

Glass Fabric/BMI 적층판의 삼점굴곡 시험시 발생하는 손상 및 파단현상에 대해 지지간 거리와 시편두께의 비가 미치는 영향

이 재 락 · 김 준 형 · 신 동 근* · 김 영 철* · 윤 동 진**

한국화학연구소 고분자제4연구실 · *한국화학연구소 재료시험실 · **한국표준연구소 비파괴시험실
(1990년 10월 15일 접수)

Effect of the Ratio Between Supporting Span and Thickness of the Specimen in the Case of Three Points Flexural Test on the Damage and Fracture Phenomena of Glass Fabric/BMI Laminates

Jae-Rock Lee, Joon-Hyung Kim, Dong-Kun Shin*, Young-Chul Kim*, and Dong-Jin Yoon**

Polymer Lab. 4, Korea Research Institute of Chemical Technology P. O. Box 9, Daedeog Danji, Korea

*Material Testing Lab., Korea Research Institute of Chemical Technology P. O. Box 9, Daedeog Danji, Korea

**Lab. of Non-Destructive Evaluation, Korea Standard Research Institute, P. O. Box 3, Daedeog Danji, Korea

(Received October 15, 1990)

요 약 : 한국 화이바에서 E glass 섬유로 직조한 plain weave WR 570A를 두장 겹쳐서 Boots Techno-chemie Co.에서 근자에 개발된 autoclave 성형용 제 2세대 bismaleimide 수지인 Compimide 800으로 함침하여 autoclave로 ($0^\circ/90^\circ$)에 해당하는 구조를 만들어 삼점굴곡시험하에서 지지간 거리와 시편두께의 비(L/d)가 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 경우에 대한 damage의 축적 및 발달 그리고 delamination 현상 등을 음향방출시험, microscopic observation, load-deflection curve의 변화 등에 의해 규명하였다. L/d는 상기한 여러가지 damage 현상 및 최종 파단형태에 커다란 영향을 미친다.

Abstract : Glass fabric/BMI composites of structure($0^\circ/90^\circ$), were cured at the autoclave, which are reinforced by the two plies of plain weave WR 570A from Hankuk Fiber Co., E glass fibers. Compimide 800 from Boots Technochemie Co., which is a second generation of bismaleimides, was chosen to impregnate the above plain weaves. Accumulation and development of damage, and delamination phenomena of the glass fabric/BMI composites at the three points flexural tests for the ratio between the supporting span and the thickness of the specimen, (L/d) 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 were examined with results of the acoustic emissions, microscopic observation and load-deflection curves. L/d has a significant influences on the above mentioned damage and fracture phenomena.

서 론

우주·항공산업에 있어서 섬유보강 복합재료의 응용도는 날로 커져가고 있으며, 근자에 2-dimensional fabric의 첨단 복합재료에의 응용이 더욱 증대되고 있다.¹ Learfan 2100과 같은 개발이 추진 중인 항공기에 있어서의 2-dimensional fabric의 응용은 매우 큰 폭으로 이루어질 전망이다.¹ 첨단 복합재료에 있어서 woven fabric의 사용에 대한 관심이 높아지고 있는 것은 근래의 설계기술의 발달과 더불어 fabric의 제조기술이 발전되었고, 무엇보다도 unidirectional (U.D.) 프리프레그에 비하여 적층단계를 줄일 수 있기 때문이다.^{2,3}

그동안 woven fabric composite의 매트릭스 수지로서는 주로 epoxy 수지가 쓰여왔으나, 근자에 들어서는 매트릭스 수지로서 bismaleimide(BMI)의 중요성이 증대되고 있다.^{4~6} 그러나, epoxy 수지로 함침된 woven fabric composite에 대한 연구는 비교적 최근에 이루어지고 있으며, 그나마 주로 인장특성에 관한 것이고,^{7~13} 굴곡특성에 대한 연구는 매우 미미하다.¹⁴ 또한, 상기한 연구결과들은 주로 여러층을 겹친 상태의 시편들을 사용한 결과 주위의 층들에 의한 제약으로 인하여 손상메카니즘에 대한 접근이 빈약하고, 주로 기계적인 물성예측에 머물고 있다. Plain weave 구조를 가지는 woven fabric의 경우 온도의 변화에 의한 macroscopic warping이 발생하지 않으므로, 매우 온도차가 심한 경우에 사용될 수 있으며, 이 때, local coupling effect가 fabric composite의 기계적 특성에 가장 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다.¹⁵

