

## 적층판 결합공정의 불확정성을 고려한 강건최적설계

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

최주호\* · 이우혁\*\* · 윤병동\*\*\* · Zhimin Xi\*\*\*\*

Choi, Joo-Ho · Lee, Woo-Hyuk · Youn, Byeng-Dong · Zhimin Xi

#### ABSTRACT

Design optimization of layered plates bonding process is conducted to achieve high product quality by considering uncertainties in a manufacturing process. During the cooling process of the sequential sub-processes, different thermal expansion coefficients lead to residual stress and displacement, thus resulting in defects on the surface of the adherent. So, robust process optimization is performed to minimize the residual stress mean and variation of the assembly while constraining the distortion as well as the instantaneous maximum stress to the allowable limits. In robust process optimization, the dimension reduction (DR) method is employed to quantify both reliability and quality of the layered plate bonding. Using this method, the average and standard deviation is estimated. Response surface is constructed using the statistical data obtained by the DRM for robust objectives and constraints, from which the optimum solution is obtained.

*Keywords:* Robust design, Dimension Reduction Method, Response surface analysis

#### 1. 서론

보통 제품의 품질은 설계시의 의도와 달리 성능 변동을 갖는다. 그러한 이유는 공정시의 오차와 환경에 대한 영향등 어떤 요인이 공정에 영향을 미치기 때문이다. 이러한 요인을 잡음인자라 하고 강건설계는 이러한 잡음인자에 영향을 덜 받도록 설계하는 것을 말한다.(한형석과 박태원,1996) 즉, 파라미터들의 불확실성을 시스템의 설계에 반영하여 제품 품질의 산포를 줄임으로서 좀 더 신뢰도를 가질 수 있는 설계를 하는 것이다.(허재성과 광병만,2005) 적층판 결합공정에서도 잡음인자에 의해 결과값이 많은 영향을 받는다. 그래서 적층판 결합공정 최적설계시 제품의 품질을 높이기 위해서는 성능변동을 고려해야 한다. 그러기 위해 가장 좋은 방법은 몬테카를로 시뮬레이션을 구현하는 것이 나 만족할만한 정확도를 얻기 위해서는 시행횟수를 크게 잡아야 하므로 경제성이 떨어진다는 단점이 있다. 그래서 본 논문에서는 차원감소법(Dimension Reduction

\* 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수 E-mail: jhchoi@hau.ac.kr

\*\* 학생회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 석사과정 E-mail: lwh7803@hanmail.net

\*\*\* Michigan Technological University 기계공학과 교수 E-mail: bdyoun@mtu.edu

\*\*\*\* MichiganTechnologicalUniversity 기계공학과 박사과정 E-mail: zxi@mtu.edu

Method, DRM)이란 새로운 방법을 사용한다.(Rahman, S.와 Xu, H.,2004) 이것은 적은 횟수로 몬테카를로 시뮬레이션과 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 차원감소법을 이용하여 평균과 표준편차를 구하고 설계 변수, 잡음 인자들과 성능 사이의 관계를 추정하기 위해 반응표면 분석법을 사용한다. 이렇게 추정된 식을 최적화 하기 위해 망소특성을 이용하여 강건설계 문제를 정의 한다. 그러면 일반적인 최적설계 알고리즘을 이용하여 최적해를 찾을 수 있다.

## 2. 적층판 결합공정의 강건한 최적화

### 2.1.적층판 결합공정의 개요

그림 1은 적층판을 나타내고 대칭이므로 1/4모델로 표현하였다. 보이는 바와 같이 적층판은 서로 다른 3가지 금속으로 이루어져 있고, 한변이 100mm에서 크기는 1000mm를 갖는 사각형 모양이고 높이는 10mm정도로 상대적으로 매우 얇다.

