

〈 논문 〉

열응력과 잔류응력하의 다층박막의 피로수명 해석

박 준 협*

(2004년 7월 7일 접수, 2005년 2월 24일 심사완료)

Fatigue Life Analysis on Multi-Stacked Film Under Thermal and Residual Stresses

Jun-Hyub Park

Key Words : Micro-Electro Mechanical System(MEMS, 멤스), Print Head(프린트 헤드), Fatigue Test(피로시험), Fatigue Life(피로수명), Heater(히터)

Abstract

Reliability problem in inkjet printhead, one of MEMS devices, is also very important. To eject an ink drop, the temperature of heater must be high so that ink contacting with surface reaches above 280°C on the instant. Its heater is embedded in the thin multi-layer in which several materials are deposited. MEMS processes are the main sources of residual stresses development. Residual stress is one of the factors reducing the reliability of MEMS devices. We measured residual stresses of single layers that consist of multilayer. FE analysis is performed using design of experiment(DOE). Transient analysis for heat transfer is performed to get a temperature distribution. And then static analysis is performed with the temperature distribution obtained by heat transfer analysis and the measured residual stresses to get a stress distribution in the structure. Although the residual stress is bigger than thermal stress, thermal stress is more influential on fatigue life.

기호설명

MEMS : 초소형 전자 정밀기계(Micro-Electro Mechanical System)
DOE : 실험계획법(Design of Experiment)
 S_a : 진폭(Amplitude)
 S_{eq} : 등가진폭(Equivalent amplitude)
 S_m : 평균응력(Mean stress)
 S_u : 인장강도 (Tensile strength)

1. 서 론

초소형전자기계(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS)는 많은 구조물을 재현성을 갖고 낮은 가격으로 생산할 수 있는 일괄 공정을 사용해서 복잡한 전자기계시스템을 만드는 새로운 생산 기술이다. 반면에 초소형전자기계를 상품화를

하기 위해서는 반드시 신뢰성이 확보되어야 한다.⁽¹⁻⁵⁾

잉크젯 프린트헤드에 있어 낮은 가격과 높은 해상도의 구현은 매우 중요하다. 잉크젯 프린트헤드(inkjet print head)는 압전력(piezoelectric force) 정전력(electrostatic force), 열전사(thermal bubble) 등을 이용하여 개발되어 왔다.⁽⁶⁻⁸⁾ 그러나 오늘날 가정과 소규모 회사용의 잉크젯 프린터시장에서는 압전력과 열전사 방식의 프린터가 경쟁을 하고 있다. 휴렛팩카드(Hewlett-Packard)가 열전사 방식의 잉크젯 프린터를 1984년에 상품화한 이후, 열전사 방식의 프린트헤드에 관한 많은 기술개발이 되어 왔다. 최근에는 낮은 가격과 높은 품질 때문에 열전사 방식의 잉크젯 프린터의 시장 점유율이 높아 가고 있다.⁽⁹⁾ 열전사 방식의 프린트헤드에서 토출력은 초가열된 잉크(superheating ink)에 의해서 발생한다. 최근, 시중에서 찾아볼 수 있는 열전사 버블 잉크젯 프린터에는 두 가지 종류가 있다. 그 하나는 ‘측면 토출(side shooting)’ 원리에 의해 작동되는 것으로서, 잉크방울이 히터의 표면의

* 회원, 동명정보대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : jhyubpark@korea.com
TEL : (051)610-8362 FAX : (051)610-8349

