

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.5.421>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

모달 파라미터 정보를 활용한 PCB 물성 예측에 관한 연구[§]

추정환^{*†}, 정현범^{**}, 홍상렬^{***}, 김용갑^{*}, 김재산^{*}

* (주)만도 선형센터, ** (주)만도 시험평가센터, *** 한국 알테어

A Study on the Prediction of the Mechanical Properties of Printed Circuit Boards Using Modal Parameters

Jeong Hwan Choo^{*†}, Hyun Bum Jung^{**}, Sang Ryel Hong^{***}, Yong Kap Kim^{*} and Jae San Kim^{*}

* Advanced Center, Mando Corp.,

** Reliability & Validation Center, Mando Corp.,

*** Altair Korea.

(Received August 8, 2016 ; Revised January 16, 2017 ; Accepted January 17, 2017)

Key Words: Transversely Isotropic Property(횡등방성), Copper Clad Laminate(동박적층판), Rules of Mixture(혼합 법칙), Size Optimization(치수 최적설계), Multilayer Printed Circuit Board(다층인쇄회로기판)

초록: 본 연구에서는 횡등방성 특성을 갖는 인쇄회로기판(PCB)의 물성 예측을 위한 방법을 제안하였다. 등방성 소재와 달리 횡등방성 소재의 물성 취득을 위한 별도의 시험기준은 없으며, PCB와 같이 적층된 형태의 박판 구조물에 대해서는 재료시험 또한 쉽지가 않다. 모달시험을 통해 취득한 모달 파라미터와 상용 소프트웨어인 OptiStruct[®]의 치수 최적화 기법을 활용, 시험-해석 간 주파수 차이를 최소화시키는 강성행렬 성분을 도출하여 기계적 물성을 예측하였다. 또한 주파수 별 모드형상을 MAC(Modal Assurance Criteria) 값을 기준으로 비교, 검토하여 예측 물성에 대한 유효성을 확인하였다. 제안된 방법은 향후 PCB를 포함하는 전장제품의 설계검증을 위한 구조해석에 확대 적용될 것으로 기대한다.

Abstract: In this study, we propose a method for predicting the mechanical properties of the printed circuit board (PCB) that has transversely isotropic characteristics. Unlike the isotropic material, there is no specific test standard for acquisition of the transversely isotropic properties. In addition, common material test methods are not readily applicable to that type of laminated thin plate. Utilizing the natural frequency obtained by a modal test and the sizing optimization technique provided in OptiStruct[®], the mechanical properties of a PCB were derived to minimize the difference between test and analysis results. In addition, the validity of the predicted mechanical properties was confirmed by the MAC (Modal Assurance Criteria) value of each of the compared mode shapes. This proposed approach is expected to be extended to the structural analysis for the design verification of the top product that includes a PCB.

- 기호설명 -

σ_{ij} : 응력 성분 ($i, j=1, 2, 3$)

ϵ_{ij} : 변형률 성분 ($i, j=1, 2, 3$)

C_{ij} : 강성행렬 성분 ($i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)

ν_{ij} : 프와송비 ($i, j=1, 2, 3$)

E_i : (중)탄성계수 ($i=1, 2, 3$)

G_{ij} : 전단 계수 ($i, j=1, 2, 3$)

E_f, E_m : 섬유, 수지의 탄성계수

ν_f, ν_m : 섬유, 수지의 프와송비

V_f, V_m : 섬유, 수지의 체적율

W_i : 가중치 성분 ($i=1, 2, 3$)

ρ_c, ρ_f, ρ_m : Pre-preg, 섬유, 수지의 밀도

α, β : 최적화 설계 변수 ($0 < \alpha, \beta \leq 1$)

f_{TEST}, f_{FEA} : 시험, 해석의 고유주파수

§ 이 논문은 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 2016년도 춘계학술대회(2016. 4. 7-9., 제주해비치호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, jeonghwan.choo@halla.com

