〈 논문 〉

불확정성을 고려한 적층판 결합공정의 강건최적설계

이우혁† · 박정진* · 최주호** · 이수용**

(2006 년 9 월 1 일 접수, 2006 년 11 월 30 일 심사완료)

A Study on Robust Design Optimization of Layered Plates Bonding Process Considering Uncertainties

Woo-Hyuk Lee, Jung-Jin Park, Joo-Ho Choi and Soo-Yong Lee

Key Words : Dimension Reduction Method(차원감소법), Reliability Analysis(신뢰성해석), Robust Optimization(강건최적설계), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Layered Plates Bonding(적층판 결합)

Abstract

Design optimization of layered plates bonding process is conducted by considering uncertainties in a manufacturing process, in order to reduce the crack failure arising due to the residual stress at the surface of the adherent which is caused by different thermal expansion coefficients. Robust optimization is performed to minimize the mean as well as its variance of the residual stress, while constraining the distortion as well as the instantaneous maximum stress under the allowable reliability limits. In this optimization, the dimension reduction (DR) method is employed to quantify the reliability such as mean and variance of the layered plate bonding. It is expected that the DR method benefits the optimization from the perspectives of efficiency, accuracy, and simplicity. The obtained robust optimal solution is verified by the Monte Carlo simulation.

1. 서 론

극소전자공학(microelectronics)의 패키지나 디스플레이 장치 제조공정 중에는 다양한 적층판(layered plates) 즉, 얇은 판을 적층하여 만든 모듈이 제조되고 조립과정의 하나로 사용되고 있는데, 예를 들면 power electronic building blocks이나 transistor stacks, 스퍼터링 타겟 등이 있다.[1] 이런 적층판이 제조 될 때 적층판의 구성물질들은 특히 냉각공정에서 현저한 온도변화를 겪는다. 이러한 온도변화는 적층판의 구성물질 간의 접착력을 약하게 하거나 적층 구조물에 크랙 등을 야기한다. 그 동안 적층판의 이런 물리적인 현상은 Basaran, Suhir 등에 의해 선행연구가 다양하게 진행되었으나,[1-4] 여전히 적층판의 물성과 제조공정 시의 오차, 여러 환경적인 요인으로 인하여 설계 시의 의도와는 달리 제품 품질에 많은 영향을 끼치고 있다. 본 논문에서는 실제 디스플레이 분야에서 사용되는 적층판의 제조공정에서 가장 문제가 되는 결합공정에 대해 연구하였다. 여기서 적층판은 피접착물인 두 개의 물질과 금속접착제로 구성 된다. 그리고 결합공정은 가열과정과 냉각과정으로 이루어지는데, 이 공정 중 냉각과정 시 피접착물 간의 열팽창 계수의 차이로 인하여 잔류응력과 비틀림 변형이 발생하고 심하면 피접착물에 크랙과 같은 결함이 생긴다. 이러한 문제를 최소화 하기 위해서 냉각 시에는 인위적으로 적층판을 지지대 위에 올려 놓고 무거운 추를 적층판 위에 올려 놓는 방법을 사용하기도 한다. 본 논문에서는 이러한 추 하중과 지지대 조건들을 잘 조절함으로써 적층판에 야기되는 불량을 최소화할 수 있는 방안을 연구하였다. 이를 위해 적층판의 결합공정에서 발생

† 책임저자, 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부
E-mail : lwh7803@nate.com
TEL : (02) 300-0117 FAX : (02) 3158-2191
* 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부
** 회원, 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

하는 열 및 구조해석을 수행하는 코드를 작성하고 이를 이용하여 최적의 공정변수를 결정하는데 활용하였다.[13] 한편 실제 결합공정에서는 안전한 것으로 판단되는 공정조건에서도 여러 가지 불확실성 즉 오차와 환경에 따른 잡음인자로 인해 무시할 수 없는 비율의 불량이 발생하고 있으며 이것이 심각한 품질문제와 고객불신을 야기하고 있다. 이러한 예기치 않은 파손을 방지하기 위해서는 이러한 잡음인자에 의한 영향을 덜 받도록 설계하는 강건설계가 필요하다. 강건설계는 파라메터들의 불확실성을 시스템의 설계에 반영하여 제품 품질의 산포를 줄임으로써 더 높은 신뢰도를 가질 수 있는 설계를 하고자 하는 것이다. 지금까지의 강건설계는 주로 다구찌 방법을 활용하였는데 그것은 이론이 비교적 단순하고 적용이 쉽기 때문이었다. 그러나 이 방법은 컴퓨터 시뮬레이션을 수반하는 설계에서는 적합하지 않은 점이 있어 최근에는 신뢰성 해석을 기반으로 하는 강건설계 기법이 더 활발히 연구되고 적용되고 있다.[6] 이를 위해서는 신뢰성 분석이 수반되어야 하는데, 여기에는 반응함수의 확률을 근사적으로 계산하는 MPP search 방법(FORM, SORM 등), 통계적 모멘트를 계산하여 반응함수의 확률분포를 구하는 모멘트 방법(Taylor/Neumann expansion, RSM, DRM 등)과 시뮬레이션 방법(Monte Carlo, Importance Sampling 등)이 있다.[15~20] 이 중 가장 뛰어난 정확도를 얻기 위한 방법은 몬테카를로 방법이지만, 만족할 만한 정확도를 얻기 위해서는 시행횟수를 크게 잡아야 하므로 경제성이 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 모멘트 방법의 하나로서 최근에 Rahman에 의해 제안된 단변량 차원감소법(Univariate dimension reduction method, UDRM)을 사용하였는데,[5] 이 방법은 비선형이나 큰 분산 문제에 대해서도 Taylor나 Neumann 등 타 방법에 비해 적은 횟수의 해석으로 정확도가 우수한 통계특성을 구한다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 각종 반응함수의 확률분포를 구하였고 이를 공정변수의 산포를 고려한 강건 최적설계 문제에 효과적으로 적용하는 방법을 제시하였다.

