

무아레 간섭계 초정밀 변위 측정장치의 설계 및 PBGA 패키지 열변형 측정에의 응용

오 기 환* · 주 진 원*

(2004년 1월 29일 접수, 2004년 10월 6일 심사완료)

Submicro-displacement Measuring System with Moiré Interferometer and Application to the Thermal Deformation of PBGA Package

Kihwan Oh and Jinwon Joo

Key Words: Moiré Interferometer(무아레 간섭계), PBGA Package(PBGA 패키지), Measurement of CTE(열팽창계수 측정), Thermal Deformation(열변형)

Abstract

A description of the basic principles of moiré interferometry leads to the design of a eight-mirror, four-beam interferometer for obtaining fringe patterns representing contour-maps of in-plane displacements. The technique is implemented by the optical system using an environmental chamber for submicro-displacement measurement. In order to estimate the reliability and applicability of the system developed, the measurement of coefficient of thermal expansion (CTE) for a aluminium block is performed. Consequently, the system is applied to the measurement of thermal deformation of a WB-PBGA package assembly. Temperature dependent analyses of global and local deformations are presented to study the effect of the mismatch of CTE between materials composed of the package assemblies. Bending displacements of the packages and average strains of solder balls are documented. Thermal induced displacements calculated by FEM agree quantitatively with experimental results.

1. 서 론

반도체 패키지와 MEMS 패키지 등 미소 전자 장치는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 반도체 칩에 전력이 공급되거나 초기제작 공정에서 온도 변화가 생기면 각각의 재료는 다른 비율로 변형하게 되며 그에 따라 각 재료들 사이에서 심한 열응력이 발생하게 된다. 더구나 반도체 칩은 주기적인 열하중을 받게 되므로, 집중된 열응력은 사이클

이 진행될수록 파손의 큰 원인이 될 수 있다. 따라서 반도체 패키지의 신뢰성을 검증하고 최적의 설계조건을 확보하기 위해서는 온도의 변화에 따르는 구성 재료의 변형거동을 파악하는 것이 중요하다.

미소변형을 측정하는 광학적인 방법으로는 여러 방법이 이용되고 있지만, 최근에는 레이저를 사용하는 무아레 간섭계 기술⁽¹⁾이 개발되어 아주 높은 정밀도를 가지고 응용되고 있다. 무아레·간섭법은 비접촉으로 전체영역의 변형 상태를 한번에 측정할 수 있을 뿐 아니라, 다른 광학적인 실험방법에 비해 빛이나 진동과 같은 외부잡음에 의한 영향이 작고 선명한 간섭무늬를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 무아레 간섭법은 복합재료의 국부변형해석,^(2,3) 균열해석,^(4,5) 이중접합재의 변형거동^(6,7) 등에 효과적으

* 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail: jinwon@chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441
* 회원, LG산전

로 응용되어 왔다. 특히, 최근에는 전자 패키지나 미소 전자부품 등의 열변형해석⁽⁸⁻¹⁵⁾에 활발하게 이용되어 왔다.

본 논문에서는 마이크로미터 이하의 미소한 변위를 측정하기 위하여 8개의 거울을 사용하는 무아래 간섭계 장치를 설계하고 광학적인 시스템을 구성하였다. 온도조절장치(environmental chamber)를 광학시스템에 연결하여 온도 변화에 따른 미소 열변형을 측정할 수 있도록 하였다. 측정장치의 신뢰성을 검증하기 위하여, 열팽창계수가 잘 알려진 알루미늄 시편과 이방성 재료인 PCB에 대한 열팽창계수 측정시험을 수행하였다. 또한 구성된 무아래 간섭계 측정장치를 이용하여 WB-PBGA(wire bond plastic ball grid array) 패키지의 온도변화에 따른 열변형 측정을 수행하고 전체적인 변형과 국부적인 변형을 해석하였으며, 이 결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. 무아래 간섭계의 원리 및 변형해석

무아래 간섭법(Moiré interferometry method)은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 빛의 회절과 간섭이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여, 평면 내에서 정해진 두축 (x, y)에 대한 변위 성분을 등변위곡선으로 나타내는 광학적인 실험방법이다. 무아래 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 변형하도록 한다. 이와 같은 회절격자에 빛이 입사되면 입사된 빛은 회절되어 유한개의 각도로 진행하게 되며, 이 각도는 회절격자의 주기와 레이저의 파장에 의하여 결정된다. 한 빛에서 나누어진 간섭성이 있는 두 개의 빛에 경로차이가 생기면 이것들은 간섭무늬를 만들게 된다.⁽¹²⁾

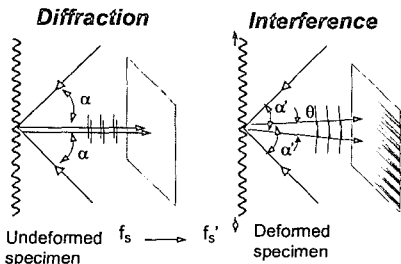


Fig. 1 Moiré fringe of deformed specimen

Fig. 1에서 설명한 변형측정원리는 x 방향의 변위 U를 측정하기 위한 것이다. 평면 내의 두 방향 변위 U, V를 동시에 측정하기 위해서는 직교형으로 홈이 나 있는 회절격자를 시편에 접착하고 빛을 4방향에서 입사시키는 시스템을 구성하여야 한다.

