

섬유금속적층판의 모드 I 접합 거동 예측을 위한 Levenberg-Marquardt 기법 기반의 역해석 기법에 관한 수치적 연구

박으뜸* · 이영현* · 김 정* · 강범수* · 송우진**†

Numerical Study on Inverse Analysis Based on Levenberg-Marquardt Method to Predict Mode-I Adhesive Behavior of Fiber Metal Laminate

Eu-Tteum Park*, Youngheon Lee*, Jeong Kim*, Beom-Soo Kang*, Woojin Song**†

ABSTRACT: Fiber metal laminate (FML) is a type of hybrid composites which consist of metallic and fiber-reinforced plastic sheets. As the FML has a drawback of the delamination that is a failure of the interfacial adhesive layer, the nominal stresses and the energy release rates should be determined to identify the delamination behavior. However, it is difficult to derive the nominal stresses and the energy release rates since the operating temperature of the equipment is restricted. For this reason, the objective of this paper is to predict the mode-I nominal stress and the mode-I energy release rate of the adhesive layer using the inverse analysis based on the Levenberg-Marquardt method. First, the mode-I nominal stress was assumed as the tensile strength of the adhesive layer, and the mode-I energy release rate was obtained from the double cantilever beam test. Next, the finite element method was applied to predict the mode-I delamination behavior. Finally, the mode-I nominal stress and the mode-I energy release rate were predicted by the inverse analysis. In addition, the convergence of the parameters was validated by trying to input two cases of the initial parameters. Consequently, it is noted that the inverse analysis can predict the mode-I delamination behavior, and the two input parameters were converged to similar values.

초 록: 섬유금속적층판은 금속과 섬유 강화 복합소재를 함께 적층한 하이브리드 재료 중 하나다. 섬유금속적층판은 계면의 접착층이 파괴되는 층간분리 현상이 발생할 수 있기 때문에 계면의 접착층에 대한 한계응력과 에너지 해방률을 실험적으로 도출해야만 한다. 하지만, 온도에 따른 에너지 해방률을 실험적으로 도출하는 과정에서 측정 장비의 사용 온도에 대한 제약을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 Levenberg-Marquardt 기법을 기반한 역해석 기법을 사용하여 접착층에 대한 모드 I 한계응력과 에너지 해방률에 대한 예측 가능성을 확인하는 것이 목표다. 먼저, 한계응력은 접착층의 인장강도와 같다고 가정하였으며, 에너지 해방률은 DCB 시험(double cantilever beam test)을 수행하여 정의하였다. 또한, 유한요소법 기반 모델을 적용하여 한계응력과 에너지 해방률을 수치해석적으로 예측할 수 있는 지 확인하였다. 그 후, Levenberg-Marquardt 기법을 유한요소법 기반 모델에 적용하여 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 수치해석적으로 예측하였다. 아울러, 본 연구에서 사용한 역해석 기법의 수렴성을 확보하기 위하여 두 가지 경우의 초기 매개변수에 대한 역해석을 추가적으로 수행하였다. 결과적으로, 본 연구에서 사용한 역해석 기법은 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 효과적으로 예측할 수 있음을 보였다.

Key Words: DCB 시험(Double cantilever beam test), 에너지 해방률(Energy release rate), 한계응력(Nominal stress), Levenberg-Marquardt 기법(Levenberg-Marquardt method), 역해석(Inverse analysis)

Received 20 April 2018, received in revised form 5 June 2018, accepted 9 June 2018

*Department of Aerospace Engineering, Pusan National University

**†Graduate School of Convergence Science, Pusan National University, Corresponding author (E-mail: woodysong@pusan.ac.kr)

1. 서 론

섬유금속적층판(fiber metal laminate)은 금속 판재와 섬유 강화 복합소재가 적층된 하이브리드 소재 중 하나다. 이러한 섬유금속적층판은 무게 대비 강도 및 충격 흡수 능력이 우수하여, 항공기 날개의 외피와 자동차의 사이드 도어 임팩트빔 등에 적용 및 이를 위한 연구가 진행 중이다[1-3]. 하지만 섬유금속적층판은 복합적인 방향의 하중에 의해 각 층이 분리되는 층간분리(delamination) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 층간분리 현상은 섬유금속적층판의 구조적 성능을 급격히 저하시키기 때문에, 실제 제품으로 섬유금속적층판을 적용시키기 위해서는 층간분리 현상을 실험적으로 명확히 규명해야 한다. 층간분리 현상을 실험적으로 규명하기 위해서 접착층(adhesive layer)의 한계응력(nominal stress)과 에너지 해방률(energy release rate)을 실험적인 방법을 수행하여 도출해야 될 필요가 있다. 접착층은 총 세 가지 모드의 한계응력과 에너지 해방률을 가지고 있으며, 각 모드에 따라서 여러 가지 시험이 수행되고 있다. 한계응력의 경우, 통상적으로 접착제의 인장강도(tensile strength)로 가정하는 경우와 맞대기 시험(butt test)을 수행하여 얻어진 최대 하중을 사용하는 경우가 있다[4,5]. 에너지 해방률의 경우, 모드 I 에너지 해방률을 도출하기 위해서, DCB 시험(double cantilever beam test)이 수행되고 있으며[6], 모드 II 에너지 해방률을 도출하기 위해서, ENF 시험(end-notched flexure test)가 수행되고 있다[7]. 모드 III 에너지 해방률의 경우, CRS 시험(crack rail shear test)을 수행하는 연구가 진행 중이다[8].

