

PHR 자기센서를 적용한 탐침형 전류 프로브

이대성^{1,+} · 이남영² · 홍성민¹ · 김철기³

A pin type current probe using Planar Hall Resistance magnetic sensor

Dae-Sung Lee^{1,+}, Nam-Young Lee², Sung-Min Hong¹, and CheolGi Kim³

Abstract

For the characterization or failure analysis of electronic devices such as PCB (printed circuit boards), the most common method is the measurement of voltage waveforms with an oscilloscope. However, because there are many types of problems that cannot be detected by voltage waveform analysis, several other methods such as X-ray transmission, infrared imaging, or eddy current measurement have been applied for these analyses. However, these methods have also been limited to general analyses because they are partially useful in detecting physical defects, such as disconnections or short circuits. Fundamentally current waveform measurements during the operation of electronic devices need to be performed, however, commercially available current sensors have not yet been developed, particularly for applications in highly integrated PCB products with sub-millimeter fine pitch. In this study, we developed a highly sensitive PHR (planar hall resistance) magnetic sensor for application in highly integrated PCBs. The developed magnetic sensor exhibited sufficient features of an ultra-small size of less than 340 μm , magnetic field resolution of 10 nT, and current resolution of 1 mA, which can be applicable for PCB analyses. In this work, we introduce the development process of the magnetic sensing probe and its characteristic results in detail, and aim to extend this pin-type current probe to applications such as current distribution imaging of PCBs.

Keywords : Magnetic sensor, Current sensor, Pin type current probe, PHR(planar hall resistance), High sensitivity, Current distribution imaging.

1. 서 론

현대의 각종 의료용, 산업용, 가전용, 스마트기기 등은 고기능화 및 소형화를 위해 전자회로는 discrete 부품보다는 고사양의 ASIC, DSP 등 IC(반도체직접회로)칩이 적용되고 PCB(인쇄회로기판)는 고밀도 설계 및 제작이 늘고 있다. 전자회로의 복잡

성과 정밀성이 높아짐에 따라 정밀 계측 기술이 더욱 중요해지고 있는 가운데, 기존 적외선 열영상 기법 [1,2] X-ray 투과영상 기법 [3,4] ECT(eddy current technique) [5,6] 등의 기술이 활용되고 있으나, 이는 제품이 고장 난 이후 불량 분석에 적합한 기술이며, 동작 중 기능적 불량 요인을 찾는 데는 한계가 있다.

전자회로의 동작 중 기능 분석 및 계측에 사용되는 멀티미터, 오실로스코프, 스펙트럼 분석기 등은 측정 포인트에 전압 프로브를 접촉하여 실시간 전압 파형 및 주파수 성분 등을 계측함으로써 동작 상태와 비정상(고장) 여부를 실시간으로 확인이 가능하다. 간혹 정상 전압신호가 나타나도 비정상적인 경우가 많은데 이는 임피던스 불량 또는 미세한 단선/단락 등의 결함에 의해 발생하는 현상으로 전압 계측만으로는 쉽게 확인이 되지 않아서 전류 신호 측정이 필요하다.

기존 전류 프로브는 클램프 모양의 프로브에 신호선을 삽입해야 측정할 수 있어서 와이어 형태만 가능하고 PCB 상에 있는 신호선은 불가능하다. 물론 PCB 패턴을 끊고 와이어를 연결하여 측정할 수 있으나, 전압 프로브와 같이 PCB 훼손없이 할 수 없으며, 많은 포인트를 측정하기엔 매우 불편하다. 따라서, 전압 프로브와 같이 측정 포인트를 변형하기 않고 프로브를 접

¹ 한국전자기술연구원 스마트센서연구센터(Smart Sensor Research Center, Korea Electronics Technology Institute) KETI, 25 Saenari-ro, Bundang-gu, Seongnam-si Gyeonggi-do 13509, Korea

² (주) 디엔제이테크 (DNJTECH)
13-65 Dongpyeon-ro, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 13930, Korea

³ 대구경북과학기술원 신물질과학전공(Department of Emerging Materials Science)
333, Techno jungang-daero, Hyeonpung-eup, Dalseong-gun, Daegu 42988, Korea

⁺Corresponding author: leeds@keti.re.kr

(Received: Sep. 10, 2021, Revised: Sep. 27, 2021, Accepted: Sep. 29, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A pin type current probe using Planar Hall Resistance magnetic sensor

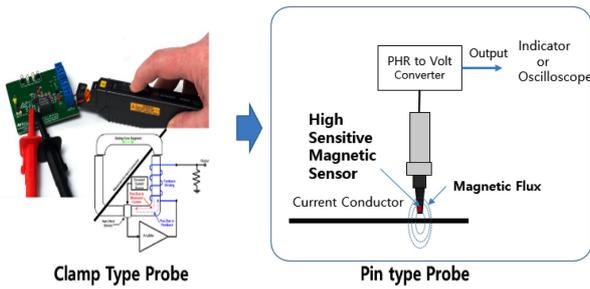


Fig. 1. The concept of the pin type current probe.

