

정전용량방식 토크센서의 출력특성과 감도해석

이 신 표* · 김 종 보*

(2002년 3월 22일 접수, 2002년 10월 7일 심사완료)

Output Characteristics and Sensitivity Analysis of Capacitive Type Torque Sensor

Shinpyo Lee and Jongbo Kim

Key Words: Capacitive Type Sensor(정전용량방식 센서), Torque Sensor(토크센서), Strain Gauge(스트레인게이지), Sensitivity(감도), Output Characteristic(출력특성)

Abstract

A new torque measuring apparatus adopting the basic principle of a capacitive type sensor is proposed in this article. Two plate electrodes are working as a capacitive sensor, whose capacitance varies as torque is applied. One end of each plate is connected to the torque carrying shaft. Output characteristics of the torque sensor were theoretically analyzed and its validity was investigated through experiment. Calculations and calibration experiments show that the output is nonlinear, that is, the sensitivity is very high at low torque but decreases as torque increases. The sensitivity of the proposed system is about 100 times roughly higher than that of a conventional 4-strain gauge type torque sensor.

1. 서 론

현재 가장 널리 사용되는 토크측정 방법은 스트레인게이지를 토크센서로 이용하는 것이다. 스트레인게이지는 다수의 가는 금속선으로 이루어진 저항선센서(resistance wire sensor)로서 축에 토크가 가해지면 축상의 두 지점사이에는 비틀림과 함께 상대적인 거리의 변화가 생긴다. 이것이 스트레인이며 축의 표면에 부착된 센서의 저항도 변하게 되므로 이 저항 변화를 휘스톤 브릿지(wheatstone bridge)와 증폭기를 이용하여 토크에 따른 전압 변화로서 신호를 검출한다.

스트레인게이지를 이용한 최근의 연구로서 병

렬판 구조를 이용하고 다수의 스트레인게이지를 부착하여 감도를 향상시키는 방법,⁽¹⁾ 토크진달축을 변형하여 굽힘하중을 이용하는 방법^(2,3)에 대한 연구가 수행되었다. 스트레인게이지 토크센서는 출력신호의 잡음이 적고 안정적이며 토크에 따라 출력이 선형적인 특성을 가지므로 사용하기 매우 편리한 장점이 있으나 감도 즉, 토크에 따른 출력의 변화가 매우 낮아 높은 이득을 갖는 고성능 증폭기를 반드시 사용해야 하는 단점이 있다.⁽⁴⁾ 한편 광학적 방법으로 축의 양단에 펄스를 검출할 수 있는 판을 부착하고 비틀림 전후의 펄스신호의 위상차를 검출하여 토크를 측정하는 방법도 연구되었다.⁽⁵⁾

본 연구는 모형항공기용으로 사용되는 저토크(low torque)의 소형엔진에 대한 성능을 시험하면서 수행한 결과로서 낮은 토크에서도 기존의 방법보다 더 높은 감도를 갖는 새로운 방식의 토크센서를 개발한 것이다.

† 책임저자, 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kuic.kyonggi.ac.kr

TEL : (031)249-9814 FAX : (031)249-9796

* 경기대학교 대학원 기계공학과

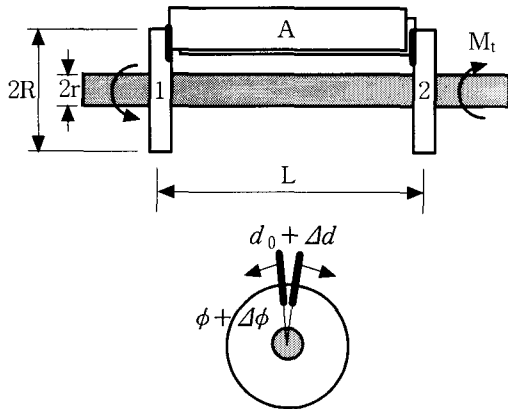


Fig. 1 Schematic of capacitive type torque sensor

회전기계의 성능곡선을 얻기 위해서는 축의 회전수와 함께 토크를 측정해야 한다. 회전수를 측정하는 방법은 광학적 또는 자기적 방법 등으로 다양하게 개발되어 있으나 토크를 측정하는 방법은 대부분 스트레인게이지 토크센서의 원리를 이용하는 것이다.

