

토오크變換器의 特性에 對한 研究 A Study on the Characteristics of Torque Transducer

崔萬鎔* · 林東圭** · 韓應教**
(M. Y. Choi · T. K. Yim · E. K. Han)

Abstract

In the present the strain gauge type torque transducers consist of solid shaft as sensor, slip ring, brush and bridge circuit as detecting circuit.

So in the case of measuring the low-capacity torque, the error caused by technical mistake in mounting strain gauge on the small sensor and especially by contact resistance between slip ring and brush takes place more than the large sensor.

Therefore in this study constant voltage in order to have no effect of contact resistance is supplied to the hollow shaft and Schrobren Bridge Circuit.

Through the experiment good results were obtained as follows; linearity, hysteresis and zero drift as static characteristics is within 1% F.S. respectively. Also when loading, zero drift is about 2% F.S.

記號說明

A ; gain of amplifier
 B_1, B_2, B_3, B_4 ; brush
 d_3, d_1 ; diameter of hollow shaft
 E ; modulus of elasticity
 E_1, E_0, e_1, e_0 ; output, input voltage
 F ; strain gauge factor
 G ; shear modulus of elasticity
 L, L' ; length of calibration lever
 l ; length of hollow shaft
 R_L ; total resistance of bridge circuit
 $R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}, R_{a4}$; strain gauge nominal resistance
 r_1, r_2, r_3, r_4 ; contact resistance between brush and slip ring
 SR_1, SR_2, SR_3, SR_4 ; slip ring
 T ; torsional moment
 x, y, z ; rectangular coordinates

Z_p ; modulus of section in circular shaft
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$; strain of x, y, and z direction
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$; strain of plane
 $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c, \epsilon_d$; 45° strain of hollow shaft
 ϵ_1, ϵ_2 ; principal strain
 ϵ_ϕ ; strain of ϕ direction
 $\Delta \epsilon_\phi$; error strain of ϕ direction
 ν ; poisson's ratio
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$; normal components of stress parallel to x, y, and z, axes
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$; shearing stress
 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ; angle between ϵ , and $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

1. 緒論

現在 strain gauge 를 使用해서 흔히 凹轉體의 應力을 測定¹⁾하든가 또는 이를 交換素子로 한 토오크變換器²⁾로서 動力測定등에 應用하고 있다. 이와같은 strain gauge type 의 토오크變換器

* 正會員 : 漢大 大學院

** 正會員 : 漢大 工大 教授

는 一般의 變位를 檢出하고 있다.

이와같은 檢出方法에는 슬립링을 介하지 않는 非接觸法도 있으나 간단한 方法으로는 역시 슬립링을 介하는 方法이 많이 利用되고 있는 實情이다.

그러나 이와같은 方法도 接觸抵抗¹⁾으로 작은 出力을 나타내는 토오크變換器에서는 상당한 誤差를 수반하는 등 여러 문제점을 지니고 있다.

本 論文에서는 비교적 低容量의 토오크變換器의 試作을 통해서 精度向上의 대책으로 슬립링과 브러시 사이의 接觸抵抗¹⁾에 의한 誤差와 中實

軸의 受感部가 작아짐으로 해서 발생하는 gauge 接觸에 있어서의 誤差를 中空軸과 세로브론 브리지형(Schrobron bridge type)의 接觸 抵抗에 관계없이 항상 일정한 전압을 공급할 수 있도록 하여 좋은 결과를 가져왔고 그 以外의 여러 特性에 관해서 實驗을 하여 검토한 것을 以下와 같이 보고하고자 한다.