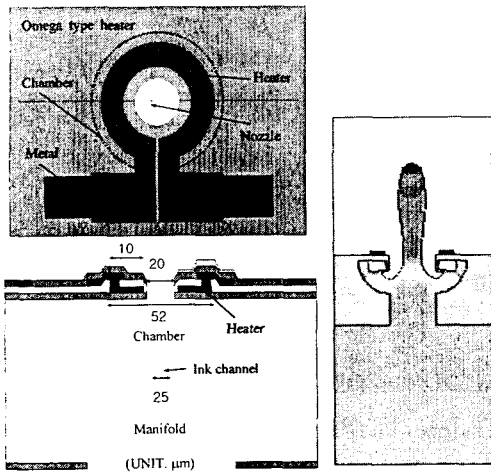


Fig. 1 Schematics of the developed thermal inkjet printhead

바로 옆에서 토출되는 방식이며, 다른 하나는 ‘전방토출(roof shooting)’ 방식으로 작동되는 것으로 잉크 방울이 히터 표면에 수직으로 토출되는 방식이다. 최근 개발되고 있는 프린트헤드에는 P. Krause 등이 최근 명명한 ‘후방토출(back shooting)’ 방식이 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 이 모델은 기포가 히터와 수직하게 성장하는 반면, 그 기포는 잉크 방울이 나아가는 방향과는 반대로 커진다. 이 후방토출 방식에 따라 만들어진 프린터 헤드는 제조 공정이 얇은 막을 정렬한 후 접합이 필요 없는 일체형 구조라는 장점을 지닌다. 즉 이 잉크젯 프린트헤드는 노즐 판을 접합하거나 조립하는 과정이 생략된 일체형 생산 방식이라고 하는 더 간단해진 생산 방식을 채택할 수 있게 됨에 따라 기존의 프린트 헤드에 비해 가격면에서 매우 유리한 위치에 설 수 있게 된 것이다. 이 프린트 헤드는 많은 수의 돔 형태의 잉크 챔버, 노즐과 노즐 가이드, 잉크를 공급해주는 잉크관, 그리고 오메가 형태의 히터로 이루어져 있다. 히터는 여러 가지 재료들로 구성되어 있는 얇은 박막 속에 있다. 잉크 방울을 분사하기 위해서는 히터의 온도가 히터의 표면의 잉크가 닿을 때 순간적으로 그 잉크방울의 온도가 280°C 이상이 되어야 한다. 그래서 잔류응력을 갖고 있는 얇은 다층 박막은 높은 온도 변화에 의한 열 응력을 받고 있다. 따라서 후방토출 방식에서 신뢰성을 확보하는 것은, 히터의 위치때문에, 측면 토출이나 전방토출 방식에서의 신뢰성 확보보다 더 어렵다.

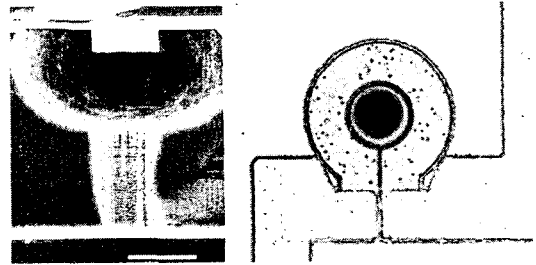


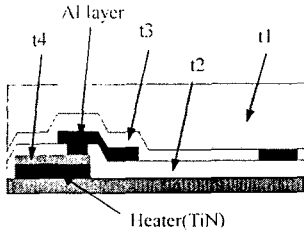
Fig. 2 Photographs of fabricated thermal printhead

이 연구에서는 후방토출 방식의 열전사 프린트헤드에 있어서의 피로수명에 대한 설계 변수들의 영향을 알아 보기 위해서 잔류응력을 측정하였으며 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 프린트헤드를 생산할 때와 같은 공정으로 재료를 박막 위에 적층하기 전과 후의 웨이퍼 곡률을 측정하여, 이를 Stoney 방정식에 대입하여 잔류응력을 구하였다. Stoney 방정식은 식의 간편함 때문에 많은 연구자에 의해 웨이퍼에 적층된 박막의 잔류응력을 측정하기 위해서 사용되어 왔다. 그리고 이식은 웨이퍼(substrate)와 박막이 등방성(isotropic)이고 박막의 두께가 웨이퍼의 두께에 비해 훨씬 작아야 되는 가정하에 성립된다. 따라서 본 연구에 사용된 웨이퍼의 두께(500μm)에 비해 박막의 최고 두께(25μm)가 매우 작기 때문에 이 식을 적용하였다. 열전달 해석을 위해서는 과도해석을 하였고, 결과의 온도분포와 측정된 잔류응력을 이용하여 박막의 응력을 구하였고, 이 응력들이 피로수명에 얼마나 영향을 미치는지 알아 보았다.

2. 프린트헤드의 구조

단일 공정으로 만들어진 돔 형태의 잉크젯 프린트헤드의 구조는 Fig. 1 과 같다. 이 그림에서 하나의 프린트헤드는 돔 형태의 잉크 저장소, 수직방향의 잉크 출입구, 오메가 형태의 히터 등으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 잉크는 뒷면에 있는 관을 통해서 잉크 저장소로 공급이 된다.