본 연구에서는 정전용량방식의 새로운 토크센서를 제안하고 브릿지와 증폭기로 구성된 전체 토크센서 시스템을 제시한다. 이론적 해석을 통하여 출력특성 관계식을 유도하고 교정실험을 통하여 제시된 관계식의 타당성을 확인하며 감도해석을 수행하여 스트레인게이지 토크센서보다 감도가 우수함을 보인다.

2. 정전용량방식 토크센서의 설계

2.1 정전용량형 토크센서

본 연구에서 제안한 정전용량방식 토크센서의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 토크 M_t 가 축에 전달되면 그림에서 축을 따라 거리 L 만큼 떨어진 두 지점 1과 2사이에는 다음과 같은 상대적인 각도의 변화가 생긴다.⁽⁶⁾

$$\Delta\phi = \frac{M_t L}{G I_2} \quad (1)$$

여기서 G 는 축 재료의 전단탄성계수(shear elastic modulus)이며 I_2 는 축 반지름 r 의 4승에 비례하는 극관성모멘트(polar moment of inertia)이다.

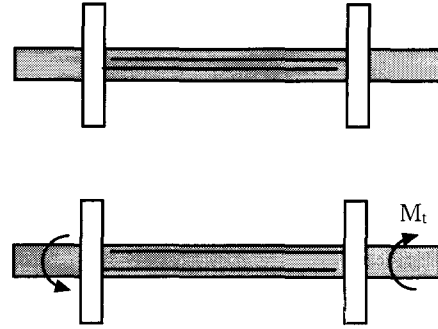


Fig. 2 Distance variation between two electrodes before and after torque

거리 L 만큼 떨어진 위치에 축과 직교하도록 반지름 R 인 원형판을 각각 부착하고 이 원형판의 외측에 면적 A 의 전극판(electrode)을 설치한다. 이와 같은 기하학적 구조에서 토크에 의하여 비틀림이 식 (1)과 같이 생기면 전극판 사이에는 다음의 식 (2)와 같은 거리의 변화가 생긴다.

$$\Delta d \approx R \cdot \Delta\phi \quad (2)$$

이것을 개략적으로 나타낸 것이 Fig. 2이다. 실제 센서의 제작에서 가장 주의해야 할 점은 전극판을 원형판의 표면에 수직으로 부착해야 하는 것이다. 예를 들어, 만약 원형판에 홈(slot)을 만들고 여기에 전극판을 끼우는 형식이 되면 축과 연결된 원형판의 변형에 따라 전극판도 변형된다. 따라서 전극판은 Fig. 2와 달리 원형판과의 수직을 이루지 못하고 축에 대하여 미세하게 비틀어지는 결과가 나타나게 된다. 이 경우에는 비틀림각에 의한 거리변화가 식 (2)와 다르게 되고 판 사이의 간격도 불균일해진다.

비틀림에 의한 성분을 포함하여 전극판은 다음과 같은 정전용량을 갖게 된다.

$$C = C_0 + \Delta C \approx \epsilon_0 \frac{A}{(d_0 + \Delta d)} \quad (3)$$

여기서 ϵ_0 는 상수($= 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$)이고 d_0 는 토크가 가해지지 않은 상태에서 최초의 전극판 간격이며 Δd 는 비틀림에 의하여 발생한 전극판 사이의 거리 변화를 표시한다.

Fig. 1에서 두 전극판은 평행이 아니므로 반경

방향에 따라서 간격이 다르고 마주보는 면적도 각도에 영향을 받게 된다. 그러나 전극판 중심까지의 거리가 전극의 폭에 비하여 크고 변형전의 각도 ϕ 및 변형각 $\Delta\phi$ 가 작은 경우에는 근사적으로 평행전극판으로 가정하고 식 (3)을 사용할 수 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서 실험할 토크의 범위도 식 (3)이 만족될 수 있는 미소변형의 저토크 영역이며 뒤에 설명할 3장의 교정실험에서 측정데이터와 식 (3)을 사용하여 유도한 이론적 출력식과의 비교를 통하여 식 (3)의 타당성을 보일 것이다. Fig. 1에는 전극판 사이의 각도가 매우 크게 나타나 있으나 이것은 원리의 설명을 위한 것이며 실제로는 두 판이 전기적으로 단락(short)되지 않을 최소한의 간격으로 설정된다.

