

자기센서의 원리와 응용

손대락

한남대학교 물리학과

(1997년 12월 20일 받음)

I. 서 론

센서는 어떤 물리·화학적량을 다른 물리·화학적량으로 변환시키는 기능의 소자를 통칭하는 용어로써 그 범위가 매우 넓으며, 현대 산업사회에서 전기·전자공학의 발전과 더불어 센서가 더욱 중요시되고 있다. 특히 대부분의 센서가 피측정 물리·화학적량을 전기적 신호로 변화시키는 기능으로 정밀측정, 생산자동화 및 자동제어 등에 다양하게 사용되고 있다.

센서는 원리적 측면에서의 분류와 센서의 기능적 측면으로 분류방법이 있다. 센서 관련 학문적 연구면에서 보면 센서의 원리적 측면에서의 접근이 용이하며 센서를 사용하는 산업체나 사용자의 입장에서는 센서의 기능적 측면 즉 피측정 물리·화학적량의 종류에 따른 분류가 편리하다.

예를 들면 미소 변위측정을 위하여 사용되는 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)의 경우 길이를 정밀측정하는 전문가가 사용하고 있지만, 원리는 변위에 따른 코아의 위치 변동에 의하여 자속의 변화가 코일에 유도되는 기전력의 변화를 측정하므로써 미소 변위를 측정하는 원리이고, 따라서 LVDT의 측정범위를 길게 하고 선형도를 높이는 연구를 한다면 자기학 분야의 전문가가 연구를 하는 것이 바람직하다.

따라서 산업관련분야에서 센서를 분류할때는 측정기능면에서 분류하여 사용하는 것이 편리하여 우리나라의 센서코드[1]가 기능적 측면에서 분류되어 있으며, 역학센서의 경우 9024-9031, 화학센서의 경우 9027, 전자기 센서의 경우 9030으로 분류되어 있으며 자기센서는 전자기센서에 속하는 중분류로 되어 있으며 소분류에는 자장센서, 자속센서 및 자기력센서등으로 분류되어 있다. 그러나 센서를 연구 개발하는 측면에서의 분류가 학문연구를 하는 분야에 적절하기 때문에 자기센서의 경우도 마찬가지로 적용되고 있다. 국가나 산업체에서 분류할때의 자기센서는 주로 자기장측정용 센서의 의미를 포함하고 있으나, 학문적 입장에서의 자기센서는 "자기적 현상을 이용한 센

서"로 포괄적으로 취급하는 것이 바람직하다. 자기적인 현상을 이용한 자기센서는 인류역사에도 매우 밀접하다. 인류가 최초로 안개 지역이나 항해에서 방향을 지시하는데 사용하였던 자기 나침반에서부터 오늘날 인공위성의 자세제어에 사용되는 flux-gate 센서에 이르기까지 자기센서는 많은 발전을 하여 오늘날에 이르렀다. 따라서 대부분의 자기센서에 사용되는 자기적 현상이 19세기에서 20세기에 발견된 것이기 때문에 새로운 원리의 자기센서 개발보다는 새로운 재료의 개발이나 새로운 센서의 설계 및 최적화 기술을 도입으로 센서의 특성 향상에 많은 노력을 하고 있다.

자기센서를 기술하기 전에 센서의 일반적인 특성과 최근 개발 동향에 관하여 기술하여 자기센서를 이해하는데 도움이 될까 한다.

센서에서 일반적인 주요사항은 다음과 같다.

1. 선형도 (Linearity)
2. 분해능 (Resolution)
3. 재현성 (Reproducibility)
4. 동특성 (Dynamic response)
5. 신뢰성 (Reliability)

또한 최근의 센서개발동향은 센서의 저전력화, 소형화 및 센서출력이 microcomputer와 쉽게 interface가 가능하여 user friendly한 출력이 쉽게 가능한 센서 즉 intelligent sensor[2]와 EMC에 내성이 있는 센서의 개발이 요구되고 있으며, 자기센서의 경우 중요한 장점이 우수한 재현성과 신뢰성이기 때문에 센서의 사용 환경조건이 나쁜 공장의 생산자동화용, 자동차용 및 항공·우주분야 등에 널리 사용되고 있다.

