

종류가 다른 부직포가 삽입된 하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴인성

정종설* · 정성균**†

Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites Inserted with Different Types of Non-woven Tissues

Jong-Seol Jeong*, Seong-Kyun Cheong**†

ABSTRACT: The mode II interlaminar fracture toughness was evaluated for CFRP laminates with different types of non-woven tissues and the source of increased mode II interlaminar fracture toughness was examined by SEM analysis in this paper. The interlaminar fracture toughness in mode II is obtained by an end notched flexure test. The experiment is performed using three types of non-woven tissues: 8 g/m² of carbon tissue, 10 g/m² of glass tissue, and 8 g/m² of polyester tissue. On the basis of the specimen with no non-woven tissue, interlaminar fracture toughness on mode II at specimens inserted with non-woven carbon and glass tissues and polyester tissues increases as much as 166.5% and 137.1% and 157.4% respectively. The results show that mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates inserted with non-woven tissues increased due to the fiber bridging, fiber breakage, and hackle etc. by SEM analysis.

초 록: 본 연구에서는 CFRP 적층판에 다양한 종류의 부직포를 삽입하여 모드 II 층간파괴인성을 평가하고, 파단면의 SEM 분석을 통해 층간파괴인성의 증가 원인을 파악하였다. 모드 II 층간파괴인성값(J/m²)은 ENF실험에 의하여 얻어졌으며, 부직포를 삽입하지 않은 시편과 3종류의 부직포(8 g/m²의 탄소부직포, 10 g/m²의 유리부직포, 8 g/m²의 폴리에스테르부직포)가 각각 삽입된 시험편들이 준비되었다. 각 시험편들에 대한 모드 II 층간파괴인성값은 부직포를 삽입하지 않은 시편을 기준으로 탄소부직포를 삽입한 시편은 197.7% 증가하였고, 유리부직포를 삽입한 시편은 약 135.4% 증가하였으며, 폴리에스테르부직포를 삽입한 시편은 약 158.7% 증가하였다. 부직포 삽입에 의한 모드 II 층간파괴인성값의 증가 원인은 SEM 분석에 의한 결과 단섬유의 섬유가교(Fiber bridging), 섬유파단(Fiber breakage), 헵클(Hackle) 등의 발생에 기인된 것으로 확인되었다.

Key Words: 탄소섬유강화복합재료(CFRP: carbon fiber reinforced plastic), 하이브리드 복합재료(hybrid laminates), 부직포(non-woven tissue), 탄소부직포(non-woven carbon tissue), 유리부직포(non-woven glass tissue), 폴리에스테르부직포(non-woven polyester tissue), 모드 I(Mode I), 모드 II(Mode II), 층간파괴인성(interlaminar fracture toughness)

1. 서 론

탄소섬유강화 적층 복합재료는 타 재료에 비해 강도

(Strength), 강성도(Stiffness), 내식성(Corrosion resistance), 피로수명(Fatigue), 내마모성(Wear resistance), 내충격성(Impact resistance), 경량화(Weight reduction) 등이 우수한