식 (1), (2), (3)을 보면 축의 비틀림에 따라 전극판 간격은 토크에 비례하여 증가하지만 센서의 정전용량은 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 식 (3)에서 간격의 향이 분모에 위치하므로 초기 간격 d_0 가 작은 경우 미소한 간격 변화에 의한 정전용량의 변화정도는 다음의 식 (4)와 같이 매우 커지게 됨을 알 수 있다. 따라서 일반적으로는 정전용량방식 센서는 이와 같이 초기에 d_0 를 작게 설정하여 힘, 또는 거리 등 물리량의 미소 변화에도 큰 감도를 갖도록 설계한다. 본 연구에서 제안하는 토크센서도 정전용량방식을 사용하므로 저토크에서 우수한 감도를 갖게 될 것으로 예상된다.⁽⁸⁾

$$\Delta C \propto \frac{1}{d_0^2} \cdot \Delta d \quad (4)$$

실제로 본 연구에서 사용한 센서에서 전극판의 가로와 세로는 각각 80mm, 15mm로서 면적 A 는 약 0.0012m^2 이며 토크가 가해지지 않은 경우 HP E4925A LCR미터로 측정한 센서의 정전용량은 연결선을 포함하여 약 29pF이었다. 이 경우 식 (3)을 이용하여 대략적으로 계산한 전극판 사이의 초기 간격은 0.36mm이다.

2.2 센서가 포함된 브릿지와 증폭기

Fig. 3은 콘덴서가 포함된 브릿지 회로와 증폭기를 표시하고 있다. 여기서 R_1 , R_2 는 저항이며 C_1 , C_2 는 콘덴서이다. C_1 이 2.1절에서 설명한 토검출용 정전용량형 센서로서 토크에 의해 그

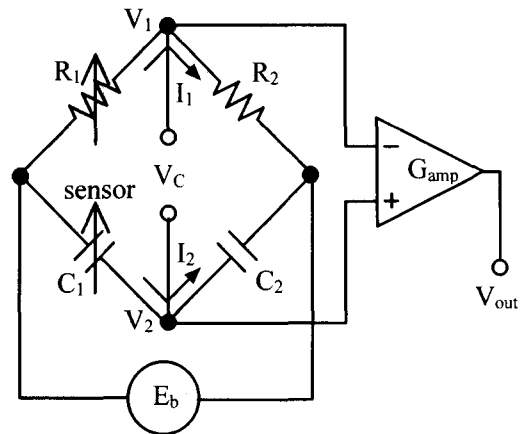


Fig. 3 Capacitive type torque sensor circuit

값이 변하므로 가변형으로 표시하였다. R_1 은 가변저항(50k Ω potentiometer)으로서 브릿지의 균형을 조정하여 전체 토크센서의 동작점을 정한다.

즉, 토크가 가해지지 않아 센서 C_1 이 일정한 정전용량을 갖는 경우 R_1 을 설정하여 출력이 0이 되도록 하거나 또는 의도적으로 출력이 0이 되지 않도록 조정한다. 증폭기는 1개의 연산증폭기(operational amplifier)와 4개의 저항을 이용하여 증폭도 약 10으로 차동형(differential type)으로 구성하였으며⁽⁹⁾ 출력은 디지털 오실로스코프로 검출하였다. 브릿지에 인가되는 교류신호 E_b 는 정현파 교류이며 진폭은 10V, 주파수는 약 16kHz이다.

2.3 토크센서의 정특성관계식과 실험적 검증

Fig. 3의 회로에 오옴의 법칙을 적용하면 직렬 연결된 저항 R_1 과 R_2 를 흐르는 전류 I_1 과 콘덴서 C_1 , C_2 를 흐르는 전류 I_2 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_1 = \frac{E_b}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{E_b}{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}} \quad (6)$$

여기서 ω 는 브릿지 상단에 인가되는 정현파 교류의 각속도이며 $1/\omega C$ 는 콘덴서 양단의 임피던스(impedance) 성분이다. R_1 을 흐르는 전류 I_1 에 의하여 전압강하가 발생하고 Fig. 3에 표시한 V_1

Table 1 Values used for output calculation

| components | values | remarks |
|------------|----------------------------------|-----------|
| R_1 | variable 2k -10k ohm | resistor |
| R_2 | 330ohm, fixed | resistor |
| C_1 | 26pF, fixed | sensor |
| C_2 | 410pF, fixed | condenser |
| E_b | amplitude 10V frequency 16kHz | sine wave |
| G_{amp} | 10 | gain |

은 다음과 같이 표시할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$V_1 = E_b - \frac{E_b}{R_1 + R_2} R_1 \quad (7)$$

마찬가지로 C_1 을 흐르는 전류 I_2 에 의하여 V_2 는 다음의 식 (8)과 같이 표시된다.