이렇게 얻어지는 간섭무늬들은 시편의 표면에서 각각 x 방향의 변위 U와 y 방향의 변위 V에 대한 등변위곡선을 나타낸다. 평면의 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_x(x, y) \quad (1)$$

$$V(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_y(x, y)$$

여기서 $N_x(x, y)$ 와 $N_y(x, y)$ 는 위치에 따라 분포하는 간섭무늬의 차수이다. 보통의 경우에 $f_s = 1200 \text{ lines/mm}$ 이므로 인접한 간섭무늬 사이는 $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위 차이를 나타낸다.

평면내의 변형률을 계산하여야 할 때에는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_x}{\Delta x} \right]$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_y}{\Delta y} \right] \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_y}{\Delta x} + \frac{\Delta N_x}{\Delta y} \right]$$

3. 무아래 간섭계의 설계 및 구성

무아래 간섭법을 위한 광학시스템은 크게 빛 입사장치, 무아래 간섭계 및 기록장치의 3부분으로 나누어진다. 빛 입사장치는 레이저와 같이 간섭성이 있는 광원과 빛을 퍼트리기 위한 빛 확장기(beam expander) 및 평행광 발생기(collimator)로 구성된다. 앞에서 설명한 바와 같이 무아래 간섭계를 이용하여 평면내의 두 방향 변위를 측정하기 위해서는 기본적으로 수평방향과 수직방향에서 각각 2개의 평행광이 시편의 회절격자에 같은 입사각을 가지고 반대편에서 입사되어야 한다. 이러한 광학장치는 측정목적에 따라 다양하게 구성할 수 있지만, 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 포물면 거울(parabolic mirror)과 8개의 거울을 사용

하는 무아래 간섭계를 설계하여 구성하였다.

3.1 광학장치 및 온도 발생장치

Fig. 2는 반도체 패키지의 열변형 측정을 위해 구성된 광학장치 및 온도변화 장치를 도식적으로 보여주고 있다. 30 mW의 He-Ne 레이저에서 발생된 빛은 광섬유를 통하여 진행하고, 광섬유의 끝에서 퍼지게 된다. 구면의 파면을 가지고 퍼진 빛은 6"의 포물면 거울(parabolic mirror)에서 반사된 후 평행광(collimated beam)으로 변화되어 진행한다. 진행된 평행광의 바깥부분은 특별히 제작된 무아래 간섭계의 안쪽 4개의 거울에서 반사되어 바깥쪽 거울로 진행하며, 바깥쪽 거울에서 반사된 각각의 평행광은 회절격자가 부착된 시편의 표면에 상하좌우 4 방향에서 49.4°의 입사각을 가지고 입사하게 된다. 시편에서 회절되어 간섭을 일으킨 간섭무늬 영상은 집광렌즈(collecting lens)를 통하여 CCD 카메라로 진행하게 된다.

시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 가열과 냉각을 할 수 있는 온도 챔버(chamber)를 사용하였다. 이 챔버는 진동을 유발할 수 있으므로 광학장치와 시편과의 상대운동을 방지하기 위하여 시편을 고정된 받침대와 간섭계를 챔버 벽을 통해 한 몸체로 연결하였다. 시편의 온도는 열전대를 이용하여 측정하고, 원하는 온도로 빨리 접근하는 동시에 그 온도를 넘지 않도록 챔버의 온도를 컴퓨터 프로그램에 의하여 제어하였다. 챔버의 한쪽 벽에 pyrex로 된 창을 설치하여 빛이 통과할 수 있도록 하였다.

시편을 챔버 안에서 고정시킨 후 거울들을 정렬하고 간섭계 전체에 강제회전을 주어 시편과 간섭계의 방향을 광학적으로 정확하게 일치시켰다. 이렇게 하여 간섭무늬가 가능한 없어진 초기 변위장(null field)을 얻고 이 때부터 온도 변화를 주어 각 온도단계에서 간섭무늬를 얻어내었다. CCD 카메라와 영상처리장치를 이용하여 간섭무늬를 기록하였고 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다. Fig. 3은 구성된 광학장치를 보여주고 있다.

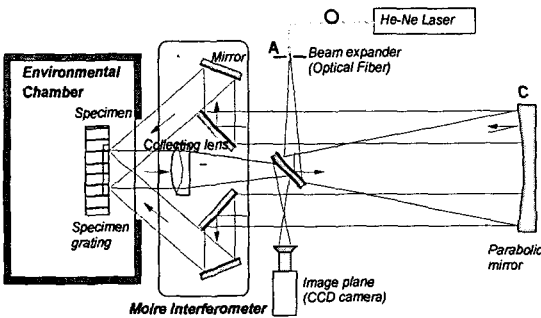


Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup with eight-mirror, four-beam moiré interferometer

3.2 무아래 간섭계의 설계 및 제작

회절격자가 부착된 시편에 빛을 4 방향에서 입사시켜 간섭을 일으키도록 하는 무아래 간섭계는 Fig. 4와 같이 한 몸체로 설계하였다. 설계된 간섭계는 시편과의 사이에 충분한 거리를 둘 수 있어 챔버 설치 등 실험장치에 큰 제약을 받지 않는다는 특징을 가지고 있다.

포물면 거울에서 전달된 직경 6"의 평행광은 가운데 부분을 제외한 좌우상하 4개의 부분으로 나누어져 빛의 진행방향과 45°기울어진 4개의 안쪽 거울에서 바깥쪽으로 반사된다. 반사된 평행광은 다시 4개의 바깥쪽 거울에 의해 반사되어 시편으로 입사되게 된다. 이 때, 시편으로 입사하는 정확한 각도 49.4°를 조절하기 위하여 바깥쪽 거울들을 2축으로 회전시킬 수 있는 미세조정장치가 각각 부착되어있다.