접착층의 에너지 해방률을 실험적으로 도출하기 위해서는 접착층의 층간분리 길이(delamination length)를 측정해야만 한다. 접착층의 층간분리 길이는 일반적으로 시편의 전단부에 눈금을 표기하여 시각적으로 측정하거나 이미지 인식 기반 광학 장비를 사용하여 도출한다[9,10]. 하지만, 온도에 따른 접착층의 층간분리 길이를 측정하려면 장비의 사용 온도를 고려해야만 하며, 비용적인 측면에서 효율적이지 못하다. 따라서, 최근 응집영역모델(cohesive zone model)을 사용하여 접착층의 층간분리 거동을 수치해석적으로 예측하는 연구가 보고되었다[11,12]. 하지만, 응집영역모델의 매개변수인 한계응력과 에너지 해방률의 도출 방법에 대한 많은 논쟁이 있으며[13], 이러한 매개변수를 실험적으로 도출하는 과정에서 측정 과정 중 발생하는 오차와 이론적 가정에 의한 오차 등 많은 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 최근 역해석(inverse analysis) 기법을 기반한 응집영역모델의 매개변수인 한계응력과 에너지 해방률을 도출하기 위한 연구가 진행 중이다. Jin 등은 모드 I 한계응력과 층간분리 길이를 매개변수로 선정하여 Kalman filter algorithm을 사용하여 접착층의 모드 I 층간분리를 예측하였으며[14], Xu 등은 모드 I 한계응력과 에

너지 해방률을 매개변수로 선정하여 Kalman filter algorithm과 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 혼용하여 접착층의 모드 I 층간분리를 예측하였다[13]. 또한, Chen 등은 Arcan 시험과 Levenberg-Marquardt 기법을 기반한 역해석 기법을 수행하여 모드 I 한계응력과 층간분리 길이를 예측하였다[15].

본 연구는 Levenberg-Marquardt 기법을 기반한 역해석 기법을 수행하여 접착층의 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 예측하는 것이 목표다. 먼저, 접착층의 모드 I 한계응력은 접착제인 폴리프로필렌(polypropylene)의 인장강도로 가정하였으며, 모드 I 에너지 해방률은 DCB 시험을 수행하여 도출하였다. 이 때, 실험적으로 도출한 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 매개변수로 사용하여 응집영역모델 기반 수치해석 모델의 신뢰성을 확보하였다. 그 후, Levenberg-Marquardt 기법을 적용하기 위해 유한요소법 기반 상용 소프트웨어인 ABAQUS와 수학적 연산을 수행하기 위한 상용 소프트웨어인 MATLAB을 연동하여 역해석 기법을 수행하였다. 역해석 기법의 목적함수(objective function)는 DCB 시험과 유한요소법 기반 모델로부터 도출된 변위-하중 그래프 간의 평균 제곱근 오차(root mean square error)이며, 목적함수가 최소화(minimization)되는 방향으로 매개변수를 갱신(update)하였다. 또한, Levenberg-Marquardt 기법의 매개변수에 대한 수렴성(convergence)을 확인하기 위하여 두 가지 경우의 초기 매개변수(initial parameters)를 추가적으로 사용하여 역해석을 수행하였다.

2. 실 험

2.1 DCB 시험

본 연구에서는 섬유금속적층판의 모드 I 에너지 해방률을 도출하기 위해 DCB 시험을 수행하였다. 섬유금속적층판은 Fig. 1과 같이 알루미늄 5052 계열 판재와 자기 강화형 폴리프로필렌(self-reinforced polypropylene) 판재, 그리고 Collano 사의 폴리프로필렌 접착제로 구성되어 있다. 이 때, 접착층의 모드 I 에너지 해방률을 도출하기 위해 ASTM D5528을 참고하여 Fig. 2와 같이 시험편을 제작하였다[16]. 시험편은 약 2 mm의 알루미늄 5052 판재와 폴리프로필렌 접착제로 이루어져 있으며, 공압 가열기를 사용하여 175°C의 온도 조건에서 0.4 MPa의 압력에 의해 제작되었다. 이 때, 시험편의 폭은 25 mm이며, 길이는 150 mm이다. 또한, 시험편 제작 시 이형필름(release film)을 사용하여 50 mm의 초기 층간분리 길이(initial delamination length)를 얻었다. 그 후, 각 시험편의 전단부에 힌지(hinge)를 부착하여 접착층의 모드 I 층간분리가 발생하도록 하였다.

본 연구에서는 DCB 시험을 수행하기 위해 Instron 사의 만능재료시험기(Instron 5566)를 사용하였다. 이 때, 인장속도는 10 mm/min이다. 시험 중 Instron 5566으로부터 하중과 수직 변위 데이터를 얻었으며, 층간분리 길이는 DCB 시

