

재료에 따른 반도체 압력 센서 배선의 피로 수명 평가에 관한 연구

심재준* · 한동섭* · 한근조** · 이상석***

* 동아대학교 대학원, ** 동아대학교 기계공학과 교수, *** 부산정보대학 자동차기계계열 교수

A Study of Fatigue Lifetime Evaluation on the Interconnect of Semiconductor Pressure Sensor According to the Various Materials

Jae-Joon Shim* · Dong-Seop Han* · Geun-Jo Han** · Sang-Suk Lee***

* Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

** Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

** School of Automotive & machine, Busan Info-Tech College, Busan 616-737, Korea

요 약 : 기존의 기계적인 센서들보다 높은 민감도와 선형성을 가지는 반도체 압력 센서들은 크기가 작고 일괄공정에 의해 제작될 수 있는 반도체 공정 기술로 제작되므로 다양한 산업에서 적용되고 있다. 하지만 열과 반복적인 외부 하중은 센서의 수명에 치명적인 영향을 미치고 있고, 특히 외부에서 가해지는 열은 센서를 구성하는 구조물보다 신호를 전달하는 금속 배선의 피로 수명에 지대한 영향을 미치고 있으므로 이에 대한 영향성을 분석할 수 있는 프로세스를 확립하고, 이후 다양한 재료의 반복적인 열하중에 대한 피로 수명을 Manson & Coffin식에 따라서 평가하였다. 금속 배선의 밑단에서 피로수명이 가장 낮고, 굽힘하중은 피로 수명보다는 응력분포에 큰 영향을 미치고 있다.

핵심용어 : 반도체 압력 센서, 피로수명, 열하중, 금속 배선, 민감도

Abstract : Application of semiconductor sensors has been widely spreaded into various industries because those have several merits like easy miniaturization and batch production comparison with previous mechanical sensors. But external conditions such as thermal and repetitive load have a bad effect on sensors's lifetime. Especially, this paper was focused on fatigue life of a interconnect made by various materials. Firstly we implemented the stress analysis for interconnect under thermal load and wording pressure. And the fatigue lifetime of each material was induced by Manson & Coffin Equation using the plastic stress-strain curve obtained by the plastic-elastic Finite Element Analysis. The Fatigue lifetime in its bottom is smaller than others and bending load have not an effect on the fatigue lifetime of the interconnect but the stress distribution

Key words : Semiconductor pressure sensor, Fatigue lifetime, Thermal load, Interconnect, Sensitivity

1. 서 론

자동차뿐만 아니라 다양한 분야에서 각종 물리량을 감지하여 압력과 같은 물리량을 전기신호로 변환하기 위한 반도체 압력 센서에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. MEMS를 이용하여 제작된 다양한 센서들은 실리콘 재료로 제작되는 데, 취성, 접착, 마모 등에 의한 파손과 크리이프 및 열하중에 의한 금속 배선의 박리 등에 의해 센서의 수명은 단축된다.

이와 같이 반도체 압력 센서에 적용되는 금속 배선에 관련된 연구로 반복적인 열하중에 의해 금속 배선에서 발생하는 소성 전단 변형율이 전류크라우닝 현상과 소성 파손에 미치는 영향성을 분석하고, 재료의 다양한 소성 특성에 따른 피로

수명식을 제안하였다.(Hung et al., 2001) 가스 센서에서 반복적으로 가해지는 열하중에 따른 금속 배선의 피로수명을 열분포해석과 열응력 해석을 수행하여 다양한 재료에서 발생하는 피로수명을 예측하였다.(Puigcorbe et al., 2003) 또한, 다결정 박판에서 존재하는 잔류응력이 계면에 미치는 영향을 분석하고, 계면에 인장과 압축 응력이 발생하는 기본 구조를 제안하였다. (Spaepen, 2000)

하지만, 기존의 연구는 금속 배선에 사용되는 금속 박막에 관련된 연구를 많이 수행하여, 실제 이러한 금속 배선과 관련된 연구는 미비한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 실제 압력 센서의 금속 배선에 대해 구조물 하중변화와 재료 변화가 피로 수명에 미치는 영향을 분석하고, 적정 내구 수명에 대한 각 재료의 임계 온도를 도출하였다.