간섭계에 강제 회전을 줄 수 있도록 하기 위하여 간섭계 전체를 X, Y, Z 3개의 축으로 회전시킬 수 있는 장치를 하단에 부착하였다. 이 장치를 이용하여 간섭계와 시편이 상대적으로 정확히 정렬되도록 할 수 있으며, 이동 간섭무늬(carrier fringe)를 발생시킬 수도 있다. 측정할 수 있는 작

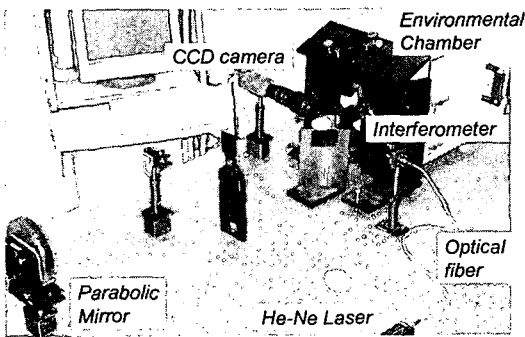


Fig. 3 Moiré interferometry system for the measurement of thermal deformation

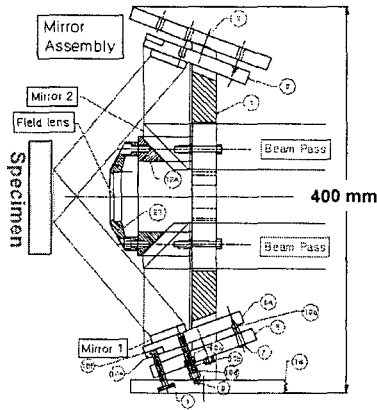


Fig. 4 A drawing of cross sectional view of eight-mirror interferometer and detail beam pass

업면을 가능한 크게 하도록 간섭계 설계에 주안점을 두었으며, 설계된 작업면은 직경 51 mm의 원 내부 영역이다.

3.3 광학 장치의 정렬

무아래 간섭계에서는 감도가 대단히 높은 간섭무늬를 기록하기 때문에 광학장치들의 정확한 정렬이 이루어져야 한다. 이러한 정렬은 절대적인 위치조정과 각도조정으로는 매우 어려우며, 광학부품 간의 상대적인 위치를 조정하는 자동정렬(self-alignment)을 이용한다. 무아래 간섭계에서는 간섭계의 중심선과 빔의 중심이 일치하여야 하며, 간섭계로 입사되는 빛이 평행광이어야 한다. 또한 회절격자로 입사되는 빛이 시편의 법선방향과 정확한 각(1200 lines/mm의 회절격자에서는 49.4°)을 이루어야 하며, 시편과 간섭계가 평행해야 한다.

위의 조건들을 만족시키기 위하여 본 논문에서 구성된 광학장치를 정렬하는 과정은 다음과 같다.

- (1) 광섬유와 렌즈에 의해 퍼진 빛이 포물면 거울을 중심으로 균일한 강도를 가지도록 광섬유 한쪽 끝의 위치와 각도를 조정한다.
- (2) 포물면 거울의 위치를 조정하여 완전한 평행광이 되도록 하기 위하여, 포물면 거울에서 나온 빛에 대하여 수직으로 평면 거울을 놓고, 그 거울에서 반사되어 포물면 거울에서 모아져 다시 광섬유 끝(Fig. 2의 A점)으로 도달하는 점이 가장 작게 되도록 포물면 거울의 위치를 결정하고, 그

점이 빛이 퍼지기 시작한 점과 일치하도록 포물면 거울의 각도를 조절한다.

(3) 회절격자에 두 방향에서 도달하는 빛의 각도를 정확히 정렬하기 위하여, V 변위를 나타내는 거울들을 가리고 회절한 빛 중 반사의 법칙을 따르는 빛은 반대쪽 거울을 통해 다시 A점에 모인다. 이 두 개의 점이 가운데에 한 점으로 모이도록 간섭계의 바깥 거울을 조정한다.

(4) 같은 방법으로 V 변위를 나타내는 두 개의 점을 원래 모아진 점들과 일치시키면 회절격자에 도달하는 4 방향의 평행광은 정확한 각도를 가지고 회절격자에 도달함을 의미한다.

(5) CCD 카메라의 초점을 맞추면 간섭무늬가 나타난다. 이는 변형에 의한 것이 아니고 시편의 미소 강체회전에 의한 것이므로 간섭무늬가 없어지도록 간섭계 전체의 3방향 회전 각도를 반복적으로 조절한다.

4. 시스템의 신뢰성 평가

본 논문에서 구성한 광학 시스템 및 온도조정 장치의 신뢰성을 평가하기 위하여 물성치가 잘 알려진 알루미늄 재료와 PCB에 대한 열팽창계수를 측정하였다.

4.1 알루미늄 재료의 열팽창계수 측정

열팽창계수가 비교적 크고 발표된 열팽창계수 값들의 차이가 서로 작은 알루미늄(Al 6061) 시편을 비교대상으로 선택하였다. 시편의 온도를 변화시키고 이에 대한 간섭무늬를 해석하여 온도에 따른 열팽창계수를 측정하였다. 알루미늄 시편은 25×10×15 mm의 직육면체 형상으로 가공하고 시편의 한쪽 면을 연마한 후, 상온(20℃)에서 회절격자를 복제하였다. 복제를 위하여 상온에서 경화시킬 수 있고, 높은 온도(130℃)에서도 사용할 수 있는 Tra-con사의 BA F114 접착제를 사용하였다. 시편의 온도는 시편의 한쪽 면에 부착된 열전대를 이용하여 측정하였다.

