

선박용 센서 기술(2)

부산수산대학교 기관공학과
교수 이일영

4. 위치 및 각도의 측정

4.1 차동 변압기(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)

차동변압기의 기본 구조와 작동 원리를 그림 4.1에 나타낸다. 이것은 1차 코일, 2차 코일, 코어로 구성되어 있다. 중앙의 1차 코일에 교류 전류를 흘려주면, 코어를 거쳐서 2차 코일에 기전력이 유기(誘起)된다. 2차 코일은 차동적(差動的)으로 접속되어 있으며, 코어가 중앙에 위치할 경우, 좌우의 2차 코일에 유기되는 전압은 같기 때문에 출력은 영(zero)이 된다.

코어의 위치가 어느 한쪽으로 움직이면 좌우의 2차 코일 유기 전압에 차이가 생기고, 출력 측에는 코어 위치에 비례하는 진폭을 갖는 교류 신호가 얻어진다.

코어가 좌측 또는 우측에 있을 때는, 각각 1차 코일에 가해지는 전압의 위상을 기준으로 했을 때 서로 역위상으로 되므로 출력 전압의 위상을 판별함으로써 이동 방향의 판별이 가능하다.

차동 변압기 출력 단자에 교류 전압기(AC volt meter)를 연결하면 바로 코어의 변위에 비례하는 출력 값을 읽을 수가 있다. 그러나 일반적으로 피드백 제어에 필요한 직류 신호를 얻기 위해서는 또 다른 장치인 신호 조절기(signal conditioner)를 2차 코일 출력 측에 연결해서 교류 신호를 위상 검파·복조(phase-sensitive demodulation), 여과(filtering) 과정을 거쳐서 직류 신호로 만

들어 주어야 한다. 신호 조절기의 역할을 그림 4.2에 나타내었다.

일반적으로 차동 변압기로는 수 μm 에서 수십cm의 범위에서 안정된 측정이 가능하다.

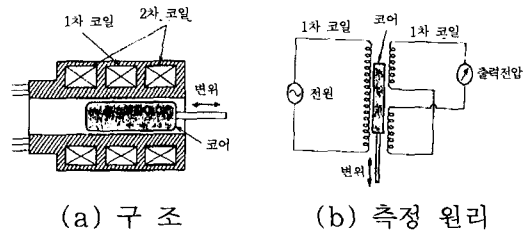


그림 4.1 차동 변압기(LVDT)의 구조와 측정 원리

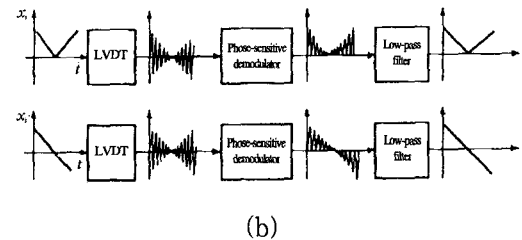
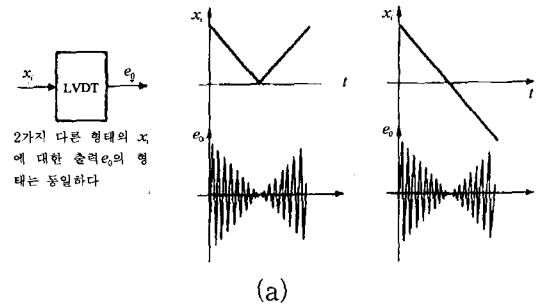


그림 4.2 LVDT용 신호 조절기의 역할

4.2 포텐쇼미터

직선적인 변위 또는 회전 각도를 전기 저항의 변화로서 검출하는 것으로, 섭동자(slidebar)와 저항체로 구성된다.

그림 4.3의 (a)는 직선형 (b)는 회전형을 나타낸다. 저항체 양 단자에 직류 전압 E 를 가하면 직선형 및 회전형 포텐쇼미터에서 얻어지는 출력 전압은 각각

$$e(t) = \frac{x(t)}{x_{\max}} \cdot E$$

$$e(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_{\max}} \cdot E$$

로 주어진다. (이 때, 출력 측에는 매우 큰 내부 임피던스를 갖는 전압계를 연결한 것으로 가정하였다.)