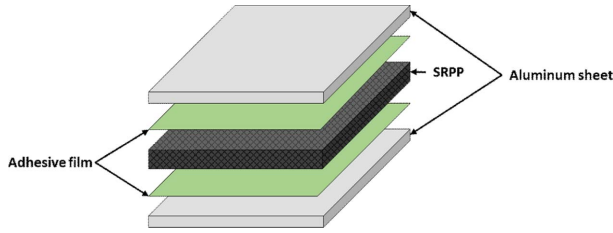


Fig. 1. Schematic design of fiber metal laminate

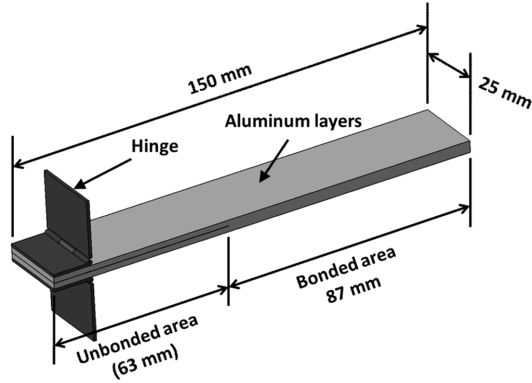


Fig. 2. Configuration of DCB specimen

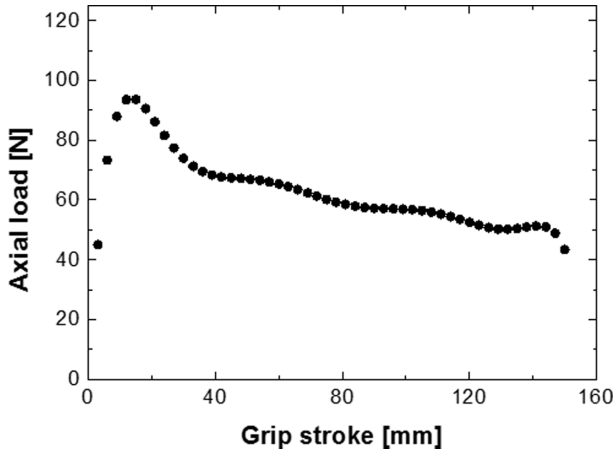


Fig. 3. Axial load-grip stroke data obtained from DCB tests

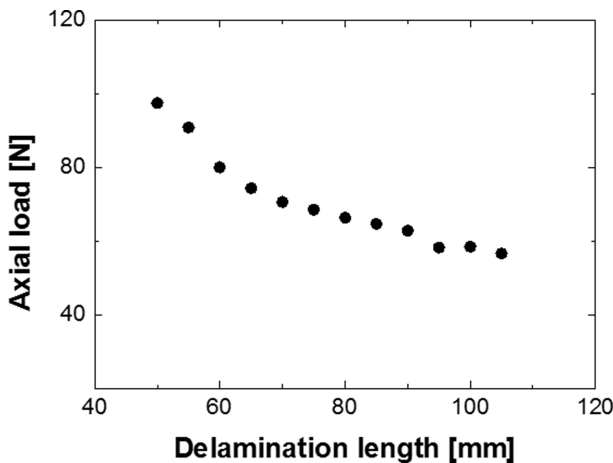


Fig. 4. Axial load-delamination length obtained from DCB tests

험편의 전단부에 5 mm 간격의 눈금을 표시하여 측정하였다. DCB 시험을 수행하여 도출한 하중-변위 그래프는 Fig. 3과 같으며, 층간분리 길이에 따른 하중 그래프는 Fig. 4와 같다.

2.2 모드 I 에너지 해방률 도출

본 연구에서는 DCB 시험으로부터 도출한 하중, 변위, 그리고 층간분리 길이를 사용하여 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다. 이 때, ASTM D5528을 참고하여 MBT(modified beam theory)와 CCM(compliance method) 방법을 사용하였으며[16], 각 방법에 따른 에너지 해방률을 비교하였다.

2.2.1 Modified beam theory

MBT 방법은 시험편의 층간분리가 진행될 때, 층간분리가 발생한 곳의 전면부가 완전 구속(perfectly clamped)이 되어 있다는 가정하에 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

P 는 DCB 시험으로부터 측정된 하중, δ 는 수직 방향의 변위이며, b 는 시험편의 폭, a 는 층간분리 길이이다. 식 (1)의 경우, 단순한 식으로 에너지 해방률을 도출할 수 있지만 실제 시험에서는 층간분리가 발생할 때 시험편의 회전운동이 발생하기 때문에 층간분리 길이에 대한 오차가 발생한다. 따라서, 층간분리 길이를 보정하기 위해서 아래와 같은 식으로 층간분리 길이를 보정하여 에너지 해방률을 도출하였다.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+\Delta)} \quad (2)$$

Δ 는 층간분리 길이의 보정인자(effective delamination extension)이며, Fig. 5와 같이 층간분리 길이에 대한 절편으

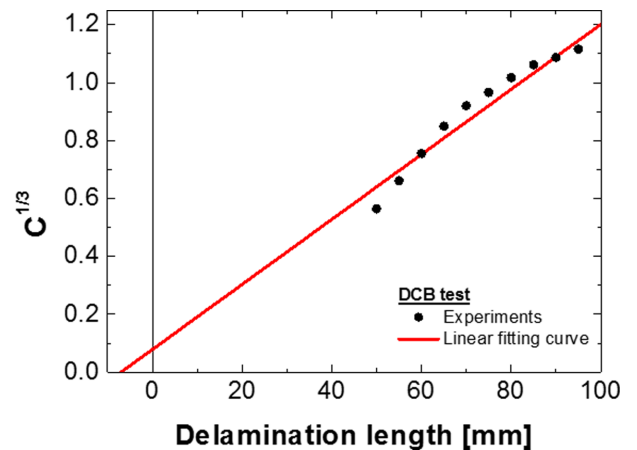


Fig. 5. $a-C^{1/3}$ curve for obtaining effective delamination extension

로 도출할 수 있다. 이 때, Fig. 5에서의 C 는 컴플라이언스 (compliance)이며, 수직 방향의 변위와 하중에 대한 비율인 δ/P 를 의미한다.

2.2.2 Compliance calibration method

CCM 방법은 로그 스케일(logarithmic scale)에서의 컴플라이언스와 층간분리 길이를 Fig. 6과 같이 나타낸 후, 선형 회귀 적합(linear regression fitting)으로부터 도출된 기울기 n 을 사용한 방법이다. CCM 방법을 사용한 에너지 해방률은 아래와 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (3)$$

2.2.3 실험 결과

본 연구에서는 DCB 시험으로부터 도출된 하중, 수직 방향의 변위와 층간분리 길이를 확보하여 MBT와 CCM 방법으로 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다. DCB 시험으로부터 도출한 모드 I 에너지 해방률의 평균 값과 표준편차는 Table 1과 같다. 결과적으로 MBT 방법에 의해 도출된 모드 I 에너지 해방률은 CCM 방법에 비해 약 34% 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 각 시험편의 표준편차는 상대적으로 큰 것을 알 수 있으며, 이는 시험 제작 시 접착층의 표면 분포도와 DCB 시험을 수행함으로써 발생하는 실험적 오차에 의한 것이라 판단된다. 아울러, MBT 방법과 CCM 방법의 보정인자와 기울기 값을 도출하는 과정에서 실제 시험 데이터는 Fig. 5와 6과 같이 선형 관계가 아닌 비선형 관계와 유사한 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 접착층이 열가소성 수지 기반이며, ASTM D5528에서 제시한 에너지 해방률의 도출 방법은 열경화성 수지를 기반하기 때문에 이러한 오차가 발생했다고 판단된다. 또한, 시험편의 알루미늄 소재의 소성변형(plastic deformation)에 의해 오차가 추가적으로 발생했다고 판단할 수 있다. 특히, 시험편의 층간분리 길이를 시각적으로 측정하는 과정에서 발생한 실험

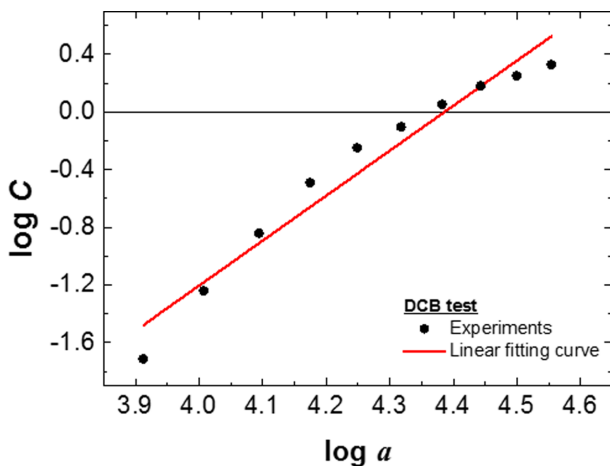


Fig. 6. log a -log C curve for obtaining n -value

Table 1. Mode-I energy release rates calculated by MBT and CCM

Method	Mean value of G_{IC} [N/mm]	Standard deviation [N/mm]
MBT	1.5019	0.3055
CCM	2.0066	0.2368

적 오차가 모드 I 에너지 해방률의 상대적으로 큰 표준편차를 야기했다고 판단된다.