무아래 간섭계 광학장치를 3.3절에 설명한 과정을 따라 잘 정렬하여 초기 변위장을 얻어내었다. 온도를 높여가며 상온에서 100℃까지 약 10℃ 간격의 각 온도 단계에서 U방향 변위와 V방향 변위를 나타내는 간섭무늬를 얻어내었다.

얻어진 간섭무늬로부터 다음 식에 의하여 시편

의 열팽창계수를 결정할 수 있다.

$$CTE = \frac{1}{f} \frac{\Delta N}{\Delta L \Delta T} \times 10^6 \text{ (ppm/}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

여기서, ΔL 은 수평방향 (x 방향)의 정해진 길이이고 ΔN 은 ΔL 에서의 간섭무늬 개수이며, ΔT 는 온도 변화이고, f 는 virtual reference frequency로 여기서는 2400 lines/mm이다.

Fig. 5는 몇 가지 단계의 온도에 따른 U 변위를 나타내는 간섭무늬를 보여주고 있다. 온도가 올라갈수록 간섭무늬의 간격이 좁아져서 팽창이 일어났음을 볼 수 있다.

시편의 정해진 길이 ΔL 에서의 간섭무늬 개수와 식(2)을 이용하여 구한 열팽창계수를 각 온도별로 Fig. 6에 나타내었다. 열팽창계수는 인접한 온도 단계 사이의 변화된 간섭무늬에 대해 계산하였으며, 두 온도의 중간 온도에 계산된 열팽창계수를 표시하였다. 알루미늄 6061의 열팽창계수는 23.6 ppm/°C로 알려져 있으며 본 실험에서는 23.2 ~ 23.7로 계산되어서, 알려진 열팽창계수와 실험 값이 잘 일치하였다. 이로부터 본 연구에서 구성한 무아래 간섭계 광학장치 및 그의 정렬과 온도 조절장치, 간섭무늬 해석 등 열변형 측정 시스템 및 실험방법에 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

4.2 PCB의 열팽창계수 측정

PBGA 패키지 결합체를 구성하는 PCB의 열팽창계수를 측정하였다. PCB는 거시적으로 보면 직교이방성을 가진 재료이므로 각 방향의 열팽창계수가 큰 차이를 갖는다. 준비된 시편의 크기는 길이 20.9 mm, 두께 1.65 mm, 폭 10 mm의 직육면체 형상이고 알루미늄 시편과 같은 방법으로 상온(20°C)에서 회절격자 물드를 복제하였다. 무아래 간섭계 광학장치를 정렬하고 챔버의 온도를 10°C 간격으로 120°C까지 변화시키면서, 각각의 온도 단계에서 간섭무늬를 측정하였다.

Fig. 7은 80°C에서 U 변위장과 V 변위장을 나타내는 PCB의 간섭무늬를 보여주고 있다. 변형장을 비교해보면 수평방향 간섭무늬에 비해 수직방향 간섭무늬의 간격이 훨씬 좁게 나타난 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 온도에 따른 각 방향의 열팽창계수 측정결과를 보여주고 있다. 수평방향 (PCB의 면내 방향) 열팽창계수의 평균값은 14.8

ppm/°C이었고, 수직방향 (PCB의 면외방향) 열팽창계수의 평균값은 47.7 ppm/°C로 계산되었다.

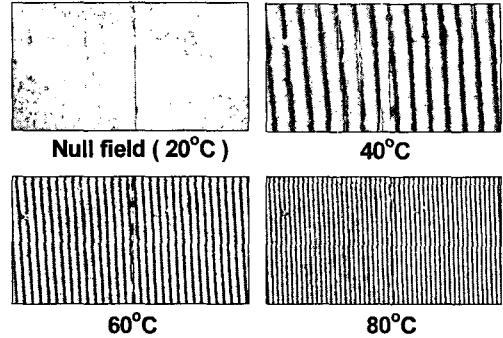


Fig. 5 Representative fringe patterns of the Al6061 block depicting U displacement

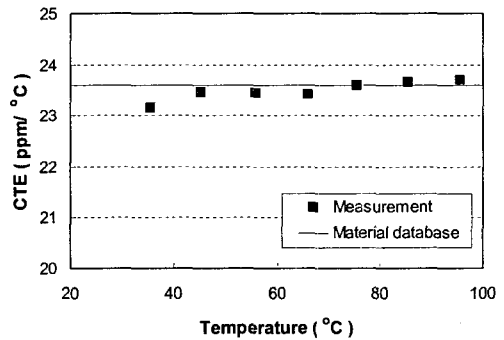


Fig. 6 CTE values of the Al6061 block



Fig. 7 Fringe patterns of the PCB depicting displacement fields at T=80°C

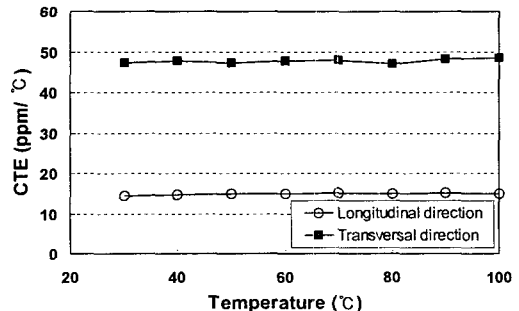


Fig. 8 CTE values of the PCB

5. PBGA 패키지의 열변형 측정

5.1 WB-PBGA 패키지의 열변형 측정방법

반도체 패키지와 PCB가 솔더볼로 결합된 패키지 결합체에 온도 변화가 생기면, 패키지와 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 패키지에 굽힘 변형이 발생하며, 그로 인해 솔더볼에는 전단변형이 발생하게 된다. 이러한 변형은 패키지의 사용시 신뢰성에 큰 영향을 주므로 패키지의 설계나 개발 시 이에 대한 적절한 해석이 필요하다.

