

FEM해석과 통계적 방법을 이용한 프린터 Gear-Drive ASF Boss의 피로수명 예측

이재혁*, 이종규**

The Prediction Of the Life To Failure Of the Printer Gear-Drive ASF Boss Using the FEM Analysis And the Statistical Method

Jae Hyuk Lee, Jong Gyu Lee

Key Words : 유한요소법, 피로수명, 실험계획법, 회귀분석, 프린터

Abstract

The ASF(Automatic Sheets Feeders) part of the printer has many bosses supporting gear-trains. Steel-pin bosses are substituted for plastic mold bosses because of advantages such as cost reduction, convenience of manufacturing and accuracy in dimension, but they have a weak point such as fatigue fracture due to low material strength, which causes a serious problem in the reliability of product. To prevent the fatigue fracture of bosses, we should exactly estimate the life to failure of the various shapes of bosses. We take the linear FEM analysis and the statistical method in this paper to figure out the life to failure of bosses. The maximum stress and life to failure of bosses can be easily estimated by this method. This paper specifies how to figure out the life to failure of bosses.

기호설명

Su : Ultimate Strength

q : Notch Sensitivity Factor

K_t : Stress Concentration Factor

K_f : Fatigue Notch Factor

1. 서론

프린터의 자동 급지장치에는 많은 Boss 들이 사용되고 있는데 이는 동력전달부인 Gear-Train부를 지지하며 회전 Torque를 정확히

전달하는 기능을 한다. 과거에는 Steel pin을 사용하였으나 최근에는 원가 절감 및 작업의 편리성, 치수의 정확성을 고려하여 플라스틱 재질의 Mold Boss로 제품에 일체화되고 있다.

Buyer들의 제품 신뢰성 요구조건은 현재 60,000매/3년 보장이지만 2000년에는 75,000매/3년, 2001년에는 100,000매/3년으로 요구조건이 점점 가혹해지고 있다. 그러나 Plastic Mold Boss로 재질의 변경에서 오는 재질의 강도 저하로 인하여 보증 한도 내에서 Boss의 파괴 파괴가 발생하고 이로인해 제품의 신뢰성에 문제가 발생하고 있다. 추후 더욱 가혹한 조건에서의 제품의 신뢰성을 유지하기 위해서는

* 삼성전자 CS경영센터 전문기술그룹

** 삼성전자 CS경영센터 전문기술그룹

보증한도를 만족할 수 있는 Boss의 최적설계가 필수적이다.

프린터의 자동 급지장치에는 많은 Boss 들이 사용되고 있는데 형상과 크기가 다양하므로 각각의 Boss에 대해서 피로 수명을 구하는 것은 많은 어려움이 있다. 이를 해결하고자 본 논문에서는 실험을 통해서 HIPS(HR-1360)재료에 대한 정확한 물성치를 확보하고 이들 물성치들을 이용하여 선형 유한요소해석과 실험계획법, Regression과 같은 통계적 방법을 이용하여 피로수명식을 만들어서 설계자들이 간단하게 Boss의 피로수명을 예측하고 최적설계를 위한 주요 설계 인자들에 대한 분석을 할 수 있도록 하고자 한다.

2. 피로시험 결과

본 연구에서는 상온에서 Instron사의 0.1ton 유압식 만능시험기를 사용하여 최대 100만 cycle까지의 HIPS(HR-1360) 소재에 대해서 피로시험을 수행하였다.

탄성 구간에서 하중비 $R=0.1$, 10Hz로 시험을 수행하였고 10^6 Cycle까지 미파단 시편이 발생할 때까지 하중을 변화 시켜가며 수행하여 Table 1의 결과를 얻었고 이를 이용하여 Fig.1의 S-N선도를 구하였다.

Table 1. Fatigue Test Result

Max.	최대응력	피로수명
95	21.9	2,646
90	20.7	8,150
90	20.7	7,670
85	19.6	19,663
80	18.4	41,590
70	16.1	70,340
60	13.8	157,130
55	12.7	288,134
50	11.5	1,027,200

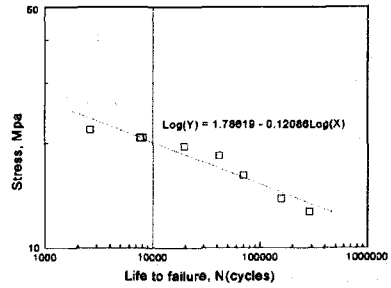


Fig. 1 S-N Curve

3. Boss 피로수명 계산

3.1 실험인자 설정

본 논문에서는 프린터에 사용되는 Boss의 형상을 Fig. 2와 같이 크게 2가지로 나누었고 각각의 형상에 대해서 실험 변수들을 설정하였다. 이들 변수들을 이용하여 직교 배열표를 만들어 구조 해석을 이용한 실험계획법을 수행하여 Boss의 최대응력을 구하는 선형 Regression 방정식을 만들고자한다. 이를위해 각각의 Boss형상에 대해서 Fig. 3과 Table 2와 같이 형상 변수들을 설정하였다.