삼점굴곡시험은 그 단순성 및 효율성에 의해 오랫동안 섬유강화 복합재료의 일차적인 기계적 특성을 평가하는데 많이 사용되어 왔고, 점차로 복잡한 multi-axial 내부구조를 가지는 복합재료의 평가에도 응용되고 있다. 이 때 지지간 거리와 시편두께의 비(L/d)가 stress concentration 조건, 그에 따른 damage의 축적 및 발달 그리고 최종 파단형태에 미치는 영향도 매우 중요하다. 또한, 이러한 경우에는

tension, compression 및 shear stress가 동시에 작용하게 되어 2-dimensional fabric 이에 대한 연구활동은 그동안 비교적 저조하였으나, 이에 대한 중요성이 근자에 더욱 부각되고 있다.^{16~18}

그리고 상기한 바와 같이 보강섬유 다발속이나, 섬유다발이 교차하는 곳에서 초기의 중요한 손상이 발생함으로 직접적인 손상 관찰이 어렵고, 음향방출과 같은 간접적 방법이 효과적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 매트릭스 수지로서 비교적 가공성이 뛰어나서 void를 거의 형성하지 않으면서도 매우 brittle한 BMI 수지를 사용하였고, 보강섬유로는 탄소섬유 등에 비하여 flexibility가 매우 커서 굴곡하중 등에 쉽게 손상되지 않는 E-glass 유리섬유 plain weave 2-dimensional fabric을 이용하여¹⁹ 매우 단순한 적층구조를 가지는 두께 1mm의 적층판으로 제조한 뒤, 삼점굴곡시험하에서 지지간 거리와 시편두께의 비(L/d)를 변화시켜 가면서, 그에 따른 굴곡행태와 손상메카니즘의 차이를 load-deflection curve의 변화와 음향방출시험을 통하여 추적하였다.

실 험

실험재료

본 연구에 사용된 유리섬유 fabric은 한국 화이바 제품으로 E-glass로 짜여진 plain weave WR 570 A로서 두께는 0.5mm이고, 밀도는 경사(warp), 위사(fill) 각각 5, 6(25mm당)이고, 중량은 570g/m²이다. 사용된 BMI 수지는 Boots Technochemie사의 autoclave 성형용 Compimide 800으로서 그 주성분은 4,4'-bismaleimido diphenyl methane(MDAB)이며, 평균 분자량은 358이고, 경화제로는 아민이 첨가되어 있는 상온에서 황갈색의 고체로 되어 있으며, 148℃에서 용융되어 액상이 된다. 상온에서 고상인 Compimide 800 수지를 분쇄하여 미세한 분말로 만들어 acetone과 methyl ethyl ketone의 중량비 5:6인 혼합용액에 녹여서 solid content가 60 wt%인 용액을 만든 뒤 유리섬유로 된 fabric을 한장씩 따로 함침시켜서 프리프레그를 만들었다. 함침된 프

리프레그는 통풍이 잘되는 곳에 방치하여 과도한 solvent를 제거하여 작업성과 tacky를 조절한 뒤 적절한 크기로 재단하여 사용하였다. 이 때의 residual solvent는 대개 10 wt% 정도였다.

재단된 프리프레그는 autoclave 성형을 위해 적층한 연후에 bagging film으로 전체를 덮고, 특수 sealant로 밀봉한 연후에 vacuum line을 연결 밀봉상태를 확인한 후, autoclave에 장입하여 190°C까지 3°C/min의 속도로 가열한 뒤 190°C에 4시간 유지시킨 뒤 서서히 냉각시킨다. 이 때 190°C에서 도달할 때까지는 aspirator를 연결하여 740 mmHg의 vacuum을 가해준다. 온도가 160°C에 도달하였을 때 4기압의 압력을 가해서 190°C에서 4시간 유지시킬 때까지 계속 압력을 걸어준다. 성형된 적층판은 post curing chamber에 넣어 240°C에서 15시간 경과시켜 post curing을 완료시킨다. 성형된 적층판의 fiber volume fraction은 0.55이고, 두개의 fabric 보강층을 가진다. Post curing이 완료된 적층판은 diamond-cutter로 절단한 뒤, 절단면을 미세한 입도를 가지는 abrasive paper로 wet polishing하여, free edge delamination에 영향을 미칠 수 있는 edge surface flaw를 제거한다. 시편의 두께는 1mm이고, 폭은 항상 20mm로 하였으며, 시편길이는 삼점굽곡시 지지간 거리보다 40mm 크게 절단하였다.

실 험

기계적인 특성평가를 위하여 Instron 1122를 사용하여 삼점굽곡시험을 시행하였으며, 이 때 사용된 load cell의 최대 용량은 500kg이었다. 삼점굽곡시 cross head speed는 2mm/min로 하였고, 지지간 거리는 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120mm로 변화시켰다.