잉크 저장소는 등방 식각 방식에 의해서 만들어 졌다. 히터는 잉크 저장소 위에 있으며, 노즐은 오메가 형태의 히터 중심부에 있다. 이러한 구조는 접착이나 조립 공정이 따로 필요가 없는 일괄 공정으로 만들어질 수 있기 때문에 생산 단가를



t1 : thick. of Ni layer
 t2 : thick. of SiO₂ layer below Al layer
 t3 : thick. of SiO₂ layer above Al layer
 t4 : thick. of Si₃N₄ layer above heater

Fig. 3 Configuration of multi-layer near heater in inkjet printhead

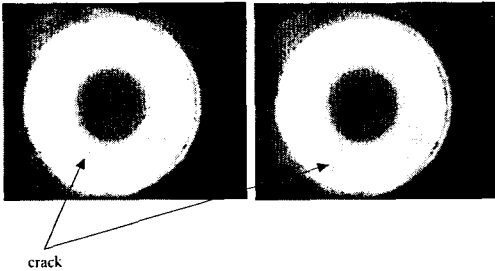


Fig. 4 SEM of crack in omega type printhead

낮추는 데 유리하다. Fig. 2 는 만들어진 프린트헤드를 보여 준다. Fig. 3 은 잉크젯 프린트헤드 적층 단면을 보여 준다. 이 그림에서 히터가 얇은 박막 속에 있음을 알 수 있다.

3. 프린트헤드의 파손

잉크젯 프린트헤드를 상품화하기 위해서는 단위 노즐이 10⁸ 방울 이상을 토출하여야 한다. Fig. 4 는 개발된 오메가형의 히터를 가진 프린트헤드를 토출 시험을 수행했을 때, 파손된 프린트헤드의 SEM 사진이다. 이 그림에서 보는 것처럼 균열이 히터의 안쪽에서 발생하여 바깥쪽으로 진전하고 있음을 알 수 있다. 이러한 파손의 원인은 열응력, 잔류응력 등이다. 열응력은 열전사 방식의 잉크젯 프린트헤드가 잉크를 토출시키기 위해서는 잉크와 접촉하고 있는 면의 온도가 4μsec 이내 280~350°C 에 도달해야 한다. 따라서 히터 주변은 가열과 냉각을 반복함으로써 재질 간의 열팽창 계수 차이 때문에 열 응력이 발생된다. 또한 MEMS 공정으로

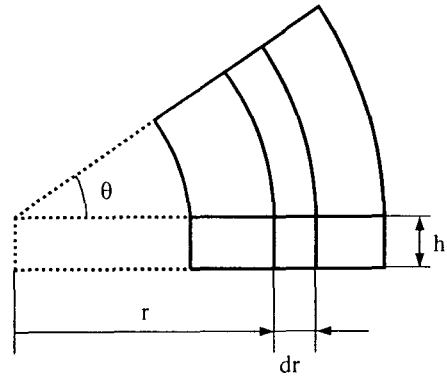


Fig. 5 Part of donut type heater

만들어진 박막은 대부분 잔류 응력을 가지고 있다. 균열이 내부에서 발생해서 바깥쪽으로 진전하는 원인은 히터의 형상이 환형이기 때문에 히터의 안쪽과 바깥쪽 사이에 저항 차이가 발생하기 때문인 것으로 추정된다.

4. 응력 해석

앞에서 설명한 것처럼, 잔류응력 및 열응력 등이 프린트헤드의 내구성을 저하 시키는 주요 원인이다. 이에 본 연구에서는 실험계획법을 이용해서 토출 성능에는 크게 영향을 미치지 않는 설계변수들을 선택하여 내구 수명에 이들 설계변수가 어떤 영향을 미치는지를 알아 보고 최적값을 도출하고자 한다. 이때 잔류응력과 열응력을 동시에 고려하여 해석을 수행하였다.

히터, 히터의 아래의 열전달 층(Si₃N₄), 열흡수 층(Al)의 두께들은 프린트 헤드의 성능에 영향을 주는 설계 변수들이다. 따라서 Fig. 3 에서 보는 것처럼, 그러한 층들을 제외하고, 히터(heater) 주위의 4 개의 층들을 설계변수 들로 선택하였다.

