

체결 성능 향상을 위한 FPCB 커넥터의 형상설계

김대영* · 박형서** · 김웅겸*** · 표창률**** · 김현영*†

* 강원대학교 기계의용공학과, ** (주)화신,
*** (주)새한마이크로텍, **** 인덕대학교 기계자동차과

Shape Design of FPCB Connector to Improve Assembly Performance

Dae-Young Kim^{*}, Hyung-Seo Park^{**}, Woong-Kyeom Kim^{***}, Chang-Ryul Pyo^{****}
and Heon Young Kim^{*†}

^{*} Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

^{**} Research Planning Team, HWASHIN Co., LTD,

^{***} R&D center, Sae Han Micro Tech Co., LTD,

^{****} Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Induk Univ.

(Received August 8, 2011; Revised December 22, 2011; Accepted December 23, 2011)

Key Words: FPCB Connector(연성인쇄회로기판 커넥터), Terminal(터미널), Fine Pitch(협피치), Design Optimization(형상 최적화), Fatigue Life(피로수명)

초록: 최근 휴대폰은 스마트폰의 출현으로 다기능화가 요구되고 있으며, 각 보드의 전기적 신호를 연결시키는 커넥터는 필수 핵심 부품이 되었다. 커넥터는 많은 양의 전기신호를 처리하기 때문에 소형화, 협피치화가 필요하다. 하지만, 커넥터의 소형화 및 협피치화는 구조적 안전성을 저하시키며, 외부하중에 의한 접촉불량을 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 초소형 협피치 FPC 커넥터를 개발하기 위해 벤치마킹을 통한 초기설계안을 도출하였으며, 터미널 두께 0.2mm, 개수 50 개를 기준으로 하였다. 체결성능을 평가하기 위해 수치해석 모델을 구성하였으며, 다구찌 방법을 이용하여 형상 최적화를 수행하였다. 또한, 터미널의 한계수명을 예측하기 위해 피로해석을 수행하였으며, 체결 성능이 향상된 최종형상을 도출하였다.

Abstract: Recently, multi-functionalization (as in smart phones) has been in demand, and the connectors connecting the electrical signals of each board in a cellular phone have become key components. The miniaturization of these connectors is required to achieve a finer pitch design and enhance the electrical signal transfer capacity. However, the miniaturization of connectors reduces the structural safety, and a finer pitch design may cause contact problems under external impact. In this paper, a preliminary design for miniaturized, finer-pitch connectors is suggested for a product with 50 pins and a thickness of 0.2 mm. The assembly process of the FPCB (Flexible Printed Circuit Board) and connector was simulated to ensure the holding force between the two components and avoid overstressing. The design optimization process was performed with the Taguchi method. Fatigue analysis was also conducted to predict the fatigue life of the terminal, and the theoretical and experimental results were compared.

1. 서론

최근 휴대폰(cellular phone)은 스마트폰(smart phone)의 대중화로 인해 다양한 어플리케이션(application) 및 멀티미디어 기능이 요구되고 있다. 또한, 고성능의 운영체제(OS)와 연산처리기(CPU),

주변장치 등을 필요로 한다. 이는 음성과 텍스트 중심의 기존 휴대폰 개념에서 벗어나 인터넷 검색, 동화상 송/수신 등의 업무를 가능하게 하며 초소형 컴퓨터의 기능까지 부여하고 있다. 휴대폰의 빠른 변화는 휴대폰 내의 다양한 보드(board)를 필요로 하고, 보드들 간의 기능 연결이 무엇보다 중요하게 되었다. 이때, 각 보드들의 전기적 신호를 연결해 주는 부품소재를 커넥터(connector)라 하며, 디지털 카메라, MP3 플레이어, 네비게이션, DMB 단말기, 디스플레이어(LCD, PDP, OLED), 시리얼

† Corresponding Author, khy@kangwon.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

ATA 등의 모든 전자제품에 사용된다. 커넥터 시장은 일본의 업체들이 장악하고 있지만, 국내 업체는 시장 점유율이 낮고, 기술적 수준이 상대적으로 떨어져 있는 상황이다.

