

온도 센서와 자기 홀(Hall) 센서의 응용

I. 서론

일반적으로 센서(sensor)의 정의는 열, 빛, 온도, 압력, 소리, 자기, 전기, 전자기 등의 자연의 에너지원의 물리적인 양의 변화를 감지하고, 구분 및 계측하여 일정한 신호로 알려주는 부품이나 기구, 또는 계측기를 말한다. 인간과 비교하면 눈, 코, 귀, 신경세포처럼 자연의 물리적 변화를 감지하는 감각기관이다. 단지 기계적이고, 전자적으로 제어가 쉬운 시스템으로 만들어 놓은 부품이다. 동작을 감지하거나 소리에 따라 반응하거나, 누르는 힘에 따라 반응하는 등등 활용 범위는 다양하다. 센서의 종류에는 온도 센서, 압력 센서, 유량 센서, 자기 센서, 광 센서, 음향 센서, 미각 센서, 후각 센서 등이 있으며, 고속도로에 차량이 진입하면 통행 카드가 나오거나, 실내의 화재 감지기, 건물입구의 자동 점멸등, 밤이 되어 어둠이 짙어오면 켜지고, 낮이 되어 태양이 밝아오면 꺼지는 가로등 등이 간단한 센서의 보기이다. 각 종 센서의 종류와 측정원리, 응용분야에 대하여 <표 1>에 정리되어있다.

센서는 열적, 전기적, 자기적, 전자기적, 광학적 변화를 감지하는 기기이다.

센서는 대개 금속, 비금속, 유전체, 유체, 탄성체 등을 가공하여 제작되어 왔는데 크기의 문제, 재연성의 문제, 자동시스템을 이용한 제어의 어려움이 많다. 이 문제를 해결한 것이 바로 반도체 센서들이다. 반도체는 전자시스템 안에서 제어가 가능하고, 자동화 시스템 구축이 용이하다. 본 논고에서는 반도체를 이용한 온도센서와 홀 센서에 대한 구조 및 동작원리 그리고 특성과 응용부분들에 대하여 고찰하고자한다. <그림 1>에 현재 사용되는 다양한 반도체 센서의 모습이 도시되어있



이병철
(주)비드앤마이크로



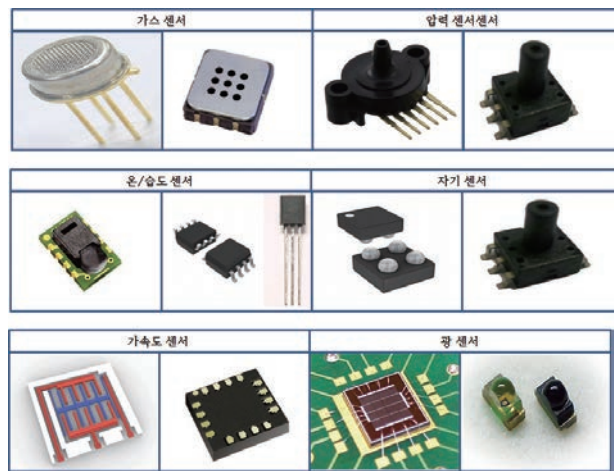
이해수
(주)세광에너텍



다. 본 논문에서는 역학적 센서, 자기 센서, 온도센서 영역에서 반도체를 이용한 센서에 대하여 고찰해본다.

〈표 1〉 각종 센서 분류와 측정원리 및 응용분야

주분류	소분류	측정원리	응용분야
역학 센서	압력센서	기계식, 전기식, 반도체	요기, 관 압력 측정
	변위센서	전위차계, 차동 변압기 등	자동설비
	응력 센서	금속, 반도체	전자저울
	유속 센서	피토관, 초음파, 열식	생산 공정 유량계 등
	가속도 센서	관성식, 자이로, 반도체	운송, 자동차 로봇 제어 시스템 등
자기 센서	전자유도 센서	전자유도 작용	자기헤드, 서치코일 등
	전류자기 센서	홀 효과, 자기저항	홀 소자, 근접스위치 등
	철심형자력계	유도 전류	자기장 측정, GPS의 방위각 측정 등
	자기 다이오드	자기 응축 효과	자기 센싱
	SQUID	조셉슨 양자 효과	미소 자계, 뇌파 측정
광 센서	광전자 방출형	광전효과	광전관, 광전자 증배관 등
	광도전형	광도전 효과	카메라 노출계, 방사 온도계, 광도계
	접합형	광기전력 효과	광통신, 수광 소자, 리모컨 등
	복합 광 소자	수광/발광 효과	포토 인터럽트
음향 센서	음파 센서	정전형, 압전형	마이크로 폰, 소음계
	초음파 센서	입전 자동차	초음파 제어, 통신 소자, 가스센서 등
온도 센서	촉온 저항 소자	금속 저항 온도특성	온도계측 및 물리량 계측
	써미스터	금속산화물 온도특성	
	P-n 접합센서	다이오드 온도 특성	
	열전대	Seeback효과	
	초전형 센서	자발분극 온도특성	
화학 센서	가스 센서	반도체, 전기화학식, 고체전해질식, 접촉 연소식	가스 센싱
	이온 센서	전기화학적 전위차	의료 계측, 생산 공정, 환경 계측등
	습도 센서	세라믹 고분자, 전해질, 초음파, 열전도식	습도 측정
방사선 센서	기체/액체 전리형, 반도체, 섬광형	공업계측, 비파괴 검사, 유전자 연구, 방사선 치료	
바이오 센서	효소, 미생물, 조직센서	혈액형, 유기물 측정 등	



〈그림 1〉 반도체를 이용한 각종 센서

II. 본 론

2.1 온도 센서

반도체의 동작을 위해서는 전기, 광, 온도, 압력 등의 외력이 인가되어야한다. 이들 중에서 온도의 외력은 온도에 따른 저항 변화의 요인으로 작용한다. 일반 도체는 온도가 올라가면 비저항이 증가하는 반면, 진성 반도체의 경우는 이와 반대로 온도가 올라갈수록 저항이 감소하는 특징이 있다. 진성 반도체 내의 전자들은 공유결합을 하고 있기 때문에 구조적으로 자유전자가 존재하지 않지만 온도가 절대온도에서부터 올라가기 시작하면 열로부터 에너지를 얻은 전자가 핵으로부터 속박에서 벗어나게 되어 자유전자(free electron)가 된다. 전류란 시간당 전하의 이동량을 의미하므로 자유롭게 움직일 수 있는 전하인 자유전자가 많아진다는 것은 전류의 흐름이 존재한다는 것을 의미한다. 그러므로 진성 반도체는 온도가 높아질수록 자유전자의 증가에 따라 저항이 작아지는 특성을 보여 준다.