그림 4.4에는 360° 이상의 회전각 검출이 가능한 회전형 포텐쇼미터의 원리와, 회전형 포텐쇼미터의 구조를 나타내었다.

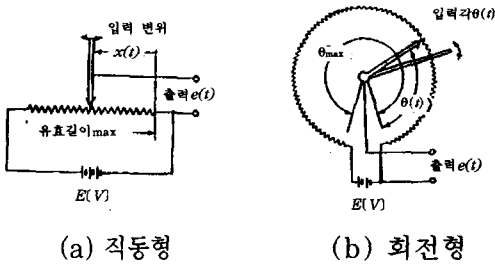


그림 4.3 포텐쇼미터의 원리

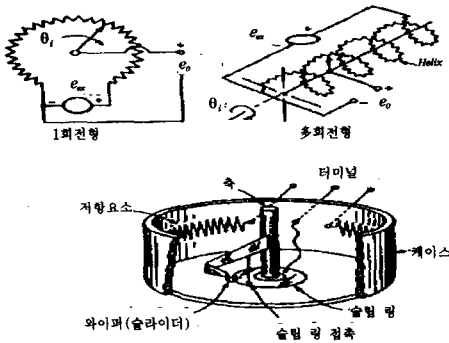


그림 4.4 회전형 포텐쇼미터의 구조

또한, 그림 4.5에는 포텐쇼미터의 저항체 구조의 예를 나타내었다.

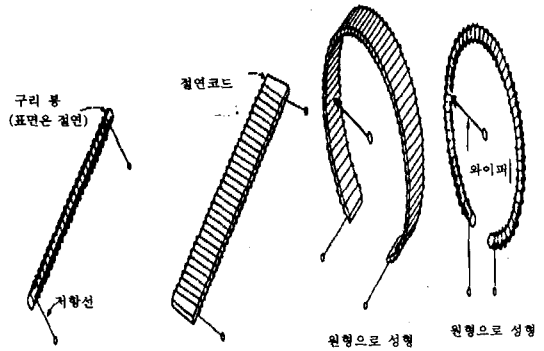


그림 4.5 포텐쇼미터 저항체의 구조

포텐쇼미터의 해상도(分解能, resolution)은 저항체의 구조에 따라서 달라질 수 있다. (그림 4.6)

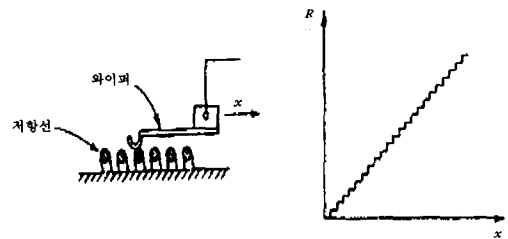
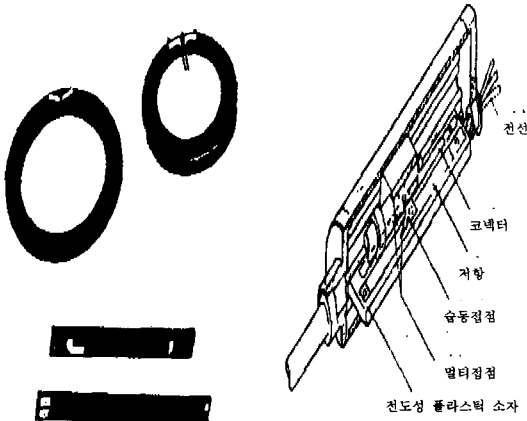