3. 유한요소법을 이용한 수치해석

3.1 유한요소모델링

본 연구에서는 역해석 기법을 적용하기 전, 유한요소법 기반 해석모델을 사용하여 접착층의 층간분리 현상을 수치해석적으로 모사하였다. 이 때, 유한요소법 기반 상용 프로그램인 ABAQUS에서 제공하는 응집영역모델을 사용하였으며, 수치해석에 사용된 모델은 Fig. 7과 같다. 시험편의 알루미늄 층은 4 절점 평면 변형 요소(4-node plane strain element)를 사용하였으며, 접착층은 접착 요소(cohesive element)를 사용하였다. 이 때, 알루미늄 5052 판재의 물성치는 Table 2와 같다. 시험편에 부착된 힌지는 Fig. 7과 같이 강체 거동(rigid motion)을 보이는 면으로 단순화하였으며, 실제 시험과 같이 힌지의 끝단에 수직 방향의 변위를 발생시켰다. 접착층의 층간분리 현상을 수치해석적으로 모사하기 위해 응집영역모델을 사용하였다. 응집영역모델을 사용하기 위해서는 접착요소의 응집력-분리(traction-separation)

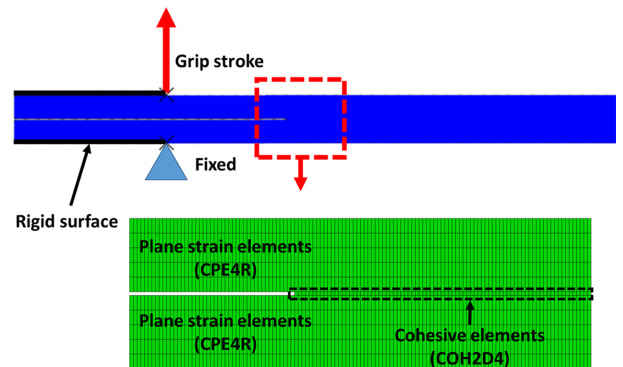


Fig. 7. Numerical model for prediction of delamination behavior

Table 2. Material properties of aluminum 5052-H32

Material property	Value
Density	2680.00 kg/m ³
Young's modulus	65.53 GPa
Yield strength	174.06 MPa
Tensile strength	242.99 MPa
Poisson's ratio	0.33

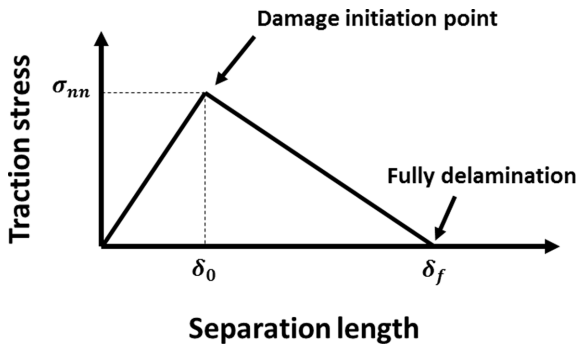


Fig. 8. Traction-separation law of cohesive element

Table 3. Mode-I energy release rates of a selected specimen

Method	Value
MBT	1.1940 N/mm
CCM	1.7862 N/mm

관계를 규명해야 하며, 이러한 관계는 Fig. 8과 같이 접착요소의 손상이 발생하기 전과 후로 나뉜다. 접착요소의 손상이 발생하기 전의 변형 거동을 모사하기 위해서는 모드 I 한계응력과 페널티 강성(penalty stiffness)을 도출하여야 한다. 본 연구에서는 모드 I 한계응력은 Collano 사에서 제공하는 물성치를 참고하여, 접착제의 인장강도인 30.3 MPa로 가정하였으며, 페널티 강성은 아래와 같은 식으로 도출할 수 있다[17].

$$K_{nm} = \frac{E}{t} \quad (4)$$

K_{nm} 는 접착요소의 페널티 강성을 의미하며, E 는 접착제의 탄성계수(modulus of elasticity), t 는 접착제의 두께를 의미한다. 이 때, 접착제의 두께는 각 시험편의 두께를 측정하여 약 0.05 mm로 가정하였다. 그 후, 접착요소의 손상이 발생된 이후의 파괴 진전을 모사하기 위해 Table 3과 같이 DCB 시험 데이터 중 하나를 선정하여 MBT, CCM 방법으로 도출한 모드 I 에너지 해방률을 사용하였다.

3.2 해석 결과 및 비교

본 연구에서는 DCB 시험으로부터 도출한 하중-변위 그래프와 유한요소해석으로부터 예측한 하중-변위 그래프를 비교하여 수치해석 모델의 타당성을 검토하였다. Fig. 9는 DCB 시험과 유한요소해석으로부터 도출한 하중-변위 그래프를 나타낸다. CCM 방법의 경우, DCB 시험에 비해 하중이 상대적으로 높음을 알 수 있으며, MBT 방법의 경우, CCM 방법에 비해 상대적으로 하중을 효과적으로 예측하였으나, 수직 방향의 변위가 약 121 mm일 때 시험편이 완전 분리가 발생한 것을 알 수 있다. ASTM D5528에 따르면 MBT 방법이 다른 방법에 비해 가장 보수적인 값을 도출한다고 보