음향방출시험은 Acoustic Emission Technology Corp. 제품인 AET 5000을 사용하였고, 탐촉자로는 MAC 300L을 사용하였고, filter는 250~500KHz 영역의 FL25 band pass filter를 사용하였으며, threshold는 0.5 volt, preamplification은 60dB, main amplification은 26dB로 하였다. Noise를 방지하기 위하여 삼점굽곡시험시 접촉면에 teflon film을 대고 실험을 시행하였다.

Glass fabric/BMI composite의 손상메카니즘을 측정하기 위하여 음향방출 시험결과 중 event vs. time, distribution of energy event 등을 중점적으로 분석하였다.^{16,20}

결과 및 토론

본 연구에서는 실험 가능한 넓은 범위의 L/d를 채택하기 위하여 L/d를 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 등으로 변화시키고, 파괴형태에 대한 stacking sequence의 역할을 축소시키기 위하여 (0°/90°)_s에 해당하는 plain-weave 두장을 적층하여, 두 적층판 사이의 resin rich area가 mid-plane과 일치하도록 하였다. 이러한 resin rich area의 형태를 Fig. 1에 도시하였다. 매트릭스로 함침된 보강섬유의 국부적 배열상태는 Fig. 2에 도시하였다.¹ 단순화된 Fig. 2에서 보는바와 같이 외부에서 가해진 힘을 받으면, 보강섬유 다발로 이루어진 warp와 fill에 있는 보강섬유와 매트릭스의 계면에 손상이 발생하고, 이어서 warp과 fill 사이에 끼여 있는 매트릭스 층에 손상이 발생하고, 매트릭스만으로 된 층간박리 현상 등에 의하여 최

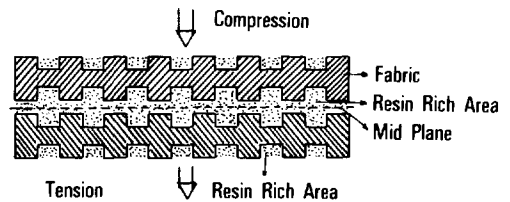


Fig. 1. Schematic representation of the studied glass/BMI composite structure.

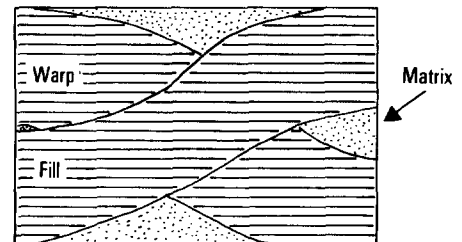


Fig. 2. Simplified representation of the relationship among warp, fill and matrix.

종적인 파단이 일어날 것임을 추정할 수 있다. 이 때 보강섬유와 매트릭스와의 특성 차이가 큰 경우에 위와 같은 손상형태를 판별하기가 그렇지 않은 경우보다 상대적으로 쉽다고 할 수 있으므로 본 연구에서는 glass fabric/BMI composite를 실험재료로 사용하였다. 이 경우에 손상에 의해 발생하는 음향방출의 근원은 주로 매트릭스의 손상에 의한 것이다.

삼점굴곡하에서의 시편재원 및 물성은 Table 1에 표시하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 굴곡탄성율은 $L/d=45$ 인 경우에 최대치를 보이고, $L/d=30, 75$ 를 제외하면 커다란 차이를 보이지 않는다. 굴곡강도는 역시 $L/d=45$ 인 경우에 최대치를 보인 후 L/d 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 삼점굴곡하에서의 L/d 가 변화함에 따라 load-deflection curve가 변화하는 것을 Fig. 3, 4에 도시하였다.

$L/d=30$ 인 경우에는 damage 축적에 따라서 서서히 load bearing capacity가 감소하다가 최대굴곡 응력을 나타내는 점 주위에서 $L/d=45$ 인 경우보다 급격히 감소하였다. 이는 $L/d=45$ 인 경우가 $L/d=30$ 인 경우보다 stress concentration에 의하여 warp과 fill 사이의 매트릭스와 mid-plane의 resin-rich layer에서의 손상이 억제되다가 급격한 파단형태로 가는 것을 의미한다. 그 반면 $L/d=60, 75, 90, 105, 120$ 인 경우에는 load bearing capacity가 초기단계의 손상축적과 더불어 감소하지 않고 오히려 증가됨을 보여주는데, 이는 보강섬유의 warp과 fill 사이에 끼여져 있는 매트릭스 수지에 손상이 심해져서 warp과 fill 사이에 발생하는 mechanical friction에 의한 것

이다.