2. 토오크 變換器의 原理

2.1 受感部の 變換 原理

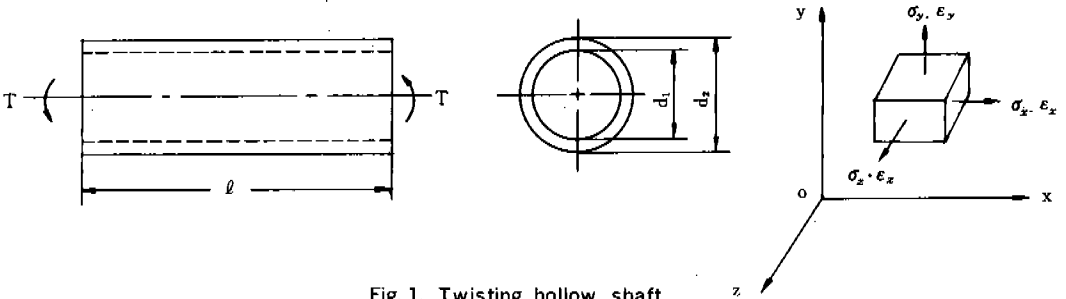


Fig. 1. Twisting hollow shaft.

Fig. 1에서

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \dots\dots(1)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \dots\dots(2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \dots\dots(3)$$

로 되며 원통面에서 $\sigma_z, \epsilon_z = 0$ 이다.

길이 l 되는 中空軸에 비틀림 T를 가했을 때 最大剪斷應力이 발생하는 곳은 軸과 45°의 角을 이루었을 때이며,

$$\tau = (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \frac{1}{2} \sin 2\theta \quad \text{여기서 } \theta = 45^\circ \text{ 이므로,} \dots\dots(4)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y)$$

순수전단應력이 작용할 때

$$\sigma_x = -\sigma_y = \tau_{max} \text{ 이다.} \dots\dots(5)$$

式(5)를 式(1)과 (2)에 代入하면

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} (1 + \nu) = \frac{\tau_{max}}{E} (1 + \nu) \dots\dots(6)$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} (1 + \nu) = -\frac{\tau_{max}}{E} (1 + \nu) \dots\dots(7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ 이므로 } \epsilon_x = \frac{\tau_{max}}{2G}, \quad \epsilon_y = -\frac{\tau_{max}}{2G} \dots\dots(8)$$

式(8)로부터 受感部는 G가 작고 τ_{max} 가 큰 材質일수록 ϵ_x, ϵ_y 는 증가하여 더 좋은 감도를 낼 수 있다.

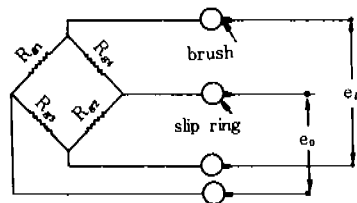


Fig. 2. Slip ring and brush circuit

그림(2)와 같이 測定回路가 four-bridge와 슬립링과 브러시로 구성되었을 때 one-gauge의 出力과 스트레인 ϵ 와의 관계는

$$e_0 = \frac{1}{4} e_t \cdot F \cdot \epsilon \dots\dots\dots(9)$$

式(6)과 式(7)을 式(9)에 代入하면,

$$e_0 = \frac{1}{4} e_t \cdot F \cdot \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \tau_{max} \dots\dots\dots(10)$$

Fig. 2와 같이 토오션이 (T)주어졌을 때

$$T = \tau_{max} \cdot Z_p \quad Z_p = \frac{\pi}{16} d_1^3 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right] \dots\dots(11)$$

式(11)을 式(10)에 代入하여 정리하면

$$e_0 = \frac{1}{4} e_t \cdot F \cdot \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \frac{16T}{\pi d_1^3 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right]} \dots\dots(12)$$

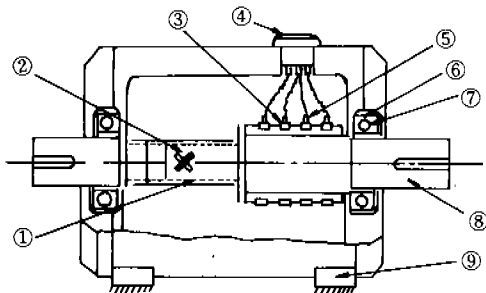
$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 이므로 式(12)는 다음과 같다.

$$e_0 = \frac{2e_t \cdot F}{\pi d_1^3 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right]} \cdot \frac{T}{G} \dots\dots\dots(13)$$

式(13)은 one-gauge의 出力이므로 four-gauge일 경우

$$e_0 = \frac{8e_t \cdot F}{\pi d_1^3 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \right]} \cdot \frac{T}{G} \text{로 된다} \dots\dots\dots(14)$$

2-2 變換素子와 토오크變換器의 構造



- ① hollow shaft ④ connector ⑦ bearing
- ② gauge ⑤ brush ⑧ torque shaft
- ③ slip ring ⑥ insulator ⑨ attachment

Fig. 3. Construction of torque transducer.

