論文

Textile Composite의 구조와 물성(I)
- 스티칭 복합재료의 충격 손상 거동 -

이승호* · 강태진* · 김종섭**

Mechanical Properties of Textile Composite(I)
— Impact Behavior of Stitched Woven Laminate Composite —

Sung-Ho Lee*, Tae-Jin Kang* and Jong-Seob Kim**

ABSTRACT

The toughening effect of woven laminate composites by stitching was studied. The effect of toughness in stitched woven laminate composites was varied with the stitching conditions including stitch density, stitch type and the properties of stitching thread. The compression after impact(CAI) strength of a stitched laminate was increased with stitch density up to the optimum level, and then it showed a continuous decrease after the optimum level due to the damage during the stitching process. The high velocity impact induced damaged area was confined to smaller areas with increasing stitch density. The stitching of the woven laminate composites showed improvements in impact toughness and damage tolerance by eliminating unopposed propagation of delamination from the high level impact energy and maintaining the integrity of the total structure.

초 록

스티칭이 적층 복합재료의 충격 인성 향상에 미치는 영향을 고찰하였다. 스티칭 복합재료의 인성은 사용되어지는 적층 복합재료, 스티치 밀도, 스티치 타입, 스티칭사의 종류 등에 따라 다르게 나타난다. 스티칭 밀도가 증가함에 따라 충격후 잔여 압축강도는 최적수준까지 증가하지만 지나치게 많이 스티칭을 해 줄 경우에는 적층 복합재료 내부의 손상으로 인하여 충격후 잔여 압축강도가 다시 점차로 감소함을 알 수 있었다. 고속 충격시 발생하는 층간분리에 의한 손상영역은 스티칭 밀도가 증가함에 따라 현저히 감소함을 확인하였다. 적층 복합재료를 최적의 스티칭 밀도로 스티칭하여 줌으로써 파괴인성의 향상과 함께 층간분리를 방지하여 전체 구조의 보지성을 월등히 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

섬유 강화 복합재료는 경량성, 비강도, 내충격 흡수성등이 우수하여 항공, 우주 분야에 널리 사용되어지고 있다. 현재 FRP에 사용되고 있는 보강 섬유물 중 적층 복합재료는 제작이 용이한 반면 두께

* 서울대학교 섬유고분자 공학과
** 한성대학교 교양학부

방향으로의 보강 섬유가 없기 때문에 외부 하중이 가해질 경우 층간분리 현상을 유발하여 높은 피로강도와 충격강도가 요구되는 곳에서는 사용의 제한을 받게 된다.

섬유 강화 복합재료의 내충격성을 향상시키기 위하여 섬유와 수지간의 계면 결합력을 조절하거나 사용되는 수지를 toughening하는 방법이 사용되며 hybrid 복합재료와 같이 적층 복합재료의 구조를 변화시키거나 두께 방향으로 섬유를 보강한 구조물을 사용하기도 한다. 그 중 3축 방향으로 섬유를 보강한 구조물은 3축 보강 섬유에 의해 하중을 구조물 전체에 골고루 분산시킬 수 있고 외부 하중에 의한 무저항적인 층간분리를 막아주어 내충격성이 우수하고 뛰어난 구조보지성을 나타낸다. 적층 복합재료의 두께 방향으로 섬유를 보강하는 방법으로는 fiber insertion[1]이나 스티칭[2~4]이 대표적이며 특히 스티칭은 그 방법이 용이하여 생산성이 높고 구조물의 크기에 대한 제약을 적게 받는다. 일반적으로 스티칭에 있어서 스티칭 밀도가 클수록 물성은 향상되지만 지나친 스티칭은 적층 복합재료 내부의 보강섬유를 손상시켜 오히려 물성이 저하되는 결과를 얻게 되므로 적절한 스티칭 밀도의 선택이 필요하다[5~7].

복합재료의 인성은 충격후 잔여 압축강도(residual compressive strength after impact)나 충격으로 인한 손상영역 등의 변수에 의하여 결정되며 이 중 충격후 잔여 압축강도는 복합재료의 내충격성과 구조보지성을 평가하는 중요한 요소로 알려져 있다[8~9].

