

<학술논문>

## 무아래 간섭계 측정과 최적화 기법을 이용한 적층판의 접착제 물성치 규명

주진원<sup>†</sup> · 김한준<sup>\*</sup> · 이우혁<sup>\*\*</sup> · 김진영<sup>\*\*</sup> · 최주호<sup>\*\*\*</sup>  
(2007년 6월 23일 접수, 2007년 9월 13일 심사완료)

### Material Parameters Identification of Adhesive in Layered Plates Using Moiré Interferometry and Optimization Technique

Jin-Won Joo, Han-Jun Kim, Woo-Hyuk Lee, Jin-Young Kim and Joo-Ho Choi

**Key Words:** Layered Plates(적층판), Moiré Interferometry(무아래 간섭계), Optimization(최적화),  
Material Parameter Identification(물성치 규명), Adhesive(접착제)

#### Abstract

In this study, a method to characterize material properties of adhesive that is used in a layered plates bonding process is developed by combined evaluation of experiment, simulation and optimization technique. A small bonded specimens of rectangular plate are prepared to this end, and put into a thermal loading conditions. Moiré interferometry is used to measure submicron displacements occurred during the process. The elevated temperature is chosen as control factors. FE analysis with constant values for the adhesive materials is also carried out to simulate the experiment. Significant differences are observed from the two results, in which the simulation predicts the monotonic increase of the bending displacement whereas the measurement shows decrease of the displacement at above 75°C. In order to minimize the difference of the two, material parameters of the adhesive at a number of different temperatures are posed as unknowns to be determined, and optimization is conducted. As a result, optimum material parameters are found that excellently matches the simulation and experiment, which are decreased with respect to the temperature.

#### 1. 서 론

미소전자 패키지(microelectronics package)나 디스플레이 장치 관련 부품 등에서는 다양한 적층판이 제조되거나 조립의 수단으로 종종 사용된다. 이러한 예로는, PEBB(power electronic building blocks)이나, 트랜지스터 스택(transistor stacks), ITO 스퍼터링 타겟(indium tin oxide sputtering target)

등<sup>(1)</sup>이 있다. 디스플레이 분야에서 사용되는 적층판 중 하나인 ITO 스퍼터링 타겟은 구리계열의 금속과 세라믹 계열인 타겟을 인듐계열인 금속접착제로 접합하는 구조로 되어 있다. 결합공정은 4개의 연속적인 부분공정으로 이루어지는데, (1) 피접착물인 두 판을 각각 가열하는 공정을 거친 후, (2)용융된 금속접착제를 각각의 한쪽 면에 입힌 다음, (3)두 판에 압력을 가하는 결합공정을 거치고, (4)상온까지 자연냉각을 하는 과정을 거친다. 이때 냉각공정에서 피접착물 사이의 서로 다른 열팽창계수의 차에 의해 균일하지 않은 변형과 잔류응력과 발생한다. 특히 대상품이 크고 얇거나 반복적인 열하중을 받으면, 항복응력이 낮은 접합부나 취성이 강한 세라믹 계열의 타겟

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 충북대학교, 기계공학부  
E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr  
TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441

<sup>\*</sup> 충북대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

<sup>\*\*\*</sup> 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

에서 파손이 발생하는 경우도 발생한다.

적층판의 기계적인 거동은 Basaran<sup>(2)</sup>나 Suhir<sup>(3)</sup> 등에 의해 선행연구가 다양하게 진행되었으나, 수치 계산에 의한 한계와 적층판에 사용되는 재료의 물성, 제조공정시의 오차 그리고 여러 환경적인 요인으로 인하여 해의 신뢰성에 여러 문제점이 남아 있다. 적층판의 제조과정에 대한 기계적인 거동을 파악하고 정량적인 데이터를 얻어내기 위해서는 유한요소해석이 매우 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 인듐이나 납과 같이 전형적으로 낮은 녹는점을 갖는 금속접착 재료는 온도에 상당히 의존적인 물성치를 가지며 심한 소성 거동을 보이므로, 신뢰할 수 있는 해석을 위해서는 이러한 금속접착 재료의 정확한 재료 물성치를 고려하는 것이 매우 중요하다. 그러나 온도에 따라 변하는 재료의 정확한 재료 물성치들은 실제로 문헌에서 찾기 힘들 뿐만 아니라, 실제 사용되는 재료에서는 다양한 화학성분 비가 적용되거나, 접합면의 두께 등의 형상에 따라 다른 재료 물성치를 가질 수 있으므로 정확한 재료상수 값을 결정하기가 매우 어렵다. 따라서 실제로 부품에 실장되어 사용되는 재료에 대한 적절한 실험과 이의 통계적인 처리를 통하여 재료상수 값을 유추하고 이를 확인하는 방법도 매우 효과적이고 신뢰성 있는 방법이 될 수 있다.

