

스파타가공법을 이용한 스트레인 게이지의 개발 및 특성에 관한 연구

한 응 교* · 노 병 옥** · 이 명 호***

A Study on the Development and Characteristics of Strain Gauge using Sputter Machining

E. K. Han, B. O. Rho and M. H. Lee

Abstract The control of resistance of foil strain gauge is accomplished by means of etching technique. Thus, there is an irregularity in metal foil. In order to solve this problem, ion sputter machining method has been used to make strain gauge in this study and the characteristics of this strain gauge are investigated. As the result of this study, it was possible to make a flexible strain gauge which can be used to measure the stress. The strain gauge made by authors shows superior characteristics in creep, O point variance, hysteresis and nonlinearity by surrounding temperature.

1. 서 론

전기저항체를 이용하여 그 저항값의 변화량으로 물체의 변형도를 직접 측정하고자 시도한 것은 매우 오래전부터의 일이며 1856년 Load Kelvin은 인장력을 받는 어떤 금속세선이 그 고유 저항값이 변한다는 것을 발표하였으며 그것이 오늘날의 스트레인 게이지로 발전계승된 것^{1,2)}이라 볼 수 있다.

종래의 Foil Strain Gauge는 저항조정을 에칭을 통하여 하였기 때문에 금속박이 불균일 하게되는 단점이 있다.

그래서 이러한 문제점을 보완하기 위해 스파타가공을 이용하여 세라믹재료 또는 절연체에 어드밴스 스트레인 게이지 재료(Advance Strain Gauge Material, Cu 55%, Ni 45%)를 증착하여 변환기용 스트레인 게이지로 사용^{3,4,5)}하였다.

그런데, 이 방식은 피측정체에 직접 증착하여야 하므로 Flexible한 재료에 증착하기가 어려우며 또한 Cu와 Ni의 불균일 분포가 생겨서 이를 해결하기 위해 열처리를 하여야하며 여기서 베이스가 고온에 견디어야 하는 등의 문제점⁶⁾이 있다.

따라서 이 문제를 해결하기 위한 방법은 대체로 3

*한양대학교 정밀기계공학과

**한양대학교 대학원

***서울산업대학교 기계설계학과

접수 : 1989년 9월 30일

가지 정도로 생각할 수 있다.

1) 내열성, 절연성의 변화가 없는 베이스 재료에 스파타링하여 증착시키는 방법⁷⁾

2) 내열성(세라믹) 재료에 스파타 증착시킨후 열처리한 다음 전사시키는 방법^{8,9)}

3) 현재 사용하고 있는 에칭형 포일 스트레인 게이지 4 μ m의 베이스(폴리미드)를 단순한 밴드형의 패턴으로 스파타가공하여 0.3~0.7 μ m까지 박막으로 만들어 저항을 조정하는 방법 등이 있다.

따라서 본 연구에서는 4 μ m의 어드밴스 재료에 Mask(폴리미드)를 부착하고 0.3~0.7 μ m의 두께가 되도록 스파타 가공¹⁰⁾을 해서 포일 스트레인 게이지에서 생기는 금속박의 불균일과 증착에서 생기는 Cu, Ni의 성분 불균일을 없애기 위한 새로운 스파타 밀링 가공식 스트레인 게이지 제작의 기초 실험으로서, 폴리미드의 이온 스파타가공 및 온도특성에 관하여 보고하고자 한다.

2. 이 론

2-1. 스파타링 현상의 이론해석

이온빔에 의한 Sputter 현상은 근본적으로 양전하를 가진 기체이온이 Target 입자와 충돌함으로써 표면 근방에서 결합되어 있는 Target 입자가 방출되는 것을 나타낸다.

이 Sputter 현상은 Sputtering yield라는 용어으로써 Sputter 현상의 정도를 설명하고 있다.

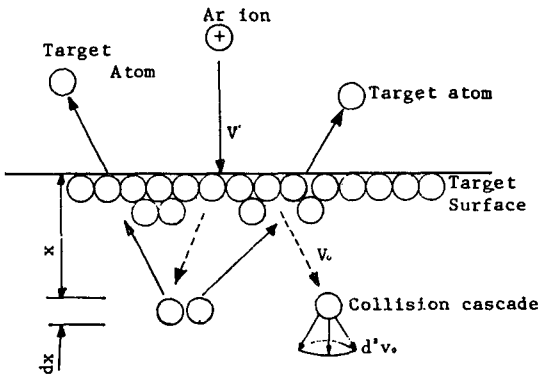


Fig. 1 Schematic of ion sputter.

즉 Fig. 1과 같이 임의의 속도벡터(V_0, d^3V_0)로 $X=0$ 인 표면에 이온이 조사될 때, 표면근방의 (X, dx)층에서 t 시간에 이동되는 평균 원자수는

$$G(X, V_0, V_1, t) d^3v_0 dx \dots\dots\dots (1)$$

로 정의하면

(V_0, d^3v_0)의 속도로 X 평면을 지나는 원자수는

$$G(X, V_0, V_1, t) d^3v_0 V_{0x} dt \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 주어진다.

여기서 V_{0x} 는 V_0 의 x 성분이다.

따라서 Target 표면($x=0$)에서의 반동되는 Sputtering yield는

$$S = \int d^3v_0 |V_{0x}| \int_0^\infty dt G(0, V_0, V_1, t) \dots\dots\dots (3)$$

와 같이 표시된다.

또 $x=d$ 인 면에서는

$$S = \int d^3v_0 v_{0x} \int_0^\infty dt G(d, V_0, V_1, t) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 V_{0x} 는 항상 (+)로 된다.

P.Sigmund는 Edgeworth expansion^{11,12)}하여 $X=0$ 인 표면에서의 에너지부여는

$$F(E, \eta, X=0) = \alpha(M_2/M_1, \eta) \cdot N \cdot Sn(E) \dots\dots (5)$$

로 나타낼 수 있다고 제안하였다.