접수: 2013년 2월 20일, 수정: 2013년 3월 29일, 게재승인: 2013년 4월 05일

*서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원

**†서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, Corresponding author(E-mail: skjung@snut.ac.kr)

반면에 외부의 충격에 의한 층간파괴(Interlaminar fracture)가 일어나는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법 중에서 고인성의 수지나 고무입자를 첨가한 에폭시수지를 사용하거나[1-3], 층간에 고인성의 필름을 삽입하는 방법[4,5], 휘스커를 층간에 분포하는 방법[6], 최근에는 스테인리스 핀을 적층방향의 Z-방향으로 삽입하는 방법[7-9]이 제시되고 있다. 이러한 방법 중에서 탄소부직포를 삽입하는 방법[10,11]이나 실크(Silk fiber)를 삽입하는 방법[12]은 비교적 성형이 쉽고 층간파괴인성이 현저히 증가하는 장점이 있다. 부직포의 종류에는 탄소부직포, 유리부직포, 폴리에스테르부직포 등이 있다. 부직포(NWT)는 직경 $12\ \mu\text{m}$, 길이 $3\sim 15\ \text{mm}$ 인 단섬유가 평면상에 불규칙적으로 배치된 구조이며 공기층을 포함하고 있기 때문에 두께는 일정하지 않다. 그러므로 부직포는 단위면적당 무게로 표시하고 있다. 저자 등은 탄소부직포, 유리부직포, 폴리에스테르 부직포를 삽입한 시편에 대한 모드 I 층간파괴인성을 실험적으로 연구하였다. 그 결과 부직포를 삽입하지 않은 시편을 기준으로 탄소부직포를 삽입한 시편은 6.3% 감소하였고, 유리부직포를 삽입한 시편은 약 11.4% 감소한 반면 폴리에스테르부직포를 삽입한 시편은 약 69.4% 증가하였다[13]. 적층형 복합재료의 충격저항은 모드 I과 모드 II 충격저항에 복합적으로 의존한다. 그러므로 위와 같은 부직포 종류별로 모드 I, 모드 II 층간파괴 인성 데이터 확보가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 탄소부직포, 유리부직포, 폴리에스테르부직포를 삽입한 하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴특성(G_{IIC})을 연구하여 데이터를 확보하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

부직포가 삽입된 하이브리드 복합재료의 모드 II 층간파괴특성(G_{IIC}) 평가를 위하여 CFRP 프리프레그(SK-Chemicals, USN125 series)와 에폭시 레진 필름(SK-Chemicals, #SKR2514)을 붙인 $8\ \text{g/m}^2$ 의 탄소부직포[14,15], $10\ \text{g/m}^2$ 의 유리부

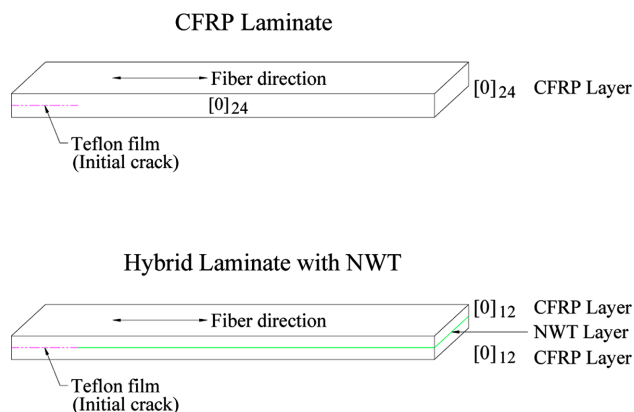


Fig. 1. Lay-up of CFRP and NWT interleaved hybrid laminates.

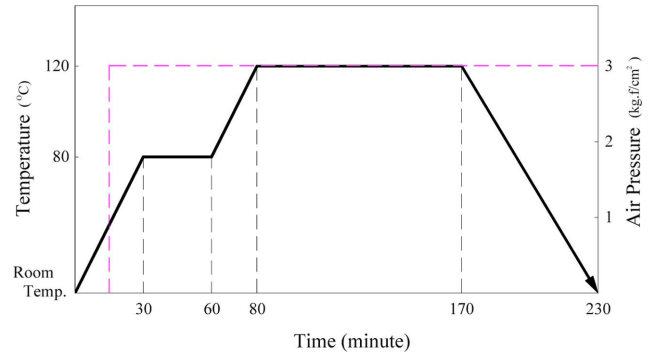


Fig. 2. Cure cycle of CFRP, NWT interleaved hybrid laminates.