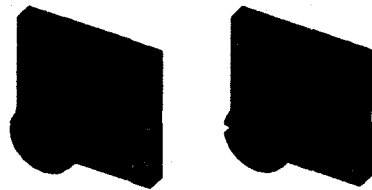


Fig. 2 Boss Shapes

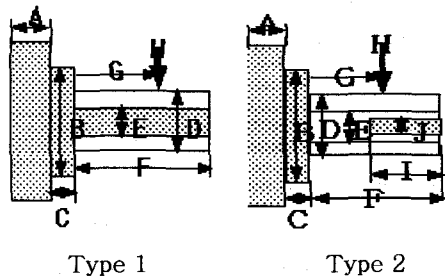


Fig. 3 The Variables Of Experiments

Table 2. The Variables Of Bosses

A	Base Plate Thickness	F	Boss Length
B	Rib Diameter	G	Distance To Load
C	Rib Length	H	Load
D	Outer Diameter	I	Undercut Length
E	Inner Diameter	J	Undercut Thickness

3.2 실험계획법

Boss의 2가지 Type에 대해서 설정된 형상 변수들을 $L_{16}(2^{15})$ 직교 배열표를 사용하여 실험 계획법을 수행 하였다.

3.2.1 Boss Type 1 직교표

Table 3. Experiment Level Of Type 1

실험인자		1수준	2수준
A	Base Plate	2	3
B	Rib Diameter(mm)	12	14
C	Rib Length(mm)	1	3
D	Outer Diameter(mm)	8	10
E	Inner Diameter(mm)	4	6
F	Boss Length(mm)	8	10
G	Distance To Load(mm)	6	8
H	Load(N)	40	60

Table 4. Type 1 Orthogonal Table

No.	A	B	C	D	E	F	G	H	최대응력(Mpa)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	9.76
2	1	1	1	1	1	1	1	2	14.6
3	1	1	1	2	2	2	2	1	8.72
4	1	1	1	2	2	2	2	2	13.1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	8.32
6	1	2	2	1	1	2	2	2	12.5
7	1	2	2	2	2	1	1	1	5.57
8	1	2	2	2	2	1	1	2	8.35
9	2	1	2	1	2	1	2	1	10.9
10	2	1	2	1	2	1	2	2	16.3
11	2	1	2	2	1	2	1	1	5.35
12	2	1	2	2	1	2	1	2	8.03
13	2	2	1	1	2	2	1	1	8.68
14	2	2	1	1	2	2	1	2	13.0
15	2	2	1	2	1	1	2	1	5.44
16	2	2	1	2	1	1	2	2	8.16

Table 3과 같이 A~H 실험인자에 대해서 2개의 수준값을 정한 후 Table 4의 직교 배열표의 실험방법에 따라 FEM해석을 통해서 Boss의 최대응력을 구하였다. 이 응력값을 이용해서 인자 A~H의 선형 Regression 응력식을 만들고자 한다.

3.2.2 Boss Type 2 직교표

Table 5. Experiment Level Of Type 2

실험인자		1수준	2수준
A	Base Plate	2	3
B	Rib Diameter(mm)	12	14
C	Rib Length(mm)	1	3
D	Outer Diameter(mm)	8	10
E	Inner Diameter(mm)	4	6
F	Boss Length(mm)	8	10
G	Distance To Load(mm)	6	8
H	Load(N)	40	60
I	Undercut Length(mm)	3	5
J	Undercut	0.6	1.2

Table 6. Type 2 Orthogonal Table

No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	최대응력(Mpa)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8.60
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	22.5
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	8.96
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	14.3
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	9.07
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	17.3
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	6.23
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	13.5
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	29.2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	31.3
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	6.03
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	8.14
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	14.4
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	16.7
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	12.0
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	10.3

Type 2 Boss의 A~J인자에 대해서도 Type 1 Boss와 같이 실험계획법을 수행하여 Table 5, Table 6과 같은 결과를 얻었다.

3.2.3 Boss 응력계산

Boss Type 1에 대해서는 Table 3과 Table 4와 같이 2수준, 8인자, 16회 실험을 수행하였고 Boss Type 2에 대해서는 Table 5와 Table 6과 같이 2수준, 10인자, 16회 실험을 수행하였다. 각각의 Boss 형상에 대한 실험은 I-DEAS SIMULATION 선형 응력해석을 이용하여 구하였다. Boss Type 1에 대한 1차 선형 Regression 응력식은 $\text{Stress(MPa)} = 26.1 - 0.633A - 1.05B - 0.384C - 1.96D + 0.779E - 0.086F + 0.631G + 0.196H$ 으로 구해졌다.

