

이방성 전도 필름을 이용한 플립칩 패키지의 열피로 수명 예측 및 강건 설계

남 현 옥*

(2004년 4월 24일 접수, 2004년 7월 7일 심사완료)

Robust Design and Thermal Fatigue Life Prediction of Anisotropic Conductive Film Flip Chip Package

Hyun Wook NAM

Key Words : Flip Chip(플립칩), ACF(이방성전도필름), Thermal Fatigue(열피로), Fatigue Life(피로수명), Reliability Analysis(신뢰성 해석)

Abstract

The use of flip-chip technology has many advantages over other approaches for high-density electronic packaging. ACF (anisotropic conductive film) is one of the major flip-chip technologies, which has short chip-to-chip interconnection length, high productivity, and miniaturization of package. In this study, thermal fatigue life of ACF bonding flip-chip package has been predicted. Elastic and thermal properties of ACF were measured by using DMA and TMA. Temperature dependent nonlinear bi-thermal analysis was conducted and the result was compared with Moire interferometer experiment. Calculated displacement field was well matched with experimental result. Thermal fatigue analysis was also conducted. The maximum shear strain occurs at the outmost located bump. Shear stress-strain curve was obtained to calculate fatigue life. Fatigue model for electronic adhesives was used to predict thermal fatigue life of ACF bonding flip-chip packaging. DOE (Design of Experiment) technique was used to find important design factors. The results show that PCB CTE (Coefficient of Thermal Expansion) and elastic modulus of ACF material are important material parameters. And as important design parameters, chip width, bump pitch and bump width were chose. 2nd DOE was conducted to obtain RSM equation for the choose 3 design parameter. The coefficient of determination (R^2) for the calculated RSM equation is 0.99934. Optimum design is conducted using the RSM equation. MMFD (Modified Method for Feasible Direction) algorithm is used to optimum design. The optimum value for chip width, bump pitch and bump width were 7.87mm, 430 μ m, and 78 μ m, respectively. Approximately, 1400 cycles have been expected under optimum conditions. Reliability analysis was conducted to find out guideline for control range of design parameter. Sigma value was calculated with changing standard deviation of design variable. To acquire 6 sigma level thermal fatigue reliability, the Std. Deviation of design parameter should be controlled within 3% of average value

1. 서론

전자 소자들이 다기능화 경박단소화됨에 따라 지금까지 크게 문제되지 않았던 신뢰성 문제들이

많이 노출되게 되었다. 패키지의 기계적 파손은 전자소자의 전기적 기능 수행에 직접적인 영향을 주게 되고 이는 zero defect 의 기술을 요구하는 반도체 및 전자부품 시장에서의 경쟁력 하락의 일차적인 원인이 된다. 이러한 기계적 파손의 유형은 패키지 열변형에 의한 접합부의 층간 분리, 접촉계면에서의 균열 발생과 진전, 솔더 조인트의 피로 파손 등이며, 설계 단계에서의 파괴역학적

* 회원, 청주교육대학교 실과교육과
E-mail : redhair@cje.ac.kr
TEL : (043) 299-0794 FAX : (043) 299-0798

Table 1 Elastic and thermal property of each material

	PCB	Bump (Au)	Chip (Si)	PCB Pad (Cu)
CTE	14e-6(x) 35e-6(y)	82	130	115
E(GPa)	25(x) 8(y)	14.4e-6	2.6e-6	17e-6