본 연구에서는 woven fabric prepreg를 서로 다른 스티칭 밀도와 스티칭 패턴으로 스티칭하여 성형한 후 충격 에너지를 가한 다음 잔여 압축강도와 손상영역을 비교함으로써 스티칭에 의한 적층 복합재료의 인성 향상 및 구조 보지성에 대하여 고찰하였다.

2. 실 험

2-1. 시편 제작

본 연구에서는 경사와 위사가 동일한 조건으로 제작된 S-2Glass 직물(plain, 5×5 count/inch^2)과 Kevlar29 직물(2×2 basket, 20×20 count/inch^2), Spectra 직물(plain, 21×21 count/inch^2)을 각각 불포화 polyester 수지, PVB-Phenol 수지, Vinylester 수지를 사용하여 경화시킨 세 종류의 적층 복합재료를 사용하였다. 시편의 수지 함량이 25wt%가 되도록 각각의 수지를 직물에 도포하여 프리프래그를 만들고 5장의 프리프레그를 $[(0°)_5]$의 순서로 적층, 가압한 후 경위사 양방향으로 스티칭하여 시편을 제작하였다. S-2Glass/Polyester와 Kevlar/PVB-Phenol 적층 복합재료는 Kevlar 49 섬유를 스티칭사로 하여 스티칭 간격 51mm, 25mm, 13mm의 chain 스티치로 스티칭하였으며 Spectra/Vinylester 복합재료는 Spectra 섬유를 스티칭사로 하여 스티칭 간격 20mm, 15mm, 10mm의 plain 스티치로 스티칭하였다. Fig. 1은 스티칭된 상태를 나타내는 그림으로 chain 스티치의 pitch length는 9mm가 되도록 조절하였고, plain 스티치는 양면에서 스티칭하여 스티칭사의 장력에 의한 시편의 휨을 방지하고 스티칭의 효과를 극대화시켰다. 스티칭에 의한 복합재료의 기본물성 변화에 대하여 참고문헌[10~11]에 보고된 바가 있으며 각 시편의 규격은 Table 1에 보인 바와 같다.

Table 1. Specifications of stitched specimen.

Specimen	Stitching thread	Stitch type	Stitch spacing(mm)	Thickness (mm)	Resin content(wt%)
S-2Glass/ Polyester(S-800)	Kevlar 49 (2840 denier)	chain stitch	51, 25, 13	2.7	25
Kevlar/PBV-Phenol(KC-4600)	Kevlar 49 (2840 denier)	chain stitch	51, 25, 13	2.7	25
Spectra/Vinylester(XSR-10)	Spectra (1200 denier)	plain stitch	20, 15, 10	2.0	24

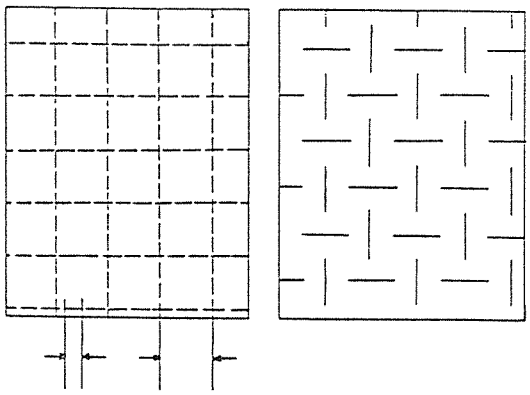

Fig. 1. Shape of (a) chain and (b) plain stitched panel.

