장비에 의한 자기 잡음 등)의 영향이 거의 미치지 않고, 전류의 변화가 주요인임을 알 수 있었다.

전류 궤환장치를 사용하여 자장 측정 및 발생을 자동화시킴으로써 자장의 안정도를 10배 이상 향상 시켰으며, 연 300여 건의 장비 교정시간을 약 20% 정도 단축하는 효과를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] Norman F. Ness, Space Science Reviews, 11, 459(1970).
- [2] W. Gopel, J. Hesse, and J.N. Zemel, Magnetic Sensors, VCH, Weinheim((1989) pp. 34-36.
- [3] http://quanta.kyunghee.ac.kr/expr/4_2/hall/hall.html
- [4] <http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/>
- [5] <http://nonmag.kriss.re.kr/maggen.htm>
- [6] Po Gyu Park, Chang Ho Choi, C. S. Kim, V. Ya. Shifrin, and V. N. Khorev, J. Kor. Phys. Soc. 34(4), 327(1999).
- [7] Po Gyu Park, Ph.D. thesis, Development and research of the measuring complex for determination of the proton gyromagnetic ratio in water by low field method, VNIIM(2001).
- [8] V. Ya. Shifrin, Po Gyu Park, V. N. Khorev, Chang Ho Choi, C. S. Kim, IEEE Trans. Instrum. Meas., 47(3), 638(1998).
- [9] Po Gyu Park, Young Gyun Kim, V. Ya. Shifrin, V. N. Khorev, J. Kor. Mag. Soc. 11(1), 38(2001).
- [10] LabVIEW Basics I Course Manual and LabVIEW Basics II Course Manual, Natinal Instruments (1998).
- [11] 김창석, 자기, KSRI-87-76-ET(1987), pp. 25-54.

Generation of a Precision Magnetic Field Using Electromagnet and NMR Magnetometer

Young Gyun Kim and Po Gyu Park*

Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS), P.O.Box 102, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

Jeong Kwon Park

SET Ltd., 72-1, Jangdong, Yuseong, Daejeon, Korea

(Received 10 July 2002, in final form 30 July 2002)

A precision magnetic field was generated by the NMR magnetometer and electromagnet system. The current and field feedback systems are used to control of magnetic field in the electromagnet using computer. Stability of magnetic field according to results that compare field and current feedback, current method is better than 2 times. The stability of magnetic field with current feedback improved 10 times compared with no feedback. This system is used for the calibration of magnetometers and the testing related to magnetic fields.

Key words : Magnetic field measurement, Calibration of magnetometers.