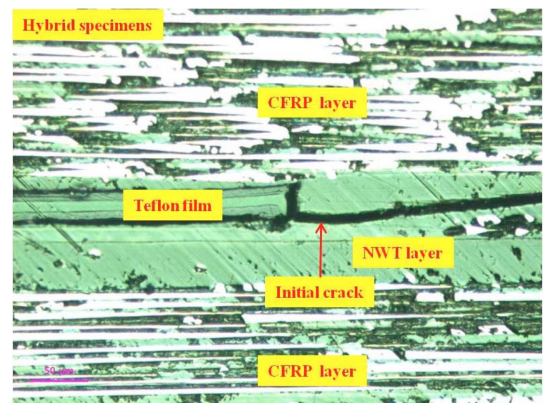


Fig. 3. The sectioned specimens.

포, $8\ \text{g/m}^2$ 의 폴리에스테르부직포(TFP 사, Optimat®203)를 각각 사용하였다. Fig. 1과 같이 CFRP 시편의 적층순서는 $[0]_{24}$ 이며, CFRP의 층간에 부직포를 삽입한 시편의 적층순서는 $[0]_{12}/[0]_{12}$ 이다. 여기서 “/” 기호는 부직포의 삽입위치를 의미한다. 인위적인 결함을 만들기 위해 테프론 필름(Teflon film, 두께: $12\ \mu\text{m}$)을 삽입하였으며, 이렇게 적층된 적층판을 Fig. 2와 같은 공정으로 오토클레이브에서 성형하였다. 모드 II에 의한 층간파괴인성값(G_{IIC})을 평가하기 위하여 JIS[16] 규격에 의하여 ENF(End Notched Flexure) 시편을 제작하였다. Fig. 3은 성형이 완료된 시편의 단면 사진으로 부직포 층의 두께와 테프론 필름의 단부 레진 밀집지역을 관찰할 수 있다.

2.2 실험방법

초기 자연크랙을 만들기 위하여 삽입한 테프론 필름의 단부에는 레진(Resin)이 밀집되어 있기 때문에 Fig. 4와 같이 모드 I 하중을 부가하여 초기크랙을 얻은 후 실험을 진행하였다. 실험은 상온에서 수행되었으며 실험속도는 $2\ \text{mm/min}$ (만능인장시험기 크로스헤드 속도)이며, 일정한 변위 제어로 하중을 부가하였다. Fig. 5는 모드 I 하중을 부가하여 얻은 초기크랙의 크기와 모드 II 실험에 의한 파단면의 형상이다. 실험은 상온에서 수행되었으며 Table 1은 ENF 시

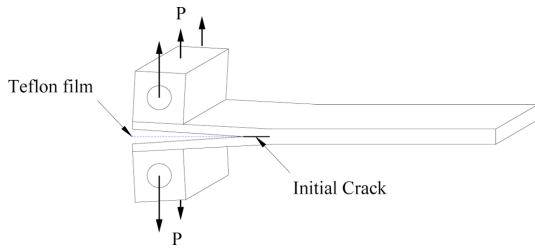


Fig. 4. Introduction of an Initial crack.

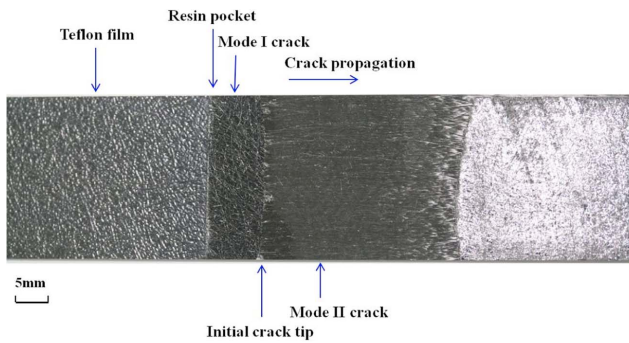


Fig. 5. The fracture surface of specimens.