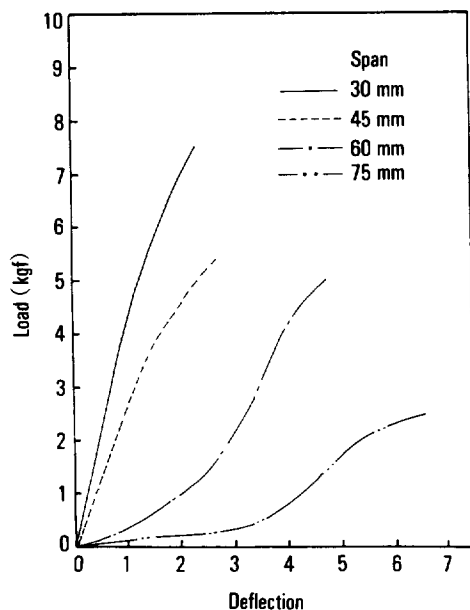


Fig. 3. Load-deflection curves of glass fabric/bismaleimide span to depth ratio 30 : 1 ~ 75 : 1.

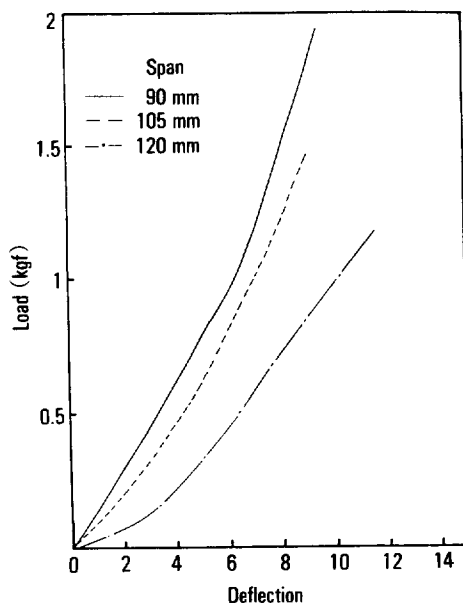


Fig. 4. Load-deflection curves of glass fabric/bismaleimide span to depth ratio 90 : 1 ~ 120 : 1.

Table 1. Glass/BMI ($0^\circ/90^\circ$)의 굴곡 특성

지지간 거리 (mm)	지리 길이 (mm)	폭 (mm)	두께 (mm)	굴곡탄성율 (kg/mm^2)	굴곡강도 (kg/mm^2)
30	70	20	1	811	11.4
45	85	20	1	1,080	15.5
60	100	20	1	1,024	11.7
75	115	20	1	940	12.0
90	130	20	1	1,014	9.6
105	145	20	1	1,047	8.1
120	160	20	1	1,054	8.2

$L/d=60, 75$ 인 경우에는 load가 증가함에 따라 load bearing capacity가 다시 감소함을 보였으나, $L/d=90, 105, 120$ 인 경우에는 load bearing capacity가 감소하는 형태를 보이지 않았다. 이것은 $L/d=$

$60, 75$ 인 경우에는 warp과 fill 사이에 있는 매트릭스의 손상이 매우 커서 $L/d=30, 45$ 에서 관찰된 바와 같은 최종 파단형태를 가지는 것을 보여준다. 그 반면 $L/d=90, 105, 120$ 인 경우에는 warp과 fill 사이의