무아래 간섭법(moiré interferometry)<sup>(4)</sup>은 비접촉으로 전체적인 영역에서의 변형거동을 측정할 수 있고 감도가 매우 높아 1µm이하의 변위를 측정할 수 있으므로 복합재료의 국부변형거동,<sup>(5)</sup> 이중 접합재료의 경계층 문제,<sup>(6)</sup> 반도체 패키지의 열변형<sup>(7-10)</sup>에 효과적으로 이용되어 왔다. 본 논문에서는 비선형 유한요소해석에 의해 굽힘변형을 구하고 무아래 간섭법에 의해 측정된 굽힘변형과의 비교를 통하여 새로운 재료 물성치들을 구하고 이의 신뢰성을 확인하였다. 이를 위하여 최적화 기법을 사용하여 문제를 정식화하고 두 결과의 차이를 최소화함으로써 최적의 물성치들을 결정하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 무아래 간섭법

무아래 간섭법은 빛의 회절(diffraction)과 간섭(interference)이라는 두 가지 성질을 주로 이용하

여 평면 내의 정해진 두 축(x, y)에 대한 변위 성분을 간섭무늬로 나타내는 광학적인 실험방법<sup>(4)</sup>이다. 무아래 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통, 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 변형하도록 하며, 얻어지는 간섭무늬들은 시편의 표면에서 각각 x 방향의 변위 U와 y방향의 변위 V에 대한 등변위 곡선을 나타낸다. 평면의 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

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

여기서  $N_x(x,y)$ 와  $N_y(x,y)$ 는 위치에 따라 분포하는 간섭무늬의 차수이며, 본 논문에는  $f_s = 1200$  lines/mm인 회절격자를 사용했으므로 인접한 간섭무늬간의 차이는 0.417 µm의 변위를 나타낸다.

### 2.2 실험 과정

본 실험에서 사용될 시편은 Fig. 1과 같이 한 변의 길이가 40 mm인 정사각형 판 모양의 적층판이며, 두께가 8 mm인 구리 계열의 평판과 두께가 5 mm인 세라믹 계열의 평판이 두께 0.5 mm인 인듐 계열의 금속 접착제에 의해 접합된 형태이다. 평면 내의 2차원 변위를 측정하기 위하여 다이아몬드 톱 기계를 이용하여 직단면이 잘 나타나도록 절단한 후, 그 면을 폴리싱하였다. 점도가 낮은 에폭시를 사용하여 회절격자 몰드를 시편의 표면에 복제하고 24시간 경화하여 1200 lines/mm의 주기를 갖는 회절격자를 생성하였다.

Fig. 2는 실험에서 사용된 광학장치와 온도조정 장치의 구성도를 보여주고 있다. 광학장치는 8개의 거울과 포물면 거울(parabolic mirror)을 사용하는 4 beam 무아래 간섭계<sup>(11)</sup>를 이용하였으며 시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 온도 챔버를 광학장치에 연결하여 사용하였다. 시편을

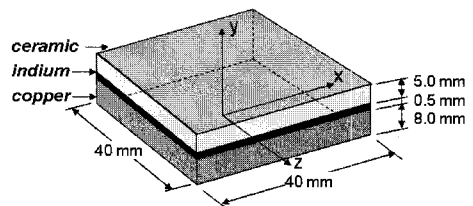


Fig. 1 Schematics of the laminated layered specimen

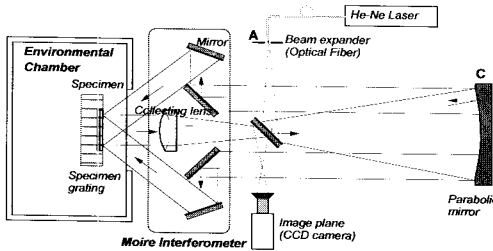


Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus with an environment chamber

온도 챔버 안에 고정시킨 후, 간섭계의 거울들을 조정하여 광학장치들을 정확하게 정렬하였다. 간섭계 전체의 강제회전을 통하여 시편과의 상대 위치를 정확하게 일치시키고 변위장의 초기상태 (null field)를 얻어내었다. 이 초기상태의 간섭무늬는 온도변화에 대한 기준 변형을 나타내며, 간섭무늬가 없어지면 광학장치와 시편이 완벽하게 정렬되었음을 의미한다. 컴퓨터와 시편에 부착된 열전대를 이용하여 상온(20℃)에서 약 25℃의 간격으로 단계적으로 170℃까지 상승시킨 후에 다시 단계적으로 상온까지 온도를 하강시켰다. CCD 카메라와 영상처리장치를 이용하여 각 온도 단계에서 U 변위장과 V 변위장을 나타내는 간섭무늬를 얻어내었다.