히터에 열이 발생하기 위해서 Fig. 2 에서의 메탈층을 통해서 전기가 공급이 되면 저항체인 히터가 발열해야 한다. 그런데 안정된 토출과 높은 주파수 특성을 가진 프린트 헤드를 개발하기 위해서는 가능한 빠른 시간 내에 잉크와 접촉하고 있는 면의 온도를 280~350°C 로 도달시켜야 하고 또한 빠른 시간 내에 열을 낮추어야 한다. 따라서 이 연구에서는 그러한 목표 성능을 만족시킨 후에 신뢰성 평가를 하기 때문에 앞에서 설명한 바와 같이 성능에 영향을 미치는 설계 변수들은 제외하였다.

Table 1 Cases of design parameters in design of experiment(DOE)

(unit: μm)

case	t1	t2	t3	t4
1	15	1	1	0.1
2	15	1	1	0.5
3	15	1	2	0.1
4	15	1	2	0.5
5	15	2	1	0.1
6	15	2	1	0.5
7	15	2	2	0.1
8	15	2	2	0.5
9	25	1	1	0.1
10	25	1	1	0.5
11	25	1	2	0.1
12	25	1	2	0.5
13	25	2	1	0.1
14	25	2	1	0.5
15	25	2	2	0.1
16	25	2	2	0.5

t1 : thickness of Ni layer
 t2 : thickness of SiO₂ layer below Al layer
 t3 : thickness of SiO₂ layer above Al layer
 t4 : thickness of Si₃N₄ layer above heater

열 응력을 해석하기 위해서는 히터에서의 파워 밀도를 알아야 한다. 그런데, 앞에서 언급한 것처럼, 헤드의 균열이 안쪽에서 발생하는 것은 안쪽과 바깥쪽 간에 파워 밀도, 즉 저항차이가 있기 때문이다. 따라서 응력 해석을 수행할 때는 이러한 점을 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5 와 같은 오메가(도너츠)형의 히터의 일부분에서 반경방향으로의 파워 밀도에 관한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$R = \rho \frac{l}{A_r} = \rho \frac{r\theta}{h \cdot dr} \quad (1)$$

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{dr \cdot h}{\rho \cdot r \cdot \theta} \cdot V^2 \quad (2)$$

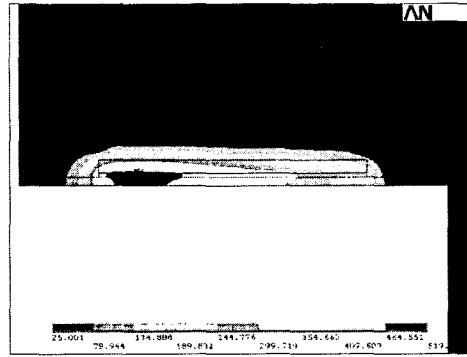


Fig. 6 Distribution of temperature in membrane near heater (Case 2)

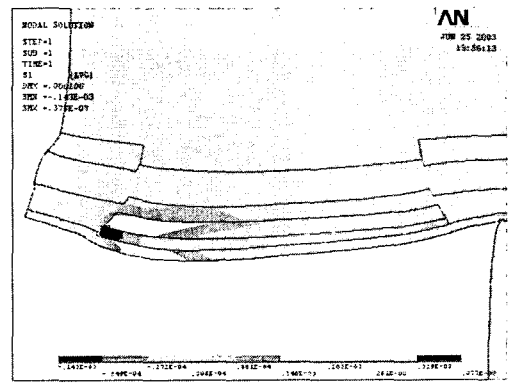


Fig. 7 Distribution of thermal stress in membrane near heater (Case 2)

$$\frac{P}{V_o} = \frac{dr \cdot h}{\rho \cdot r \cdot \theta} \cdot V^2 \frac{1}{r \cdot \theta \cdot dr \cdot h} = \frac{V^2}{\rho \cdot \theta^2} \cdot \frac{1}{r^2} = \frac{C}{r^2} \quad (3)$$

여기서 r 은 반경, ρ 는 비저항(specific resistance), V 는 전압, P 는 파워이다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 파워 밀도는 r²에 반비례하는 것을 알 수 있다. 식 (3)에서 C 값은 1μsec 이내 잉크와 접촉하고 있는 히터의 아래 면이 280°C 에 도달하는 값으로 정하였다.