휴대폰의 다기능화에 따라 커넥터 또한 소형화, 협피치(fine pitch)화 추세에 있다.^(1,2) 하지만, 초소형 고정밀 커넥터는 기존 커넥터에 비해 구조적 안전성이 떨어지며, 체결시 문제가 발생할 수 있다. 체결 문제는 터미널(terminal)간의 큰 전기 저항을 유발시키며, 전기 신호의 단절로 인해 본래의 기능을 잃어버리게 한다.^(2,3) 또한, 외부 하중이나 커넥터의 반복 운동에 의해 내구성이 떨어질 수 있으며, 온도에 따른 물성저하가 발생하기도 한다. 따라서 커넥터 개발을 위해서는 커넥터의 구조 안전성 및 내구성 확보가 필요하다.

본 논문에서는 휴대폰에 상당부분 적용되고 있는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board) 커넥터를 개발하고자 하였다. 현재 양산되어 판매되고 있는 모델을 벤치마킹 하였으며, 터미널 두께와 터미널 간격, 개수 등을 고려하여 초기설계안을 도출하였다. 터미널의 반복 패턴 중 일부분을 고려하여 수치모델을 구성하였으며, FPC가 삽입(insertion)되는 과정을 모사하였다. 수치모델의 검증은 벤치마킹 모델에 대한 해석 및 시험값과의 비교를 통해 이루어졌다. 또한, 커넥터의 체결력을 향상시키기 위해 설계인자(design factor) 및 문제점을 분석하였으며, 각 인자들에 대한 설계 최적화(design optimization)를 수행하였다. 용도에 따라 FPCB의 반복적인 삽입과 발거(ejection)가 발생하기 때문에 터미널의 피로수명(fatigue life)을 예측하는 것이 중요하다. 따라서 벤치마킹 모델의 피로해석을 수행한 후 예측된 결과를 시험결과와 비교하였다. 마지막으로 동일한 해석 과정을 거쳐 벤치마킹 모델 대비 체결력과 피로 성능이 우수한 FPCB 커넥터를 설계하였다.

2. FPCB 커넥터의 형상설계

FPCB 커넥터는 일반적으로 Fig. 1 과 같이 터미널과 액츄에이터(actuator), 하우징(housing), FPCB로 구분된다. 커넥터의 체결은 액츄에이터의 회전에 의해 액츄에이터와 터미널, 터미널과 FPCB가 접촉하여 이루어진다. 터미널은 커넥터의 가장 중요한 역할을 하는 부품으로서 전기 전도도를 높이기 위해 동합금 박판이 사용되며, 프레스 가공 후 금 또는 주석이 도금되어 제조되는 것이 일반적이다. 하우징과 액츄에이터는 먼지, 습기 및 전기 간섭 등으로부터 터미널을 보호하기 위해 필요로 되며,

폴리머 소재를 이용하여 사출방식으로 성형된다.^(4,5) 커넥터 설계의 주요 관건은 안정적인 접점을 통해 항상 일정한 전류가 흐르도록 유지시키는 것이다. 따라서 FPCB와 접촉하는 터미널의 형상에 따라 체결 성능이 상이해지며, 터미널 설계가 커넥터 성능에 직접적으로 영향을 미친다.⁽²⁾

본 논문에서는 성능이 우수하고, 현재 양산되어 판매되고 있는 A사 모델을 목표로 벤치마킹 하였다. 벤치마킹 모델은 0.2mm 피치를 가지며, FPCB와 터미널이 1점 접촉방식으로 설계되어 있다. 벤치마킹 모델의 문제점을 분석하였으며, 체결방식과 터미널 형상을 수정하였다. 벤치마킹 모델과 개발모델의 초기설계안을 Fig. 2에 나타내었다. 개발모델의 접촉력을 높이기 위해 터미널과 FPCB의 접촉을 2점으로 하는 방법을 선택하였으며, 두께를 0.2mm로 설계하였다.

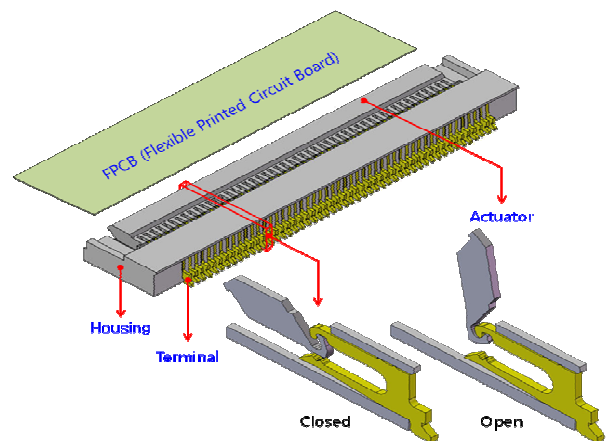


Fig. 1 Components of FPCB connector (Benchmarking model)