따라서

$$S(E, \eta) = H(X=0, E, \eta) = \frac{3}{4\pi^2} \frac{F(X=0, E, \eta)}{N \cdot C_0 \cdot U_0} \dots\dots\dots (6)$$

그러므로 $X=0$ 인 표면에서의 Sputtering yield는

$$S(E, \eta) = \frac{3}{4\pi^2} \frac{1}{N \cdot C_0 \cdot U_0} \alpha(M_2/M_1) \cdot N \cdot Sn(E) = 0.0420\alpha(M_2/M_1) Sn(E)/U_0 A^2 \dots\dots\dots (7)$$

로 나타낼 수 있다.

여기에서 η : 방향코사인(V_x/V)

N : Target 원자의 밀도

C_0 : 단면상수

U_0 : Target의 결합에너지

M_1 : 이온질량
 M_2 : Target 질량

2-2. 각도의존성

일반적인 균일물질에서 각도의 영향을 생각하면 수직입사인 경우와 임의각 θ 일때 그 비를 Sputtering yield (7)식으로 부터 방향여현 η 만으로 나타내면

다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{S(E, \eta)}{S(E, 1)} = \frac{\alpha_\eta}{\alpha_1} = \eta^f = (\cos\theta)^f \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $S(E, 1)$ 은 수직($\cos 0^\circ = 1$)으로 입사하는 경우의 스파터율이다.

따라서 η 가 감소(θ 의 증가)하면 Sputter Yield $S(E, \eta)$ 는 증가하지만 최적 가공각도($45^\circ \sim 60^\circ$)를 지나면 $S(E, \eta)$ 는 다시 감소되는 경향을 보이는데 이는 이온 입사각도가 0° 일 때, 즉 수평입사할때는 스파터가공이 전혀 되지 않기 때문이다.

또한 최적가공각도는 금속의 재질에 따라 각각 다르므로 정확히 규정하기는 힘들다.

일반금속에서는 가공시간이 길어짐에 따라 가공량은 점점 증대되는 경향을 보이고 있다.

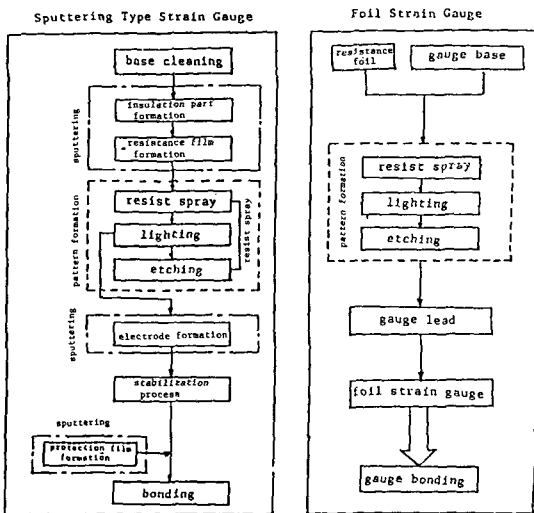


Fig. 2 Manufacturing process for sputtering type strain gauge and foil strain gauge.

2-3. 스파터링 스트레인 게이지의 제작공정

Fig. 2는 스파터링법에 의한 스트레인 게이지의 제작공정과 포일 스트레인 게이지의 제작공정을 비교해 놓은 것이다.

Fig. 2에서도 알 수 있듯이 스파터형 스트레인 게이지의 제작공정은 종래의 스트레인 게이지의 제작공정과 전혀 다르다.

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험장치

본 실험에 사용한 장치로는 Fig. 3과 같은 내부구조인 Kaufman형 이온 샤워식 가공장치를 이용하였다.

그리고 Photo. 1은 실험에 사용한 이온 스파터 가공기의 전체 외관이다.

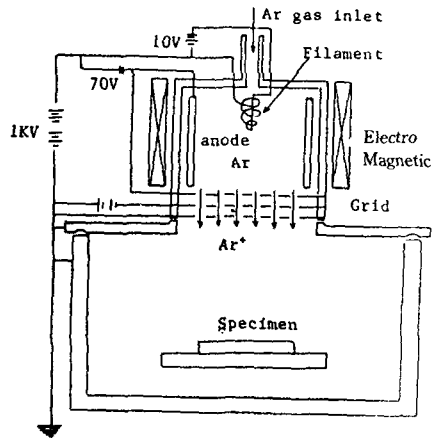


Fig. 3 Schematic diagram of ion sputtering equipment.

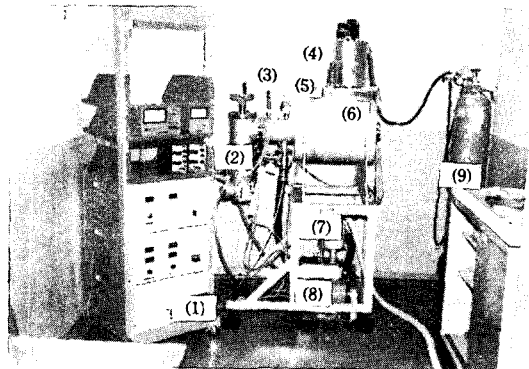


Photo. 1 Ion sputter-machining apparatus

No,	Item
1	Electric Supply Set
2	Diffusion Pump
3	Pirani Vacuum Gauge
4	Ion Source
5	Ionization Vacuum Gauge
6	Chamber
7	Rotary Pump
8	Motor
9	Argon Gas Tank