응력해석은 먼저 열 전달에 대한 과도 해석을 수행하여 온도 분포를 구한 후, 그 온도 분포와 측정된 잔류응력을 입력하여 전체적인 해석을 수행하였다. 열 전달 해석과 구조 해석을 수행할 때 사용한 물성치는 Table2 와 같다. 그리고 열

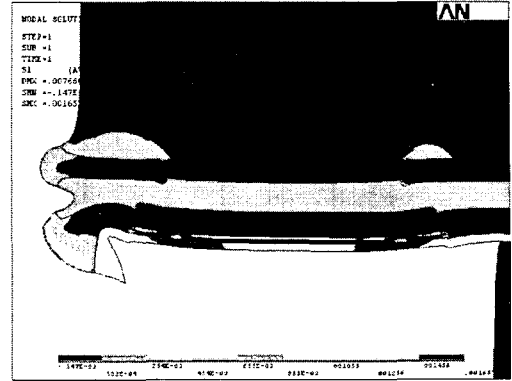
Table 2 Properties of materials

Material \ Property	Ni	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Young's Modulus (x10 ⁻³ , N/μm ²)	200	75	200
Density (x10 ⁻¹⁸ , Kg/μm ³)	8910	2070	3200
Temperature Expansion Coefficient (x10 ⁻⁶ , °C)	8.81	0.4	2.5
Poisson's ratio	0.3	0.2	0.24
Thermal Conductivity (x10 ⁻⁶ , W/μm/K)	90.5	1.4	1.67
Specific Heat (J/Kg/K)	443	840	790

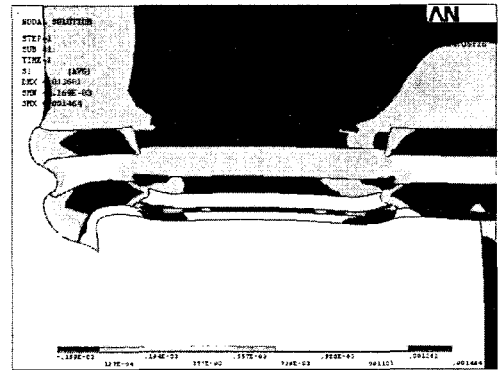
t1 : thickness of Ni layer
 t2 : thickness of SiO₂ layer below Al layer
 t3 : thickness of SiO₂ layer above Al layer
 t4 : thickness of Si₃N₄ layer above heater

전달 해석에 사용한 경계조건은 히터를 구성하고 있는 요소(15 elements)에 열전달률(heat transfer rate) 값을 식 (3)에 따라 r²에 반비례하도록 입력하였다. 즉 전압이 10V 이고 전류가 616mA 인 1μsec 의 펄스를 입력해야 목표 성능을 얻을 수 있음을 성능시험으로 구했다. 따라서 식 (3)에 의해 C 값을 구하면 1943.405 을 얻을 수 있었다. Fig. 2 의 메탈 층은 전극역할을 하기 때문에 박막 위에 있지 않고 몸체(substrate) 위에 있어 박막의 신뢰성 문제에는 영향을 주지 않기 때문에 오메가형의 히터를 환형의 히터로 가정하였다.

따라서 본 연구에서는 실험계획법에 의해서 축대칭 2 차원 해석을 수행하였다. 적용된 실험 계획법은 Table 1 에서 보는 것처럼 4 인자 2 수준의 요인 배치법에 의해서 16 가지 경우에 대해서 해석을 하였다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 8 Distribution of residual stress in membrane near heater (Case 1 and 2)

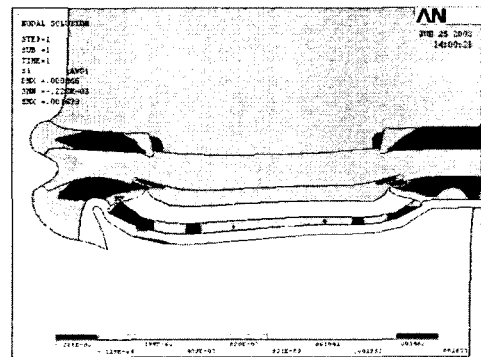


Fig. 9 Distribution of resultant stress in membrane near heater (Case 2)

5. 고찰

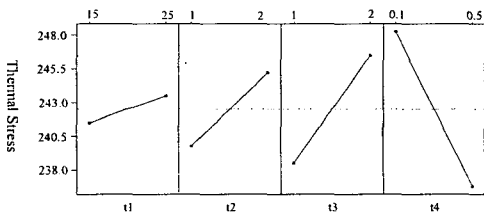
Fig. 6 은 열전달 해석을 수행하여 얻은 히터 주위의 온도분포들중 하나를 보여 준다. 이 그림에서 보는 바와 같이 안쪽 히터의 아래 부분의 온도가 바깥쪽에 비해서 2 배 이상 높다는 것을 보여 준다. 이는 균열의 시작 위치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 최고 온도를 나타내는 곳은 히터의 파워밀도가 가장 큰 가장 안쪽 부분이 아니라 약간 바깥쪽이다. 이는 가장 안쪽 부분은 주위로의 열전달이 일어났기 때문이다.

