論文 한국정밀공학회지 제9권 제1호 1992. 3
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 9. No. 1 Mar. 1992.

비접촉 토오크센서의 개발(I)

손 대 락*, 임 순 재*, 김 창 석*, 남궁 석**

Development of Non-contact Torque Sensor

De-Rac Son*, Soon-Jae Lim*, Chang-Suk Kim*, Suk Namgung**

ABSTRACT

A non-contact torque sensor was developed using amorphous alloy. The change of maximum magnetic induction of Co-based amorphous alloy under the tensile and compressive stress was proportional to applied torque. For the construction of the torque sensor, a glass fiber reinforced-epoxy rod was used as shaft. The amorphous strips were attached on the epoxy shaft in the direction of +45° and -45°. The magnetizing coil and 2 sensing coil was installed. The static and dynamic test was carried out. The linearity and sensor hysteresis of the torque sensor was less than 1%.

1. 서론

자동차 엔진, 펌프, 모우터 등과 같은 회전동력장치의 일률 또는 효율을 측정 하거나 회전동력장치를 과부하 없이 운용하고자 할 때 토오크센서가 이용된다. 이때 사용되는 토오크센서는 대부분 스트레인 게이지(strain gate)와 slip ring을 이용하고 있는 데, 이러한 종류의 센서들은 감지된 토오크를 회전하는 축으로부터 외부로 그 신호를 전달하기 위해서 slip ring이나 magnetic coupler와 같은 중간의 신호 전달 장치(signal transmitter)를 설치하여야 한다. 이러한 신호 전달장치는 설치하기가 번거롭고, 가격이 비싸며, 신호처리에 전기잡음(electrical noise)을 유기하여 측정을 어렵게 하기도 한다.[1] 이 외에도 비접촉식으로 토오크를 측정하는 데에는 회전축의 회전각 차이를 광학적 또는 기계적으로 감지하는 방법이 있고, 자기적인 방법으로 최근 비정질합금(amorphous alloy)의 磁氣탄성효과에 의한 초기 투자율의 변화나 multi-vibrator bridge를 이용한 투자율 변화 기울기를 읽는 비접촉 토오크 센서가 보고 되고 있다.[2-4-7]

이러한 기존의 토오크센서가 갖는 단점을 보완하는 새로운 방식의 비접촉 센서를 개발하였다. 개발된 센서의 원리는 비정질 합금을 非磁性의 회전축에 부착하고, 그 비정질 합금의 자기탄성효과에 의한 최대자기유도(maximum magnetic induction)의 차이를 이용한 것이다.

2. 센서의 원리

磁歪(magnetostriction)를 가진 비정질 합금을 교류(AC)로 磁化시키고 외부로부터 응력을 가하면 최대자기유도 값이 변한다. 회전하는 축에 Fig. 1처럼 축방향에 대하여 +45°와 -45°로 비정질 합금을 부착하고, 그 외부에 자장을 발생시키는 1차코일(N_1)을 감아 설치하고, 회전하는 축과 1차코일 사이에 2개의 감지코일 즉, 2차코일 (N_2)을 설치한다. 만약 축이 비틀림 하중을 받으면 하나의 비정질 합금은 압축하중을 받으며, 또 다른 비정질 합금은 인장하중을 받게 된다. 부착된 비

* 한국표준과학연구원
** 충남대학교 기계공학과

정질합금은 음자왜(negative magnetostriction)의 성질을 갖고 있어 압축응력을 받을 때가 인장응력을 받을 때보다 최대자기유도 값이 더 커지게 된다. 즉, 축이 비틀림 하중을 받으면 두 비정질 합금의 최대자기유도 차이는 인가한 비틀림 하중에 비례하게 된다. 식으로 표현하면,

$$\triangle B_{max} = k\tau \quad (1)$$

여기서 k는 비례상수 이며, τ는 인가한 또는 측정할 토오크이다. 비례상수 k는 자화 주파수(magnetizing frequency)와 최대 자화력(maximum magnetic field strength)에 따라 변화한다.