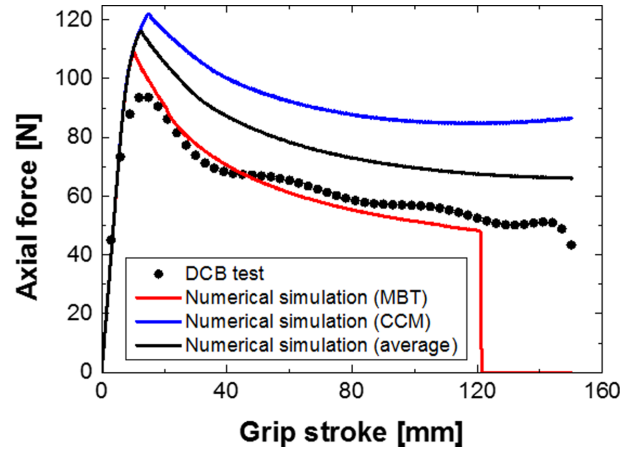


Fig. 9. Comparisons of experimental and numerical results

고되었으며[16], 이러한 이유 때문에 MBT 방법이 상대적으로 낮은 하중 영역대를 보인다고 판단할 수 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 유한요소법 기반 모델은 이전의 Lee 등 [5]이 제안한 수치해석 모델과 동일한 모델이기 때문에 수치해석 모델의 타당성은 충분하지만, Fig. 9과 같은 결과는 DCB 시험으로부터의 오차가 크게 기여한 것이라 판단된다. 특히, 온도에 따른 접착층의 한계응력 및 에너지 해방률을 도출하기 위한 시험을 수행할 때, 이러한 오차가 심화될 가능성이 높기 때문에 역해석 기법을 통한 한계응력과 에너지 해방률의 예측이 불가피할 수 밖에 없다고 판단된다.

4. 역해석 기법 수행 및 결과 고찰

4.1 Levenberg-Marquardt 기법의 이론 전개

본 연구에서는 접착층의 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 예측하기 위해 Levenberg-Marquardt 기법을 기반한 역해석을 수행하였다. Levenberg-Marquardt 기법은 Fig. 10과 같은 과정으로 진행이 되며, DCB 시험과 유한요소법 기반 모델로부터 도출한 하중에 대한 평균 제공근 오차는 Levenberg-Marquardt 기법의 목적함수가 된다. 이 때, 목적함수는 아래의 식과 같이 정의하였다.

$$\psi(p) = \sqrt{\frac{1}{m}}(r^T r) \quad (5)$$

ψ 는 목적함수를 의미하며, p 는 매개변수, m 은 하중 데이터의 개수, r 은 잔차 벡터(residual vector)다. 이 때, 잔차 벡터는 아래와 같은 식으로 도출할 수 있다.

$$r = f_{FE} - f_{DCB} \quad (6)$$

f_{FE} 는 유한요소법 기반 모델로부터 도출된 하중 데이터를 의미하며, f_{DCB} 는 DCB 시험으로부터 도출된 하중 데이터를

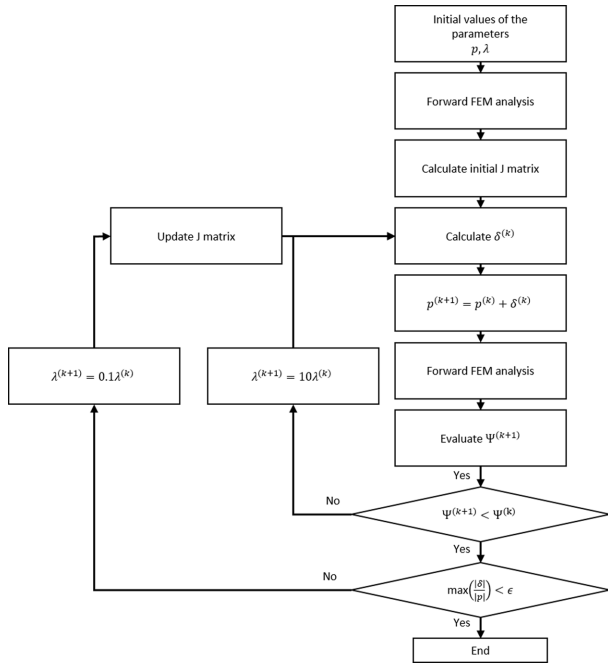


Fig. 10. Flow chart of the Levenberg-Marquardt method

의미한다.

Levenberg-Marquardt 기법을 수행하기 위해서는 초기 매개변수 값을 결정해야 한다. 그 후, 유한요소법 기반 모델로부터 하중 데이터를 획득하여 매개변수의 증분 벡터를 도출한다. 이 때, 매개변수의 증분 벡터는 아래와 같은 식으로 정의하였다.

$$\delta = [J^T J + \lambda \text{diag}(J^T J)]^{-1} J^T r \quad (7)$$

$$J = \partial r / \partial p \quad (8)$$

J 는 Jacobian 행렬을 의미하며, λ 는 감쇠 지수(damping factor), $\text{diag}(J^T J)$ 는 $J^T J$ 행렬의 대각 행렬(diagonal matrix)을 의미한다. 이 때, Jacobian 행렬은 중앙 차분법(central differential method)을 사용하여 아래와 같은 식으로 도출하였다.

$$J = \frac{1}{2\Delta p} [r(p + \Delta p) - r(p - \Delta p)] \quad (9)$$

감쇠 지수는 양의 수로 이루어진 상수이며, Levenberg-Marquardt 기법의 수렴 여부에 따라 감소하거나 증가한다 [18]. 본 연구에서는 이전의 목적함수 값이 현재 목적함수 값보다 크면 감쇠 지수를 증가시키고, 반대의 경우에는 감쇠 지수를 감소시킨다. 이는 역해석 모델의 목적함수가 수렴하지 않을 경우, 감쇠 지수가 증가하여 경사 하강법(gradient descent method)과 유사해짐을 알 수 있다. 반면에 감쇠 지수가 감소하면 가우스-뉴턴법(Gauss-Newton method)과 유사해짐을 알 수 있다. 이러한 감쇠 지수의 조절을 통해 전

반적인 해의 수렴성 및 수렴 속도를 확보할 수 있는 것이 Levenberg-Marquardt 기법의 장점이다[18]. 최종적으로 Levenberg-Marquardt 기법은 목적함수가 수렴하며, 매개변수에 대한 절대상대오차(absolute value of relative error)가 특정 값의 이하가 될 때까지 반복 수행된다. 이 때, 매개변수에 의한 상대오차는 아래의 식과 같이 정의하였다.

$$E_{\text{relative}} = \left| \frac{p_{\text{updated}} - p_{\text{old}}}{p_{\text{old}}} \right| \quad (10)$$

E_{relative} 는 이전의 매개변수와 현재의 매개변수에 대한 절대상대오차이며, p_{updated} 는 현재의 매개변수, p_{old} 는 이전의 매개변수를 의미한다. 본 논문에서는 목적함수가 수렴하며, 매개변수에 대한 절대상대오차가 10^{-5} 이하일 때 반복 수행을 종료하도록 설정하였다.