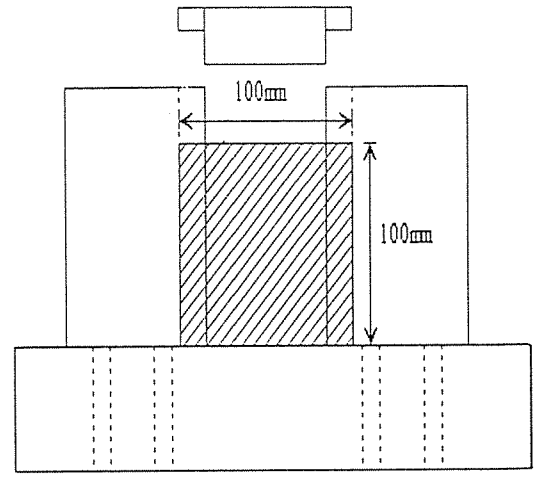

Fig. 2. Compression test fixture.

2-2. 충격후 압축 실험 (Compression After Impact Test)

낙하하중 충격 시험기를 사용하여 충격실험을 행하였다. 사용된 충격 시험기는 지름 7.6cm의 창을 갖는 원형 치구에 압축 가스를 이용하여 시편을 고정하고 추에 연결된 직경이 1.27cm인 반구형 tup에 의해 충격을 가하도록 되어 있다. 시편은 가로 세로 각각 10cm의 크기로 절단하여 사용하였고 충격에너지는 추의 질량과 높이를 달리하여 위치에너지를 변화시킴으로써 조절하였다. 충격시험시 시편이 받는 하중은 10 μsec. 마다 컴퓨터에 전송되며 시간에 따른 하중-변위 곡선으로부터 흡수한 에너지를 구하였다.

충격 시험에서 가해 준 충격에너지는 시편이 관통되거나 심한 손상이 일어날 수 있는 수준으로 예비실험을 통하여 결정하였으며 S-2Glass/Polyester 복합재료는 324.5 Joule, Kevlar/PVB-Phenol과 Spectra/Vinylester 복합재료는 87.9 Joule의 에너지를 가한 충격실험을 행하여 시편이 흡수한 에너지를 구하였다. 충격 후 압축 실험은 BSS(Boeing Specification Support Standard)7260[12]의 실험법에 의거하여 실행하였으며 Fig.2와 같은 기구를 제작하여 Instron에서 cross-head의 속도를 5mm/min로 하여 실험하였다. 압축강도는 측정된 최대 하중을 시편의 단면적으로 나누어 계산하였다.

2-3. 손상 영역

가로, 세로 300mm×300mm 크기의 시편을 제작하여 고속 탄자로 관통시킨 후 손상영역을 측정, 비교하였다. 사용된 탄자의 무게는 2.85g이었으며 탄자가 시편을 관통할 수 있는 확률이 50%가 되는 속도를 시편 종류별로 예비 실험을 통하여 결정한 후 이 속도로 시편에 충격을 가하고 관통된 시편의 단면을 잘라 층간분리가 일어난 부분의 길이를 측정하여 손상영역을 비교, 관찰하였다. 각 시편의 두께와 충격 속도는 Table 2에 보인 바와 같다.

또한 S-2Glass/Polyester 복합재료에 Kevlar 49를 스티칭사로 하여 스티치 간격 10mm의 plain

Table 2. Specimens for high velocity impact.

Specimen	Density (g/cm^3)	Areal density (g/cm^2)	Thick-ness (mm)	Striking velocity (m/sec)
S-2Glass/ Polyester(S-800)	1.95	2.25	11.5	700
Kevlar/ PVB-Phenol (KC-4600)	1.23	1.30	10.5	550
Spectra/ Vinylester (XSR-10)	0.95	0.95	10.0	530

스티치로 스티칭을 한 후 모우드 I 파괴 실험을 행하여 파괴 인성과 손상 영역과의 관계를 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 충격후 잔여 압축강도