Fig. 1의 위는 기능별 분류에 의한 센서의 세계시장규모이고, Fig. 1의 아래는 센서의 사용목적에 따른 분류에 의한 유럽시장규모로 대부분의 센서시장이 10년에 100% 이상의 커지는 것으로 예측되고 있으며, 센서관련산업이 고부가가치의 미래지향적 산업임을 잘보여주고 있다[3].

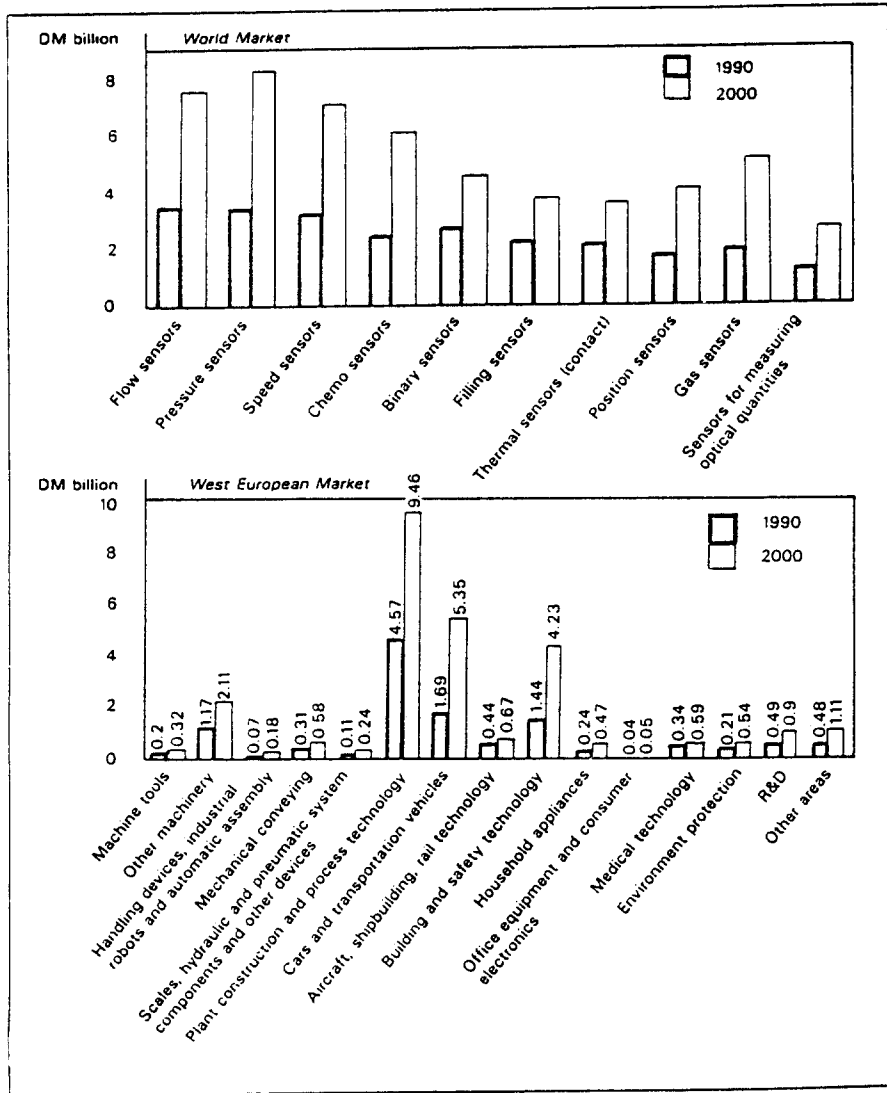


Fig. 1. Market size of sensors.

II. 본 론

자기센서의 범위가 매우 넓기 때문에 모든 자기센서에 관련된 원리 및 응용범위를 기술하는 것이 어렵기 때문에, 여기에서는 자기센서에 활용되는 원리와 간단한 응용 예를 들고 자세한 내용은 참고문헌으로 인용하려고 한다.

자기센서를 자기적 현상으로 분류하여 보면 다음과 같다.