측 또는 근접하여 전류를 실시간으로 측정할 수 있는 탐침형 전류 프로브 개발이 필요하다.

본 연구에서는 클램프형 전류 프로브와 달리 PCB 패턴 또는 IC 핀에 변형이나 선을 추가하지 않고 전압 프로브와 같은 방식으로 측정 포인트에 프로브를 위치시켜 동작 중에 전류를 측정할 수 있도록 고감도 자기센서와 증폭회로로 구성된 탐침형 전류 프로브를 개발하고자 하였다. 여기에 적용되는 자기센서는 수백 um 크기로 제작이 가능하고 감도가 높은 박막 PHR(planar hall resistance)를 적용하였으며, DC/AC 전류의 방향과 크기를 동시에 측정할 수 있도록 PHR센서 구조 및 구동회로, 저잡음 PHR-to-Volt 변환기를 개발하여 전류프로브를 제작하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 탐침형 전류 프로브 설계

2.1.1 구성 및 구조

전류프로브의 구성은 4단자 휘스톤 브릿지 구조의 PHR 센서와 PHR 전압 드라이버, 차동 증폭기, MCU와 변환회로로 되어 있다. MCU는 PHR 구동전압과 타이밍 신호와 PHR의 오프셋과 감도 보정신호를 제공하고 오실로스코프 입력신호를 제어하는 역할을 한다. Fig. 2은 전류프로브의 단순화된 전기적 블록 다이어그램이다. 전류프로브의 제작 구조를 보여주는 Fig. 3과 같이 PHR 센서칩은 PCB의 한쪽 끝에 배치하고 와이어본딩하

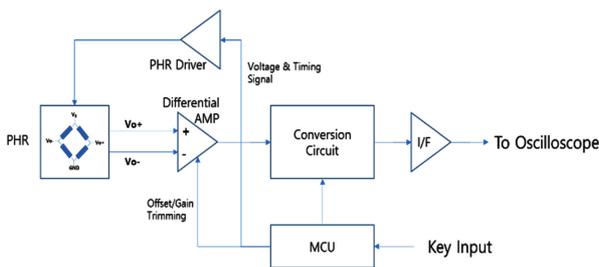


Fig. 2. Electrical block diagram of pin type current probe using PHR.

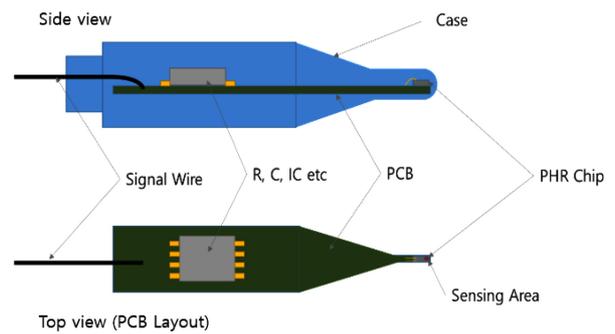


Fig. 3. Structure of the pin type current probe.

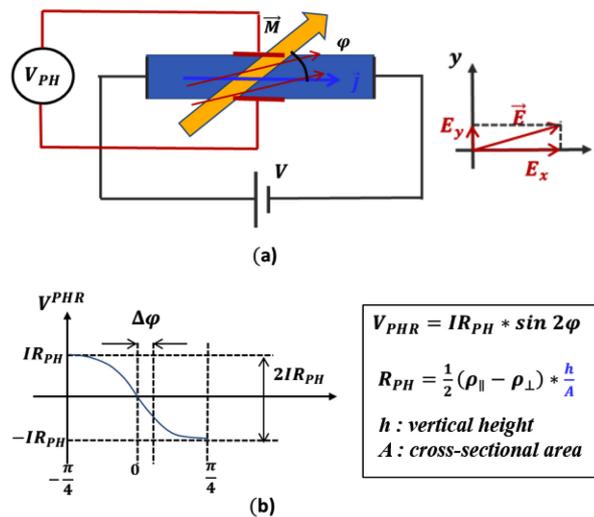


Fig. 4. Explain the operation principle of AMR in PHR (a) bias circuit and AMR effect description and (b) output signal of AMR effect vs magnetic field direction.

여 연결한다. 케이스는 탐침형 구조를 갖도록 하고 손으로 잡을 수 있는 두께로 제작한다.

2.2 PHR자기센서 설계

2.2.1 PHR 자기센서 이론

PHR 자기센서는 비대칭 자기저항 효과(Asymmetric Magnetoresistance, AMR)를 이용한다. 자기 저항체의 저항은 자화방향(M)과 전류방향(I)의 각도에 따라 달라진다(Fig. 4). 자화방향과 전류방향의 평행할 때 저항이 가장 크며 수직 방향으로 배열할수록 저항은 감소한다.

