

자동차용 하이브리드 IC에 사용되는 알루미늄선의  
응력해석에 관한 연구  
(제1보 알루미늄선에 작용하는 하중 분석)

임 석 현\*

A study on stress analysis of aluminium wire in hybrid IC  
using for vehicles  
( A force analysis acting on aluminium wire)

S. H. Lim\*

Abstract

A lot of electronic parts are used for recent vehicles. If electronic parts break down, it will bring passenger to fatal wound. The very representative trouble of electronic parts is a cut aluminium wire of a hybrid IC. In this study, I analyzed a cause of cut aluminium wire and the main results obtained on this study are summarized as follows; (1) The forces acting on the aluminium wire are because of thermal expansion of a resin. (2) The forces acting on the aluminium wire are obtained by the theoretical analysis and those results are agree well with those of the FEM

Keywords : hybrid IC(하이브리드 IC) , aluminium wire(알루미늄선), thermal expansion(열팽창),

1. 서론

최근의 자동차는 배기가스규제, 연비규제 및 안전규제 등에 대응하기 위하여 전자화가 급속히 진행되고있다. 이

러한 각종 전자부품 중 특히 엔진제어관련 부품은 엔진룸 내에 설치되어 고온의 영향을 받음과 동시에 온도의 상승과 저하에 따른 심각한 온도 cycle의 영향 즉 열충격을 받는다. 또한 빗물 등에 의한 수분과 배기가스에 의한 부

\* 여주대학 자동차과

식의 영향도 받는다. 이러한 조건이 복합적으로 각종 기기에 작용하면, 특히 전자부품에 작용하면 심각한 상황이 되는 것은 필연적이다.<sup>1)</sup> 실제로 엔진을 제어하는 전자부품이 이러한 영향을 받아 고장이 발생하여, 갑자기 엔진 rpm이 급격히 상승함에 의해 폭주하게되어 사고로 진전된 경우가 여러 차례 있었다. 특히 자동차는 대량생산제품이기 때문에 이러한 문제가 발생하면 문제의 원인이 된 부품의 대책품을 그 부품이 장착된 모든 차를 회수하여 교체하여야 하기 때문에 자동차회사로서는 막대한 재정적 손실과 함께 회사 이미지에 손상을 입게된다. 이러한 고장을 일으키는 원인은 위와 같이 여러 종류가 있지만 빈발하는 고장을 구체적으로 들어보면 납땜 부위의 파손을 포함한 알미늄선의 단선,<sup>2)~4)</sup> 수지와 기판의 분리,<sup>5)~7)</sup> IC 칩 파손,<sup>7)~10)</sup> 기판 파손,<sup>11)~12)</sup> 부식문제,<sup>13)</sup> 등이 있으며 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 하이브리드 IC제품에 있어서의 알미늄선의 단선에 대하여는 반복적인 실험에 의하여 개선이 이루어지는 관계로 이론적인 해석이 전무한 실정이다.

그림1은 본 연구에서 사용된 하이브리드 IC의 구조를 나타내고 있는데 실제로 사용되고 있는 제품이다. 그림 2는 이러한 하이브리드 IC가 원인 미상의 현상에 의해 알미늄선이 피로 파괴된 것을 전자현미경을 통하여 350 배로 확대한 사진이다. 피로파괴된 여러 가지 하이브리드 IC를 살펴보면 공통적으로 사진2와 같이 알미늄선의 양쪽 끝단과 왼쪽에서 3/4 부분에 발생하고 있는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 이러한 알미늄선의 피로파괴를 방지하기 위한 단선의 정확한 원인규명 및 그 대책에 관한 것으로서 본 논문에서는 우선 알미늄선에 작용하는 하중 파악에 중점을 두고있다.

## 2. 본론

### 2.1 파괴 원인 분석

여러 가지 원인 중 가장 의심이 가는 부분이 알미늄을 감싸고 있는 수지에 의한 영향이다.

하이브리드 IC제품은 수분, 진동, 부식 등을 방지하기 위하여 그림 1과 같이 실리콘, 실리콘젤, 에폭시의 3종의 수지로 밀폐 시켜 놓았다. 그러나 엔진룸에 배치된 하이브리드 IC가 엔진에 의해 열을 받으면 수지는 팽창을 하여 IC부품을 잡아 당기는 것으로 추정된다. 또한 정차 시

에는 열이 식으므로 수축을 하기 때문에 주행과 주차를 반복하면 IC부품은 인장과 압축이 반복되는 반복하중을 받을 것으로 예상된다. 따라서 이 반복하중에 의하여 구조가 가장 취약한 알미늄선이 단선되는 것으로 추정하고 본 연구를 추진했다.

