

생산공정의 불확실성을 고려한 적층판 결합공정의 최적설계

최주호*, 이우혁*, 박정진*

*한국항공대학교 시스템 최적설계 실험실

초록

디스플레이 산업에 이용되는 적층판(layered plates)의 결합공정 중 냉각공정에서 열팽창계수의 차이로 인해 잔류응력이 발생하고 심하면 적층판에 크랙(crack)이 발생한다. 본 연구에서는 적층판의 결합공정을 대상으로 현상을 분석하고 이 과정을 시뮬레이션하는 해석 프로그램을 개발하였다. 또한 이를 토대로 향후의 새로운 제품에 대해서도 크랙과 같은 문제점을 최소화 할 수 있는 신뢰성 있는 공정 셋업을 제시하기 위해 차원감소법(dimension reduction method)과 근사화 방법인 반응표면법(response surface method), 순차적 근사최적화 기법(Sequential Approximate Optimization, SAO)을 이용하여 신뢰성기반의 강건최적설계를 하였다.

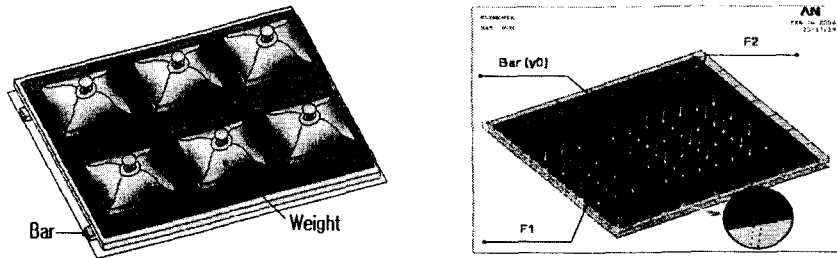
1. 서론

극소전자공학(microelectronics)의 패키지나 디스플레이 장치 제조공정 중에는 다양한 적층판 즉, 얇은 판을 적층하여 만든 모듈이 제조되고 조립과정의 하나로 사용되고 있는데 예를 들면 power electronic building blocks 이나 transistor stacks, 스퍼터링 타겟 등이 있다[1]. 이런 적층판이 제조 될 때 적층판의 구성물질들은 특히 냉각공정에서 현저한 온도변화를 겪는데 이러한 온도변화는 적층판의 구성물질 간의 접착력을 약하게 하거나 적층 구조물에 크랙 등을 야기한다[1-4]. 게다가 적층판의 물성과 제조공정 시의 오차, 여러 환경적인 요인으로 인하여 설계시의 의도와는 달리 제품 품질에 많은 영향을 끼치고 이것이 심각한 품질문제와 고객불신을 야기하고 있다. 이러한 예기치 않은 파손을 방지하기 위해서는 이러한 잡음인자에 의한 영향을 덜 받도록 설계하는 강건설계가 필요하다.

2. 적층판 결합공정의 해석

적층판은 Fig. 1 의 (a)와 같이 한 변이 100 mm 에서 크기는 1000 mm 를 갖는 사각형 모양에 높이는 10 mm 정도로 상대적으로 매우 얇고, 단일 판인 하판과 6 개의 조각으로 나뉘어진 상판이 각각 가열된 상태에서 접착제로 접착 되어진다. 그리고 난 후 상온까지 자연냉각을 하는데 이 냉각과정 중에 서로 다른 접착물의 열팽창 계수의 차이로 인해 잔류응력과 뒤틀림 변형이 발생하게 되며 심할 경우 접착물에 크랙과 같은 불량 발생하게 된다. 이러한 잔류응력과 변형에 따른 크랙 방지를 위해 생산 현장에서는 Fig. 1(a)와 같이 적층판을 지지바 위에 올려

