

응집 영역 요소를 이용한 고분자 접착 테이프의 박리거동 모사

장진혁* · 성민창* · 유웅열*[†]

Numerical Simulation of the Delamination Behavior of Polymeric Adhesive Tapes Using Cohesive Zone Element

Jinhyeok Jang*, Minchang Sung*, Woong-Ryeol Yu*[†]

ABSTRACT: Metal and polymer sandwich composites, which are made of sheet metal sheath and polymer or fiber reinforced plastic core, have been reconsidered as an alternative to sheet metal due to their lightness and multifunctional properties such as damping and sound-proof properties. For the successful applications of these composites, the delamination prediction based on the adhesion strength is important element. In this study, the numerical simulation of the delamination behavior of polymeric adhesive tapes with metallic surfaces was performed using cohesive zone elements and finite element software. The traction-separation law of the cohesive zone element was defined using the fracture energy derived from peel mechanics and experimental results from peel test and implemented in finite element software. The peel test of the polymeric adhesive film against steel surface was simulated and compared with experiments, demonstrating reasonable agreement between simulation and experiment.

초 록: 금속/고분자 샌드위치 복합재는 경량성과 제진, 방음 등의 다기능성의 측면에서 기존의 스틸 강판을 대체할 후보 중 하나로서 연구되고 있다. 금속/고분자 복합재의 활용하기 위해서는 접착력을 바탕으로 한 박리 거동 예측이 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 응집요소를 사용하여 유한요소 해석을 통해 접착제를 사용한 고분자 테이프의 박리거동 해석을 수행하였다. 응집요소의 특성은 박리시험과 역학 관계로부터 도출한 파괴인성을 통해 정의하였고 이를 해석에 적용하였다. 스틸 강판에서 고분자 테이프를 박리하는 시험을 모사하였고, 해석결과와 시험결과를 비교하여 박리 거동 모사가 가능함을 확인하였다.

Key Words: 전산 모사(Numerical simulation), 박리(Delamination), 고분자 테이프(Polymeric adhesive tape), 응집영역 요소(Cohesive zone element)

1. 서 론

금속/고분자 샌드위치 구조의 복합재는 경량성과 제진, 방음 등의 다기능성의 측면에서 기존의 스틸 강판을 대체할 것으로 기대되며 자동차, 선박, 비행기 등의 산업에서 사용될 것으로 전망하고 있다[1,2]. 하지만 금속/고분자 복합재의 경우 금속과 고분자의 물성에 비해 약한 계면 특성의

로 인하여 쉽게 박리가 일어나고 이는 금속/고분자 복합재의 신뢰성을 저하시킨다[3]. 이 때문에 금속/고분자 복합재에서의 계면에 대한 이해는 중요하며, 접착력을 바탕으로 한 박리거동 예측이 필요하다.

계면의 접착력을 평가하는 위해서 초기 점착력 측정시험(probe tack test), 전단접착강도시험(dynamic shear test), 박리시험(peel test) 등이 사용되고 있다. 이 중 박리시험은

Received 18 January 2016, received in revised form 25 June 2016, accepted 30 August 2016

*Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University

[†]Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Corresponding author (E-mail: woongryu@snu.ac.kr)

얇은 필름을 접착 판에 부착시킨 후 일정 온도, 습도 조건에서 일정한 속도로 필름을 떼어낼 시 강도를 측정하는 방법으로서 쉽게 계면의 접착력을 박리강도로써 평가할 수 있다는 점에서 많은 연구에서 이를 사용하고 있다[4,5]. 접착을 평가하는 측면에서 박리시험에 대한 이해는 매우 중요하며, 이때의 역학관계를 규명하고자 하는 노력이 있었으며[6,7], 다양한 필름 형태의 박리 과정에 대해서 유한요소 해석을 이용하여 모사를 하기 위한 연구들도 다수 진행되고 있다[8,9].