Table 1. Dimension for the ENF test specimens

Unit : mm

Width (B)	Span Length (2L)	Specimen Thickness (2h)		Initial Crack Length (a)
		CFRP	Hybrid	
25	100	2.9 ± 0.1		20~40

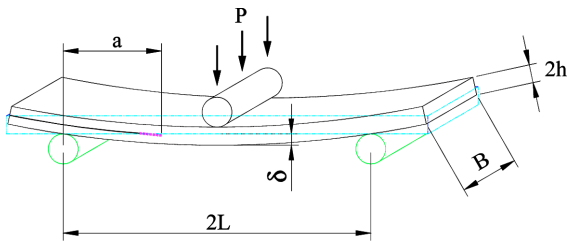


Fig. 6. Schematic of the ENF test specimens.

험편의 최종치수이며, Fig. 6은 ENF 시험편의 형상과 시험 개략도이다.

2.3 층간파괴인성값의 계산

모드 II 실험 후, G_{IIC} 값은 식 (1)에 대입하여 계산하였다 [10].

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P_C \delta_C}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (1)$$

여기서, P_C 는 임계하중, δ_C 는 임계변위, B 는 시편의 폭, a 는 크랙길이, $2L$ 은 스패ん길이이다.

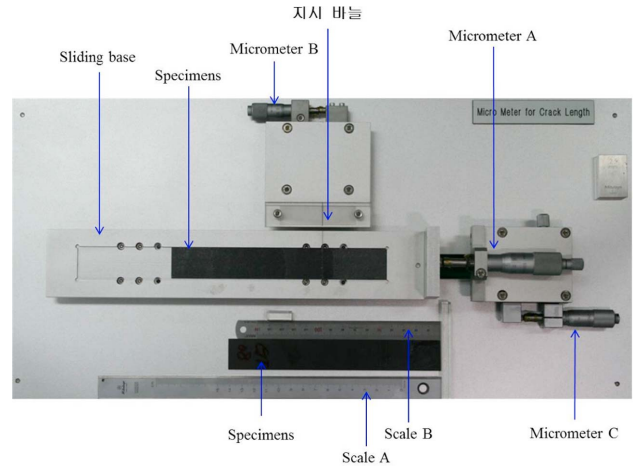


Fig. 7. A micro meter for the crack length measurement.

모드 I 하중을 부가하여 얻은 초기크랙의 길이를 정확하게 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 독자적으로 제작한 마이크로메타를 사용하였다. 마이크로메타가 부착된 두 개의 1축 스테이지와 시편을 올려놓을 수 있는 슬라이딩 베이스로 구성되어 있다. 측정순서는 먼저 마이크로메타 A를 영점 조정한 후 시편을 슬라이딩베이스 오른쪽 끝에 맞추어 올려놓는다. 마이크로메타 B, C를 움직여서 측정하고자 하는 원점의 위치에 지시바늘이 오도록 한다. 마이크로메타 A를 돌려서 측정하고자 하는 크랙의 끝에 지시바늘이 오도록 하고 눈금을 읽으면 길이를 측정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

모드 II 하중 하에서의 하이브리드 시편의 파괴메카니즘은 다음과 같다. 초기 균열의 끝단에서, 에폭시수지의 무수한 미세균열은 전단력에 의해 성장하다가 부직포 단섬유를 만나게 되면 단섬유의 섬유가교에 의해 성장이 멈춘다. 이후 단섬유와 에폭시 수지의 계면을 따라 성장하며 인접한 단섬유를 만나면 다시 성장이 멈춘다. 이러한 과정을 반복하며 전단력을 흡수하다가 한계에 이르면 단섬유와 에폭시 수지의 파단이 동시에 일어나서 분리하게 된다. 이상과 같은 단섬유의 섬유가교에 의한 전단력의 흡수, 균열 성장 억제 효과로부터 모드 II 층간파괴인성값(G_{IIC})은 증가