2. 적층판 결합공정의 해석

2.1 적층판 결합공정의 개요

적층판 모델은 Fig. 1과 같다. (a)는 평면도를 나타내고 (b)는 측면에서 본 것인데 하판은 단일 판인 반면 상판은 공정의 특성상 6개의 조각으로 나뉘어 있다. Fig. 1의 (C) 그림에서 보는 바와 같이 적층판은 상하좌우 대칭이므로 실제 해석 시에도 1 사분면의 1/4모델만을 해석하였다. 적층판은 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 서로 다른 3가지 재료로 이루어져 있다. 그림에서는 조금 과장되어 있지만 실제로는 한 변이 100mm에서 크게는 1000 mm를 갖는 사각형 모양이고 높이는 10 mm정도로 상대적으로 매우 얇다. Fig. 2는 적층판의 결합공정을 나타내는데 먼저 접착될 두 물체를 각각 가열을 한다. 그리고 접착제로 사용될 액체상태의 금속을 가열된 두 물체에 각각 바른 후 서로 포개어 결합한 후 상온까지 자연 냉각을 한다. 이 냉각과정 중에 서로 다른 접착물의 열팽창 계수의 차이로 인해 잔류응력과 뒤틀림 변형이 발생하게 되며 심할 경우 접착물에 크랙과 같은 불량이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력과 변형에 따른 크랙 방지를 위해 Fig. 3과 같이 적층판을 지지바 위에 올려놓고 상판 위에는 적절한 크기의 추 하중을 올려놓으면 이러한 현상을 감소시킬 수 있다. 이때 추 하중 크기나 지지바 높이에 따라 적층판 밑면이 바닥과 접촉하기도 한다.