AMR 현상에 따라 자화방향이 전류방향과 틀어지면 전류 방향에 수직인 전기장 성분이 발생하고(Fig. 4(a)의 E_y) 이로 인해 전류의 수직 방향으로 평면홀 전압 (V_{PH})이 발생한다. V_{PH} 는 평면홀 저항 (R_{PH})에 의해 결정되는데 박막구조일수록, 수직 방향

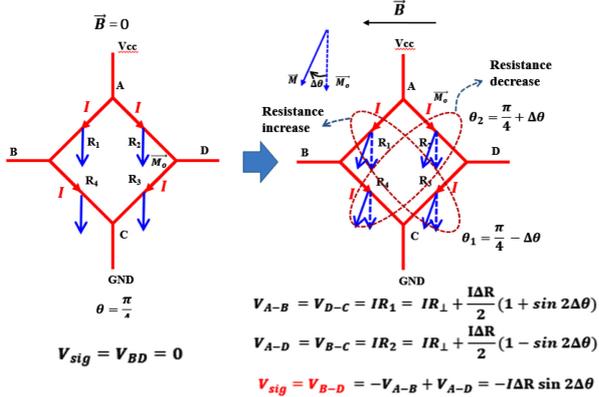


Fig. 5. PHR working principle of Wheatstone bridge structure.

의 누적거리가 클수록 값이 커진다(Fig. 4(b)). 외부 자기장에 의해 자화 방향이 틀어지면 V_{PH} 신호가 변화하는데 PHR 자기센서는 이를 이용하여 자기장을 측정한다.

본 연구에서는 NiFe/Cu/IrMn 삼중막 구조로 30nm이하의 PHR 박막구조를 사용하였으며 [7,8], 동일한 자기저항체를 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge) 형태로 배치하여 PHR 신호를 강화한 자기센서 구조를 사용하였다(Fig. 5).

초기 자화방향은 센서의 아래 축 방향으로 형성되도록 공정 진행된다. 초기 자화방향을 ‘Easy Axis’라고 한다. 전류 방향은 Easy axis에 $\pm 45^\circ$ 각도로 흐르도록 자기저항체가 배치되며, 외부 자기장이 없는 상태에서는 휘트스톤 브리지의 저항 대칭성에 의해 출력신호는 영(zero)이 된다. 하지만 외부 자기장 영향으로 자화방향이 회전하면 비대칭 자기저항에 따라 휘트스톤 브리지의 4개 저항 사이에 불일치(mismatch)가 발생하고 외부자기장에 비례하는 자기 신호가 발생한다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 Easy axis는 전류방향에 45° 틀어진 아래방향으로, 즉 종축방향으로, 정확히 배치될 때 신호감도가 극대화되며 신호 선형성 또한 양호해진다. 만약 Easy axis가 종축 방향에서 틀어지면 센서감도 및 선형성 특성이 불량해질 수 있다.

4개 저항이 이상적으로 동일하면 자기 신호가 없는 상태에서 출력신호(Fig. 5의 B-D사이 신호: V_{BD}) offset은 존재하지 않는다. 하지만 공정 상의 노광, 식각 혹은 박막증착 등의 로딩효과에 따라 각 저항값의 mismatch가 발생하고 V_{BD} offset이 발생할 수 있다. V_{BD} offset 자체는 이를 조절하는 회로기능으로 제어할 수 있으나, offset 조절 한계가 있을 뿐 아니라 센서 동작 모드에서 줄 발열에 의한 센서온도가 증가하며 발생하는 thermal drift noise의 원인이 된다.

결론적으로 센서 제조 공정에서의 KPI(key process index)는 첫째, Easy axis를 정확히 센서의 종축 방향으로 설정하는 것과 둘째, 저항값의 mismatch가 최소화되도록 증착, 노광, 식각 등 공정을 제어하는 기술이다.

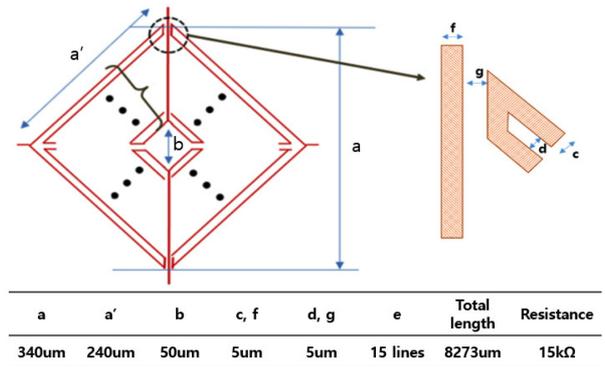


Fig. 6. Design pattern of PHR Sensing part.

2.2.2 PHR 자기센서 칩 설계

자기센서의 휘트스톤 브릿지는 이론에서 밝힌 바와 같이 종축에 바이어스 전압을 인가하고 출력이 횡축으로 배치된 마름모꼴로 구성하였다. 자기저항 값을 최대로 하기 위해 각 사분면의 제한된 영역에 촘촘히 반복 연결된 패턴을 설계하였다.