S-2Glass/Polyester 복합재료는 324.5 Joule, Kevlar/PVB-Phenol과 Spectra/Vinylester 복합재료는 87.9 Joule의 에너지를 가하여 충격 실험을 행한 후 이들 충격으로 손상된 시편으로 잔여 압축강도를 측정하였다. 일반적으로 일방향(unidirectional) 적층복합재료에 스티칭을 해 줄 경우 복합재료의 표면에서 loop를 형성하는 스티칭사에 의하여 복합재료 표면부의 보강섬유가 휘어진 상태로 성형이 된다. 이로 인하여 스티칭 복합재료의 압축강도는 스티칭을 하지 않은 경우 보다 낮은 값을 나타내게 된다[3]. 그러나 직물을 보강재료 사용할 경우에는 보강섬유가 이미 휘어진 상태로 존재하기 때문에 스티칭사의 압축에 의한 보강섬유의 휨이 복합재료의 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는다. 본 연구에서는 S-2Glass, Kevlar, Spectra 세 종류의 섬유로 제직한 직물을 보강재로 사용하였으므로 스티칭에 의한 압축강도 저하는 거의 없었다. 본 연구에서 각각의 시편이 충격시 흡수한 에너지와 충격후 잔여 압축강도는 Fig. 3-Fig. 5에 보인 바와

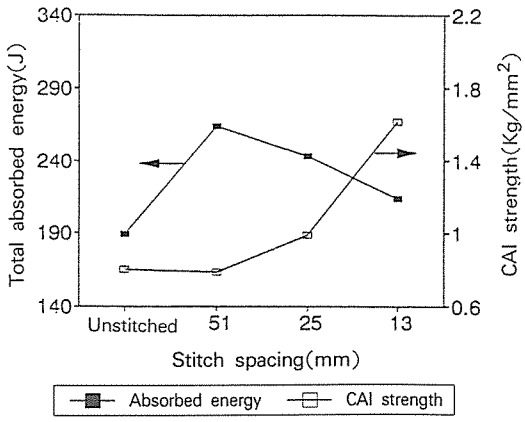

Fig. 3. Total absorbed energy and compression after impact(CAI) strength of S-2Glass/Polyester composite at different stitch spacings.

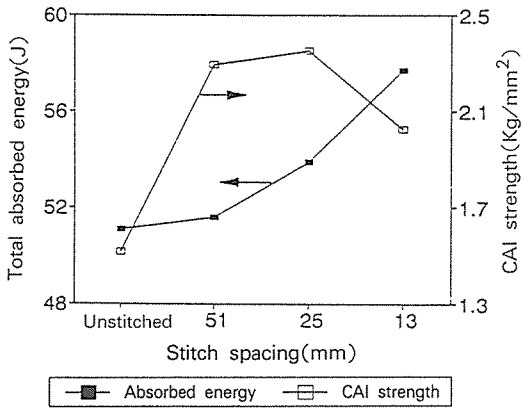

Fig. 4. Total absorbed energy and compression after impact(CAI) strength of Kevlar/PVB-Phenol composite at different stitch spacings.

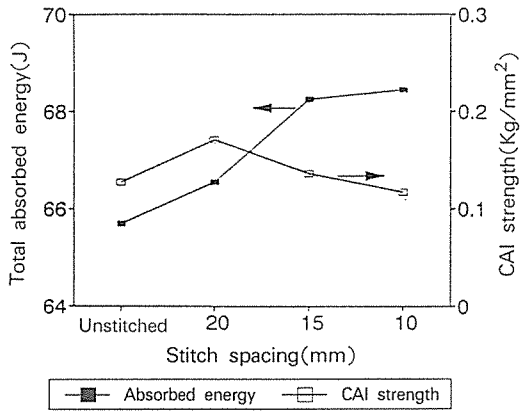

Fig. 5. Total absorbed energy and compression after impact(CAI) strength of Spectra/Vinylester composite at different stitch spacings.

같다.

S-2Glass/Polyester 적층 복합재료의 경우 Fig. 3에 보인바와 같이 스티치 간격이 51mm일때 흡수한 충격 에너지가 최대가 되었고 스티치 간격이 더 조밀해지면서 흡수 에너지가 다시 점차 감소하였다. 충격후 잔여 압축강도는 스티치 간격이 좁아지면서 지속적으로 증가함을 보였다. 스티치 간격이 넓을 때에는 스티칭사를 통한 효과적인 하중전달에 의하여 충격 에너지를 시편 전체에 분산시킴으로써 흡수되는 충격 에너지양이 증가하지만 스티칭에 의한 보강효과가 적고 시편이 손상을 심하게 받게 되므로 잔여 압축강도가 낮은 값을 보였다. 스티칭

간격이 더 좁아지면 충격에너지의 전파가 억제되면서 충격 에너지의 흡수가 감소하지만 손상범위 또한 감소하기 때문에 충격후 잔여 압축강도는 지속적인 증가를 보이게 된다.