### 3. 유한요소 해석

적층판의 온도변화에 대한 비선형 거동을 해석하기 위하여 상용 코드인 ANSYS 10.0을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 시편이 전후좌우 대칭이므로 Fig. 3과 같이 1/4 모델만을 모델링하고 대칭면 부분의 수직변위를 모두 구속하였으며, 중심점(x=0, y=0, z=0)의 y 방향 변위도 구속하였다. 굽힘변형의 거동을 신뢰성 있게 해석하기 위하여 3차원 20절점 육면체요소(SOLID95)를 사용하였다. 상온인 20℃를 기준으로 170℃까지 온도를 상승시키며 정해진 온도 단계에서 열변형을 계산하였다. 체적력으로 가해지는 온도는 전체시편에 대해 균일한 것으로 가정하였다.

사용한 각 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 세라믹 재료의 열팽창계수는 구리의 열팽창계수에 비해 2배 이상 작기 때문에 온도가 상승하면 아랫부분이 더 많이 늘어

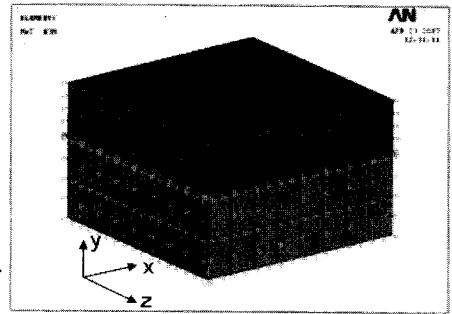


Fig. 3 Finite element model of the specimen

Table 1 Material properties used in the FEA

	Ceramic	Indium	Copper
Thermal expansion coefficient ( $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	7.6	25	17.3
Young's modulus (GPa)	145	12.74	117
Possion's ratio	0.24	0.45	0.33
Yield stress (MPa)	130	1.4	240

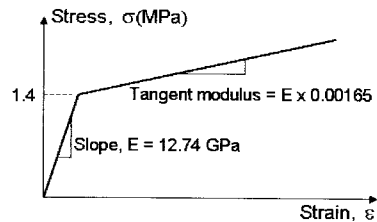


Fig. 4 Bilinear stress-strain relationship of indium

나서 위로 굽는(∼) 변형을 보일 것으로 예측된다. 그와 함께 금속접착제의 탄성계수 값과 항복 응력 값이 피접착물의 탄성계수에 비해 대단히 작으므로 접착제의 전단변형도 크게 발생할 것으로 예측된다. 해석에서 구리계열 금속과 세라믹 재료는 탄성영역 내에 있는 것으로 가정하였고, 금속접착제는 용융점이 대단히 낮으므로 Fig. 4와 같은 탄소성 거동(bilinear kinematic hardening)을 하는 것으로 가정하였다. 금속접착제의 탄소성 물성치는 전체변형에 대단히 큰 영향을 미칠 가능성이 크므로 실제 공정과정을 시뮬레이션을 할 때 신뢰성 있는 데이터를 사용하여야 한다. 본 논문에서는 Plotner 등<sup>(12)</sup>이 발표한 Fig. 4와 같은 자료로 유한요소해석을 수행하고, 실험에 의해 측정된 변위와 해석에 의한 변위와의 차이를 최소화함으로써, 온도에 따른 최적의 탄소성 물성치를 다시 결정하였다.

### 4. 결과비교 및 고찰

#### 4.1 등변위곡선의 비교 및 변형거동

Fig. 5는 실험결과 중에서 선택된 몇 개의 온도단계에서 무아래 간섭계에 의한 시편의 간섭무늬와 유한요소 해석에 의한 등변위 곡선(displacement contour)을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서의 영역은 단면의 오른쪽 반 ( $x=0-20\text{ mm}$ )만을 보여주고 있다. 유한요소 해석에 의한 인접한 등변위 곡선 사이는 간섭무늬와 똑같이  $0.417\ \mu\text{m}$ 의 변위를 나타내도록 하였다. 두 결과에서 보는 바와 같이 전체적인 변형거동은 매우 유사하게 나타나서 유한요소 해석방법이나 상온에서의 재료의 물성치가 크게 틀리지 않음을 보여주고 있다. 그러나 정량적인 수치나 간섭무늬의 개수 등을 비교해 보면, 특히 고온에서 두 결과의 차이가 커져서 문헌에서 도입한 재료의 물성치가 정확하지 않게 입력되었음을 알 수 있다.