4.2 DCB 시험에 대한 역해석 수행 및 결과

본 논문에서는 Levenberg-Marquardt 기법의 매개변수로서 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 사용하였다. 초기 매개변수 값은 35 MPa의 한계응력과 1.8 N/mm의 에너지 해방률로 선정하였으며, 수학 연산 소프트웨어인 MATLAB을 사용하여 매개변수의 증분 및 Jacobian 행렬 등 역해석에 필요한 수학 연산을 수행하였다. 그 후, 유한요소법 기반 수치해석 상용프로그램인 ABAQUS와 연동하여 DCB 시험을 모사한 수치해석을 수행 후, 하중 데이터를 MATLAB이 수집하도록 하여 4.1절과 같은 과정을 반복 수행하도록 하였다.

초기 매개변수 값이 [35 MPa, 1.8 N/mm]인 경우의 역해석 결과는 Fig. 11과 같다. 7회 반복 수행하였을 때, 전반적으로 하중-변위 그래프가 실제 DCB 시험으로부터의 결과에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 매개변수인 모드 I 한계응력과 에너지 해방률이 목적함수가 최소화되는 방향으로 수렴하였다고 판단할 수 있다. Fig. 11의 최대 하중을 비교

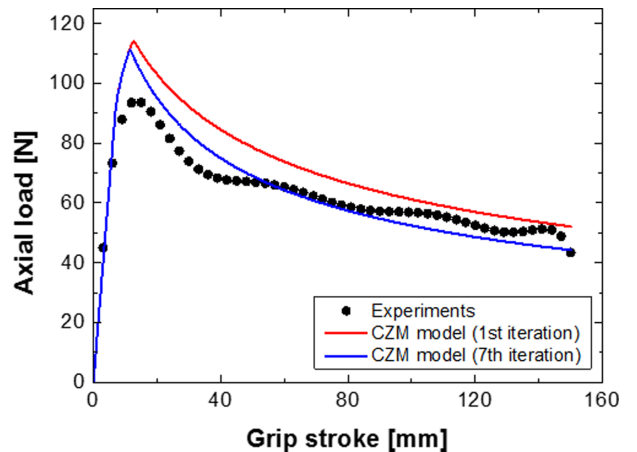
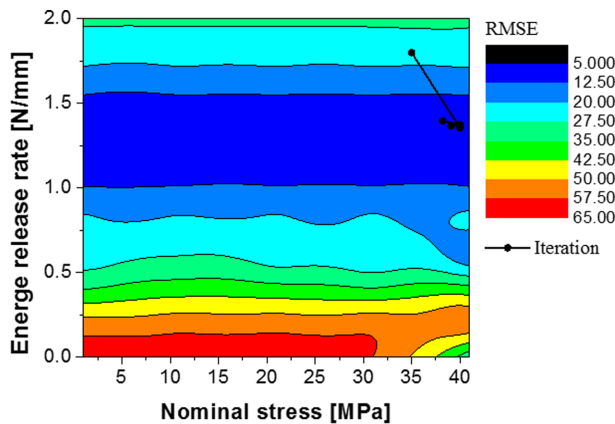
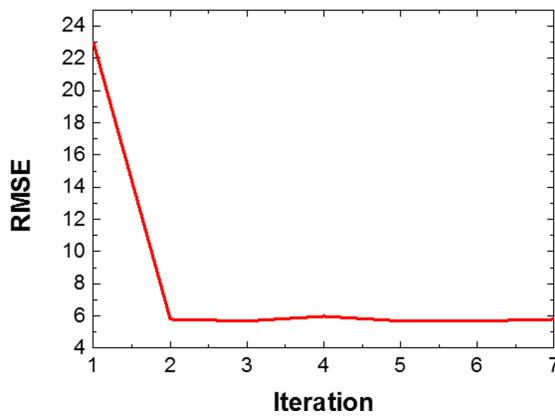


Fig. 11. Comparison of axial load curves obtained from DCB test and inverse analysis



(a) Distribution of root mean square error and path of input parameters



(b) History of root mean square error

Fig. 12. Numerical results obtained by inverse analysis; $p=[35$ MPa, 1.8 N/mm]

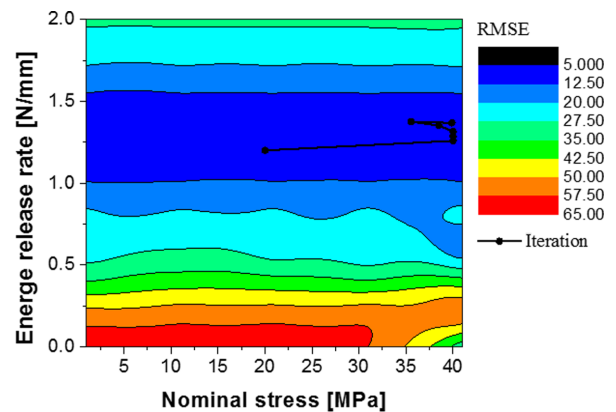
해보았을 때, 수치해석 모델로부터의 최대 하중이 DCB 시험으로부터의 최대 하중보다 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 시험편의 접착층이 균일하게 분포하지 못하기 때문에 발생한 문제라 판단된다. Fig. 12-(a)는 매개변수에 따른 평균 제곱근 오차의 분포도와 매개변수의 수렴 경로를 나타낸다. 이 때, 초기 매개변수는 평균 제곱근 오차가 최소화되는 방향으로 수렴함을 알 수 있으며, Fig. 12-(b)는 반복 횟수에 따른 평균 제곱근 오차에 대한 그래프이며, 반복 횟수에 따른 평균 제곱근 오차의 추세를 시각적으로 나타내었다. 결과적으로 평균 제곱근 오차가 반복 횟수 2회부터 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, Levenberg-Marquardt 기법으로부터 약 39.1541 MPa의 모드 I 한계응력과 약 1.3685 N/mm의 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다. 실제 DCB 시험으로부터 도출한 모드 I 한계응력과 에너지 해방률과 비교하였을 때, 모드 I 한계응력은 약 29% 증가하였다. 모드 I 에너지 해방률의 경우, MBT 방법에 의한 모드 I 에너지 해방률보다 약 15% 증가하였으며, CCM 방법에 의한 모드 I 에너지 해방률보다 약 24% 감소함을 알 수 있다.