해석 및 피로강도 해석 기술과 관련된 기계공학적 접근이 필수적이다.⁽¹⁾ ACF(Anisotropic Conductive Film)을 이용한 Flip Chip 접합 공정의 경우 공정이 Solder 접합에 비하여 간단하고, 미세 pitch 대응이 용이한 점 때문에 최근 LCD 를 중심으로 응용분야가 증가하고 있는 추세이다.⁽²⁾ 그러나 Solder 를 이용하는 Flip Chip 접합법에 비하여 ACF 를 이용하는 경우 신뢰성이 떨어지는 문제가 있어 ACF 를 이용하여 Flip-chip 을 접합하는 경우 형상에 관계된 설계 인자나 재료의 특성을 나타내는 재료 인자에 좀 더 주의해야 할 필요가 있다. 이러한 설계나 재료 인자를 효과적으로 분석하기 위해서는 CAE 의 도움이 필수적인데, 현재 ACF 를 이용한 Flip Chip 에 관한 해석은 대부분 선형 해석에 머무르고 있으며, 단순 휨(warpage)나 ACF 에 함유된 particle 의 변형을 간략화 하는 정도에 머무르고 있는 형편이다.^(3,4) 본 연구에서는 ACF 접합 Flip Chip 의 열피로 신뢰성을 CAE 를 이용하여 확보하고자 ACF 의 비선형 특성을 고려한 열피로 신뢰성 해석 공정을 구축하였다. 또한 실험계획법(Design Of Experiment)과 신뢰성 해석(Reliability Analysis)을 이용하여 ACF 의 신뢰성에 영향을 미치는 주인자를 분석하였으며 각 인자의 설계 방향을 제시하였다.

2. 열피로 신뢰성 해석

2.1 재료 물성

본 해석에 사용된 PCB(FR-4)는 직교이방성(orthotropic) 재료이며, Au Bump, Si Chip, Cu PCB Pad 는 등방성 재료이다. 각각의 주요 물성은 Table 1 에 나타내었다. ACF 는 Hitachi 에서 생산된 FC 212B 를 이용하였다. ACF 의 경우 열피로 조건인 125°C 이상의 온도에서는 상당한 소성 변형을 하므로 탄소성 해석을 수행하였다. ACF 의 경우 온도의 변화에 따라 탄성 계수가 변하게 되는데 온도에 따른 탄성계수와 열팽창계수는 DMA(Dynamic Mechanical Analyzer)와 TMA(Thermo Mechanical Analyzer)를 이용하여 측정하였다.

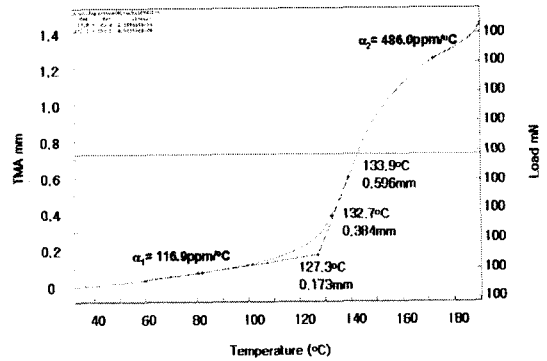


Fig. 1 TMA result of ACF

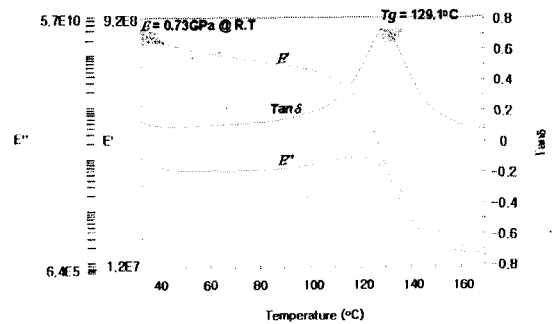


Fig. 2 DMA result of ACF

Fig. 1 과 2 에 DMA 와 TMA 를 이용하여 ACF 의 열팽창계수와 탄성계수를 측정 결과를 나타내었다. 두 시험 결과 125~130 도 사이에서 유리 전이 온도(Glass transition temperature)가 나타났다.

