2752 大韓機械學會論文集 第17卷 第11號, pp. 2752~2761, 1993.

〈論 文〉

충격하중을 받는 CFRP 적층판의 충격손상과 굽힘 잔류강도

직교 이방성 적층판의 충격손상과 파괴메카니즘

심재기* · 양인영** · 오택열***

(1993년 3월 12일 접수)

Impact Damage and Residual Bending Strength of CFRP Composite Laminates Subjected to Impact Loading

Fracture Mechanism and Impact Damage of Orthotropy Laminated Plates

Jae Ki Sim, In Young Yang and Taek Youl Oh

Key Words : Foreign Object Damage(이물충격손상), Impact Damage(충격손상), CFRP(탄소섬유복합재), Delamination Area(박리면적), Impact Energy(충격에너지), Residual Bending Strength(잔류굽힘강도).

Abstract

The purpose of this study is to confirm the decreasing problems of residual bending strength, and the fracture machanism experimentally when CFRP composite laminates are subjected to Foreign Object Damage. Composite laminates used for this experiment are CFRP orthotropy laminated plates, which have two-interfaces $[0_6^0/90_6^0]_{sym}$ and four-interfaces $[0_3^0/90_6^0/0_3^0]_{sym}$. When the specimen is subjected to transverse impact by a steel ball, the delamination area generated by impact damage is observed by using SAM (Scanning Acoustic Microscope). also, The fracture surfaces obtained by three-point bending test were observed by using SEM (Scanning Electron Microscope). Then, fracture mechanism was investigated based on the observed delamination area and fracture surface. The results were summarized as follows ; (1) It is found that for the specimen with more interface, the critical delamination energy is increased while delamination-developement energy is decreased. (2) Residual bending strength of specimen A is greater than that of Specimen B within the impact range of impact energy 1.65J (impacted-side compression) and 1.45J (impacted-side tension). On the other hand, when the impact energy is beyond the above ranges, residual bending strength of specimen A is smaller than that of specimen B. (3) In specimen A and B, residual strength of CFRP plates subjected to impact damage is lower in the impacted-side compression than in the impacted-side tension. (4) In the case of impacted-side compression, fracture is propagated from the transverse crack generated near impact point. On the other hand, fracture is developed toward the impact point from the edge of interface-B delamination in the case of impacted-side tension.

*정회원, 조선대학교 정밀기계학과
**정회원, 조선대학교 기계설계공학과
***정회원, 경희대학교 기계공학과

1. 서 론

최근 항공기 우주기기등 우주구조용 재료로서 가장 주목받고 있는 선진복합재료중에서도 탄소섬유강화수지(이하 CFRP라고 한다)는 비강도 비강성이 높기 때문에 경량화가 요구되는 여러분야 즉, 원심분리기의 회전동, 항공기의 압축기동익, 헬리콥터의 회전익 등 항공우주 산업을 시작으로 여러분야에서 응용이 시도되고 있다. 그러나 CFRP 적층재의 결점의 하나는 충격에 대해서 약하다고 하는 것이 지적되어,[1] 복합재료의 충격문제는 가장 중요한 문제로 되어 있다. CFRP 적층판이 항공기 구조부재로 이용될 때 정비중의 공구낙하(Tool drop)나 비행중 날으는 새와의 충돌(Bird strike),[2] 이착륙시의 작은돌이나 파편등의 여러종류 재질의 충돌체에 의한 충격손상(Foreign object Damage : FOD)을 피할수가 없으며,[3] 표면으로부터는 거의 보이지 않는 충격손상이 적층판 내부에 발생하여 이것에 의해 강도가 저하하게 되는것이 중요한 문제로 지적되고 있다.[4~6] 최근에는 Rotem[7] 黑川[1]등은 횡충격을 받는 적층판은 파괴굽힘강도가 아주 낮다는 점에 주목하여 횡충격에 의해 충격손상을 받는 CFRP 적층판을 3점굽힘 및 4점굽힘 시험을 행하여 굽힘잔류강도 저하관계를 실험적으로 설명하고 있다. 그러나 이들 모두 충격 에너지와 박리면적의 관계 및 잔류강도저하 관계만을 실험적으로 설명하고 있을뿐 충격손상에 의해 잔류강도가 저하하는 파괴메카니즘에 관한 연구는 행해져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 적층수가 같고 적층계면의 수가 다른 CF/EPOXY 직교이방성 적층판에 충격을 가하여 충격 에너지의 크기와 박리손상면적의 관계 및 임계박리에너지와의 관계를 명확히 하고, 3점굽힘 시험을 행하여 충격손상을 받는 CFRP 적층재의 잔류굽힘강도 저하관계를 평가하고 파괴메카니즘을 해명하는 것을 목적으로 한다. 연구방법으로서는 먼저 CFRP 적층판에 강구에 의한 충격손상을 부여하고 내부손상이 생긴 시험편을 초음파 현미경으로 관찰하여 층간계면 박리면적을 측정, 촬영한후, 충격에너지의 크기와 손상박리면적의 관계를 구하고 충격면이 각각 인장, 압축이 되도록 3점굽힘시험을 행한 후, 잔류강도가 급격히 저하하는 충격손상이 있는 적층판에 대한 파괴메카니즘을 규명하기 위하여 주사전자현미경으로 파면을 관찰하였다. 3점굽힘시험에서는 충격손상부위가 壓子의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 壓子의 접촉 위
치로부터 임의의 위치 떨어진 곳에 충격손상을 부여하여 파괴가 발생하도록 배려했다.