열은 전자에게 뿐만 아니라 핵에게도 영향을 준다. 온도가 높아지면 핵의 격자진동이 활발해지고, 핵의 격자진동은 자유전자와 충돌을 일으켜 자유전자의 흐름을 방해한다. 불순물이 전혀 없는 반도체, 즉 진성 반도체 내의 자유전자의 수는 일반 도체에 비해 매우 적은 편이기

때문에 온도에 따라 증가하는 자유전자의 수가 절대적

인 영향을 끼치게 된다. 이런 전기적 특성 때문에 진성 반도체는 온도가 올라갈수록 저항이 작아진다. 그러나 주기율표상의 3족 또는 5족 원소를 배합한 불순물 반도체에는 이미 전류가 흐르기에 충분한 수의 전자(electron)나 홀(hole)이 있다. 이는 실온에서도 존재함을 의미한다. 온도에 따라 증가한 자유전자의 개수가 전류에 미치는 영향은 미미하다. 이때는 핵의 진동운동에서 발생하는 전자 산란(electron scattering) 현상이 자유전자 운동, 즉 전류의 흐름에 더 많은 영향을 끼친다. 이것은 도체에 서도 동일하다. 다시 말해서 불순물 반도체는 일반 도체와 마찬가지로 온도가 올라갈수록 저항이 커진다. 실제로 사용하는 반도체는 대부분 불순물이 첨가되어진 반도체이며, 온도가 높아질수록 저항이 커지는 특성을 지니고 있다.

반도체 온도 센서는 온도의 변화에 응답하는 센서로 온도변화를 감지하여 온도관리를 자동화하는데 이용되고 있다. 온도 센서란 열을 감지하여 전기신호를 내는 센서로 일반적으로 접촉식과 비접촉식으로 나누어지며, 접촉식은 실제 측정대상에 직접 접촉시켜서 온도 값을 측정하는 방식이며, 비접촉식은 물체로부터 방사되는 열선을 측정하는 방식이다. 반도체 온도 센서는 온도가 높아지면 저항 값이 감소하는 부저항온도계수(NTC, negative temperature coefficient)의 특성이 있는 전자회로용 소

〈표 2〉 접촉식 온도 센서들에 대한 비교특성

항목	RTD	열전대	서미스터	IC 온도 센서
측정 범위(°C)	-250~+900	-270~+1,800	-100~+450	-55~+150
감도	0.00385 (Ω/°C)	1~70 (μV/°C)	수 (Ω/°C)	-2 (mV/°C)
직진성	2차 다항식 근사	4차 다항식 근사	3차 다항식 근사	직선화 작업 불필요
강도	진동, 충격에 약함	강함	충격과 진동에 무관	패키징 된 IC만 견고
구동방식	전류원	불필요	전압원	전압
출력형태	저항	전압	저항	전압, 전류, 디지털
크기	0.25 X 0.25(in)	비드직경 =5 X 선 직경	0.1X0.1(in)	TO-18~플라스틱패키지
가격	\$25~\$1000	\$1~\$50	\$2~\$10	\$1~\$10

금속과 반도체의 열 특성의 차이점은 저항의 증가와 감소형태이다.

자로, 열용량이 작아서 미세한 온도변화에도 급격한 저항 변화가 생기므로 온도 제어용 센서로 많이 이용된다. 일반 접촉식 온도 센서들과 반도체 IC 센서에 대한 비교특성이 〈표 2〉에 정리되어있다.

2.1.1 반도체 다이오드를 이용한 온도센서

반도체 다이오드는 정류 기능을 가지며 기본 구조는 p-n 접합 구조이다. 반도체 다이오드를 이용한 온도 센서는 pn 접합에 걸리는 순방향 전압의 온도 의존성을 이용한다. 〈그림 2〉에서 다이오드에 흐르는 순방향 전류는 다음 (식 1)으로 주어진다.

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \quad \text{(식 1)}$$

여기서, I_s 는 역방향 포화전류(누설전류), q 는 전자전하, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도이다. 이때 p-n 접합에 걸리는 전압은 아래 (식 2)와 같고,

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \quad \text{(식 2)}$$

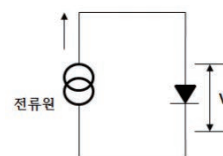
다이오드 전류 I 를 일정하게 유지하고, 구동전류를 $I \gg I_s$ 로 만들면, 순방향 다이오드 전압 V 는 온도 T 에 비례하며, 아래 (식 3)으로 정리된다.

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \quad \text{(식 3)}$$

전압 감도(S_V)는 온도에 따른 전압의 변화량으로 표시하며, 구동전류(I)와 포화전류(I_s)의 함수로 아래 (식 4)와 같이 표현된다.

$$S_V = \frac{dV}{dT} \approx \frac{k_B}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \quad \text{(식 4)}$$

실제로는 포화전류가 여러 전류성분으로 구성되어 있



〈그림 2〉 다이오드를 이용한 온도 센서 회로도



고, 온도의존성을 가지기 때문에 V-T 관계가 비선형으로 되어 오차가 발생한다.

2.1.2 반도체 트랜지스터를 이용한 온도센서

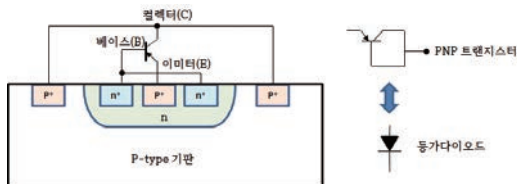
〈그림 3〉의 (a)와 같이 트랜지스터의 베이스(B)와 이미터(E)를 접속하면, 다이오드 온도 센서와 등가회로를 이루어와 동일한 온도 특성을 얻을 수 있다. 이 다이오드를 〈그림 3〉의 (b)처럼 정전류로 구동하면 아래 (식 5)이 성립한다.

$$V_{BE} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_c}{I_s}\right) \quad (\text{식 5})$$

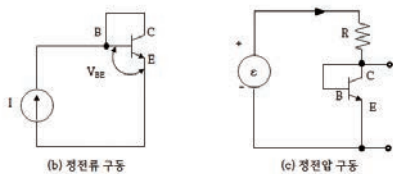
여기서, I_c 는 컬렉터 전류이고, I_s 는 포화전류이다. 또한 〈그림 3〉의 (c)처럼 정전압 구동을 하면 아래 (식 6)으로 정리된다.

$$I = \frac{\epsilon - V}{R} \quad (\text{식 6})$$

온도가 증가하면, 트랜지스터 전압(V)이 미소하게 감소하여 전류(I)가 미소하게 증가한다. 다이오드나 트랜지스터를 사용한 온도검출회로는 0.2 mV/°C의 출력특성을 나타낸다. 다이오드는 2단자 소자이기 때문에 사용하기는 쉽지만 특성의 호트러짐이 크다. 트랜지스터는 특성의 호트러짐은 외부회로에서 보정하기 쉽지만 3단자 소자이다. 또한 두 경우 모두 정전류 회로를 필요로 하며, 더구나 출력특성의 직선성이 부족하다. 즉, 좁은 영역에서는 직선성이 유지되지만 전 온도범위(-55~150°C)에서는 3~4°C만큼 크다. 이러한 결점을 해결하기 위해서 IC 온



(a) PNP 트랜지스터의 구조(좌)와 등가회로(우)



(b) 정전류 구동

(c) 정전압 구동

〈그림 3〉 트랜지스터를 이용한 온도 센서의 구동회로

도 센서(integrated circuit temperature sensor)가 개발되었다.