그림 4.6 권선(wire)식 포텐쇼미터의 해상도

근래에는 전도성 수지(conductive plastic) 저항 소자가 개발되었다. 이것은 정제된 탄소계 충전제를 플라스틱제 표면에 압축 성형하여 후막(厚膜) 저항으로 성형한 것으로, 표면이 매우 매끄러운 연속상의 저항체이므로 해상도(resolution)가 거의 무한대이고 섭동자와 저항체 사이의 기계적 마찰이 적어 수명이 매우 긴 것이 특징이다. 그림 4.7에 전도성 수지 저항 소자를 갖는 포텐쇼미터의 구조를 나타내었다. 포텐쇼미터는 특별한



(a)전도성 수지

(b)포텐쇼미터의 구조

그림 4.7 전도성 수지 저항 소자를 갖는 포텐쇼미터의 구조

신호 조절기(signal conditioner)를 필요로 하지 않으면서도 출력으로 수 volt의 직류 전압 신호를 얻을 수 있기 때문에 매우 손쉽게, 저렴한 가격으로 사용할 수 있는 것이 장점이다. 결점은 접촉식 센서이기 때문에 수명에 한도가 있어, 접촉 노이즈 등으로 신뢰성이 떨어진다는 점이다. 그러나 이러한 단점들은 전도형 수지의 개발로 현저히 개선된 것이 사실이다.

4.3 광학식 디지털 엔코더

광학식 디지털 엔코더에는 증분형(incremental type), 절대형(absolute type)이 있다. 직선형 절대 엔코더의 한 예를 그림 4.8에 나타내었다. 이것은 4비트 방식으로, 광원과 포토 다이오드는 고정하고 스케일을 이동시키게 되며, 역의 구성도 가능하다. 스케일에는 2진수 4비트 신호가 발생하도록 마스크가 만들어져 있어 포토 다이오드에서 4비트의 디지털 신호가 얻어진다. 스케일을 회전형으로 하면 마찬가지로 원리의 회전 엔코더가 된다.

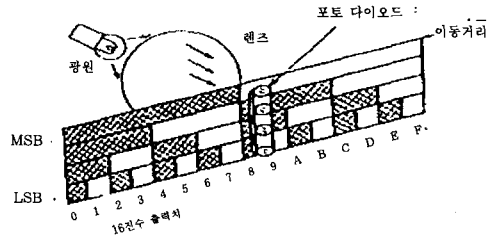


그림 4.8 직선형 절대 엔코더

절대 엔코더에서는 비트 수가 많아지면 스케일 제작이 어려워지고, 포토 다이오드와 스케일과의 배치 상의 정밀도가 매우 높아야 하므로 가격이 비싸지는 것이 결점이다.

일반적으로 널리 사용되는 것은 증분식 엔코더이며, 그림 4.9에 그 원리를 나타내었다. 이동 스케일과 포토 다이오드는 2비트로서 족하다. 이동 스케일의 2개 트랙에는 필요한 해상도에 맞추어 제작된 광 통과 마스크가 1/2 주기만큼 위상차를 두고 만들어져 있다. 포토 다이오드 출력을 파형 정형(整形) 회로에 가하면 위상이 다른 2개의 방형파가 얻어지며, 이 상하의 방형파의 위상 관계는 스케일 이동 방향에 따라 반전된다. 펄스 작성 회로는 이것을 이용하여, 아래 방형파의 미분과 위 방형파를 곱한 것이 정(正)전압의 펄스 열 또는 부(負)전압의 펄스 열을 만들어 낸다. 이 펄스 열의 펄스 수와 펄스의 극성에 의하여 이동 거리와 이동 방향을 계측하게 된다.

