

## NiCrFe 박막 스트레인 게이지

이연석\*, 박흥준\*, 표성열\*\*, 민남기\*\*  
 \*(주)카스, \*\* 고려대학교

### NiCrFe Thin Film Strain Gages

Youn Suk Lee\*, Heung Joon Park\*, Seong Yeol Pyo\*\*, Nam Ki Min\*\*  
 \*CAS, \*\*Korea University

**Abstract** - NiCrFe 박막을 이용한 정밀급 박막 스트레인 게이지를 개발하였으며, 그 특성을 요약하면 다음과 같다. 스트레인한계: 5 % 이하, 저항: 350 ~ 2,000 Ω, 게이지 율: 2.1, 정도: 0.1 %, 피로한계 :  $10^6$  at  $\pm 1500 \mu\epsilon$ , 사용온도범위: -75 ~ 150 °C, 온도 출력:  $\pm 1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ , 게이지율변화 : + 0.009 %/°C. 국산화된 박막 스트레인 게이지는 디지털 로드 셀 등에 적용할 수 있으며, 이 분야의 국내 기술력 향상에 이바지할 것이다.

### 1. 서 론

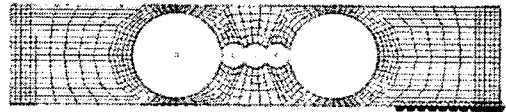
현재 국내에서 각종 로드 셀 및 압력센서 등에 사용되고 있는 박형(foil type) 스트레인 게이지는 직선성, 분해능, 경시 안정성 등이 우수하여 고정밀 정하중 측정에는 적합하지만, 높은 소비전력, 수작업에 따른 저가화의 어려움, 접착제 사용으로 인한 사용온도제한(100°C 이하) 등으로 생산현장에서 많은 문제를 야기하고 있다. 이에 반하여, 박막 스트레인 게이지는 접착제를 사용하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 사용온도범위(-30~180°C)가 넓다. 박막 스트레인 게이지는 비록 박막처리에 따라 고분해능 실현을 위한 보상한계가 제한되어 정밀도가 다소 떨어지는 문제점이 있으나, 제조공정의 자동화, 수율향상, 저가격화, 소형화, 집적화가 용이하다.[1-2]

본 연구에서는 두 종류의 박막 스트레인 게이지를 개발하였다. TFG 1000은 유리기판 위에 감지 물질로 NiCrFe 박막, 전극으로 Cu막을 증착하여 제작하였다. TFT 1000은 자체 설계한 스테인리스 스틸 다이어프램 위에 SiO<sub>2</sub> 절연막, NiCrFe 박막, Cu박막을 직접 증착하여 제작하였다. 본 연구에서는 고정밀급 박막형 스트레인게이지를 국산화함으로써 감지소자에 대한 요소 기술을 확보하고 성능향상을 도모함으로써 이 분야의 국내 기술력 향상에 이바지하고 선진 제품과 경쟁이 가능하게 되었다.

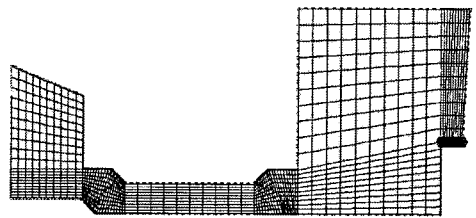
## 2. 박막 스트레인 게이지 제작

### 2.1 탄성체 설계 및 제작

탄성체(spring element)는 제품의 성능을 원천적으로 결정한다는 측면에서, 구조의 최적설계에 의해 특성을 개선하고 설계과정에서 예측할 수 있다면 품질 향상에 결정적인 역할을 할 것이다. 따라서 박막 스트레인 게이지의 평가를 위하여 밴딩(bending)형 로드 셀에 적용되는 쌍안경 형상과 다이어프램 형상 등 두 종류의 탄성체를 설계하였다. 쌍안경 구조의 탄성체 재질은 Al2024이며 플랫폼은 강체로 가정하였다. 플랫폼 꼭지점에 5kg의 하중이 작용되는 경우에 대한 응력해석 결과, 변형률의 분포는 그림 1(a)와 같다. 다이어프램형 탄성체의 재질은 스테인리스 스틸이며, 300kg의 하중이 작용하였을 경우에 대한 응력해석 결과, 변형률의 분포는 그림1(b)와 같다.



(a) 쌍안경 구조로 설계된 탄성체



(b) 다이어프램형 탄성체

그림 1 탄성체의 응력해석 결과

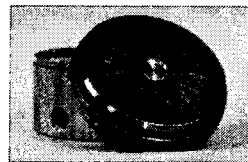
### 2.2 NiCrFe 박막 제작

그림 2는 제작된 소자의 구조이다. 그림 (a)의 TFG 1000은 유리기판 위에 감지 물질로 NiCrFe 박막, 전극으로 Cu막을 사용하였다. 그림 (b)의 TFT 1000은 스테인리스 스틸 다이어프램 위에 SiO<sub>2</sub> 절연막, NiCrFe 박막, Cu박막을 사용하였다.