Table 7. Type 1 Factor Contributions

No.	실험인자		%기여도
1	D	Outer Diameter	37.39
2	H	Load	37.30
3	B	Rib Diameter	10.67
4	E	Inner Diameter	5.91
5	G	Distance To Load	3.88
6	C	Rib Length	1.44
7	A	Base Plate Thickness	0.97
8	F	Boss Length	0.07
9	기타		2.37

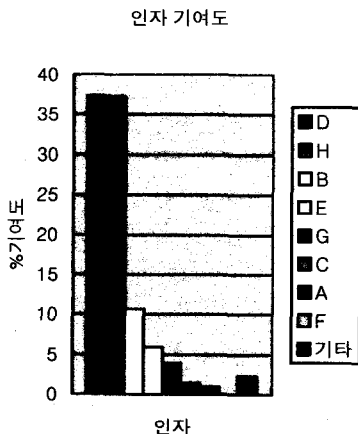


Fig. 4 Plot Of Factor Contributions Of Type 1

Table 7의 실험인자 기여도 분석을 통해 보면

Type 1 Boss의 최대 응력을 결정 하는데 가장 중요한 인자는 D와 H로 기여도 37.39%, 37.30%를 나타내고 있다.

Type 1 Boss의 인자 기여도는 $D > H > B > E$ 순으로 나타났으므로 Type 1 Boss를 최적 설계를 위해서는 D,H,B,E인자를 우선 고려해야 한다.

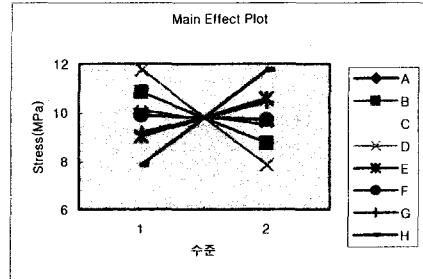


Fig. 5 Main Effects Plot Of Type 1

Table 8. P-Value Of Type 1

No.	실험인자		P Value
1	Constant		0
2	A	Base Plate Thickness	0.133
3	B	Rib Diameter	0.001
4	C	Rib Length	0.078
5	D	Outer Diameter	0
6	E	Inner Diameter	0.004
7	F	Boss Length	0.657
8	G	Distance To Load	0.012
9	H	Load	0

Fig. 5의 주효과 그림에서와 같이 D(↑), H(↓), B(↑), E(↓)로 설계를 하는 것이 Boss의 응력을 최소화 할 수 있다. Regression응력식의 R-sq = 97.6%로 직선성은 유의하게 나왔고 Table 8의 P-value도표에서 보면 A, C, F인자가 유의 수준 5%는 벗어 났지만 인자 기여도가 미비하므로 Regression 응력식은 유의하고 피로해석의 응력식으로 사용할 수 있다고 판단된다. 같은 방법을 이용하여 Boss Type 2에 대한 1차 선형 Regression을 이용한 응력식은 $\text{Stress(MPa)} = 39.1 + 3.45A - 1.85B + 0.813C - 4.35D + 2.54E -$

2.42F+ 2.27G+ 0.247H+ 1.87I+ 1.53J으로 구해졌다.

Table 9. Type 2 Factor Contributions

No.	실험인자		%기여도
1	D	Outer Diameter	34.62
2	E	Inner Diameter	11.81
3	H	Load	11.18
4	F	Boss Length	10.72
5	G	Distance To Load	9.43
6	I	Undercut Length	6.4
7	B	Rib Diameter	6.23
8	A	Boss Plate Thickness	5.45
9	C	Rib length	1.21
10	J	Undercut Thickness	0.39
11	기타		2.56

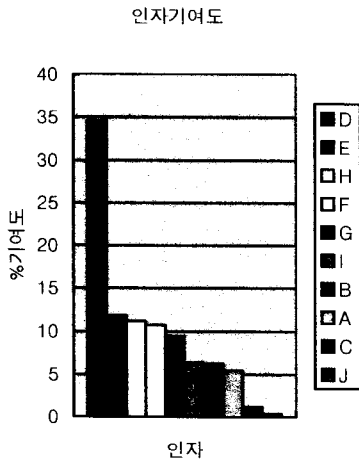


Fig. 6 Plot Of Factor Contributions Of Type 2

Table 9에서 Type 2 Boss의 인자기여도를 보면 D인자가 34.62%로 가장 큰 기여도를 나타내고 다음으로 E,H,F,G인자가 약 10% 정도의 비슷한 수준으로 기여도를 점유하고 있으므로 Type 2 Boss에 대해서는 D인자 (Boss 외경)가 다른 인자들에 비해서 응력 값에 많은 영향을 끼친다고 판단된다.