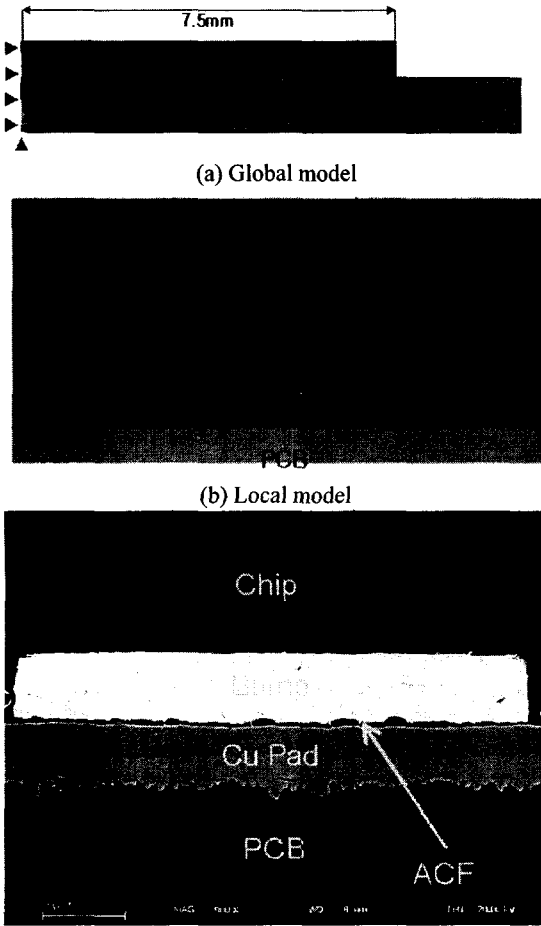
2.2 형상 모델링 및 열하중 조건

본 모델에 사용한 Chip 의 크기는 폭 15mm, 두께 0.625mm 이며, PCB 의 폭 및 두께는 각각 20mm, 1mm 이다. 해석의 편이성을 고려하여 1/2 모델을 사용하였다. 상세 모델에서는 Bump 와 Cu pad, ACF 층이 고려되도록 모델링하였으며, 특히 Au Bump 와 Cu pad 사이의 간격을 2μm 정도 두었다. 이것은 실제 ACF 를 이용한 Flip Chip 접합에서 2μm 정도의 간격이 발생되기 때문이다. 각 재료의 특성이 잘 반영이 되도록 PCB 는 직교이방성으로 모델링 하였으며, Au Bump 및 Cu Pad 등은 등방성으로 모델링하였다.

Fig. 3 에 모델링의 개략도와 접합 후 Flip Chip 의 단면을 나타내었다.

본 해석에 사용한 열하중 조건은 JEDEC standard No. 22-A104 를 참조하였으며, 온도 조건은 - 55 도와 125 도를 반복하는 형태이다.

온도변화구간의 시간은 300sec 이며 각 온도에서의 유지시간은 1500sec 이다. Fig. 4 에 열하중 곡선을 나타내었다.



(c)SEM Photograph of ACF bonding flip-chip packaging

Fig. 3 Geometry modeling of ACF bonding flip chip packaging

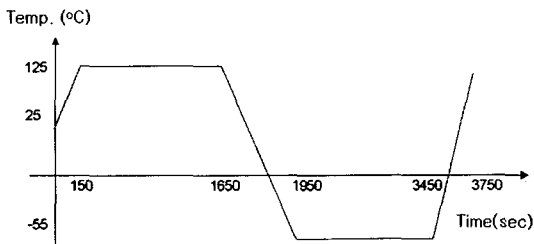


Fig. 4 Thermal load profile

2.3 열피로수명예측 모델

일반적인 금속 피로 수명의 모델은 크게 응력에 기초한 모델과 변형률에 기초한 모델, 균열(crack)을 고려한 3 가지 모델로 나눌 수 있다. Solder 를 이용한 실장의 경우 변형률에 기초한 Coffin-manson relation 을 이용하는 방법⁽⁵⁾ 일반화 되어 있는 반면 ACF 의 경우 피로수명모델이 일반화 되어 있지 않다.

ACF 를 이용한 Flip Chip 접합의 경우 ACF 의 Bonding Strength 에 의해 결합이 되어 있는 상태이므로, 일반 금속의 피로 수명식 보다는 Electronic adhesive 에 사용되는 피로 수명 예측 모델이 적합하다. Alex Gladkov 등⁽⁶⁾은 Electronic Adhesives 의 피로 수명 모델을 온도, 응력비, 주파수, Epoxy 형태, 상대재의 종류 등 5 가지 변수에 대하여 아래와 같은 실험식을 만들었다.

$$N_f = \frac{A}{\exp(17 \frac{\tau}{\tau_{adh}})} \times f^{0.3} \tag{1}$$

여기서, A 는 피로시험을 통해서 얻어지는 상수, τ 는 전단 응력, τ_{adh} 는 전단파괴응력, f 는 피로 주파수다.