Kevlar/PVB-Phenol 적층 복합재료의 경우에는 스티치 간격이 조밀해질수록 흡수하는 에너지가 증가하였으며 25mm 간격으로 스티칭하였을 때 충격후 잔여 압축강도가 가장 높은 값을 보였다(Fig. 4). 스티치 간격이 좁아질수록 스티칭사가 충격에너지를 시편에 고르게 분산시켜 흡수하는 에너지의 양이 증가되면서 스티칭사에 의하여 시편의 손상범위가 감소하게 된다. 따라서 충격후 압축강도 또한 스티치 간격의 감소와 함께 증가하게 된다. 그러나 25mm 보다 좁은 스티치 간격으로 스티칭할 경우 스티칭 공정중에 복합재료 내부 보강섬유의 손상이 심하게 발생함으로 인하여 손상 영역이 감소하더라도 충격후 잔여 압축강도가 다시 저하됨을 알 수 있었다.

Spectra/Vinylester 복합재료에 있어서도 Kevlar/PVB-Phenol 복합재료의 비슷한 결과를 보였으며 20mm 간격으로 스티칭하였을때 충격 후 잔여 압축강도가 가장 큰 값을 나타냈다.

압축 실험시 시편의 손상부위에서는 buckling이 일어나게 된다. S-2Glass/Polyester 복합재료의 경우 보강섬유가 brittle 하기 때문에 손상부위 이외의 보강섬유는 원래 상태의 배열을 유지하게 되므로 압축 하중을 받을때 Fig.6(a)와 같이 시편의 전면과 후면에 대칭적인 buckling이 일어남을 알 수 있었다. 이로 인하여 시편은 지속적으로 압축하중을 받게 되며 하중에 제거되면 시편이 원래의 상태로 되돌아 가려는 탄성 거동을 보였다. 또한 스티칭을 해 준 경우에 스티칭사가 복합재료의 변형을 억제하므로 buckling이 적게 일어남을 확인하였다. Kevlar/PVB-Phenol과 Spectra/Vinylester 복합재료의 경우는 충격이 가해지면 손상부위 주위의 보강섬유가 배열이 흐트러지게 된다. 이로 인해 압축하중이 가해지면 Fig.6(b)와 같이 전단응력이 보강섬유와 기지물질 사이에 발생하게 되어 debonding이나 기지 균열 등을 수반한 전단변형에 의한 buckling이 일어남을 알 수 있었다. 이 경우

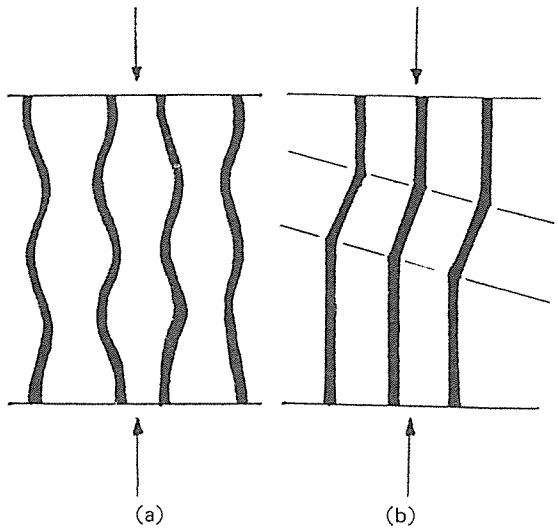

Fig. 6. Schematic diagram of (a) compressive and (b) shear deformations caused by compressive loading.