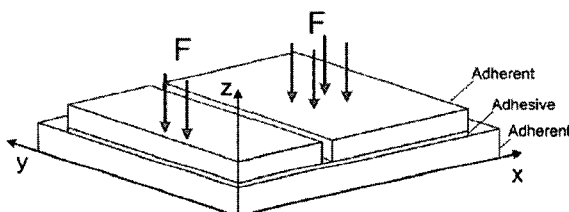


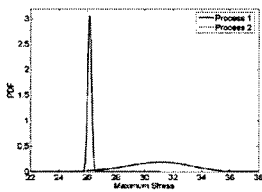
그림 1 적층판의 기하학적 모델

적층판 결합공정을 살펴 보면 먼저 접착될 두 물체를 각각 가열을 한다. 그리고 접착제로 사용될 액체상태인 금속을 가열된 두 물체에 각각 바른 후 서로 포개어 결합한다. 그리고 난 후 상온까지 자연 냉각을 한다. 냉각 공정시 접착물의 열팽창 계수의 차이 또는 잘못된 셋업 조건으로 인해 잔류응력과 변형이 발생하고 심하면 접착물에 Crack과 같은 결함을 야기한다. 이러한 문제를 최소화 하기 위해서 냉각시 인위적으로 적층판에 하중을 가하고 냉각공정의 초기 또는 마지막에 하중을 제거 하였다. 이때 가해지는 하중은 그림 1에 나타난 것처럼 주변에 가해지는 하중을 기준으로 중앙에 다양한 비율로 힘을 가하였다. 또 그림에 나타내지는 않았지만 적층판 아래에 얇은 지지바가 놓여 있는데 가해지는 하중에 의해 적층판 밑면과 바닥사이에 접촉이 일어난다. 본 연구에서는 유한요소 모델을 이용하여 열에 의한 과도해석과 구조해석을 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 설계 변수로는 공정성능(발생응력, 변형)에 많은 영향을 끼치는 것으로 조사된, 가해지는 하중과 지지바의 높이를 선택하였다. 그리고 주변부에 가해지는 하중을  $x_1$ , 주변부와 중앙부에 가해지는 힘의 비율을  $x_2$ , 지지바의 높이를  $x_3$ 로 정하였다. 목적함수는 잔류응력이 최소가 되는 것이고 공정중에 발생하는 최대응력이 허용응력 보다 작고 동시에 측정점에서의 변형된 높이, 즉 변위를 한계치 이내로 만족시키는 제한조건하에 강건 최적설계를 수행한다.

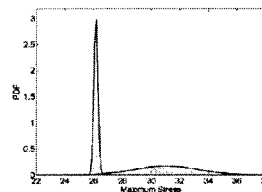
### 2.2. 불확정성을 고려한 DRM과 MCS비교

본 연구에서는 보다 효과적인 강건최적설계를 위해서 차원감소방법(DRM)을 사용하였다. 차원감소법의 장점은 초기조건, 즉 입력값이 불확실하면 출력되는 값도 역시 불확실한데 이때 출력되는 값들의 평균과 편차

를 적은 실험 횟수로도 구할 수 있다는 것이다. 예는 다음과 같다. 초기조건이  $x_1 = 4000N$ ,  $x_2 = 0.5$ ,  $x_3 = 1mm$ 이라고 할 때 초기조건 셋업값의 10%를 표준 편차로 가정하였다. 그리고 표준편차를 고려한 초기조건으로 차원감소법을 이용하여 초기조건을 포함한 적분점을 7개를 구하였다. 그리고 이점들을 가지고 해석을 수행하여 결과 값인 최대응력 잔류응력 변위등을 구하고 다시 차원 감소법을 이용하여 평균과 표준편차를 구할 수 있다. 이것에 대한 자세한 내용은 참고 문헌(Rahman, S.와 Xu, H.,2004)을 참조하기 바란다. 앞에서 언급한 초기조건을 가지고 차원감소법과 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 최대응력, 잔류응력, 변위의 평균과 표준편차를 각각 계산한 것을 아래에 그림과 표로 나타내었다. 몬테카를로 시뮬레이션은 샘플 100개를 가지고 수행하였다. 그리고 Process는 가해진 힘을 제거하는 시점을 각각 달리하여 수행한 것으로 Process 1은 공정의 마지막에서 힘을 제거한 결과 이고 Process 2는 힘을 가한 직후 바로 제거한 것을 의미한다.