3. 열피로 해석 결과

3.1 해석 결과의 검증

전자패키징의 열변형을 측정하는 대표적인 방법으로 Moire interferometer 를 이용하는 방법이 있다. Lee 등⁽³⁾은 Moire interferometer 를 이용하여 100°C 에서 25°C 로 온도가 내려갈 때의 PCB 와 Chip 의 변형량을 측정하였는데, 변형량의 분포는 Fig. 5 와 같다. 해석의 타당성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 논문의 실험과 동일한 조건에서 Bi-thermal 해석을 수행한 후 변형량의 분포를 계산하였다. 해석은 상용 유한 요소 패키지인 ANSYS 6.0 을 이용하여 수행하였다. Fig. 6 에 해석 결과를 나타내었다.

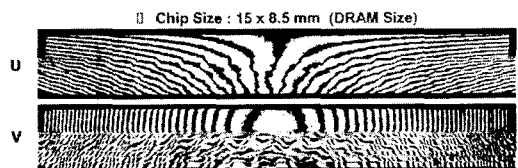
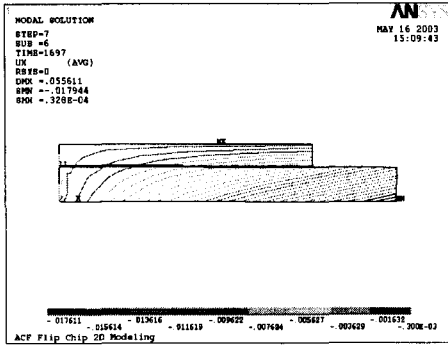
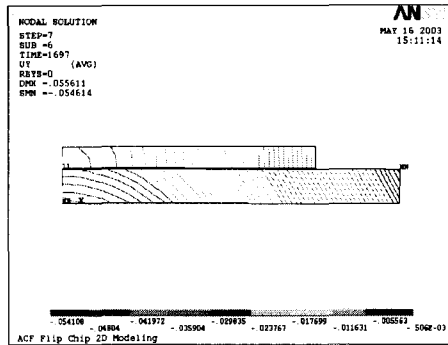


Fig. 5 Displacement field of ACF bonding flip-chip packaging



(a) Displacement field (x-direction)



(b) Displacement field (y-direction)

Fig. 6 Bi-thermal analysis results

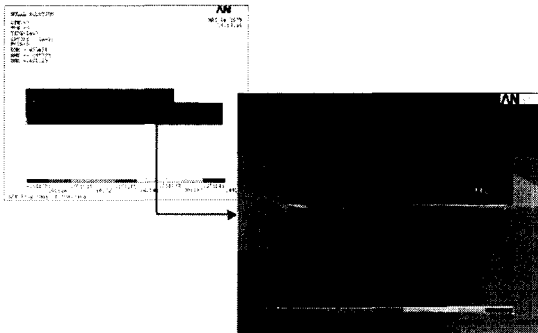


Fig. 7 Shear strain field of ACF bonding flip-chip packaging

해석 결과는 실험 결과와 매우 유사한 변형량의 분포를 나타냄을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 같은 모델에 대하여 열피로 해석을 수행하였다. 3 회의 thermal cycle 을 수행하는 동안의 응력과 변형률을 계산하였다. 최대 전단 변형률이 나타나는 곳은 Fig. 7 과 같이 최외각 Bump 와 Cu pad 사이에서 나타났다.

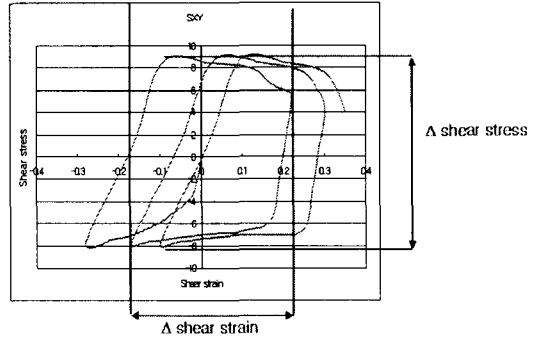


Fig. 8 Shear stress-strain curve of ACF bonding flip-chip packaging

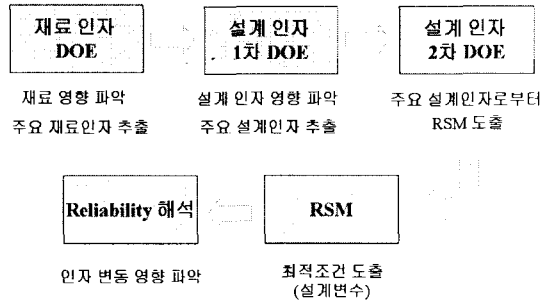


Fig. 9 Design of experiment plan

피로수명의 계산을 위하여 최대전단변형률이 발생하는 점의 전단응력과 변형률을 구해보면 Fig. 8 과 같다.