에도 스티칭을 많이 해 줄수록 buckling이 감소함을 알 수 있었다.

스티칭 복합재료에 충격을 가할 때 복합재료의 두께방향으로 보강하여준 스티칭사에 의하여 충격하중을 두께방향으로 효과적으로 전파시킬 수 있으며 외부 충격에 의한 층간분리를 억제할 수 있다. 스티칭사는 충격에너지를 시편에 분산시키고 스스로 충격에너지의 일부를 흡수함으로써 스티칭 복합재료의 에너지 흡수능력을 증가시킨다. 또한 외부충격에 의한 손상을 감소시킴으로써 복합재료의 파괴 인성을 증가시킨다. 그러나 스티칭 공정중에 스티칭사가 적층 복합재료를 관통함으로 인하여 복합재료 내부 보강섬유의 절단과 손상이 발생하고 스티칭사가 지나가는 부분과 지나지 않는 부분이 존재함으로 인해 내부 구조가 불균일하게 되어 복합재료의 물성과 파괴 인성을 감소시키는 원인이 된다. 이와 같은 이유로 해서 S-2Glass/Polyester 복합재료는 스티칭 간격이 좁아지면 에너지 전파범위가 축소되어 충격 에너지의 흡수가 감소하면서 충격후 잔여 압축강도가 증가하였다. 또 Kevlar/PVB-Phenol, Spectra/Vinylester과 같은 연성계 복합재료는 스티칭을 많이 해줄수록 에너지 전파가 더 잘 일어나게 되어 흡수 에너지가 증가하지만

과도한 스티칭을 하게 되면 스티칭 공정중에 생기는 복합재료 내부의 손상으로 인하여 충격후 잔여 압축강도가 다시 감소하게 된다.

복합재료의 파괴 인성을 증가시키기 위해서는 스티칭에 의한 보강효과와 스티칭 공정에 수반되는 복합재료의 손상 등을 고려하여 최적의 조건으로 스티칭을 해 주어야 한다. 충격후 잔여 압축강도만으로 파괴인성을 평가하면 S-2Glass/Polyester 복합재료의 경우는 스티치 간격이 조밀할수록, Kevlar/PVB-Phenol과 Spectra/Vinylester 복합재료의 경우는 각각 스티치 간격 25mm와 20mm로 스티칭해 줄 경우가 가장 높은 파괴 인성을 나타냄을 알 수 있었다.

3-2. 손상 영역

S-2Glass/Polyester, Kevlar/PVB-Phenol, Spectra/Vinylester 스티칭 적층 복합재료를 2.85g의 탄자로 각각 700, 550, 530 m/sec의 속도로 고속충격을 가하여 완전 관통이 일어나도록 한 다음 관통단면을 절단하여 층간 분리가 일어난 길이를 측정하였다. Fig.7~Fig.9는 각 시편별로 층간분리가 일어난 길이를 비교한 것이다. 스티칭 간격을 좁게할수록 층간분리 현상이 현저히 감소함을 확인할 수 있었으며 스티칭하지 않은 적층 복합재료와 비교해 볼 때 층간결합력이 비교적 우수한 S-2Glass/Polyester 적층 복합재료는 50%, Kevlar/PVB-Phenol 적층 복합재료는 55%, 층간결합력이 낮은 Spectra/Vinylester 적층 복합재료는 75% 이상 층간분리를 감소시킬 수 있었다.

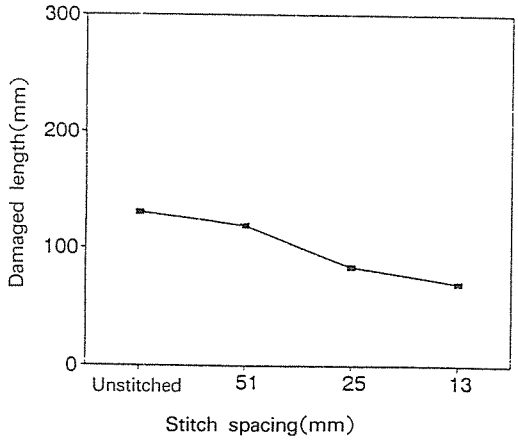

Fig. 7. Damaged length of S-2Glass/Polyester composite at different stitch spacings.