Fig. 6과 같이 자기센서의 휘트스톤 브릿지 감지부의 선폭은 박막공정의 성능을 고려하여 5um를 기본으로 적용하였다. 자기저항 패턴의 수는 15개 이고 중심부 빈 부분의 간격은 50um로 하였더니 감지부의 전체 크기는 마름모의 대각선 길이인 340um가 되었다. 그래서 감지부 한 변의 저항은 약 15kΩ으로 설계하였다. Fig. 7은 PHR 감지부(빨간색)와 AI신호선(녹색)으로 구성된 자기센서 칩을 보여준다. 센서 칩의 크기는 폭 900um,

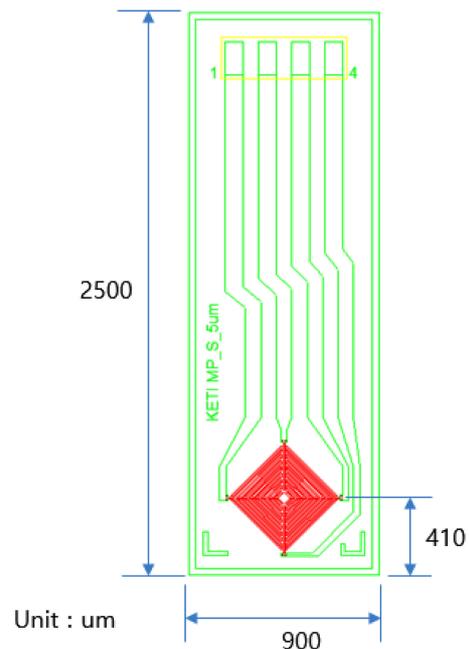


Fig. 7. The size of PHR sensor chip.

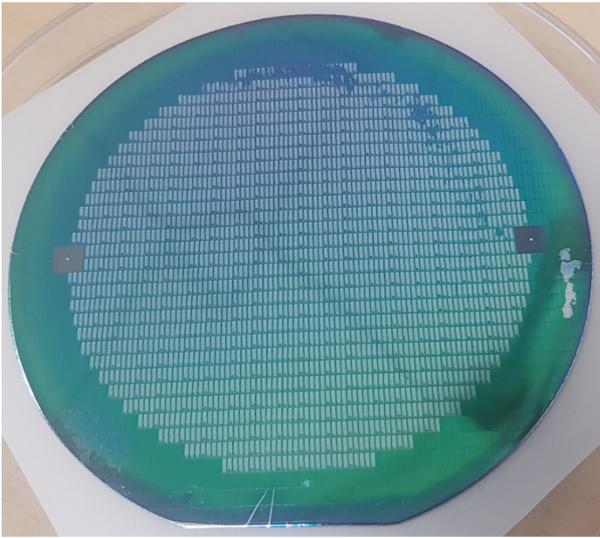


Fig. 8. Fabricated PHR sensor wafer.

길이 2500 um 으로 설계하였다. PHR 자기센서를 4인치 실리콘 기판에 제작할 수 있도록 5인치 마스크를 적용하였다.

2.3 PHR자기센서 제작

PHR 자기센서 공정은 p형 실리콘 기판에 Thermal SiO₂ 2000A, 자기박막 공정, Al신호선 공정, 보호막 PECVD Low stress SiO₂ 순으로 진행되었다. 공정 온도에서 Al이 공정 중 자기박막의 확산이 발생되는지의 여부를 확인하고 공정을 진행하였다. 자기박막은 Ta/NiFe/Cu/IrMn/Ta로 구성되어 있으며, 각 층의 두께는 5 nm/10 nm/0.5 nm/10 nm/5 nm이다. 이 때 Cu의 두께를 조절하면 자기장 감지 범위를 조절할 수 있다. 자기박막 공정에 사용된 스퍼터는 4종의 멀티타겟을 장착하여 진공 챔버에서 순차적으로 증착공정이 이루어질 수 있는 전용 스퍼터 장비를 사용하였다.

제작결과를 Fig. 8과 같이 4인치 실리콘 기판에 PHR 자기센서가 제작되었다. Fig. 9(a)는 2500 um × 900 um 크기로 다이싱된 자기센서 칩이고 (b)는 감지부의 확대 사진이다.

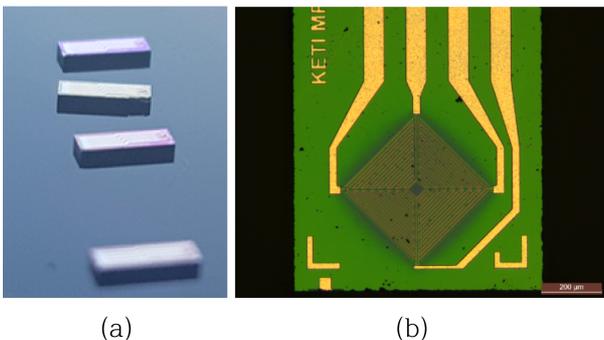


Fig. 9. (a) Diced PHR sensor chip and (b) Enlarged photo of PHR sensing part.