2.1.3 반도체 IC를 이용한 온도센서

기본적으로 모든 IC 온도 센서도 〈그림 4〉의 (a)처럼 트랜지스터의 베이스-이미터 전압과 컬렉터 전류 사이의 관계를 (식 7)을 이용한다.

$$V_{BE} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_c}{I_s}\right) \quad (\text{식 7})$$

동일한 트랜지스터 N개를 〈그림 4〉의 (b)와 같이 접속시키고, 총 전류 I_c 를 각 트랜지스터에 균등하게 배분하면, 각 트랜지스터에 흐르는 전류는 I_c/N 으로 될 것이고, 이때 위 식은 아래의 (식 8)으로 전환된다.

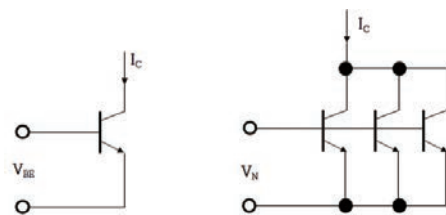
$$V_{BE} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_c}{N I_s}\right) \quad (\text{식 8})$$

앞에서 언급했듯이 I_s 가 강한 온도 의존성을 가지기 때문에 〈그림 4〉의 (b)회로를 그대로 사용하지 않는다.

〈그림 5〉와 같이 동일한 두 트랜지스터를 접속하고, 서로 다른 전류 밀도로 동작한다고 가정하는 경우 저항 R_1 의 양단전압은 트랜지스터 Q_1 과 Q_2 의 B-E 전압 차와 같으므로 전압과 온도 간의 관계는 아래와 같은 (식 9)로 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{R1} &= V_{B1} - V_{B2} \\ &= \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{E1}}{J_s}\right) - \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{E2}}{J_s}\right) \\ &= \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{E1}}{J_{E2}}\right) \end{aligned} \quad (\text{식 9})$$

위 식에서 J_{E1}/J_{E2} 가 일정하게 유지되는 한, 이 전압차는 온도 T에 비례한다. 오늘날 사용되고 있는 IC 온도 센서는 대부분 이 원리를 이용한다. IC 온도 센서 대한 구성 회로도의 예시(AD 시리즈)가 〈그림 5〉에 도시되어있다.



〈그림 4〉 IC 온도 센서 기본 회로도

이 센서 구조에서 전압과 온도와의 관계는 아래 (식 10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_T &= V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \\
 V_{BE1} &= \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_{C01}}\right) \\
 V_{BE2} &= \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_2}{I_{C02}}\right) \\
 I_{C1} &= I_{C2} = \frac{I_T}{2}
 \end{aligned}
 \tag{식 10}$$

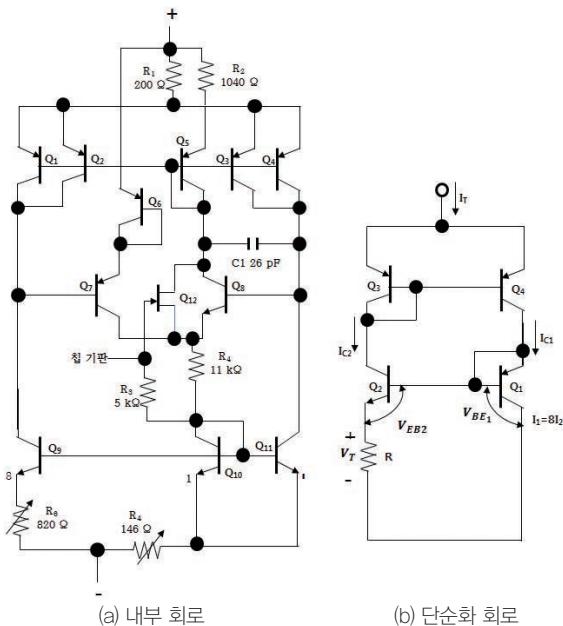
트랜지스터 Q_2 를 동일한 8개의 트랜지스터로 구성되도록 설계하면, Q_1 에서 이미터 전류밀도는 Q_2 에서보다 8배 더 크다. 즉, 트랜지스터에 흐르는 전류를 $I_1=8I_2$ 가 되도록 설계하면, R의 양단 전압(V_T)와 온도(T)와의 관계는 아래 (식 11)과 같다.

$$V_T = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{8I_1}{I_2}\right) = \frac{k_B T}{q} \ln 8 = 179 \frac{\mu V}{K} \times T \tag{식 11}$$

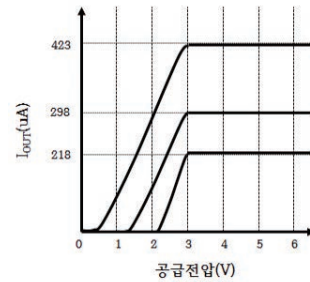
이때 회로에 흐르는 총 전류(I_T)는 아래 (식 12)와 같이 표현된다.

$$I_T = 2I_{C2} = 2 \frac{V_T}{R} = \frac{2 \times 179 \mu A}{R} \times T \tag{식 12}$$

만일 저항 R값을 358 Ω 이 되도록 조정하면, (식 13)으로 측정온도(T)는 직접 전류(I_T)로 전환할 수 있다.



〈그림 5〉 IC 온도 센서에 대한 회로 구성 예시도(AD 시리즈)



〈그림 6〉 IC 온도 센서의 전류-전압특성 곡선의 예시

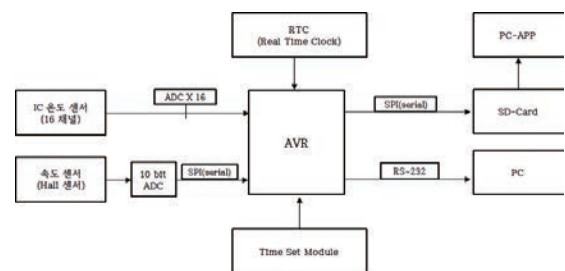
$$\frac{I_T}{T} = \frac{\mu A}{K} \tag{식 13}$$

전류-전압 특성곡선은 〈그림 6〉과 같은 결과를 보여준다. 이 결과는 약 4 V 이상의 전원에서 완전히 정전류 영역으로 들어가고, 직선적인 출력전류가 얻어진다. 따라서 이 센서의 감도는 1 A/°C 이다.