본 연구에서는 박리시험에서의 역학관계를 통해 접착에너지를 구하는 식을 도출하고, 이를 고분자 테이프의 박리시험에 적용하였다. 또한 박리시험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 유한요소해석 프로그램을 이용하여 박리해석을 진행, 그 거동을 모사하는 연구를 수행하였다.

2. 박리과정에서의 역학관계

고분자 테이프에서의 박리 역학관계에 대한 식은 Kendall[10]에 의해 제안된 식을 사용하였다. 고분자 테이프가 탄성변형을 한다고 가정한다면 Fig. 1에서 보듯이 Δc 만큼 고분자 테이프의 박리가 진행될 때의 외부에서 해준 일(W_p), 소모되는 계면접착 에너지(U_s), 탄성 변형에너지(U_E)는 다음과 같이 나타낸다.

$$W_p = F\Delta c(1 - \cos\theta) + \frac{F^2\Delta c}{Ebd} \quad (1)$$

$$U_s = bG\Delta c \quad (2)$$

$$U_E = \frac{F^2\Delta c}{2Ebd} \quad (3)$$

여기서 E 는 고분자 필름의 탄성계수, b 는 고분자 필름의 너비, d 는 고분자 필름의 두께, G 는 고분자 필름과 강판 사이의 파괴인성이다. 이때, 에너지 보존법칙에 의하여 박리강도와 단위면적당 고분자 필름과 강판 사이의 파괴인성에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

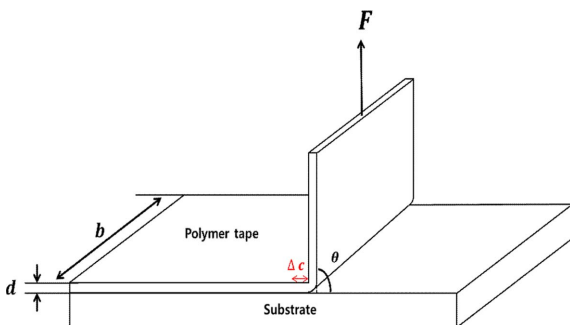


Fig. 1. Polymer film peeling from a rigid substrate

$$W_p = U_s + U_E \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{2dE} \left(\frac{F}{b} \right)^2 + \left(\frac{F}{b} \right) (1 - \cos\theta) \quad (5)$$

90도 박리시험을 통해 얻어지는 박리강도를 식 (5)에 적용하여 계면의 파괴인성을 구하면 아래의 식 (6)과 같고, 이를 응집요소를 통한 박리거동 모사에 적용한다.

$$G = \frac{1}{2dE} \left(\frac{F}{b} \right)^2 + \left(\frac{F}{b} \right) \quad (6)$$

3. 고분자 테이프의 박리시험 및 해석

3.1 고분자 테이프 박리시험

박리시험에 고분자 테이프는 810 scotch magic tape(3M)을 사용하였고, 접착 판(substrate)은 전기도금강판(POSCO)를 사용하였다. 각각의 물성은 고분자 테이프의 경우 제공한 회사의 문헌 값을 통해 구하였고, 강판은 UTM(Universal testing machine) (Instron 8801)을 통한 인장시험을 통해 값을 얻었으며, 그 값은 Table 1에 표기하였다.

고분자 테이프를 부착하기 전 전기도금강판의 표면 조도는 원자간력 현미경(Atomical Force Microscope)를 통해 측정하였으며, 이를 통해 구한 평균 표면 조도 값은 19.9 nm로 측정되었다.

강판에 고분자 테이프를 붙이고 Fig. 3와 같이 90도 박리시험을 진행하였다. 이때 시험편의 폭은 24 mm, 길이는 110 mm로 구성하였다. 박리속도는 박리시험의 ASTM 규격(ASTM D3330)에 맞춰 5.0 ± 0.2 mm/s로 유지하며 시험을 진행하였다.