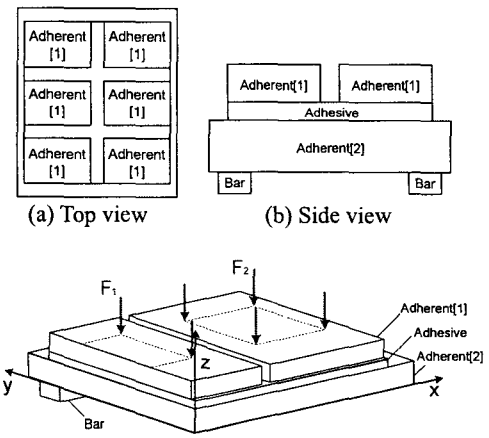


Fig. 1 Schematic illustration of a bonded assembly

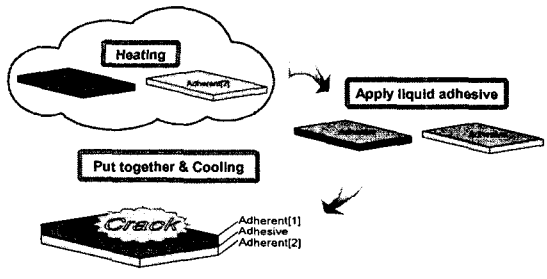


Fig. 2 Layered plates bonding process

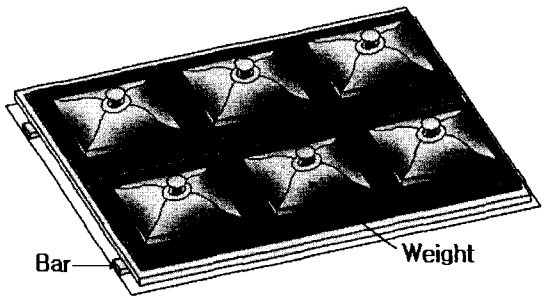


Fig. 3 Weight application, support bar to reduce defects

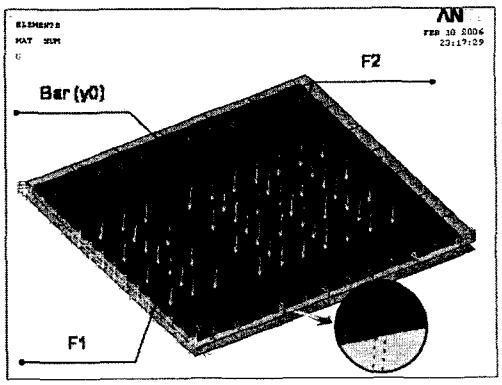


Fig. 4 Finite element model of the target assembly

그러나 이러한 추 하중과 지지바의 높이를 어느 정도로 하는 것이 불량을 최소화하는 것인지를 결정하는 것이 쉽지 않으며 현장에서 많은 시행착오가 발생할 수 있는 부분이다. 게다가 적층판의 두께나 크기, 상판의 배열 및 개수 등이 달라질 때마다 이들의 적정 크기는 변화하게 되는데 이때마다 실험을 통하여 이를 결정하는 것은 매우 비합리적이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 적층판의 냉각 결합공정을 시뮬레이션하는 코드를 개발하고 이를 통해 불량을 최소화하는 최적의 하중 크기와 지지바의 높이를 찾고자 한다.

2.2 유한요소 해석 및 결과

앞에서 언급한 바와 같이 적층판의 유한요소 모델은 상하좌우 대칭이므로 Fig. 4와 같이 전체 모델의1/4만을 표현하였다. 설계 변수는 가해지는 하중의 크기와 지지바의 높이를 선택하였고, 주변부에 가해지는 하중을 F2, 중앙부에 가해지는 하중을 F1, 지지바의 높이를 y0로 정하였다. 본 모델이 1/4모델이므로 Fig. 1(a)와 Fig. 3을 참조하면 F1은 원래의 추 하중의 1/2임을 알 수 있다. 또한 하중을 언제 제거하는 것이 좋을 지를 알기 위해 하중 제거 시점도 변수로 고려하였다.

Table 1 Material Property

	Adherent [1]	Adhesive	Adherent [2]
Thermal expansion coefficient (k^{-1})	$7.6*10^{-6}$	$32*10^{-6}$	$16*10^{-6}$
Young's modulus (GPa)	145	12.74	120
Poisson's ratio	0.24	0.45	0.34
Thermal conductivity (W/m.k)	0.12	81	388
Yield or Fracture stress (Mpa)	130	2	240

이 경우에 공정 마지막에 제거되는 것을 Process 1, 공정 초기에 제거되는 것을 Process 2라 하여 두 가지 중에 어느 것이 불량 감소에 유리한 지를 비교하였다. Table 1은 본 연구에서 고려하고 있는 적층판 구성요소의 물성치를 나타내는데 Adherent[1]이 상판을, [2]가 하판을 나타낸다. 보다시피 두 재료의 열팽창계수 차이가 2배가 넘음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서 원안의 그림은 접착물 상판의 간격과 접착제의 두께를 보여주기 위해 확대한 것인데, 적층판 구조물은 접착물 간의 간격이 매우 작고, 접착제의 두께가 매우 얇다. 그리고 접착제는 두 물질을 접착 하는 일뿐만 아니라 소성거동을 하면서 발생하는 응력에 대한 완충제 역할까지 한다. 본 연구에서 사용한 접착제의 소성거동은 겹선형 이동경화(bilinear Kinematic hardening) 영향을 고려하였다. 이러한 적층판 구조물의 물성치 및 특성을 기반으로 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 열에 의한 과도해석과 구조해석을 수행하였다. 해석결과로부터 세 가지의 반응치를 구하였는데 이들은 냉각 과정 중에 상판에 발생하는최대 순간응력(instantaneous maximum stress), 냉각이 종료된 후에 상판에 남은 최대 잔류응력(residual stress), 그리고 상판 중심점 수직변위(center displacement)이다. 상판의 재질이 취성재료이므로 응력은 주응력으로 계산하였다. Table 2 는 설계변수의 초기조건 값들을 나타낸 것이다. Fig. 5는 초기조건에 대한 해석결과를 나타낸다. 최종변형은 중앙이 약간 솟아오른 상태이고 최대 순간응력은 상판의 간격 부분에서 35 MPa이 발생하고 잔류 응력은 상판의 모서리부분에 약 23 MPa, 최대 변위는 중앙에 약 3.8 mm가 발생한다. 본 연구의 목표는 불량을 최소화 하기 위해 최대 순간응력과 변위가 허용치를 초과하지 않는 범위 내에서 잔류응력이 최소가 되는 최적의 조건을 찾는 것인데 허용치는 최대 순간응력이 130 MPa, 변위는 3 mm이다. 결과를 살펴보면 최대 순간응력은 허용치보다 작게 발생하므로 문제가 없지만 변위는 크랙의 위험이 있는 3 mm 제한 조건을 만족하지 못하고 있다. 그래서 본 연구에서는 제한조건을 만족하면서 잔류응력이 최소가 되는 최적의 조건을 찾기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 설계변수의

Table 2 Initial setup of the process parameters

	y0 (mm)	F1 (N)	F2 (N)	The choice
value	1	2000	4000	Process 1

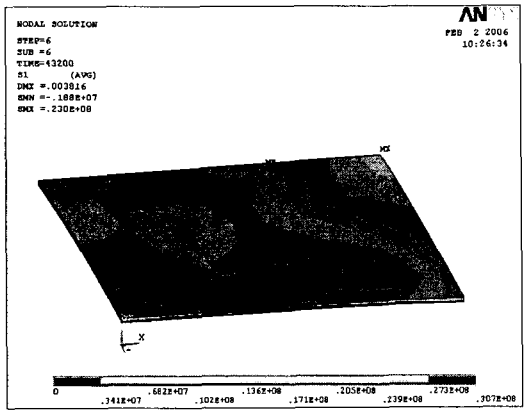


Fig. 5 Stress distribution of adherent[1] at the end of the process

불확정성을 고려한 강건최적설계를 수행하였다.