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근의 자동차 산업은 운전자의 안전 및 편의 사양 확대, 연비개선에 대한 수요 증가로 관련 기술 개발을 활발하게 전개하고 있다. 이에 따라 전장제품의 채택이 확대되고 있으며, 차량운용 중 발생 가능한 제품의 성능저하 및 파손에 대한 사전 검증이 중요해지고 있다. 파손 원인의 대부분은 온도 및 외부 진동과 같은 환경적인 요인이 차지하고 있으며,⁽¹⁾ 해석을 통한 사전 검증을 위해서는 PCB의 기계적 물성이 반드시 확보 되어야 한다.

황등방성을 나타내는 PCB(Printed Circuit Board)의 물성을 예측하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 대부분의 이론적인 접근들은 적층판 이론(Laminate Theory)을 기본으로 하고 있다.^(2~4)

하지만 동박(Copper Foil)으로 이루어진 회로의 패턴이 정확하게 반영되기 어렵고, 유리섬유와 수지의 체적율(Volume Fraction) 정보가 명확하지 않아 실제 물성과는 차이를 갖게 된다. 이러한 이유 때문에 시험을 통한 물성예측이 반드시 필요하다. Amy 등⁽⁵⁾은 연구에서 정적 굽힘 시험을 통하여 탄성계수 및 전단계수를 예측하였고, Rzepka 등⁽⁶⁾은 유리섬유 직조 일부를 3차원 유한요소로 모델링하여 얻은 해석결과를 인장 및 굽힘 시험결과와 비교하여 유리섬유에 대한 물성을 보정하고 이를 하나의 직조 층(Lamina)과 전체 PCB 모델로 순차적으로 확대 적용하는 방법으로 물성을 예측하였다. 하지만 재료시험을 위한 시편 제작과정이 별도로 필요하며, 적층방향에 대한 물성은 예측이 어렵다. 이와 같은 정적 시험방법의 한계를 극복하기 위하여 진동시험을 활용한 물성예측 연구들도 활발하게 연구되고 있다.^(7,8)

특히, Huang 등⁽⁹⁾에 의한 연구에서는 비 접촉식 LDV(Laser Doppler Vibrometer) 측정을 통한 모달 파라미터 시험 결과와 최적화 기법을 이용하여 PCB해석모델의 물성을 예측하였다. 하지만 PCB 설계 및 재질 변경 시 동일 방법을 반복 수행해야 한다는 어려움과 장비취급의 어려움을 갖고 있다.

본 연구에서는 효율적으로 모달파라미터를 취득할 수 있는 충격망치 방법과 상용 소프트웨어에서 제공하는 치수 최적화 기법을 활용하여 Bare PCB Pre-preg층의 물성을 예측하는 방법을 소개하고자 한다. 또한 Pre-preg층의 초기 물성 예측 방법을 소개하고, 적용된 유리섬유의 직조 형태 및 구성에 따라 다양하게 변경되는 물성에 대하여 체계적 관리가 가능한 최적화 설계변수를 도입함으로써 적정 회수의 반복 수행 후에는 축적된 설계변수

값으로부터 별도의 시험 없이도 설계변경된 PCB 제품의 기계적 물성을 예측하고 구조 안정성 검토를 위한 해석검증에 활용될 것이다.

2. 연구대상 및 해석방법

2.1 인쇄회로기판(PCB) 해석모델

Fig. 1은 PCB 기본 구성단위인 동박적층판(CCL)을 나타낸다. 동박적층판은 신호와 전원 그리고 접지가 위치하는 동박(Copper Foil)과 직조형태의 유리섬유에 열경화성 수지를 침투시켜 만든 Pre-preg로 구성되며, 이는 다시 반 경화상태의 Pre-preg와 프레스 성형을 통하여 다층구조의 PCB를 형성하게 된다.