Fig. 3에서와 같이 中空軸에 대하여 45°의 角度로 4개의 gauge를 使用하였을 때 45°의 方

向에서 최대전단응력이 발생하며 $R_{\sigma 1}, R_{\sigma 2}, R_{\sigma 3}, R_{\sigma 4}$ 의 스트레인을 $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c, \epsilon_d$ 라고 할 때

$$|\epsilon_a| = |\epsilon_b| = |\epsilon_c| = |\epsilon_d| = \epsilon \text{로 된다.}$$

또한 Fig. 3에서와 같이 토오크軸은 左右 2개의 보울베어링으로 케이스에 支持되어 있다. 토오크軸의 수감부에는 前述한 바와 같이 gauge가 接着되어 있고 또 이웃 部分에는 슬립 링을 4개 두고 있다. 外部와의 電氣的 接統은 이 슬립링과 레버로서 Up-Down할 수 있는 브러시에 의해서 이루어진다.

2-3 Gauge 接着方向에 따른 오차

평면에서 측정된 3개의 측정트레인크기를 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 라 하고 主스트레인을 ϵ_1, ϵ_2 라 하면 ϵ_1 의 方向으로부터 φ 方向의 스트레인 ϵ_0 는

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} \left\{ (\epsilon_1 + \epsilon_2) + (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2\varphi \right\} \dots\dots(15)$$

따라서 指定된 角度 φ 에 대해서 角度 誤差 $\Delta\varphi$ 만큼 方向이 틀렸을 때,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} \left\{ (\epsilon_1 + \epsilon_2) + (\epsilon_1 - \epsilon_2) \cos 2(\varphi \pm \Delta\varphi) \right\} \dots\dots\dots(16)$$

式(15)에서 式(16)을 빼면

$$\Delta\epsilon_0 = \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \left\{ \cos 2(\varphi \pm \Delta\varphi) - \cos 2\varphi \right\}$$

순수전단응력이 작용할 때 $\epsilon_1 = -\epsilon_2$ 따라서 $\Delta\epsilon_0$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_0 = \epsilon_1 \{ \cos 2(\varphi \pm \Delta\varphi) - \cos 2\varphi \}$$

$$\Delta\epsilon_0 / \epsilon_1 = \cos 2(\varphi \pm \Delta\varphi) - \cos 2\varphi \dots\dots(17)$$

3. 試作 變換器의 示方

- 3-1 스트레인 出力 設定値; $1,600 \times 10^{-6}$ 스트레인
- 3-2 스트레인의 전기적 出力 設定値; $0.8mV/V$

3.3 슬립링 ; ① 材質 ; 銀-銅 合金 (BLH 社)

② 갯수 ; 4

3.4 브러시¹¹⁾ ; ① 材質 ; 銅-그라파이트

(graphite) (BLH 社)

② 브러시 / 슬립링 ; 3/1

3.6 접착제 ; Cyanoacrylate Adhesive (Loctite)

3.7 交換器의 총폭 및 길이 ;

① 총 폭 ; 140mm

② 총길이 ; 236mm

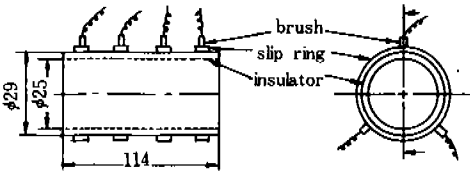


Fig. 6. Slip ring and brush.