3. 적층판 결합공정의 신뢰성 분석

적층판 결합공정 시 환경적인 요인이나 오차와 같은 불확정성이 제품의 품질에 영향을 끼치므로 신뢰성 분석이 요구된다. 신뢰성 해석 방법에는 서론에서 언급한 MPP search 방법, 모멘트 방법과 시뮬레이션 방법이 있다. 그 중 몬테카를로 방법이 제약조건이 적고 정확도가 가장 높은 방법이기는 하지만 신뢰할 만한 수준의 정확도를 얻기 위해서는 많은 시행횟수의 계산에 따른 비경제적인 문제를 피할 수 없기 때문에 이 논문에서는 차원감소법을 이용하여 효율적인 신뢰성 분석을 하고자 한다.[5]

3.1 차원감소법(Dimension reduction method)

차원감소법(Dimension reduction method, DRM)은 기존의 다른 방법에 비해 효율성과 정확도, 그리고 단순함에 있어 여러 장점을 갖는다.[5] 먼저, 이 방법은 변수의 개수를 N개라고 했을 때, 2N+1번의 해석 시행횟수를 요구한다. 두 번째, 이 방법은 매우 정확한 값의 통계적 모멘트를 제공하며 심지어 3차의 외도(skewness)와 4차의 첨도(kurtosis)까지 구해준다. 세 번째, 이 방법은 경사(gradient)가 필요 없는 방법이다. 기본적으로 차원감소법은 정량적인 시스템의 불확정성을 갖는 N개의 입력변수를 아래의 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} E\left[G^m(\mathbf{X})\right] &= \iint\cdots\int G^m(x_1,x_2,...,x_N) f_X(x_1,x_2,...,x_N)dx_1dx_2\cdots dx_N \\ &= \iint\cdots\int Y(x_1,x_2,...,x_N) f_X(x_1,x_2,...,x_N)dx_1dx_2\cdots dx_N \\ &= E[Y(\mathbf{X})] \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 m은 계산시 모멘트의 차수를 나타내며, G는 시스템의 반응값으로, $Y=G^m$ 으로 나타낸다. 그리고 $(x_1,x_2,...,x_N)$ 은 임의의 입력 변수이다. 앞에서 언급한대로 차원감소법의 사용으로 불확정성을 갖는 정량적인 시스템의 계산 효율과 정확도를 눈에 띄게 향상 시킬 수 있다. 최소한의 오차로 이러한 점을 만족시킨다는 것이 다차원 적분(multi-dimensional integration)을 다중 1차 적분(multiple one-dimensional integrations)문제로 변환하는 주된 이유이다.

3.2 모멘트 계산을 기반으로 한 구적법(Moment-based quadrature rule)

다중 1차 적분 문제로의 변환을 위하여 실제 함수인 Y를 근사화한 additive decomposition, $\hat{Y}$ 를 사용한다. $\hat{Y}$ 는 식 (2)에서 보는 것과 같이 1차적 문제의 총 합이다. 어떤 임의의 시점에서의 한 입력 변수를 제외한 모든 다른 임의의 입력 변수들은 그들의 평균값을 갖고 있다.

$$\begin{aligned} Y(X_1,...,X_N) &\cong \hat{Y}(X_1,...,X_N) \\ &= \sum_{j=1}^{N} Y(\mu_1,...,\mu_{j-1},X_j,\mu_{j+1},...,\mu_n) - (N-1)Y(\mu_1,...,\mu_n) \end{aligned} \tag{2}$$

불확정성을 갖는 정량적인 시스템의 항은 식 (3)

$$(N-1)\cdot Y(\mu_1,\mu_2,...,\mu_n) = const. \tag{3}$$

이고, 식 (2) 의 첫 번째 항은 아래의 식 (4)와 같이 고려한다.

$$\begin{aligned} &E\left\{\left[\sum_{j=1}^{N} Y(\mu_1,...,\mu_{j-1},x_j,\mu_{j+1},...,\mu_N)\right]\right\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} Y(\mu_1,...,\mu_{j-1},x_j,\mu_{j+1},...,\mu_N)\cdot f_{X_j}(x_j)\cdot dx_j \end{aligned} \tag{4}$$

수치적 적분을 하기 위해 모멘트 기반 구적법(Quadrature Rule Based Moment)을 소개하겠다. 임의의 입력 변수에 대한 통계적 모멘트 법은 적분점과 적분 시 요구하는 가중치(weights)를 계산한다.