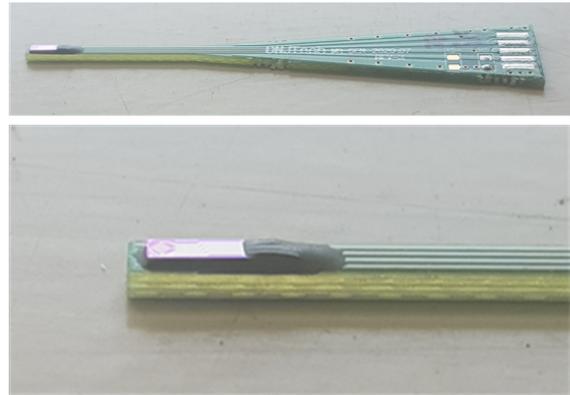


Fig. 10. Sensor PCB of current probe, which PHR chip attached and wire bonded.

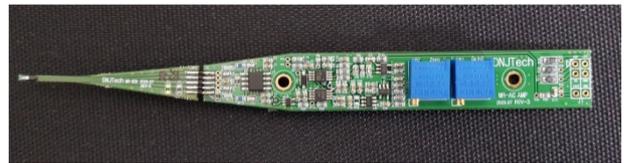


Fig. 11. Probe PCB which composed with sensor PCB and amplifier PCB.

2.4 탐침형 전류 프로브 제작

제작된 PHR 자기센서 칩을 Fig. 10과 같이 PCB에 부착하고 와이어 본딩한 후 epoxy를 도포하여 와이어를 고정 및 보호하였다. PCB는 프로브의 끝을 가늘게 하기 위해 칩의 폭보다 조금 큰 1 mm로 하고 반대편은 증폭부 PCB와 연결하기 위해 8 mm 제작하였다. 모양은 삼각형에 한 쪽이 길쭉하게 나온 형태가 되었다.

프로브의 PCB는 센서부와 증폭부를 분리하여 제작하였다. 센서부는 PHR 센서 칩을 부착하고 와이어 본딩하는 공정으로 제작되고 증폭부 PCB는 SMT 공정을 제작되기 때문에 분리하는 것이 편리하다. Fig. 11은 센서부 PCB와 증폭부 PCB가 연결된 모습이다. 증폭부에서는 PHR 센서를 구동하고 센서의 미약한 신호를 증폭하여 아날로그 신호로 출력하도록 제작되었다. 웨스턴 브릿지 구조의 센서 신호를 증폭하기 위해 (+)(-)두 센서 신호를 차동 증폭하기 위한 인스투루먼트 증폭회로 적용되었고, 이후 2차 증폭회로와 LPF가 적용되었다. 센서출력 오프셋과 감도를 조절하기 위한 두 개의 가변저항을 미세조정이 가능한 멀티턴 가변저항으로 적용하였다.

프로브의 케이스는 Fig. 12와 같이 상하부 플라스틱 구조물을 제작하고 센서부를 보호하기 위해 직경 1.5 mm 인 금속 파이프를 끼었다. 전체적인 크기는 손으로 잡기 편하도록 앞 쪽을 얇게 하여 날렵한 모양을 갖게 하였다. Fig. 13은 3D 프린터로 제작된 케이스로 조립된 프로브의 최종 모습이다.

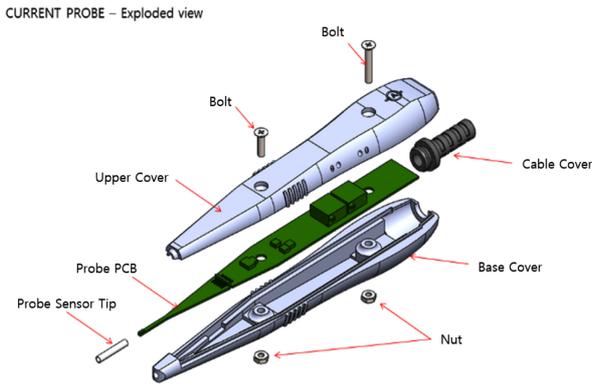


Fig. 12. Assembly diagram of the current probe.



Fig. 13. Assembled pin type current probe.