Table 1. Material properties of polymeric adhesive tape and steel substrate

	Thickness (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Elongation (%)
810 scotch magic tape	0.0625	450	25
Steel substrate	0.6	110000	43

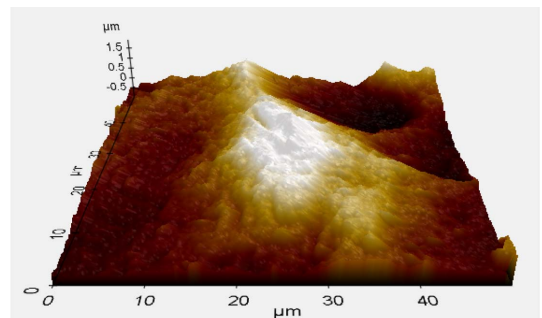


Fig. 2. AFM images of electro-galvanized steel surface

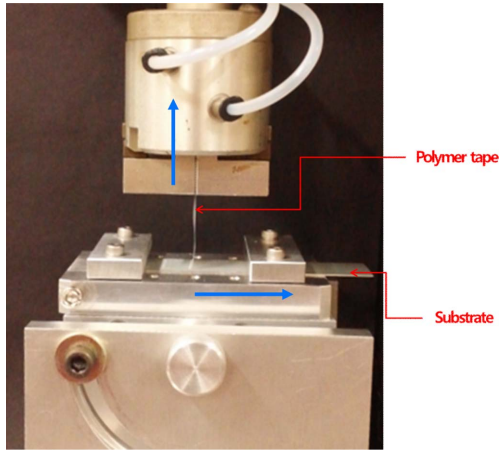


Fig. 3. Experimental configuration for polymer tape peeling

3.2 박리거동 모사 해석

고분자 테이프의 박리거동모사 해석을 위해서 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS 6.13을 사용하였다. 모델의 단순화를 위해 Fig. 4과 같이 고분자테이프 층, 접착계면을 이루는 응집 요소 층, 강판 층의 3개의 층으로 구성된 2차원 모델을 사용하였다. 응집요소와 고분자 테이프, 강판 층은 각각을 tie 구속조건을 주어 연결하여 해석 조건을 구성하였다. 그리고 본 연구에서는 변위조건을 변화시켜 박리시험과 유사한 형태의 해석을 진행하는 기하 비선형 해석 방식을 사용하였다.

본 해석에서는 고분자 테이프와 강판 계면의 접착특성을 모사하기 위해 응집요소를 사용하였다. 이때 사용한 응집요소의 두께는 0.005 mm로 설정하였다. 응집요소의 파손 특성은 응집응력-분리관계(traction-separation law)에 의해 정의된다. 선형, 사다리꼴, 지수함수 형태 등의 다양한 함수의 형태가 제시되었으나, 본 연구에서는 해석의 효율성과 비용적 측면에서 Fig. 5의 선형 응집응력-분리관계(traction-separation law)를 사용하였다. 선형 응집응력-분리관계에서의 파괴인성은 응집응력-분리 관계에서의 면적과 같고 아래 식 (7)의 관계를 갖는다.