Type 2 Boss의 인자 기여도는 D>E>H>F>G 순으로 나타났으므로 Type 2 Boss의 최적설계를 위해서는 D,E,H,F,G인자를 우선 고려해야만 하고 Fig. 7의 Type 2 Boss의 주효과 그림에서와 같이 D(↑),E(↓),H(↓),F(↑),G(↓)로 설계하는 것이 Boss의 응력을 최소화 할 수 있다.

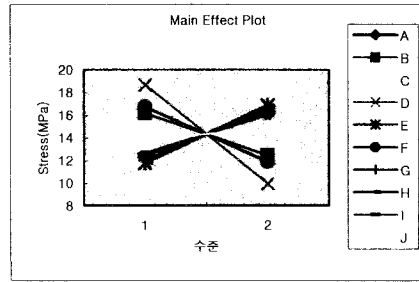


Fig. 7 Main Effects Plot Of Type 2

Table 10. P-Value Of Type 2

No.	실험인자		P Value
1	Constant		0.02
2	A	Base Plate Thickness	0.023
3	B	Rib Diameter	0.018
4	C	Rib Length	0.186
5	D	Outer Diameter	0
6	E	Inner Diameter	0.005
7	F	Boss Length	0.006
8	G	Distance To Load	0.008
9	H	Load	0.006
10	I	Undercut Length	0.017
11	J	Undercut Thickness	0.426

Regression응력식의 R-sq=97.4%로 직선성은 유의하게 나왔고 Table 8에서 C,J 인자가 유의 수준 5%에서 벗어났지만 인자 기여도가 미비하므로 Regression 응력식은 유의하고 피로 해석의 응력식으로 사용할 수 있다고 판단된다.

3.3 응력보정

대부분의 Mold Boss에는 응력을 줄이기 위해 Fillet이 되어있기 때문에 위에서 구한 응력식에 Fillet 효과를 고려해야만 한다. Fillet 효과를 고려한 응력식을 구하는 방법은 다음과 같은

방법을 사용하였다.

1) Brinell Hardness Number(BHN)를 근사식을 이용하여 구한다.

$$BHN \approx 2 \times S_u$$

2) Notch Sensitivity Factor를 구한다.

$$a = \left(\frac{600}{BHN}\right)^{1.8} \times 10^{-3} \text{ in 에서}$$

$$q = \frac{1}{(1+a)} \quad (r : \text{Fillet Radius})$$

3) K_t (Stress Concentration Factor)를 구한다.

$$S = \frac{32 F t d_0}{\pi (d_0^3 - d^3)}, \quad \text{정적하중 응력식을 이용하여}$$

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{S} \text{ 를 구한다.}$$

(σ_{\max} : 구조해석으로 구한 최대응력)

4) $q = \frac{K_t - 1}{K_t}$ 관계에서

Fatigue Notch Factor K_f 를 구한다.

5) Fillet 효과를 고려한 최종 Boss의 응력은 다음과 같다.

$$S_f = \frac{S_r}{K_f} \quad (S_r : \text{Regression 응력식})$$

6) S_f 를 S-N 선도에 대입하여 피로수명을 계산

$$\text{Log}(S_f) = -0.12086 * \text{Log}(\text{Life}) + 1.78619$$

4. 결론

본 논문에서는 FEM해석과 통계적인 방법을 이용해서 프린터에서 사용되는 Mold Boss의 피로수명을 구하였고 각 인자들의 기여도와 유의성에 대해서 검토하였다.

이를 통해 Boss를 설계할 때 있어서의 중요 인자들을 파악할 수 있고 형상에 대한 피로수명을 예측 할 수 있는 방법을 제시 하였다.

지금까지의 방법은 1가지 HIPS(HR-1360) 소재에 대해서만 임의의 형상에 힘이 가해 질 때의 피로수명을 예측하였지만 앞으로는 여러

소재에 대해서도 적용하여 소재나 형상에 구애없이 피로수명을 예측하는 방법을 만들고자 한다.

참고문헌

1. Julli A. Bannantine, Jess J. Comer James L. Handrock, "Fundamentals Of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990
2. Joseph Edward Shigley, Charse R. Mischke "Mechanical Engineering Design", McGRAW-HILL
3. 염봉진, 변재현, 이승훈 "실험계획 및 분석 : 다구치 방법과 직교표의 활용", 한국과학기술원, pp. 104-106, 1999