2. 실험 방법

2.1 시험편의 형상

본 실험에 이용한 CFRP 적층판은 1방향 프리프레그(prepreg, 東レ製のトレカ P3051-15, 탄소섬유는 T300-3000, 메트릭스인 에폭시(EPOXY)수지는 #2500)로 제작되었다. 본 실험에 이용한 CFRP 시험편은 2종류이며, 각각의 적층 순서는 시험편 A : $[0_6^\circ/90_6^\circ]_{sym}$. 및 시험편 B : $[0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ]_{sym}$으로서 적층수는 모두 24플라이(ply)이다. 시험편의 형상은 40×180×3.75 mm(폭×길이×두께)의 띠판이며, 표면의 섬유방향이 0°방향이 되도록 시험편의 길이 방향과 일치시켰다. 시험편의 폭은 충격손상 폭보다 넓게하여 시험편의 가장자리의 효과가 시험결과에 영향을 미치지 않도록 했다.

2.2 충격 실험

직경 150 mm의 원공이 있는 두께 10 mm의 강판 2매에 같은 직경 150 mm의 원공이 있는 고무판을 붙여 한중앙에 시험편을 지지하고 Fig. 1과 같은 압축공기를 이용한 충격시험장치에 의해 직경 5 mm(0.5g)의 강구를 시험편에 충돌시켰다. 강구의 충격속도는 시험편의 앞에 설치한 1조의 포토셀

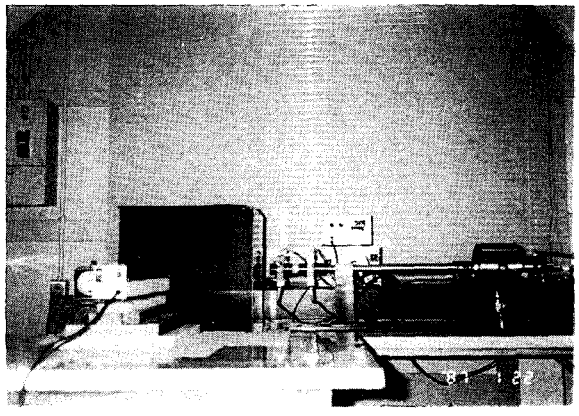


Fig. 1 Photo of impact test apparatas

(photo. cell)에 의해 강구가 2정점(10 cm)간을 통과하는 시간을 체크하여 측정하였다. 충격속도는 압축공기압력을 변화시켜 얻었고, 본 실험에서는 대략 82.64 m/s(1.7J) 및 100 m/s(2.5J)의 속도로 충격을 가하였다. 충격에너지 [단위(J)]는 충돌 직전의 충돌체의 운동에너지를 나타낸다.

2.3 충격손상의 관찰방법

충격시험후에 생긴 시험편 내부의 界面剝離를 Fig. 2와 같이 초음파 현미경(Olympus UH 100, 사용 주파수 30 MHz)을 이용하여 관찰하였다. 편의상, Fig. 3과 같이 충격면으로 부터 계면 A, B, C, D로 정하고 시편 A의 경우, 충격면에서 계면 A를 관찰한 후, 충격면 반대편에서 계면 B를 관찰하여 全剝離面積을 계산했다. 박리면적 계산방법은 각 계면을 색갈별로 구분하여 각 색갈이 분포된 영역을 초음파현미경 내장의 소프트웨어를 이용하여 각 계면의 박리면적을 계산한 후 합산하여 전 박리면적으로 하였다. 시편 B의 경우는 계면이 4개이므로 충격면에서 계면 A와 B를 관찰하고, 충격면 반대편에서 계면 C, D를 관찰 하였다. 시험편 B의 경우, 계면 B는 계면 A에, 계면 C는 계면 D에 의해 보이지 않는 부분이 있으나 초음파현미경의 특성상 부득히 하여 투영단면적을 박리면적으로 하였다.