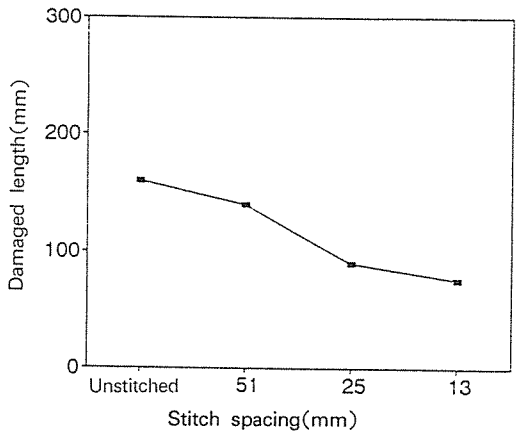

Fig. 8. Damaged length of Kevlar/PVB-Phenol composite at different stitch spacings.

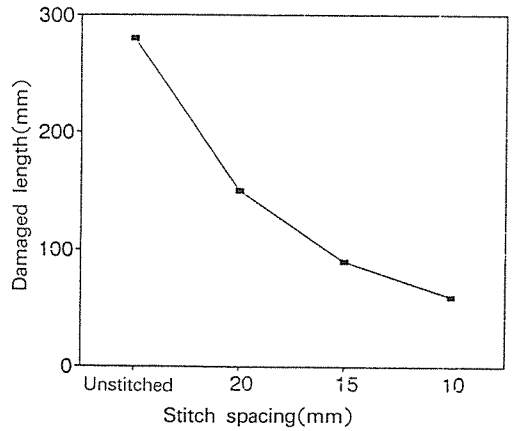

Fig. 9. Damaged length of Spectra/Vinylester composite at different stitch spacings.

Fig.10은 10mm 간격의 plain 스티치로 스티칭한 S-2Glass/Polyester 복합재료의 모우드 I 파괴실험을 행한 결과를 보인 것이다. 스티칭 복합재료는 균열이 진전함에 따라 스티칭하지 않은 적층 복합재료보다 더 큰 하중을 받게 되므로 보강된 스티칭사가 층간분리를 억제함을 알 수 있다. 스티칭 복합재료의 균열이 4mm를 넘게되면 보강된 스티칭사가 파단되면서 파괴하중이 급격히 감소함을 알 수 있었고 균열이 더욱 진전함에 따라 인접한 스

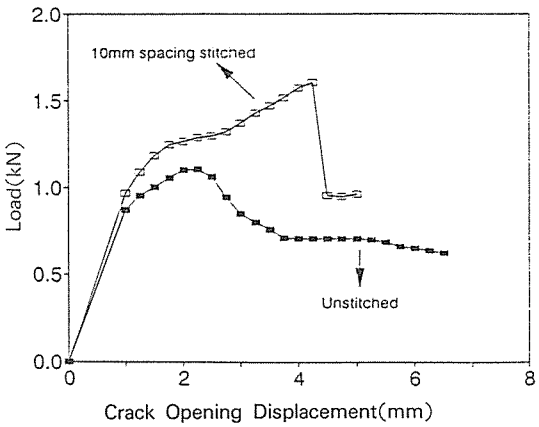

Fig. 10. Load-crack opening displacement curve of S-2Glass/Polyester composite.

티칭사에 의해 계속해서 같은 파괴 거동을 반복하였다. 이와 같은 파괴거동에 의하여 스티칭 복합재료는 스티칭하지 않은 적층 복합재료보다 층간분리를 수반하는 변형이 일어날 때 훨씬 더 많은 에너지를 소비하게 된다. 고속탄자가 복합재료를 관통하면서 충격파에 의해 층간분리나 bulging 현상이 일어나게 되는데 이때 스티칭사가 파단되면서 많은 에너지를 소비함과 동시에 충격에너지를 시편 전체에 넓게 분산시키는 역할을 함으로써 시편의 손상범위를 국소화시키고 파괴 인성을 향상시킴을 알 수 있었다.