Fig. 8 로부터 최대전단응력과 최소전단응력을 계산 할 수 있으며, 각각의 응력을 식 (1)에 대입하면 각 응력 조건에서 피로 수명을 계산할 수 있다. 즉 250C 에서 1250C 로 증가하는 구간에서의 최대전단응력을 이용하여 피로수명을 계산하고, 250C 에서 -550C 로 감소하는 구간에서도 동일한 방법으로 열피로 수명을 계산한 후 이 두 피로 수명을 linear combination 하는 방법으로 전체 피로 수명을 구하였다.

4. 실험계획법 및 최적설계

확보한 열피로 해석 Process 는 전자패키징의 신뢰성에 영향을 주는 주요 인자를 분석하는데 사용되었다.

실험계획법의 목표는 전단변형률의 차이(Δ shear strain)를 최소화하는 것으로 잡았다. 이것은 전단 변형률의 차이가 열피로 수명에 가장 큰 영향을 주기 때문이다. 효과적인 분석을 위하여 실험계획법(Design of Experiment)을 이용하였다. DOE plan 은 아래와 같다.

Table 2 Material parameters

Material Parameters	(-)	(0)	(+)
PCB Modulus factor	0.8	1.0	1.2
PCB CTE factor	0.8	1.0	1.2
Chip Modulus factor	0.8	1.0	1.2
Chip CTE factor	0.8	1.0	1.2
Bump Modulus factor	0.8	1.0	1.2
Bump CTE factor	0.8	1.0	1.2
ACF Modulus factor	0.8	1.0	1.2
ACF CTE factor	0.8	1.0	1.2

Pareto Chart of the Standardized Effects
(response is DelShear, Alpha = .05)

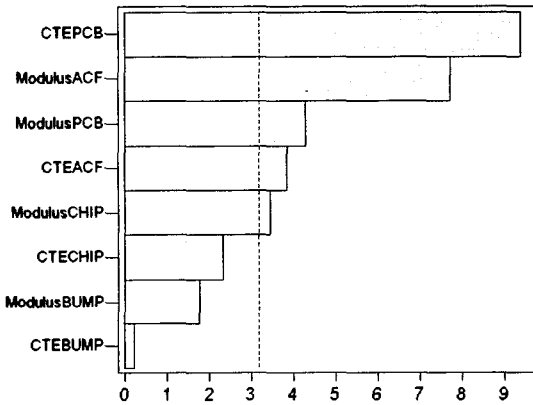


Fig. 10 Pareto chart for material parameters

우선 재료 인자들을 우선으로 DOE 를 수행하여 주요 재료 인자를 추출하였으며 각 재료의 설계 방향을 파악하였다. 그 후 설계 인자의 DOE 를 통해서 주요 설계인자를 확보하였으며, 확보한 주요 인자들로부터 RSM(Response Surface Method)을 도출하고자 2 차 DOE 를 수행하였다. RSM 을 확보한 후 MMFD(Modified Method for Feasible Direction) 을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적 설계값이 확보된 후 신뢰성 해석을 통하여 인자 변동의 영향을 살펴보았다.

4.1 재료인자 DOE

분석 재료 인자는 PCB, Chip, Bump, ACF 각각의 탄성계수와 열팽창계수로 총 8 개의 인자이며 수준은 2 수준으로 하였다. 인자의 변동폭은 초기값을 기준으로 $\pm 20\%$ 로 하였다. 해석 횟수는 총 12 회이다. Table 2 에 분석 재료인자와 변동폭을 나타내었다.