Table 2. Mean G_{IC} and G_{IIC} values

Specimens	G_{IC} values (J/m ²)		G_{IIC} values (J/m ²)[13]	
	Average	Standard error	Average	Standard error
CFRP	971.7	20.6	241.5	7.3
NWCT	2892.4	84.7	226.3	7.7
NWGT	2287.6	84.8	214.1	9.2
NWPT	2514.2	39.7	409.1	8.2

한다. ENF 실험은 CFRP 및 하이브리드 시편을 각각 15개씩 진행하여 얻어진 데이터를 정리하였다. Table 2는 ENF 실험에서 얻어진 CFRP 및 하이브리드 시편의 평균 층간파괴인성값(G_{IIC})이다. Fig. 8은 시편의 종류에 따른 층간파괴

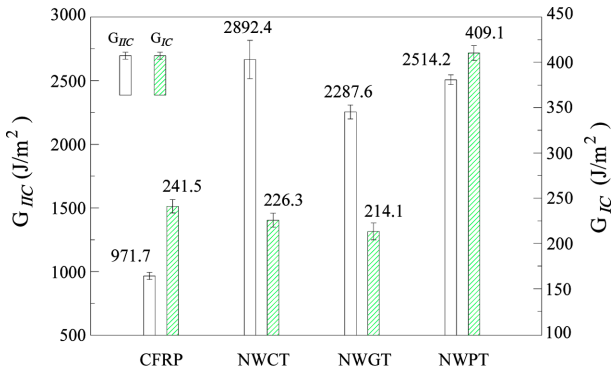
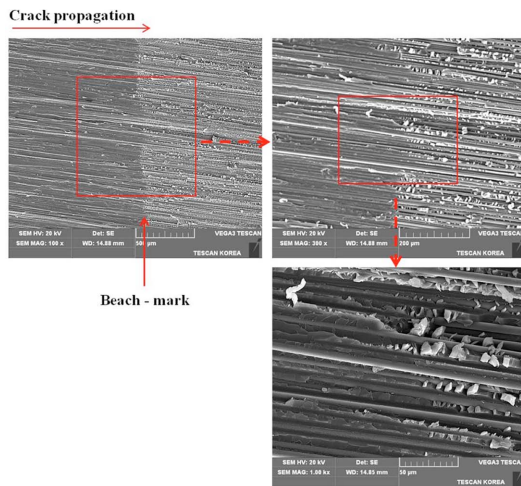
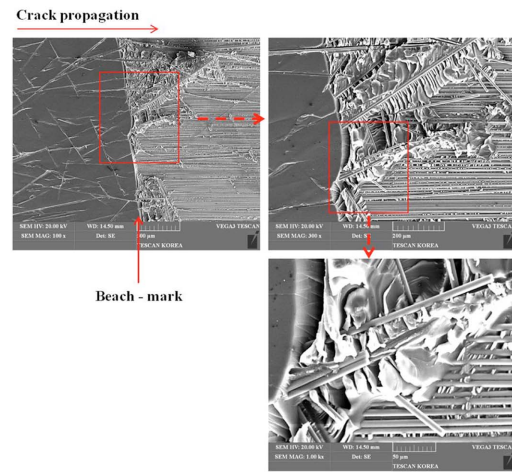


Fig. 8. G_{IIC} and G_{IC} values for the DCB, ENF test.