Fig. 7 은 열전달 해석에 의해서 구한 온도 분포만을 입력으로 하여 얻은 히터 주위의 열응력 분포를 보여준다. 열응력은 재료간 열팽창계수의 차이 때문에 발생한다. 따라서 온도가 가장 높은 곳이 반드시 열응력이 최대가 아니다. 이 그림에서 열응력이 최대인 곳은 실리콘 나이트라이드(Silicon nitrite, Si₃N₄)와 히터의 경계면에서 발생한다. 그리고

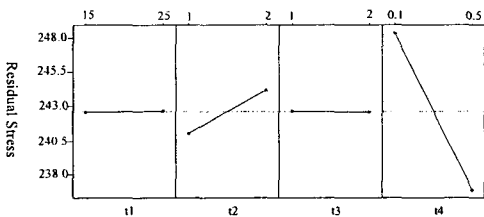
균열이 발생한 히터 아래 층인 Si₃N₄ 층에도 상당한 응력이 발생한다.

Fig. 8 은 측정된 잔류응력만을 입력하여 구한 히터 주위의 응력 분포를 보여준다. 잔류응력에 의한 응력 분포에서 최대 응력이 발생하는 곳은 측정된 잔류응력 값이 가장 큰 Si₃N₄ 층 주위에서 발생한다. 그런데 다른 층의 두께에 따라 최대응력이 발생하는 위치는 달라진다는 것을 Fig. 8(a)와 (b)에서 볼 수 있다. 즉 히터의 위에 있는 Si₃N₄ 층의 두께가 얇을 경우에는 히터 위에서 최대 응력이 발생하고, 두꺼울 경우에는 히터 아래에서 최대응력이 발생하였다. 그러나 히터 아래 층인 Si₃N₄ 층의 안쪽 부분과 바깥쪽 부분에서도 거의 같은 응력이 발생하였다.

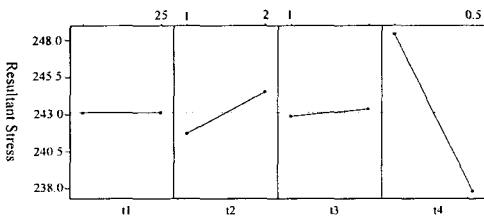
Fig. 9 는 측정된 잔류응력과 가열에 의한 온도 분포를 동시에 고려하여 해석한 결과이다. 이 그림은 히터와 히터 위에 있는 Si₃N₄ 층 주위에서 최대응력이 발생하고 있다는 것을 보여 준다.



(a) Main effects for thermal stress



(b) Main effects for residual stress



(c) Main effects for resultant stress

Fig. 10 Main effects of design parameters for response

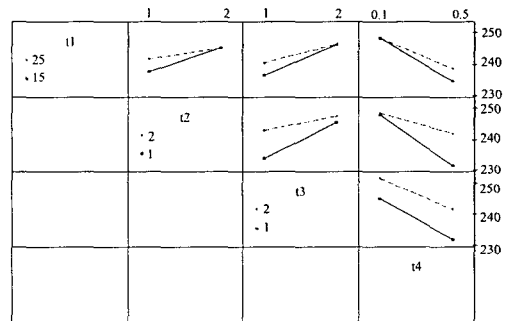


Fig. 11 Interaction effects of design parameters for thermal stress

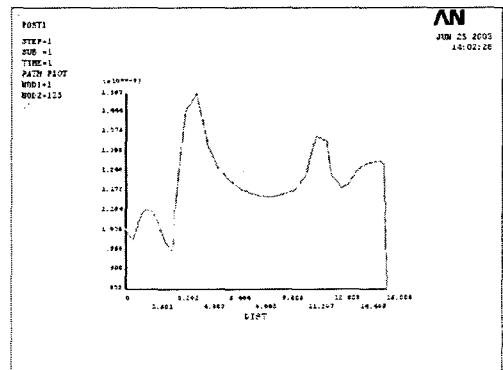


Fig. 12 Distribution of 1st principal resultant stress of layer beneath heater (Case2)

그런데 균열이 발생했던 히터 아래에 있는 Si_3N_4 층의 안쪽 부분에도 상당한 크기의 응력이 발생하고 있다.