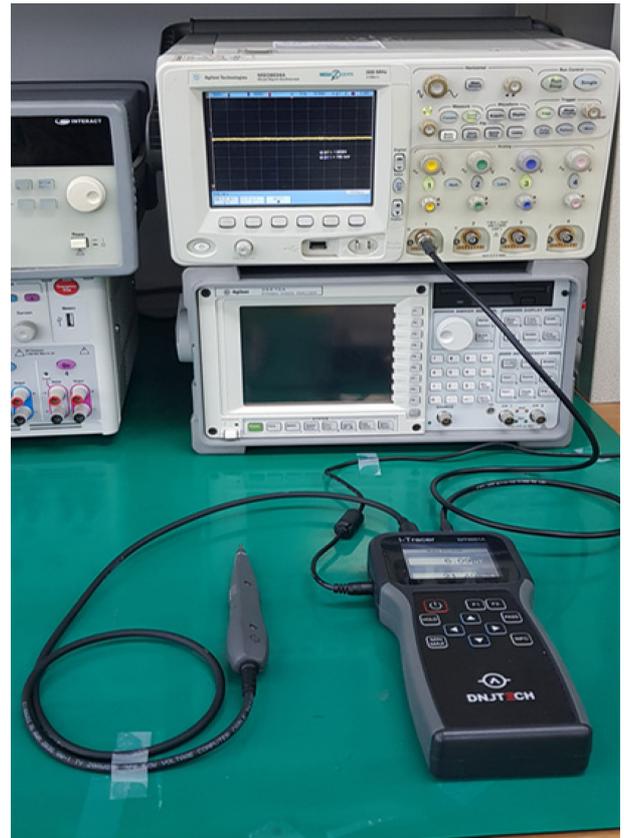


Fig. 14. Current probe and indicator, the output of the probe is connected to oscilloscope.

3. 결과 및 고찰

3.1 측정 Set-up

제작된 전류 프로브는 전원 공급과 출력값을 표시하기 위해 별도로 제작된 표시기(indicator)와 연결하였다. 또한 프로브의 아날로그 출력은 오실로스코프에 연결하여 볼 수 있다. 표시기는 ADC 하여 자기장 단위와 전류 단위로 표시하도록 하였다. 입력된 프로브의 전압을 자기장 세기로 표시하기 위해 전압-자기 변환계수를 적용하였고, 전류 세기를 표시하기 위해서는 자기-전류 변환계수를 적용하였는데, 이는 측정환경에서 자기장과 전류 각각의 칼리브레이션 과정을 수행하여 변환계수를 산출하였다.

Fig. 15는 자기장 감지 성능을 측정하기 위한 set-up으로 자기장 발생하는 헬름홀츠 코일과 전류공급용 DC 파워플라이 그리고 멀티미터를 사용하였다. 헬름홀츠 코일 내에는 인가되는 전류세기에 비례하여 균일한 자기장에 형성되기 때문에 프로브를 그림과 같이 설치하고 출력전압을 측정하였다. Fig. 16은 PCB 상에 흐르는 전류 세기를 측정하기 위한 set-up 이다. 원리적으로 전류에 의해 발생한 자기장의 세기를 측정하는 것으로 PCB 전류선과 프로브의 거리와 방향에 따라 출력전압이 크게 바뀐다. 따라서 일정한 성능 검증을 위해 프로브의 자기장 감지방향을 전류선과 수직하게 방향을 잡고 PCB면 일정한 거리(여기서는 1mm)를 유지하도록 클램프로 고정하여 설치하였다.

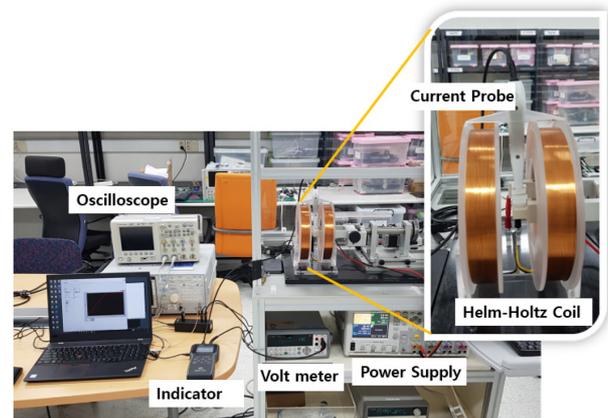


Fig. 15. Measurement setup for magnetic field sensing performance using Helmholtz coil.

3.2 측정 결과

Fig. 17는 자기장 감지 성능을 측정하기 위해 헬름 홀츠 코일 내 자기장을 $\pm 510 \mu\text{T}$ 범위로 인가하고 프로브의 출력전압을 측정한 결과이다. 시료에 따라 감도가 1.58 V/T에서 최고 2.39 V/T 수준으로 측정되었다.

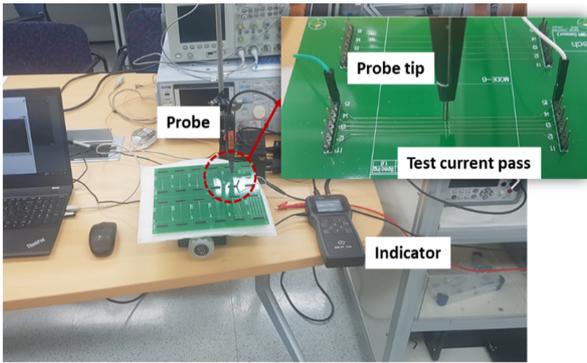


Fig. 16. Measurement setup for current sensing performance using PCB current line.