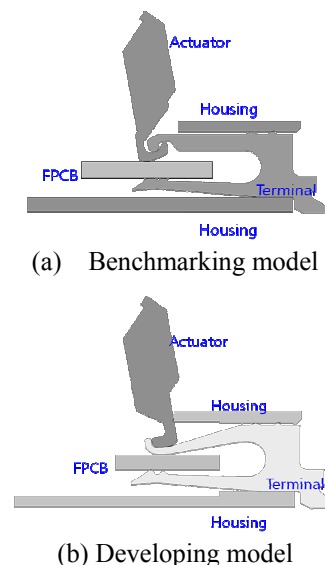


Fig. 2 Design of FPCB connector (Developing model)

3. 체결해석 및 형상최적화

3.1 유한요소모델링

FPCB 커넥터의 핵심은 높은 체결력을 유지하는 것이기 때문에 체결력을 평가하는 것이 중요하다. 체결력을 평가하기 위해 수치해석 방법을 적용하였으며, 상용해석 프로그램인 ABAQUS/Standard 로 해석을 진행하였다. 체결시 발생하는 하중과 응력 분포를 평가하기 위해 개발모델과 벤치마킹 모델의 해석 결과를 비교하였다.

유한요소모델은 Fig. 3 과 같이 FPCB, 터미널, 하우징, 액츄에이터로 구성하였으며, 벤치마킹 모델을 나타내고 있다. FPCB 는 전기신호 연결을 위해 커넥터에 삽입될 때, 다른 구성품에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 FPCB 가 이미 삽입되어 있는 상태로 가정한 후 해석 초기에 터미널 안쪽까지 위치시켰으며, FPCB 한쪽 끝부분을 높이 방향에 대한 자유도만 허락하였다. 해석시간을 고려하여 터미널 1 개에 해당되는 부분을 해석영역으로 설정하였으며, 평면응력상태(plane stress state)로 가정하였다. 벤치마킹 모델과 개발모델 모두 체결 메커니즘이 동일하기 때문에 각 모델의 액츄에이터에 80° 회전각을 부여하여 체결과정을 모사하였다. 또한, 액츄에이터와 하우징은 강체(rigid body)로 가정하였으며, 무마찰 조건으로 해석을 진행하였다. 터미널과 보드 간의 연결은 전기신호 전달을 위해 납땜(soldering)되기 때문에 터미널의 일정부분에 자유도를 전부 구속하였다.

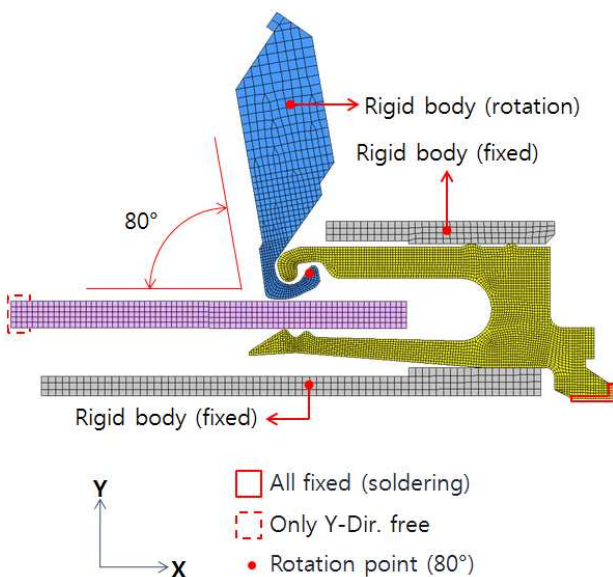


Fig. 3 Finite element model and boundary condition of FPCB connector for assembly analysis

상대적으로 변형량이 큰 터미널과 FPCB 는 탄소성 재료모델을 사용하여 그 거동을 표현하였다. 액츄에이터는 내열성 및 전기 절연성이 우수한 액정 폴리머(LCP - liquid crystal polymer) 재질이 적용되었고, 터미널은 2mm 두께의 인청동(phosphor bronze) 재질에 금(Au)을 코팅하여 전기 전도성을 높인 재료가 적용되었다. 단축인장시험으로부터 응력과 변형률의 관계를 구하였으며, Table 1 에 각 구성품의 재료특성을 나타내었다.