A moment-consistent integration rule에 따르면 선형적인 시스템은 아래의 식 (5)와 같이 구성할 수 있다.[5]

$$\begin{bmatrix} \mu_{j,n-1} & -\mu_{j,n-2} & \mu_{j,n-3} & \cdots & (-1)^{n-1}\mu_{j,0} \\ \mu_{j,n} & -\mu_{j,n-1} & \mu_{j,n-2} & \cdots & (-1)^{n-1}\mu_{j,1} \\ \mu_{j,n+1} & -\mu_{j,n} & \mu_{j,n-1} & \cdots & (-1)^{n-1}\mu_{j,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{j,2n-2} & -\mu_{j,2n-3} & \mu_{j,2n-4} & \cdots & (-1)^{n-1}\mu_{j,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{j,1} \\ r_{j,2} \\ r_{j,3} \\ \vdots \\ r_{j,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{j,n} \\ \mu_{j,n+1} \\ \mu_{j,n+2} \\ \vdots \\ \mu_{j,2n-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mu_{j,i}$ 는 j 번째 임의의 변수에 i 번째 줄의 모멘트를 나타낸다. 선형 시스템의 해는 적분점이 해가 되는 식 (6)인 비선형 식에 따르는 계수가 된다.

$$x_j^n - r_{j,1}x_j^{n-1} + r_{j,2}x_j^{n-2} - \cdots + (-1)^n r_{j,n} = 0 \quad (6)$$

적분점이 결정되면, 상응하는 가중치(weights)를 가지고 수치적분을 수행한다.

$$w_{j,i} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{k=1,k\neq i}^{n} (x_j - x_{j,k}) f_{x_j}(x_j) dx_j}{\prod_{k=1,k\neq i}^{n} (x_{j,i} - x_{j,k})} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \mu_{j,n-k-1} q_{j,ik}}{\prod_{k=1,k\neq i}^{n} (x_{j,i} - x_{j,k})} \quad (7)$$

$q_{j,i0} = 1$, and $q_{j,ik} = r_{j,k} - x_{j,i} q_{j,i(k-1)}$

여기서 w_{ji} 는 j 번째 임의의 입력변수에 대한 i 번째 적분점에서의 가중치(weight)를 나타낸다. k 는 적분점의 intermediate index 이고, $q_{j,i}$ 는 raw moment 에서 central moment 까지의 transformation tensor 이다. 식 (1)의 시스템 반응값의 불확정성은 식 (8)에서 보이는 것과 같이 다중 1 차 적분을 통해서 계산되어 진다.

$$\mathrm{E}\left[\sum_{j=1}^{N} G^m(\mu_1, \ldots, \mu_{j-1}, X_j, \mu_{j+1}, \ldots, \mu_N)\right] \cong \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} w_{j,i} G^m(\mu_1, \ldots, \mu_{j-1}, x_{j,i}, \mu_{j+1}, \ldots, \mu_N) \quad (8)$$

각 공정에서의 불확정성을 갖는 설계변수를 고려하여, 신뢰성 기반의 강건 최적설계를 하기 위해서는 위의 신뢰성 분석 과정이 요구된다.

3.3 MCS 와 DRM 과의 비교

차원감소법(DRM)이 실제 효율적으로 설계변수의 불확정성을 고려하여 반응의 산포를 예측할 수 있는지를 검증하기 위해 적층판 결합공정 시뮬레이션 모델에 Table 2와 같은 초기 셋업 조건을 이용하여 Process 1과 2에 대해 몬테카를로 방법과 DRM 을 각각 수행하여 비교하였다. Fig. 6은 초기 조건에 대한 DRM과 몬테카를로 방법의 비교 결과로 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

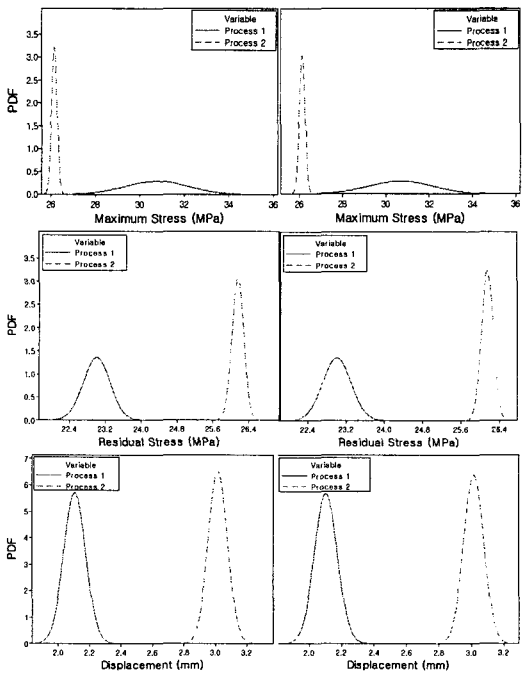


Fig. 6 PDF of responses (DRM / MCS)