$$G = \frac{1}{2} \times \sigma_0 \times \delta_f \quad (7)$$

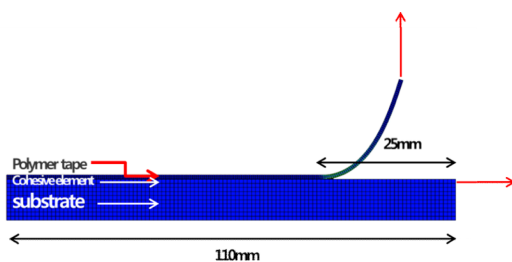


Fig. 4. Simulation configuration for specimen

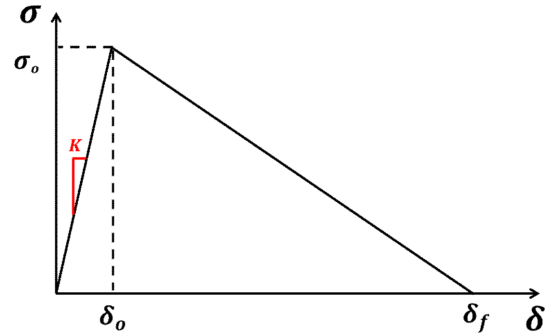


Fig. 5. Traction-separation law for cohesive element

본 연구에서는 90도 박리시험만을 진행하여 모드 I 방향의 파괴인성 값만을 구하였다. 그래서 본 연구에서는 모드 II 방향의 파괴인성 값은 박리시험에서 구한 모드 I 방향의 파괴인성 값과 같다고 가정하였다. 혼합모드에 대한 고려를 위한 파손의 시작 조건(Failure initiation criterion)과 최종 파손의 판단 기준(Failure propagation criterion)은 아래의 식 (8)과 (9)의 Ye[11]에 의해 제시된 2차 관계를 사용하였다.

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1c}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2c}}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{G_1}{G_{1c}}\right)^2 + \left(\frac{G_2}{G_{2c}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

박리 시험을 통해 고분자 테이프와 강판 사이의 파괴인성을 구하고, 접착특성을 응집요소의 관계로 정의하였으며, 박리조건에 따른 해석을 통해 최적화한 해석 조건을 통해 박리 과정을 모사하였다.

4. 결과 및 토의

고분자 테이프의 90도 박리시험을 진행한 결과는 Fig. 6와 같다.

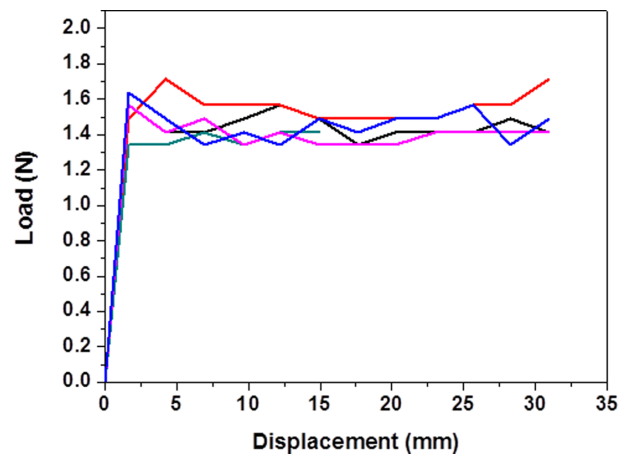


Fig. 6. The load-displacement curve for peel test of polymer tape

박리가 진행되기 시작한 후에는 대체로 일정한 박리강도를 보이며 이때의 하중을 폭을 고려하여 평균을 내어 박리강도를 계산하면 $0.2 \pm 0.02 \text{ N/mm}$ 이다. 시편마다 일정한 박리강도를 보이고 평균에 비해 큰 오차를 보이지 않는 것으로 보아 박리 시험으로 얻은 결과는 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 박리강도를 이용하여 박리 역학관계를 통해 유도된 식 (6)에 적용하여 고분자 테이프와 강판 사이의 파괴인성을 아래와 같이 계산하였다.

$$G = \frac{1}{2 \times (0.0625 \text{ mm}) \times (450 \text{ N/mm}^2)} (0.2 \text{ N/mm})^2 + (0.2 \text{ N/mm})$$

$$= 0.2007 \text{ N/mm} \approx 0.2 \text{ N/mm}$$

구해진 파괴인성을 식 (7)에 적용하여 이를 모드 I, II 방향의 파괴인성(G_{1c} , G_{2c})로 설정하였다. 최적 해석 조건을 찾기 위해 응집요소의 응집응력-분리 관계의 강성(K), 응집