2.1.4 반도체 온도 센서의 적용

■ IC 센서를 이용한 고속철도차량 구동장치의 무선 온도 모니터링 시스템

고속철도차량의 구동장치는 차량의 동력을 전달하는 중요 부분이다. 이 장치는 기어와 베어링, 내부 윤활시스템으로 구성되어 있다. 이러한 구동장치의 이상상태는 항상 점검되어야 하는데 모니터링 방법으로 온도의 변화량 측정법을 사용한다. 구동장치의 온도가 기준치 이상을 넘을 경우에 기어와 베어링의 산화율의 증가와 윤활유의 점도가 떨어져 기어와 베어링의 손상에 대한 저항성을 감소시킨다^[1-2]. 온도의 기준치 이상의 상승은 구동장치의 충격하중 및 반복적인 피로는 장기간에 걸쳐서 발생할 수 있는 이물질 혼입, 조립불량 등의 문제와 기어, 베어링, 기어박스 등과 같은 구동장치의 부품에 경년열화, 마모



〈그림 7〉 온도 모니터링 시스템 구성도



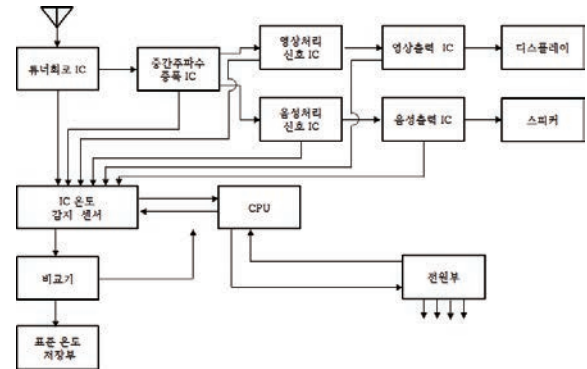
및 미세균열 등의 원인이 된다^[3-4].

이런 문제점을 예방하기 위하여 온도 모니터링 시스템을 구성하고, 운영관리하고 있다. 온도 상승을 감지하는 센서로 IC 온도 센서가 사용되며, 모니터링 시스템은 <그림 7>과 같이 구성된다.

<그림 7>은 온도 센서의 출력단 이후 신호처리 장치의 개요도를 나타낸 것이다. 온도모니터링의 신호처리장치는 전류전압 변환기, AD 변환기(ADC: Analog to digital Converter), 마이크로프로세서, 송신부, 수신부, USB 인터페이스장치, 디스플레이 장치로 구성된다. 온도센서(16채널)에서 전류신호 출력 후 증폭기(amplifier)에서 전압 값으로 변환 증폭한 다음 속도 센서에서의 속도신호를 ADC(10 bit)로 변환 후 직렬(serial) 통신으로 PC로 전송한다. AVR(Automatic Voltage Regulator)에서 전압 값(0~5V)을 ADC(10 bit)로 입력 받고, 전압 값을 온도 값으로 변환 연산하여 연산된 온도 값 (현재시각, 속도, 온도)은 직렬통신을 통해 SD 카드에 저장하고 연산된 온도 값은 RS-232를 통해 PC로 전송 후 실시간으로 모니터링 하게 되는 시스템이다. 온도 모니터링시스템을 통하여 고속철도 차량 구동장치의 온도 변화를 분석함으로써 본 연구의 모니터링 시스템으로 구동장치의 기능 이상 여부를 판단할 수 있으며, 일상정비(ES)와 완전분해점검(TBO)시 유지보수의 효율성을 제공할 수 있다.

■ 텔레비전 IC 온도 과열 방지 장치

텔레비전의 회로를 구성하는 IC의 과열을 방지하기 위하여, 온도감지센서로 모든 IC의 온도를 측정하고 저장된 IC의 표준온도와 측정된 온도를 비교하여 측정된 온도가 표준온도를 초과할 경우 CPU가 각 IC에 전원을 공급하는 전원부의 공급전압을 하강시켜 과열되는 IC의 온도를 낮추게 하여 과열되는 텔레비전의 IC회로를 냉각시키는 텔레비전의 IC 온도과열 방지장치에 IC 온도 센서가 사용된다. 텔레비전은 전력소비가 높기 때문에 각 개별소자의 온도가 쉽게 상승하고, 온도상승으로 인한 과열을 방지하기 위해 냉각팬을 사용하여 온도를 하강시킨다. 일반적인



<그림 8> 텔레비전 온도과열 방지 시스템 구성도

텔레비전의 냉각팬을 사용한 냉각방식은 공랭식이기 때문에 실질적으로 과열되는 IC의 온도를 강하시키기에는 여러 가지 문제점이 있다. 모든 IC의 온도를 측정하는 온도감지수단과, 전원을 공급하는 전원공급수단과, 적정 온도 값을 저장하고 있는 표준온도저장수단과, 현재 측정된 온도와 저장된 표준온도를 비교하여 전원공급수단의 공급 전압을 하강시키는 전압하강방법이 사용된다. 구성도를 살펴보면 <그림 8>에서처럼 감지된 모든 IC의 온도와 표준온도 저장부에 저장된 IC의 적정 온도 값을 비교기에서 비교하고, 그 결과를 CPU에 인가하여 비교기에서 판단한 결과에 따라서 모든 IC의 현재 온도가 표준온도 저장부에 저장된 온도 값을 초과할 경우 전원부를 제어하여 모든 IC에 공급되는 전압을 강하시켜 IC의 온도를 하강시키는 CPU로 구성된다.

2.1.5 반도체 IC를 이용한 온도 센서의 개발 방향

반도체 소자설계 및 제조공정의 눈부신 발전에 힘입어 전자 정보 기기, 가전제품들은 나날이 소형화와 고속화되고 있다. 그러나 전력 소비로 인한 기기들의 열 발생은 필수적으로 수반된다. 전기 회로 내에서 안정된 성능을 유지하기 위해서는 온도 제어에 대한 기술 개발이 요구된다. 또한 전원 회로나 모터 회로 등 기기 동작 시 발생하는 열은 회로에서는 쇼트(short)나 이상 동작을 동반하고 있어, 과부하에 대한 여러 가지 보호회로 및 온도 검출에 의한 제어가 요구된다. 통상적으로 이 문제를 해결하기 위해 서미스터를 이용한 온도 검출 회로가 이용되고 있

지만, 노이즈(noise)가 없는 안정된 레퍼런스(reference) 전압원이나 오프셋(off-set)을 가지지 않는 비교기가 필요하다. 이럴 경우 복잡한 회로설계가 수반하다. 이런 복잡성을 해결하기 위하여 고 정밀 레퍼런스 전압 원, 비교기, 정 전류 회로를 온도 검출 소자와 함께 한 개의 칩에 내장한 기술개발이 진행되고 있다.

2.2 홀(Hall) 센서

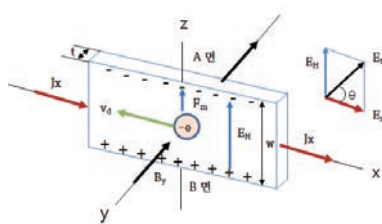
2.2.1 홀 효과(Hall Effect)

홀 효과는 전류와 자기장에 의해 모든 전도체 물질에 나타나는 효과이다. 전류가 흐르는 전기 전도체에 수직하게 자기장이 인가될 때 전류와 자기장의 방향에 수직하게 걸리는 전압을 홀전압이라 하며, 이러한 효과를 홀 효과라 한다. <그림 9>에 홀 효과에 대한 모습이 도시되어 있다.