1. Faraday의 전자기유도법칙
2. 인덕턴스변화 및 Skin 효과

3. 자속 분포의 변화에 의한 유도기전력의 변화
4. Joule 효과
5. ΔE 효과
6. Matteucci 효과
7. Thomson 효과 (자기저항효과)
8. Hall 효과
9. Wiedmann 효과
10. Vallari 효과
11. Sixtus 효과
12. Curie 온도 및 Hopkinson 효과

- 13. Zeeman 효과
- 14. Josephson 효과

이들의 원리가 사용되는 자기센서의 간단한 예를 들어 보면 다음과 같다.

1. Faraday 전자기유도법칙 : 이법칙은 자속의 시간변화율에 비례하여 기전력이 발생하는 것으로 ($V = -\frac{d\Phi}{dt}$), 자기센서에서 가장 간단한 원리의 센서이다.

그 사용예를 보면 도로의 표면에 탐지코일을 매설하여 두면 지나가는 차량이 자성체이기 때문에 지자기장의 분포를 변화시켜서 코일에 기전력이 유도되며 이 기전력으로부터 차량의 속력과 크기를 측정하는 센서로[4] 우리나라에도 고속도로에 설치되어 차량흐름의 정보를 측정하는데 사용되고 있다. 탐지코일 마그네토미터는 코일을 포머에 권선하여 유도되는 기전력으로 부터 교류자기장을 측정하는 센서로 센서의 분해능을 높이기 위하여 코아를 넣어서도 사용한다. 그 응용은 지표에서 태양풍에 의한 교류자기장의 변화등의 측정등에 사용되며, 분해능이 1 pT 까지 가능하다[5].

2. 인덕턴스변화 및 skin 효과 : 이 방법의 원리는 감지부분이 연자성재료의 코아에 코일이 권선되어 있고, 측정 대상물체가 비자성금속일 경우 와전류에 의한 skin 효과에 의하여, 측정대상물체가 자성의 금속일 경우 자기회로의 자기저항변화가 코일의 인덕턴스를 변화시키고, 이는 근접정도에 따라 변하므로 근접정도를 측정 할 수 있는 센서로써 선형성은 나쁘지만 온도특성이 우수하고, 그 구조가 간단하여 비접촉 S/W나 회전하는 축의 회전수 측정 및 비접촉 근접센서로 널리 사용되고 있다[6].

3. 자속분포의 변화에 의한 유도기전력의 차이 : 이 원리를 사용하는 센서는 자기변형상수가 매우적고 고 투자율의 자성재료를 사용하고 있으며, 그 대표적인 예가 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 fluxgate 마그네토미터 그리고 자동차용 ABS 센서이다. LVDT의 원리는 두개의 이차코일과 한개의 일차코일로 구성되어 있다. 중앙에 위치한 일차코일에 교류전류를 가하여 코아를 자화시키고 자화된 코아의 위치에 따라서 두개의 이차코일을 통과하는 자속분포가 변화하게 되어 두개의 이차코일에 유도되는 기전력의 차이가 발생하고, 그 값이 코아의 변위에 비례하므로 변위를 측정하는 센서로 사용된다. LVDT는 비교적 선형도가 우수하기 때문에 산

업용 및 정밀측정용 변위 및 각도 측정용으로 널리 보급되어 있다[6]. Fluxgate 마그네토미터는 두개의 코아 또는 원형의 코아에 두개의 일차코일에 교류자화방향이 서로 반대방향이 되도록 교류전류를 가하면, 외부자장이 없을 경우 두 코아의 자속의 합이 영이 되지만 외부자장이 있을 경우 두 코아의 자속이 서로 다르게 되어 이차코일에 기전력이 발생되고, 이 기전력으로부터 외부자기장을 측정하는 센서로[7], 이차세계대전을 전후하여 개발된 기술로 60년대 부터 인공위성에 활용되고 있으며 선형도가 0.1 % 이상이고 전력소모가 적기 때문에 휴대용 저자장 측정용으로 지자원탐사, 항공우주공학 및 군사용으로 널리 보급되어 있다. ABS 센서의 원리는 톱니모양의 회전판에 영구자석을 놓으면 회전판이 회전하면 톱니가 있을 경우와 없을 경우의 자기저항 (magnetic reluctance) 변화에 의하여 자속의 변화가생겨서 기전력이 발생하는 것을 이용하여 회전수를 측정하는 원리이다[6].