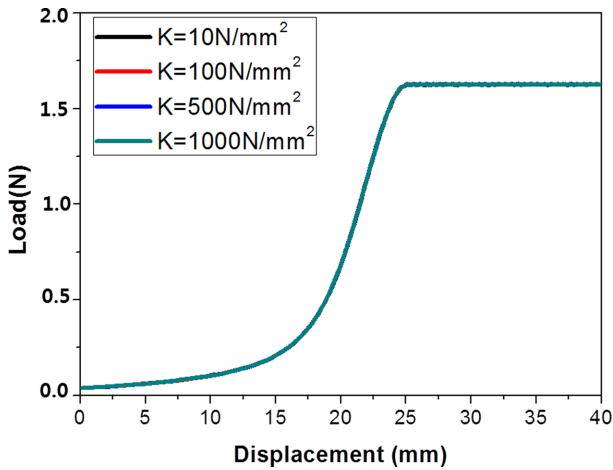


Fig. 7. The peel force-displacement curve for peel simulation according to the stiffness of cohesive element

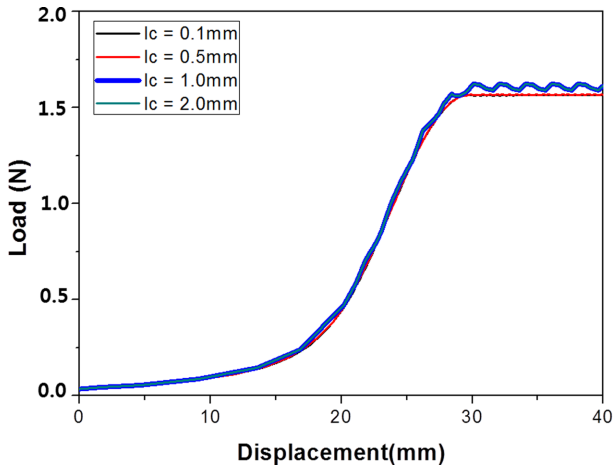


Fig. 8. The peel force-displacement curve for peel simulation according to the size of cohesive element

요소의 크기(l_c)와 임계 분리 값(δ_f)을 달리하여 해석을 진행하였다. 먼저 응집요소의 강성(K)을 달리하여 해석을 진행한 결과, 해석 조건내의 강성의 변화에 따라서는 결과가 크게 변화하지 않음을 확인하였다(Fig. 7).

응집요소의 크기(l_c)에 따라 해석한 결과 응집요소의 크기가 작을수록 해석이 잘 수렴하고 안정적으로 진행됨을 확인하였다(Fig. 8).

마지막으로 임계 분리 값(δ_f)에 따라 해석한 결과 임계 분리 값에 따라 해석 결과가 크게 차이가 남을 확인하였다. 임

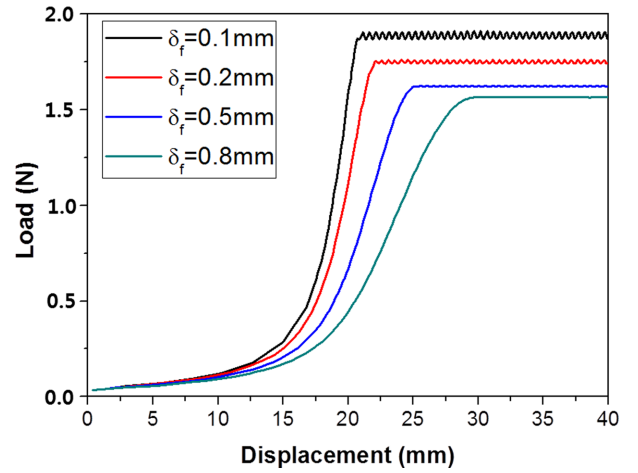


Fig. 9. The peel force-displacement curve for peel simulation according to the critical length of cohesive element

Table 2. Properties of cohesive element

$K \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_f \text{ (mm)}$
100	0.5	0.8