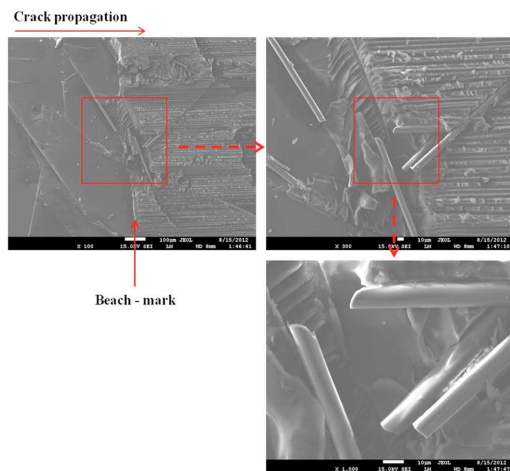
인성값(G_{IIC})의 변화를 막대그래프로 나타내었다. Table 2를 살펴보면 부직포를 삽입하지 않은 시편을 기준으로 탄소 부직포를 삽입한 시편은 약 197.7% 증가하였으며, 유리 부직포를 삽입한 시편은 약 135.4% 증가하였고, 폴리에스테르 부직포를 삽입한 시편은 약 158.7% 증가하였다. 그 이유는 모든 부직포의 단섬유들에 의한 섬유가교(Fiber bridging)의 현상(단섬유의 섬유가교에 의한 모드 II 균열성장의 억제효과) 때문이다. 이러한 것은 Fig. 9의 파단면의 SEM 사진으로 알 수 있다. Fig. 9의 (a)는 부직포가 없는 에폭시수지의 파단면이다. Fig. 9의 (b), (c), (d)는 각각 탄소부직포와 유리부직포, 폴리에스테르 부직포의 파단면이다. SEM 분석에 의하면 부직포 종류에 따라서 파단면의 형태가 차이가 있음을 알 수 있다. 부직포 층의 크랙팁(모드 I에 의한 초기크랙)영역의 파단면으로 모든 부직포 층에서 단섬유의 섬유가교(Fiber bridging), 섬유파단(Fiber breakage) 및 헉클(Hackle)이 많이 발생한 것을 확인할 수 있다.



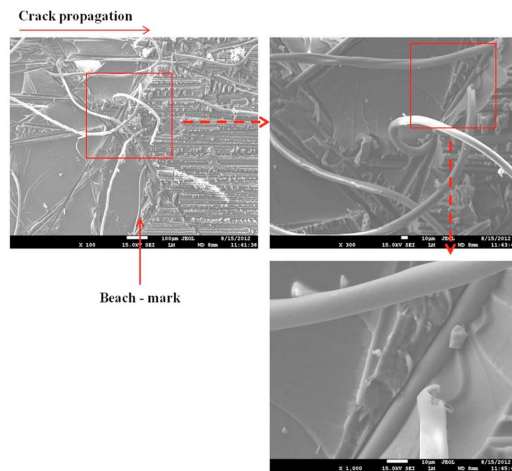
(a) The fracture surface of the CFRP



(b) The fracture surface of the NWCT



(c) The fracture surface of the NWGT



(d) The fracture surface of the NWPT

Fig. 9. SEM photos of fracture surface of the CFRP and the hybrid specimens after the DCB tests.

4. 결 론

본 연구는 탄소섬유강화복합재료(CFRP)에서 부직포에 의해 개선되는 층간파괴특성을 활용하기 위해 여러 종류의 부직포를 삽입한 하이브리드 복합재료에 대한 모드 II 층간파괴특성을 검토를 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 모드 II 하중조건하에서, 모드 II 층간파괴인성값은 탄소부직포 > 폴리에스테르 부직포 > 유리부직포 순으로 나타났다. 부직포를 삽입하지 않은 시편을 기준으로 탄소부직포를 삽입한 시편은 약 197.7% 증가하였으며, 폴리에스테르부직포를 삽입한 시편은 약 158.7% 증가하였고, 유리부직포를 삽입한 시편은 약 135.4% 증가하였다.

(2) 탄소부직포를 삽입한 시편에서는 탄소부직포층의 단섬유의 섬유가교(Fiber bridging), 섬유파단(Fiber breakage) 및 헵클(Hackle)이 가장 많이 발생하였으며, 특히 폴리에스테르부직포를 삽입한 시편은 단섬유 인발(Fiber pull out)과 헵클(Hackle)이 모드 II 층간파괴인성값을 증가시키는 요인이 확인되었다.