이 이온원은 가공기의 내부압력 및 전압, 전류 등에 변화가 적고, 안정하게 이온화되는 Ar가스를 주입하여, 캐소드(필라멘트)에서 발생된 열전자에 의하여 가스가 이온화되고, 이 플라즈마상태의 이온 중에서 (+) 이온만 전위차를 이용하여, Fig. 4와 같은 3매의 다공질인 그리드(직경 92mm 원판에 $\phi 0.35\text{mm}$ 의 구멍이 163개 있음)를 통하여 가속되어 가공실로 인출되며, 이때

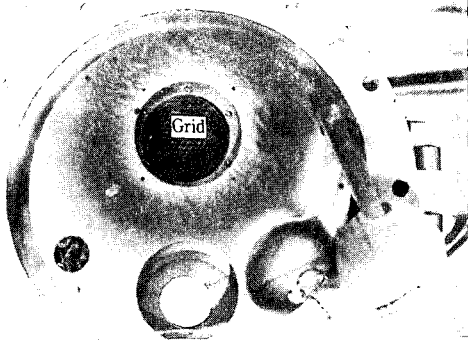
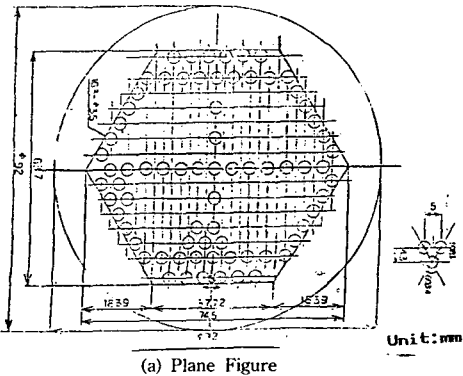
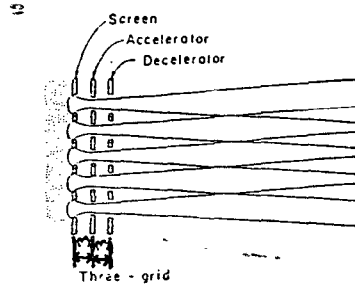


Photo. 2 Bottom of the ion source part



인출된 이온빔은 중진공상태인 ($1 \times 10E(-3)$ Torr 이하) 가공실에서 가공물에 충돌하면서 가공이 이루어진다.



(b) Cross Section Figure (Unit : mm)

Fig. 4 Grid form.

Photo. 2의 상부는 이온실의 Grid 형상을 나타내고 있으며 하부는 가공실을 나타낸 것이다.

Ion-Optic에는 확산형(Diffusion Type)과 집속형(Focus Type)이 있는데 본 실험에서는 Fig. 4의 (b)와 같은 확산형을 사용하였다.

3-2. 스파타링 스트레인 게이지의 제작

Chamber내를 진공상태로 만들기 위해 진공펌프 중에서 우선 저진공용 유희전 진공펌프를 모터의 가동으로 피라니진공계(PG1)가 $1 \times 10E(-3)$ Torr 정도가 될때까지 진공시킨후, 고진공용 유확산 진공펌프를 가동시킨다. 이때 전리진공계(PG2)가 $1.5 \times 10E(-4)$ Torr 이하로 진공이 되면, 전원을 공급하고 Ar 개스를 주입한다. 공급된 전원은 Anode 70V, Filament 10V의 전압을 걸어 주었다.

Ar 개스는 Filament에서 방출되는 열전자에 의해 이온화 되어 가공물에 조사된다.

이때 가공을 위한 이온 가속전압은 1KeV, 이온 전류밀도 $0.38 \text{ mA} / \text{cm}^2$ 로 일정하게 유지시키면서 가공하였다.

폴리미드인 마스크의 제원은 Fig. 5와 같고 가공실 내의 가동대에 어드밴스 스트레인 게이지 재료를 놓고 그 위에 마스크를 부착한 후 Filament에서 방출된 열전자에 의해 (+)이온만 Grid를 통하여 인출되어 구

명이 뚫려있는 마스크 부위인 어드밴스를 가공하도록 하였다.

가공시간에 대한 가공깊이 및 그 깊이에서의 저항치를 측정하기위하여 가공시간은 10분 단위로 계속 가공하였으며 형상측정기(ET-10, KO SAKA, JAPAN)로 가공깊이를 측정하였으며 그때마다의 저항치를 측정하였다.

또한 식(8)에 따라서 이온입사각도를 달리할 때 스트레인 게이지의 저항치가 120Ω 에 도달되는 가공시간이 달라지므로 이온입사각도를 달리해가면서 이온입사각도가 가공시간에 어떠한 영향이 미치는가를 알아보았다.

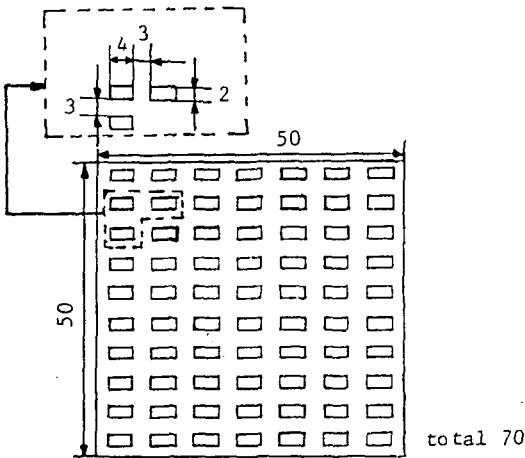
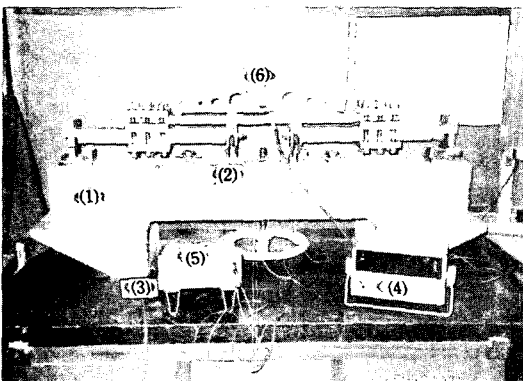


Fig. 5 Dimension of polimid mask, (unit:mm).