3.2 체결해석 결과

벤치마킹 모델과 개발모델의 체결해석 결과로부터 응력분포를 Fig. 4 와 5 에 나타내었다. 벤치마킹 모델의 경우, 최대 응력이 약 0.625GPa, 최대변위가 0.178mm 로 나타났으며, 소성변형이 발생하지 않음을 확인하였다. 개발모델의 경우, 최대응력이 약 0.575GP 로 측정되었으며, 벤치마킹 모델에 비해 약 9% 더 낮은 것으로 나타났다. 또한, 최대변위가 0.087mm 로 측정되었다. 이는 벤치마킹 모델에 비해 개발모델이 하중분산 측면에서 보다 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한, FPCB 의 체결력을 평가하기 위해 하중을 측정된 결과, Table 2 와 같이 개발모델이 약 39% 더 크게 나타났다. 따라서 개발모델의 2 점 접촉방식 설계가 터미널에 작용하는 하중을 보다 잘 분산시키고, 체결력을 높이는 데 효과적임을 알 수 있다.

Table 1 material property for terminal and actuator

	Terminal	Actuator
Material	Phosphor bronze	LCP
Elastic modulus	110GPa	19.3GPa
Yield strength	0.673GPa	0.89GPa
Tensile strength	0.762GPa	0.103GPa
Poisson's ratio	0.34	0.4

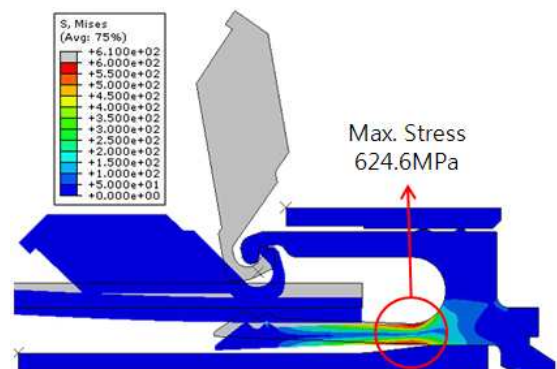


Fig. 4 Stress distribution of benchmarking model

Table 2 Comparison of maximum stress and force between benchmarking model and developing model

	Benchmarking	Developing
Max. stress (GPa)	0.624	0.575
Force (N)	1.945	2.695
Max. disp. (mm)	0.178	0.087

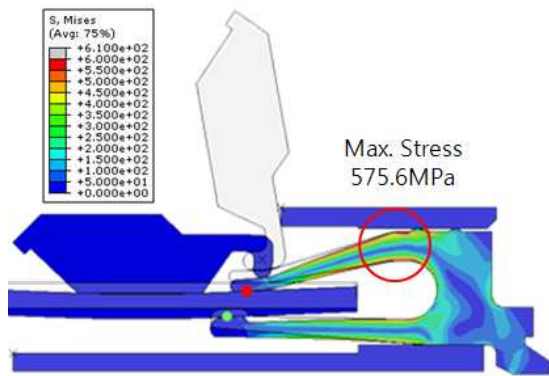


Fig. 5 Stress distribution of developing model

3.3 형상최적화

초기설계안으로부터 형상최적화를 수행하기 위해 실험계획법(experiment design)을 적용하였다. 본 연구에서는 다양한 실험계획법 중 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용하였다.⁽⁶⁾ 다구찌 방법은 산포의 크기를 SN 비로 변환하여 산포가 적은 인자를 찾아가는 파라미터 설계에 주로 이용된다. 신호의 힘(power of signal)대 잡음의 힘(power of noise)으로 표현되는 SN 비는 잡음으로 인한 특성치의 변동이 초래되어 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨리게 되므로 신호의 힘을 증가시켜 시스템을 안정화 하도록 도입되었다. 다구찌 방법은 특성치에 따라 망목(nominal the best), 망소(smaller better), 망대(larger better) 특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 망대 특성과 망소 특성을 모두 고려하였으며, 체결력이 망대 특성에 해당되고, 최대 응력이 망소 특성에 해당된다. 망소 특성과 망대 특성에 대한 손실함수는 다음과 같다.

$$L(y) = ky^2, k = \frac{A}{\Delta^2}; (Smaller\ better) \quad (1)$$

$$L(y) = k\left(\frac{1}{y^2}\right), k = A\Delta^2; (Larger\ better) \quad (2)$$

여기서, $L(y)$ 는 손실함수이고, y 는 측정치, k 는 상수, A 는 손실정도, Δ 는 허용오차를 의미한다. 망소 특성과 망대 특성의 SN 비를 계산하는 식은 다음과 같다.