U 변위를 나타내는 간섭무늬에서는 온도의 상승으로 인하여 길이 방향으로 큰 팽창이 일어났음을 보여주고 있다. 열팽창 계수의 차이로 인하여 구리계열 금속의 열팽창이 세라믹계열 재료의 열팽창보다 훨씬 크게 나타났으며, 이로 인해 간섭무늬가 수직방향으로 나타나지 않고 비스듬히 굽은 모양으로 나타났다. 이것은 각

각 재료의 자유 열팽창에 굽힘에 의한 강제회전이 중첩되었기 때문이다. 따라서 시편이 전체적으로 아래로 볼록하게 굽힘변형이 일어났음을 볼 수 있으며, 이러한 굽힘변형은 V변위를 나타내는 간섭무늬를 해석하면 정량적으로 구할 수 있다.

U 변위의 간섭무늬는 금속 접착제 부분에서 불연속인 곡선처럼 나타났으나 이것은 접착제 윗면(세라믹계열 재료의 아랫면)과 아랫면(구리계열 금속의 윗면)의 U 변위 차이 때문이며, 이 차이는 접착재료 영역에 매우 큰 전단변형이 일어났음을 의미한다. U 변위 차이는 중심에서 바깥쪽으로 갈수록( $x$  좌표값이 커질수록) 커지므로 접착층 바깥부분의 전단변형률이 가장 커지게 된다. 이 전단변형은 온도 차가 크거나 반복 열하중이 가해지면 접착재료를 파손에 이르게 한다. 열팽창계수가 다른 두 개의 재료가 금속접착제나 납 등에 의해 결합되었을 때, 열하중이 가해지면 기본적으로는 이와 같이 전체적인 굽힘변형과 접착부의 전단변형이 주로 발생되며, 어느 쪽의 거동이 더 지배적인가는 접합재료의 온도에 따른 물성치가 큰 영향을 미친다. 실험에서의 간섭무늬를 보면 고온에서 U 변위를 나타내는 간섭무늬가 저온에서보다 똑바로 선 것을 볼 수 있는데, 이것은 고온에서 금속 접착제 재료가 항복하여 윗면과 아랫면의 결합력이

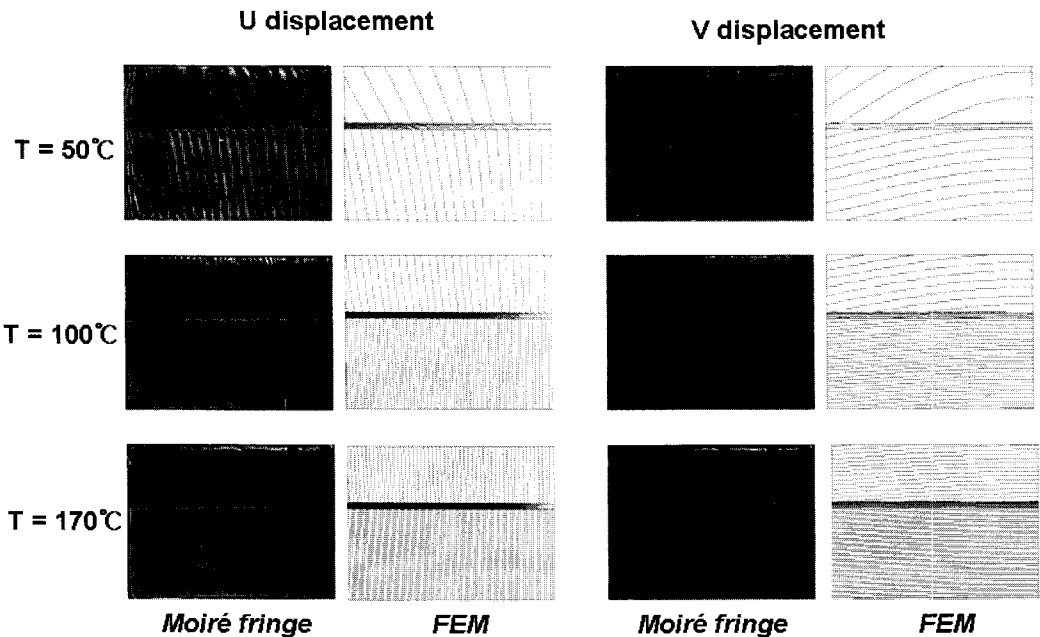


Fig. 5 Representative moiré fringe patterns and displacement contours by finite element analysis (Spacing between adjacent lines represents  $0.417\ \mu\text{m}$  in all cases)

거의 없어졌기 때문이다. 즉, 전체적인 굽힘변형은 줄어들고, 접착부의 전단변형이 매우 크게 발생하였기 때문이다.