(a) DRM에 의한 최대응력의 확률분포



(b) MCS에 의한 최대응력의 확률분포

그림 1 DRM 과 MCS에 의한 최대응력의 확률분포

표 1 최대응력의 평균과 편차

|           | Process 1 |        | Process 2 |        |
|-----------|-----------|--------|-----------|--------|
|           | DRM       | MCS    | DRM       | MCS    |
| Mean      | 30.960    | 31.051 | 26.158    | 26.170 |
| Deviation | 2.204     | 2.350  | 0.130     | 0.130  |
| Skewness  | -0.273    |        | 0.018     |        |
| Kurtosis  | 2.164     |        | 2.497     |        |

그림 1과 표1은 공정중 최대응력에 대한 결과이다. 확률분포를 보면 거의 같은 것을 볼 수 있다. 그리고 초기에 힘을 제거할 때 최대응력의 평균값이 마지막에 제거할 때 보다 작고 산포도 작아서 초기에 힘을 제거하는 것이 더 좋다는 것을 볼 수 있다. 그리고 이것은 표 1에서 수치적으로 확인할 수 있다.

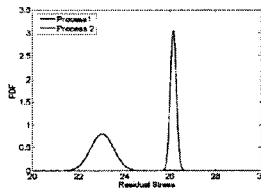


그림 2 DRM에 의한 잔류응력의 확률분포

표 2 잔류응력의 평균과 편차

|           | Process 1 |        | Process 2 |        |
|-----------|-----------|--------|-----------|--------|
|           | DRM       | MCS    | DRM       | MCS    |
| Mean      | 23.024    | 22.951 | 26.158    | 26.170 |
| Deviation | 0.497     | 0.508  | 0.130     | 0.130  |
| Skewness  | 0.097     |        | 0.018     |        |
| Kurtosis  | 1.831     |        | 2.497     |        |

그림 2는 차원감소방법에 의한 잔류응력의 확률분포를 나타낸 것이고 표 2는 차원감소법과 몬테카를로를 이용한 잔류응력의 평균과 편차를 비교한 것이다. 잔류응력에 대한 결과는 최대응력의 결과와는 달리 초기에 힘을 제거하는 것이 잔류응력의 평균값이 더 크게 나왔다. 하지만 산포는 여전히 하중을 초기에 제거하는 것이 더 작음을 볼 수 있다. 이것으로 미루어 보아 하중을 초기에 제거하는 것이 좋은지, 마지막에 제거하는 것이 좋은지 선불리 판단 할 수 없다.

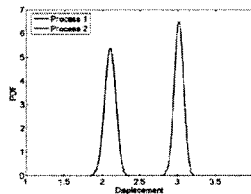


그림 3 DRM에 의한 변위의 확률분포

표 3 변위의 평균과 편차

|           | Process 1 |       | Process 2 |       |
|-----------|-----------|-------|-----------|-------|
|           | DRM       | MCS   | DRM       | MCS   |
| Mean      | 2.103     | 2.110 | 3.018     | 3.019 |
| Deviation | 0.074     | 0.078 | 0.061     | 0.064 |
| Skewness  | 0.075     |       | 0.002     |       |
| Kurtosis  | 2.040     |       | 2.992     |       |

그림 3은 차원감소법에 의한 변위의 확률분포를 나타낸 것이고 표 3은 차원감소법과 몬테카를로에 의한 변위의 평균과 편차를 나타낸 것이다. 이때 변위에 대한 산포는 비슷하나 힘을 마지막에 제거하는 것이 변위가 더 작으므로 힘을 마지막에 제거하는 것이 좋다.