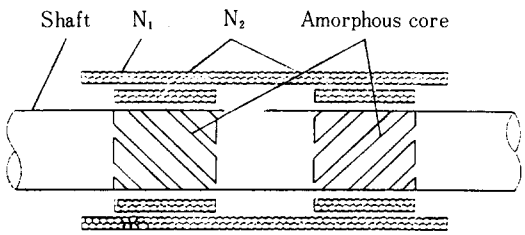


Fig. 1 Schematic diagram of the torque sensor

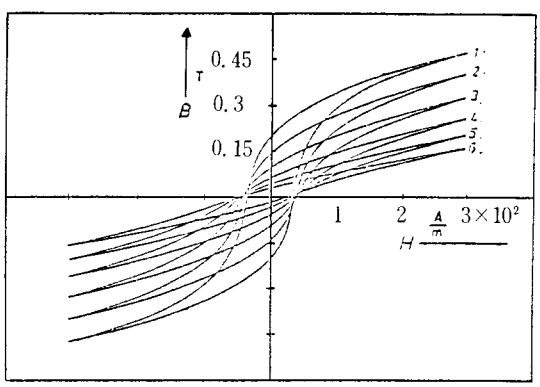


Fig. 2 Maximum magnetic induction vs. magnetic field strength

이 원리를 그래프로 설명한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2에서 2번 B-H loop가 비틀림 하중을 받지 않고 있는 경우의 비정질 합금의 최대자기유도를 나타내고 있는 것이라면, 1번 B-H loop는 압축하중을 받고 있는 경우를 나타내는 것이 되고, 3번 B-H loop는 인장하중을 받고 있는 경우를 나타내는 것이 된다. 결국 비틀림 하중에 대한 두 비정질 합금의 최대자기유도 차이를 구하면 바로 토오크 값에 비례하는 신호를 검출할 수 있다.

3. 센서의 제작

센서의 원리에서 설명한 바와 같이 glass fiber epoxy 봉에 ±45°로 비정질 합금을 원주를 따라 환형으로 부착하였다. 이 때 비정질 합금은 외부 응력에 민감히 작용하도록 폭 1㎜, 길이 17㎜, 가격 1㎜로 에칭하여 순간 접착제를 이용하여 부착하였다. glass fiber epoxy 봉을 사용한 이유는 센서원리가 최대자기유도의 차이를 구하는 것 이므로 비정질 리본을 충분히 자화시켜야 하기 때문이다. 따라서 비금속 · 비자성체의 탄성물질을 이용해야 되는 데, 본 연구(I)에서는 glass fiber를 축방향에 대하여 ±45°로 적층한 epoxy 환봉을 사용하였다.

부착한 비정질 리본을 자화시키기 위한 1차 코일은 직경 0.3㎜의 에나멜 동선을 길이 74㎜의 solenoid로 474회 감았으며, 최대자기유도를 감지하는 2개의 2차 코일은 같은 동선을 폭이 15㎜되게 460회 감아 두 코일의 극성이 서로 반대되게 직렬로 연결하였다. 이는 축이 비틀림 하중을 받지 않을 때, 출력 전압을 영으로 하기 위함이다. 여기서 비정질 리본이 부착된 회전축은 1차코일과 2차코일 모두에 대하여 비접촉으로 설치된다. Fig. 3는 제작된 센서의 각 부를 나타낸 사진이다.

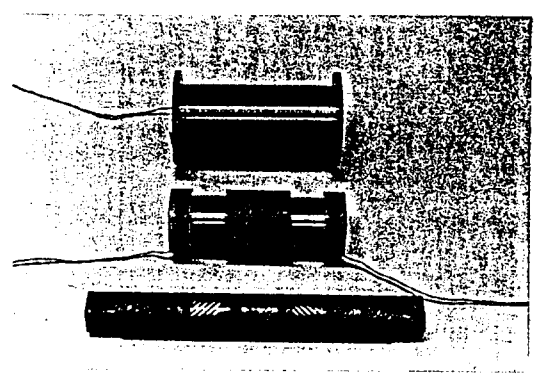


Fig. 3 Components of the torque sensor

한편, 두 비정질 합금의 최대자기유도 차이를 전압으로 측정하기 위한 전자회로는 Fig. 4와 같다. sine파와 consine파가 발생 되는 발진기에서 sine파 출력은 전압대 전류 변환기를 거쳐 1차코일에 공급되며, cosine파 출력은 전압 비교기와 multi-vibrator를 거쳐 sample/holder에 sampling pulse로 인가시켰는 데, 그 이유는 최대자기유도가 sine파의 peak점에서 얻어지므로