3.5 사용 스트레인 gauge

① B-FAE-5-35 T 11 ② B-FAET-5-12T 11

G. L ; 5 mm

G. L ; 5 mm

G. F ; $2.03 \pm 1\%$

G. F ; $2.03 \pm 1\%$

G. R ; $350 \pm 0.5 \Omega$

G. R ; $120.2 \pm 0.2 \Omega$

4. 實驗 方法

4.1 靜的 特性

4.1.1 靜的 校正⁶⁾

本 實驗에서는 용량 $T = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}$, $0.65 \text{ kg}\cdot\text{m}$, $0.55 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 에 대하여 다음과 같이 實驗하였다.

즉 스트레인 지시계 (MS-307T)로서 Fig. 7 에서와 같이 길이 500mm되는 校正用아암에 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 씩 0° 方向으로 하중을 가하여 $1 \text{ kg}\cdot\text{m}$, $0.65 \text{ kg}\cdot\text{m}$, $0.55 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 까지 각각 측정하고 校正用아암을 180° 회전하여 최대 하중까지 하중을 가한다. 이때 스트레인은 토오크의 方向이 다르고 굽힘방향이 달라진 값을 얻게 되므로 양자를 平均한 平均値를 校正値로 한다.

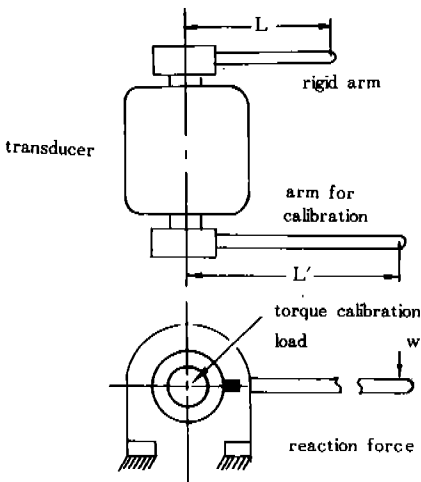
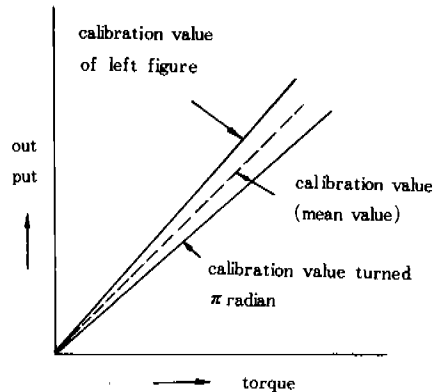
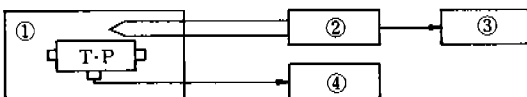


Fig. 7. Schematic diagram of static calibration.



4.1.2 溫度特性



① electric furnace

③ recorder

② thermo-meter

④ static indicator

Fig. 8. Block diagram of experimental apparatus of temperature.

Fig. 8 에서와 같이 토오크變換器를 전기로에서 20~70℃까지 균일하게 加熱하여 10℃간격으로 영점 이동의 현상을 정적 지시계로 측정하였다.

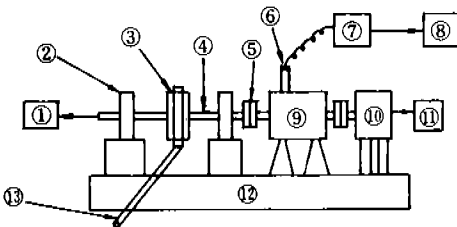
4-2 動的 特性

4-2-1 零點 移動量(無負荷時)

동적 특성을 실험하기 위하여 Fig. 9 에서와 같이 토오크變換器를 설치하고 레버로서 하중을 가한다. 이때 토오크變換器의 설치방법으로는 동체를 그림과 같이 부착하고 플렉시블커플링을 사용하였다.

또한 브러시의 마찰 토오크를 무시할 수 없으므로 모터쪽으로 설치했다.

無負荷時의 영점 移動量은 스트레인게이지 저항 120Ω과 350Ω에 대하여 각각 1,000rpm, 1,750rpm으로 200분까지 회전했을 때의 것을 電磁오실로그래프와 펜쓰기오실로그래프로서 기록되었다.