* 대표저자 : 심재준(정회원), shimjj@donga.ac.kr 051)200-6989

* 정회원, dshan@paran.com 051)200-6989

** 정회원, gjhan@dau.donga.ac.kr 051)200-7650

*** 정회원, lss234@bit.ac.kr 051)330-7074

2. 피로 수명 평가 이론

반복적 비탄성 하중을 받는 재료의 거동은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 히스테리시스 형태를 가진다. 여기에서 루프의 전체 폭은 $\Delta\varepsilon$ 로 전체 변형을 범위를 나타내며, 루프의 전체 높이는 $\Delta\sigma$ 로 전체 응력의 범위이다. 전체 변형율은 탄성변형율과 소성변형율 범위의 합으로 식(1)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (1)$$

여기서 후크의 법칙을 적용하면, 탄성항을 $\Delta\sigma/E$ 로 대체할 수 있으며, 식(2)와 같이 된다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \Delta\varepsilon_p \quad (2)$$

여기서 루프안의 면적은 한사이클 동안 사용된 단위체적당 에너지를 나타내며, 이것은 재료에 가해진 소성 변형일을 표현한다. 이러한 선도는 몇 가지 방법으로 얻을 수 있으나, 대표적으로 동반샘플법과 증분 단계 시험법이 있다.

본 연구에서는 매우 신속하고 좋은 결과를 얻을 수 있는 증분 단계법으로 유한요소해석을 이용하여 하나의 시험편에서 단계적인 하중의 증감에 의하여 응력-변형률 선도를 구하였다. 구해진 선도로부터 얻어진 소성변형률 진폭을 Coffin & Manson 식(3)에 대입하여 임의 부재의 피로수명특성을 분석한다. (Bannantine et al., 1990)

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

여기서, $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ = 소성변형률 진폭, $2N_f$ = 파괴까지의 반복수(1반복수는 1/2 사이클), ε_f' = 피로 연성 계수, c = 피로 연성 지수를 나타내며, 피로연성계수는 피로 특성치로 알루미늄인 경우는 0.4이고, 금인 경우는 0.45를 사용한다. (Pelletier et al., 2000) 그리고, 피로 연성 지수인 경우에는 Coffin은 -0.5, Manson은 -0.6을 적용하고 있으나, 연성이 큰 재료에서는 Manson의 값을, 경한 금속에서는 Coffin의 값을 사용하는 것이 더 정확하다.

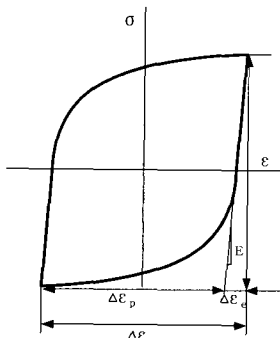


Fig. 1 The stress-strain hysteresis curve under cyclic load

본 연구에서는 시험편에 부가되는 하중부가방식이 온도 제어이므로 우선 유한요소해석을 통해서 온도에 따른 파단 반복수를 구하고, 이후 새로운 온도-수명 선도를 도입한다.

3. 유한요소 해석

3.1 유한 요소 해석 모델

반도체 센서 금속 배선이 위치하는 기판의 지지조건과 금속 배선의 형상의 변화에 의해서 외부 하중에 대해 응력이 국부적으로 집중되어 발생하므로, 해석모델은 금속 배선단면 형상과 형상 변화 사이에 미치는 상호 영향을 최소화하기 위해 Fig. 2에서처럼 하나의 금속 배선으로 단순화하였다. 이때, 금속 배선 단면 형상 변화에 대한 영향을 제거하기 위해 폭을 $100\mu\text{m}$ 로, 두께는 $0.4\mu\text{m}$ 로 설정하였고, 다이아프램은 $50\mu\text{m}$ 의 두께로 모델을 형성하고, 해석을 위해 적용된 단순한 모델과 위치에 대한 명칭을 보여주고 있다. 그리고 밑면은 팩킹징에 의해서 완전히 고정되게 해석을 수행하였다.