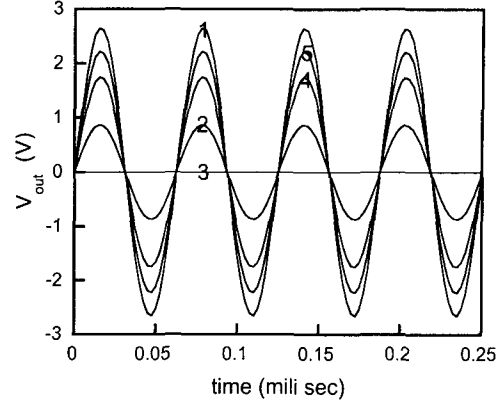
$$V_2 = E_b - \frac{E_b}{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}} \frac{1}{\omega C_1} \quad (8)$$

식 (7), (8)을 이용하면 브릿지 출력전압 $V_C = V_2 - V_1$ 은 식 (9)로 표시되고 여기에 증폭기의 이득 G_{amp} 를 곱하면 최종적인 토크센서의 출력 V_{out} 을 식 (10)으로 얻게 된다.

$$V_C = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_2 + C_1} \right) E_b \quad (9)$$

$$V_{out} = G_{amp} V_C \quad (10)$$

유도한 출력관계식 (9), (10)의 특성을 파악하기 위하여 Table 1에 나타낸 계산조건에서 출력을 예측해 보았다. Fig. 4는 센서 C_1 을 포함하여 C_2 , R_2 를 일정하게 두고 가변저항 R_1 을 변화시켰을 때 출력의 진폭 변화를 계산한 것이다. 실제 토크센서에서 C_1 , C_2 , R_2 를 일정하게 두고 R_1 을 변화시키면 오실로스코프화면을 통하여 Fig. 4와 동일한 진폭변화를 실험적으로 관찰할 수 있다. 여기서 C_1 을 일정하게 고정시킨 것은 실제로는 축에 토크가 가해지지 않은 것을 의미하며 이 조

Fig. 4 Typical output variation with R_1

건에서 R_1 을 변화시킨 것은 기기의 동작조건을 설정하는 것을 의미한다.

Fig. 4에 R_1 에 따른 출력의 변화를 숫자 1-5로 나타낸 5가지 경우에 대하여 표시하였다. 계산한 저항값은 각각 1=3.5k Ω , 2=4.5k Ω , 3=5.2k Ω , 4=7.5k Ω , 5=8.5k Ω 이다. 5.2k Ω 인 경우 3을 중심으로 R_1 이 낮은 영역에서는 R_1 의 증가에 따라 출력이 감소하여 5.2k Ω 에서 0이 되었다가 5.2k Ω 보다 높은 영역에서는 다시 출력이 증가하였다.

Fig. 5는 R_1 에 대하여 더 자세한 계산을 수행하고 출력의 진폭변화를 표시한 것이다. 실선은 브릿지 출력 계산식 (9)에서 센서 정전용량 C_1 으로 26pF을 사용한 것이며 점선은 29pF을 사용하여 계산한 것이다. 또한 실제 장치의 특성이 이론적으로 유도한 출력관계식과 일치하는 가를 검토하기 위하여 계산과 동일한 실험조건으로 브릿지와 증폭기를 구성하여 R_1 의 변화에 따라 실제로 측정된 결과도 점으로 표시하였다. 26pF으로 계산한 결과가 실험결과와 매우 정확히 일치함을 알 수 있으며 29pF의 경우에는 출력의 경향은 비슷하지만 브릿지 균형을 이루는 R_1 값과 출력진폭이 실험결과와 차이를 보였다. 계산에서 사용한 수치 29pF은 2.1절에서 설명한 바와 같이 센서를 브릿지에 연결하지 않은 상태에서 LCR미터를 이용하여 실측한 값이며 26pF은 다음의 브릿지 균형 관계식 (11)을 이용하여 출력을 관찰하면서 출력이 0이 되었을 때의 R_1 을 이용하여 환산한 값으로 두 값은 약 11%의 차이를 보인다.