4. Joule 효과 : 강자성체를 자화시키면 자성체의 모양이 변하는 현상으로, 자기장의 세기가 아주 높지않을 경우 부피의 변화가 없이 시편의 길이와 단면적이 변화하는 현상으로 1842년에 발견되었으며 자기변형(magnetostriction) 효과라고도 한다. 일반적인 연자성재료의 경우 길이의 변형률이 10^{-5} 정도로 자기코아에서 발생하는 소음원 중 하나이나, 자기변형효과가 큰 특성을 이용한 대표적인 센서는 수중음향센서와 Fe-계 비정질리본에 광섬유를 부착하여 자기장에 의한 비정질리본의 길이변화가 광섬유의 광로의 길이를 변화시켜서 광학적 간섭계를 이용하여 자기장을 측정하는 광섬유마그네토미터로 그 원리는 자성체의 자화방향회전에 의한 자기변형이 코아의 길이를 변화시키기 때문에 코아에 부착된 광섬유에 응력을 가하게 되고 따라서 광로의 차이가 발생하게 되고, 이 광로차를 Mach-Zender 간섭계를 사용 측정하므로써 자기장을 측정하는 방법으로 그 분해 능이 수 pT 정도 되는 것으로 보고되고 있다[8]. 최근에 개발된 Terfenol D 재료는 자기변형상수가 10^{-3} 정도의 매우 큰 재료로 이 현상을 응용한 수중음향센서의 개발이 활발히 진행되고 있다[9].

5. ΔE 효과 : 이 현상은 자화에 의하여 자성재료의 Young률이 변화되는 것으로, 자기장에 의한 고체내의 음향신호의 전달속도(acoustic delay)의 변화나 음향신호의 반사를 이용하여 센서에 사용하는 원리로 자기장측정 센서, acoustic delay line, 기름의 수위를 측정하는 비접촉 변위센서 및 비파괴자기탐상용센서등에 활용되고 있다[10, 11].

6. Matteucci 효과 : 강자성체에 종방향의 자기장을 가하고, 자성체를 비틀면 시편의 자화가 변하는 현상으로, 자기변형의 특성을 갖는 스프링모양의 자성체선(wire)에 코일을 권선하여, 변위나 피축정 힘에 의하여 강자성선에 비틀림힘을 가하게되어 자기유도의 변화에 의한 기전력을 측정하므로 변위센서 및 힘측정센서의 응용이다. 비정질자성재료의 Matteucci 효과와 Large Barkhausen 효과를 이용하여, 비틀림상태의 비정질리본 및 세선에 코일을 권선하지 않고서도 변위 및 회전속도를 측정하는 센서의 개발도 있다[12, 13].

7. 자기저항효과 : 자기저항효과는 일명 Thomson 효과로 말하며, 저성체의 전기적 저항이 자화방향과 전류의 방향에 따라서 변화하는 현상으로, 물리적인 원인은 자기장에 의하여 스핀방향이 서로다른 전자의 에너지준위가 분리되고 따라서 Fermi 표면의 상태밀도(density of state)가 변하여 비저항의 변화를 주는 것으로 알려져 있다. 자성박막의 경우 자기저항변화율이 2~5 % 정도로 적기 때문에 두개의 동일한 센서를 사용한 차등형이나 4개를 사용한 브리지형태를 많이 사용하고 있다[12]. 최근에는 강자성박막사이에 비자성박막이 있는 자기다중박막의 경우 인접한 두 강자성박막이 반강자성 구조로 결합하여 거대자기저항효과를 갖는 자성재료 및 granular 형 박막에서의 GMR과 산화물계 자성재료의 CMR에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기저항효과를 이용한 센서는 센서의 소형화가 가능하고, IC화 할 수 있는 장점을 가지고 있어서, 자장센서, 변위센서, 각도센서 및 기록매체의 head 등에 응용되고 있다. 특히 brushless 모터와 서보모터 사용의 증가로 자기저항효과를 이용한 센서의 수요가 최근 많이 증가되고 있다.