3-3. 게이지의 실험



No,	Item	Model
1	Strain Gauge Factor Measurement Apparatus	
2	Bridge Head	
3	Dummy Gauge	
4	Digital Strain Meter	Showa Sokki DS-100
5	Multi Tester	HEWLETT PACKED 3478A
6	Dial Gauge	Tokyosemitsu Kogyo

Photo. 3 Experimental apparatus of strain gauge factor

Photo. 3에 있는 게이지용 측정기의 핸들을 돌리면 보의 굽힘이 발생하며 이를 다이알게이지로부터 굽힘량(처짐량)을 측정하고 또한 저항측정기로 부터 변화한 저항을 측정한다.

동시에 디지털 스트레인 메타로부터 변화한 스트레인량을 측정한다. 위의 과정에서 게이지용은 저항변화량/스트레인변화량 으로부터 구할 수 있다.

3-4. 스파타가공에 의해 제작한 스트레인 게이지의 온도특성

스파타가공에 의해 제작한 스트레인 게이지의 온도의 변화에 의한 0점의 변화량, 크리이프, 히스테리시스 등을 실험하였다.

스트레인 게이지를 저용량 로드셀에 붙인후 온도를 -20°C 에서 부터 180°C 까지 변화시키면서 무부하상태에서의 0점의 이동량을 측정하였으며 또한 같은 온도

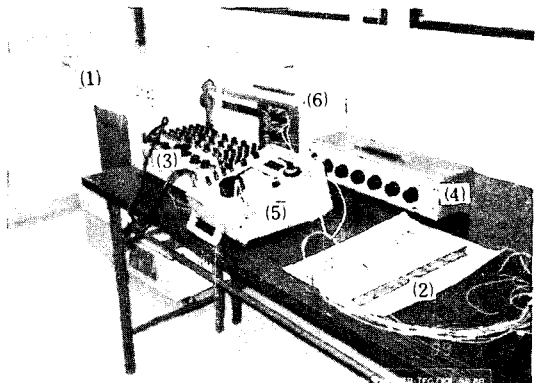


Photo. 4 Experimental apparatus of strain gauge temperature characteristics.

No.	Item	Model
1	Constant Temperature Oven	Yamato. N63. Japan
2	Load Cell	A1. max force 6Kg
3	Switch Box	Tokyo Sokki. SW-12D. Japan
4	Resistance Box	Yokogawa. Type 2793. Japan
5	Strain Meter	Tokyo Sokki. TS-1B. Japan
6	2Pen Recorder	Yokogawa. Type3056. Japan

구간에서 하중 6Kg에 대한 크리프량과 히스테리시스량을 측정하였다.

또한 종래의 포일 스트레인게이지의 성능을 비교하기 위하여 상기의 실험을 포일 스트레인 게이지에 대해서도 실험을 행하였다.

Photo. 4는 스트레인 게이지의 온도특성 실험장치를 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 스파타링에 의한 새로운 스트레인 게이지의 형성

Fig. 6은 이온 스파타링법에 의해 제작한 스트레인 게이지의 단면도이다.

이중 a는 이온입사각도가 0°일때, b는 55°일때의 스트레인 게이지의 형상이다.

이온 스파타링에 의한 스트레인 게이지는 종래의 포일 스트레인 게이지에 비해 형상이 단조로우며 균등한 두께를 갖는 밴드형임을 알 수 있었다.

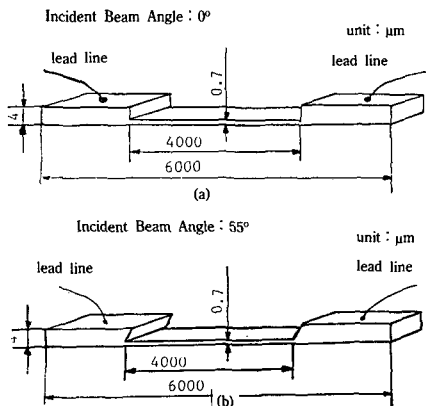


Fig. 6 Dimension and shape of sputtering strain gauge with different incident beam angle.

또한 길이 50×50mm의 마스크내에 70장 정도의 스트레인 게이지를 생산해 낼수 있어 양산성의 가능성도 보인다.

4-2. 이온 입사각도와 가공시간

식(8)에 따라서 이온 입사각도를 달리할 때 가공시간이 달라지므로 이온 입사각도를 달리해가면서 가공시간에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보았다.

Fig. 7은 이온입사각과 가공시간과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 입사각도 0°는 시험편에 대해 수직으로 입사하는것을 0으로 하였다.

여기서는 120Ω에 도달할 때 까지의 가공시간이 이온입사각도가 55°일 때 가장 짧은것을 알 수 있다.

따라서 스트레인 게이지에 가장좋은 이온입사각은 55°임을 알 수 있었다.

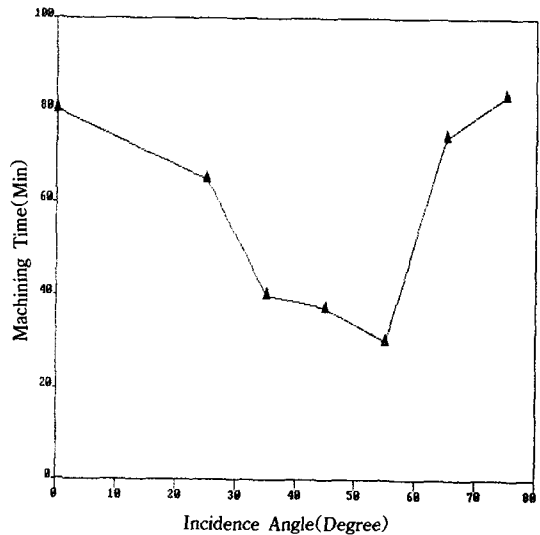


Fig. 7 Relation between machining Time and incidence angle.