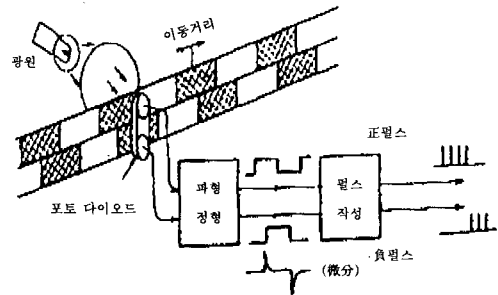


그림 4.9 증분식 엔코더

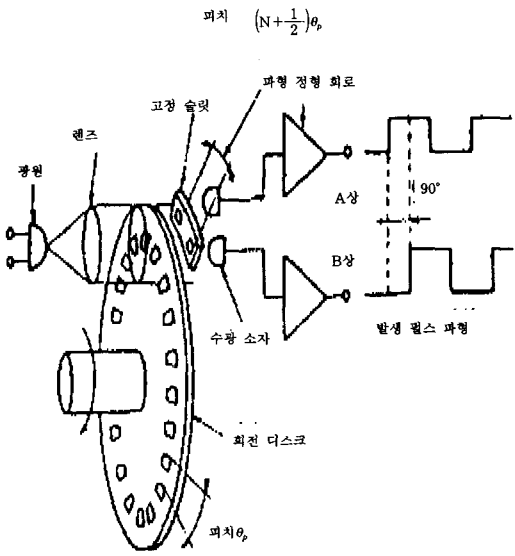


그림 4.10 로타리 엔코더 구성 예

마스크와 포토 다이오드는 원형으로 배치하면 회전형(로타리) 엔코더가 된다. 그림 4.10에 로타리 엔코더의 구성 예를 나타낸다. 이 경우에는 회전 원판에 1열의 슬릿만이 가공되어 있으며, 그 대신에 수광 소자와 고정 슬릿을 1/2 피치만큼 뒤쳐지게 하여 그림 4.9의 2열 스케일의 효과를 얻고 있다.

5. 속도 및 각속도 센서

5.1 발전식 속도계

일종의 발전기이며, 속도 또는 회전 속도에 비례한 전압이 직접 얻어지고, 견고하며, 신뢰성이 높기 때문에 전기·자기적 측정법 중에서 가장 널리 사용되고 있다.

직선 가동 코일형 속도계의 구조를 그림 5.1에 나타내었다. 여기서는 다음의 전압 유도 법칙에 따라서 코일 이동 속도에 비례하는 전압이 얻어진다.

$$e_b = Blv \times 10^{-8} = B \cdot 2\pi r N \cdot v \times 10^{-8}$$

$$= K_v \cdot v$$

여기서 B : 자속 밀도(Gauss), l : 코일 길이($2\pi r N$), v : 코일 이동 속도(cm/s), r : 코어의 반경, N : 코일 감은 수이다.

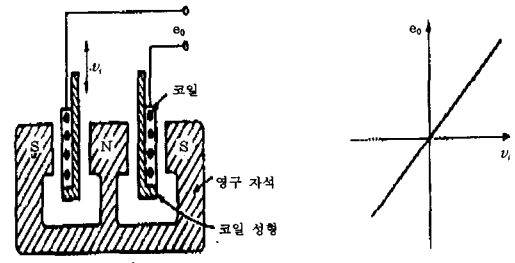


그림 5.1 직선 가동 코일 속도계의 원리

위 식에서 B, l 이 상수이므로 코일 이동 속도에 비례한 전압이 얻어지며, 이동 방향 변화에 따라 전압의 극성이 바뀐다. 속도 검출 감도는 l 에 비례하므로 가는 코일을 사용하여 감은 수 N 을 크게 해야 하지만, N 증가에 따라 필연적으로 코일의 인덕턴스 L 과 저항 R 도 증가한다. 따라서 실제로 측정되는 전압은 e_b 가 아니라 다음 식으로 표시되는 e 이므로, 전압 측정 축의 임피던스를 높게 하여 전류 i 를 줄여 주어야 한다.

$$e = e_b - L \frac{di}{dt} - Ri$$

회전형 속도계에는 직류 발전식과 교류 발전식이 있으며, 그림 5.2에 그 원리를 나타내었다.

직류식은 회전자에 브러쉬가 있기 때문에 고속으로 장기간 사용할 때는 마모에 따른 정기적 보수가 필요하다.

교류식에서는 정류 회로를 사용하여 직류 전압을 얻게 되며, 회전 속도가 낮은 경우에는 출력 전압에 맥동이 존재하기 때문에 평활 회로를 사용한다.