8. Hall 효과 : 홀센서의 원리는 물체에 전류가 흐를때 전자가 외부자기장에 의하여 Lorentz 힘을 받게되어 시편양단에 전압(홀전압)이 발생하며, 반도체분야에서는 반도체의 물성연구에 이용되나, 센서분야에서는 홀전압을 측정하므로써 자기장을 측정하는 방법으로 사용된다. 홀센서는 소형 다량생산이 가능하고 증폭기등 전자회로를 동시에 반도체공정으로 생산가능하여 저가의 다량생산공급이 가능하여 보편적인 용도의 자기장센서로 가장 많이 보급되어 있다[12].

9. Wiedmann 효과 : 자성체에 전류를 흘리거나 전류를 흘린후에 자성체를 비틀면 자성체가 자화되는 현상으로, 원기둥 모양이나 스프링 모양의 자성체에 코일을 권

선하고 자성체에 전류를 흘리는 상태에서 원기둥 모양의 경우 토오코를, 스프링 모양의 경우 힘이나 변위를 주면 코일에 전압이 유도되고 이를 측정하여 토오코, 힘 및 변위를 측정하는 센서이다[12].

10. Villari 효과 : Joule 효과의 역현상으로 자성체에 외부에서 응력을 가하면 자기적 특성(투자율)이 변화하게 되는데 이를 Villari 효과라 한다. 이 현상은 비정질 합금에서 매우 효과적이어서 비정질합금의 센서 응용에 많이 활용되고 있으며, 저항변화를 이용하는 strain gauge보다 Villari 효과를 이용한 magnetic strain gauge가 변화율이 더 크고 온도특성 및 내구성이 우수하나 선형도가 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서 정확도가 높지않은 경우 magnetic strain gauge의 응용에 관한 연구가 많이되고 있다. 대부분 강체의 변형 부분에 비정질리본을 부착하여 이용하는 힘센서 및 비접촉 토오코센서 등이 개발이며[14], 일본, 독일 및 영국 등 세계적으로 많은 연구를 하고 있다.

11. Sixtus tonk 효과 : 이 효과는 자구의 불연속적 이동이나 자기핵생성등에 의하여 코아에 권선된 코일에 펄스모양의 기전력이 발생하는 현상으로, large Barkhausen 효과를 말하며, 이를 이용한 대표적인 예가 Wiegand 선으로 보자력이 서로 다른 두개의 자성재료를 내부에는 보자력이 적은 자성재료를 그리고 외부에는 보자력이 큰 자성재료를 접합하고, 영구자석을 이용하여 외부에서 자장의 N-S 크기를 다르게 가하면 보자력이 적은 자성재료의 자구(magnetic domain)가 반전할 때 큰 Barkhausen pulse가 발생되며 이를 pick-up 코일로 감지하는 방법이다. 이 경우 센서부분은 외부에서 전원공급이 필요하지 않은 장점이 있으며, 이를 이용한 비접촉 S/W 및 회전수 측정 등에 응용되고 있다. 한편 비정질리본과 세선에서도 이와같은 현상이 있어서 많은 연구가 되고 있다[12].

12. Curie 온도 및 Hopkinson 효과 : 모든 자성재료는 온도가 증가함에 따라 자화가 감소하여 Curie 온도 T_c 이상에서 상자성체로 상전이를 하며, 투자율 또한 온도에 따라서 변화하는데 T_c 근처에서 자기이방성에너지 최소가되어 초기투자율이 최대치를 갖으며 이를 Hopkinson 효과라 한다. 자성재료의 고유적 특성인 Curie 온도(T_c)를 이용하여 고정된 온도의 감지 및 온도조절용 센서에 활용되고 있다.

13. Zeeman 효과 : 이현상은 양자역학적으로 에너지

준위가 축퇴(degenerate)되어있는 상태가 자기장하에 놓이면 에너지준위가 분리되는 현상을 말하며, 원자핵을 이용하여 자기장을 측정하는 NMR(Nuclear Magnetic Resonance)가우스미터와 원자내 전자의 에너지준위를 이용하는 absorption cell 마그네토미터가 있으며 물리적 기본현상을 이용하기 때문에 정확도와 재현성이 매우 우수하여 정밀자기장측정에 사용되고 있다[15].