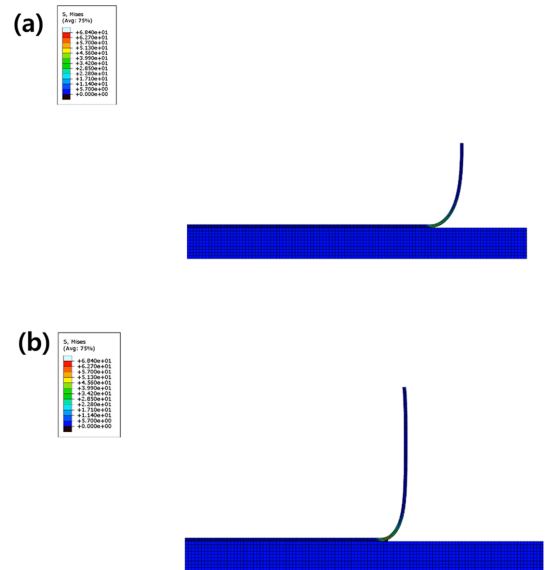


Fig. 10. Peeling analysis result of polymer tape; (a) before peeling, (b) after peeling

계 분리값의 크기가 일정수준 이상인 경우 가장 실험결과와 근접함을 확인할 수 있었다(Fig. 9).

위의 응집요소 조건 변화를 통해 최적 해석 조건을 만족하는 응집요소의 응집응력-분리관계를 설정하였고, 해석에 사용한 응집요소의 물성 값은 Table 2에 정리하였다.

응집응력-분리 관계로 정의된 응집요소를 두 계면 사이의 접착 층으로 설정하여 박리시험 모사에 수행하였다. Fig. 10은 유한요소 해석을 통한 박리 시험 전과 후의 모습을 보여주고 있다. 실제의 시험과 같은 형태로 90도의 일정한 각도를 유지하며 박리 거동 모사가 진행됨을 확인하였다.

Fig. 11의 결과를 보면 박리지점 근처 테이프 부근에 응력이 집중됨을 확인할 수 있으며 이는 굽힘에 의한 응력집중으로 인한 것으로 판단된다. 박리가 진행됨에 따라 응집요소가 최종 파손에 해당하는 파괴인성 값에 도달하게 되면 파손이 되면서 박리 해석이 진행됨을 확인하였다.

Fig. 12에서는 박리 거동 모사를 통해 얻어진 박리강도와 변위와의 관계를 나타내고 이를 실험 결과와 비교하였다. 박리 거동 모사를 통해 결과를 얻었을 때 박리 중에는 일정한 강도를 나타내는 해석이 진행됨을 확인하였고, 이는 실

제 박리시험의 결과와 일치하였다. 또한 도출된 박리강도 값과 비교하였을 때, 시험과 해석의 데이터들 간에 큰 차이가 없었음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 실제 박리시험 측정을 통해 얻은 박리강도와 박리역학을 통해 규명한 파괴인성과의 관계를 이용하여 계면 특성을 응집요소로 정의할 수 있음을 확인하였고, 실제의 시험과 비교하였을 때 신뢰할 수 있는 모사가 진행되었음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 고분자 테이프의 박리거동 해석을 위해 박리 시험에서의 역학 관계를 통해 파괴인성과 박리강도의 관계식을 도출하였다. 이를 통해 실제 박리시험 결과를 통해 얻어진 접착에너지를 응집요소에 적용하여 고분자 테이프의 박리거동 과정을 해석하였다. 박리강도가 시험 결과와 해석 결과가 차이가 없다는 결론으로부터 박리강도로부터 도출한 계면의 파괴인성을 응집요소에 적용하여 계면특성을 정의하면 고분자 테이프의 박리시험을 모사할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2015년 포스코의 재원을 통한 “기능성 전략소재 기술 개발” 과제의 일환으로 수행된 연구이며, 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단-선도연구센터지원사업사업(NO. NRF-2015R1A5A1037627)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Rao Mohan, D., “Recent Application of Viscoelastic Damping for Noise Control in Automobiles and Commercial Airplanes”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, Issue. 3, 2003, pp. 457-474.
2. Kim, K.J., Kim, C.W., Choi, B.I., Sung, C.W., Kim, H.Y., Won, S.T., and Ryu, H.Y., “Formability of Aluminum 5182-polypropylene Sandwich Sheet for Automotive Application”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 2, Issue. 4, 2008, pp. 574-581.
3. Li, H., Chen, J., and Yang, J., “Experiment and Numerical Simulation on Delamination during the Laminated Steel Sheet Forming Processes”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, Issue. 1-4, 2013, pp. 641-649.
4. Shon, M.-Y., Lee, J.-K., and Hong, J.-L., “Investigation of Adhesion Property between Glass Fiber Reinforced Plastic and Polyurethane Adhesives on Peel Strength under Cryogenic Temperature”, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 4, 2009, pp. 13-19.
5. Shon, M.-Y., “Evaluations of Lap Shear and Peel Strength for