4-3. 가공시간에 대한 가공깊이 및 저항치

가공시간에 대한 가공깊이 및 저항치의 관계를 Fig. 8, 9에 나타내었다. Fig. 8은 이온입사각도가 0°일 때, Fig. 9는 55°일때의 것이다.

그림에서와 같이 가공깊이는 가공시간에 비례하고 있으며 120Ω의 스트레인 게이지를 제작하는 경우에 있어서 이온입사각이 0°일때는 80분, 55°일때는 30분이 적절함을 알 수 있다.

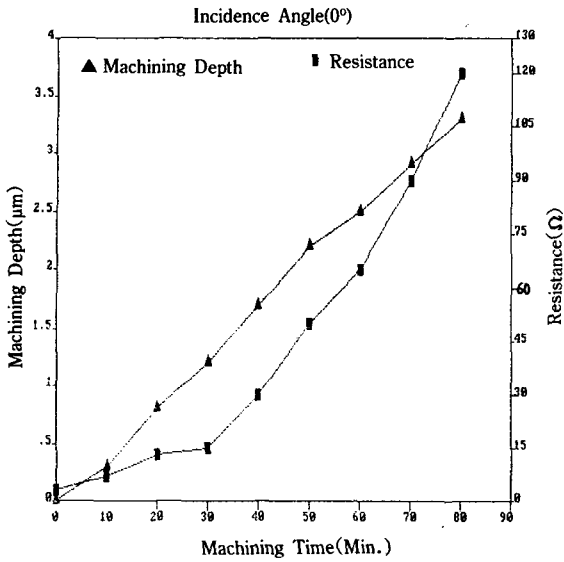


Fig. 8 Change of machining depth and resistance with machining time(Incidence beam angle: 0°).

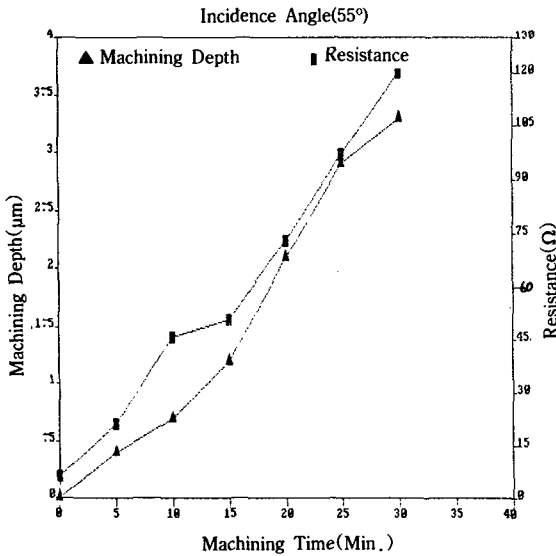


Fig. 9 Change of machining depth and resistance with machining time(Incidence beam angle: 55°).

4-4. 게이지율

본 연구에서 제작한 120Ω 스트레인 게이지를 임의로 10장을 선택하여 게이지율 검정기에 붙인 후 게이지율을 실험하고 그 평균값을 구하여 1.98을 얻었다.

게이지율은 저항변화와 스트레인변화의 비율로서 구하므로 Fig. 10에 실험한 저항변화에 따른 스트레인변화의 하나를 나타내었다.

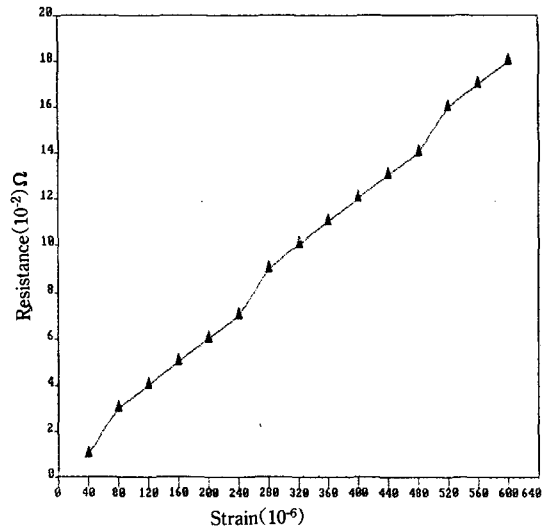


Fig. 10 Relationship between strain and resistance.

4-5. 試作한 스트레인 게이지의 특성

4-5-1. 크리이프

온도 -20℃부터 180℃까지 40℃ 간격으로 하중 6 Kg을 가하여 100시간 동안의 크리이프 변화량을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 크리이프의 변화량은 스파타식 스트레인 게이지가 종래의 Foil Strain Gauge에 비해서 훨씬 우수함을 알 수 있다. 특히 고온영역(140℃ 이상)에서는 현저한 차이를 알 수 있으며 이는 스파타식 스트레인 게이지가 형태가 단순하며 하나의 저항체로 구성되어 있기 때문이라고 생각된다. 크리이프량이 적다는 것은 게이지를 변환기의 센서에 부착하여 사용할 때 외부조건에 대한 출력의 변화가 적다는 것을 의미하기 때문에 스파타식 스트레인 게이지의 출력이 종래의 포일 스트레인 게이지에 비해 안정되리라 생각된다.