sample/holder는 cosine파의 zero-crossing 점에서 반드시 sampling을 하여야 하기 때문이다. 두 개의 2차코일에 유도되는 기전력의 차이는 적분기를 거쳐 적분시킨 다음 증폭시켰다. 이 때의 출력전압과 토오크와의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$U_0 = \frac{2\ k\ G\ N_2}{R\ C}\ \tau \qquad (2)$$

여기서 G는 증폭기의 이득이며, RC는 적분기의 시간상수(time constant)이다. 식(2)에서 알 수 있듯이 sample/holder의 출력은 회전축의 토오크에 비례하며, 비례상수는 토오크에 대하여 독립적이다. 비례상수는 주어진 자화 주파수와 최대자화력에 대하여 일정하기 때문에 비틀림 하중을 자화 주파수와 동일한 주파수로 sampling하여 측정할 수 있다.

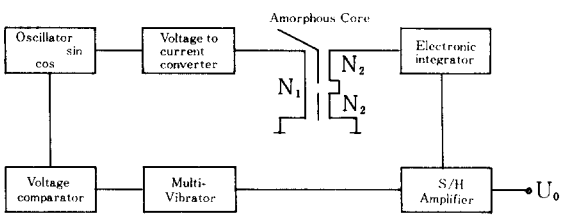


Fig. 4 Block diagram of electronic circuit

4. 실험결과 및 고찰

개발된 비접촉 토오크 센서에 대하여 정적인 실험과 동적인 실험을 실시하였다. 정적인 실험에서는 센서의 한쪽 끝에 팔(arm) 길이204㎜의 직사각형(10×50㎜) 단면을 갖는 막대를 걸었으며, 다른 한쪽 끝은 고정시켰다. 막대 양 끝에는 저울용 접시를 각각 설치하고 분동(weight)을 그 접시 위에 올려 놓는 방법으로 토오크를 센서에 인가하였다. Fig. 5는 정적 실험장치를 나타내는 사진이다.

Fig. 6에서 보듯이 -10 N·m부터 +10 N·m범위에서 실험한 결과, 토오크센서에 Hysteresis가 나타났다. 이러한 Hysteresis 현상은 다른 연구에서도 보고된 바,[6-7] 그 이유로 금속의 회전축을 사용했기 때문이라고 해석하였으나, 본 연구에서는 glass fiber epoxy 봉을 사용했기 때문에 센서의 출력에 Hysteresis가 있는 것은 다른 원인에 기인된다고 생각된다. 이를 분석하기

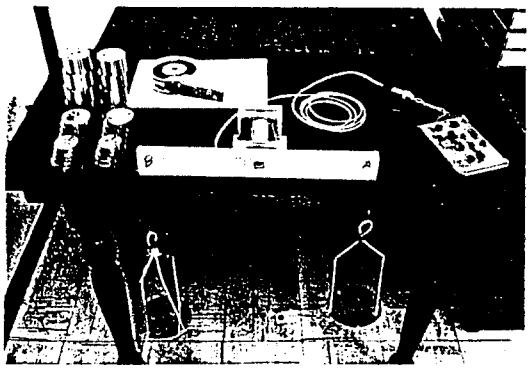
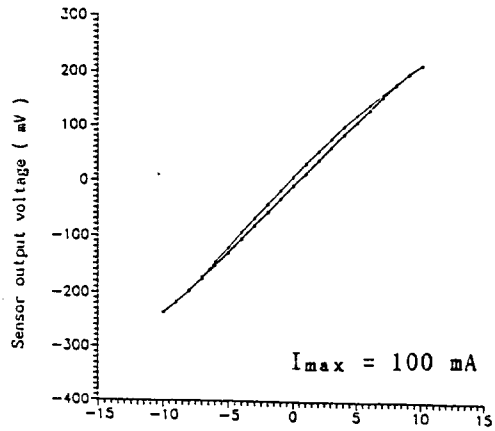