4.3 초기 매개변수에 따른 수렴성 확인

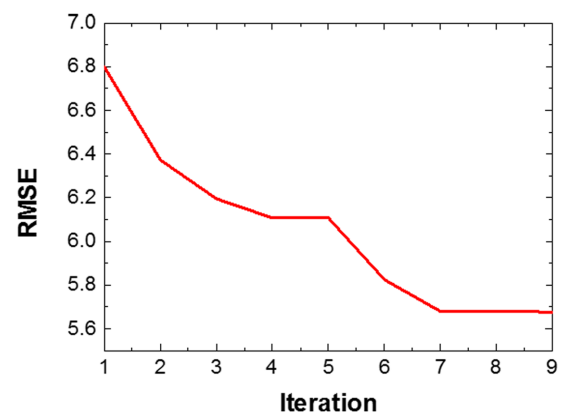
Levenberg-Marquardt 기법은 초기 매개변수의 값과 수렴 속도에 따라 기대값과 다른 국부 최솟값(bad local minimum)에 수렴할 수 있는 단점을 가지고 있다[19]. 따라서, Levenberg-Marquardt 기법을 사용한 역해석 기법을 수행할 때, 여러 가지 경우의 초기 매개변수를 설정하여 수렴성 여부를 판단해야만 한다. 본 연구에서는 Table 4와 같이 두 가지 경우의 초기 매개변수를 선정하여 역해석 기법을 수행하였다. Fig. 13와 Fig. 14는 각 경우에 대한 평균 제곱근 오차 분포도와 매개변수의 수렴경로, 그리고 반복 횟수에 따른 평균 제곱근 오차를 나타내었으며, Fig. 13-(a)에서 초기에 모드 I 한계응력이 최대 한계응력으로 설정한 40 MPa로 갱신되었기 때문에 Fig. 12-(a)와 비교하였을 때 좀더 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 13-(b)와 같이 반복 횟수가

Table 4. Two-additional cases of initial parameters

Case	Mode-I nominal stress	Mode-I energy release rate
1	20 MPa	1.2 N/mm
2	10 MPa	1.5 N/mm



(a) Distribution of root mean square error and path of input parameters



(b) History of root mean square error

Fig. 13. Numerical results obtained by inverse analysis; $p=[20$ MPa, 1.2 N/mm]

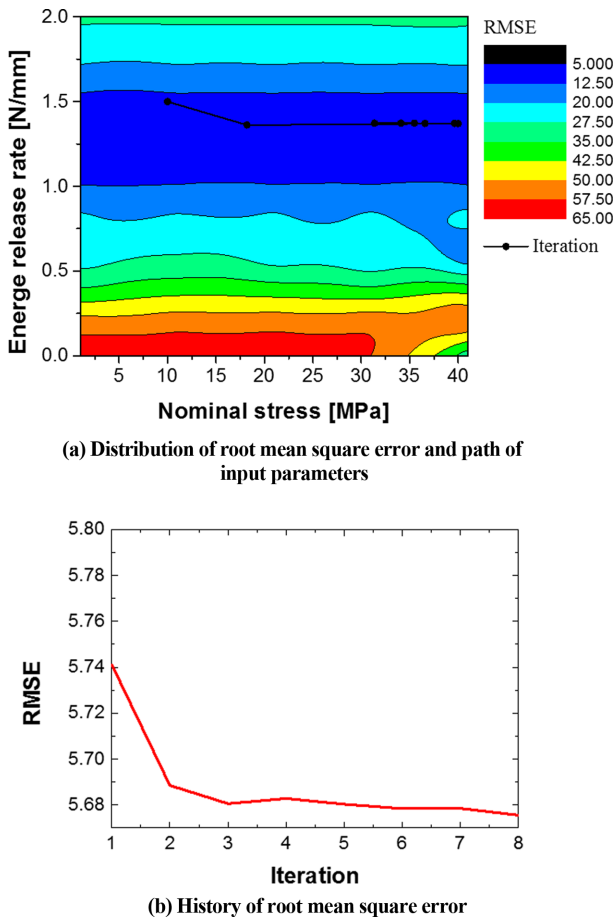


Fig. 14. Numerical results obtained by inverse analysis; $p=10$ MPa, 1.5 N/mm]

Table 5. Numerical results of two-additional cases of initial parameters

Case	Mode-I nominal stress	Mode-I energy release rate
1	39.8792 MPa	1.3692 N/mm
2	39.6330 MPa	1.3710 N/mm

7회 이후가 되었을 때, 매개변수가 수렴함을 알 수 있다. Fig. 14-(a)의 경우에도 초기에 매개변수가 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있으며, Fig. 14-(b)에서 반복 횟수가 8회 일 때, 매개변수가 수렴함을 알 수 있다. 두 가지 경우의 초기 매개변수 값을 설정하여 역해석 기법을 수행한 후, 최종적으로 수렴된 매개변수 값은 Table 5와 같다. 4.2절에서 도출한 모드 I 한계응력과 비교하였을 때 최대 약 1.2%의 상대오차가 발생하였으며, 모드 I 에너지 해방률과 비교하였을 때는 최대 약 0.2%의 상대오차가 발생하였다. 이는 수렴과정 중 서로 다른 매개변수가 기대값으로 수렴한다고 판단할 수 있다. 또한, 반복 횟수에 따른 평균 제공근 오차에 대한 그래프에 따르면, 첫 번째 반복 수행 이후에 평균 제공근 오차가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 Levenberg-