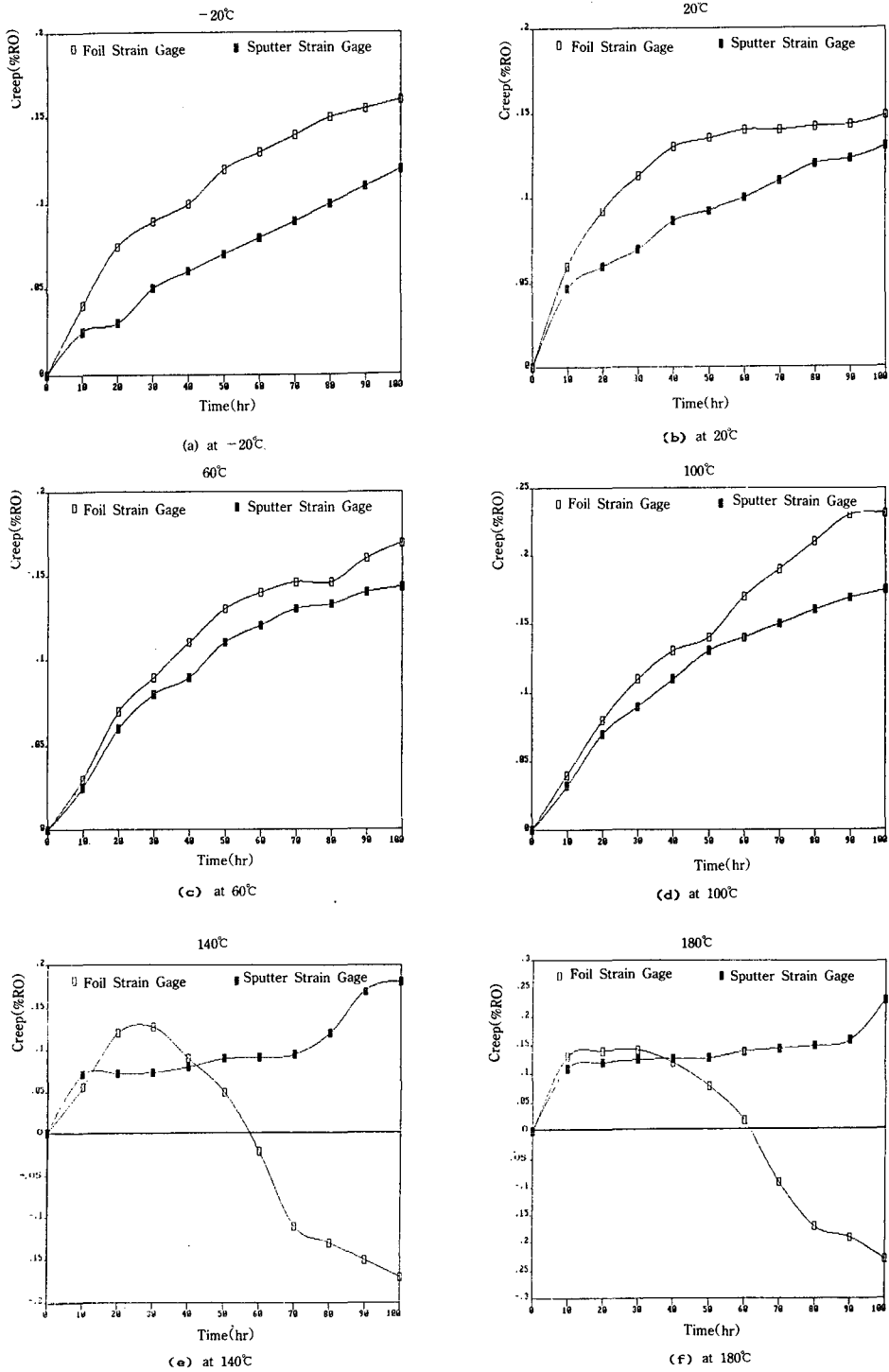


Fig. 11 Difference of creep characteristics between foil strain gauge and sputter strain gauge at each temperature.

2. 온도의 변화에 따른 0점의 이동량

온도를 -20°C 에서 부터 180°C 까지 변화시키면서 무부하상태에서의 영점의 이동량을 -20°C 를 기준으로 하여 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 온도의 변화에 따라 2종류의 게이지는 0점의 변화가 발생하기는 하나 그 변화량은 스파타식 스트레인 게이지가 180°C 까지 약 1.3% RO 정도였으나 종래의 포일 스트레인 게이지는 약 2.7% RO로 0점의 변화량이 큼을 알 수 있었다.

크리프 특성과 마찬가지로 0점의 변화량도 스파타식 스트레인 게이지가 종래의 포일 스트레인 게이지에 비해 훨씬 안정되어 있음을 알 수 있다.

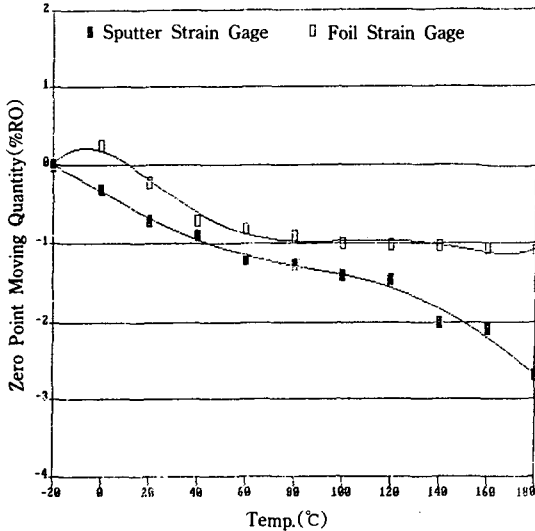


Fig. 12 Variation of zero point moving quantity with temperature.