위의 결과들을 토대로 차원감소법의 결과와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과에는 차이가 없음을 확인 할 수 있었다. 이것은 차원감소법의 우수성을 잘 보여주는 예이다. 그러므로 본 논문에서는 차원감소법을 사용하기로 한다. 그리고 본 논문의 목적은 적층판 공정시 발생하는 최대응력과 변위를 줄이고 잔류응력을 최소화 하는데 있다. 하지만 강건성을 고려한 위의 결과를 보면 최대응력은 초기에 힘을 제거하는 경우, 응력의 평균값이 더 작고 산포도 작으나 잔류응력은 마지막에 힘을 제거하는 것이 평균값이 더 작다. 하지만 산포는 초기에 제거 하는 것이 더 좋다. 그리고 변위는 산포는 비슷하나 힘을 마지막에 제거하는 것이 더 작으므로 더 좋다. 이와 같은 상황은 현장에서 판단해야 할 문제이나 이런 다양한 조건을 잘 고려하기 위해 최적화 기법이 필요하다.

### 3. 반응표면법을 이용한 적층판의 강건최적설계

#### 3.1. 반응표면 추정

변수와 성능의 관계를 추정하기 위해 반응표면을 수행한다. 설계변수는  $x_1, x_2, x_3$ 이고, 범위는 식(1)과 같다. 수준은 3수준으로 상한과 하한 중앙값을 사용한다.

$$\begin{aligned}
 2000 \leq x_1 \leq 10000 & \quad (1) \\
 0.2 \leq x_2 \leq 1.0 & \\
 1 \leq x_3 \leq 5 &
 \end{aligned}$$

반응점을 생성하기 위해서는  $3^3$ 요인배치법(Full-factorial design)을 이용하였고 이로 인해 27개의 반응점

식(6)은 목적함수로서 공정이 끝난 후의 잔류응력을 최소화하는 것을 나타낸다. 식(7)은 제한 조건으로 공정중에 발생하는 최대응력이 허용응력을 넘어서는 안되며, 변위도 허용변위보다 작아야 한다는 것을 표현한 것이다. 여기서 허용응력  $S_y = 130 \text{ Mpa}$ , 허용변위  $L_A = 3 \text{ mm}$  로 가정하였다. 그리고 위의 (2)식과 (3)식을 이용하여 구한  $\mu_M, \mu_R, \mu_D, \sigma_M, \sigma_R, \sigma_D$ 에 대한 회귀 방정식을 (6)식과 (7)식에 대입한다. 이 때 강건한 최적화를 위해 각각의 평균과 편차의 정확한 평가가 요구 된다. 마지막으로 Visual DOC를 이용하여 최적해를 구하였다. 최적화 알고리즘으로는 Sequential Quadratic 프로그램을 사용하였다. 그 결과는 아래 표 와 같다.

표 4 Visual DOC를 이용한 최적해

|    | process 1 |           |          | process 2 |           |          |
|----|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
|    | x1        | x2        | x3       | x1        | x2        | x3       |
| 평균 | 5988.903  | 0.9707034 | 2.527201 | 5380.657  | 0.3942824 | 2.153485 |
| 편차 | 4.3489    | 0.394     | 0.0144   | 1.371     | -0.0019   | 0.047    |

#### 4. 결론

본 연구에서는 적층판 결합공정의 불확정성을 고려하기 위하여 차원감소법을 사용하였다. 그리고 반응표면법을 사용하여 회귀식을 구하였고 추정된 회귀식을 망소특성을 이용하여 강건설계문제로 정식화 하였다. 그리고 최적설계 알고리즘을 이용하여 최적해를 구하였다. 이렇게 얻은 최적설계를 이용하여 적층판의 성능 변동을 예측할 수 있게 되었다. 이 방법의 장점은 일반적인 최적설계 알고리즘을 사용해서도 강건설계를 할 수 있다는 것과 적은 실험수에 의해 경제적 시간적 낭비를 줄일 수 있다. 아직 이 최적설계에 대한 검증이 이루어지지 않아서 향후과제로 남아있다.

#### 참고문헌

박성현 (2003) 현대실험계획법, 민영사 서울  
 허재성, 광병만 (2004) 반응표면을 활용한 통계적 모멘트 추정 방법과 신뢰도 해석에 적용, 대한기계학회  
 한형석, 박태원 (1996) 반응표면 분석법을 이용한 기구의 강건설계  
 Suhir, E., 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.  
 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.  
 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.  
 Youn, B.D., Choi, K.K., 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.