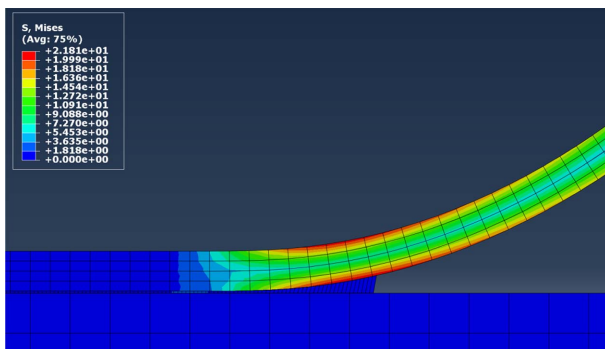


Fig. 11. Simulation result showing Von Mises stress around delamination zone at steady state peeling

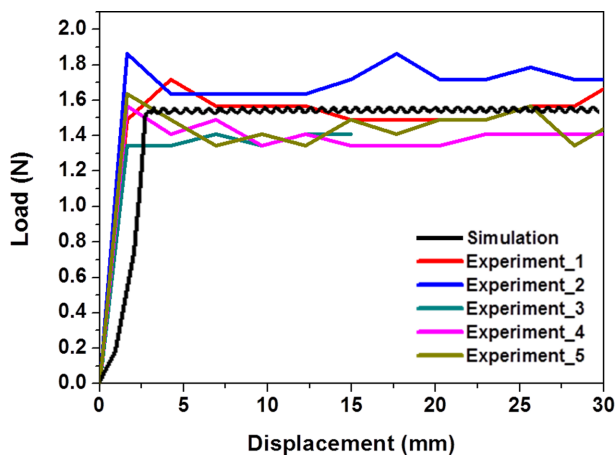


Fig. 12. The peel force-displacement curve for peel simulation and experiments of polymeric adhesive tape

- Epoxy and Polyurethane Adhesive Bonded Triplex Sheets at Cryogenic Temperatures,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 39-45.
6. Thouless, M.D., and Jensen, H.M., “Elastic Fracture Mechanics of the Peel-test Geometry”, *The Journal of Adhesion*, Vol. 38, 1992, pp. 185-197.
 7. Galamas, P., Völker, B., Collino, R.R., Begley, M.R., and McMeeking, R.M., “Peeling of an Elastic Membrane Tape Adhered to a Substrate by a Uniform Cohesive Traction”, *International Journal of Solid and Structure*, Vol. 51, 2014, pp. 3003-3011.
 8. Hanna Bruce and Christian Holmqvist, “Modelling Adhesion in Packing Materials Physical Tests and Virtual Tests in Abaqus, Division of Structural Mechanics”, Lund university, Sweden, 2013.
 9. Pelfrene, J., VanDam, S., and VanPaepegem, W., “Numerical Analysis of the Peel Test for Characterization of Interfacial Debonding in Laminated Glass”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 62, 2015, pp. 146-153.
 10. Kendall, K., “Thin-film Peeling-the Elastic Term”, *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol. 8, No. 13, 1975, pp. 1449.
 11. Ye, L., “Role of Matrix Resin in Delamination Onset and Growth in Composite Laminates”, *Composites Science and Technology*, Vol. 4, 1988, pp. 257-277.