또한 기판은 $25 \times 25 \times 0.55 (10^3 \mu\text{m})$ 이고, Fig. 3에는 요소 분할된 형상을 확대하여 나타내었다. 폭이 좁게 보이는 곳이 금속 배선의 형상이고, 그 밑면이 다이아프램을 보여주고 있다. 실리콘 기판의 해석에는 8절점 3자유도를 가진 요소를 사용하였다. (Zienkiwicz et al., 1991)

금속 배선에 사용되는 재료는 일반적으로 반도체 및 미세 시스템에서 적용되는 알루미늄과 질량이 무거운 구리, 그리고 가장 좋은 전기전도성을 가지는 금을 선정하여 해석을 수행하였으며, 각각의 재료에 대해 소성 변형을 구하기 위해서 재료 비선형을 고려한 탄소성해석을 수행하였으며, 금속 배선에 사용되는 재료의 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다.

3.2 하중 및 경계 조건

실제 압력 센서인 경우에는 측정하기 위한 압력을 지속적으로 받고 있고, 동시에 온도의 변화에 의한 열하중도 작용되므로, 열하중과 측정압력을 외부하중으로 동시에 부가하여 강도 평가를 수행하였다. 금속 배선에서 재료의 제작 순서가 잔류응력에 미치는 영향이 낮으므로, 본 해석에서는 이전에 수행된 모델에 대해서 전부 수행하지 않고, 알루미늄, 구리, 금에 대해서 해석을 수행하였으며, 이때 각 금속 배선의 두께는 $0.4\mu\text{m}$ 로 일정하게 설정하고 해석을 수행하였다. 가해진 압력은 민감도 해석에서 수행한 0.5MPa 를 실리콘 박막뿐만 아니라 외부 압력에 노출되는 금속 배선의 모든 부분에 대해 면압으로 부가하였다.

단순하게 정의된 금속 배선을 이용하여 상온(20°C)에서 100°C 까지 변화되는 열하중을 점차적으로 부과하면서 발생하는 응력-변형률 선도를 구하고, 이후 얻어진 선도에서 파손이 발생하는 반복수를 구하였다. 증착되는 금속 배선의 계면은 기판에 완전히 결합된 것으로 가정하여 공유되는 절점은 일치시켰다. 또한 기판의 밑면은 외부와 완전히 고정되므로 변

위를 모두 고정하였다.

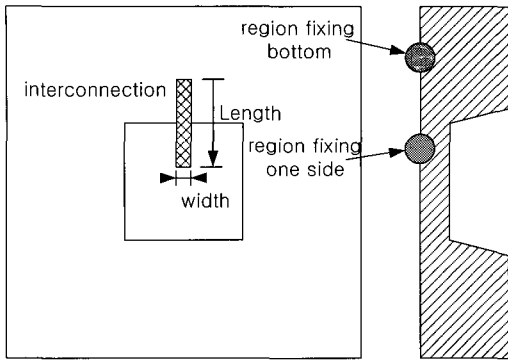


Fig. 2 The analysis model with respect to variation of interconnection thickness

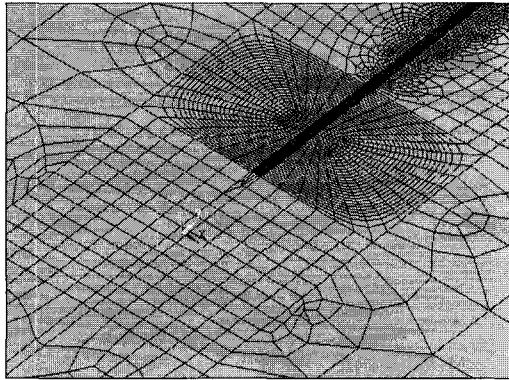


Fig. 3 Meshed shape of diaphragm type pressure sensor with simplified interconnect

Table 1 Mechanical properties of each material

| | E(Gpa) | E _T (GPa) | σ _y (MPa) | ν | CTE(/°C) at 20°C |
|----|--------|----------------------|----------------------|-------|-----------------------|
| Si | 190 | 100 | 6900 | 0.202 | 2.6×10 ⁻⁶ |
| Al | 70 | 4 | 50 | 0.35 | 27.1×10 ⁻⁶ |
| Au | 78 | 2 | 200 | 0.44 | 15.2×10 ⁻⁶ |
| Cu | 130 | 11 | 150 | 0.34 | 20.5×10 ⁻⁶ |

4. 해석 결과

반도체 센서 구조물에 사용되는 금속 배선은 열하중에 의해 소성 변형을 동반한 큰 응력이 발생되고, 열하중이 제거된 이후에도 소성변형으로 인하여 잔류응력이 금속 배선 내에 존재하게 된다. 이와 같이 소성 변형을 동반하는 구조물의 피로수명을 소성 변형률-수명 선도와 Manson-coffin식을 이용하여 예측하였다.