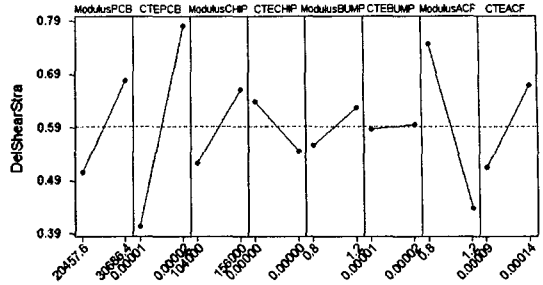


Fig. 11 Main effect plot for material parameters

Table 3 Design parameters (unit : mm)

Design Parameters	(-)	(0)	(+)
PCB Width	9	10	11
PCB Thickness	0.9	1	1.1
Bump Width	0.081	0.09	0.099
Bump Height	0.0162	0.018	0.0198
Bump Pitch	0.45	0.5	0.55
Chip Width	6.75	7.5	8.25
Chip Thickness	0.5625	0.625	0.6875
Gap	0.0018	0.002	0.0022

각 조건에서 해석된 결과는 MINITAP R13 을 이용하여 통계 처리하였다. 재료 변수에 대한 결과를 파레토 차트(Pareto chart)로 나타내면 Fig. 10 과 같다. 유의 수준 α 를 0.05 로 했을 때 주요 인자는 PCB 열팽창계수, ACF 탄성계수, PCB 탄성계수, ACF 열팽창 계수, Chip 탄성계수로 나타났다.

Fig. 11 에는 선정된 주요 재료인자의 주효과(main effect)를 나타내었다. 전단변형율의 차이(Δ shear strain)를 적게 하는 것이 좋은 설계이므로, ACF 탄성계수는 크게 설계하고 나머지 주요 인자들은 적게 설계하는 것이 좋은 설계방향임을 알 수 있다.

4.2 설계인자 DOE

설계 인자 DOE 에서도 8 인자 2 수준 직교 배열법을 이용하였다. 분석 설계 인자는 PCB 폭, PCB 두께, Bump 폭, Bump 높이, Bump 간 거리(pitch), Chip 폭, Chip 두께, Bump 와 PCB pad 간의 거리(Gap)으로 설정하였다. Table 3 에 분석 설계 인자와 변동폭을 나타내었다.

각 조건에서 해석된 결과는 MINITAP 을 이용하여 통계 처리하였다. 설계인자에 대한 파레토 차트 결과는 Fig. 12 에 나타내었다.

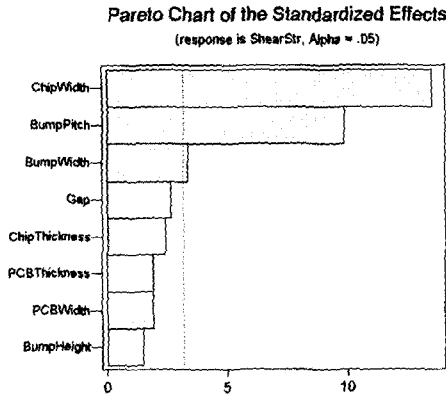


Fig. 12 Pareto chart for design parameters

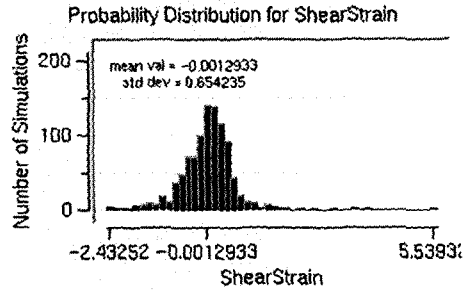
Table 4 Design parameters (unit : mm)

(Alpha 값)	-1.732	-1	0	1	1.732
Bump Width	0.0791	0.0837	0.09	0.0963	0.1009
Chip Width	6.5907	6.975	7.5	8.025	8.4093
Bump Pitch	0.4393	0.465	0.5	0.535	0.5606

Table 5 Thermal fatigue life

	Thermal Fatigue Lift at Initial Conditions	Thermal Fatigue Lift at Optimal Conditions
Temp. Increasing Section (25=>125=>25)	387.4	792.1
Temp. Decreasing Section (25=>-55=>25)	426.4	2092.5
Avg. Life	406.9	1442.3