4.2 온도에 따른 굽힘변위의 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 구리 금속판의 중심선 ( $y = 4 \text{ mm}$ )을 따라 변화하는 굽힘변위를 실험과 해석으로부터 계산하여 보여준 것이다. 이 결과는 V 변위를 나타내는 간섭무늬로부터 얻어졌으므로 그래프의 곡선은 금속판이 실제 휨 모양을 과장하여 보인 것이다. 실험결과인 Fig. 6을 보면, 50°C에서 75°C까지 온도가 상승할수록 굽힘변위는 증가하였으나, 75°C에서 100°C까지 더 올라가면 오히려 굽힘변위가 감소하는 현상이 나타나서 170°C까지 계속적으로 변위가 감소함을 볼 수 있다. 유한요소 해석결과인 Fig. 7을 실험결과와 비교하여 보면, 온도가 50°C에서와 75°C에서는 해석결과와 실험결과가 거의 일치하였으나, 그 이상의 온도에서는 실험의 결과와는 다르게 온도가 50°C에서 170°C까지 증가하는 동안 굽힘변위는 계속 증가하였다.

Fig. 8은 실험과 해석에서 계산한 구리 금속판 끝단( $x=20 \text{ mm}$ ,  $y=4 \text{ mm}$  지점)의 최대굽힘변위를 온도에 따라 도시한 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 실험결과에서는 온도가 상승할수록 75°C까지는 굽힘변위는 증가하다가 그 이상의 온도에서는 변위가 감소하는 현상을 보였으나 유한요소 해석결과에서는 온도가 상승할수록 계속하여 변위가 증가하였다, 실험결과에서 이러한 현상이 발생하는 이유는 온도가 올라갈수록 금속접착제 재료의 항복에 의해 결합력이 점점 약해져서 각각의 재료가 자유롭게 팽창하였기 때문이다. 그러나 유한요소 해석에서는 온도에 따른 물성치를 고려하지 않았기 때문에 이러한 심한 비선형 현상이 잘 나타나지 않았다. 신뢰성 있는 해석을 위해서는 온도에 따른 접착제 물성치를 정확하게 입력하여 이 변위의 차이를 가능한 줄이는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

온도가 감소할 때에는 온도가 증가할 때의 과정을 따르지 않고 거의 선형적으로 굽힘변위가 감소하여 상온으로 돌아왔을 때에도 상당한 양의 잔류변형이 남았다. 이것은 금속접착 재료의 온도 히스테리시스에 관련된 중요한 특징일 것으로 판단되나 본 논문의 범위를 벗어나므로 다루지

않았다. 유한요소해석에서는 온도 감소시의 결과를 구하지 않았다.

4.3 접착물간의 경계면에서 U 변위

4.1에서 언급한 바와 같이 접착제 윗면(세라믹 계열 재료의 아랫면)과 아랫면(구리계열 금속의

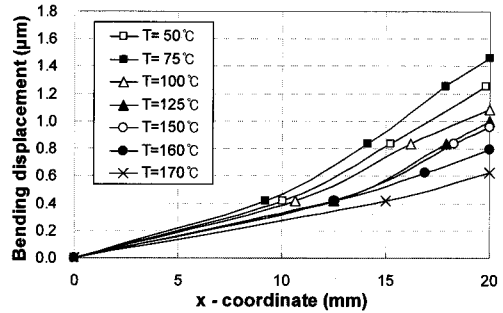


Fig. 6 Bending displacement distributions by experiment along the middle line of copper plate

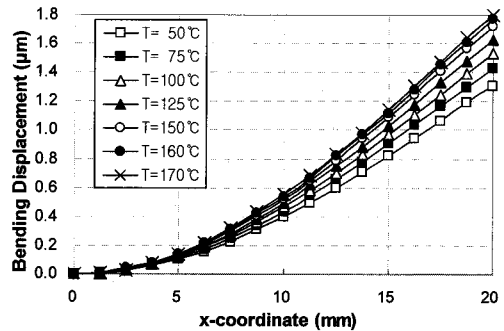


Fig. 7 Bending displacement distributions by FE analysis along the middle line of copper plate