Pre-preg는 Fig. 2와 같이 유리섬유의 직조패턴에 따라 다양한 종류로 분류되며, 패턴 별 섬유 함량, 치수 및 무게는 IPC-4412A 기준에 따른다. 직조의 경사(warp)와 위사(fill) 방향으로 섬유 분포 정도가 동일하다고 가정한다면 축 1-2에 의한 평면은 등방성 평면을 이루게 된다.

3차원 직교이방성 물질에 대한 일반적인 Hooke의 법칙에서 강성행렬은 다음과 같이 9개의 독립적인 상수들로 표현 된다.⁽¹¹⁾

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix}$$

등방성 평면에 대하여 강성행렬을 이루는 상수들은 아래의 관계를 만족하며,

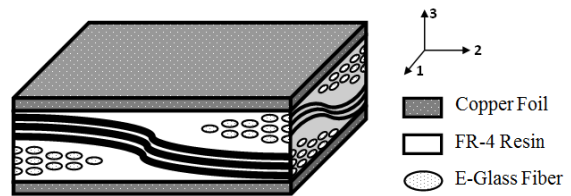


Fig. 1 CCL(Copper Clad Laminate) Structure



1080 Cloth 2116 Cloth 7628 Cloth

Fig. 2 Typical glass-weave styles used in PCB⁽¹⁰⁾

$$C_{11} = C_{22}, C_{31} = C_{32}, C_{44} = C_{55}, C_{66} = C_{11} - C_{12}$$

강성행렬은 다음과 같이 5개의 독립적인 상수들의 조합으로 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{11} - C_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

강성행렬을 구성하는 상수 성분들은 공학상수 (Engineering Constant)와 아래의 관계를 만족한다.

$$C_{11} = \frac{1-v_{23}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta}, C_{12} = \frac{v_{21}+v_{31}v_{23}}{E_2 E_3 \Delta}, C_{13} = \frac{v_{31}+v_{21}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta}$$

$$C_{33} = \frac{1-v_{12}v_{21}}{E_1 E_2 \Delta}, C_{44} = \frac{E_2 E_3}{E_2+E_3+2 v_{23} E_3}$$

여기서, $\Delta = \frac{1-v_{12} v_{21}-v_{23} v_{32}-v_{31} v_{13}-2v_{12}v_{23}v_{31}}{E_1 E_2 E_3}$

2.2 모달 파라미터 측정

모달 파라미터 측정을 위하여 Fig. 3처럼 PCB를 구속이 없는 조건하에서 특정 위치에 가속도 센서를 고정하고 충격망치로 44개 절점을 가진하여 가속도 응답을 수집하였다.

PCB의 전체 질량은 92g이며, 가속도 센서는 추가되는 질량이 전체 질량의 10%를 넘지 않도록

Table 1 Natural frequencies and mode shapes of the PCB

Order	Natural frequency	Mode shape
1 st	138 Hz	1 st Torsion mode
2 nd	143 Hz	1 st Bending mode
3 rd	334 Hz	2 nd Torsion mode
4 th	398 Hz	2 nd Bending mode
5 th	477 Hz	1 st Camber mode

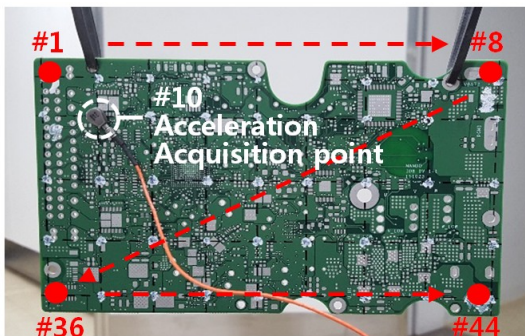


Fig. 3 Experimental setup for modal test of the bare PCB

B&K 4517 Type (0.65g)을 선정하였다.⁽¹²⁾ 또한 타격 시 충격 망치의 관성에 의한 영향성을 최소화할 수 있도록 PCB Piezotronics社의 084A17 제품을 사용 하였으며, 측정된 모달 파라미터 결과는 Table 1에 정리하였다.