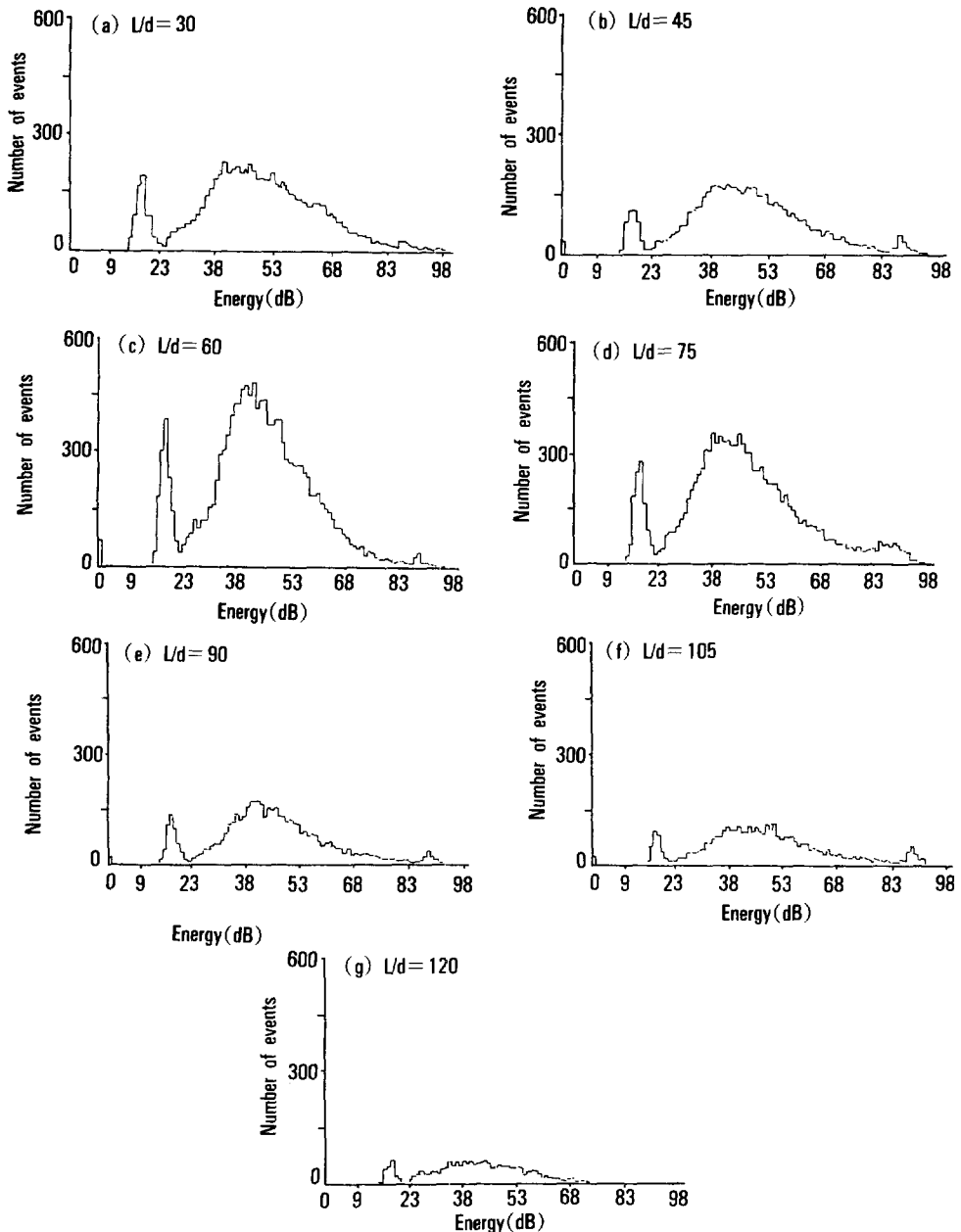


Fig. 5. Distribution of events by energy of glass fabric/bismaleimide.

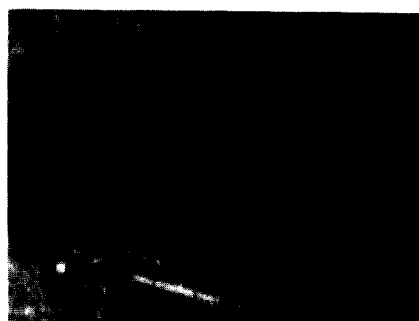
매트릭스 손상이 비교적 적고, 지지간 거리가 넓은 관계로 $L/d=90$ 인 경우에는 유리섬유의 straining effect에 의해 load bearing capacity가 증진되나 $L/d=105, 120$ 인 경우에는 보강섬유인 유리섬유의 flexibility가 동시에 작용하여, 시편 전체적으로 볼 때 일부의 손상과 더불어 쉽게 휘어져서 고유의 강도를 제대로 발휘하지 못하고, 특히 $L/d=120$ 인 경우에는 지지대 사이로 미끄러져 내리는 것과 같은 형태를 보이는 것임을 추론할 수 있다.

위와 같은 관찰 및 추론을 입증하기 위하여 음향 방출 결과 중 events의 energy 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 이 경우에 energy level이 낮은 events는 warp과 fill 사이의 계면과 매트릭스의 손상에 의한 것이고, 에너지 level이 중간 정도의 events는 resin rich area 및 mid-plane에서의 손상에 의한 것이고, energy level이 매우 높은 events는 주로 delamination에 의한 것임을 알 수 있다.^{21,22} 이러한 견지에서 살펴볼 때, $L/d=30$ 인 경우에는 warp과 fill 사이의 계면과 매트릭스에서의 손상 및 resin rich area 및 mid-plane의 resin 층에서의 손상이 심한 관계로 굴곡 탄성율이 매우 낮고, 굴곡강도가 $L/d=45, 60, 75$ 인 경우에 비하여 낮게 되었음을 알 수 있다.