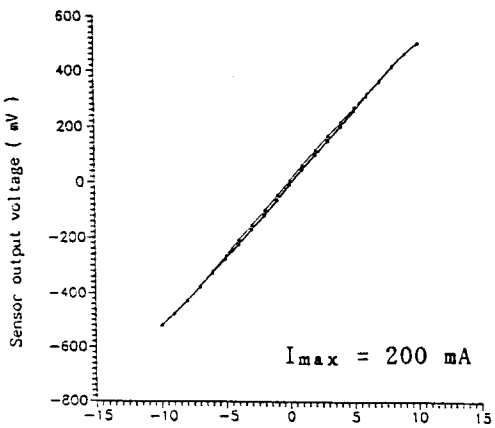
Fig. 5 Apparatus for static torque test

위해서 최대자화전류(I_{max})를 증가시키면서 Hysteresis를 조사한 결과, I_{max}가 100mA일 때 센서 Hystresis는 약 5%, I_{max}가 500mA일 때 센서 Hystresis는 약 1%로 미만으로 나타났다. 즉, 최대자화전류를 증가함에 따라 센서 Hystresis는 감소함을 알 수 있었다. 이는 토오크 센서에 부착된 비정질 합금의 방향이 자화력 방향에 대하여 ±45°로 기울어져 있기 때문에, 최대자화전류를 많이 흘려 자화력이 증가함에 따라 magnetic domain의 방향이 자화력의 방향으로 보다 많이 背向되기 때문인 것으로 생각된다. 한편, -5N·m이하와 +5N·m이상의 범위에서는 비직선 현상이 나타났다. 토오크 범위를 줄이고, 0.4N·m씩 변화시키면서 실험한 결과 센서 Hystresis를 포함한 직선성이 ±1%미만으로 나타났다. 이를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 7이다.

Fig. 8는 동적 실험장치를 나타내는 사진이다. 동적 실험의 목적은 제작된 토오크센서의 비틀림 고유주파수를 찾기 위함이다. 10Hz에서 2000Hz까지 수직방향으로 진동을 발생하는 진동발생기에 팔 길이 400㎜의 직사각형(10㎜×30㎜) 단면을 갖는 금속 막대를 토오크 센서에 연결하였다. 진동발생기에서 정현파를 10Hz부터 sweep하면서 일정 변위를 토오크 센서에 인가한 결과 40Hz에서 1차 공진현상이 나타났다. 이 때 사용된 금속 막대의 고유주파수는 400Hz이였는데, Fig. 9은 금속 막대의 Impact Test의 결과를 나타낸다. 상용 토오크 센서의 공진 주파수가 100Hz(600RPM)이상인 것을 고려하면 회전축의 재설계가 필요한 것으로 생각된다. 이 점만 개선하면 많은 응용이 기대된다. 특히 공구마모나 절삭상태인식 같은 공작기계의 가공공정 감시나 적응제어에 이용될 수 있을 것으로 생각된다[8].

한편, 기존의 자기적 방법을 이용한 비접촉 토오크센





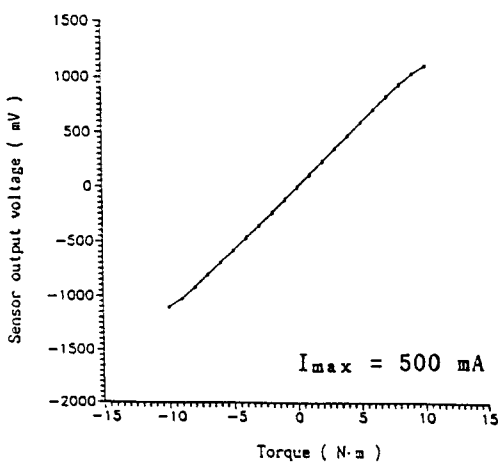


Fig. 6 Sensor output voltage vs. applied torque at different max. magnetizing current