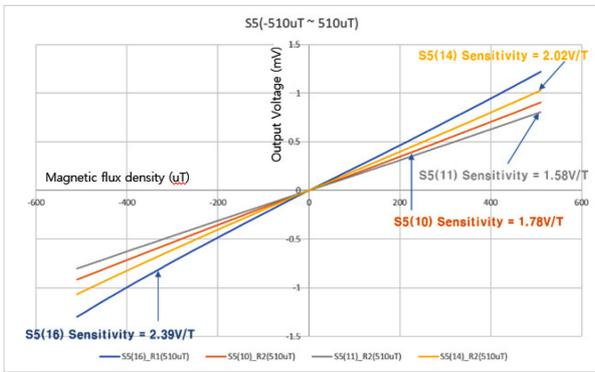


Fig. 17. The magnetic sensitivity graph of the probe.

Fig. 18은 전류 감지 성능을 측정 한 결과로 Fig. 16에서 볼 수 있듯이 PCB상에 있는 도선에 전류를 $\pm 1,000$ mA 범위로 흘려 주면서 프로브의 출력전압을 측정하였다. 측정결과 전류 감도는 0.98 V/A에서 최고 1.93 V/A 수준으로 나왔다.

Fig. 19는 자기장의 감지성능을 통계적으로 검정하기 위해 약 0.01uT의 간격으로 자기장을 10회 반복 측정 한 결과이다. 이를 근거로 귀무가설(H_0)과 대립가설(H_A)을 하기와 같이 설정하고 0.01 uT 간격의 두 그룹 (0.049 uT 그룹과 0.057 uT 그룹)에 대

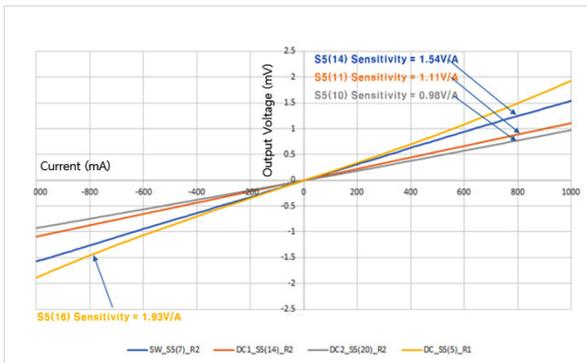


Fig. 18. The current sensitivity graph of the probe.

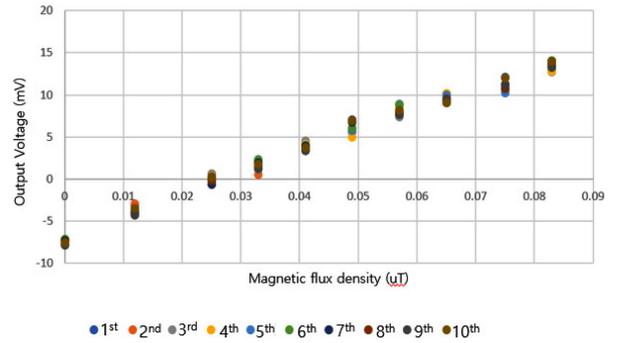


Fig. 19. Measurement result of magnetic field sensing resolution of 0.01 uT or less.

Table 1. T-test results for the 0.049uT group and the 0.057uT group.

	0.049 uT	0.057 uT
Average	6.69126	8.6485
Variation	0.07732	0.2786
Number of observations	10	10
Pooled variation	0.1779	
Hypothesis mean deviation	0	
Degree of freedom	18	
t-value	-10.373	
p-value	5.07E-09	
t-reject value	2.1009	

해 T-검정을 실시하였다(Table 1).

$H_0 = 0.01 \mu\text{T}$ 의 자기분해능이 없다.

$H_0 = 0.01 \mu\text{T}$ 의 자기분해능이 있다.

T-검정 결과 귀무가설 H_0 의 p-value는 5.07×10^{-9} 수준으로 신뢰도 95%에 해당하는 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에 비해 완벽하게 무시될 정도로 낮은 값이다. 따라서 귀무가설이 기각되며 0.01 uT 이하의 자기감도는 뚜렷하다는 대립가설을 채택할 수 있다. 본 연

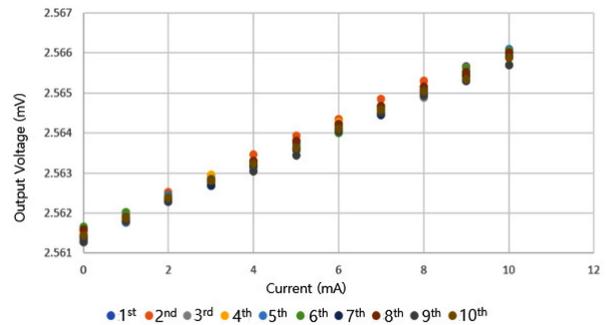


Fig. 20. Measurement result of current sensing resolution of 1 mA or less.

Table 2. T-test results for the 0mA group and the 1 mA group.