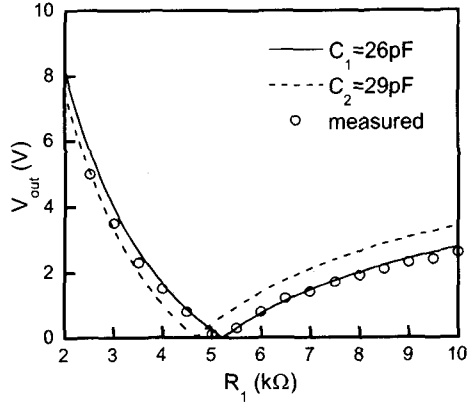


Fig. 5 Effect of R_1 on the output

$$\frac{R_1}{\omega C_2} = \frac{R_2}{\omega C_1} \quad (11)$$

R_1 이 5.2kΩ 인 경우를 기준으로 이 보다 낮은 저항값에서는 R_1 의 변화에 대한 출력의 변화가 크지만 그 이상의 저항에서는 변화가 완만한 특성을 보여준다. Fig. 5의 결과는 토크를 가하지 않은 경우 단순히 R_1 만을 변화시킨 경우의 출력 예를 보여주는 것으로 R_1 의 설정값에 따라 토크 변화에 대한 출력의 변화 즉, 감도가 다를 것으로 예상된다.

3. 토크센서의 교정실험과 불확도 해석

토크센서의 출력이 0이 되는 $R_1=5.2k\Omega$ 을 중심으로 이 값보다 높거나 낮은 몇 가지 R_1 에 대하여 R_1 을 고정하고 실제로 축에 토크를 가하면서 교정실험을 실시하였다. 토크는 축의 한쪽을 고정하고 다른 한쪽에 축과 수직으로 길이 30cm의 봉(bar)을 설치한 후, 봉의 끝에 질량이 알려진 추를 달아 가하였다. Fig. 6에 측정된 출력과 함께 이론식을 이용하여 예측한 출력을 표시하였다.

시험된 모든 R_1 에 대하여 이론값과 측정치가 약간의 차이를 보이고 있으나 경향은 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 값의 차이는 식 (9)의 유도과정에서 센서 주변에 존재하는 구조물들의 미세한 정전용량과 연결선 등의 영향을 무시하고 단순히 이상적인 정전용량센서로 모델링한 것과

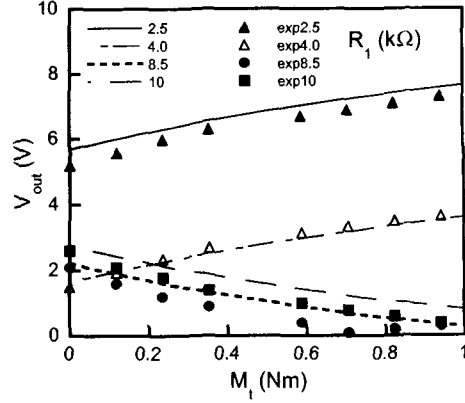


Fig. 6 Calibration curves of present torque sensor

브릿지와 증폭기사이의 임피던스 정합문제(impedance matching) 등에 의하여 발생한 것으로 추정된다. 그러나 토크센서는 절대량(absolute calibration)을 측정하는 장치가 아니고 알려진 토크에 대한 상대적 교정과정(relative calibration)을 거친 후 사용하는 것이므로 교정곡선에 대한 출력식의 형태를 정하고 실험결과를 통하여 출력식의 계수들을 잘 정하면 성공적으로 교정식을 얻을 수 있다. 이 경우에도 본 연구에서 제시한 관련식들은 의미를 갖고 사용될 수 있을 것이다.⁽¹¹⁾ 또한 유도한 이론적 출력식과 실험측정치가 비교적 잘 일치하므로 2장에서 미세하게 기울어진 센서의 정전용량을 식 (3)으로 가정하고 사용했던 것에 대한 타당성을 확인할 수 있다.

교정곡선들은 모두 초기에 감도가 높고 토크가 증가하면서 감도가 감소하는 비선형적인 특성을 가졌다. 이와 같은 비선형적인 출력특성은 선형적인 특성을 갖는 기존의 스트레인 게이지방식 토크센서와 비교하여 매우 결정적인 단점이 된다. 향후 출력의 선형화에 대한 추가적인 연구가 필요하다. Fig. 6의 측정결과를 1차식으로 곡선맞춤(curve fitting)한 결과 0.1N·m의 낮은 토크에서는 약 3.59V/N·m의 감도를 가졌고 0.8N·m에서는 약 1.54V/N·m의 감도를 가졌다.