- ① digital tachometer
- ② bearing
- ③ band brake
- ④ shaft
- ⑤ flexible coupling
- ⑥ code
- ⑦ dynamic amplifier
- ⑧ oscillo graph
- ⑨ torque transducer
- ⑩ motor
- ⑪ watt meter
- ⑫ base
- ⑬ lever

Fig. 9. Block diagram of experimental apparatus.

4-2-2 動的 特性

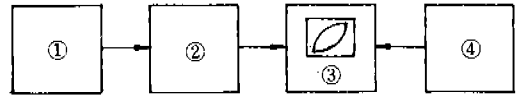
Fig. 9 에서와 같이 용량 T= 1kg·m, 0.65kg·m, 0.55kg·m 토오크變換器에 길이 500mm되는 레버로 0.1kg·m씩 토오크를 증가시키며 가

동 후 10분과 100分 후의 영점 이동 관례를 오실로그래프와 오실로스코프로서 관찰하고 기록하였다.

또한 0.55 kg·m에 있어서는 스트레인 게이지 저항 120Ω과 350Ω과의 零點移動현상을 비교하였고 사진(1)은 動的 特性 實驗을 나타낸 것이다.

4-2-3 受感體의 固有振動

회전에 의한 토오크軸의 固有振動數는 受感體에 應력을 주어 리사쥬圖形으로 測定하고 이에 대한 分력圖形이 Fig.10 에 그려져 있다.



- ① torque transducer
- ② dynamic amplifier
- ③ oscilloscope
- ④ C-R oscillator

Fig. 10. Block diagram of experimental frequency measurement.



Photo 1. Experimental apparatus of characteristics.

5. 實驗 結果

5-1. 靜的 特性

5-1-1. 靜的 較正

용량 T= 1kg·m, 0.65kg·m, 0.55kg·m의 F·S (full scale)에 대한 直線性은 0.63% F·S, 0.59% F·S, 0.7% F·S로 모두 1%

以内이며 히스테리스는 0.61% F·S, 0.42% F·S, 0.53% F·S 이고 零點移動은 0.1 ~ 0.2% 까지 나타났고 이에 대한 것들이 Fig. 11에 도시되었다.

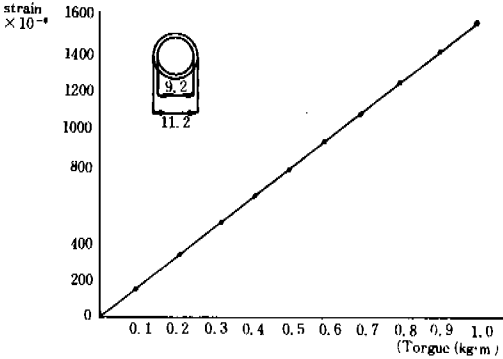


Fig. 11. Static calibration on 1kg-m torque transducer.

5.1.2. 온도 특성

용량 T=0.55 kg·m의 토오크變換器를 10℃ 간격으로 20℃~70℃ 까지 균일하게 가열할 때 零點移動은 50℃ 이하에서는 30×10⁻⁶ 스트레인 정도로 지시되나 60℃ 이상에서는 급격히 零點移動이 증가됨을 볼 수 있고 이것에 대한 관계가 Fig.12 와 表 1에 도시되었다.

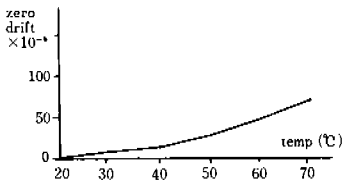


Fig. 12. Relation of temperature VS zero drift.

Table. 1. Temp. VS. Zero drift.

Temp (°C)	Zero Drift (×10 ⁻⁴)	%F·S
20	0	0
30	10	0.62
40	15	0.93
50	30	1.87
60	51	3.18
70	78	4.87

5.2. 動的 特性 特性

5.2.1. 零點 移動量(無負荷時)

용량 T=0.55 kg·m의 토오크變換器에서 스트레인게이지 저항 120Ω 과 350Ω 으로서 實驗한 零點移動量은 Fig. 13 에서와 같이 120Ω 에서는 회전수와 시간의 경과에 따라서 증가하며 350Ω 에서는 회전수의 증가에 따라 약간 증가하나 시간의 경과후에는 거의 일정한 값에 도달됨을 Fig. 14 에서 도시하고 있다.