길이가 충분히 긴 장방형 도체 또는 반도체 시료에 x-축 방향으로 전류 I_x 가 흐르고 있는 경우, 만일 외부 자기장 B_y 가 없다면, 전자(-e)는 인가 전계 E_x 와 반대방향으로 속도 v_d 로 이동한다. 이때 전류는 (식 14)로 표현된다.

$$J_x = -nev_d = ne\mu_c E_x, \quad I_x = (tw) \times (ne\mu_c E_x) \quad (\text{식 14})$$

여기서, n은 전자농도, e는 전자 전하량, μ_c 는 전자이동도, t는 시료두께, w는 시료의 폭을 나타낸다. 그러나 외부에서 시료에 수직한 방향(y 방향)으로 자계 B_y 를 인가하면, <그림 9>에서 보는바와 같이 전자에 자기력 F_m 이 작용하여 전자는 그림과 같이 z-방향으로 향하는 속도성분을 갖게 된다. 전자는 A면의 경계를 통해서 이동할 수



<그림 9> 홀 효과의 기하학적 도식도

없기 때문에, 면 A에는 전자가 축적되고 반대 면 B에는 전자의 부족이 발생한다. 그 결과 A면에 (-)전하, B면에 (+)전하가 축적된다. 이와 같은 전하분포에 의해 다시 B측에서 A측을 향해 전계 E_H 가 발생하고, 이 전계에 의해 전자에는 로렌츠 힘(Loenz force, $F_e = -eE_H$)인 전기력이 작용하여 전자가 A면으로 이동하는 것을 방해한다. 평형 상태에서는 자계 B_y 에 의한 자기력 F_m 과 전계 E_H 에 의한 전기력 F_e 가 균형을 이루어 <그림 9>와 같이 자계를 인가하기 전과 마찬가지로 전자는 외부전계 E_x 에 평행하게 이동하여 전류도 나란히 흐른다. 두 힘의 균형조건으로부터 홀 전계(Hall Field)는 아래 (식 15)로 표현된다.

$$E_H = -\frac{J_x B_y}{ne} = R_H J_x B_y, \quad R_H = -\frac{1}{ne} \quad (\text{식 15})$$

여기서, 비례계수 R_H 를 홀 계수(Hall coefficient)라 한다. 정공(hole)의 경우는 R_H 값은 절대값은 전자의 경우와 동일하나 부호는 플러스(+) 값을 갖는다. A, B 두 면 사이에 발생하는 기전력을 홀 전압(Hall voltage, V_H)라고 하며, 아래 (식 16)과 같이 표현된다.

$$V_H = wE_H = wR_H J_x B_y = R_H \frac{I_x B_y}{t} \quad (\text{식 16})$$

위 식에서와 같이 홀 전압이 크게 하기 위해서는 전자농도 n이 낮고, 이동도(μ)가 커야 함을 알 수 있다. 반도체 내부의 총 전계 E_t 는 E_x 와 E_H 의 벡터 합으로 주어진다. 전계 E_t 와 E_x 사이의 편향각(deflection angle)을 홀 각(Hall angle)이라고 하며, 아래 (식 17)과 같은 관계를 갖는다.

$$\tan\theta = \frac{E_H}{E_x} = \mu_c B_y \quad (\text{식 17})$$

2.2.2 홀 소자 제작

홀 소자는 시료의 형태상 세 가지로 분류한다. 첫 번째는 길이(L)가 무한한 경우, 두 번째는 장방형, 세 번째는 십자형 형태 소자이다. <그림 10>에 각 형태에 따른 홀 소자의 모습이 도시되어 있다. 무한길이의 경우 홀 전압은 (식 16)으로 표시되나, 유한 크기 소자인 정방형과 십자형의 경우에는 (식 16)은 아래 (식 18)로 변환된다.

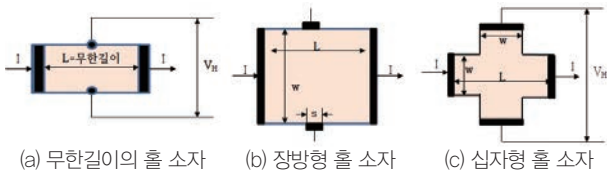


$$V_H = R_H \frac{IB}{t} F_H \quad (\text{식 18})$$

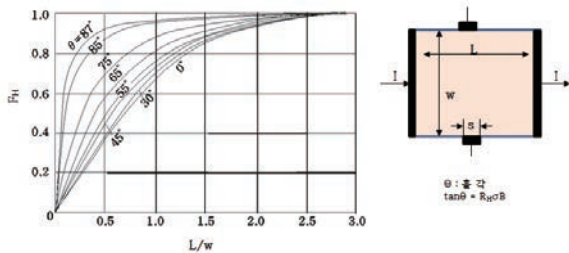
여기서, F_H 는 형상계수(geometry factor)이다. 이 계수는 실제의 홀 센서들은 <그림 10>의 (b), (c)에 나타난 것처럼 유한의 크기를 가지므로 홀 전압은 (식 16)으로 주어지는 값보다 작아진다. 이 현상은 자기저항효과로 전극 접촉부(electrode contact)가 전류의 유선(current line)을 왜곡시키기 때문에 발생한다.

형상계수는 L/W 와 θ 의 함수이다. <그림 11>에 장방형 홀 소자에 대한 L/W 와 θ 에 따른 형상계수의 변화를 나타내고 있다. <그림 11>에서 $L/w \gg 3$ 인 범위에서 F_H 는 최대값인 1이 된다. 따라서 홀 소자의 길이 L 은 폭 w 보다 3배 이상 커야함을 알 수 있다.

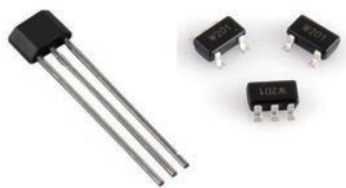
큰 홀 전압을 얻으려면 (식 18)에서 알 수 있는 바와 같이, 홀 계수와 전자나 정공의 이동도가 크고 두께가 얇은 반도체 박편이어야 한다. <그림 10>의 장방형 홀소자(b)에서, 전극 크기와 길이 비(s/L)가 0.1보다 작은 장방형



<그림 10> 형태별 홀 소자 분류



<그림 11> 장방형 홀 소자에 대한 L/W 와 θ 에 따른 형상계수의 변화



<그림 12> 패키지 된 홀 소자의 외관 모습

박편을 제작하는 것은 어렵다는 것을 알 수 있다. 이러한 문제는 제작하기가 더욱 용이한 <그림 10>의 (c)와 같은 십자형 구조(cross shaped)로부터 동일한 형상계수 값을 얻을 수 있기 때문에 실용의 홀 센서는 십자형 구조로 되어 있다.

홀 전극의 단락효과를 억제하고, 또한 외부회로의 임피던스에 정합된 내부저항을 갖도록 설계된다. <그림 12>에 패키지 된 홀 소자의 외관 모습이 도시되어 있다.

2.2.3 홀 센서 특성

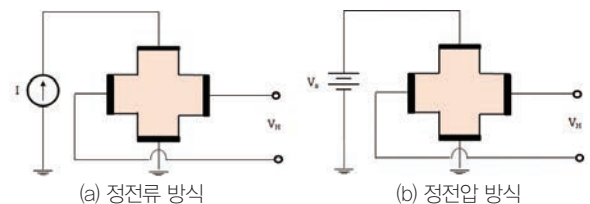
(1) 구동원리

홀 센서를 이용하려면 사용 용도에 따라 소자전류를 공급하는 방식을 결정해야한다. 홀 센서의 구동은 <그림 13>에서와 같이 정전류와 정전압 구동 방식을 사용한다.