2.3 기계적 물성 최적화 프로세스

최적화 수행은 Altair社의 상용 소프트웨어인 OptiStruct[®]로 진행되었으며, 이방성 물성카드인 MAT9을 활용하였다. 해당 PCB를 구성하는 Pre-preg는 7628 형식의 직조 패턴이 적용되었으며, 세계의 동박적층판(CCL)으로 구성된다. CHEXA 요소로 이루어진 3차원 모델에 동박(Copper Foil) 층은 두께가 상대적으로 얇은 것을 감안하여 등방성 물성(Isotropic Property)으로 가정하였고, Pre-preg 층은 횡등방성 물성으로 모델링하였다.

Pre-preg의 기계적 물성 값은 축 1-2가 이루는 평면의 탄성계수와 프와송비 그리고 최적화를 위하여 도입 된 설계변수 α, β 에 대한 종속변수로 다음과 같이 정의 하였으며, 임의의 최적화 설계 변수 α 와 β 의 초기 값은 각각 0.1과 0.02로 선정하였다.

$$E_2 = E_1, E_3 = \alpha E_1, v_{23} = v_{31}, v_{23} = \beta v_{12}$$

최적화 수행을 위한 등방성 평면의 탄성계수와 프와송비의 초기 값은 혼합법칙(Rule of Mixture)을 적용하여 아래와 같이 정의된다.

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m, v_{12} = V_f v_f + V_m v_m$$

여기서 아래 첨자 f 와 m 은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 각각 E-Glass Fiber와 FR-4 Resin을 나타내며, 기본 물성은 Table 2와 같다.

또한 Pre-preg 내부에 공동(void)이 없다는 가정 하에 아래와 같이 유리섬유의 체적율을 계산할 수

Table 2 Mechanical properties of the PCB substrates⁽¹³⁾

	Elastic modulus [GPa]	Poisson ratio	Density [g/mm ³]
Copper	108.0	0.30	8.90E-3
FR-4 Resin	3.05	0.33	1.80E-3
E-Glass Fiber	72.3	0.22	2.55E-3

Table 3 Calculated volume fraction

Weave style	FR-4 Resin (V_m)	E-Glass Fiber (V_f)
7628	0.64	0.36

있으며,⁽¹⁴⁾ 본 논문에서 적용한 유리섬유의 체적율은 Table 3과 같다.

$$Fiber\ Volume\ Fraction = (\rho_c - \rho_m) / (\rho_f - \rho_m)$$

본 설계문제는 아래와 같이 최초 다섯 개 고유주파수에 대한 시험과 해석 결과의 차이가 최소가 되도록 정식화하였다.

Find $\alpha, \beta, E_1, \nu_{12}$
 to minimize
 $Error = \sum_{i=1}^5 W_i \{ (f_{TEST} - f_{FEA}) / f_{TEST} \}^2$
 subject to
 $0 < \alpha, \beta \leq 1$
 $E_1^{LB} \leq E_1 \leq E_1^{UB}, \nu_{12}^{LB} \leq \nu_{12} \leq \nu_{12}^{UB}$
 $f^{LB} \leq f_{FEA} \leq f^{UB}$

3. 해석결과 및 고찰

Table 4에서는 혼합법칙을 통하여 예측된 Pre-preg의 초기 물성 값과 최적화를 통하여 도출된 최종 물성 값을 확인할 수 있다.