연구의 추진방법은 다음과 같다.

우선 수지의 열팽창이 알미늄선에 미치는 영향을 파악하기 위하여 범용 유한요소법 프로그램을 이용하여 열팽창 해석을 실시한다. 이때의 경계조건은 엔진룸내의 온도와 하이브리드 IC 내부에 설치된 트랜지스터의 온도 등이 고려된다. 해석에 이용한 유한요소법 소프트웨어는 NAS TRAN이다.

다음 단계는 이러한 팽창에 의해 실제 알미늄선에 작용하는 하중을 계산한다. 계산은 탄성론을 이용하여 실시하고 결과의 확인을 위하여 NASTRAN을 이용한 해석을 수행한다.

제2보에서는 금번 계산한 이론치의 검증을 위하여 실험을 실시한다.

실험은 알미늄선의 직경이 0.05mm에 불과하기 때문에 연구용 형상을 제작하기 어렵고 응력측정을 위한 스트레인 게이지 부착이 불가능하여 직경 5mm의 선을 이용하여 각 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정한다. 하중은 탄성론에 의해 구해진 값을 이용하여 각 부위에 가한다.

마지막 단계로는 이러한 하중에 견딜수 있는 최적의 알미늄선의 형상을 유한요소법을 이용하여 제시한다. 최적형상 제시의 전제조건은 재질, 직경 등은 바꾸지않고 로보트에 의한 작업이 가능한 형상을 제시하는 것으로 한다. 또한 최적형상의 검증은 상기의 직경 5mm의 알미늄선의 시험을 통하여 실시한다.

### 2.2. 수지의 열변형해석

그림 3과 4는 유한요소법으로 해석한 결과로서, 주변 온도가 85℃일 경우 순수한 수지만의 열팽창에 의한 변형도와 주응력도이다.

그림 3은 수지가 열변형에 의해 좌우 끝단부 이외에는 기판에 거의 수직한 방향으로 변형하고 있음을 알 수 있다.

그림4의 주응력도를 보면 수지는 하부를 구속 당하고 있기 때문에 횡방향으로 커다란 압축응력이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 기판에 수직한 방향에는 수지의 상면이 자유이기 때문에 매우 작은 인장응력이 작용하

고 있다. 참고적으로 그림에 알미늄선의 위치를 기입했는 바, 그림 3의 열팽창 방향으로 보아 알미늄선에 작용하는 힘은 수지가 변형하는 방향인 기판에 수직방향임을 알 수 있다.

그림5와 6은 그림 3과 4의 수지속에 내장되어 있는 트랜지스터의 발열온도를 40℃로 하는 열원으로 고려했을 경우의 해석결과이다. 그림 3및 4와 비교하면 1차축의 변형이 다소 크지만 그다지 큰 변화는 없다.

1차축에는 파워 트랜지스터와 히트 스프레이터, 2차축에는 알미늄 포스트가 있다. 이들 부품은 금속 등의 고체 부품인 관계로 수지에 비해 열에 의한 변형이 거의 없기 때문에 그들 부품의 실제 열팽창계수를 적용하여 계산한 것이 그림 7, 8이다. 알미늄선 주변의 변형은 그다지 변화가 없지만 예측한대로 고체가 많은 1차축 보다 수지의 영역이 넓은 2차축의 기판에 수직인 방향의 변형이 커짐을 알 수 있다.

이상을 정리하면 알미늄선에 작용하는 힘의 방향은 기판에 수직이고, 또한 1차축보다 2차축에 커다란 힘이 작용하는 것이 예상되어, 이것이 2차축 조기 피로파괴의 원인으로 판단된다.

### 2.3 알미늄선에 작용하는 힘

수지 내부에 매설되어 있는 알미늄선이 수지의 열팽창에 의해 어떠한 힘을 받는지를 3차원적으로 해석하는 것은 어렵다. 따라서 이렇게 조합된 구조를, 알미늄선 길이 방향으로 단위길기로 절단하여, 한 방향으로 일정한 열팽창 흐름속에서 단단한 원주(알미늄선)가 정지하고있는 평면 스트레인 문제로서 해석한다. 이것은 또 정지하고 있는 무한탄성판 안에서 탄성판과 같은 두께의 원형 강판이 한 방향으로 하중을 받아 변형하는 평면 스트레인 문제로서 해석할 수 있다.

여기서는 이 평면 스트레인 문제를 근사적이기는 하지만 이론적으로 해석하여 그 결과를 유한요소법 결과와 비교하였다. 여기서도 전과 마찬가지로 중간내용은 생략하고 해석 이론과 결론에 대해서만 논하겠다.