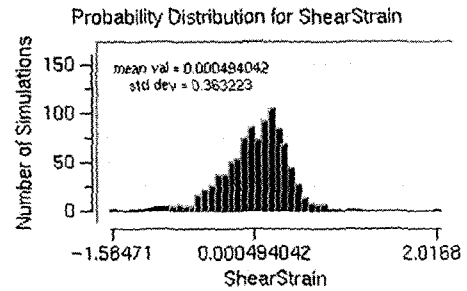
유의 수준 α 를 0.05 로 했을 때 주요 설계 인자는 Chip 너비(width), Bump 거리(pitch), Bump 너비(width)로 나타났다. 여기서 chip 너비의 영향이 가장 크게 나타났다는 것은 chip 너비의 영향이 이 해석에서 목적함수로 잡은 전단변형율의 차이(Δ shear strain)에 가장 큰 영향을 주는 항목이라는 것을 의미한다. 설계 인자의 경우 1 차 DOE 가 끝난 후 RSM 을 확보하기 위하여 2 차 DOE 를 수행하였다. 2 차 DOE 는 정확한 RSM 을 확보하기 위하여 3 인자 중심합성법을 이용하여 해석 횟수를 15 회 수행하였다. Table 4 에 분석 설계 인자와 변동 폭을 나타내었다. 2 차 DOE 에서 구한 값을 바탕으로 RSM 을 구한 결과 결정 계수(R^2)의 값이 0.99934 로 신뢰할 만한 수준이었다. RSM 을 통해 얻은 관계식은 MMFD(Modified method of feasible direction)을 이용하여 최적설계를 수행하였다.



Quality constraints and robust objectives:

Parameter Name	Mean Value	Std. Deviation	Sigma Level	Probability of Success
ChipWidth	7.57017	0.5502201	2.14	0.9670916171
BumpWidth	0.078	0.05645917864	2.14	0.9670913332
BumpPitch	0.43	0.0500545836	2.14	0.9670913332
ShearStrain	-0.00129330247	0.65423231	2.02	0.950726068

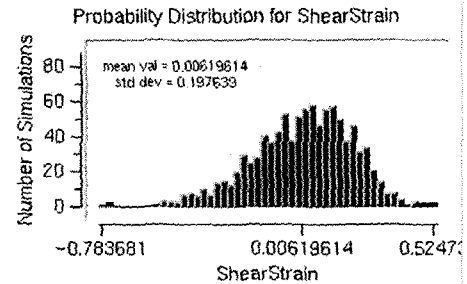
(a) Standard deviation of design parameters: 7% of average value



Quality constraints and robust objectives:

Parameter Name	Mean Value	Std. Deviation	Sigma Level	Probability of Success
ChipWidth	7.57017	0.383492643	3	0.9670916278
BumpWidth	0.078	0.033856412824	3	0.9670912046
BumpPitch	0.43	0.0214967056	3	0.9670912046
ShearStrain	0.00049404002	0.363223091	2.78	0.960724214

(b) Standard deviation of design parameters: 5% of average value



Quality constraints and robust objectives:

Parameter Name	Mean Value	Std. Deviation	Sigma Level	Probability of Success
ChipWidth	7.57017	0.230695586	5	0.9670914258
BumpWidth	0.078	0.007238647755	5	0.9670914258
BumpPitch	0.43	0.0128285213	5	0.9670914258
ShearStrain	0.00619613841	0.197639114	5.75	0.960999931

(c) Standard deviation of design parameters: 3% of average value

Fig. 13 Reliability Analysis

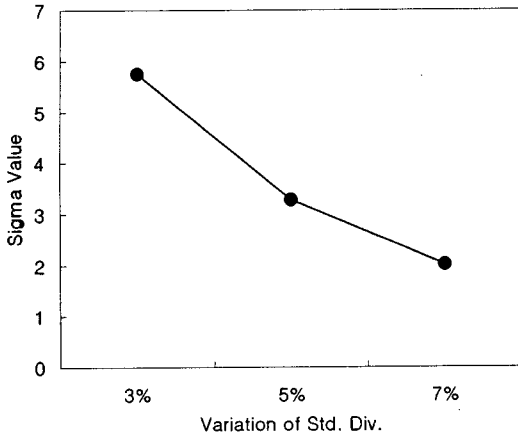


Fig. 14 Sigma value for Δ shear strain

DOE, RSM, 최적설계는 iSight (≡Engineous)를 이용하여 수행하였다. 최적 조건은 Bump 너비 78 μ m, chip 너비 7.87mm, Bump 거리 430 μ m 로 계산되었다.