Table 3 Design factors and the dimensions

Design factor	Position	Dimensions
A	α	$9^\circ \sim 13^\circ$
B	β	$0^\circ \sim 1^\circ$
C	r	0.35mm ~ 0.45mm

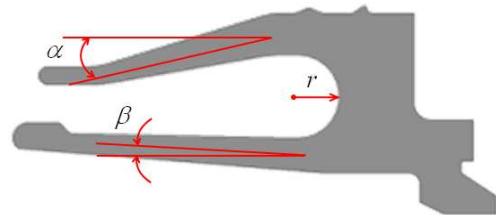


Fig. 6 Position of design factors

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]; (Smaller\ better) \quad (3)$$

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]; (Larger\ better) \quad (4)$$

여기서 n 은 데이터 개수를 의미하고 y_i 는 측정치를 의미한다.

다구찌 방법을 이용한 파라미터 설계 방법은 다음과 같다.⁽⁶⁾ 우선 제어 가능한 인자들로 이루어진 실험을 구성한 후 각 실험조건의 측정치로부터 SN 비를 계산한다. 이때 실험을 구성하기 위해 주로 직교배열표(orthogonal arrays)가 사용된다. 계산된 SN 비에 대해 분산분석(ANOVA - analysis of variance)을 수행하고, 각 인자의 유의성을 확인한다. 유의한 제어인자들의 최적수준은 SN 비를 최대로 하는 수준조합이기 때문에 SN 비의 영향성이 적은 인자는 제거한 후 다시 최적조합을 찾는다.

앞서 기술한 다구찌 방법을 토대로 FPCB 커넥터의 최적설계를 수행하기 위해 설계 인자 및 범위를 결정하였다. 터미널은 FPCB 와 접촉하는 부분의 형상이 민감하게 반응할 것으로 판단하여 Fig. 6 과 같이 설계 변수를 결정하였다. 설계범위는 각 각도의 범위를 최대와 최소로 하였을 때, 서로의 치수를 침범하지 않는 설계가능 영역에서 설정하였으며, Table 3 에 나타내었다. 다구찌 방법에서 일반적으로 사용되는 3 수준(level)계 3 인자(factor) 실험에 해당하는 L9 직교배열표를 적용하였으며, Table 4 에 나타내었다. 각 인자들이 서로 미치는 영향이 적은 것으로 가정하여 교호작용은 무시하였다. L9 의 직교배열표를 이용한 체결해석 결과값들은 Table 5 와 같고, 최대응력과 체결력에 대한 SN 비의 각 인자별 수준 평균을 구하면, Table 6 과 같다.

Table 4 Table of orthogonal arrays

L9	Control factor (L-level, D-dimension)					
	A		B		C	
	L	D	L	D	L	D
1	1	9°	1	0°	1	0.35mm
2	1	9°	2	0.5°	2	0.4mm
3	1	9°	3	1°	3	0.45mm
4	2	11°	1	0°	2	0.4mm
5	2	11°	2	0.5°	3	0.45mm
6	2	11°	3	1°	1	0.35mm
7	3	13°	1	0°	3	0.45mm
8	3	13°	2	0.5°	1	0.35mm
9	3	13°	3	1°	2	0.4mm

Table 5 Analysis results for orthogonal arrays

L9	Control factor			Force(N)	Max. stress(GPa)
	A	B	C		
1	1	1	1	2.511	0.575
2	1	2	2	2.795	0.587
3	1	3	3	2.974	0.632
4	2	1	2	2.787	0.614
5	2	2	3	2.985	0.647
6	2	3	1	2.766	0.621
7	3	1	3	3.334	0.678
8	3	2	1	3.197	0.654
9	3	3	2	3.252	0.673

Table 6 Average of SN ratio

Level	Force			Max. stress		
	A	B	C	A	B	C
1	26.391	27.359	26.929	13.420	12.419	12.633
2	27.239	28.521	28.073	12.157	12.098	12.304
3	30.797	28.547	29.425	10.504	11.564	11.143
Total	84.427	84.427	84.427	36.081	36.081	36.081

Table 7 ANOVA table

	Position				Dimensions			
	S	Q	V	F ₀	S	Q	V	F ₀
A	3.643	2	1.822	11.87	1.426	2	0.713	11.46
B	0.307	2	0.153	-	0.124	2	0.062	-
C	1.041	2	0.520	3.39	0.408	2	0.204	3.28
Total	4.991	6	-	-	1.958	6	-	-

다음은 분산분석(ANOVA, analysis of variance)을 수행하여 각 인자의 유의성을 확인하고자 하였다.