직경 2a의 단단한 원판이 탄성판 내부에 x방향으로 P의 힘을 받아 변위하는 것으로 한다.(그림9)

이 경우에 단단한 원판 주변의 응력장은 단순반경응력(simple radial stress distribution)상태인 것으로 한다. 응력성분은 다음 식으로 나타낸다.<sup>14)</sup>

$$\sigma_r = \frac{P}{\pi} \frac{\cos \theta}{r}, \quad \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0 \quad (1)$$

$\sigma_r$  은 x축에 대해 대칭으로,  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ 에서 압축이고, y축에서는 역대칭으로  $\pi/2 < \theta < 3\pi/2$ 에서 인장이다. (그림10)

이 응력성분은 극좌표에서 평형방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

를 만족한다

또 원판의 외주에 작용하는  $\sigma_r$ 와 P의 평형방정식

$$4 \int_0^{\pi/2} \sigma_r r \cos \theta d\theta = -4P \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta d\theta = -P(3)$$

을 만족한다.

평면 스트레인 상태에서의 응력, 스트레인, 변위의 관계는

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu) \sigma_r - \nu \sigma_\theta] \\ \epsilon_\theta &= \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu) \sigma_\theta - \nu \sigma_r] \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} = \frac{\tau_{r\theta}}{G} \end{aligned} \quad (4)$$

로 주어진다.

(4)식 제1식에 (1)을 대입하여 적분하면

$$u = -(1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \cos \theta \cdot \log r + f(\theta) \quad (5)$$

(4)식 제2식에 (1),(5)식을 대입하여 적분하면

$$\begin{aligned} v &= (1+\nu) \nu \frac{P}{\pi E} \sin \theta + (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta \cdot \\ &\log r - \int f(\theta) d\theta + g(r) \end{aligned} \quad (6)$$

$f(\theta)$ ,  $g(r)$ 은 각각  $\theta$ ,  $r$  만의 함수이다.  
(4)의 제3식에 (1) (5) (6)을 대입하면

$$(1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta \cdot \log r + \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} + (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta + \frac{\partial g(r)}{\partial r} r - (1+\nu)\nu \frac{P}{\pi E} \sin \theta - (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta \cdot \log r + \int f(\theta) d\theta - g(r) \quad (7)$$

$\theta$ ,  $r$  은 독립된 변수이기 때문에 모든  $\theta$ ,  $r$ 에 관해서 (7)식이 성립하기 위해서는 각각의 함수가 0이 되지 않으면 안 된다.

$$\frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} + (1+\nu)(1-2\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta + \int f(\theta) d\theta = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial g(r)}{\partial r} r - g(r) = 0$$

(8)식의 일반해는

$$f(\theta) = -\frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{2\pi E} P \theta \sin \theta + A \sin \theta + B \cos \theta \quad (9)$$

$$g(r) = Cr$$

$$\therefore u = (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \cos \theta \cdot \log r - (1-\nu)(1-2\nu) \frac{P}{2\pi E} \theta \sin \theta + A \sin \theta + B \cos$$

$$v = (1+\nu)\nu \frac{P}{\pi E} \sin \theta + (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \sin \theta \cdot \log r + (1-\nu)(1-2\nu) \frac{P}{2\pi E} (\theta \cos \theta - \sin \theta) + A \cos \theta - B \sin \theta + Cr \quad (10)$$

대칭성으로부터  $\theta = 0$  에서  $v = 0$

$$\therefore A = C = 0$$

또 전압조정기 기관 위치 ( $\theta = 0$ ,  $r = H$ )에서  $u = 0$ 으로 하면

$$-(1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \log H + B = 0 \quad (11)$$

$$\therefore B = (1+\nu)(1-\nu) \frac{P}{\pi E} \log H$$

$$\therefore u = (1+\nu) \frac{P}{\pi E} [(1-\nu) \log \frac{H}{r} \cos \theta - \frac{(1-2\nu)}{2} \theta \sin \theta] \quad (12)$$

$$\therefore v = (1+\nu) \frac{P}{\pi E} [\frac{1}{2} \sin \theta - (1-\nu) \log \frac{H}{r} \sin \theta - \frac{(1-2\nu)}{2} \theta \cos \theta]$$

## 2.4 계산 결과

계산에 사용한 하이브리드 IC 조건은 다음과 같다.

기관과 알미늄선 간의 거리  $H = 0.5 \sim 2.0 \text{mm}$

알미늄선의 반경  $a = 0.15/2$

$H/a = 6.7 \sim 27.0$

$\nu = 0.45$

열팽창  $\alpha TH$ 의 흐름 중에 원형의 강판이 정지하고 있는 문제에 대응하기 위해서는

$$(U_0)_{\theta=0} = \alpha TH \quad (13)$$

라고 두면 된다.