특히 등방성 평면의 초기 탄성계수 값은 28GPa에서 15GPa 수준으로 가장 크게 감소하여 PCB의 응답특성에 지배적으로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Pre-preg층의 적층 방향 탄성계수가 등

Table 4 The initial and updated mechanical properties

	Initial value	Updated value
$E_1 = E_2$	27.98 GPa	15.30 GPa
E_3	2.80 GPa	3.10 GPa
ν_{12}	0.29	0.30
$\nu_{23} = \nu_{31}$	0.006	0.06
G_{12}	10.85 GPa	5.89 GPa
$G_{23} = G_{31}$	2.54 GPa	2.53 GPa

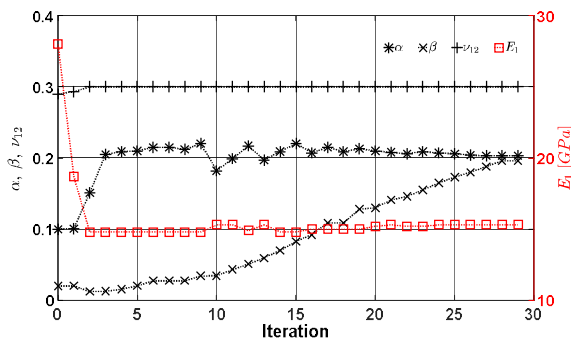


Fig. 4 Iteration history of the design variables

방성 평면 대비 20% 수준으로 크게 감소되는 것은 해당 물성이 유리섬유의 방향성에 지배적인 영향을 받고 있음을 나타내며, 다른 연구내용들과 유사하다.^(15~17) 다만 방열목적의 Aluminum층과 같이 Bare PCB이 외의 구조가 함께 고려되는 경우,⁽⁹⁾ 추가된 구조물의 동특성이 모달파라미터 결과에 지배적인 영향을 주게 되어 Pre-preg 층의 횡등방성 특성은 약하게 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 4에서는 최적화 해석 동안 설계 변수들의 수렴이력을 확인할 수 있다.

최적화된 물성을 반영한 해석결과와 측정된 고유주파수 간의 차이가 Table 5와 같이 대폭 감소하였고, 각 각의 고유모드는 Fig. 5와 같다.

시험과 해석에서의 모드 형상에 대한 일치율은 MAC(Modal Assurance Criteria)값을 통하여 확인하였으며, Fig. 6과 같이 평균 0.95수준으로 높게 나타나 제안된 방법으로 도출된 물성에 대한 유효성을 검증하였다.

또한 임의로 선정되는 최적화 설계변수 α, β 가 최적화 결과에 미치는 영향성을 검토하기 위하여 각 인자에 대하여 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9의 다섯 가지

Table 5 Comparison result table

Mode order		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Initial condition	Frequency (Hz)	142	166	342	455	535
	Error (%)	2.9	16.1	2.4	14.3	12.2
Optimal condition	Frequency (Hz)	140	146	331	401	471
	Error (%)	1.4	2.0	0.9	0.8	1.2