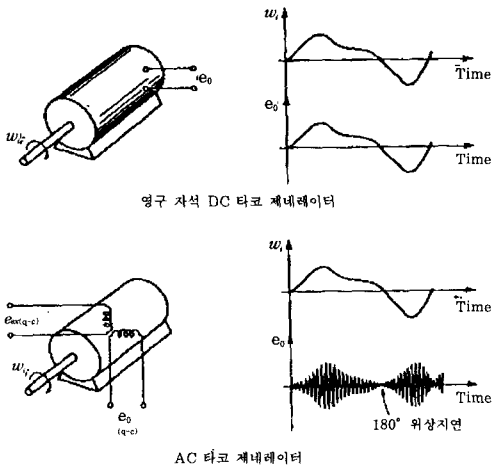


그림 5.2 회전형 속도계에서의 직류 발전식과 교류 발전식

5.2 전자 계수식 회전 속도 센서

1회전당 일정수의 펄스 신호가 발생하도록 측정계를 구성하면, 그 펄스 열의 기본 주파수는 회전 속도에 비례하며, 이것을 電磁性으로 행하는 것이 전자 계수식 회전 속도 센서이다.

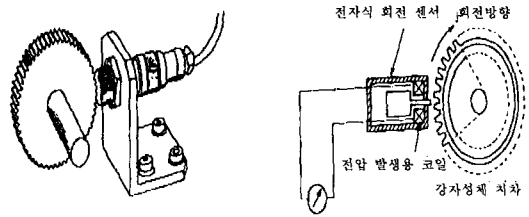
이 센서는 영구 자석과 검출 코일 등으로 구성된다. 개개의 펄스 신호가 명료하게 판별이 가능하게 제작하고, 1회전당 펄스 수가 많도록 제작하는 것이 설계의 주안점이다.

장치의 구성 예를 그림 5.3에 나타낸다. 1회전당 펄스 수가 많아질수록 자기 회로의 폐루프화, 다극 결합에 의한 출력 진폭의 균일화 등의 대책이 필요하다.

회전 검출기로부터의 신호는 파형 整形 회로에서 증폭 정형되어 펄스 신호로 변환된다. 정형된 펄스 신호는 디지털적으로 측정할 목적으로 일정 시간 동안 적산 계수되며, 이 적산 시간을 타임 베이스(time base)라 한다. 타임 베이스 종료 시각에 동기하여 그 사이에 발생한 펄스 수를 메모리에 기억하고, 디지털 시시기에서 표시한다.

또한 펄스 신호를 주파수 - 전압 변환기

(F/V converter)를 거쳐서 직류 전압 신호로 바꾸어 줌으로써 회전 속도를 직류 전압 신호의 형태로 얻기도 한다.



(a) 치차의 회전속도 검출 (b) 센서의 구조

그림 5.3 전자식 회전 속도계의 구조

6. 힘, 토크, 압력의 측정

6.1 변형율(스트레인) 측정 소자

(1) 전기 저항선 스트레인 게이지
금속 도선의 저항, $R(\Omega)$ 는

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

로 표시하며, 여기서 ρ :도선의 고유 저항($\Omega \cdot \text{cm}$), L :도선의 길이(cm), A :도선의 단면적(cm^2)이다.

따라서 금속 도선이 인장 또는 압축에 의하여 변화되었을 때에는 다음 식이 성립한다.

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon} = K_s$$

이 식에서 K_s 를 스트레인 게이지의 게이지 윌(gauge factor)라 하며, K_s 는 탄성 한계 내에서는 거의 일정한 값을 갖는다. 예를 들면 Nichrom 선(Ni: 80%, Cr: 20%)인 경우 $K_s = 2.0$ 정도이다.

위 식을 다시 쓰면,

$$K_s = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

스트레인 게이지의 K_s 와 R 값은 게이지

제작사에 의하여 주어지므로 사용자는 ΔR 을 측정함으로써 ϵ 값을 구할 수 있으며 이것이 스트레인 게이지에 의한 변형률(strain)측정의 원리이다.