두 방식의 출력은 아래 (식 19)와 같다.

$$V_H = R_H \frac{IB}{t} F_H (\text{정전류 방식}), V_H = \frac{w}{L} \mu B V_s \frac{F_H}{g_M} (\text{정전압 방식}) \quad (\text{식 19})$$

여기서, g_M 은 형상효과에 의한 저항증가율이다. 정전류 구동방식은 자체 직선성이 우수하다. 자속밀도가 커지면 자기저항효과에 의해 소자저항이 증가하지만 소자전류가 소자저항에 관계없이 일정하므로 직선성은 양호하다. 인가전압이 소자저항(R)의 온도변화에 따라 변화하므로 불평형 전압의 온도변화가 크고, 회로가 복잡한 단점이 있다. 정전압 구동방식은 자속밀도가 증가하면 자기저항효과에 의해 저항치가 증가하여 소자전류($I=V_s/R$)가 작아지기 때문에 홀 전압이 변화하여 직선성이 나쁜 단점이 있다. 또한 소자전류가 소자 저항에 의해서 결정되므로 홀 전압의 온도변화가 크다. 그러나 인가전압이 일정하므로 불평형 전압의 온도변화가 작고, 회로가 간단한 장점이 있다.



<그림 13> 홀 소자 구동 방식

(2) 주요특성

■ 감도

정전류 구동의 경우 홀 전압은 전류와 자속밀도의 곱에 비례하므로, 홀 센서의 감도로는 보통 적감도(S_I)가 사용되고 있다. 홀 전압과 적감도의 관계는 아래 (식 20)과 같다.

$$V_H = S_I I B, \quad S_I = \frac{V_H}{I B} = \frac{R_H}{t} F_H \quad (\text{식 20})$$

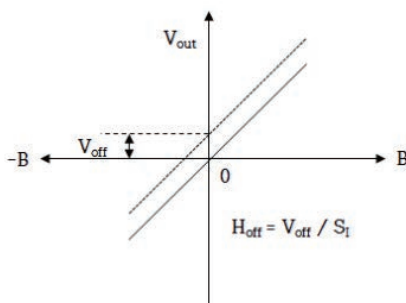
적감도는 보통 소자전류 1 mA, 자속밀도 1 kG에 대한 홀 전압을 mV로 표현하며, 적감도의 단위로는 mV/mA · kG가 자주 사용된다. 감도는 온도의 변화에 따라 민감한데 홀 전압의 온도 의존성은 적감도의 온도 의존성에 의해서 결정된다. 이런 이유 때문에 온도 의존성을 작게 하려면 에너지 갭이 큰 반도체를 사용하여야 한다. 소자재료의 에너지 갭이 클수록 온도특성이 우수하다.

■ 자계 직진성

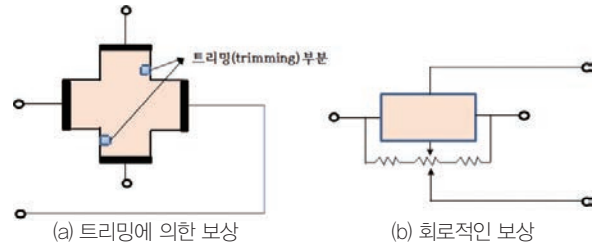
홀 전압이 이론값으로부터 벗어난 정도를 나타내는 것으로, 통상 %로 표시한다.

■ 오프셋 전압(offset voltage, V_{off})

이상적인 홀 소자에서는 외부자계가 없을 시 홀 전압은 영(zero)이다. 그러나 실제의 홀 소자는 여러 가지 원인에 의해서 외부자계가 존재하지 않는 경우에도 <그림 14>와 같이 약간의 전압이 발생한다. 외부자계를 인가하지 않은 상태에서 홀 소자에 단위입력 전류를 흘릴 때 나타나는 출력전압을 오프셋 전압 또는 불평형 전압이라 한다. 실용상 문제가 되는 것은 오프셋 전압과 적감도(S_I)와



<그림 14> 홀 소자의 오프셋 전압



<그림 15> 홀 소자 오프셋 보상 방식

의 비(rate)인 오프셋 자계(H_{off})이다.

오프셋 전압은 홀 소자의 가공 정밀도의 문제와 소자 내부의 전기적 특성의 불균일성, 홀 전극의 비대칭성 등에 의해서 발생된다. 이 오프셋 전압이 홀 센서의 가장 큰 문제점인데 보상이 필수적이다. 홀 전극 위치의 비대칭에 기인하는 오프셋 전압을 보상하는 방법에는 2가지가 있다. <그림 15>의 (a)처럼 홀 전극 근방에 홈을 내어 평형을 갖도록 하는 트림밍(trimming) 법과 (b)처럼 출력 측에 보상용 저항을 넣어 브리지 회로를 만들어 회로적인 보상방법이 있다. 더 나은 방법은 홀 전압을 증폭하는 차동 증폭기의 평형조절을 홀 소자와 일체화하여 할 수도 있다. 이 경우에는 오프셋 전압이 가능한 한 작은 것이 바람직하다.

■ 동상전압

홀 소자는 4단자 소자이므로 동상전압이 홀 전압에 중첩된다. 동상전압은 보통 차동 증폭기에 의해서 제거되지만 제거되지 않는 양은 0점 드리프트(zero drift)가 되어 나타난다.

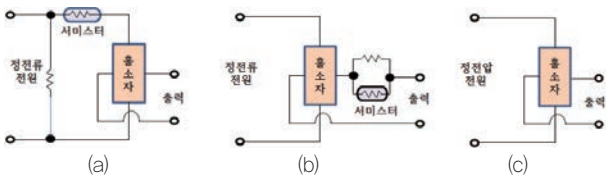
■ 재료에 따른 홀 소자 특성

홀 소자의 특성은 재료와 형상에 의해서 결정되며, 물질 상수인 전이동도와 에너지 밴드 갭(band gap)에 따라 변한다. 전이동도가 크면 클수록 감도는 커진다. 또 에너지 갭이 클수록 홀 소자의 온도 특성이 좋아진다. <표 3>에 홀 소자의 재료로 사용되는 물질의 전자 이동도와 에너지 갭이 정리되어있다. <표 3>에서 보는바와 같이 화합물 반도체인 갈륨비소(GaAs)는 밴드 갭이 커서 동작 온도범위가 넓고, 온도변동이 작다. 그러나 전자 이동도가 작아 감도가 나쁘다. 인듐안티몬(InSb)은 전자 이동도



〈표 3〉 홀 소자재료의 전자 이동도와 에너지 갭

물질	전자 이동도, $\mu(m^2/V-s)$	상온에너지 밴드 갭, $E_g(eV)$
Si	0.41	1.11
GaAs	0.85	1.38
InSb	7.7	0.17
InAs	3.3	0.35



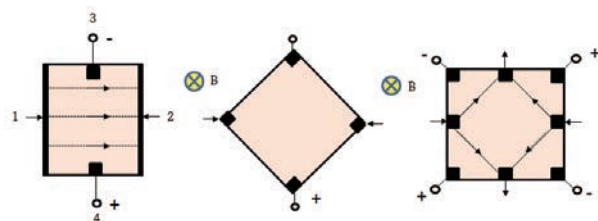
〈그림 16〉 홀 센서 온도보상 방식

가 크므로 출력 전압이 크다. 보통 갈륨비소 홀 센서의 수 배~10배 정도 크나, 에너지 밴드 갭이 작아서 동작범위는 작다.