특징적인 것은 브릿지가 균형을 이루는 $R_1=5.2k\Omega$ 보다 낮은 경우(2.5와 4.0kΩ)에서는 토크의 증가에 따라 출력이 증가하였으나 8.5와 10kΩ의 경우에는 토크에 따라 출력이 감소하는 특성을 보이고 있다. 이것은 앞의 Fig. 4, 5에서

Table 2 Uncertainty analysis for output voltage

| X_i | value | δX_i | $\left(\frac{\partial V_{out}}{\partial X_i} \frac{\delta X_i}{V_{out}}\right) \times 100(\%)$ |
|---|------------------|----------------|--|
| C_1 | 23.627pF | 0.228pF | 1.002% |
| C_2 | 406.772pF | 0.882pF | 0.181% |
| R_1 | 2.452k Ω | 3.014 Ω | 0.200% |
| R_2 | 328.767 Ω | 0.163 Ω | 0.082% |
| E_b | 10.002V | 0.008V | 0.080% |
| G_{amp} | 9.995 | 0.0263 | 0.263% |
| Total uncertainty $\delta V_{out} / V_{out} = 1.07\%$ | | | |

이론적으로 예측되었던 결과이다.

한편 2절의 마지막 논의에서 R_1 이 교정곡선의 감도에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하였으나 측정결과나 계산결과를 보면 감도측면에서는 차이를 보이지 않았다. 이것은 최대감도를 갖는 R_1 이 특별히 존재하지 않는 것을 의미하므로 실용적인 면에서는 브릿지 균형을 맞춘 후 적절히 R_1 을 선택하고 교정을 수행하면 되는 것을 의미한다.

실험을 통하여 측정된 데이터의 오차정도를 평가하기 위하여 불확도 해석을 수행하였다. 식 (9)와 (10)으로부터 출력전압에 영향을 주는 인자를 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$V_{out} = V_{out}(R_1, R_2, C_1, C_2, E_b, G_{amp}) \quad (12)$$

이들 변수들은 모두 불확도를 갖고 있으며 최종 출력에 오차를 전파시킨다. 각각의 변수들을 X_i 로 표시하고 이들의 불확도를 δX_i 라고 하면 출력전압의 불확도는 Kline과 Mcklintock의 방법⁽¹²⁾을 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{out}} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial V_{out}}{\partial X_i} \frac{\delta X_i}{V_{out}} \right)^2} \quad (13)$$

불확도의 계산과정을 나타낸 것이 위의 Table 2이다. 여기서 브릿지를 구성하는데 사용되는 고정저항의 대표값은 정밀하게 교정되었다고 가정 한 디지털 멀티미터(DMM)로 실제 하루 중 20회 측정된 데이터를 이용하여 계산한 평균을 사용하였고, 변수의 불확도는 데이터의 표준편차를 계산하고 student t분포 (95% 신뢰범위)를 이용하여 환산한 불확도를 이용하였다. 센서 C_2 의 불확도

는 LCR미터로 측정된 값과 각도의 영향을 경험적으로 고려하여 산정하였다. 계산결과에 의하면 Fig. 5에서 제시한 측정데이터는 약 1.07%정도의 불확도를 가지며 센서 C_1 의 영향이 가장 크게 나타났다. 이것은 C_1 를 제외한 나머지 부품들과 전원은 최대 약 0.3%의 오차내에서 비교적 정밀하게 유지되기 때문에 출력에 크게 영향을 미치지 않지만 센서의 정밀한 제작에 많은 주의가 필요함을 의미한다.

4. 스트레인게이지 센서와의 감도비교

교정실험 중에 관찰해보면 본 연구에서 제시한 새로운 토크센서의 감도가 매우 우수함을 알 수 있었다. 따라서 본 장에서는 기존의 스트레인게이지 방식 토크센서와 본 연구에서 제안한 정전용량방식 토크센서의 감도를 이론적 해석을 통하여 비교해 보고자 한다. 증폭기를 거치지 않은 상태의 두 토크센서의 브릿지로부터의 기본신호에 대한 감도를 비교함으로써 정전용량형 토크센서의 감도가 기존의 스트레인게이지 방식 토크센서보다 우수함을 증명할 것이다.