본 실험에 사용된 반도체 패키지는 Fig. 9에서와 같이 388개의 I/O를 가진 한 변 35 mm의 WB-PBGA(Wire bond-plastic ball grid array) 패키지이다. 이 반도체 패키지는 그림과 같이 반도체 칩, 플라스틱 몰딩 혼합물(molding compound) 및 유기 기질(organic substrate)로 구성되어 있으며, 이 패키지는 저온 용융 공정솔더볼(eutectic solder ball)로 PCB에 연결되어 있다. 이 패키지는 솔더볼이 가장자리에 4줄로 둘러싸고 있고, 칩이 아래 가운데 부분에 6×6의 솔더볼이 놓여있는 perimeter PBGA 패키지이다.

칩을 포함한 패키지의 열변형을 측정하기 위하여, 패키지 결합체(반도체 패키지+솔더볼+PCB)를 칩이 나타나는 단면을 따라서 절단하고, 솔더볼의 직경이 가장 크게 되도록 표면을 연마하여 아주 매끄럽게 하였다. 회절격자 물드를 상온(20℃)에서 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 갖는 회절격자를 생성하였다.

시편을 챔버 안에 고정시킨 후 3.3절에서 설명한 과정을 따라 광학장치들을 정렬하고 간접계 전체에 적당한 강제 회전을 주어 간섭무늬가 없어진 초기 변위장을 얻어내었다. 초기 변위장을 얻은 후, 시편에 1 사이클의 온도의 변화를 주어 (20℃→50℃→75℃→100℃→125℃→100℃→75℃→50℃→20℃) 각 온도 단계에서 간섭무늬를 얻

어 내었다. CCD 카메라와 영상처리장치를 이용하여 간섭무늬를 기록하였고 필요에 따라 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다.

5.2 열변형에 의한 간섭무늬

Fig. 10의 왼쪽 그림은 50℃와 100℃의 온도단계에서 기록한 U 변위장과 V 변위장을 나타내는 간섭무늬를 보여주고 있다. 50℃의 U 변위 간섭무늬를 보면 온도 증가에 의한 열팽창에 의하여 x 방향으로의 인장변형률이 발생된 것을 볼 수 있다. 열팽창계수가 낮은 반도체 칩 부분에는 작은 변형률이 발생되었고 열팽창계수가 큰 몰딩 및 PCB 부분에는 큰 변형률이 발생했음을 알 수 있다. 이로 인하여 전체적으로 굽힘 변형이 발생하였다. 100℃에서의 간섭무늬는 중앙 칩이 있는 부분에서 좀 다르게 나타났는데, 칩 윗 부분의 U 변위 간섭무늬의 간격이 다시 좁아진 것을 볼 수 있다. 이것은 V 변위 간섭무늬에서 보는 바와 같이 국부적으로 반대방향의 굽힘 변형이 일어났기 때문이다. 이러한 현상은 125℃가 되면 더욱 심해지는 것으로 나타났다.

5.3 열변형 유한요소해석

PBGA 패키지의 열변형 거동에 대한 실험 결과 수치 해를 비교하고 신뢰성을 검토하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 11은 사용한 유한요소 모델을 보여주고 있다. 시편과 하중 조건에 대칭성이 있으므로 시편의 오른쪽 절반에 대해서만 해석을 수행하였고, 유한요소는 4절점 2차원 평면응력 요소를 사용하였다. 해석의 효율성을 위하여 2차원 요소를 사용하였지만, 솔더볼의 3차원적인 형상을 고려해 주기 위하여 솔더볼 한 피치에 해당하는 실제두께를 각 요소의 변수로 입력하였다. 대칭선의 x 방향 변위와 대칭선의 가장 아래 한 점의 y 방향 변위를 구속하였다. 상온(20℃)를 기준으로 한 온도변화를 하중조건으로 주었다. 솔더볼의 재료는 저온 용융 공정솔더(eutectic solder, 63Sn/37Pb)로서 Fig. 12와 같이 온도에 따라 변하는 탄소성 거동의 비선형성을 고려⁽¹⁶⁾하였으며 나머지 재료는 선형 탄성재료로 가정하였다. 해석에 사용한 각 재료의 물성치는 Table 2와 같다. 물성치 중 몰딩 혼합물과 PCB의 열팽창계수는 무아래 간접계를 이용하여 직접 실험한 결과를 사용하였다.