Table 3 Comparison summary of DRM and MCS

Maximum Stress (Mpa)				
	Process 1		Process 2	
	Mean	St.dev	Mean	St.dev
DRM	30.724	1.434	26.157	0.131
MCS	30.69	1.387	26.151	0.123
Ratio	100.111	103.389	100.023	106.504
Residual Stress (Mpa)				
	Process 1		Process 2	
	Mean	St.dev	Mean	St.dev
DRM	23.016	0.294	26.157	0.131
MCS	23.009	0.295	26.151	0.123
Ratio	100.030	99.661	100.023	106.504
Displacement (mm)				
	Process 1		Process 2	
	Mean	St.dev	Mean	St.dev
DRM	3.84	0.07	5.207	0.058
MCS	3.838	0.072	5.206	0.059
Ratio	100.052	97.222	100.019	98.305

이 때 몬테카를로 방법은 1000번의 실행횟수로 평균과 편차를 예측한 반면에 차원감소법은 7번만으로도 비슷한 결과를 도출하여 차원감소법의 우수성을 확인할 수 있다. 게다가 더욱 중요한 점은 DRM은 고전적인 신뢰성 해석 기법들이 보여줄 수 없었던 산포의 특성을 PDF그래프를 통해 보여주어 결과 분석에 용이하다는 것이다. Fig. 6과 Table 3을 분석해 보면 최대응력의 경우 Process 2일 때 평균값이 Process 1보다 작고 산포도 작아서 Process 2가 좋다는 것을 볼 수 있다. 잔류응력에 대한 결과는 최대응력의 결과와는 달리 Process 2가 평균값이 더 크게 나왔다. 하지만 산포는 Process 1이 더 작음을 볼 수 있다. 그러므로 하중제거의 시점을 선택하기 쉽지 않았다. 마지막으로 변위의 경우 평균과 편차 모두 Process 1이 나은 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 Process 1이 2보다 낫지만 반응값들의 산포를 볼 때 적층판 결합 공정설계 시 설계변수의 불확정성을 고려한 최적화 설계가 필요하다.

4. 반응표면법을 이용한 강건 최적설계

4.1 적층판 결합 공정 강건 최적화의 공식화

신뢰성 기반의 망소특성을 이용한 강건 최적설계는 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

$$\text{Minimize} \quad \left(\frac{\mu_R}{\mu_{R0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{R0}}\right)^2$$
$$\text{Subject to} \quad G_1 = \mu_M + 3\sigma_M \le S_F \qquad (9)$$
$$G_2 = \mu_D + 3\sigma_D \le L_A$$

목적함수는 잔류응력의 평균과 편차를 최소화하는 것이고, 제한조건인 G_1은 순간 최대응력으로 130 MPa 보다 작아야 하고, G_2 는 중심점 변위로 3mm이내가 되어야 하며, 각각 3시그마를 더함으로써 불확정성을 고려하였다.

4.2 순차적 근사최적화 기법(Sequential Approximate Optimization, SAO)

일반적으로 최적설계의 결과를 얻기 위해 국소최적화 기법이나 전역최적화 기법을 이용할 경우 비선형성이 강한 문제에서는 적게는 수십 번에 많게는 수백 번까지의 해석횟수를 필요로 한다. 설계요구조건이 설계변수들의 명시적인 함수의 형태로 표현된 실용적인 방정식들이 존재할 경우에는 해석시간이 짧으므로 이러한 방법을 통해 수행하여도 단시간에 원하는 결과를 얻을 수 있다. 하지만 실제 제품 성능 해석결과를 얻기 위해 사용하는 CAE 프로그램(NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, ADAMS, FLUENT, STAR-CD 등)을 이용하여 해석을 수행하는 경우 해석시간이 길기 때문에 앞에서 언급한 방법을 사용할 경우 엄청나게 많은 시간이 요구된다. 그래서 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 순차적 근사최적화(SAO) 기법을 사용하고자 한다.[21]

근사화 방법으로는 기울기(gradient)값 없이 함수값만을 요구하는 방법 중에 가장 많이 쓰이는 반응표면법(RSM)을 사용하였다. 그리고 반응표면법은 불확정성을 고려하기 위해 각각의 설계점에 DRM을 적용하였다. 순차적 근사화의 단계는 다음과 같다.

Step 1. 실험계획법(Design Of Experiment, DOE)에 의하여 함수 계산을 수행할 설계점들을 선정한다.

Step 2. 선정된 각 설계점들에서 DRM 을 적용하여 원하는 반응값의 평균과 편차값을 구한다.

Step 3. 계산된 각 설계점에서의 평균과 편차값을 이용하여 근사함수 모델의 계수들을 최소자승법을 이용하여 구한다.

Step 4. 근사화된 식을 이용하여 각각의 제한조건을 만족하는 최적해를 구한다.

Step 5. 신뢰영역 알고리즘(trust region algorithm)을 이용하여 수렴조건을 만족하면 최적화를 종료하고, 그렇지 않으면 설계영역을 재조정하여 Step 1로 간다.