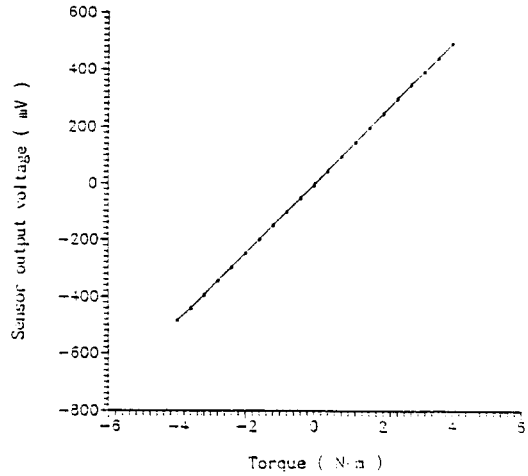


Fig. 7 Hysteresis and linearity of torque sensor at I_{max} = 500mA

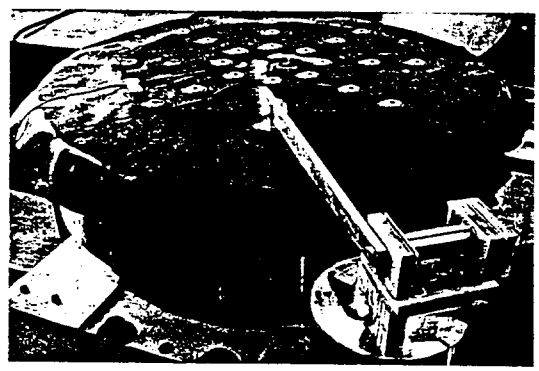


Fig. 8 Apparatus for dynamic torque test

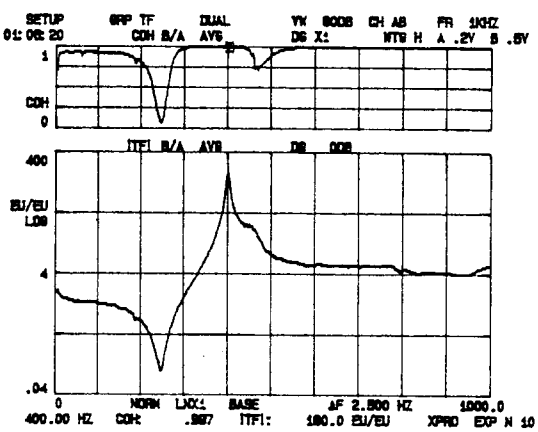


Fig. 9 Transfer function of arm used in dynamic torque test

서는 투자율의 변화 혹은 투자율 변화 기울기를 보기 때문에 외부 자장의 변화에 영향이 큰 반면, 본 연구에서 개발한 토오크센서는 비정질합금의 최대자기유도의 차이를 보기 때문에 외부 환경에 민감하지 않은 장점을 지닌다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

① 비정질 합금의 최대자기유도 차이를 이용한 비접촉 토오크 센서를 개발하였다.

② 개발된 토오크 센서 Hysteresis를 포함한 직선성은 ±1%미만으로 나타났다.

③ 동적 비틀림 하중을 자화 주파수(10kHz)와 동일하게 sampling할 수 있다. 센서의 비틀림 고유주파수를 향상 시키면 동측정 범위(dynamic range)우수 할 것으로 생각 된다.

④ 기존의 토오크 센서에 비하여 구조가 간단하고, 가격도 매우 저렴하게 제작할 수 있다.

6. 참고문헌

1) Y. H. Kown et al., 동적 Torque 비접촉식 측정기술 개발, 과학기술처(1989)

2) R. Boll and G. Hinz, Sensoren aus amorphen Metallen, Technischen Messen TM-52, PP. 189-198(1985).

3) E. Brinksmeier, Beruehrungslose Drehmomentmessung mit magnetischen Verfahren, Sensor Magzin, May, PP. 14-17 (1989).

4) I. Sasada et al., Torque Transducers with Stress-Sensitive Amorphous Ribbons of Chevron-Pattern, IEEE MAG-20, PP. 951-953 (1984).

5) K. Mohri et al., New Torque Sensors using Amorphous Star-Shaped Cores, IEEE MAG-23, PP. 2191-2193 (1988).

6) K. Tanizaki et al., Development of Magnetostrictive Torque Sensor, 제12회 일본응용자기학회 학술강연개요집, P. 348 (1988).

7) K. Tanizaki et al., Behavior of Hysteresis in Magnetostrictive Torque Sensor, 제13회 일본응용자기학회 학술강연개요집, P. 65 (1989).