

비정질합금을 이용한 비접촉 자기탄성 토오크센서

손대락, 임순재, 유중렬, 김창석

한국표준연구소

대덕연구단지사서함 3호

(1991년 9월 13일 받음)

회전축에 부착된 두 코어가 회전축의 토오크에 의하여 인장응력과 압축응력을 받게하여 두 코어의 최대자기유도 차이를 피측정량으로 하는 새로운 비접촉 토오크 센서를 제작하였다. 제작된 토오크센서는 선형도가 1% 정도였으며 과도현상적인 토오크를 자화주파수와 동일한 10 kHz의 샘플링주파수로 측정 가능하게 하였다.

I. 서론

동적인 토오크의 측정은 회전동력상치의 일률측정등에 널리 사용되어 왔으며, 그 측정방법으로는 strain gauge방법, 광학적 방법 및 자기적인 방법등이 있다[1, 2]. 최근에는 공장자동화와 관련하여, 생산공정의 40%가 드릴링작업으로[3] 생산성 향상과 품질향상을 도모하기 위하여 연장의 마모상태를 판단하는 측정방법이 필요하게 되었으며, 이를 위하여 AE(Acoustic Emission) 방법, 모터의 전류측정 및 토오크 측정방법 등이 개발되고 있다. 특히 비접촉 토오크센서는 이러한 응용분야의 활용에 경제적이고 효과적인 측정장치로 대두되고 있다. 특히 비정질합금의 자기탄성효과에 의한 초기투자율의 변화나 multi-vibrator bridge를 이용하여 비접촉 토오크센서에 많이 활용되고 있다[4-7]. 본 연구는 자기탄성효과에 의한 최대자기유도의 변화를 이용한 힘센서로 [8, 9] 비접촉 토오크센서에 응용하였다.

II. 토오크 센서 제작

비정질합금의 최대자기유도 B_{max} 의 변화를 이용한 비접촉 토오크센서의 제작은, 회전축에 두 코어를 회전축방향에 대하여 ± 45 도 각도로 부착시킬 경우, 회전축이 받는 토오크에 의한 축의 변형이 각각의 코어에 인장응력과 압축응력을 받게하여 두 코어의 최대자기유도차이를 피측정량으로 하는 비접촉 토오크센서가 가능하

다. 토오크센서를 제작하기 위하여 탄성체인 회전축을 제작하여야 한다. 토오크센서의 원리가 최대자기유도의 차이를 측정하는 것 임으로 비정질 리본을 충분히 자화시켜야 하기 때문에, 금속제의 회전축 사용이 어려워, glass fiber를 사용한 epoxy막대를 제작하였다. Epoxy막대의 제작은 직경이 10 mm Φ 인 막대에 glass fiber를 축방향에 대하여 45도 각도로 권선하고 epoxy를 몰딩한 후 다시 그 위에 -45도 각도로 glass fiber를 권선하고 epoxy를 몰딩하는 방식으로 반복하여 최종적으로 직경이 20mm Φ 인 막대를 제작하였다. 따라서 축방향의 토오크에 의한 축의 변형이 축방향에 대하여 ± 45 도 방향으로 용이한 비자성인 회전축을 제작하였다.

제작된 회전축은 직경이 19mm Φ 가 되도록 선반을 사용하여 가공한 후 음자왜(negative magnetostriction)인 Vacuumshmelze 사의 Co-계열 비정질 리본($Co_{62}Ni_{15}Si_8B_{15}$, 포화자왜 $\lambda_s = -6 \times 10^{-6}$)을 폭 12mm로 절단하고, 그 리본에 폭 1mm, 간격 1mm인 레터링을 45도 각도로 부착시킨후 에칭을 하였다. 제작된 비정질 코어를 회전축에 순간접착제(Loctite[®] Cyanoacrylate 401)을 사용하여 부착시켰다.

최대자기유도의 변화 ΔB_{max} 는 외부에서 가한 응력에 대하여 어떤 선형도 범위내에서 비례할 경우[8],

$$\Delta B_{max} = k\sigma \quad (1)$$

이고 여기서 σ 는 응력 즉 $\sigma = F/A$ 이고 k 는 비례상수이다. 토오크센서에서 회전축의 변형이 토오크에 비례하면, 회전축이 받는 토오크에 의하여 회전축에 부착된

비정질코어는 각각 인장응력과 압축응력을 받게 되고, 토오크(τ)와 두 코아의 최대자기유도변화의 차이는 다음과 같이 된다.

$$2\Delta B_{\max} = k_1 \tau \quad (2)$$

여기서 k_1 은 비례상수이다.