놓고 상판 위에는 적절한 크기의 추하중을 올려 놓고 있는데 이러한 추 하중과 지지바의 높이를 어느 정도로 하는 것이 불량률 최소화하는 것인지를 결정하는 것이 쉽지 않으며 많은 시행착오가 발생할 수 있는 부분이다. 게다가 적층판의 두께나 크기, 상판의 배열 및 개수 등이 달라질 때마다 이들의 적정 크기는 변화하게 되는데 이때 마다 실험을 통하여 이를 결정하는 것은 매우 비합리적이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 적층판의 결합공정을 시뮬레이션하는 코드를 개발하고 이를 통해 불량률 최소화하는 최적의 하중 크기와 지지바의 높이를 찾고자 한다.



(a) Illustration of a bonded assembly (b) Finite element model

Fig. 1 Layered plates

적층판의 유한요소 모델은 상하좌우 대칭이므로 Fig. 1 의 (b)와 같이 전체 모델의 1/4 만을 표현하였다. 설계 변수는 가해지는 하중의 크기와 지지바의 높이를 선택하였고, 주변부에 가해지는 하중을 F2, 중앙부에 가해지는 하중을 F1, 지지바의 높이를 y_0 로 정하였다. 또한 하중을 언제 제거하는 것이 좋을 지를 알기 위해 하중 제거시점도 변수로 고려하였다. 이 경우에는 공정 마지막에 하중이 제거되는 것을 Process 1, 공정 초기에 제거되는 것을 Process 2 라 하여 두 가지 중에 어느 것이 불량 감소에 유리한 지를 비교하였다. 또한 추하중 크기나 지지바 높이에 따라 적층판 밑면이 바닥과 접촉하는 것과 접착제의 소성거동도 고려하였다.

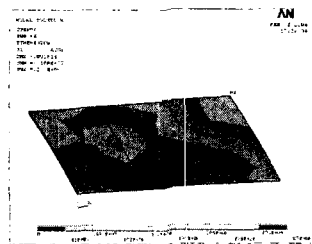


Fig. 2 Stress distribution of adherent at Process 1

Fig. 2 는 Process 1 의 조건하에 F1 은 2000 N, F2 는 4000 N, y_0 는 1 mm 인 적층판의 실제조건에서의 해석결과이다. 최종변형은 중앙이 약간 솟아오른 상태이고 최대 순간응력은 상판의 간격 부분에서 35 MPa 이 발생하고 잔류 응력은 상판의 모서리부분에 약 23 MPa, 최대 변위는 중앙에 약 5 mm 가 발생한다. 본 연구의 목표는 불량률 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 mm 이다. 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 불확정성을 고려한 강건최적설계를 수행하였다.

3. 불확정성을 고려한 강건 최적설계

신뢰성 해석 방법에는 MPP search 방법, 모멘트 방법과 시뮬레이션 방법이 있다[5,6]. 그 중 몬테카를로 방법이 제약조건이 적고 정확도가 가장 높은 방법이지만 신뢰할 만한 수준의 정확도를 얻기 위해서는 많은 시행횟수의 계산에 따른 비경제적인 문제를 피할 수 없기 때문에 이 논문에서는 차원감소법[3]을 이용하고자 한다. 차원감소법은 결합공정의 성능함수의 정량적인 불확실성을 제공해줌으로써 기존의 방법에 비해 효율적이고 정확한 최적화를 수행할 수 있도록 도와주고 이를 검증하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하였다.