4.1 열하중에 의한 금속 배선의 강도 평가

타이어용 압력 센서의 금속 배선에 열하중이 부가될 때 발

생되는 잔류응력을 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하여 다음의 결과를 도출하였다. Fig. 4에는 두께비가 0.1일 때, 금속 배선 길이 방향에 대한 잔류응력값을 나타내고 있다. 금 배선이나 알루미늄 배선은 지지조건의 변화에 따른 응력값의 변화가 거의 나타나고 않고 있지만, 구리 배선인 경우에는 지지조건이 변화되는 지점에서 최대 110.98MPa로 증가하였다가 다시 급격하게 감소하여 82.23MPa이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5에는 각 재료의 금속 배선에서 발생하는 잔류응력분포도를 보여주고 있다. 열하중이 제거된 이후에 금속 배선에 남아있는 잔류 변형은 거의 없는 것으로 사료되며, 구리와 알루미늄 배선인 경우에는 지지조건이 변화되는 지점에 응력의 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다.

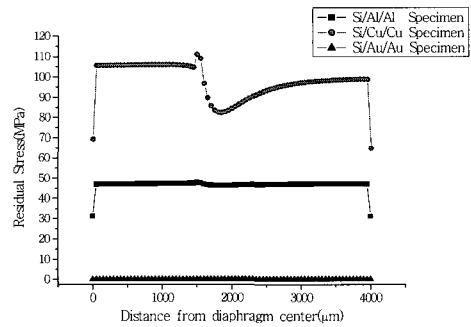


Fig. 4 Residual stress each material along the interconnect length under the thermal load

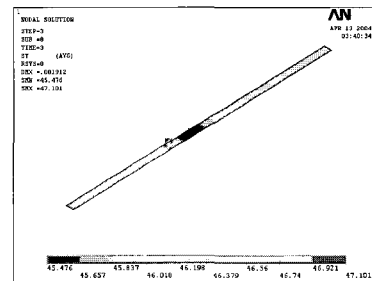


Fig. 5 Residual stress distribution of Al material under thermal load

4.2 사용하중과 열하중에 의한 금속 배선의 강도 평가

Fig. 6에서는 금속 배선의 길이에 따른 순수 재료의 잔류응력값을 보여주고 있다. 열하중만 가해지는 경우에는 모든 금속 배선에서 인장응력이 발생하고 있으나, 굽힘하중과 열하중이 동시에 가해지는 경우에는 금 배선에서 압축응력이 나타나고 있으며, 특히, 잔류응력값이 225MPa로 아주 높게 발생함을 알 수 있다. 또한, 구리 배선에서는 지지조건이 변화되는 지점에서 급격한 응력변화가 발생하여, 응력집중계수가 3 정도로 비교적 높은 값을 보이고 있다. 하지만, 알루미늄 배선은 열하중만 가해지는 경우와는 반대로 매우 안정적인 경향을 보이고 있으나, 하중에 의한 소성변형으로 인하여 반복적인 수명은 가장 낮을 것으로 사료된다.

Fig. 7에는 알루미늄 배선만을 확대하여 나타내고 있다. 열하중에 의해서 발생하는 응력분포도와는 상당한 차이를 나타내고 있다. 특히, 열하중을 받는 Si/Al/Al인 경우에는 지지조건부근에만 응력이 집중되어 발생하지만, 굽힘 하중과 열하중을 동시에 받고 있는 경우에는 굽힘하중으로 인하여 응력분포도가 넓게 분포되고 나타나고 있으므로, 그 굽힘하중에 대한 영향성이 매우 높다.