두코아의 최대자기유도의 차이를 이용한 토오크센서를 제작하기 위하여 센서의 구조를 Fig. 1과 같이 설계하였다. 코아를 자화시키기 위한 일차코일 N_1 은 직경이 0.4 mm Φ 인 에나멜선을 길이가 10 cm 직경이 3.2 cm 인 솔레노이드로 480회 권선하였으며, 이차코일 N_2 는 각각의 코아위에 직경이 0.4 mm Φ 인 에나멜선을 폭이 15 mm 되게 460회를 각각 권선하고 두코일은 극성이 서로 반대되게 식별로 연결하여 토오크가 없을때 출력전압이 0이 되게 하였다.

한편 두 코아의 최대 자기 유도의 차이를 구하기 위해서 다음과 같은 방법을 택하였다. 우선 최대 자기유도에 도달하는 시간이 최대 자화력 H_{\max} 의 시점과 같기 때문에 만약 일차코일에 가하는 전류를 정현파로 할 경우 최대 자기 유도의 시점은 일차코일에 흐르는 전류파형의 미분인 cosine 파형의 zero-crossing 시점이 된다. 따라서 두 코아의 최대 자기 유도의 차이를 측정하는 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다.

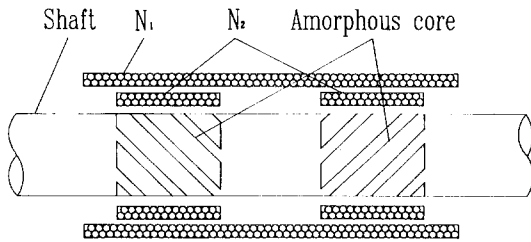


Fig. 1. Schematic diagram of the torque sensing element.

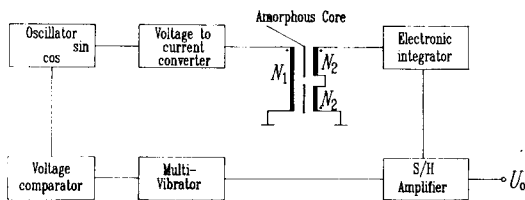


Fig. 2. Block diagram of the torque sensor.

Sine 과 cosine 의 출력이 있는 발진기, 즉 quadrature oscillator(BB 4423)을 사용하였으며, 자화주파수는 10 kHz를 사용하였다. 일차코일에 가하는 전류는 발진기의 sine 출력단을 전압-전류 변환기에 연결하였으며, 최대 자기유도의 sampling 펄스를 얻기 위하여 cosine 출력을 전압비교기와 multivibrator를 사용하여 cosine 출력의 zero-crossing 위치에서 샘플링 펄스를 만들어 S/H 증폭기의 디지털 입력단에 연결하였다. 한편 두 코아의 최대 자기 유도의 차이를 구하기 위하여 두 이차코일에 유도되는 기전력의 차이를 Miller 적분기로 적분하였으며, 적분된 신호를 증폭기를 사용하여 증폭시킨다음 S/H 증폭기의 아날로그 입력단에 연결함으로써 두 코아의 최대자기유도의 차이에 비례하는 출력을 얻을수 있도록 하였다. 따라서 S/H 증폭기의 출력과 회전축에 가한 토오크와의 관계는 식(2)를 사용하면 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$U_0 = \frac{2k_1 G N_2}{R C} \tau \quad (3)$$

여기서 G 는 증폭기의 이득이고 RC 는 Miller 적분기의 시간상수(time constant)이다. 식(3)에서 보면 S/H 증폭기의 출력이 회전축의 토오크에 비례하고 비례상수가 토오크에 대하여 독립적이다. 그러나 비례상수 k_1 은 자화주파수와 최대 자화력 H_{\max} 에 따라 변화한다[7]. 주어진 자화주파수와 최대자화력에 대하여 비례상수가 일정하기 때문에 외부에서 가하는 토오크를 자화주파수와 동일한 샘플링 주파수로 측정할 수 있고 회전축과 자화코일 및 탐지코일이 비접촉이기 때문에 특성이 우수한 비접촉 토오크센서가 가능하게 된다.