또한 가동 후 30분과 200분후의 상태를 오실로그래프로 Fig. 15 에 기록하였다.

5.2.2. 動的 特性(負荷時)

각각의 토오크變換器에 있어서 負荷의 증가로 인한 零點移動量은 無負荷時보다 크게 증가하였으며 토오크 1kg·m 에서는 28×10⁻⁶ 스트레인 (1.75% F·S) 이 이동하였다.

또한 0.55 kg·m의 토오크變換器에서는 스트레인 게이지 저항 120Ω 과 350Ω 을 使用했을 때를 Fig. 16 에 도시하였다.

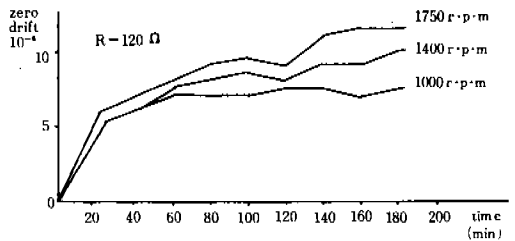


Fig. 13. Relation between zero drift and time by revolution on 120.

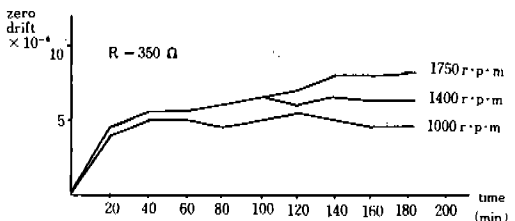


Fig. 14. Relation between zero drift and time by revolution on 350.

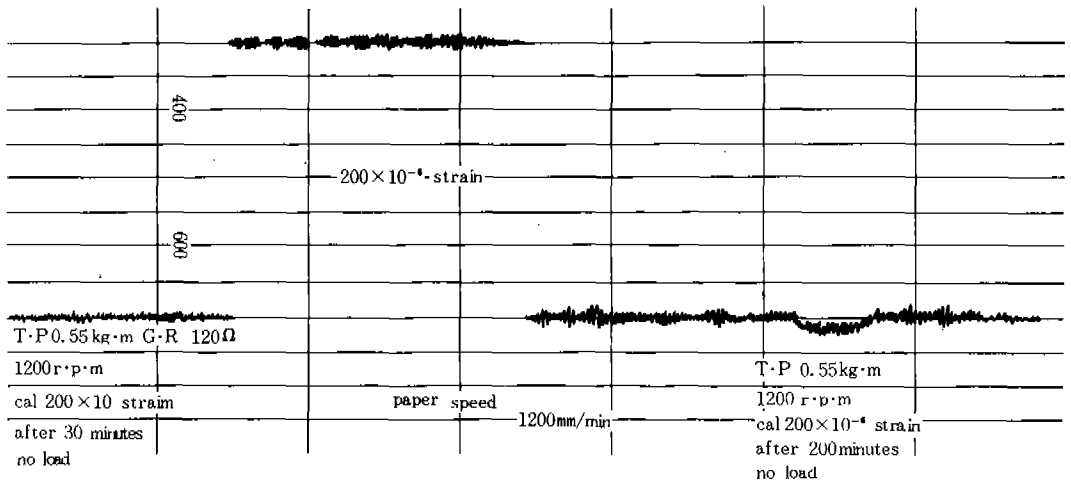


Fig. 15. Zero drift after 30 minutes and 200 minutes on 0.55kg-m torque transducer with G.R 120 Ω

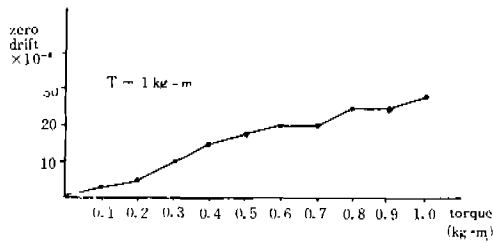


Fig. 16. Relation torque and zero drift by increasing load 1kg-m torque transducer.