	0 mA	1 mA
Average	0.000	0.899
Variation	0.231	0.169
Number of observations	10	10
Pooled variation	0.1999	
Hypothesis mean deviation	0	
Degree of freedom	18	
t-value	-4.495	
p-value	0.00028	
t-reject value	2.1009	

구에서는 두개 그룹만의 결과를 보여주었으나, 나머지 8개 그룹에 대한 결과도 그 유의성이 뚜렷함을 확인하였다.

Fig. 20은 PCB에 흐르는 전류의 감지성능을 통계적으로 검증하기 위해 1 mA의 간격으로 전류를 10회 반복 측정 한 결과이다. 이를 근거로 귀무가설과 대립가설을 하기와 같이 설정하고 1 mA 간격의 두 그룹 (0 mA 그룹과 1 mA 그룹)에 대해 T-검정을 실시하였다(Table 2).

H_0 : 1 mA의 전류분해능이 없다.

H_A : 1 mA의 전류분해능이 있다.

T-검정 결과 귀무가설 H_0 의 p-value는 0.00028수준으로 신뢰도 95%에 해당하는 유의수준 $\alpha=0.05$ 에 비해 충분히 무시될 수 있다. 따라서 귀무가설이 기각되며 1 mA 이하의 전류 감도는 뚜렷하다는 대립가설을 채택할 수 있다. 나머지 8개 그룹에 대한 결과도 그 유의성이 뚜렷함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 PCB 상에 있는 도선의 전류를 전압 프로브와 같이 도선을 끊지 않고 편리하게 측정할 수 있는 탐침형 전류 프로브에 관한 것이다. 탐침형을 구현하기 위해 소형화가 가능한 고감도 PHR 자기센서를 설계 제작하여 적용하였고 증폭회로부 및 센서 케이스를 제작하여 조립함으로써 전류 프로브 시제품을 제작하였다. 제작된 프로브는 자기장 ± 510 uT 범위에서 약 2.3 V/T감도의 선형 특성을 보였고, 최소 분해능으로 10 nT 이하의 감도를 가지는 것을 T-검정을 통해 확인하였다. 또한 최종적으로 전류 측정 성능은 ± 1000 mA 범위에서 전류감도가 약 1.9 V/A 수준으로 나왔고, 분해능은 T-검정을 통해 1 mA 이하

의 매우 우수한 결과를 확인하였다.

개발된 탐침형 전류프로브는 실증 테스트를 통해 다양한 사용환경에서 발생하는 문제점을 파악하고 개선 연구를 통해 실제 상용화에 이르도록 후속연구를 계속할 계획이다. 또한 탐침 모양이고 접촉하지 않는 장점을 활용하여 PCB의 전류분포를 이미징하는데 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부 창업성장기술개발사업과 산업통상부 소재부품패키지형기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- [1] J. Y. Zhang, W. Xu, W. Zhang, X. Meng, and Y. Zhang "A novel compression algorithm for infrared thermal image sequence based on K-means method", *Infrared phys. technol.*, Vol. 64, pp. 18-25, 2014.
- [2] Y. Huang, and J. W. Wu "Infrared thermal image segmentations employing the multilayer level set method for non-destructive evaluation of layered, structure", *NDT and E international*, Vol. 43, No. 1, pp. 34-44, 2010.
- [3] T. Ueda, T. Oki, and S. Koyanaka, "An automated assessment method for integrated circuit chip detachment from printed circuit board by multistep binarization and template matching of X-ray transmission images", *J. Mater. Cycles. Waste. Manag.*, Vol. 23, pp. 315-322, 2021.
- [4] Y. J. Roh, W. S. Park, and H. Cho, "Correcting image distortion in the X-ray digital tomosynthesis system for PCB solder joint inspection", *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 12, pp. 1063-1075, 2003.
- [5] R. Koggalage, K. Chomsuwan, S. Yamada, M. Iwahara, and U.R. Abeyratne, "Giant magnetoresistance based Eddy-current sensor for High-speed PCB defect detection", *Proc. of Int. Conf. on Info. and Auto.*, pp. 170-175, Colombo, Sri Lanka, 2005.
- [6] K. Chomsuwan, S. Yamada and M. Iwahara "Bare PCB inspection system with SV-GMR sensor Eddy-current testing probe", *IEEE Sens. J.*, Vol.7, No.5, pp. 890-896, 2007.
- [7] A. Elzawy, S. J. Kim, A. Talantsev, and C. G. Kim, "Equi-sensitive adjustment of planar Hall effect sensor's operating field range by material and thickness variation of active layers", *J. of Physics D: Applied Physics*, Vol. 52, No. 28, pp. 285001(1)-285001(11), 2019.
- [8] B. Sinha, T. Q. Hung, T. S. Ramulu, S. Oh, K. W. Kim, D. Y. Kim, F. Terky, and C. G. Kim, "Planar Hall resistance ring sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure", *J. of Appl. Phys.*, Vol. 113, No. 6, pp. 063903(1)-063903(10), 2013.