Table 2의 초기조건에 대한 프로세스 별 결과는 Table 4와 같고, 초기조건의 결과를 이용하여 SAO 알고리즘을 거쳐 나온 초기 최적해의 결과는 Table 5이다. 초기 최적해의 결과를 살펴보면, 초기조건에서 벗어났었던 Process 2의 변위 의 제한

Table 4 Result at Initial setup

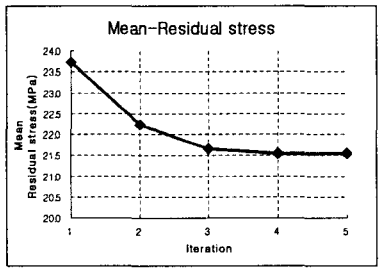
Response		Process 1			Process2		
		Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]
DRM ⓐ	mean	30.725	23.017	3.840	26.158	26.158	5.207
	St.dev	1.433	0.295	0.070	0.132	0.132	0.058
MCS ⓑ	mean	30.743	23.010	3.838	26.151	26.151	5.206
	St.dev	1.391	0.295	0.072	0.123	0.123	0.059
Ratio (ⓐ/ⓑ)*100	mean	99.941	100.030	100.037	100.024	100.024	100.020
	St.dev	102.997	99.893	96.257	106.849	106.849	97.700

Table 5 Result at Initial Optimum

Response		Process 1			Process2		
		Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]
Otimum by RSM ⓐ	mean	42.732	21.326	2.812	57.545	26.95	3.377
	St.dev	1.739	0.074	0.065	0.484	0.109	-0.008
Real optimum ⓑ	mean	42.514	22.086	2.771	64.9106	27.595	2.8708
	St.dev	1.378	0.312	0.063	1.1403	0.234	0.0442
Ratio (ⓐ/ⓑ)*100	mean	100.513	96.559	101.480	88.653	97.663	117.633
	St.dev	126.197	23.718	103.175	42.445	46.581	18.100

Table 6 Result at Final Optimum

Response		Process 1			Process2		
		Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp. [mm]
Otimum by RSM ⓐ	mean	44.493	21.42	2.7135	61.496	26.806	2.8717
	St.dev	0.97174	0.07	0.05392	1.14	0.23547	0.04488
Real optimum ⓑ	mean	44.5061	21.4243	2.7133	61.495	26.8094	2.8718
	St.dev	0.9671	0.0736	0.054	1.1405	0.2355	0.0449
Ratio (ⓐ/ⓑ)*100	mean	99.971	99.980	100.007	100.002	99.987	99.997
	St.dev	100.480	95.109	99.852	99.956	99.987	99.955



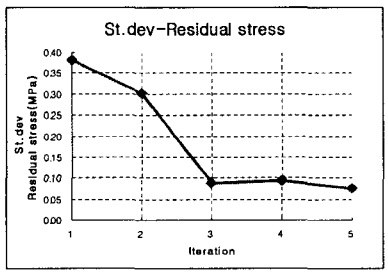


Fig. 7 History of objective value

조건을 만족하는 등 초기값에 비해서는 개선된 결과를 보여주고는 있지만 실제 값과 비교해 볼 때 근사화에 따른 오차가 있고 특히 편차의 오차가 심한 것을 볼 수 있다. 이러한 오차정보를 바탕으로 순차적 근사화 기법을 통해 설계영역을 재조정하며 앞의 SAO 알고리즘에 따른 과정을 반복하였다. Fig. 7은 SAO 알고리즘의 반복과정을 거치며 목적함수의 평균과 편차가 수렴해 가는 것을 보여준다.

Table 7 Setup of the process parameters

value	y0 (mm)	F1 (N)	F2 (N)
Initial	1	2000	4000
Final	2.557	3450.907	5244.483

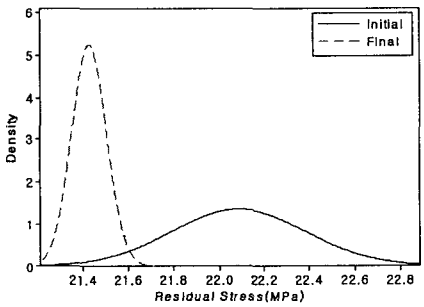


Fig. 8 PDF of Initial Opt. & Final Opt.

최종적으로 최적해를 얻어낸 결과는 Table 6과 같다. 초기 최적해의 결과와 비교했을 때 눈에 띄게 평균과 편차의 오차가 줄어들었음을 볼 수 있다. 게다가 우리가 목적함수로 설정한 잔류응력 또한 감소한 것을 볼 수 있다. 전체적인 결과를 분석해 볼 때 Process 1이 Process 2보다는 우수한 결과를 보이고 있다. Process 1의 초기 최적해와 최종 최적해의 결과를 두 결과 모두 Normal 분포라고 가정하고 목적함수인 잔류응력의 PDF그래프를 그려보면 Fig. 8과 같다. 초기 최적해에 비해 평균과 편차가 동시에 감소한 것을 한눈에 확인할 수 있다. 그에 따른 설계변수들은 초기의 조건에 비해 Table 7 에서 보는 것과 같이 모두 증가해야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

적층판 결합공정의 문제점을 해결하기 위하여 매개변수 연구가 가능한 시뮬레이션 코드를 상용코드인 ANSYS를 이용하여 개발하였다.