Fig. 10 은 각 응력들에 대한 설계 변수들의 영향도를 알아 보기 위해서 실험계획법 분석을 수행한 결과를 보여 준다. 이 그림에서 기울기가 클수록 설계변수의 영향이 크다. 양의 기울기일 때 설계변수의 값이 증가하면, 반응값이 증가하고, 음의 기울기일 때 설계변수의 값이 증가하면, 반응값이 감소한다. 이 그림으로부터 잔류응력, 열응력, 합응력들은 히터 위의 Si_3N_4 층의 두께 변화에 가장 큰 영향을 받고 있다. 히터 위의 Si_3N_4 층의 두께가 두꺼울 수록 균열 발생한 위치에서의 응력값은 작아 진다. 잔류응력과 합응력은 히터 위의 실리콘 다이옥사이드($\text{Silicon dioxide, SiO}_2$)층의 두께 변화에 영향을 받고 있으나,

선택된 나머지 설계변수들에 의한 영향을 받지 않는다. 반면에 열응력은 다른 설계변수들에 의해서도 양의 영향을 받고 있다. 즉, 변수의 두께가 증가하면 응력값도 증가한다.

Fig. 11 은 열응력에 대한 설계변수들의 교호효과를 보여준다. 이 그림에서 두직선의 기울기 차가 클수록 교호효과는 크다. A1 층 위 의 SiO_2 층 두께, t3 와 히터 위 의 Si_3N_4 층 두께, t4 사이의 교호효과만 없고 나머지 변수사이의 교호효과가 있다.

Table 3 은 설계 변수의 변화에 대한 최대 온도, 온도분포에 의해서 발생한 주응력, 잔류응력에 의한 주응력, 온도분포와 잔류응력을 동시에 고려했을 때의 주응력, 즉 합 응력을 보여 준다. 이들 응력 값은 균열이 발생한 히터 아래에 있는 Si_3N_4 층에서 최대값을 읽은 것들이다. Fig. 12 는 히터 아래에 있는 Si_3N_4 층 에서의 응력분포를 보여준다. 이 표에서 잔류응력에 의해서 발생한 응력이 열응력에 의해서 발생한 응력보다 크다는 것을 알 수 있다. 합 응력의 크기는 열응력과 잔류응력의 크기를 합한 값과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 잔류응력은 평균응력의 역할을, 열응력은 진폭의 역할을 하여 피로수명을 저하시킨다.

잔류응력과 열응력이 피로수명에 미치는 영향의 차이를 분석하기 위해서 Goodman 에 의해 제안된 식

$$\frac{S_a}{S_{eq}} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (4)$$

을 사용하여, 등가 진폭을 구하여 그 결과를 Table 3 에 나타냈다. 여기서, S_a 는 진폭, S_{eq} 은 등가진폭, S_m 은 평균응력, S_u 은 인장강도이다. 진폭은 열응력, σ_{th} 을, 평균응력은 잔류응력, σ_r 을, 인장강도는 파손이 일어난 층의 재료인 Si_3N_4 의 인장강도인 13.9GPa 을 대입하여 등가응력을 구하였다. 각 경우에 있어서, 잔류응력이 열응력에 비해서 약 6~7 배 정도 크다. 그러나 등가응력과 열응력을 비교하면, 그 차이가 열응력의 10~13% 정도로, 열응력의 변화가 등가응력의 변화에 더 큰 영향을 주고 있다. 따라서 단순히 응력값 크기만을 비교하면 잔류응력이 피로수명에 더 큰 영향을 미치는 것 같지만, 열응력이 피로수명을 저하시키는 더 큰 요인임을 알 수 있다.