Cu : 100 nm  
 NiCrFe : 100 nm  
 Glass : 150 nm

(a) TFG 1000 소자



Cu : 100 nm  
 NiCrFe : 100 nm  
 SiO<sub>2</sub> : 500 nm  
 SDS 630

(b) TFT 1000 소자

그림 2 제작된 박막 스트레인 게이지

금속 박막 및 절연박막은 magnetron sputtering 방법을 사용해 증착하였다. 그 결과만을 제시하면 표 1과 같다.

표 1 게이저 박막의 기본 특성

시험항목	시험 기준	시험 방법	시험 결과
비저항 ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	> 100	4 point probe	120
온도저항계수 (ppm/ $^{\circ}\text{C}$ )	< 100	DVM (-50 $^{\circ}\text{C}$ ~ 100 $^{\circ}\text{C}$ )	108.5
게이지율	> 2.0	G.F. Tester	2.1
균일도(% @ 3~5")	< 1	$\alpha$ -step, SEM	$\pm 4$

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 기본특성

스트레인게이지의 그리드(grid) 폭이 20, 40, 120  $\mu\text{m}$ 인 박막 증착 스트레인게이지의 여러 기본적인 특성을 시험하였다. 시험 방법은 적용 로드 셀의 정격 최대 하중인 5kg을 3회 preloading 하여 센서회로를 충분히 warming up 시킨 후 무부하 상태에서 인가하중을 1kg 씩 증가시켜가면서 각 인가하중 값에 대한 출력신호를 측정하였다. 특성시험은 각각의 박막 증착 스트레인 게이지 적용 로드 셀을 3회 반복하여 각각의 로드 셀의 특성 값을 계산하였다.

그림 3은 게이지의 비직선성을 평가한 결과이다. 비직 선성의 최대 값은 게이지 두께가 20 $\mu\text{m}$ 인 시료에서 0.1854%, 40  $\mu\text{m}$ 에서는 0.178%, 120 $\mu\text{m}$ 에서는 약 0.202%를 보이고 있어, 40 $\mu\text{m}$  게이지의 직선성이 가장 우수함을 알 수 있었다.

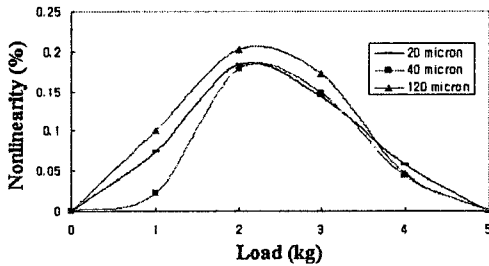


그림 3 박막 스트레인 게이지의 비직선성

그림 4는 또 다른 중요한 특성인 히스테리시스를 평가 한 결과로서, 120  $\mu\text{m}$  선폭에서 가장 특성이 좋지 않게 나오고 있으며 그 최대치는 0.313%를 보이고 있다. 그러나 40, 20  $\mu\text{m}$  선폭에서는 각각 최대값 0.247, 0.259% 을 보이고 있으며 상대적으로 좋은 특성을 나타내고 있다.

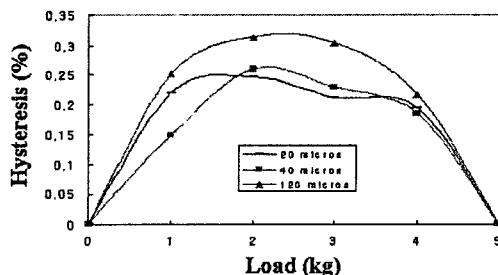


그림 4 박막 스트레인 게이지의 히스테리시스

크리프 특성은 30분을 기준으로 하여 평가하였다. 먼저 게이지에 대해서 충분한 warming이 이루어지도록 preloading을 가해 순수한 게이지 특성이 잘 나타나도록 준비한 후 평가를 수행하였다. 그림 5는 3가지 선 폭에 대해 크리프 값을 비교해서 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 약 2 - 5 분 경과 후 부터는 크리프 값은 일정한 값으로 되고, 선폭이 커짐에 따라 일정 치에 접근해 가는 시간이 증가하는 경향을 보이고 있다. 크리프율을 비교해 보면 20 $\mu\text{m}$ 에서는 0.194- 0.204%, 40 $\mu\text{m}$ 에서는 0.233- 0.242%, 120  $\mu\text{m}$ 에서는 0.269 - 0.278%로 되어, 20 $\mu\text{m}$ 에서 가장 우수한 특성을 보이고 선폭이 증가할수록 크리프 특성이 나빠진다.