분산분석이란 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 앞서 구한 SN 비를 토대로 분산분석을 수행한 결과, Table 7 과 같이 나타났으며, 이때 S는 각 인자별 수준의 합계, Q는 자유도, V는 평균제곱, F₀는 평균제곱의 비로서 F 검증에 사용된다. 오차항의 경우 제곱합이 제일 작은 B 인자를 오차로 설정하고, 분산분석을 수행하였다. 그 결과, A와 C 인자에 대한 F₀를 계산할 수 있었으며, F 분포표⁽⁶⁾를 기준으로 A 인자는 5%, C 인자는 10%에서 유의한 것을 확인하였다. 따라서 A와 C 인자를 기준으로 설계 조건을 고려하였으며, 항복응력이 넘지 않는 기준에서 체결력이 최대일 때를 최종 설계안으로 결정하였다.

4. 터미널의 피로수명 예측

4.1 피로시험

벤치마킹 모델의 피로시험을 수행하기 위해 Fig. 7 과 같이 기판과 연결되는 터미널의 끝단부를 구속하고 Y축 방향으로 0.17mm의 변위를 반복적으로 가하여 체결과정에서 발생하는 굽힘 변형을 유도하였다. 변위의 크기는 체결해석의 결과로부터 측정된 최대변위를 기준으로 하였다. 시험 결과, 10⁵cycle 이상의 피로수명이 나타나는 것을 확인하였으며, 실제 휴대폰의 FPCB 커넥터가 받는 피로한도를 넘어서는 것으로 판단하였다.

4.2 피로해석

터미널에 대한 피로수명을 예측하기 위해 시험과 동일한 경계조건을 부여하여 해석을 진행하였다. 벤치마킹 모델의 경우, 0.17mm의 반복하중을 부여하였고, 개발모델의 경우에는 FPCB와 접촉하는 부위에 각각 0.11mm와 0.08mm의 반복하중을 부여하였다. 또한, Fig. 8 과 같이 나타나는 인청동 재질의 S-N 선도⁽⁷⁾를 참고하여 해석에 적용하였다.

일반적으로 피로거동은 응력비를 따르는 범위와 평균응력(mean stress) 함수의 Goodman 선도⁽⁸⁾로 나타낸다. 따라서 피로수명 계산 이론은 Goodman 이론을 적용하였다. 피로 사이클에 대한 응력비의 정의는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{5}$$