5.2.3. 受感體의 固有 振動數

리사쥬 圖形(Lissajous Diagram)에 의해 기본 진동수를 測定한 결과 1,220 Hz 의 固有 振動數를 얻었다.

6. 考 察

① 스트레인 게이지 접착방향에 따른 誤差는 式(25)로 부터 表 2에서 나타낸 바와 $\Delta\phi = 5^\circ$ 에 대하여 1.52% F.S의 誤差를 발생하므로 접착에 있어서 세심한 주의가 필요하다.

Table 2. Error of strain gauge attachment in direction.

$\Delta\phi$	1°	2°	3°	4°	5°	6°
% F.S	0.061	0.24	0.55	0.97	1.52	2.2

② Fig. 12에서와 같이 온도특성은 60°C 이하에서는 비교적 良好하고 60°C 이상에서는 급격히 증가한다.

그러므로 이것은 Fig. 12에서와 같이 온도보상을 함으로써 100°C까지도 사용할 수 있으나 60°C 이하에서 사용하는 것이 좋다. 또한 회전할 때 실험 장치로부터의 열전도와 베어링 및 슬립링의 발열이 있으므로 受感部의 온도가 상승하고 不均一하게 되어 零點移動量이 증가하기 쉽다. 그러므로 長時間 測定時는 베어링에 냉각유를 공급해야 한다.

③ 스트레인 게이지 저항을 120 Ω과 350 Ω을 사용했을 때 350 Ω이 零點移動이 적게 나타난 것은 일정한 전압에 대하여 전류의 변화량이 350 Ω을 사용했을 때 더 작기 때문이다.

7. 結 論

(1) 無負荷時 中空軸을 사용한 토오크變換器의 直線性, 히스테리시스, 零點移動量이 모두 1% F.S 以內로 良好하다.

(2) 토오크變換器에 사용되는 스트레인 게이지의 저항값은 120 Ω보다 350 Ω의 것을 권장한다.

(3) 負荷時의 零點移動量은 最大負荷時에 2% F.S 以內이다.

(4) 本 論文에서는 受感體로서 中空軸과 검출회

로로서는 세로브론 브리지타입 (Schrobron bridge type)을 적용하여 低容量 토오크 (1 kg·m 以下) 測定에 있어서 精度向上에 기여하나 경제적인 면을 고려해야 한다.

앞으로 이를 기초로 하여 非接觸形 토오크 變換器와도 비교하여 여러 특성에 대한 연구를 계속할 생각이다.

參 考 文 獻

1. L. Z. Syuck, J. C. Fogle and R. R. Haynes ; Dynamics Micro-Torque Transducer, SE SA 1971. No. 1, p. 276.
2. Richard S. Sucver ; Torsional-Impact Apparatus, SESA 1972, No. 1, p. 398.
3. Milton J. Lebow ; Measurement of Torque, Measurement and Data, January-February 1972, p. 72.
4. 馬越立郎 ; 最近の應力測定技術(2), 機械の研究,

vol. 31, No. 5, 1979.

5. 馬越立郎 ; 回轉体の應力測定と應力波形読み取り法について、日本 NDI 應力ひずみ 測定 Symposium, No. 11, 1979.
6. 松嶋仁 ; スリップリングに関する一實驗, 日本 NDI, 第21卷 第9號, p. 594.
7. 赤律・萩原 ; スリップリングの接觸抵抗の影響について、日本 NDI 應力ひずみ測定 Symposium, No. 11, 1979.
8. 韓應教 ; 스트레인게이지 - 理論과 應用, 普成文化社, 1980.
9. Tomas G. Beckwith/N. Lewis Buck ; Mechanical Measurement, 2nd edition, pp. 343 ~ 372.
10. Fitzgerald, Kingsley, Kusko ; Electric Machinery, Kogakusa, 3rd edition, pp. 348~359.
11. 武政隆一 ; 電氣ブラシの性能と使用法, 東京電機大學出版局.