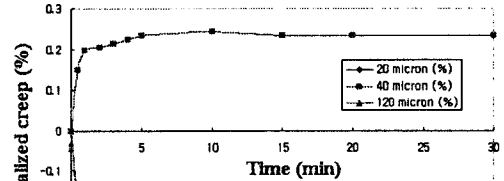


그림 5 박막 스트레인 게이지의 크리프 특성

#### 3.2 변형율의 온도 의존성

그림 6은 박막 스트레인 게이지의 열적 특성 즉, 온도변화에 따른 스트레인 게이지의 의사 변형율 (apparent strain)을 측정된 결과이다. 측정시험 결과 8개의 박막 증착 게이지의 의사 변형율의 변화량은 기준 변화량(127.4  $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ )에 대해 각각  $\pm 2.2 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 가진다. 의사 변형율의 절대 변화량은 크지만 게이지 사이의 편차가 적기 때문에 휘트스톤 브리지로 구성할 경우 브리지 저항의 불균형으로 발생되는 영점 출력 값의 차이는 작아져서 열적으로 안정된 박막증착 스트레인 게이지 로드 셀을 제작 할 수 있을 것이다.

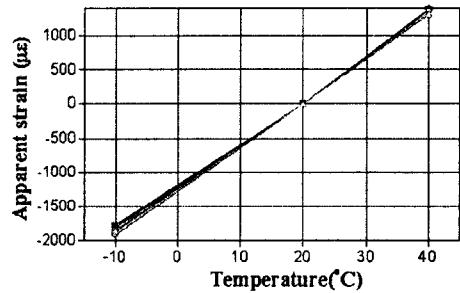


그림 6 의사 변형율의 온도 의존성

#### 3.3 열처리 영향

열처리 전후의 특성 비교는 실하중 측정장비를 이용하여 시험하였다. 시료를 -10 $^{\circ}\text{C}$ , 20 $^{\circ}\text{C}$ , 40 $^{\circ}\text{C}$ 의 설정온도에 2시간동안 유지한 후 열적 평형이 이루어지면 측정을 진행하였다. 시험도중 자체 회로에서의 발열에 의한 출력신호 값의 변동영향을 최소화하기 위해서 각 설정온도에서 3회 100kg pre-loading을 시행하여 박막 스트레인 게이지 적용 로드 셀의 전체 회로에 충분한 전류가 흐르도록 하였다. 그 다음, 0kg, 50kg, 100kg 순으로 하중인가와 반대로 하중 제거를 하면서 총 3회에 걸쳐 기본특성시험(비직선성, 히스테리시스, 크리프)을 진행 하였다. 시험시료의 열처리는 진공과 환원성 분위기에서

시행하였으며, 진공 열처리의 경우  $3 \times 10^{-6}$  torr 의 최저 진공도를 유지한 상태에서 250℃ 열처리를 시행한 결과 전극박막의 Cu층의 증발로 인하여 특성시험을 위한 soldering이 불가능하였다. 따라서 진공 열처리는 본 연구에는 부적합한 방법으로 생각된다.

반면, 전극 층의 산화를 방지하기 위해서 환원성 수소 분위기에서 열처리를 행한 결과, 전극 층에 바로 soldering이 가능하였다. 또한 열처리 온도는 로드 셀 소재(17-4 PH) 특성상 구리 석출경화 열처리 온도인 400℃이하로 하여야 한다. 본 논문에서는 열처리하지 않은 시료와, 200℃, 250℃ 수소 환원성 분위기에서 90분간 열처리를 행한 박막 스트레인 게이지 적용 로드 셀의 특성을 관찰하여 열처리 효과에 따른 특성의 변화를 관찰하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 상온에서 시험한 열처리 전후의 특성을 비교해 보면 비직선성의 경우 열처리 전의 0.055%에 비하여 250℃에서 90분간 환원성 분위기 열처리한 시료에서는 0.019%로 189%의 특성 향상을 가지고 왔으며, 히스테리시스의 경우 열처리 전의 0.076%에 비하여 열처리 후 0.047%로 특성이 62%의 향상되었고, 또한 크리프의 경우도 열처리 전의 0.067%에서 열처리 후 0.056%로 20%의 특성 향상을 나타내었다. 따라서 환원성 수소 분위기에서 열처리를 행하면 금속 박막의 내부 결정구조가 안정화되어 비직선성과 히스테리시스 특성의 향상을 가져오는 것으로 생각된다.