이 최적조건에서의 전단변형률의 차이(Δ shear strain)는 0.34 로 초기값이 1.1 에 비하여 60%정도 감소한 결과를 나타내었다. 전단변형률의 차이가 최소가 되는 조건에서의 전단응력의 값과 식 (1)을 이용하면 피로 수명을 계산할 수 있다. Table 5에 계산한 피로 수명을 나타내었다.

최적 설계 후 열피로 수명이 3 배 정도 향상된 결과를 나타내고 있다. 그러나 실제 제품제작의 과정에 있어서는 설계 인자의 변동을 반드시 동반함으로 설계 인자 변동의 영향을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 Monte Carlo simulation 을 이용하여 신뢰성 해석(Reliability Analysis)를 수행하였다. 즉, Monte Carlo Simulation 에서 추출 데이터의 개수는 1000 개로 하였다. 설계 변수는 설계 변수의 표준편차가 각 설계 변수의 평균의 7%, 5%, 3%가 되도록 변동시켰으며, 시그마 값(Sigma Value)를 구하기 위한 상한값으로는 초기 조건에서의 전단 변형률의 차이 1.1 을 기준으로 하였다. Fig. 13 과 14 에 신뢰성 해석 결과와 설계 변수 변동폭에 따른 시그마 값을 각각 나타내었다.

식스 시그마 수준을 만족하기 위해서는 설계 변수의 표준편차는 평균의 3% 이내로 관리되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

(1) ACF 접합 Flip chip 패키지의 열피로 신뢰성에 큰 영향을 미치는 주요 재료인자는 PCB 의 열팽창계수와 ACF 의 탄성계수로 나타났다. 특히, ACF 의 경우 열팽창계수보다 탄성계수의 영향이 더 지배적인 것으로 나타났다.

(2) 설계 인자 중 주요 인자는 Bump 너비, Chip 너비, Bump 사이의 거리이며 최적 설계 값은 Bump 너비 78 μ m, chip 너비 7.87mm, Bump 사이 거리 430 μ m 로 나타났다.

(3) 최적설계조건에서 전단변형률의 차이는 60% 감소 하였으며, 이 때 1440 cycle 의 열피로 수명이 예상되었다.

(4) 전단 변형률 1.1 기준으로 설계 변수의 표준 변차를 평균의 3% 이내로 관리해야 식스 시그마 수준의 열피로 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

ACF 의 물성 측정을 도와주신 KAIST 재료공학과 백경옥 교수님과 권운성 군에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S.B., 2003, "Reliability of Electronic Packaging," *KSME Journal*, ISSN 1226-7287 Vol. 43, No. 8, pp. 38~39.
- (2) Yim, M.J. and Paik, K.W., 1998, "Design and Understanding of Anisotropic Conductive Films for LCD Packaging," *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Tech. Part A*, Vol. 21, No. 2.
- (3) Hwang, T.K. , Ham, S.J. and Lee, S.B., 2000, "A Study on the Thermal Deformation of ACF Assemblies using Moire Interferometry and FEM," *Int'l Symp on Electronic Materials & Packaging*, pp. 358~363.
- (4) Chiang, K.N., Chang, C.W. and Lin, J.D., 2000, "Analysis of ACA/ACF Package Using Equivalent Spring Method," *Electronic Packaging Technology Conference*, pp. 110~116.
- (5) Qian, Z., Lu, M., Ren W. and Lin, S., 1999, "Fatigue Life Prediction of Flip-Chips in Terms of Nonlinear Behaviors of Solder and Underfill," *Electronic Packaging Technology Conference*, pp. 141~148.
- (6) Alex Gladkov and Avram Bar-Cohen, 1999, "Parametric Dependence of Fatigue of Electronic Adhesives," *IEEE Trans. on Components and Packaging Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 200~208.