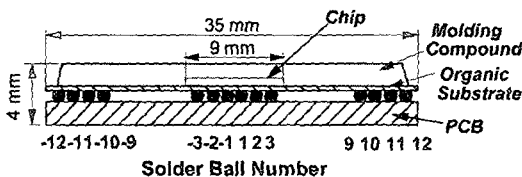


Fig. 9 Schematic diagram of a sectioned WB-PBGA package assembly

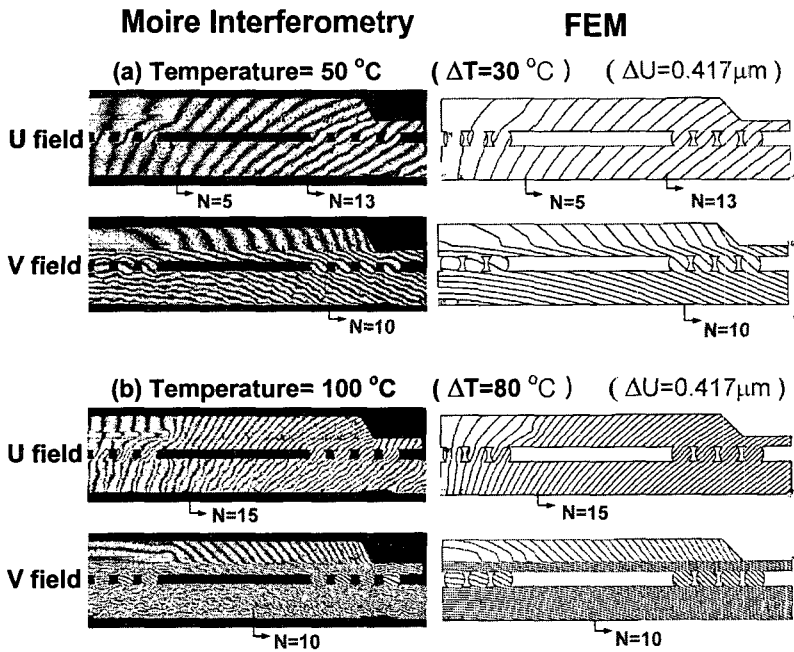


Fig. 10 Displacement contours of the WB-PBGA package assembly due to temperature change by moiré interferometry and finite element analysis

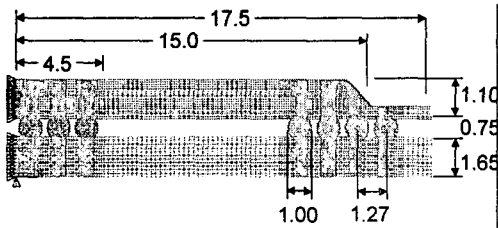


Fig. 11 Finite element model for the thermal analysis of the WB-PBGA package assembly

Fig. 10의 오른쪽 그림은 유한요소 해석에 의해서 얻어진 U 변위와 V 변위 분포를 간섭무늬와 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 두 인접한 선 사이는 간섭무늬와 같이 0.417 μm의 변위를 나타내도록 하였다. 온도가 50°C일 때의 변위분포는 실험에 의한 간섭무늬와 크기 및 형상이 아주 잘 일치하였다. 온도가 100°C일 때의 변위분포는 전체적인 크기는 잘 일치하였으나, 반도체 칩이 있는 부분에서 국부적으로 약간 다른 모양의 변위 분포가 얻어졌다. 이로부터 재료의 물성치, 변위조건 및 하중조건 등이 신뢰성 있게 해석되었음

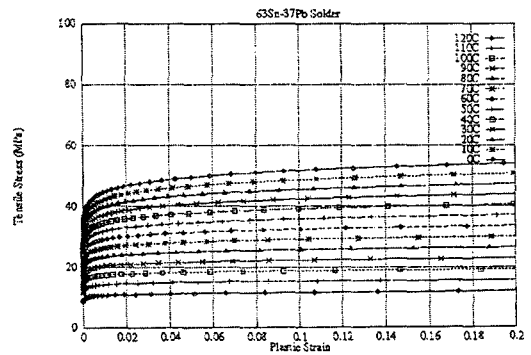


Fig. 12 Temperature-dependent stress-strain curve for 63Sn/37Pb solder

을 의미하나, 온도가 100°C 이상이 될 때, 솔더볼의 비선형 특성과 크립 특성 등이 해석에 충분히 반영되지 못했음을 알 수 있다. 따라서 솔더가 포함된 전자부품 등의 열변형 유한요소해석을 하는 경우에는 신뢰성 있는 실험에 의한 검증과 입력자료에 대한 조정이 필요하다.

Table 1 Material properties for the finite element analysis of WB-PBGA package assembly

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	CTE (ppm/°C)
Si Die	131	0.30	4.0
Substrate	26 (x) 11 (y)	0.39	14.8 (x) 47.7 (y)
Molding compound	16	0.25	12.3
Eutectic Solder	32	0.40	21
PCB	22 (x) 10 (y)	0.28	14.9 (x) 47.7 (y)

6. 실험결과 및 토의

열팽창계수의 차이로 인한 반도체 패키지의 굽힘변형은 그 자체로 성능에 문제가 될 수 있을 뿐 아니라, 제2차 조립 시나 솔더볼의 파손에도 영향을 미칠 수 있다. Fig. 13은 V 변위 간섭무늬에서 패키지의 길이방향 중심선을 따라 얻어진 각 온도에 대한 굽힘변위 분포를 보여주고 있다. 온도가 증가함에 따라 PCB 부분과 패키지 부분의 열팽창계수 차이로 인하여 아래로 볼록한 굽힘변형이 발생되었으나 패키지의 끝 부분은 굽힘이 일어나지 않고 직선적으로 변형하였다. 100°C 이상의 온도에서는 변위가 더 이상 증가하지 않고 감소하는 거동을 보였는데 이러한 현상은 높은 온도에서는 솔더볼이 탄소성 변형을 하게 되어 결합력이 약해지면서 패키지의 몰딩 부분과 칩 부분의 열팽창계수 차이에 의해서 칩이 있는 영역에서 국부적으로 반대로 굽어지기 때문이다. 칩이 없는 부분에서는 원래의 굽힘 변형이 일어나서 결국 S자로 구부러진 형태의 변형이 일어났다. 이러한 국부적인 굽힘변형은 100°C에서부터 시작되어 125°C가 되면 더욱 커지며, 온도가 감소할 때에도 이 변형이 유지되어 상온으로 돌아왔을 때에도 영구변형으로 남게 된다.