III. 실험결과 및 고찰

정적(static)상태에서 토오크센서의 특성을 조사하기 위하여 팔의 길이가 20.4cm 인 epoxy막대와 분동을 사용하여 토오크를 인가하였다. Fig. 3-a 에서 Fig. 3-c 는 토오크를 -10 N·m에서 +10 N·m까지 변화를 주면서 센서의 출력전압을 측정된 것으로 토오크 센서에 hysteresis가 있음을 알 수 있다. 이러한 hysteresis 현상은 다른 연구에서도 발표된 바가 있으며 [6, 7], 이 현상이 회전축으로 사용된 금속에 의한 것으로 해석하였다. 그러나 본 연구에서는 회전축을 비자성체인 glass fiber를 epoxy로 몰딩시킨 축을 사용하였기 때문에 센서의 출력에 hysteresis가 있는 것은 다른 원인에 기인한 것으로 사료된다.

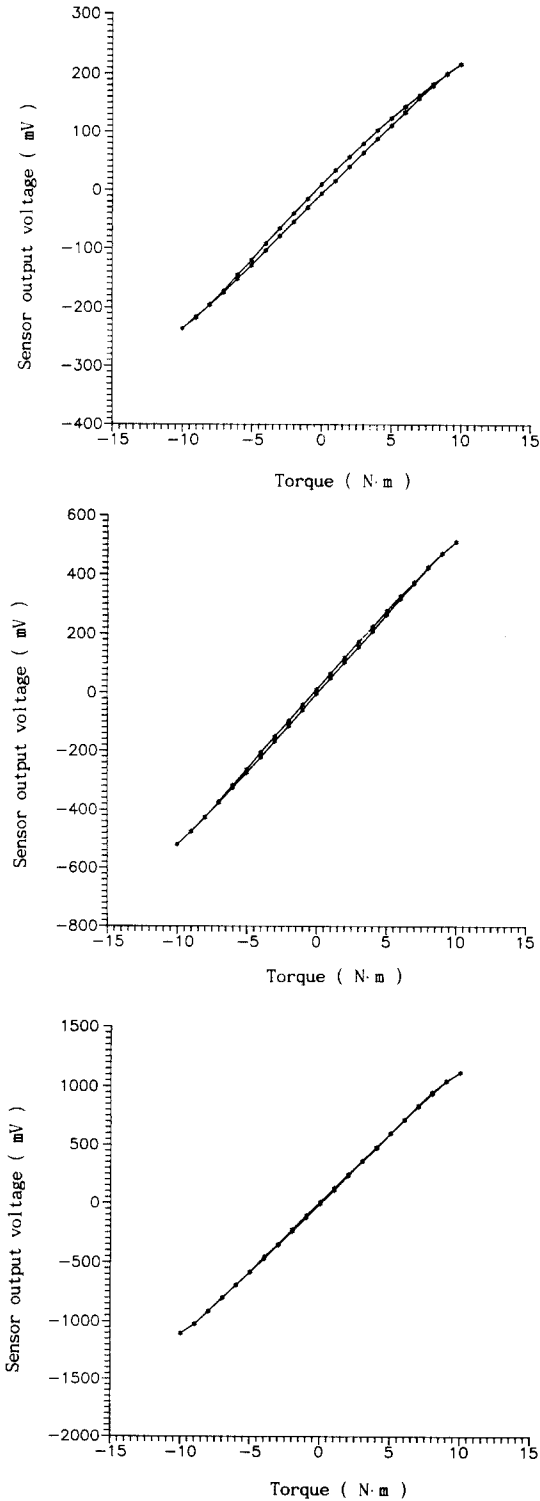


Fig. 3. Hysteresis of torque sensor at (a) $I_{max}=100$ mA, (b) $I_{max}=200$ mA, (c) $I_{max}=500$ mA.