(3) 탄소부직포, 유리부직포, 폴리에스테르 부직포 중에서 탄소부직포와 유리부직포의 모드 I 층간파괴인성값은 감소하고 모드 II 층간파괴인성값은 증가하였다[13]. 그러나 폴리에스테르 부직포는 유일하게 모드 I과 모드 II 두 가지 하중조건에서 층간파괴인성값이 증가하는 것으로 나타났다. 폴리에스테르 부직포를 삽입한 시편은 부직포를 삽입하지 않은 시편을 기준으로 각각 69.4%[13], 158.7% 증가하였다.

향후 추가적인 연구를 통하여 부직포의 특성이 모드 II 층간파괴인성에 어떻게 영향을 주는지 그 원인을 정확하게 규명할 계획이다.

참고문헌

- Hu, W., Han, I.S., Park, S.-C., and Choi, D.-H., "Multi-objective Structural Optimization of a HAWT Composite Blade Based on Ultimate Limit State Analysis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, 2012, pp. 129-135.
- Kim, J.K., Baillie, C., Poh, J., and Mai, Y.W., "Fracture Toughness of CFRP with Modified Epoxy Resin Materials," *Composites Science Technology*, Vol. 43, 1992, pp. 283-297.
- Odagiri, N., Kishi, H., and Yamashita, M., "Development of Torayca Prepreg P2302 Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aircraft Primary Structural Materials," *Advanced Composite Materials (in Japan)*, Vol. 5, 1996, pp. 249-252.
- Ozdil, F., and Carlsson, L.A., "Mode I Interlaminar Fracture of Interleaved Graphite/Epoxy," *Journal of Material Science*, Vol. 26, 1992, pp. 432-459.
- Ishai, O., Rosenthal, H., Sela, N., and Drukker, E., "Effect of Selective Adhesive Interleaving on Interlaminar Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composite Laminates," *Composite (A)*, Vol. 19, 1988, pp. 49-54.
- Yamashita, S., Hatta, H., Takei, T., and Sugano, T., "Interlaminar Reinforcement of Laminated Composites by Addition of Orientated Whiskers in the Matrix," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 1254-1268.
- Mouritz, A.P., "Review of Z-pinned Composite Laminates," *Composite: Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 2383-2397.
- Choi, I.H., Ahn, S.M., Yeom, C.H., Hwang, I.H., and Lee, D.S., "Impact Resistance of Composite Laminates Manufactured by New z-Pinning Technique," *The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 37, 2009, pp. 693-700.
- Lee, B.H., Park, Y.B., Kweon, J.H., Choi, J.H., Choi, I.H., and Chang, S.T., "Strength of Stainless Steel Pin-reinforced Composite Single-lap Joints," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, 2012, pp. 65-69.
- Lee, S.H., Noguchi, H., Kim, Y.B. and Cheong, S.K., "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part I-Mode II," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2153-2168.
- Lee, S.H., Noguchi, H., Kim, Y.B., and Cheong, S.K., "Effect of Interleaved Non-Woven Carbon Tissue on Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites: Part II-Mode I," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, 2002, pp. 2169-2181.
- Jeong, J.-S., and Cheong, S.-K., "Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminates with Silk Fibers Interleave," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012. (submit)
- Jeong, J.-S., and Cheong, S.-K., "Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites Inserted with Different Kinds of Non-woven Tissues : Part I-Mode I," *Trans. of the KSME*, Vol. 37, No. 4, 2013, pp. 497-502.
- Jeong, J.S., Lee, S.H., and Cheong, S.K., "Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Composite Laminates with Carbon Non-woven Tissue under High and Low Temperature," *The Korean Society for Composite Materials*, 2010, pp. 222-225.
- Cheong, S.K., "Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminates With Carbon Non-woven Tissue Having Different Weight," *The Korean Society for Composite Materials*, 2009, pp. 43-48.
- JIS K7086, Testing Methods for Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics, 1993. (in Japanese)