3. 온도의 변화에 따른 히스테리시스 및 비직선성

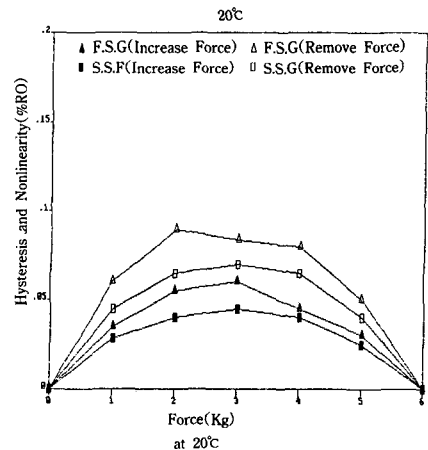
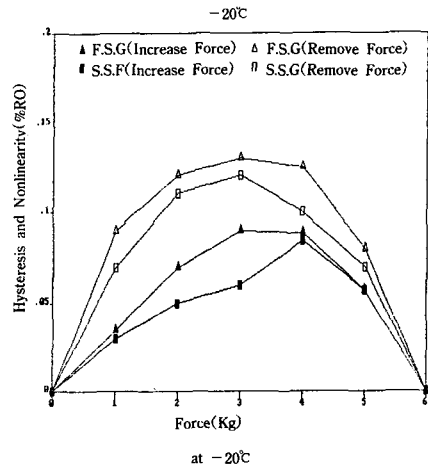
Fig. 13은 온도를 -20°C 에서 180°C 까지의 히스테리시스 및 비직선성의 변화량을 스파타식 스트레인 게이지와 종래의 포일 스트레인 게이지에 대해 각각 측정하여 나타낸 것이다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 실온영역(20°C)과 고온영역(140°C)에서의 히스테리시스 및 비직선성의 변화는 시작한 스파타식 스트레인 게이지가 종래의 포일 스트레인 게이지에 비해 훨씬 안정되어 있음을 알 수 있다.

스파타식 스트레인 게이지의 히스테리시스 및 비직선성의 편차는 실온에서 최대 0.05% RO의 편차량을 보이며 고온영역(180°C)에서는 스파타식 스트레인 게이지는 0.11% RO의 편차를 보인다.

전 온도범위에 있어서 부하특성(히스테리시스, 비직선성)의 편차량은 크리프 특성, 영점의 변화특성과 마찬가지로 스파타식 스트레인 게이지가 더 우수함을 알 수 있다.

5. 결 론

종래의 포일 스트레인 게이지와 스파타형 스트레인 게이지의 단점을 개선하기 위한 새로운 이온식 스파타형 스트레인 게이지 개발에 관한 기초적인 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



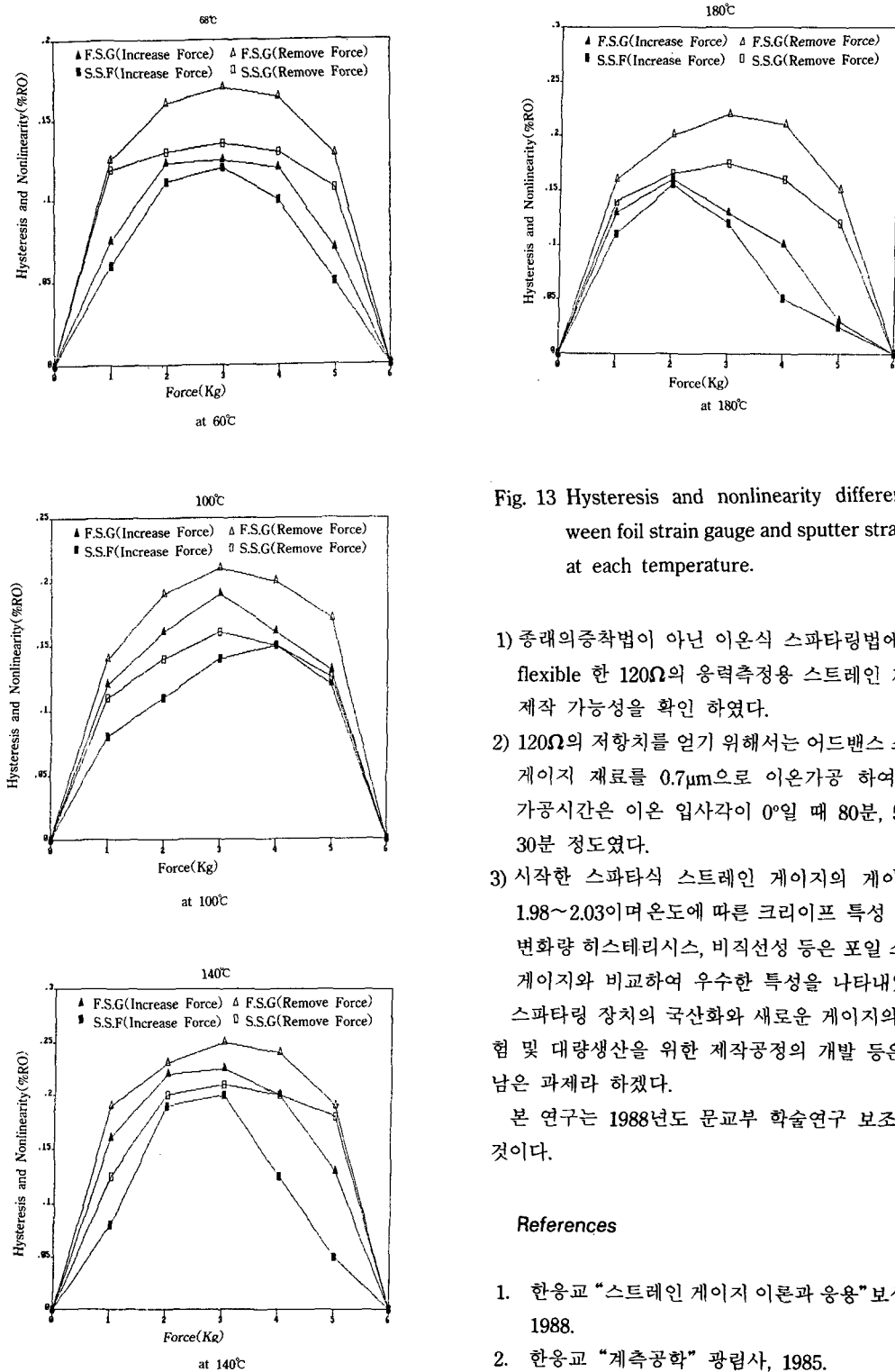


Fig. 13 Hysteresis and nonlinearity difference between foil strain gauge and sputter strain gauge at each temperature.