스트레인 게이지의 구조를 그림 6.1에 나타내었다.

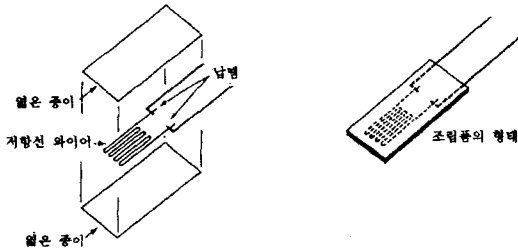
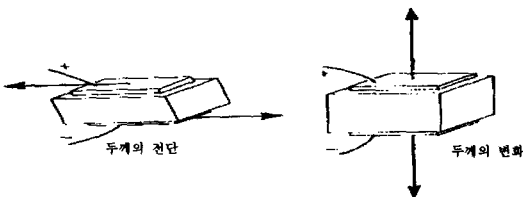


그림 6.1 스트레인 게이지의 구조

(2) 압전 소자

어떤 물질은 압전 효과(piezoelectric effect: piezo라는 접두어는 '누른다(press)'는 의미의 그리스어 piezein에서 유래됨), 즉 기계적인 변형을 받았을 때 전압이 발생하는 성질을 갖는다(그림 6.2(a)).

이런 물질의 예로는 수정, 티탄산 바륨(barium titanate)등이 있다. 이 중에서 강유전성(強誘電性) 세라믹 재료인 티탄산 바륨이 널리 사용되며, 힘, 압력의 측정, 초음파 발신기 등에 사용된다. 그림 6.2(b)는 압전 요소에 적합한 회로도이며, 압전 소자와 분로 용량(C)을 포함하고 있다.



(a) 압전 소자의 원리

압전 소자는 높은 고유 진동수와 높은 감도를 갖는 것이 특징이며, 대표적인 공진 주파수는 150KHz 정도이다.

(3) 반도체 스트레인 게이지

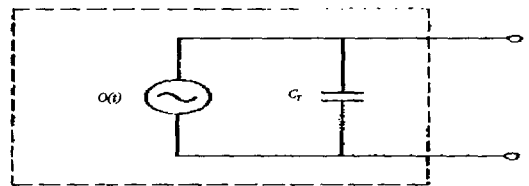
이것을 반도체 확산형 게이지라고도 하며, 실리콘 단결정판(單結晶板)을 응력이 작용하는 다이어프램으로 사용하고, 그 표면의 일부에 극히 소량의 불순물을 확산시켜 두면, 여기에 응력이 작용할 때 결정 격자의 변형, 불순물 에너지 준위(準位)의 치우침 등에 의하여 결정 내의 전자나 정공(hole)의 밀도가 변화하여 전기 저항이 크게 변한다. 이 저항 변화는 응력에 비례한다. 실리콘을 사용하는 반도체 스트레인 게이지의 게이지율(gauge factor)은 180정도로서 저항선 스트레인 게이지의 경우(2~3 정도)에 비하여 현저한 차가 있다.

따라서 반도체 스트레인 게이지의 감도가 매우 크며, 초소형 압력 센서, 초소형 가속도 센서의 제작에 사용된다.

6.2 힘, 토크의 센서

스트레인 게이지를 사용하여 재료 시험용 시험편에 가해지는 힘을 측정하는 경우의 결선도를 간략하게 표시한 것이 그림 6.3이다.