Fig. 14는 패키지 윗면을 따라 분포하는 길이방향 변형률의 분포를 보여주고 있다. 온도가 증가하면 패키지 결합체에 전체적인 인장변형률이 발생하며 거기에 굽힘에 의한 인장변형률과 압축변형률이 중첩된다. 그림에서 점선은 반도체 칩이 있는 범위 (x= 0~4.5 mm)를 나타내고 있으며, 이 선을 경계로 변형률이 크게 변하고, 끝 쪽으

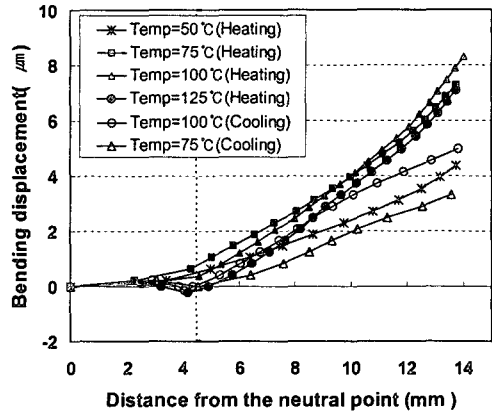


Fig. 13 Bending displacement distributions along the package by temperature change

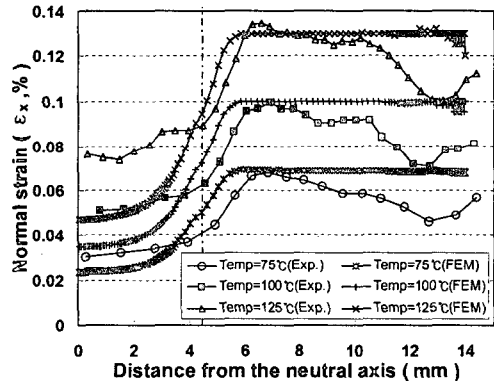


Fig. 14 Longitudinal strain distributions along the top surface of package

로 갈수록 변형률은 다시 감소한다. 실리콘 칩의 열팽창계수가 몰딩혼합물의 열팽창계수보다 아주 작고 탄성계수는 크기 때문에, 경계면 안쪽의 변형률이 바깥쪽의 변형률 보다 작게 발생되었다. 유한요소 해석 결과와 비교해 보면, 온도가 75°C 일 때는 두 결과가 대체적으로 잘 일치하였으나, 온도가 125°C일 때는 칩 부분에서 유한요소 결과가 상당히 작게 계산되었다. 이것은 굽힘변형 거동에서 설명한 바와 같이 높은 온도에서 솔더볼의 탄소성 변형으로 인하여 반대의 국부적인 굽힘이 일어나므로 열팽창에 의한 인장변형률에 굽힘에 의한 인장변형률이 중첩되었기 때문이며, 유한요소 해석에서는 이러한 국부적인 굽힘변형

을 반영하지 못하여 굽힘에 의한 압축변형이 중첩되었기 때문이다. 실험에서 패키지의 끝 부분의 변형률이 감소하는 것은 이 부분에서는 굽힘이 일어나지 않고 강제회전 만이 일어났기 때문이다.

BGA와 같이 높은 I/O 개수를 가진 반도체 패키지 결합체가 열 하중을 받을 때 패키지부분과 PCB를 연결하는 솔더볼의 변형이 파손의 주요 원인이 된다. Fig. 15는 각 솔더볼에서 발생하는 평균 변형률 값을 보여주고 있다. 솔더볼의 평균 변형률은 간섭무늬에서 솔더볼 외곽을 따라서 측정된 간섭무늬 차수의 차이와 와 식(2)에 의해 계산되었다. 그래프에서 점선은 열팽창계수와 온도 차이에 의해 계산된 자유열팽창에 의한 변형률을 나타내므로 전체변형률과 자유열팽창에 의한 변형률 차이가 응력을 발생시키는 기계적인 변형률이다. 패키지의 길이 방향 수직변형률(ϵ_x)은 위, 아래 부분의 구속으로 인하여 자유 열팽창 변형률보다 약간 작게 나타났으며, 수직방향 수직변형률(ϵ_y)은 안쪽의 솔더에서 큰 값을 보였다. 이것은 앞에서 설명한 패키지의 국부적인 굽힘변형 거동과 관련이 있다. 전단변형률은 안쪽 배열과 바깥쪽 배열 솔더볼의 부호가 반대이며, 절대값은 칩의 경계와 가까운 안쪽 배열의 맨 바깥쪽 솔더볼과 바깥쪽 배열의 맨 안쪽 솔더볼에서 큰 값을 보였다. Fig. 16은 각 솔더볼에서 발생하는 평균 유효변형률 값을 보여주고 있다. 각각의 값들 중 절대값은 안쪽 배열의 바깥쪽에 위치한 3번 솔더볼에서 가장 크게 발생되었으며, 그 값은 온도가 100℃일 때 0.242%, 온도가 125℃일 때는 0.362%이었다.

7. 결론

본 논문에서는 미소한 열변형을 정밀하게 측정하기 위하여 8개의 거울을 사용하는 무아레 간섭계 장치를 구성하였다. 구성된 광학 시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여, 알루미늄 시편에 대한 열팽창계수 측정시험을 수행하였고, 이 시스템을 이용하여 WB-PBGA 패키지의 온도변화에 따른 열변형 거동을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측정된 시편의 열팽창계수는 재료의 물성치 데이터와 상당히 잘 일치하여 본 논문에서 구성