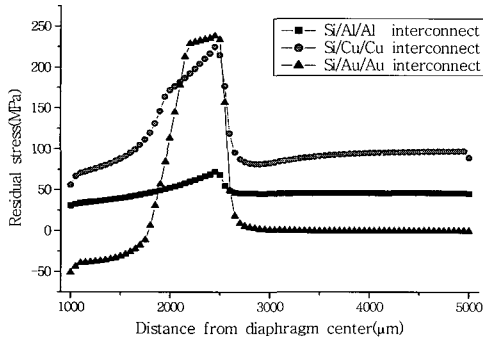


Fig. 6 Residual stress of each material along the interconnect length under bending and thermal load

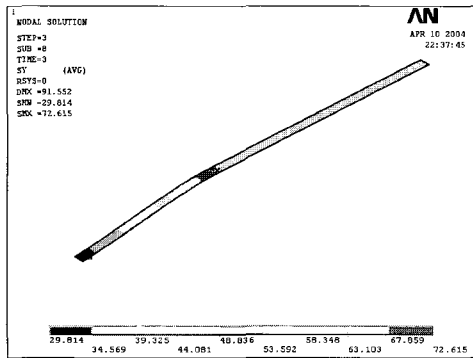


Fig. 7 bending and cyclic thermal load

4.3 금속 배선 내부에서의 피로 수명 평가

금속 배선 두께 방향에 따른 응력-변형을 선도를 Fig. 8에 나타내고 있다. 일반적으로 실리콘과 금속 배선은 완전히 결합된 것으로 해석을 수행하였으므로 실리콘과 접하는 금속 배선의 밑바닥에서 변형율이 가장 낮게 나타나고 있으며, 금속 배선의 중심과 금속 배선의 윗면에서 소성 및 탄성 변형을 진폭이 가장 크며, 그 값은 거의 동일하게 발생함을 알 수 있다. 피로 수명은 1시간을 1cycle로 계산하였으며, Fig. 9는 수명과 파손까지의 반복수를 나타내고 있다. 금속 배선 밑면의 피로 수명은 30.9×10^4 cycles이며, 금속 배선 윗면의 피로 수명은 8.1×10^4 cycles로 3.8배정도의 차이가 발생하므로, 금속 배선의 파손은 윗면에서 발생할 것으로 예상된다.

4.4 이층 금속 배선의 재료 위치에 따른 피로 수명 평가

Fig. 10에는 이층금속 배선에서 알루미늄 재료의 위치에 따른 피로 수명 값을 나타내고 있다. 강도 평가에서 구한 결과

와 유사하게 위치 변화에 따라 소성변형을 진폭의 변화는 거의 발생하지 않으므로, 피로 수명도 거의 차이가 발생하지 않았다. 하지만, 순수한 알루미늄 재료에서 피로수명보다 이층금속 배선에서의 알루미늄 재료의 피로수명은 약 2.25% 증가되었지만, 모두 피로 수명이 10년을 넘지 못하는 것을 알 수 있다.

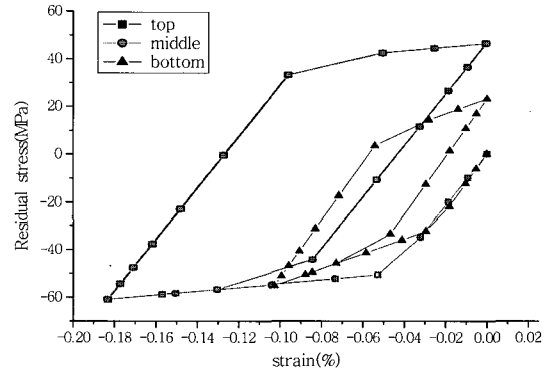


Fig. 8 The stress-strain hysteresis Curve along the thickness direction of interconnect under cyclic thermal load

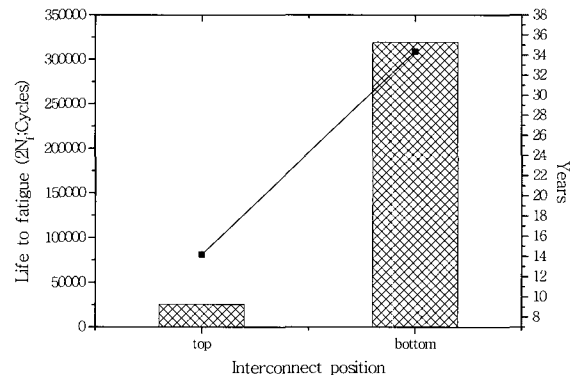


Fig. 9 Fatigue cycles and life along the thickness direction of interconnect under cyclic thermal load