Marquardt 기법을 기반한 역해석 기법은 시간과 비용적인 측면에서 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 효과적으로 예측할 수 있다고 판단할 수 있으며, 고온 조건에서의 DCB 시험과 같이 층간분리 길이를 측정하기 어려운 상황에서 효과적인 대안이 될 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 폴리프로필렌 접착층의 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 예측하기 위해 Levenberg-Marquardt 기법을 기반한 역해석 기법을 수행하였다. 실험적 방법으로 모드 I 한계응력은 접착층의 인장강도와 같다고 가정하였으며, 모드 I 에너지 해방률은 DCB 시험을 수행하여 MBT와 CCM 방법으로 도출하였다. 그 후, 이전 연구에서 수행한 응집영역모델을 활용한 유한요소법 기반 수치해석 모델을 사용하여 MBT와 CCM 방법으로부터 도출한 모드 I 에너지 해방률에 따른 하중-변위 그래프를 비교하였다. 이때, MBT 방법이 상대적으로 실험값과 유사한 경향을 보였지만, 약 121 mm의 변위에서 완전 분리가 발생함을 보였으며, DCB 시험으로부터 발생한 오차에 의해 모드 I 에너지 해방률을 명확히 예측하지 못함을 알 수 있었다. 따라서, Levenberg-Marquardt 기법을 사용하여 약 39.1541 MPa의 모드 I 한계응력과 약 1.3685 N/mm의 에너지 해방률을 예측하였다. 또한, Levenberg-Marquardt 기법의 단점인 기대값과 다른 국부 최솟값으로의 수렴 여부를 확인하고자 두 가지 경우의 초기 매개변수를 선정하여 역해석을 수행하였으며, 이전에 예측한 매개변수와 비교하였을 때, 모드 I 한계응력은 최대 약 1.2%, 모드 I 에너지 해방률은 최대 약 0.2%의 상대오차를 보여 매개변수가 기대값과 다른 국부 최솟값에 수렴하지 않음을 보였다.

본 연구에서 수행한 Levenberg-Marquardt 기법은 첫 번째 반복 횟수 이후 매개변수가 빠르게 수렴함을 보였으며, 시간과 비용적 측면에서 접착층의 모드 I 한계응력과 에너지 해방률을 효과적으로 예측할 수 있음을 보였다. 또한, 층간 분리 길이를 측정하기 위한 장비가 사용되기 어려운 조건에서 역해석 기법은 효과적인 대안이 될 수 있으리라 판단된다. 더불어, 역해석 기법을 활용하여 모드 II와 III에 대한 한계응력 및 에너지 해방률을 충분히 예측할 수 있으리라 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)과 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원-산업용 무인비행장치 전문인력양성사업(No. G02N05660000601)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관

제자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Vermeeren, C.A.J.R., "An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates," *Applied Composite Materials*, Vol. 10, No. 4, 2003, pp. 189-205.
2. Park, E.T., Kim, J., Kang, B.S., and Song, W.J., "Numerical Study on Performance Evaluation of Impact Beam for Automotive Side-Door using Fiber Metal Laminate," *Composites Research*, Vol. 30, No. 2, 2017, pp. 158-164.
3. Reyes, G., and Kang, H., "Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber-Metal Laminates," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, 2007, pp. 284-290.
4. Blackman, B.R.K., Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Paraschi, M., and Williams, J.G., "The Calculation of Adhesive Fracture Energies in Mode I: Revisiting the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 2, 2003, pp. 233-248.
5. Lee, B.E., Park, E.T., Ko, D.C., Kang, B.S., and Song, W.J., "Evaluation of Fracture Behavior of Adhesive Layer in Fiber Metal Laminates using Cohesive Zone Models," *Composites Research*, Vol. 29, No. 2, 2016, pp. 45-52.
6. Tsai, G.C., and Chen, J.W., "Effect of Stitching on Mode-I Strain Energy Release Rate," *Composite Structures*, Vol. 69, No. 1, 2005, pp. 1-9.
7. Davidson, P., Waas, A.M., and Yerramalli, C.S., "Experimental Determination of Validated, Critical Interfacial Modes I and II Energy Release Rates in a Composite Sandwich Panel," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, 2012, pp. 477-483.
8. Becht, G., and Gillespie, J.R.J.W., "Design and Analysis of the Crack Rail Shear Specimen for Mode III Interlaminar Fracture," *Composites Science and Technology*, Vol. 31, No. 2, 1988, pp. 143-157.
9. De Morais, A.B., De Moura, M.F., Marques, A.T., and De Castro, P.T., "Mode-I Interlaminar Fracture of Carbon/Epoxy Cross-Ply Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 5, pp. 679-686.
10. Heidari-Rarani, M., Shokrieh, M.M., and Camanho, P.P., "Finite Element Modeling of Mode I Delamination Growth in Laminated DCB Specimens with R-Curve Effects," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, 2013, pp. 897-903.
11. Woo, K.S., and Cairns, D.S., "Fracture Analysis of Notched Laminated Composites using Cohesive Zone Modeling," *Composites Research*, Vol. 30, No. 2, 2017, pp. 149-157.
12. Jang, J.H., Sung, M.C., and Yu, W.R., "Numerical Simulation of the Delamination Behavior of Polymeric Adhesive Tapes using Cohesive Zone Element," *Composites Research*, Vol. 29, No. 4, 2016, pp. 203-208.
13. Xu, Y., Li, X., Wang, X., and Liang, L., "Inverse Parameter Identification of Cohesive Zone Model for Simulating Mixed-Mode Crack Propagation," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 13, 2014, pp. 2400-2410.
14. Jin, G., Wu, P., Xu, Y., Liang, L., and Liu, Y., "Determination of Solder/Cu Interfacial Cohesive Zone Model Parameters by Inverse Analysis, Proceeding of the 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, Chengdu, China, Aug. 2014, pp. 610-614.
15. Chen, X., Deng, X., Sutton, M.A., and Zavattieri, P., "An Inverse Analysis of Cohesive Zone Model Parameter Values for Ductile Crack Growth Simulations," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 79, 2014, pp. 206-215.
16. ASTM D5528-13, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, 2013.
17. Simulia, D.S., ABAQUS User's Manual, Dassault Systems, 2013.
18. Gavin, H., "The Levenberg-Marquardt Method for Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems," Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, USA, 2011, pp. 1-15.
19. Whitney, D., "Optimum Step Size Control for Newton-Raphson Solution of Nonlinear Vector Equations," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 14, No. 5, 1969, pp. 572-574.