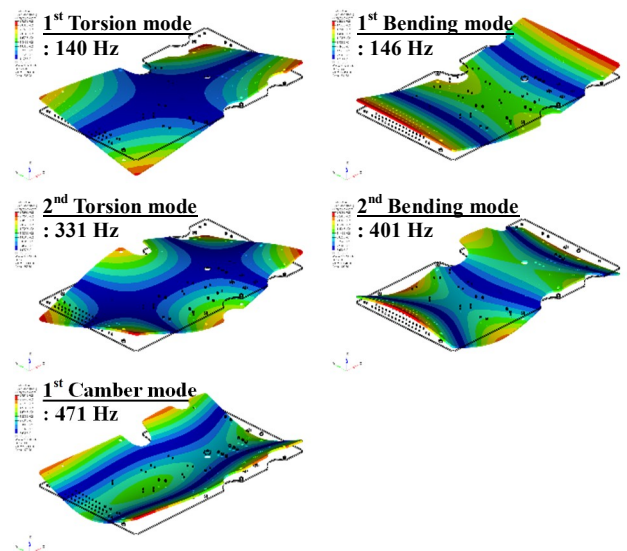


Fig. 5 FEA Result-Natural frequencies and mode shapes

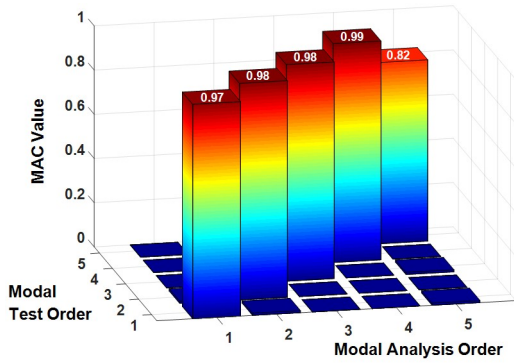


Fig. 6 MAC Results of the first five mode shapes

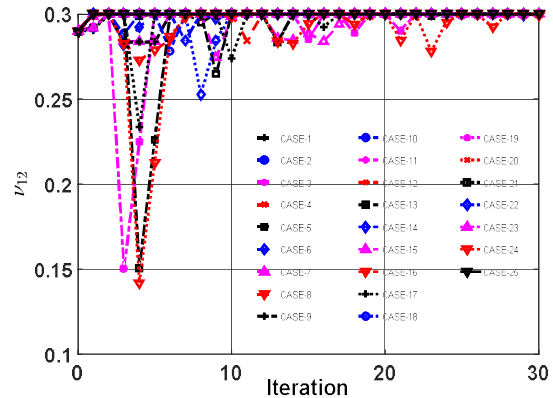


Fig. 9 Iteration history of the Poisson's ratio (ν_{12})

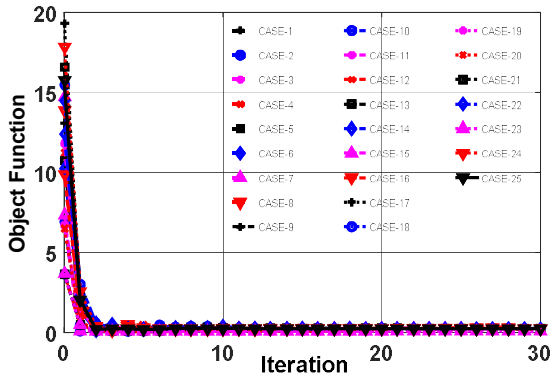


Fig. 7 Iteration history of the object function

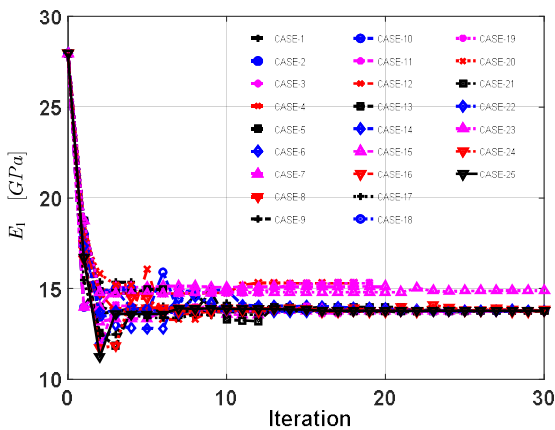


Fig. 8 Iteration history of the elastic modulus (E_1)

수준으로 완전요인 해석을 수행하였다.

해석결과 최초 다섯 개 고유주파수의 시험-해석 간 차이를 나타내는 목적함수는 Fig. 7과 같이 0.2 미만 수준으로 나타나며, 고유주파수 기준으로는 2% 미만의 차이를 확인하여 최적화 설계변수의 임의 선정에 대한 유효성을 판단하였다. 탄성계수 및 프와송 비에 대한 수렴이력은 각각 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

4. 결론

본 논문에서는 시험을 통하여 취득한 모달 파라미터 정보를 활용하여 PCB Pre-preg층의 횡등방성 물성을 정확하게 예측할 수 있는 방안을 제안하였다. 최적화 수행 결과 등방성 평면을 이루는 Pre-preg층의 초기 예측 물성이 중요하며, 보다 정확한 초기 값 선정을 위하여 다양한 접근을 검토하고 있다. 추가적으로 다양한 직조패턴의 PCB에 대한 물성예측을 진행하여 최적화 설계 변수에 대한 데이터베이스를 구축하고, 별도의 시험 없이 다층구조 PCB의 물성을 예측하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 이와 같은 연구를 토대로 PCB를 포함하는 상위제품의 동특성 예측 및 설계사전검토에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