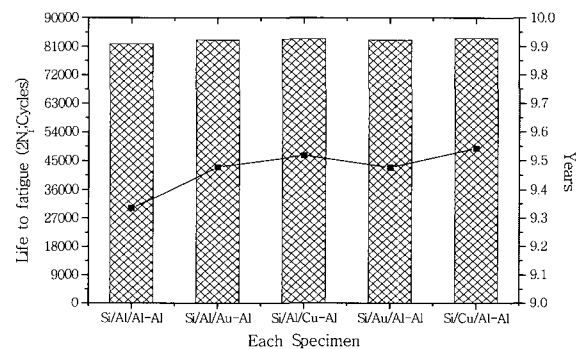


Fig. 10 Fatigue cycles and life with respect to variation of the position of Al material in the interconnect

4.5 사용하중이 적용된 경우에 피로 수명 평가

Fig. 11에는 열하중과 측정 압력이 동시에 부가될 때 알루미늄 배선에서 발생하는 응력-변형을 선도를 나타내고 있다.

대체적으로 다이아프램의 끝단에서 발생하는 인장응력과 다이아프램의 중심에서 발생하는 압축응력으로 응력-변형을 선도가 이동하였으며, 특히 최대 잔류응력이 발생하는 지점에서의 선도는 다른 지점의 선도와는 다르게 응력이 0이 되는 x축에 대해서 대칭적으로 나타나고 있다. 그러므로 측정 압력에 의해서 금속 배선에서 발생하는 굽힘 응력은 금속 배선의 응력분포에 미치는 영향은 상당히 큰 것으로 사료된다. 하지만 금속 배선의 위치에 따른 소성변형률의 폭은 유사하므로, 피로 수명에는 큰 영향을 미치지 못하고 있다.

금속 배선의 길이위치에 따른 피로 수명값을 Fig. 12에 나타내었다. 외부에서 가해지는 압력과 열하중에 의해서 구해지는 피로수명은 열하중에 의해서 구해지는 피로수명과 큰 차이가 발생하지 않으나, 오히려 외력에 의해 발생하는 인장응력이 초기 열하중에 의해서 금속 배선에서 발생하는 압축응력값을 완화시켜 피로수명을 향상시키는 효과가 있으나, 그 효과는 미미하게 나타나고 있다.

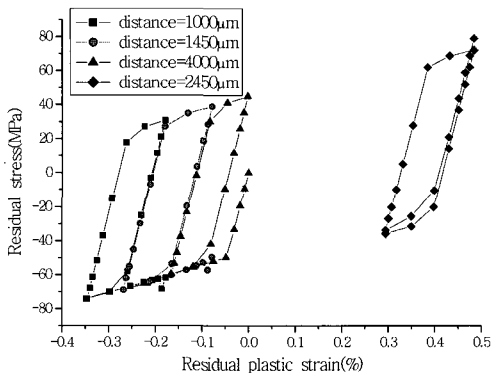


Fig. 11 Stress-strain curve of Al interconnect with respect to variation of thermal load under uniform pressure

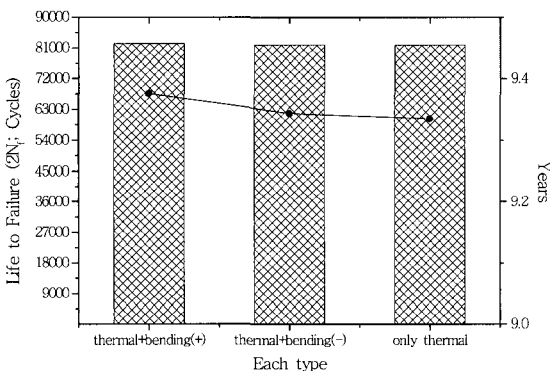


Fig. 12 Comparison of fatigue cycles and life with respect to bending and thermal load about Al material

Fig. 13에는 열하중만을 받고 있는 구리 배선에서 나타나지 않았던, 변형률의 진폭이 미세하게 발생하고 있으나 무시할 정도로 매우 적고, 하지만 인장응력에 의해 초기 열하중에 의해서 발생하는 잔류변형률이 전혀 보이지 않고 있다.

Fig. 14의 금 배선에서는 큰 인장 응력이 발생하여, 응력-

변형을 선도가 이동되고, 굽힘하중에 의해 생성된 압축잔류응력으로 인해 초기 열하중에 의한 변형이 나타나고 있다. 그러나, 구리와 금 배선에서 80°C 열하중 진폭을 가진 열하중은 탄성 변형만을 나타내므로, 낮은 온도에서 외부 압력이 피로 수명에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 사료된다.