14. Josephson 효과 : 이 효과는 두개의 초전도체사이에 부도체의 얇은박막(수 10 Å)이 있을 경우 $I-V$

특성이 비선형적으로 일어난다. 즉 임계전류 I_c 까지는 Josephson junction 양단에 전압이 발생하지 않으며 (dc Josephson 효과)와 임계전압 V_c 이상에서는 일정한 저항값을 가지나 전류가 진동하는 ($\omega = \frac{2e}{h} V$) 현상 (ac Josephson 효과)을 나타낸다. 초전도체의 환고리 (ring)모양에 2 개의 Josephson junction을 두고 전류를 흘리면 전류가 환고리를 지나가는 flux-quanta $\Phi_0 = \frac{hc}{2e} \approx 2.07 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ 의 주기로 변화하게 되

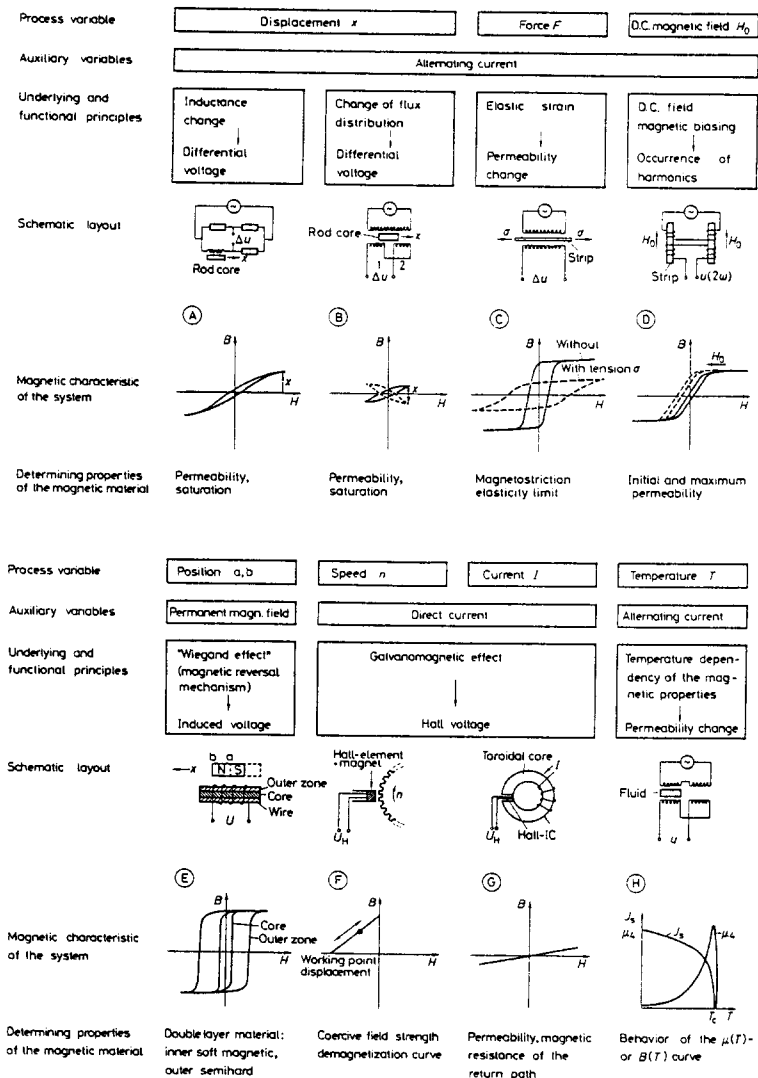


Fig. 2. Various magnetic sensor principles.

는데 이 전류의 변화로부터 자기장을 측정하는 장치를 dc-SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)라하며, 현재까지 알려진 자기장 측정방법중에서 분해능이 가장 높은 것으로 보고되고 있으며[16], 초전도현상이 저온에서 일어나기 때문에 종래에는 액체헬륨 온도에서만 가능하였으나 최근 고온초전도체를 이용한 SQUID가 개발되어 액체질소온도에서도 가능하게 되어 그 응용범위가 확대될 것으로 예상된다. SQUID 마그네토미터의 응용은 고분해능의 자기모우먼트측정, 지자장의 변화측정[17], 미소전류의 측정 및 인체의 자기장측정에 활용되고 있다.