4. 결 론

S-2Glass/Polyester, Kevlar/PVB-Phenol, Spectra/Vinylester 스티칭 복합재료에 충격을 가한 후 압축실험을 행하여 잔여 압축강도를 측정하고 고속충격에 의한 손상영역을 비교함으로써 스티칭이 적층 복합재료의 충격 인성 향상에 미치는 영향을 고찰하였다.

S-2Glass/Polyester 복합재료는 스티치 간격이 조밀해질수록 충격 후 잔여 압축강도가 증가함을 보였으며 Kevlar/PVB-Phenol 복합재료와 Spectra/Vinylester 복합재료는 각각 25mm와 20mm의 간격으로 스티칭하였을때 가장 높은 충격후 잔여 압축강도를 나타냈다.

모우드 I 파괴실험에서 스티칭 복합재료가 일반 적층 복합재료보다 층간분리에 의한 에너지 소비가 더 크다는 사실을 알 수 있었다. 이로인해 고속충격탄자의 관통에 의해 발생하는 층간분리의 범위를 스티칭을 하지 않는 적층 복합재료의 50% 이하로 제한할 수 있었다.

적층 복합재료에 적절한 조건으로 스티칭을 하여줌으로써 충격후 잔여 압축강도가 증가하고 손상영역이 축소되어 충격에 대한 인성과 구조보지성이 향상됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 94년도 교육부 신소재 분야 연구지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D.A. Evans and J.S.Boyce, "Transverse Reiforcement Methods for Improved Delamination Resistance", 34th International SAMPE Symposium, 1989, pp.271-282.

2. F.J. Arendts, K. Drenchsler and J.Brandt, "The Application of Three-dimensional Reinforced Fiber Preforms to Improve the Properties of Composities", 34th International SAMPE Symosium, 1989, pp.2118-2129.

3. Gary L. Farley, "A Mechanism Responsible for Reducing Compression Strength of Through-the-Thichness Reinforced Composite Material", Journal of Composite Materials, Vol.26, No.12, 1992, pp.1784-1795.

4. I.Verpoest, M.Wevers and P.De Mester, "2.5-D and 3-D Fabrics for Delamination Resistnat Composite Laminates and Sandwich Structure", SAMPE J., Vol.25, No.3, 1989, pp.51-56.

5. M.T.Cholakara, B.Z. Jang and C.Z.Wang, "Deformation and Failure Mechanics in 3D Composites", 34th International SAMPE Symosium, 1989, pp.2153-2160.

6. J.G. Funk and H.B.Dexter, "Experimental

Evaluation of Stitched Graphite/Epoxy Composite", NASA Langley Research Center, Hamptor, Virginin, pp.185–204.

7. G.V.Schooneveld, "Potential of Knitting/Stitching and Resin Infusion for Cost-Effective Composites", Xerkon Inc., Minneapolis, MN, pp.113–130.

8. C.L.Ong, T.B.Hong and J.Y.Huang, "Studies of Impacted Composite Laminates", 38th International SAMPE Symosium, 1989, pp.978–987.

9. R. Falabella, K.A.Boyle, "Variations in Impact Test Methods for Tough Compsite", 35th International SAMPE Symposium, 1990, pp.1454–1465.

10. 이승호, 강태진, 이재곤, 육종일, "적층 복합재료의 스티칭에 의한 구조 보지성 향상에 관한 연구", 한국섬유공학회지, 제 30 권 제 11 호, 1993, pp.817–822.

11. 이승호, 강태진, 육종일, "스티칭에 의한 Spectra/비닐에스테르 적층복합재료의 내충격성 변화에 관한 연구", 한국섬유공학회지, 제 31 권 제 1 호, 1994, pp.32–26.

12. "Advanced Composite Compression Test", Boeing Specification Support Standard BBS 7260, rev. 1988.