온도에 의한 영향으로 발생하는 부분도 보상이 필요하다. 온도 특성 보상방법은 〈그림 16〉의 (a), (b)처럼 온도 계수가 다른 서미스터 등을 센서 회로 내에 조합시켜 온도를 보상한다. 온도 의존성의 원인과 관련 파라미터를 변화시켜 센서 회로를 구성한다. 인듐안티몬(InSb) 홀 소자의 경우 (c)와 같이 정전압 구동방식으로 변경하여 온도특성을 개선한다.

2.2.4 홀 IC

홀 IC는 홀 전압을 발생시키는 홀 소자와 신호처리회로를 조합한 것이다. 실리콘 홀 소자는 전자 이동도가 작기 때문에 감도가 나빠서 단독으로 사용하지 않고, 실리콘 홀 소자와 증폭회로, 온도보상회로를 하나의 칩에 집적화한다. 혼성 홀 IC(hybrid Hall IC)는 전자 이동도가 높은 화합물 반도체(InSb, GaAs 등)로 만든 홀 소자와



〈그림 17〉 홀 소자 IC에서 사용되는 홀 소자의 구조

실리콘 신호처리 칩을 조합한 홀 IC이다. 직접화한 홀 소자 IC에서 사용되는 홀 소자의 구조가 〈그림 17〉에 도시되어있다.

(1) 홀 IC의 종류와 특성

■ 디지털(digital) 출력형

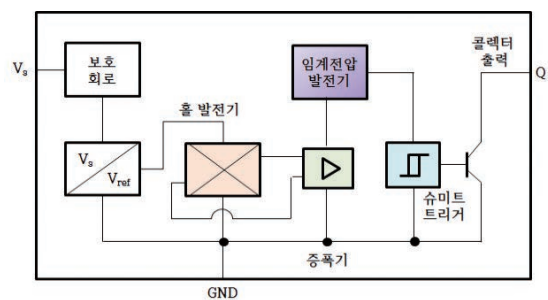
디지털 출력형에는 슈미트 트리거(Schmitt trigger) 회로가 추가된다. 〈그림 18〉에 스위칭 홀 IC 구성 블록도가 도시되어있다.

◎ 단극(unipolar) 홀 IC 스위치

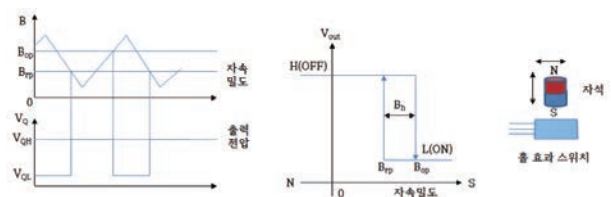
홀 스위치가 자계의 S극에 노출되고, 자속밀도가 B_{op} (operate point) 이상으로 증가하면, 출력 트랜지스터는 도통 상태가 되어 출력전압은 'High'에서 'Low'로 변한다. S극을 제거하여 자속밀도가 B_{rp} (release point) 이하로 감소하면, 출력전압은 'Low'에서 'High'로 변하여 소자는 스위치 OFF 상태로 된다. 〈그림 19〉에 단극 홀 IC의 스위칭 특성이 도시되어있다.

◎ 이극(bipolar) 홀 IC 스위치

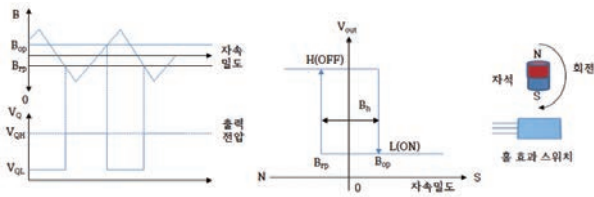
S극에 노출되었을 때 동작하고(ON상태), S극이 제거되더라도 ON상태를 계속 유지한다. 바이폴라 홀 스위치를 OFF시키기 위해서는 자계 N극에 노출시켜야 한다. 따라서 대칭적이고, 주기적으로 S극과 N극을 반복하면 50%



〈그림 18〉 스위칭 홀 IC 구성 블록도



〈그림 19〉 단극 홀 IC의 스위칭 특성



〈그림 20〉 이극 홀 IC의 스위칭 특성

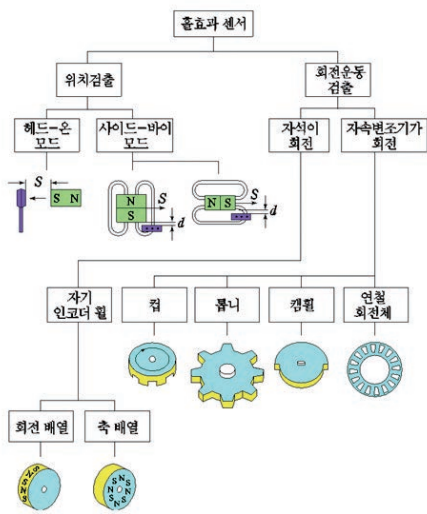
듀티 사이클(duty cycle)을 가지는 주기적 출력을 얻을 수 있다. 〈그림 20〉에 이극 홀 IC의 스위칭 특성이 도시되어 있다.

(2) 홀 IC의 응용

자계 측정뿐만 아니라, 사무기기 및 가전제품의 모터 제어, 세탁기, 냉장고 등의 도어 스위치, 전류측정, 레벨 센서, 전력측정, 근접센서, 속도센서, 위치센서 등 광범위하게 응용되고 있다. 〈그림 21〉에 홀 센서를 사용한 위치 측정과 회전 속도 측정 센서들이 분류되어 있다. 최근의 생산라인 자동화기와 자동차 전자시스템화에 따라 이 부분에서의 활용도가 점차 확대되고, 응용제품개발이 활발히 이루어지고 있다.

■ 자동차용 홀 센서

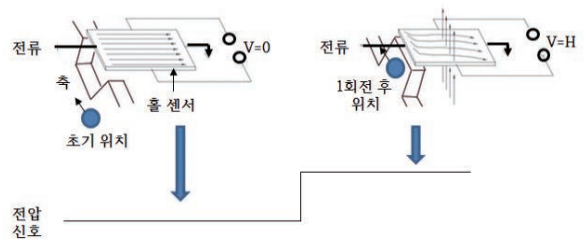
자동차 시스템에서의 홀 센서의 활용을 살펴보면, 홀센



〈그림 21〉 홀 센서를 사용한 위치 측정과 회전 속도 측정 센서들의 분류도

서는 센서 내부의 회로판에 도체가 접근하면 신호가 발생하는 반도체인 홀 소자와 증폭기가 기본적으로 설치되고 회로구성이나 사용전압에 따라 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸는 A/D 컨버터와 전압조정기로 시스템을 구성한다. 도체가 멀리 떨어져 있으면 반응이 없어 전압이 발생하지 않지만 도체를 가까이 접근시키면 전압이 발생하는 홀 소자를 이용하여 한 개의 돌기가 설치된 축을 회전시키면 돌기부분이 홀 센서에 약 1mm 안으로 접근하면 출력전압이 발생된다. 이 결과로 축이 1회전 했고, 축에 설치된 돌기는 고정된 위치를 가지고 있어 축의 위치도 알 수 있게 된다. 〈그림 22〉에 메카니즘이 도시되어 있다.