이외에도 최근 GMI(Giant Magneto-Impedence) 효과를 이용한 자기장 측정센서 등이 연구되고 있다.

Fig. 2은 보편화되어 많이 사용되는 자기센서의 원리를 그림으로 나타낸 것으로 자기센서를 쉽게 이해하기 위하여 인용하였다[18].

III. 결 론

자기센서의 연구개발 동향은 크게 3가지의 방향으로 구분된다. 첫번째는 기존의 원리와 소재를 사용하거나 새로운 설계 개념을 도입하여 최적화하는 연구, 두번째는 센서의 특성을 향상시키기위한 새로운 재료의 개발이고 마지막으로 새로운 원리의 센서개발이다. 자기센서가 주로 사용되는 용도는 높은 신뢰성을 요구하는 분야가 많기 때문에 새로운 원리의 센서가 개발되어도 사용자가 센서의 신뢰성이 입증되어야 사용 가능하기 때문에 개발에서 상품화에 이르기까지 기간이 많이 필요하게 된다. 따라서 산업체에서는 기존의 원리와 소재를 이용한 자기센서의 개발·연구가 바람직하며 대학과 연구소에서는 자기센서의 새로운 재료 개발이나 새로운 원리의 자기센서 개발에 관련된 연구가 바람직할 것으로 생각된다. 산업체의 경우 공장자동화가 가속되고 자동차에서 전자분야의 비중이 증가하고 있고, 모든 상품이 소비자의 사용 편리성 위주로 개발되고 있기 때문에 센서가 산업에서 차지하는 비중이 증가하고 있다. 따라서 자기센서분야도 그 중요성이 증가되고 있기 때문에 많은 연구·개발이 이루어져야 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] KSTPT 센서 분류표.

[2] R. Frank, "Understanding smart sensor", Avtech House London, 1996.
 [3] J. Hollingun, "Advanced Sensor-Where the Money is" Sensor Review, **11**(2), 21 (1991).
 [4] E. Schrufer, "Elecrische Messtechnik" Hanser verlag p. 252, 1984.
 [5] A. Frandsen et al., "OGO Search Coil Magnetometer Experiments :", IEEE Trans. Geo. Elect. **GE-7**(2), 61 (1969).
 [6] H. Ttaenkler, "Taschenbuch der Messtechnik Oldenbourg Verlag. 1989.
 [7] F. Primdahl, "The Fluxgate Magnetometer", J. of phys E, **12**, 241 (1979).
 [8] T. Gialloren et al, "Optical-fiber Sensors Challenge the Competition", IEEE Spectrum Sept., 1986.
 [9] F. Colombaniaetal, "Giant Dynamic Magnetostrain in Rare Earth-iron Magnetostrictive Materials", IEEE Trans. Mag. **27**(6), pp. 5343 (1991).
 [10] H. Kwun "Back in Style : Magnetostrictive sensors", Technology Today, March 1995.
 [11] Magnetostrictive Linear Displacement Transducer, Lucas company.
 [12] R. Boll and K. Overshott, Sensors **5**, VCH 1989.
 [13] Amophous Magnetic Wire and Sensors, Interomag '90 Satellite Symposium 1990.
 [14] K. Mohri, "Review on Recent Advances in the Field of Amorphous-Metal Sensors and Transducers", IEEE MAG-20, 942, (1984).
 [15] F. Hartmann, "Resonance Magnetometers", IEEE MAG-8, 66, (1972).
 [16] R. E. Sarwinski, "Superconducting Instrument", Cryogenics, December, pp. 671. 1977.
 [17] J. L. Buxton et al, "A Superconducting System for High Sensitivity Measurements of PC 1 Geomagnetic Pulsations", IEEE, GE-12, 109, (1974).
 [18] R. Boll, "Magnetic Sensors of New Materials", Siensens Forsch. -u. Entwickl. Bd 10, 1981.