다. 따라서 이를 분석하기 위하여 최대자화력 즉 최대자화전류를 변화시키면서 hysteresis를 조사하였다. Fig. 3-a는 $I_{max}=100$ mA일 경우, Fig. 3-b는 $I_{max}=200$ mA일 경우, Fig. 3-c는 $I_{max}=500$ mA일 경우에 측정한 결과로 자화전류가 증가함에 따라 hysteresis가 감소함을 알 수 있다. 한편 Fig. 4는 $I_{max}=500$ mA일때 토오크를 -4 N·m에서 4 N·m까지 0.4 N·m 씩 변화 시키면서 측정한 결과로 토오크센서가 선형성이 좋고 hysteresis가 적음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 3으로부터 y-축의 hysteresis U_h 와 x-축의 hysteresis τ_h 를 최대자화전류에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 측정값(*)은 y-축의 hysteresis를 최대 출력전압으로 나누어 역수로 취한 값 $((U_h/U_{max})^{-1})$ 이고, 측정값(□)은 x-축의 hysteresis를 최대토오크로 나누어 역수로 취한 값 $((\tau_h/\tau_{max})^{-1})$ 을 최대자화전류 I_{max} 에 대하여 나타낸 것으로 x-축의 hysteresis와 y-축의 hysteresis 모두 최대자화전류 I_{max} 에 비례하여 감소함을 알 수 있다.

따라서 토오크센서의 hysteresis는 코아의 방향이 자화력 방향에 대하여 ± 45 도 기울어져 있기 때문에 자화력이 증가함에 따라 자구의 방향이 자화력의 방향으로 보다 많이 배향되기 때문에 토오크센서의 hysteresis가 최대자화력을 증가시킴에 따라 감소하는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 6은 최대 자화전류에 따라 토오크센서의 출력을 나타낸 것으로 최대자화전류가 500 mA까지 선형적으로 증가하였다. 따라서 센서의 특성을 향상시키기 위하

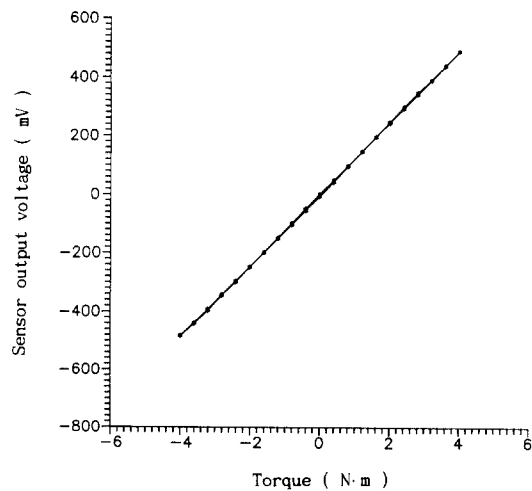


Fig. 4. Torque sensor characteristic at $I_{max}=500$ mA for the torque range from -4 N·m to 4 N·m.

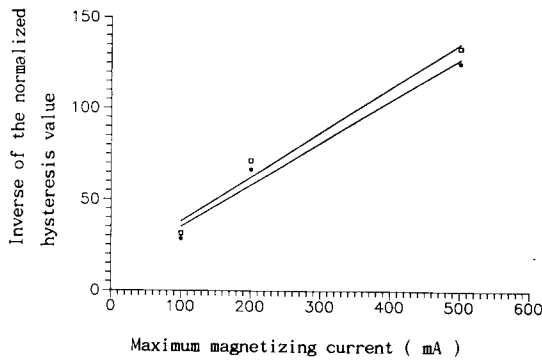


Fig. 5. Dependence of normalized hysteresis value on the maximum magnetizing current I_{max}
 □ : hysteresis value of the torque
 * : hysteresis value of the torque sensor output voltage.

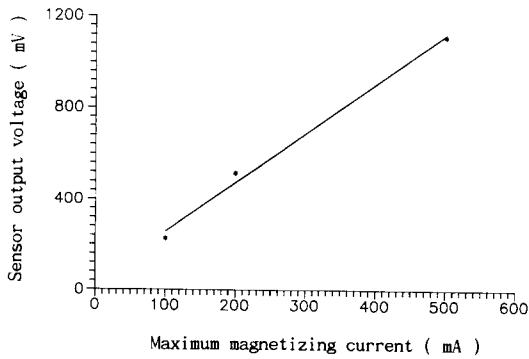


Fig. 6. Sensor output voltage at the torque of 10 N·m under different maximum magnetizing current.