식 (9)는 R_1 이 임의의 값으로 설정된 경우, 토크가 가해지지 않은 상태에서 센서가 C_1 의 정전용량을 갖는 경우의 출력이다. 만약 식 (11)이 만족되도록 R_1 을 조정하면 브릿지출력 V_C 는 0이 되는데 이제 축에 작은 토크를 가하여 센서의 정전용량을 $C_1 - \Delta C_1$ 으로 변화시키면 다음과 같은 0이 아닌 출력전압 ΔV_C 가 검출될 것이다.

$$\Delta V_C = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{C_2}{C_2 + C_1 - \Delta C_1} \right) E_b \quad (14)$$

$C_1 \gg \Delta C_1$ 을 가정하고 식 (11)을 이용하면 식 (14)는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta V_C = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} \frac{\Delta C_1}{C_1} E_b \quad (15)$$

해석 및 비교의 편의를 위하여 $R_1 = R_2$, $C_1 = C_2$ 라고 가정하면 식 (15)는 다음과 같이 단순화된다.

$$\Delta V_C = \frac{1}{4} \frac{\Delta C_1}{C_1} E_b \quad (16)$$

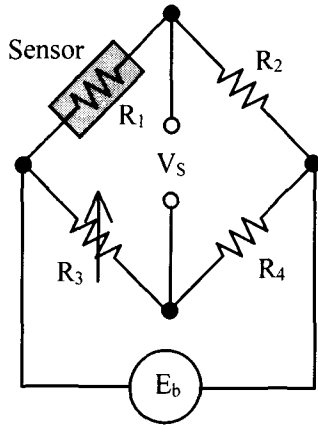


Fig. 7 Strain gauge and bridge connection

식 (1), (2), (3), (4)를 이용하여 식 (16)을 축과 센서의 기하학적 크기 및 토크와 관련시켜 표시하면 다음과 같다.

$$\Delta V_C = \frac{1}{4} \frac{\Delta d}{d_0} E_b = \frac{1}{4} \frac{E_b}{d_0} \frac{M_t L}{G I_z} R \quad (17)$$

이제 축의 표면에 축 중심과 45°의 각도로 부착된 스트레인게이지의 토크에 따른 출력의 변화를 고려한다. 스트레인게이지가 연결된 브릿지 회로를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 R_1 은 스트레인게이지 센서의 저항이며 R_2, R_3, R_4 는 스트레인게이지와 함께 브릿지를 구성하는 저항들이다.

처음에 브릿지를 구성하는 저항들 사이에 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 의 관계가 만족되어 출력이 0으로 유지되다가 토크가 가해지면 센서의 저항이 R_1 에서 $R_1 + \Delta R_1$ 으로 변화되고 출력 ΔV_S 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta V_S = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_2}\right)} \frac{R_4}{R_2} \frac{\Delta R_1}{R_1} E_b \quad (18)$$

이 경우에도 해석의 편의상 브릿지의 저항값이 초기에 모두 동일하다고 가정하고 또한 스트레인게이지 이론에 근거하여 센서의 상대적인 저항변화를 직접 스트레인과 연관시키면 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta V_S = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} E_b = \frac{1}{4} \epsilon E_b \quad (19)$$

한편 스트레인은 응력을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_t r}{E I_z} \quad (20)$$

식 (20)을 이용하여 직경 10mm인 steel 봉에 1N·m의 토크를 가했을 때 표면에서 발생하는 스트레인을 계산해보면 대략 2.547×10^{-5} 정도이다. 이와 같은 크기의 스트레인이 식 (19)에서 출력에 직접 비례하여 영향을 주므로 토크센서의 출력과 감도는 매우 작게 된다.

식 (19), (20)을 이용하면 토크가 가해졌을 때 스트레인게이지의 출력은 최종적으로 다음과 같다.

$$\Delta V_S = \frac{1}{4} E_b \frac{M_t r}{E I_z} \quad (21)$$

식 (17)과 (21)을 이용하여 동일한 토크에 대한 감도를 비교해보면 다음 식 (22)와 같다.

$$\frac{\Delta V_C}{\Delta V_S} = \frac{E}{G} \frac{R}{r} \frac{L}{d_0} \quad (22)$$

실제 사용되는 수치를 고려하여 대략적으로 $E/G=2, R/r=2, L/d_0=100$ 을 사용하면 정전용량방식 토크센서가 스트레인게이지 방식보다 약 400배 이상 감도가 우수함을 알 수 있다. 보통 사용되는 스트레인 게이지 방식 토크센서는 4개의 스트레인 센서로 브릿지를 구성하여 사용하는 4-게이지 법이고 이 경우 식 (22)에서 제시한 출력도 4배가 된다. 이 경우와 비교해도 본 연구에서 제시한 방법이 약 100배 정도의 높은 감도를 갖는다.