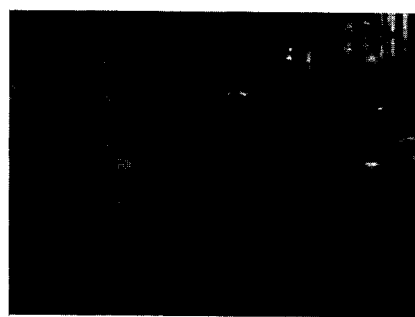
그 반면 $L/d=45$ 인 경우에는 $L/d=30, 60, 75$ 인 경우에 비하여 warp과 fill 사이의 계면과 매트릭스에서의 손상이 비교적 적게 발생하고, resin rich area와 mid-plane의 resin층에서의 손상도 비교적 적음을 알 수 있다. 따라서, 다른 L/d 인 경우에 비하여 보강섬유가 상대적으로 많은 응력을 받게 되므로 $L/d=45$ 인 경우의 굴곡탄성율과 굴곡강도가 최대치를 보인다.

$L/d=90, 105, 120$ 인 경우에는 L/d 가 증가함에 따라 warp과 fill 사이의 계면과 mid-plane에서의 손상이 감소됨을 알 수 있다. 또한, delamination과 관련된 energy level이 매우 큰 events는 $L/d=30, 45, 60, 75, 90, 105$ 에서 관찰된 반면 $L/d=120$ 인 경우에는 delamination이 관찰되지 않았다.

Fig. 6에 시편 측면에서 관찰된 delamination과 delamination이 된 내부상태에 대한 현미경 사진을



(a) Delamination observed at the side of the specimen. ($\times 75$)



(b) Fracture surface of the delaminated area. ($\times 75$)

Fig. 6. Microscopic observations of the delaminated specimens, glass fabric/bismaleimide. ($L/d=75$).

제시하였다. Fig. 6의 (a)는 delamination에 의한 파단된 시편측면이 벌어진 상태를 나타내고, Fig. 6의 (b)는 delamination 안쪽면을 절개하여 관찰된 결과이다. Fig. 6의 (b)에서 보는 바와 같이 보강섬유와 계면의 손상에 의해 보강섬유가 드러나 보이는 반면, resin rich area 및 mid plane의 resin 층에서의 resin의 파단면은 매우 복잡한 파단형태를 보인다. 파단면의 요철이 너무 심한 관계로 SEM 사진을 찍지 못하였고, 광학현미경 사진의 초점이 썩 잘 맞지 않았으나 재차 시도해도 동일한 결과만을 얻을 수 있었다. 삼점굴곡시험하에서의 glass woven fabric/BMI 복합재료가 L/d 의 변화에 따라 load 증가에 따른 damage pattern의 변화를 좀 더 세밀히 살펴보기 위하여, 시간경과에 따른 음향방출시험을 시행하여 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 표시된 시간은 분,

초 단위로 기록된 결과이고, interval size는 1초이다.

$L/d=30$ 인 경우에는 event의 수가 어느 정도 증가되어 가다가 멈추어지고, 다시 수차례 시작하는

형태를 보이는데, 이는 warp과 fill 사이의 계면 및 매트릭스에서 시작된 손상이 Fig. 6의 (b)에서 보는 바와 같은 resin rich area 및 mid plane의 resin 층에서 간헐적으로 중단됨을 의미한다.