원판에 작용하는 힘  $P$ 는

$$P = \alpha TH E \pi / (1-\nu^2) \log(H/a) \quad (14)$$

열팽창  $\alpha TH$ 를 폭  $2a$ 의 강판으로 일정한 변형으로 지지하기 위한 힘  $P'$ 는

$$\alpha TH = \frac{P'H}{(2a)E}$$

$$\therefore P' = \alpha TH(2a)E/H \quad (15)$$

(14)(15)식의 비율을 계산하면

$$\frac{P}{P'} = \frac{\pi}{2} (H/a) / (1-\nu^2) \log(H/a) \quad (16)$$

$H/a = 6.7 \sim 27$ 에서는

$$P/P' = 6.9 \sim 16$$

즉 열팽창을 전체적으로 일정한 변형으로 지지하는 경우 보다 원판으로 지지하는 경우가 7~16배의 힘이 작용한다.

그림11에 다음 식으로 나타내는  $\theta=0$  선상에서 r 방향의 변위 및 응력분포를 나타냈다.

$$\begin{aligned} (U_0)_{\theta=0} / ((1-\nu^2) P/\pi E) &= \log(H/r) \\ (\sigma_r)_{\theta=0} / (P/\pi a) &= (a/r) \end{aligned} \quad (17)$$

이것은 둘 다 r 과 함께 감쇄하는 특성을 갖는다. 그림12에 변위와 응력분포를 유한요소법 계산과 비교한 것을 나타냈다. 비교적 잘 일치하고있는 것을 알 수 있다. 그림13에 유한요소법으로 해석한 수지의 변형을 나타냈다.

### 3. 결론

- 1) 알미늄선에 작용하는 힘의 방향은 기판에 수직이고, 또한 1차측보다 2차측에 커다란 힘이 작용하는 것이 예상되어, 이것이 2차측 조기 피로파괴의 원인으로 판단된다.
- 2) 수지의 열팽창에 의해 알미늄선에 작용하는 힘을 평면 스트레인, 단순반경 응력분포를 가정한 이론해석으로 구했다. 또한 평면 스트레인 분포를 유한요소법으로도 해석했다.
- 3) 열팽창은 알미늄선 근방의 수지의 국부변형으로 흡수된다. 이것으로부터 알미늄선에는 일정하게 흡수하는 경우의 7~16배의 힘이 작용한다.
- 4) 수지의 변형분포는 유한요소법 결과와 잘 일치하고 있다.
- 5) 수지의 응력분포는 알미늄선근방에서는 잘 일치하지 않지만, 다른 부분에서는 잘 일치하고 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) 清水翼 외 1인, 自動車用エレクトロニクス部品の強度, 일본 자동차 기술회, 자동차 구조·부품의 강도수명 평가와 고 신뢰성 설계에 관한 첨단기술 심포지움, p.47. 1989,2,14
- 2) 北野외 2인, 일본기계학회논문집(A편) 54권 제505호, pp 1709~1715, 1988,9
- 3) M.Kitano 외 3인, Current Japanese Materials Research Vol.2 Soc. of Material Science, JAPAN, pp. 235~250, 1987
- 4) 宇佐美, 재료, 제35권, 제391호, pp. 452~458, 1986
- 5) 池上, 日本機械學會論文集(A編) 50卷 제457号, pp 1557~1564, 1984
- 6) 服部외 3인, 일본기계학회논문집(A편) 54권 제599호, pp 597~603, 1988
- 7) 宮野외 1인, Mould品殘留應力關係材料System, 金澤工業大學, 材料System 研究所, 第6卷, pp. 81~100, 1987
- 8) 河合, 最先端表面實裝形 LSI packageの開發動向と實裝技術特別symposium, 技術研究情報 center, pp. 27~36, 1988
- 9) A. Yasukawa ect. 1, Proc. of 1988 International symposium on power semiconductor device, Tokyo. pp.36~41, 1988
- 10) A. Yasukawa ect. 2, Proc. of the IEEE International electron device meeting, pp. 252~262, 1983
- 11) 高橋, 日本窯業協會誌, 93(4), pp, 186~194, 1985
- 12) 町田, 日本機械學會論文集(A編) 53卷 제492号, pp 1558~1565, 1987
- 13) 初田 외 2인, 일본금속학회회보 제 26권 제 4호, pp. 290~292, 1987
- 14) S.P. Timoshenko. THEORY OF ELASTICITY, MCGRAW-HILL. p.97, 1983