공정상의 설계변수의 불확정성을 고려하기 위하여 반응값의 통계적 모멘트 값을 계산해주는 차원감소법을 통해 반응값들의 통계적 거동을 쉽게 계산할 수 있었다.

결과적으로 추 하중을 나중에 제거하는 Process 1이 2보다 나은 것을 확인할 수 있었고 차원감소법을 적용한 순차적 근사화 기법을 통하여 초기 결과에 비해 목적함수로 설정하였던 잔류응력의 평균과 편차가 동시에 감소하는 것을 볼 수 있었

다. 이 연구의 결과는 설계자들이 중요시하는 목적함수 또는 제약조건에 상응하는 최적설계 값을 선택하는 데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Basaran, C. and Zhao, Y., 2001, "Mesh Sensitivity and FEA for Multi-Layered Electronic Packaging," *Trans. ASME, J. Electron. Packag.* Vol. 123 (3), pp. 218~224.

(2) Suhir, E., 1989, "Interfacial Stresses in Bimetal Thermostats," *ASME J. Appl.* Mech., Vol. 56, pp. 595~600.

(3) Suhir, E. and Weld, J.D., 1998, "Application of a `Surrogate' Layer for Lower Bending Stress in a Vulnerable Material of a Tri-Material Body," *Microelectronics Reliability*, Vol. 38, pp. 1949~1954.

(4) Suhir, E., 2001, "Predicted Thermal Stresses in a Bimaterial Assembly Adhesively Bonded at the Ends," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89(1), pp. 120~129.

(5) Rahman, S. and Xu, H., 2004, "A Univariate Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19, pp. 393~408.

(6) Park, G. J., Lee, T. H., Lee, K. H. and Hwang, K. H., 2004, "A review of Robust Design Methodologies," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 9, pp. 1368~1383.

(7) Chen, D., Cheng, S. and Gerhardt, T. D., 1982, "Thermal Stresses in Laminated Beams," *J. Thermal Stresses*, Vol. 5, pp.67~84.

(8) Jiang, Z. Q., Huang, Y. and Chandra, A., 1997, "Thermal Stresses in Layered Electronic Assemblies," *J. Electron. Pack.*, Vol. 119, pp. 127~133.

(9) Glaser, J. C., 1989, "Thermal Stresses in Compliantly-Joined Materials," *ASME Winter Annual Meeting*, Paper No. 89-WA/EEP-14, San Francisco, CA, December.

(10) Shih, C. F. and Asaro, R. J., 1988, "Elasto-Plastic Analysis of Cracks on Bi-Material Interfaces: Part I—Small Scale Yielding," *ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 55, pp. 299~316.

(11) Shih, C. F. and Asaro, R. J., 1989, "Elasto-Plastic Analysis of Cracks on Bi-Material Interfaces: Part II—Structure of a Small-Scale Yielding Fields," *ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 56, pp. 763~779.

(12) Plotner, M., Donat, B. and Benke, A., 1991, "Deformation Properties of Indium-Based Solders at 294 and 77 K," *Cryogenics*, Vol. 31(3) , pp. 159~162.

(13) ANSYS Release 9.0 Documentation, SAS IP, Inc., 2004.

(14) Youn, B. D., Choi, K. K. and Du, L., 2005, "Performance Moment Integration (PMI) Method for Quality Assessment in Reliability-Based Robust Design Optimization," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 33, pp. 185~213.

(15) Varghese, P., Braswell, R.N., Wang, B. and Zhang, C., 1996, "Statistical Tolerance Analysis Using FRPDF and Numerical Convolution," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 723~732.

(16) Lin, C. Y., Huang, W. H., Jeng, M. C. and Doong, J. L., 1997, "Study of an Assembly Tolerance Allocation Model Based on Monte Carlo Simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 70, pp. 9~16.

(17) McAllister, C. D. and Simpson, T. W., 2003, "Multidiscip Linary Robust Design Optimization of an Internal Combustion Engine," Vol. 125, No. 2, pp. 124~130.

(18) Jung, D. H. and Lee, B. C., 2002, "Development of a Simple and Efficient Method for Robust Optimization," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 53, pp. 2201~2215.

(19) Wu, Y.-T. and Wirsching, P. H., 1987, "New Algorithm for Structural Reliability Estimation," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1319~1336.

(20) Liu, P. L. and Kiureghian, A. D., 1991. "Optimization Algorithms for Structural Reliability Analysis," *Computers & Structures*, Vol. 52, No. 1, pp. 103~111.

(21) Lee, Y. B., Lee, H. J., Kim, M., S., and Choi, D., H., 2005, "Sequential Approximate Optimization Based on a Pure Quadratic Response Surface Method with Noise Filtering," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 6, pp. 842~851.