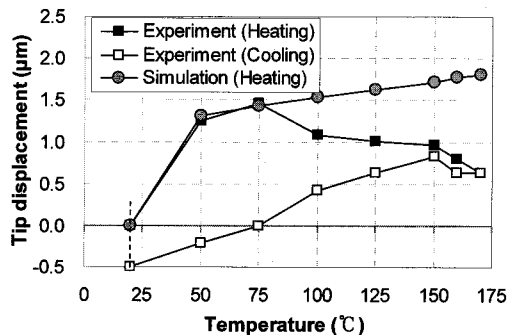


Fig. 8 V displacement at the tip of the copper plate according to temperature

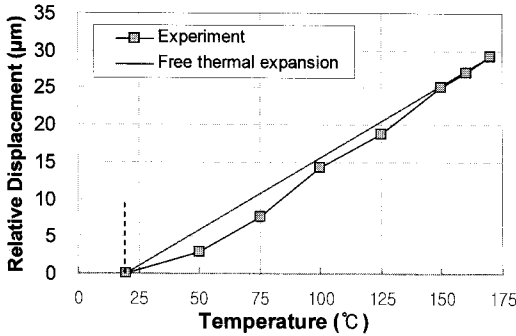


Fig. 9 Relative displacement at the interface region of adherants by experiment

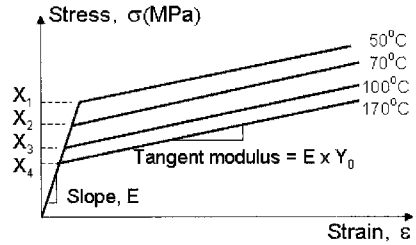
윗면)에서는 U 변위 차이를 보이며, 이 차이는 접착재료 영역에 전단변형이 일어났음을 의미한다. U 변위의 차이는 중심에서 바깥쪽으로 갈수록(x 좌표값이 커질수록) 커진다. Fig. 9는 가장 바깥쪽 지점의 U 변위 차이를 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 자유 열팽창(free thermal expansion,  $\Delta U = \Delta a \times \Delta T \times \Delta L$ )은 접착제의 접착력이 작용하지 않아서 각각의 재료가 열팽창계수에 의하여 자유롭게 변형했다고 가정했을 때의 변위 차이를 표시한다.

실험결과를 보면 온도가 증가할수록 U 변위 차이의 증가율이 커져서 150°C 이상에서는 자유 열팽창과 거의 같은 값을 보인 것으로 나타났다. 이것은 접착제가 항복을 하여 접착물 간의 결합력이 거의 없어진 상태가 되었음을 의미한다.

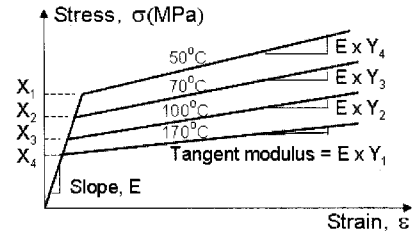
## 5. 물질거동에 대한 최적화

### 5.1 최적설계 정식화 및 과정

실제적인 실험결과와 유한요소 해석결과와의 차이를 최소한으로 줄일 수 있는 금속접착제의 물성치를 찾기 위하여 최적설계의 기법을 이용한다. 설계 변수는 다양하게 선택할 수 있지만 Fig. 4에서와 같이 재료의 탄소성 거동을 가정했을 때, 거동에 큰 영향을 끼치는 것으로 예측되는 금속접착제의 온도에 따른 항복응력과 소성변형영역에서 기울기인 접선계수(tangent modulus)의 탄성계수에 대한 비율로 정하였다. 최소화 할 목적함수는 각 온도에 따른 실제 실험에서의 끝단의 최대굽힘변위(VF<sub>i</sub>)와 유한요소 해석 결과에서



(a) 1st step : yield stress



(b) 2nd step : tangent modulus ratio

Fig. 10 Optimization for yield stress and tangent modulus ratio at measured temperatures

의 최대굽힘변위(VF<sub>i</sub>) 차이의 제곱의 합으로 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^n (VE_i - VF_i)^2 & (2) \\ &\text{subject to} \quad X_i \geq X_{i+1}, \quad Y_i \geq Y_{i+1} \end{aligned}$$

여기서 n은 적용하고자 하는 온도단계의 개수로 50°C, 75°C, 100°C, 170°C의 4개로 하였다. 고온에서의 설계 변수가 저온에서보다 크지 않게 제한 조건을 두었다.