표 2 열처리 전후의 기본 특성 비교(측정온도: 상온)

시험온도특성	열처리 前	열처리 後	특성 향상율
비 직 선 성	0.055 %	0.019 %	290 %
히스테리시스	0.076 %	0.047 %	167 %
크리프(Creep)	0.067 %	0.056 %	20 %

표 3은 환원성 수소 분위기에서 열처리 한 시료의 시험온도에 따른 특성 값을 나타낸 것이다. 상온(20℃)의 여러 특성 값은 매우 좋은 결과를 보여주고 있으나, 저온(-10℃)에서는 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 시험시료의 크리프 특성의 변화로 인하여 특성 값들의 측정에 크리프 영향이 복합적으로 내재되어 특성 값의 저하현상으로 나타나는 것으로 사료된다.

표 3 박막 증착 스트레인 게이지 적용 로드 셀의 특성

특성 항목	비직선성	히스테리시스	크리프 (Creep)
-10 ℃	0.332 %	0.338 %	0.066 %
20 ℃	0.019 %	0.047 %	0.056 %
40 ℃	0.033 %	0.131 %	0.103 %

### 3.4 온도보상 효과

개발된 박막 증착 스트레인 게이지의 온도에 따른 스펠 정밀도 향상을 위하여 NiCr 박막의 열처리 및 Ni 박막을 이용한 온도 보상을 실시하였다.

그림 7은 NiCr 박막을 환원성 수소 분위기에서 열처리한 후 TFT 1000 다이아프램 내의 박막 스트레인 게이지 8개를 휘트스톤 브리지로 연결하여 온도에 따른 스펠 변화량을 측정된 결과로, 스펠은 0.024 ~ 0.03%/℃ 만큼 증가하였다. 이와 같은 결과는 TFT 1000 다이아프램 소재인 SUS 630의 열팽창에 기인하는 결과이다. 종래의

로드 셀 제조 공정에서는 이와 같은 현상들을 감소시키기 위하여 변형이 발생되지 않는 위치에 Ni 온도 게이지를 부착하고 이것을 브리지 입력 전압 +, - 양쪽 단자에 shunt 저항과 병렬로 접속하여 입력전압을 온도 보상함으로써 로드 셀 전체의 출력을 조정한다. 즉, 주위 온도가 낮아지면 입력전압을 증가시키고, 주위온도가 높아지면 입력전압을 감소시켜 전체적으로 20℃의 출력전압과 유사하게 조절하는 방법이다.

본 논문에서도 위와 같은 종래의 스펠 온도보상 방법을 그대로 적용하였다. 그러나 보상용 온도 게이지를 별도로 제작하여 부착하는 방법을 배제하고 NiCr 박막 증착 후 연속해서 Ni 박막을 증착한 후 에칭공정을 통해 Ni 온도보상 게이지를 형성함으로써 제조 공정의 일원화 및 모든 게이지를 박막화 하는 내부 보상방법을 추진하였다. 즉, Ni 20 Ω 박막 온도 게이지를 휘트스톤 브리지 입력단자 +, - 쪽에 shunt 저항과 병렬로 연결하였다. 실하중 시험기를 이용하여 온도에 따른 스펠 변화량을 측정된 결과 0.0025 ~ 0.0033 %/℃의 출력전압 변동을 나타내고 있다.

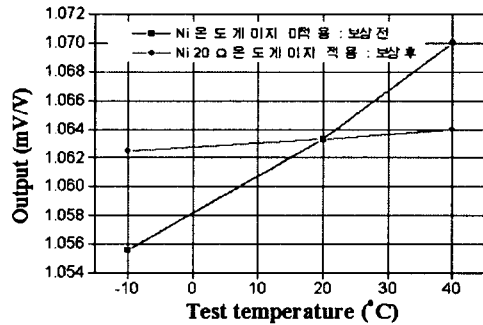


그림 7 온도보상 전후의 출력전압 변화

### 3. 결 론

본 논문에서는 두 종류의 박막 스트레인 게이지를 개발하였다. TFG 1000은 유리기판 위에 감지 물질로 NiCrFe 박막, 전극으로 Cu막을 증착하여 제작하였고, TFT 1000은 자체 설계한 스테인리스 스틸 다이아프램 위에 SiO<sub>2</sub> 절연막, NiCrFe 박막, Cu박막을 직접 증착하여 제작하였다. 고정밀급 박막형 스트레인게이지를 국산화함으로써 감지소자에 대한 요소기술을 확보하고 성능향상을 이루게 되어 이 분야의 국내 기술력 향상에 이바지하고 선진 제품과의 경쟁력을 제고시킬 것으로 기대된다. 현재 박막 스트레인 게이지를 적용한 디지털 로드 셀을 개발 중에 있다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업(공장 자동화 센서개발)의 기술개발결과입니다.

### [참 고 문 헌]

[1] 민남기 외 3인, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이아프램식 압력센서 - I : Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 개발", 대한전기전자재료학회, 10, 9, 938-944, 1997.

[1] 민남기 외 3인, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이아프램식 압력센서 -II : 압력센서의 설계, 제작 및 특성", 대한전기전자재료학회, 10, 10, 1022-1028, 1997.