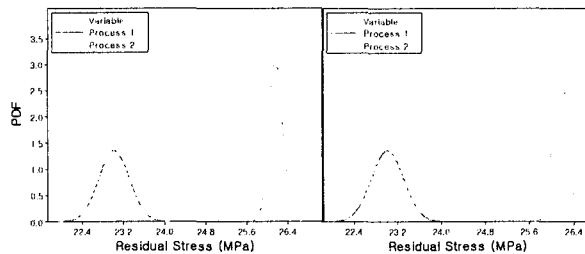


Fig. 3 PDF of Responses (DRM / MCS)

Fig 3 은 초기조건하에서 잔류응력에 대한 각 Process 별 DRM 과 몬테카를로 방법의 비교 결과로 DRM 이 몬테카를로에 비해 훨씬 적은 수의 해석횟수를 수행했음에도 불구하고 결과는 거의 유사한 것을 확인 할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 망소특성을 이용하여 문제를 정식화 하였고, DRM 과 반응표면법을 이용하여 강건 최적설계를 수행했으며 최적설계기법으로는 순차적 근사최적화 기법을 이용하였다[4]. 순차적 근사화의 단계는 다음과 같다. (1) 실험계획법에 의한 함수 계산을 위한 설계점을 선정한다. (2) 선정된 각 설계점들에서 DRM 을 적용하여 원하는 반응값의 평균과 편차값을 구한다. (3) 계산된 각 설계점에서의 평균과 편차값을 이용하여 근사함수 모델의 계수들을 최소자승법을 이용하여 구한다. (4) 근사화된 식을 이용하여 각각의 제한조건을 만족하는 최적해를 구한다. (5) 신뢰영역 알고리즘(trust region algorithm)을 이용하여 수렴조건을 만족하면 최적화를 종료하고, 그렇지 않으면 설계영역을 재조정하여 Step 1 로 간다.

Response	Process 1			Process 2			
	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp [mm]	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp [mm]	
Optimum 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 (σ/μ)×100	mean	100.513	96.559	101.480	88.653	97.663	117.653
	St dev	126.197	23.718	103.175	42.445	46.581	16.100

Table 1. Result at initial optimum

Response	Process 1			Process 2			
	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp [mm]	Maximum stress [MPa]	Residual stress [MPa]	Center disp [mm]	
Optimum 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	44.5081	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 (σ/μ)×100	mean	99.971	99.980	100.007	100.002	99.987	99.897
	St dev	100.450	95.109	99.852	99.956	99.987	99.955

Table 2. Result at final optimum

초기조건 결과를 이용하여 SAO 알고리즘을 거쳐 나온 초기 최적해의 결과는 Table 1.이고 초기조건에서 벗어났었던 Process 2의 변위의 제한조건도 만족하는 등 초기값에 비해서는 개선된 결과를 보여 주고는 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 과정을 반복하여 최종적으로 최적해를 얻어낸 결과는 Table 2.와 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.

4. 결론

적층판 결합공정의 문제점을 해결하기 위하여 매개변수 연구가 가능한 시뮬레이션 코드를 상용코드인 ANSYS 를 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 1 이 2 보다 나은 것을 확인할 수 있었고 차원감소법을 적용한 순차적 근사화 기법을 통하여 초기 결과에 비해 목적함수로 설정하였던 잔류응력의 평균과 편차가 동시에 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이 연구의 결과는 설계자들이 중요시하는 목적함수 또는 제약조건에 상응하는 최적설계 값을 선택하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Basaran, C., Zhao, Y., "Mesh Sensitivity and FEA for Multi-Layered Electronic Packaging." Trans. ASME, J. Electron. Packag. Vol. 123 (3), pp. 218-224, 2001.
- [2] Suhir, E., "Interfacial stresses in bimetal thermostats." ASME J. Appl. Mech., Vol. 56, pp. 595-600, 1989.
- [3] Rahman, S. and Xu, H., "A Univariate Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics." Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 19, 2004, pp. 393-408.
- [4] Lee, Y. B., Lee, H. J., Kim, M., S., and Choi, D., H.. "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.,2005
- [5] Liu, P.L. and Kiureghian, A.D., "Optimization Algorithms for Structural Reliability Analysis." Computers & Structures, Vol. 52, No. 1, pp. 103-111, 1991
- [6] Wu, Y.-T., and Wirsching, P.H., "New Algorithm for Structural Reliability Estimation." Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 9, pp. 1319-1336, 1987