시그널의 숫자는 축에 설치된 돌기의 숫자와 같으며 해당 시스템에서 요구하는 특성에 맞추어 적절한 숫자가 결정된다. 홀 센서는 검출할 수 있는 최대회전수에 한계가 있지만 반도체 기술의 발전으로 회전변화를 감지하는 옵티컬 센서(optical sensor)에 비하여 장점이 많아 최근에 많이 사용되고 있다. 그러나 자동차에 응용하기에 아직까지는 부적합한 면도 있다. 최고회전수가 낮다. 마그네틱 센서에 비하여 단위시간당 나타낼 수 있는 최대 시그널 출력수가 적기 때문에 대부분의 자동차용 엔진에서는 회전속도가 높은 CKPS로는 마그네틱 센서를 사용하고 상대적으로 속도가 낮은 CMPS로는 홀 센서를 사용한다. 배전기를 사용하는 전자식 점화시스템에서도 홀센서를 사용하는데 배전기축과 일체로 조립된 베인 이나 노브가 회전하면서 센서에 접근하게 되면 발생하는 출력으로 점화코일의 1차 전압을 단속하여 점화전압을 발생시키는 형식으로 최



〈그림 22〉 축 회전에 따른 홀 전압의 변화 메카니즘



신 가솔린엔진은 대부분 배전기가 필요 없는 직접점화식(DLI)을 점화장치를 사용하고 있다. 그 외에도 자동차 속도를 검출하는 센서(VSS)로 사용하기도 한다.

III. 맺음말

센서는 인간의 오감을 역학적, 화학적, 광학적, 전기적, 자기적, 전자기적인 현상과 일치시켜 개발된 과학 기술의 산물이다. 눈을 대신하는 광센서, 귀를 대신하는 음파센서, 피부를 대신하는 온습도센서, 코를 대신하는 화학센서, 혀를 대신하는 미각센서 등 센서는 인간의 오감을 대신할 뿐만 아니라, 인간의 감각으로는 측정할 수 없는 미세한 수치까지도 인식이 가능하다. 2015년 1월에 출간된 <유엔미래보고서 2045>에서는 센서 기술을 향후 10년 이내에 운송·농업·의료산업을 혁명적으로 변화시킬 대표기술로 꼽고 있다. 정부는 과학진흥정책 중 2015년부터 2020년까지 총 1508억 원을 투자하여 첨단 센서 개발 및 상용화를 지원하고, 전문 인력을 양성하며, 취약한 국내 센서 산업 기반을 확충하여 새로운 유망사업으로 육성하겠다는 목표를 제시하였다.

센서는 열, 빛, 온도, 압력, 소리 등 물리, 화학, 생물학적 현상과 물질을 감지하고, 그 정보를 데이터 형태로 변환하는 장치이다. 감지된 정보를 데이터 처리하고, 이를 통해 의사 결정을 하는 등 다양한 기능이 결합된 센서를 최근 ‘스마트 센서’라고 부른다. 첨단센서는 사물인터넷(IoT), 웨어러블 등 신기기의 등장과 더불어 점차 지능화, 소형화, 고성능화 되어 갈 것이다.

본 논문에서 다루었던 온도 센서, 홀 센서는 산업현장의 자동화 시스템 구성에 필수적인 센서이다. 특히 온도 센서는 화재, 기기들의 과열로 인한 조기 문제 발견에 중요도를 더하고 있고, 홀 소자의 경우는 자동차 전자 시스템화에서 속도와, 배전기, 축 상태 점검에 있어서 중요도를 갖는다.

무엇인가를 자동제어 하는 데는 환경의 변화를 센싱 하는 것이 무엇보다도 우선이다. 현재 반도체 기술의 눈부신 발전으로 각종의 반도체를 이용한 센서가 개발되고, 상용화되고 있다. 더불어 멤스(MEMS) 공정기술의 발전

은 반도체를 이용한 다양한 자동화 기기의 제작과 제어, 계측에 관련된 융복합 응용제품을 제작할 수 있는 단계로 접어들었다. 반도체를 이용한 온도와 자기 센서들의 유용한 응용 영역을 찾고, 멤스를 통한 소형화 기기 개발, 광학 기기와의 융복합을 통하여 새로운 센서 응용의 확장을 위한 연구 개발이 절실히 필요하다.

참고 문헌

- [1] Lee, D. H., Choi, K. J., Seo, J. W., and Moon, K. H., "Development of Test Method and Evaluation Technology of Reduction Gearbox for Korea High-Speed Train," KRRl research 2001-18, Paper No. 144, 2001.
- [2] Lee, D. H., Kwon, S. J., and Seo, J. W., "Test and Evaluation of High Speed Rail System," KRRl report, 1998.
- [3] Kato, H., Iwanami, K., Arai, H., and Asano, K., "Development of a High Speed Shinkansen Bogie," JR East Technical Review, No. 8, pp. 15-18, 2006.
- [4] Rafiee, J., Arvani, F., Harifi, A., and Sadeghi, M. H., "Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, No. 4, pp. 1746-1754, 2004.
- [5] <http://www.group.fuji-keizai.co.jp/press00.html>



이병철

- 1986년 2월 전북대학교 물리학과 학사
- 1988년 8월 전북대학교 물리학과 석사
- 1996년 8월 전북대학교 물리학과 이학박사
- 1996년 11월~2004년 3월 (주)동부하이텍
- 2004년 4월~2005년 7월 옵토팩(주)
- 2005년 10월~2008년 8월 광전자(주)
- 2008년 9월~2010년 9월 (주)에이스프라임 연구소장
- 2010년 10월~2012년 2월 포엔사 연구소장
- 2012년 3월~2012년 8월 (주)씨에스이 연구소장
- 2012년 9월~2013년 8월 (주)제이하라 부사장
- 2013년 9월~2015년 3월
- 2015년 4월~현재 (주)비드앤마이크로 연구소장

〈관심분야〉
디스플레이, 전력소자, PKG



이해수

- 1983년 전주공업대학교 전자과 전문학사
- 1992년 호원대학교 전자공학과 학사
- 2005년 아주대학교 대학원 석사
- 2014년 경희대학교 학사
- 2015년~현재 안양대학교 박사과정 재학
- 1988년2월~2008년4월 광전자(주)/중국대련법인 사장
- 2004년3월~2010년8월 전주비전대학교 전자과 겸임교수
- 2008년4월~현재 (주)세광에너지/ (주)삼민산업/ (주)충남기업 대표이사

〈관심분야〉
디스플레이, LED조명, 무전극 조명, 태양광