16 가지 경우에 있어서 가장 작은 합 응력은 경우 2 와 10 이다. 이 경우에서 공통적으로 변화된 설계 변수는 히터 위의 Si_3N_4 층의 두께이고 두꺼운 경우가 응력값이 작았다. 그리고 가장 긴

Table 3 Results of FE analysis in design of experiment (DOE)

case	Max. Temp. (°C)	1 st principal stress (MPa)			
		σ_{th}	σ_r	σ_{sum}	S_{eq}
1	576	244	1517	1755	273
2	519	216	1308	1507	238
3	576	252	1528	1774	283
4	519	239	1287	1520	263
5	586	246	1589	1833	277
6	542	240	1355	1573	265
7	586	251	1595	1842	283
8	542	244	1352	1578	270
9	576	244	1516	1755	273
10	519	232	1311	1508	256
11	576	252	1528	1775	283
12	519	239	1289	1521	263
13	586	246	1590	1833	277
14	542	240	1356	1574	265
15	586	251	1596	1843	283
16	542	244	1353	1543	270

Note : σ_{th} : Thermal stress
 σ_r : Residual stress
 σ_{sum} : Resultant stress
 S_{eq} : Equivalent stress

피로수명을 가지는 최적의 박막 두께는 경우 2 일 때이다.

6. 결론

이 연구에서 후방토출 방식의 열전사 잉크젯 프린트헤드에 있어서의 피로수명에 대한 설계 변수들의 영향을 알아 보기 위해서 잔류응력을 측정하였으며 실험계획법을 적용하여 응력 해석을 수행하였다. 그래서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 프린트헤드의 피로수명을 분석할 때는 반드시 잔류응력과 열응력을 동시에 고려하여야 한다.

(2) 프린트헤드의 피로수명에는 잔류응력보다 열응력이 더 큰 영향을 미친다.

(3) 후방토출 방식의 열전사 잉크젯 프린트헤드의 피로수명에 가장 크게 영향을 미치는 설계 변수는 히터 바로 위에 있는 층이고, 이 층이 두꺼울수록 피로수명은 증가 한다.

(4) 후방토출 방식의 열전사 잉크젯 프린트 헤드에서 성능에 영향을 미치는 Ni 층의 두께는 피로수명에 거의 영향을 미치지 않는다.

후 기

이 논문은 2003 학년도 동명정보대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

- (1) Tanner, D. M., Smith, N. F., Bowman, D. J., Eaton, W. P. and Peterson, K. A., 1997, "First Reliability Test of a Surface Micromachined Microengine using ShMMeR," *Proceedings SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication*, Vol. 3224, pp. 14~23.
- (2) Kolpekwar, A. and Blanton, R. D., 1997, "Development of a MEMS Testing Methodology," *Proc. International Test Conference IEEE*, pp. 923~931.
- (3) Tanner, D. M., 2000, "Reliability of Surface Micromachined MicroElectroMechanical Actuators," *Proc. 22nd International Conference on Microelectronics*, Vol. 1, pp. 97~104.
- (4) Rembe, C., Aschemann, H., Wiesche, S., Hofer, E. P., Debeda, H., Mohr, J. and Wallrabe, U., 2000, "Nontactile Reliability Testing of a Micro Optical Attenuator," *Proc. 38th Annual International Reliability Physics Symposium*, pp. 123~128.
- (5) Park, J.-H. and Oh, Y. S., 2004, "Fatigue Test of MEMS Device: a Monolithic Inkjet Print," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 5, pp. 816~825.
- (6) Chang, L.S. and Olive, G., 1987, "Factors Influencing the Lifetime of Thermal Ink-jet Heaters," *SID International Symposium, Digest of Technical Papers, First Edition, Palisades Inst. Res. Services*, pp. 192~195.
- (7) Chang, L.S., 1989, "Mechanisms of Failure of Thermal Ink-jet Thin-film Devices under Stressed Conditions," *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 30, No. 1, pp. 57~63.
- (8) Usui, M., 1996, "Development of the New MACH," *Proc. of the 12th International Congress on Advances in Non-Impact Printing*, pp. 50~53.
- (9) Kamisuki, S., Fujii, M., Takekoshi, T., Tezuka, C. and Atobe, M., 2000, "A High Resolution, Electrostatically-Driven Commercial Inkjet Head," *Proc. of IEEE, The 13th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 793~798.
- (10) Tseng, F., Kim, C. J. and Ho, C., 1998, "A Novel Microinkjet with Virtual Chamber Neck," *Proceedings of IEEE, The 11th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 57~62.
- (11) Lee, S.-W., Kim, H.-C., Kuk, K. and Oh, Y. S., 2001, "A Monolithic Inkjet Print Head: DomeJet," *Technical Digest of 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 515~518.
- (12) Krause, P., Obermeier, E. and Wehl, W., 1995, "Backshooter - A New Smart Micromachined Single-Chip Inkjet Printhead," *Digest of Technical Papers of The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Vol. 2, pp. 325~328.