여기서, σ_{\min} 은 피로응력의 최소응력, σ_{\max} 는 피

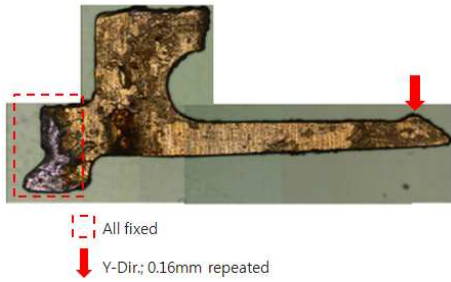


Fig. 7 Boundary condition of fatigue test

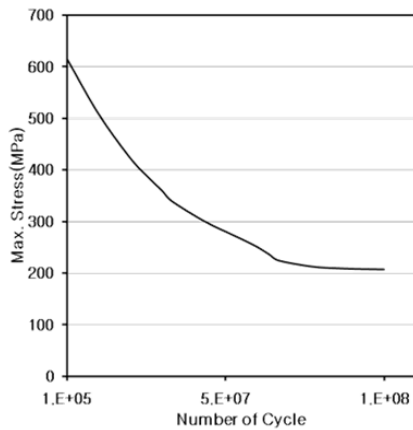


Fig. 8 S-N curve for phosphor bronze

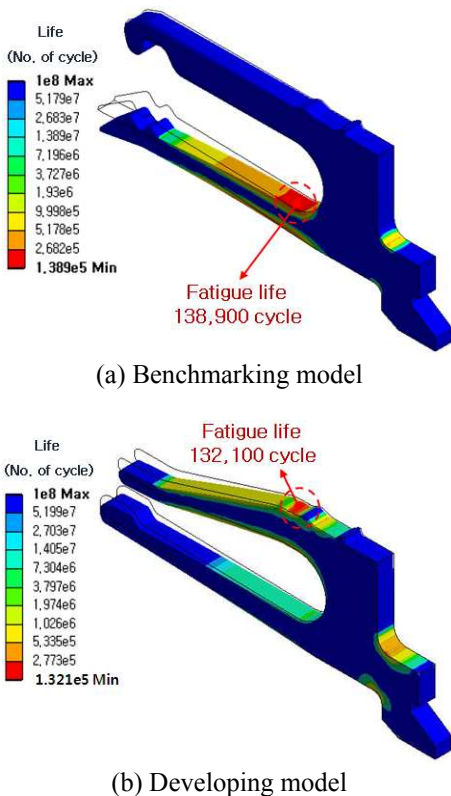


Fig. 9 Fatigue life distribution

로응력 사이클에서 최대응력을 나타낸다.

피로해석 결과, 벤치마킹 모델의 경우에는 피로수명이 약 $1.39e^5$ cycle 이었고, 개발모델은 $1.32e^5$ cycle 로 측정되었다. 피로수명이 벤치마킹 모델 대비 약 5.3% 줄어들었지만, 실제 제품 적용에서는 필요로 되는 수명 이상이기 때문에 체결력 확보를 위해 최종설계안으로 도출하였다. 피로수명에 대한 분포를 Fig. 9 에 나타내었다.

5. 결론

- (1) 체결성능을 고려한 협피치 FPCB 커넥터를 설계하기 위해 벤치마킹을 수행하였으며, 2 점 접촉방식의 커넥터 형상을 설계하였다.
- (2) 수치해석 방법을 적용하여 1pin 에 대한 체결과정을 모사하였으며, 개발모델의 초기설계안이 벤치마킹 모델에 비해 체결하중은 약 39%, 최대응력은 약 9% 향상된 것을 확인하였다.
- (3) 다구찌 방법을 적용하여 형상최적화를 수행하였으며, 초기설계안에 비해 체결성능이 향상된 형상을 도출하였다.
- (4) 벤치마킹 모델에 대한 피로시험 및 피로해석을 수행하여 피로수명을 확인하였으며, 개발모델에 적용하여 피로수명을 예측하였다. 개발모델이 벤치마킹 모델에 비해 피로수명이 작지만, 실제 사용수명 이상인 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Kim, C. J., Han, S. Z., Jung, Y. C. and Lee, J. M., 1997, "Development of High Strength and High Elastic Alloy for Connectors," *Bulletin of the Korean Inst. Of Met. & Mat*, Vol.10, No.6, pp. 676.
- (2) Kim, W. K., Pyo, C. R., Jeon, B. H., Park, H. S., Lee, S. I., Ko, T. S., Son, Y. S., Park, G. W. and Bang, I. W., 2010, "Optimization of Etching Process for Manufacturing the Burrless Connector Terminal," 2010 Spring Conference of *Korea Society for Precision Engineering*, pp. 223~224.
- (3) Shibutani, T., Wuc, J., Yu, Q. and Pecht, M., 2008, "Key reliability concerns with lead-free connectors," *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 1613~1627.
- (4) Kim, S. W., Jung, W. W., Wei, S. H., Kim, H. M., Park, S. B. and Lee, D. H., 2008, "Reappearance of the Electrical Poor Contact in Connectors by Fretting Wear," *2008 KSME Autumn Conference*, pp. 1361~1362.
- (5) Jeon, B. H. and Ann, K. S., 1993, "A Study on the Interconnection Mechanism of Compliant Press-Fit

- Pin(II),” *AUTO JOURNAL of KSAE*, Vol. 15, No. 1, pp. 89~90.
- (6) Park, S. H., 2006, “Design of Experiments,” pp. 563~584.
- (7) Gohn G., Guerard J. and Freynik H., 1956, “The Mechanical Properties of Wrought Phosphor Bronze Alloys,” *ASTM International*, pp.20~114.
- (8) Bedford, A. and Liechti, K. M., “Mechanics of Materials,” 2004, *Prentice Hall*, pp. 516~518.