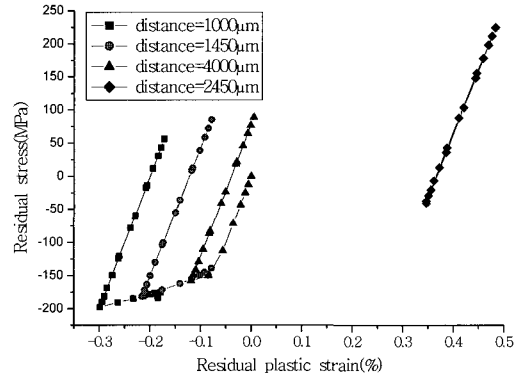


Fig. 13 Stress-Strain curve of Cu interconnect with respect to variation of thermal load under uniform pressure

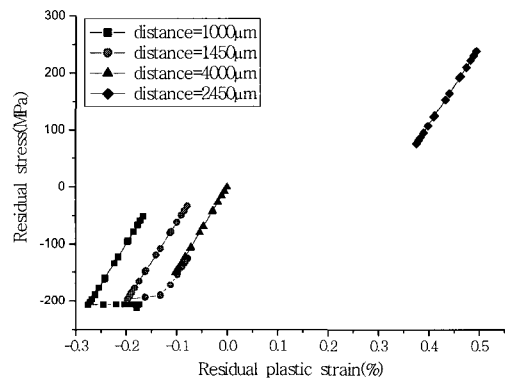


Fig. 14 Stress-Strain curve of Au interconnect with respect to variation of thermal load under uniform pressure

5. 결론

본 연구는 MEMS 기술을 이용한 자동차 타이어 압저항 압력 센서를 제작하기 위해 센서 금속 배선의 피로 수명 평가를 수행하여 다음의 결과를 도출하였다.

1. 실리콘과 접하는 금속 배선의 밑바닥에서 변형률이 가장 낮게 나타나고 있으며, 금속 배선의 중심과 금속 배선의 윗면에서 소성 및 탄성 변형률 진폭이 가장 크며, 그 차이는 73.8% 차이가 발생함을 알 수 있다.
2. 이층배선에서 알루미늄 재료의 위치에 따른 피로 수명 값을 나타내고 있다. 강도 평가에서 구한 결과와 유사하게 위치 변화에 따라 소성변형률 진폭의 변화는 거의 발생하지 않으므로, 피로 수명도 거의 차이가 발생하지 않았다.
3. 굽힘 하중과 열하중에 동시에 부가되면 최대 잔류응력이 발생하는 지점에서의 선도는 다른 지점에서의 선도와 응

력이 0이 되는 x축에 대해서 대칭적으로 나타나고 있으나, 피로 수명에 미치는 영향은 거의 없다.

4. 오히려 외력에 의해 발생하는 인장응력이 초기 열하중에 의해서 금속 배선에서 발생하는 압축응력값을 완화시켜 피로수명을 향상시키는 효과가 있으나, 그 효과는 미비하게 나타나고 있다. 그리고 강도는 알루미늄 배선에서 가장 좋은 효과를 나타내고 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L. (1990), "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall Inc., New Jersey, pp.40-87.

- [2] Huang, M., Suo, Z. and Ma, Q. (2001), "Metal Film Crawling in Interconnect Structures Caused by Cyclic Temperatures", *Acta Mater.*, Vol. 49, pp.3039-3049.
- [3] Pelletier, H., Krier, J., Cornet, A. and Mille, P.(2000), "Limits of Using Bilinear Stress-Strain Curve for Finite element Modeling of Nanoindentation Response on Bulk Materials," *Thin Solid Films*, Vol. 379, pp.147-155.
- [4] Puigcorbe, J., Vila, A. and Morante, J. R. (2003), "Thermal Fatigue Modeling of Micromachined Gas Sensors," *Sensors and Actuators, B* 95, pp. 275-281.
- [5] Spaepen, F. (2000), "Interfaces and Stresses in Thin Films," *Acta Mater.*, Vol. 48, pp.31-42.
- [6] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (1991), "The Finite Element Method-Solid and Fluid, Mechanics Dynamics and Non-linearity", McGraw-Hill Co., New York, pp. 1-283.

원고접수일 : 2005년 10월 10일

원고채택일 : 2005년 12월 28일