이것은 미세한 토크를 정밀하게 측정하는 것이 가능한 것을 의미하며 또한 스트레인게이지의 낮은 감도를 극복하기 위하여 사용되었던 높은 증폭비를 갖는 직류증폭기를 사용하지 않아도 되는 것을 의미한다. 두 토크센서의 감도 비교실험을 위하여 정전용량형 토크센서의 축에 스트레인게이지 (공칭 120Ω)를 부착하고 동일한 1N·m의 토크

크조건에서 출력을 증폭비 10의 증폭기에 연결하여 신호를 측정된 결과 정전용량방식은 약 2V의 신호변화를 관찰할 수 있었으나 스트레인게이지 방식은 극히 미세한 신호의 변화만을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 평행판 콘덴서의 원리를 응용하여 기존에 사용되던 스트레인 게이지 방식 토크센서보다 감도가 우수한 새로운 방식의 토크센서를 제시하였다. 토크를 전달하는 축의 양단에 원형판을 설치하고 각각의 원형판에 수직으로 직사각 형태의 전극판을 설치하여 두 전극판이 마주보도록 센서를 구성하였다. 토크에 따른 축의 변형에 따라 전극판 사이의 간격이 변하고 이에 따라 센서의 정전용량이 변화되는 것을 전기적으로 검출하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축의 비틀림과 휘스톤 브릿지 관계식을 이용하여 제시한 토크센서의 출력을 이론적으로 유도하였으며 실험결과와 비교하여 출력식의 타당성을 검증하였다.
- (2) 구성된 센서의 전극판은 반경방향에 따라 간격이 변하여 엄밀하게는 평행판 콘덴서와 다르다. 그러나 축의 중심에서 전극판 중심까지의 거리가 전극판의 폭보다 크고 판사이의 간격이 작은 경우에는 평행판 콘덴서의 이론이 적용될 수 있음을 문헌에서 조사하고 실험을 통하여 검증하였다.
- (3) 제안된 토크센서의 출력은 비선형적이었다. 즉, 감도는 저토크에서 크고 토크가 증가하면서 감소하는 특성을 갖는다. 본 연구에서 사용한 실험장치의 경우 $0.1\text{N}\cdot\text{m}$ 의 토크에서는 약 3.59V $\text{N}\cdot\text{m}$ 의 감도를 가졌으며 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 에서는 약 $1.54\text{V}/\text{N}\cdot\text{m}$ 의 감도를 가졌다. 향후 출력의 선형화에 대한 연구가 필요하다.
- (4) 가장 널리 사용되는 4-스트레인 게이지 방식 토크센서와 이론적으로 감도를 비교한 결과, 본 연구에서 제시한 방식이 약 100배 정도 높은 감도를 갖는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년도 경기대학교 특별목적연구 과제 학술연구비 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Joo, J. W., Na, K. S. and Kim, G. S., 1998, "Design and Evaluation of Small Size Six-axis Force/Torque Sensor Using Parallel Plate Structure," *Transactions of the KSME. A*, Vol. 22, No. 2, pp. 352~364.
- (2) Joo, J. W. and Kang, D. I., 1999, "Strain Analysis and Calibration Test of Small Capacity Torque Sensor," *Transactions of the KSME. A*, Vol. 23, No. 3, pp. 382~391.
- (3) Kim, J. Y. and Kang, C. G., 1999, "Strain Analysis of a Six Axis Force-Torque Sensor Using Cross-Shaped Elastic Structure with Circular Holes," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 2, pp. 5~14.
- (4) Bolton, W., 2000, *Mechatronics*, Addison Wesley, New York, pp. 67~71.
- (5) Kim, J. I., Oh, S. H., Lee, C. W., Cheong, Y. D. and Kim, J. N., 2000, "Analysis and Development of the Angular Twist Type Torque-meter," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 6, pp. 103~110.
- (6) Crandall, S. and Dahl, N., 1978, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, McGraw-Hill, New York, pp. 364~378.
- (7) Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J., 1993, *Fundamentals of physics*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 739~764.
- (8) Doebelin, E. O., 1990, *Measurement Systems*, McGraw-Hill, New York, pp. 254~255.
- (9) Coughlin, R. and Driscoll, F., 1991, *Operational Amplifier and Linear Integrated Circuit*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 201~208.
- (10) Lee, B. S., 1987, *Sensor Introduction*, Sewoon, Seoul, pp. 151~152.
- (11) Lee, S. P., Kauh, S., 2000, "Calibration Equation for VTA Including the Effect of Ambient Temperature Drift," *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting. B*, pp. 99~104.
- (12) Kline, S. J. and Mcklinton, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.