여 자화 전류를 증가시키는 것이 좋으나 센서의 전력소모가 증가하기 때문에 센서의 용도에 따라서 최대자화 전류를 결정하여야한다.

Fig. 7 은 제작된 토오크센서의 선형도를 나타낸 것으로 토오크 범위가 0에서 4 N·m 까지 측정된 것으로 최대 자화전류 I_{max} 가 100 mA, 200 mA, 500 mA 일 경우 모두 선형도가 1% 정도였다. 한편 토오크센서의 동특성을 측정하기 위하여 진동발생 장치에 팔의 길이가 400 mm 이고 단면적이 10x30 mm² 인 알루미늄 봉을 토오크센서에 연결하여 측정을 시도하였으며, 알루미늄봉의 1차 공진주파수는 400 Hz 였다. 실험결과 토오크센서의 1차 공진주파수가 40 Hz 이었으며, 토오크센서의 응용을 위해서는 공진주파수를 증가시켜야 할 필요가 있다.

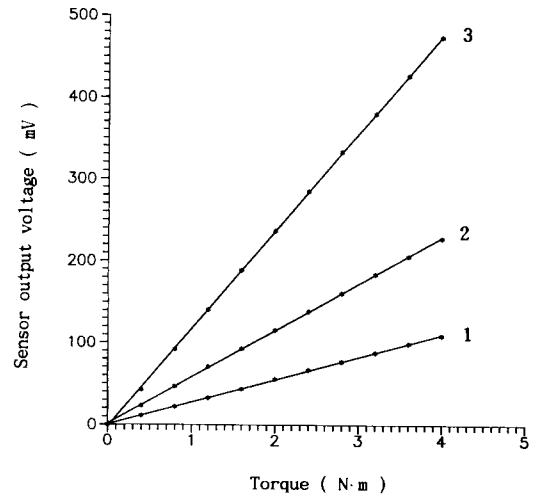


Fig. 7. Linearity of the torque sensor for the different maximum magnetizing current,
 1: I_{max} = 100 mA, 2: I_{max} = 200 mA
 3: I_{max} = 500 mA

IV. 결론

비정질 리본을 회전축의 축방향에 대하여 ±45도의 각도로 부착시키고, 회전축이 받는 토오크에 의하여 두 코어의 최대자기유도의 차이를 피측정량으로 하는 비접촉 토오크센서를 제작하였다. 제작된 토오크센서는 hysteresis 현상을 보였으며, 이 현상은 최대자화력을 증가시킴에 따라 반비례하여 감소하였다. 센서의 선형도는 1% 정도였으며, 토오크를 자화주파수 10 kHz와 동일한 샘플링 주파수로 측정이 가능하므로써 동적인 토오크의 측정이나 과도현상적인 토오크의 측정에 활용될 수 있다.

참고문헌

[1] Y. H. Kown et al., KSRI-91-89-TR.
 [2] R. Boll and G. Hinz, Technischen Messen TM-52, 189(1985).
 [3] E. Brinksmeier, Sensor Magazin, May, 14(1989).
 [4] I. Sasada et al., IEEE MAG-20, 951(1984).
 [5] K. Mohri et al., IEEE MAG-23, 2212(1987).

- [6] K. Tanizaki et al., 제 12회 일본응용자기학회 학술 강연개요집, 348(1988).
[7] Y. Nonmura et al., 제 12회 일본응용자기학회 학술 강연개요집, 351(1988).
[8] D. Son and J. Sievert, IEEE MAG-26, 2017(1990).
[9] D. Son and C. S. Kim, J. of Korean Mag. Soc., Vol. 1, 37(1991).

Non-Contact Magnetoelastic Torque Sensor Using Amorphous Alloys

D. Son, S. J. Lim, J. Y. Yoo and C. S. Kim

Korea Standards Research Institute.

P. O. Box 3 Taedok Science Town, Taejon 305-606

(Received 13 September 1991)

A new kind of a non-contact torque sensor which uses the difference of the maximum magnetic inductions as measurand was constructed. The torque sensor utilizes the tensile and compressive stress of two cores which are attached on the rotating shaft. This sensor shows that the linearity was better than 1%, and the transient torque can be measured at the sampling rate of 10 kHz which is the same as magnetizing frequency of the core.