참고문헌 (References)

- (1) Subramanya, K. P., Pandit, J. K., Prasad, C. S. and Thyagaraj, M. R., 2014, "Vibration Analysis Study of Spacecraft Electronic Package: A Review," *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 503~507.
- (2) Sottos, N. R., Ockers, J. M. and Swindeman, M., 1999, "Thermoelastic Properties of Plain Weave Composites for Multilayer Circuit Board Applications," *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, Vol. 121, No. 1, pp. 37~44.
- (3) Wang, K. Y., 2012, "Development and Application of Composite Material Lamination Theory for Printed Circuit Boards," Master thesis, Auburn University, Auburn, Alabama, 2012.
- (4) Shrotriya, P. and Sottos, N. R., 1998, "Creep and Relaxation Behavior of Woven Glass/Epoxy Substrates for Multilayer Circuit Board Applications," *Polymer*

- Composites*, Vol. 19, No. 5, pp. 567~578.
- (5) Amy, R. A, Aglietti, G. S. and Richardson, G., 1999, "Accuracy of Simplified Printed Circuit Board Finite Element Models," *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, No. 1, pp. 86~97.
- (6) Rzepka, S., Kramer, F., Grassme O. and Lienig, J., 2008, "A Multilayer PCB Material Modeling Approach Based on Laminate Theory," *Proceedings of 9th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*, pp. 234~243.
- (7) Lee, D. Y., Bae, Y. C., Kim, H. S. and Lee, Y. R., 2011, "Mechanical Property Measurement of a Transversely Isotropic Material for Gas Turbine Blades by the Experimental Modal Analysis," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 155~156.
- (8) Jun, O. C., Byun, K. H. and Joo, Y. S., 2009, "A Study on Updating of Analytic Model of Dynamics for Aircraft Structures Using Optimization Technique," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 2, pp. 131~138.
- (9) Huang, Z., Zang, C. and Friswell, M. I., 2014, "Parameter Identification of a Printed Circuit Board Structure Using Model Updating and Scanning Laser Vibrometer Measurements," *Proceedings of ISMA 2014 including USD2014*, pp. 2679~2690.
- (10) Coombs, C. F., 2008, *Printed Circuits Handbook*, McGraw Hill, pp. 154.
- (11) Lai, W. M., Rubin, D. and Krempl, E., 1993, *Introduction to Continuum Mechanics*, Pergamon Press, pp. 308~312.
- (12) Mark, S. and Torben, R. L., 1987, *Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook*, Bruel and Kjaer, pp. 86~88.
- (13) Pecht, M., Hillman, C., Rogers, K. and Jennings, D., 1999, "Conductive Filament Formation: A Potential Reliability Issue in Laminated Printed Circuit Cards with Hollow Fibers," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 22, No. 1, pp. 80~84.
- (14) Abdalla, F. H., Megat, M. H., Susan, M. S. and Sahari, B. B., 2008, "Determination of Volume Fraction Values of Filament Wound Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, No. 4, pp. 7~11.
- (15) McCaslin, L., 2008, "Methodology for Predicting Microelectronic Substrate Warpage Incorporating Copper Trace Pattern Characteristics," *Master's Thesis*, Georgia Institute of Technology, pp. 27.
- (16) Bhavsar, N. R., Shinde, H. P. and Bhat, M., 2014, "Determination of Mechanical Properties of PCB," *International Journal on Mechanical Engineering and Robotics*, Vol. 2, No. 4, pp. 23~27.
- (17) Zhang, B., Liu, P. K., Ding, H. and Cao, W., 2010, "Modeling of Board-level Package by Finite Element Analysis and Laser Interferometer Measurements," *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, No. 7, pp. 1021~1027.