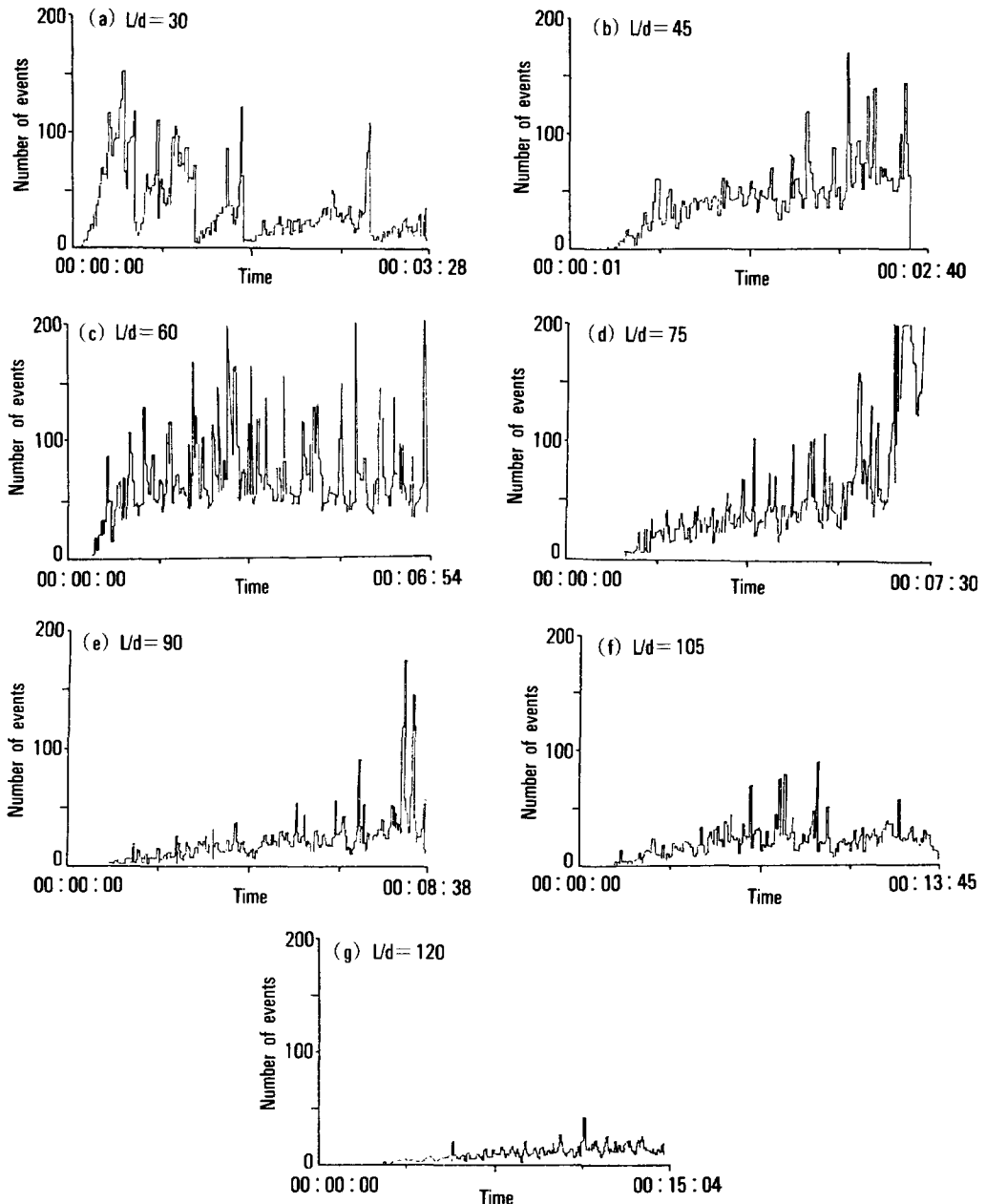


Fig. 7. Events vs time of glass fabric/bismaleimide.

$L/d=45$ 인 경우에는 주로 warp과 fill 사이의 계면 및 매트릭스에서 꾸준히 손상이 축적되고 resin rich area 및 mid plane의 손상이 비교적 적으나, $L/d=60$ 인 경우에는 $L/d=45$ 인 경우와 유사하기는 하지만, warp과 fill 사이의 계면 및 매트릭스에서의 손상이 더욱 활발히 일어나서 resin rich area 및 mid plane의 resin 층에서의 손상으로 발전함을 알 수 있다.

$L/d=75$ 인 경우에는 $L/d=45, 60$ 인 경우보다 warp과 fill 사이의 계면 및 매트릭스에서의 손상은 줄어들으나, load가 매우 증가하는 경우 delamination이 급속히 일어남을 알 수 있다.

$L/d=90$ 인 경우는 $L/d=30, 45, 60, 75$ 인 경우에 비해 warp과 fill 사이의 계면 및 매트릭스의 손상이 적어지고, load가 매우 큰 경우에만 resin rich area와 mid-plane의 resin 층에 손상이 발생함을 알 수 있다.

$L/d=105$ 인 경우에는 $L/d=90$ 인 경우에 비해 전반적으로 손상이 줄어들고, $L/d=120$ 인 경우에는 다른 경우에 비해 매우 적은 손상만 발생됨을 알 수 있다.

결 론

두장의 glass fabric 층으로 보강된 Glass/BMI 복합재료의 삼점굴곡시험시 음향방출결과는 직접 관찰이 어려운 상기 system에서의 damage 축적 및 delamination 형성 등에 대한 유용한 data로 사용될 수 있다. 이 경우에 주된 damage 현상은 warp과 fill 사이에서 발생하는 계면간의 손상, 매트릭스의 손상 그리고 resin rich area 및 mid-plane에서이 손상과 delamination에 의한 것이다. $L/d=120$ 과 같은 경우에는 delamination이 발생하지 않았으나, 그 이외의 경우에는 모두 delamination이 발생하였다.

L/d 가 삼점굴곡 시험하에서의 damage의 축적 및 발전에 커다란 영향을 미친다. $L/d=45$ 인 경우에 굴곡탄성을 및 굴곡강도가 최대치를 보이는 등 굴곡탄성율, 굴곡강도, load-deflection curve의 형태 등의

변화에 L/d 가 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 이는 음향 방출 결과에 의해 그 차이를 좀 더 자세하게 나타낼 수 있다.