- 1) 종래의 증착법이 아닌 이온식 스파타링법에 의해서 flexible 한 120Ω 의 응력측정용 스트레인 게이지의 제작 가능성을 확인 하였다.
- 2) 120Ω 의 저항치를 얻기 위해서는 어드밴스 스트레인 게이지 재료를 $0.7\mu\text{m}$ 으로 이온가공 하여야 하며 가공시간은 이온 입사각이 0° 일 때 80분, 55° 일 때 30분 정도였다.
- 3) 시작한 스파타식 스트레인 게이지의 게이지율은 1.98~2.03이며 온도에 따른 크리이프 특성 및 0점의 변화량 히스테리시스, 비직선성 등은 포일 스트레인 게이지와 비교하여 우수한 특성을 나타내었다. 스파타링 장치의 국산화와 새로운 게이지의 성능시험 및 대량생산을 위한 제작공정의 개발 등은 금후에 남은 과제라 하겠다. 본 연구는 1988년도 문교부 학술연구 보조에 의한 것이다.

References

1. 한응교 "스트레인 게이지 이론과 응용" 보성문화사, 1988.
2. 한응교 "계측공학" 광림사, 1985.

3. 藤井 積『スパッタリング法によるひずみゲージ』
Sensor Device 1987, Vol. 7, No. 5, pp.59~63.
4. 大倉 征『スパッタ型ひずみゲージと圧力変換器』
計測技術, 87, pp.54~59.
5. 西村秋典 外 2名『蒸着膜を利用したひずみ計測素子』
NDI 資料 No. 4502.
6. G. Ehrlich:1961 Trans. 8th Natl. Vac. Symp. 2nd
Intern. Congr. Vac. Sci. Tech., 1962, pp.126, Pergamon.
J. P. Hobson:Brit. J. Appl. Phys. 14, 1963, American
Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill, New
York, 1957.
7. R. C. Weast:Handbook of Chemistry & Physics
49th ed., Chemical Rubber Co.
8. G. Tominaga:Japan, J. Appl. Phys., 4, 1965.
H. Shelton & A. Y. H. Cho:J. Appl. Phys., 15, 1964.
9. G. Ehrlich:Brit. J. Appl. Phys., 15, 1964.
10. 한응교, 박재민 “이온스파타 가공을 한 금속표면의
표면거칠기에 관한 연구” 한양대 대학원 학위논문,
1989.
11. Peter Sigmund 『Theory of Sputtering 1:Sputtering
Yield of amorphous and polycrystalline targets』
Phy. Rev. Vol. 184, No. 2, 1969, pp.384~416.
12. H. Cramer Mathematical Methods of Statics(Prin-
ceton Univ. Press, Princeton N J 1945).
13. Fundamentals of Ion-source Operation Horold R
Kaufman Commonwealth scientific corporation,
Alexandria, Virginia.
14. 計量管理『真空の應用』1987. Vol. 36, No. 11, pp.17.
15. 奈良治郎『表面粗さの測定, 表示の動向』精密機械
1985, 51, 5, pp.73.
16. A. L. Southern 外 3人 『Sputtering Experiments
with 1 to 5 KeV Ar Ions』 J. App phy 1963, Vol.
34, No. 1, pp.153~163.
17. J F Ziegler 『The stopping and range of ions in
solids』 Ion Implantation Science and Technology
IBM-Research pp.51.
18. P Sigmund, C Claussen 『Sputtering from elastic-
collision spikes in heavy-ion bombard metals』 J
App phy 1981, Vol. 52, No. 2, pp.990.
19. P Sigmund 『Recoil implantation and Ion-beam-in-
duced composition changes in alloys and compou-
nds』 J App phy 1979, Vol. 50, No. 11, pp.7261.
20. 志水 隆一 外 5人 『スパッタリング』應用物理 1981,
Vo. 50, No.5.
21. Ion Implantation, Sputtering and their applications
written by P D Townsend, written by P D Town-
send, J C Kelly, N E Hartley. Academic press 1976.
22. Nils Lafgreid, G K Wehner 『Sputtering yield of
metals for Ar and Ne Ions with energies from 50
to 600 eV』.
23. G. D. Magnüson, C. E. Carlston 『Sputtering yield
of single crystals bombarded by 1 to 10 KeV Ar
Ions』 J. App phy 1963, Vol. 34, No. 11, pp.3267~
3273.
24. 金釜憲夫, 宮 俊行 『イオンビームスパッタ加工
における金屬試料の溫度』精密機械 1979, Vol. 45,
No. 8, pp.962.
25. 直江 正彦 外 2人 『イオンビームスパッタによる膜
形作成とその應用』金屬表面技術.
26. Handbook of Thin Film Technology-written by
Maissel, Glang.
27. 薄膜作成基礎 第2版 日刊工業 麻花時立男 著
28. 入門真空薄膜・スパッタリグ 毛里 衡, 數坂 昭夫
共著 技報堂出版
29. 谷口 紀男 『無機材料のイオンビームスパッタ加工』
日本機械學會 1972, Vol. 75, No. 641, pp.106.
30. 志直俊夫 井上徳 『イオンスパッタ 加工の表面粗さに
關する研究-SKDI』精密機械會 92.