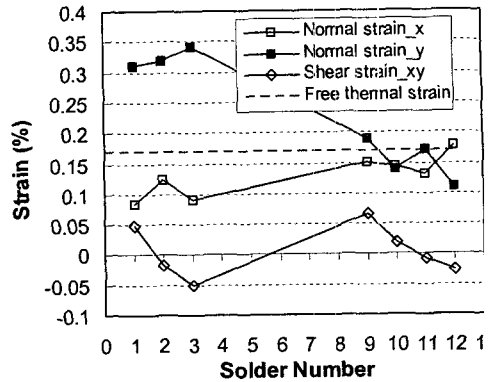


Fig. 15 Average strains of solder balls at the temperature of 100℃

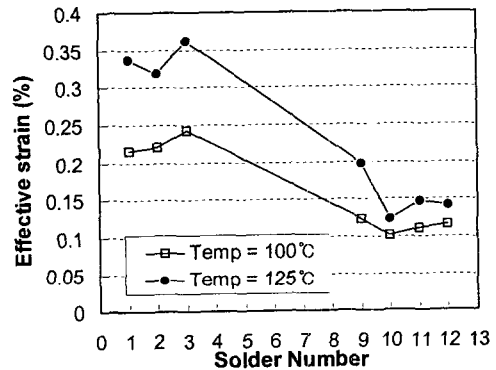


Fig. 16 Average effective strain of solder balls

한 무아레 간섭계장치 및 실험방법이 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

(2) 패키지 결합체는 온도가 증가함에 따라 굽힘변형이 증가하다가 100℃이상에서는 솔더볼의 항복에 의해 중심 부분에서는 반대방향의 굽힘변형이 일어나는 복잡한 변형 거동을 보였다.

(3) 솔더볼에서의 변형을 해석해본 결과, 평균 유효변형률은 안쪽 배열의 바깥쪽에 위치한 3번 솔더볼에서 가장 크게 발생되었으며, 그 값은 온도가 125℃일 때 0.362%이었다.

(4) 유한요소해석은 실험결과와 비교하여 각 온도에 따른 변위 분포가 상당히 잘 일치하였으나 고온에서는 솔더볼의 급격한 비선형 거동으로 인하여 변형률에 차이를 보였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 2000년도 목적기초 연구사업 지역대학 우수과학자 지원연구(과제번호 R05-2000-000-00304-0)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Post, D., Han, B. and Ifju, P., 1994, *High Sensitivity Moiré : Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Springer-Verlag, New York.
- (2) Guo, Y., Post, D. and Han, B., 1992, "Thick Composites in Compression: An Experimental Study of Micromechanical Behavior and Smeared Engineering Properties," *J. Composite Materials*, Vol. 26, No. 13, pp. 1930~1944.
- (3) Ifju, P. G., Masters, J. E. and Jackson, W. C., 1995, "Using Moiré Interferometry to Aid in Standard Test Method Development for Textile Composite Material," *Composite Science and Technology*, Vol. 53, pp. 155~163.
- (4) Dadkhah, M. S. and Kobayashi, A. S., 1989, "HRR Field of a Moving Crack, An Experimental Analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, pp. 253~262.
- (5) Perry, K. E. and McKelvie, J., 1996, "Measurement of Energy Release Rates for Delaminations in Composite Material," *Experimental Mechanics*, Vol. 36, pp. 55~63.
- (6) Post, D., Wood, J. D., Han, B. Parks, V. J. and Gerstle, Jr., F. P., 1994, "Thermal Stresses in a Bimaterial Joint: An Experimental Analysis," *J. Applied Mechanics, Trans. ASME*, Vol. 61, No. 1, pp. 192~198.
- (7) Joo, J. W., Chai S. E., Shin, D. I., 2001, "Deformation Analysis of Composite-Patched Concrete Using Moiré Interferometry," *Transactions of the KSME, A*, Vol.26, No.1, pp.160~170.
- (8) Guo, Y., Lim, C.K., Chen, W.T. and Woychik, C.G., 1993, "Solder Ball Connect (SBC) Assemblies Under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry, and Its Interpretation," *IBM J. Research Development*, Vol. 37, pp. 635~648.
- (9) Han, B. and Guo, Y., 1995, "Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moiré and Microscopic Moiré Interferometry," *J. Electronic Packaging, Trans. ASME*, Vol. 117, pp.185~191.
- (10) Han, B., 1998, "Recent Advancements of Moiré and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.4, pp.278~288.
- (11) Stout, E.A., Sottos, N.R and Skipor, A.F. 2000, "Mechanical Characterization of Plastic Ball Grid Array Package Flexure Using Moiré Interferometry," *IEEE Trans. on Advanced Packaging*, Vol. 23, No. 4, pp. 637~645.
- (12) Han, B., Wu, Z. and Cho, S., 2001, "Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Flexible Substrate by Moiré Interferometry," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 3, pp. 22~25.
- (13) Joo, J. W. and Han, B. T., 2002, "Thermo-mechanical and Flexural Analysis of WB-PBGA Package Using Moiré Interferometry," *Transactions of the KSME, A*, Vol.26, No.7, pp.1302~1308.
- (14) Cho, S.-M., Cho, S.-Y. and Han, B., 2002, "Observing Real-Time Thermal Deformations in Electronic Packaging," *Experimental Techniques*, Vol. 26, No. 3, pp. 25~29.
- (15) Han, B. 2003, "Thermal Stresses in Microelectronics Subassemblies: Quantitative Characterization using Photomechanics Methods," *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 26, pp. 583~613.
- (16) Joo, J. and Cho, S., 2004, "Evaluation of thermal Deformation Model for BGA Packages Using Moiré Interferometry," *KSME International Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 230~239.
- (17) Jung, W, Lau, J. H. and Pao, Y.-H., 1996, "Nonlinear Analysis of Full-Matrix and Perimeter Plastic Ball Grid Array Solder Joints," *Proc. of ASME Int. Mech. Eng. Congress & Exhibition*, 96-WA/EEP-17, Atlanta, Ga, Nov., pp. 1~19.