스트레인 게이지는 휘스톤 브리지(Wheat-Stone bridge)형태로 결선하여 사용하며, 그림에서 1번 게이지는 액티브(active)게이지이고 2번 게이지는 온도 보상을 위한 더미



(b) 압전 소자 사용시의 등가 회로

그림 6.2 압전 소자

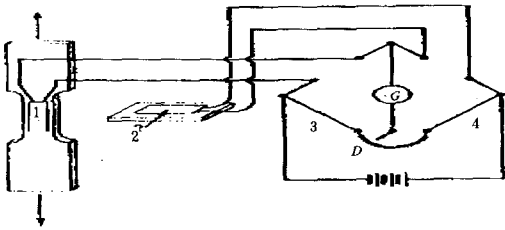


그림 6.3 스트레인 게이지의 결선

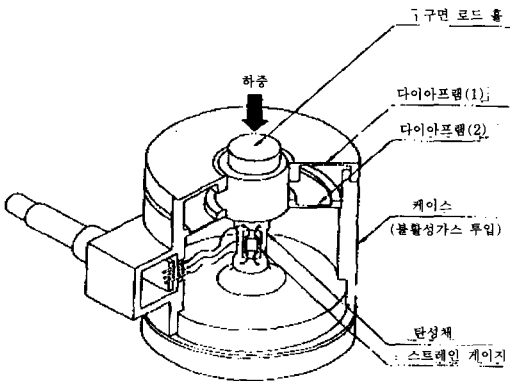


그림 6.4 로드 셀의 구조

(dummy) 게이지이다. 3,4번에도 1번에 사용한 게이지 저항과 동일한 고정 저항을 연결한다. 가변 저항기 D는 측정 초기에 브리지 출력 전압을 평형시키는 데 사용한다.

그림 6.4에는 스트레인 게이지식 힘 계측

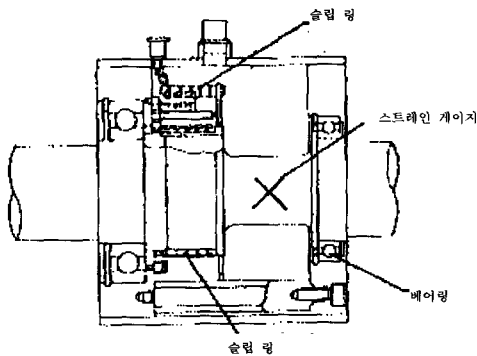


그림 6.5 스트레인 게이지식 토크 센서의 구조

장치인 로드 셀(load cell)의 내부 구조를 나타내었다. 회전 기계의 축에 작용하는 토크를 측정하는 수법에는 여러 가지 종류가 있으며, 그림 6.5에는 스트레인 게이지식 토크 센서의 구조를 나타내었다. 이 방식에서는 회전축에 부착된 스트레인 게이지와 신호 조절기 사이의 신호 전송에 슬립 링(slip ring)을 사용한다.

6.3 압력 센서

그림 6.6에는 다이하프램에 스트레인 게이지를 붙인 압력 변환기를 나타낸다.

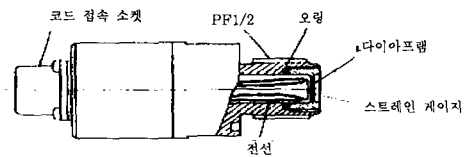


그림 6.6 스트레인 게이지식 압력 변환기의 구조

그림 6.7은 반도체 스트레인 게이지식 소형 압력 변환기의 예이며, 다이하프램 직경이 5mmφ인 것이다. 특성은 그림(b)에 나타낸 바와 같이 직선성이 매우 우수하며, 감도가 높고(예: 10mV/1bar 이상), 고유 진동수가 높은 점(예: 50KHz 이상)이 특징이다. 그러나 온도 변화에 대한 저항 변화의 민감도는 저항선 스트레인 게이지보다 더 심한 편이므로 사용할 때에 주의를 요한다.

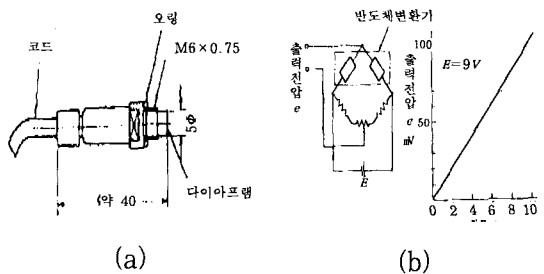


그림 6.7 반도체 스트레인 게이지식 압력 변환기의 구조와 성능