최적화를 위해 상용 프로그램인 Visual DOC를 이용하였고 최적화 알고리즘으로는 SQP (sequential quadratic programming)를 사용하였으며 미분 값 계산을 위해 전방차분법을 적용하였다.

최적화는 두 단계로 나누어 순차적으로 수행하였다. Fig. 4와 같이 모든 온도에서 일정하다고 가정한 항복응력 1.4 MPa와 접선계수 비율 0.00165를 초기값으로 하였으며, 첫 번째 단계에서는 Fig. 10(a)와 같이 온도 50°C, 75°C, 100°C, 170°C에서의 항복응력만을 설계변수 X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub>로 하여 최적화를 수행하였다. 두 번째 단계에서는 Fig. 10(b)와 같이 첫 단계에서 구한 온도에 따른 항복응력 값을 상수로 놓고 접선계수 비율을 설계변수 Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>, Y<sub>4</sub>로 하여 최적화를 수행하였다.

**Table 2** Optimum solution of yield stress(MPa)

Design variable	Initial value	Optimum value
X <sub>1</sub>	1.4	1.32817
X <sub>2</sub>	1.4	1.32705
X <sub>3</sub>	1.4	0.86288
X <sub>4</sub>	1.4	0.10882

**Table 3** Optimum solution of tangent modulus ratio

Design variable	Initial value	Optimum value
Y <sub>1</sub>	0.00165	0.0016634
Y <sub>2</sub>	0.00165	0.0016634
Y <sub>3</sub>	0.00165	0.0016505
Y <sub>4</sub>	0.00165	0.0015193

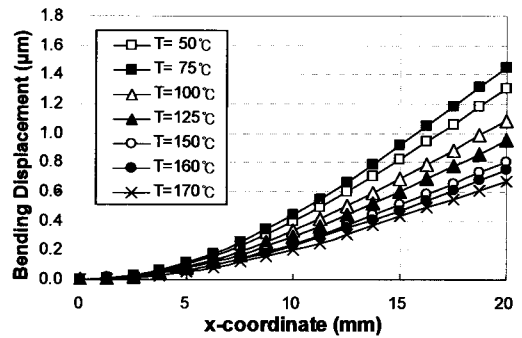
5.2 항복응력과 접선계수에 대한 최적화 결과

항복응력에 대해 최적화한 첫 단계에서의 결과를 Table 2에 보였다. 낮은 온도에서는 문헌에서 인용한 상온에서의 항복응력 1.4 MPa과 비슷한 값이 구해졌으나, 온도가 올라갈수록 항복응력이 낮아지고, 용융점에 가까운 170℃에서는 0.1088 MPa의 대단히 낮은 항복응력 값이 구해졌다. 목적 함수는 1.6108 μm<sup>2</sup>에서 0.01115 μm<sup>2</sup>로 99% 정도 크게 감소하였다.

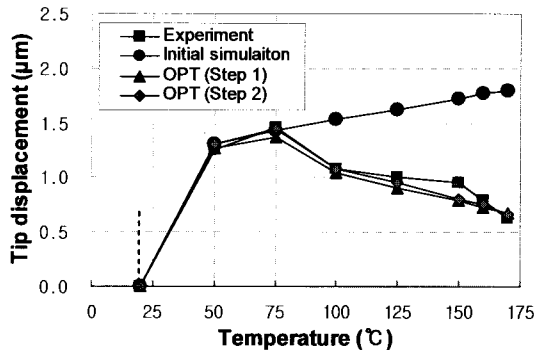
두 번째 단계로서 탄성계수에 대한 접선계수의 비율에 대하여 최적화한 결과를 Table 3에 보였다. 온도가 높아질수록 접선계수 비율은 낮아져서 상온에서의 접선계수 비율인 초기치 0.00165에 비해 100℃ 이하에서는 큰 값이 얻어졌고 170℃에서는 작은 값이 얻어졌다. 목적함수는 0.01115 μm<sup>2</sup>에서 0.00634 μm<sup>2</sup>로 다시 43% 정도 감소하였다.