후기: 본 연구는 과기처의 지원에 의해 시행된 KRICT-SR-0087-30 과제의 연구결과의 일부이다.

참 고 문 헌

1. T. Ishikawa, M. Matsushima, and Y. Hayashi, "Effect of Local Coupling Upon Linear and Nonlinear Behavior of Fabric Laminates", Proceedings of Fifth Int. Conf. of Comp. Mat., San Diego, 1985.
2. F. K. Ko, C. M. Pastore, J. M. Yang, and T. W. Chou, "Structure and Properties of Multilayer Multidirectional Warp Knit fabric Reinforced Composites", Proceedings of the 3rd Japan-U. S Conf. on Comp. Mat., Tokyo, 1986.
3. ASM International Handbook Committee, "Composites", Engineered Materials Hand-book Vol. 1, pp 148-150, ASM Int. Metals Park, 1987.
4. F. T. Traceski and J. R. Alexander, "Development of a Material Specification for Carbon Fiber/Bismaleimide (BMI) Woven Fabric Prepregs", Proceedings of 33rd Int. SAMPE Symp., Anaheim, 1988.
5. (주)종합기술센터, "최신 내열성 고분자", pp 430-432, Tokyo, 1987.
6. H. D. Stenzenberger, M. Herzog, P. Konig, W. Romer and W. Breitigam, "Bismaleimide Resins", Past, Present, Future", Proceedings of 3rd Int. SAMPE Symp.
7. T. Ishikawa, *Fiber Science and Tech.*, **15**, 127 (1981).
8. T. Ishikawa and T. W. Chou, *AIAA J.*, **21**, 1714 (1983).
9. T. Ishikawa and T. W. Chou, "Stiffness and Strength Properties of Woven Fabric Composites",

- Proceedings of 4th Int. Conf. of Comp. Mat., Tokyo, 1982.
10. T. Ishikawa and T. W. Chou, *J. of Comp. Mat.*, **17**, 399 (1983).
11. T. Ishikawa, M. Matsushima, Y. Hayashi, and T. W. Chou, *J. of Comp. Mat.*, **18**, 433 (1985).
12. J. M. Yang, C. L. Ma, and T. W. Chou, "Elastic Stiffness of Biaxial and Triaxial Woven Fabric Composites", Proceedings of the 29th SAMPE Symp., San Diego, 1984.
13. J. M. Yang and T. W. Chou, "Performance Maps of Textile Structural Composites", Proceedings of 6th Int. Conf. of Comp. Mat. London, 1987.
14. T. Yoshino, "Effect of Surface Slit Angle and Distance Between Two Indentations on Bending Fatigue Strength of Plain-Woven Glass fabric FRP", Proceedings of 4th Japan-U.S. Conf. on Comp. Mat., Washington, 1988.
15. T. Ishikawa, M. Matsushima, and Y. Hayashi, "Effect of Local Coupling Upon Linear and Nonlinear Behavior of Fabric Composites", Proceedings of 5th Int. Conf. on Comp. Mat., San Diego, 1985.
16. A. Falchi and J. Gracia, "Effects of Three Point Bending Test Controlled by Acoustic Emission on Carbon/Epoxy Laminates", Proceeding of 6th Int. Conf. on Comp. Mat., London, 1987.
17. G. C. Shi and A. M. Skudra, "Failure Mechanics of Composites", Vol. 2 of Handbook of Composites edited by A. Kelly and Y. N. Rabotnov, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1985.
18. C. Zweben, W. S. Smith, and M. W. Wardle, "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates", ASTM STP 674, ASTM, 1979.
19. G. Lubin, "Handbook of Composites", pp 89-114, 136-159, 196-271, Van Nostrand Reinhold Co., Amsterdam, 1982.
20. M. Suzuki, H. Nakanishi, M. Iwamoto, E. Jinen, Z. Maekawa, A. Mori, and F. Sun., "A Study on Fracture Mechanisms of CFRP by Acoustic Emission Method", Proceedings of 6th Int. Conf. on Comp. Mat., London, 1987.
21. J. R. Lee, J. H. Kim, J. J. Lee, K. C. Kim, and D. J. Yoon, *Polymer (Korea)*, **14**, 104 (1990).
22. J. R. Lee, J. H. Kim, J. J. Lee, K. C. Kim, and D. J. Yoon, "Effect of the Geometric Factor on the Damage and Failure of the Various Uni-Directional Carbon/Epoxy Laminates", will be Published in Composites (Korea).