앞에서 구한 온도에 따른 항복응력의 최적해와 접선계수의 최적해를 물성치로 하여 유한요소 해석을 다시 수행하였다. Fig. 11은 각 온도에 대하여 다시 계산한 구리계열 금속판의 중심선을 따라 변화하는 굽힘변위를 보여주고 있다. 온도에 따라 변화하는 변형 거동뿐만 아니라 그 크기도 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 온도변화에 따른 끝단의 최대굽힘변위에 대하여 지금까지 수행한 해석결과를 실험결과와 함께 정리하여 나타난 것이다. 앞에서 기술한 바와 같이 문헌에서 인용한 물성치로 계산한 최대굽힘변위는 실험값과는 아주 다르게 온도에



**Fig. 11** Bending displacement distributions by FE analysis along the middle line of copper plate



**Fig. 12** V displacements at the tip of the copper plate after minimizing the difference between experiment and analysis

에 따라 계속 증가하는 거동을 보였으나, 실험결과와 복합적으로 계산하여 최적설계의 기법을 이용한 해석결과는 변위거동뿐 아니라 변위 값이 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 항복응력만을 설계변수로 계산한 물성치보다 항복응력과 접선계수를 설계변수로 계산한 물성치를 이용하는 것이 더 실험결과와 잘 일치하였지만, 저용융 금속 접합재료에 대한 비선형해석에서는 온도에 따른 항복응력 값이 신뢰성 있는 해석에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 개발한 방법의 적용성을 보기 위하여 간단한 재료상수 모델로 해석과 평가를 수행하였지만, 좀 더 적절한 재료상수 모델을 본 방법에 적용하면 용융점이 낮은 금속 접착재료가 포함된 복잡한 전자 패키지 등의 시뮬레이션에 아주 실용성 있게 이용될 수 있을 것으로 판단한다.

6. 결 론

본 논문에서는 금속 접착제에 의해 접합된 적층판에 대하여 비선형 유한요소해석으로 계산된 굽힘변위와 무아래 간섭법에 의해 측정된 굽힘변위와의 차이를 최소화함으로써 최적의 물성치들을 결정하고 이의 신뢰성을 확인한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 결합된 적층판에 열하중이 가해지면 기본적으로는 전체적인 굽힘변형과 접착부의 전단변형이 주로 발생된다.

(2) 문헌에서 인용한 물성치로 계산한 유한요소 해석결과에서는 온도가 상승할수록 계속하여 변위가 증가하였으나, 실험결과에서는 금속접착제 재료의 항복으로 인해 75℃까지는 굽힘변위는 증가하다가 그 이상의 온도에서는 변위가 감소하는 현상을 보였다.

(3) 실험결과와 복합적으로 계산하여 최적설계의 기법을 이용한 해석결과는 거동뿐 아니라 변위 값이 실험결과와 아주 잘 일치하였다.

(4) 최소화 문제의 목적 함수는 첫 단계에서  $1.6108 \mu\text{m}^2$ 에서  $0.01115 \mu\text{m}^2$ 로 99% 정도, 두 번째 단계에서는  $0.00634 \mu\text{m}^2$ 로 다시 43% 정도 감소하여서, 저용용 금속 접합재료에 대한 비선형해석에서는 온도에 따른 항복응력 값이 해석의 신뢰성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Yacobi B., et al., 2002, "Adhesive Bonding in Microelectronics and Photonics," *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 10, pp. 6227-6262.  
 (2) Basaran, C. and Zhao, Y., 2001, "Mesh Sensitivity and FEA for Multi-Layered Electronic Packaging," *Trans. ASME, J. Electron. Packag.*, Vol. 123, No. 5, pp. 218-224.  
 (3) Suhir, E., 2001, "Predicted Thermal Stresses in a Bimaterial Assembly Adhesively Bonded at the Ends," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 5, pp. 120-129.  
 (4) Post, D., Han, B. and Ifju, P., 1994, "High

Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials," Springer-Verlag, New York.

(5) 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.  
 (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.  
 (5) 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, No. 5, pp. 635-648.  
 (6) 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.  
 (7) Han, B., 1997, "Deformation Mechanism of Two Phase Solder Column Interconnections Under Highly Accelerated Thermal Cycling Condition: an Experimental Study," *J. Electronic Packaging, Tran. ASME*, Vol. 119, pp. 189-196.  
 (8) 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.  
 (9) 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.  
 (10) Joo, J. W., Cho, S and Han, B., 2005, "Characterization of Flexural and Thermo-mechanical Behavior of Plastic Ball Grid Array Package Assembly Using Moiré Interferometry," *Microelectronics Reliability*, Vol. 45, Iss. 4, pp.637-646.  
 (11) Joo, J. W and Oh, K. W., 2004, "Submicro-Displacement Measuring System with Moiré Interferometer and Application to the Thermal Deformation of PBGA Package," *Transactions of the KSME, A*, Vol.28, No.11, pp.1646-1655.  
 (12) Plotner, M., Donat, B. and Benke, A., 1991, "Deformation Properties of Indium-based Solders at 294 and 77k," *Cryogenic*, Vol. 31, pp. 159-162.