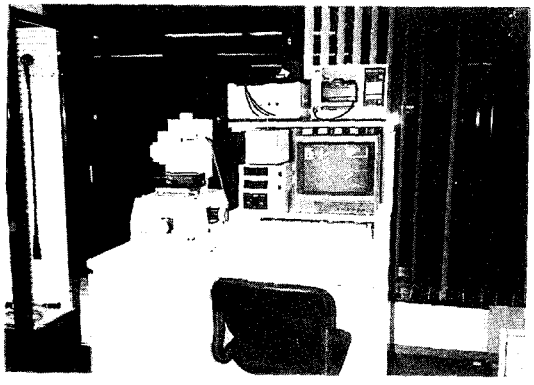


Fig. 2 Photo of Ultrasonic Microscope

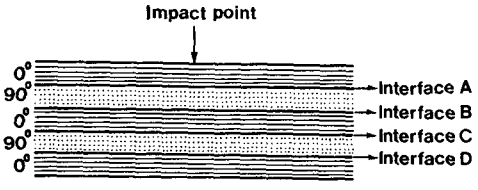


Fig. 3 Interface of CFRP specimen

2.4 정적 3점굽힘시험

충격손상을 받은 시편의 잔류굽힘강도를 조사하기 위하여 정적 3점굽힘시험을 행했다. 정적 3점굽힘시험은 Fig. 4(a)와 같은 지그(Jig)를 재료시험기(INSTRON 8501)에 부착하여 Fig. 4(b), (c)와 같이 충격면이 인장을 받는 경우와 압축을 받는 경우를 구별해서 시험을 행했다. 굽힘시험에서는 시편이 파괴되는 최대하중을 구하여 굽힘응력을 계산하였고, 파괴된 후 파면은 주사전자현미경(日本電子 JSM-T200, 배율 35-100,000)을 이용하여 관찰하였다.

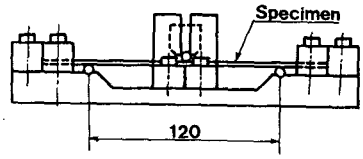
파괴굽힘응력을 구할때는 시험편을 균질등방성보로 가정하여 행했으며,[8] 계산에서는 시험편의 폭과 판두께는 실측치를 이용해서 시험편의 치수오차의 영향을 제거하였다.

파괴 굽힘응력 계산식은 다음과 같다.

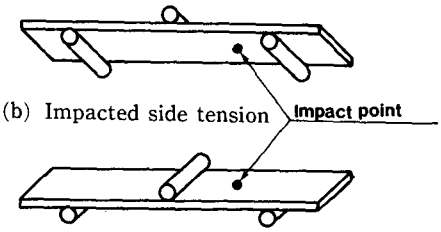
$$I=\frac{bd^3}{12}$$

$$\sigma=\frac{(PL/4)(d/2)}{I}=\frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

여기서 σ : 굽힘응력(P_a)
P : 파괴시의 최대하중(N)
L : 스판의 길이(m)
b : 시험편의 폭(m)
d : 시험편의 두께(m)
I : 관성모멘트(m^4)



(a) Bending jig



(b) Impacted side tension

(c) Impacted side compression

Fig. 4 Three-point bending jig

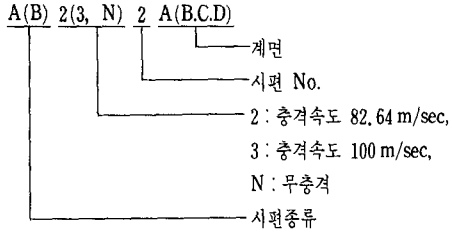
이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격에너지와 박리면적과의 관계

CFRP시험편이 충격을 받았을때 내부계면에 생긴 손상박리면적의 크기를 초음파현미경에 의해 촬영한 대표적인 사진을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 5(a)는 시편A의 계면 A, B 박리면적의 크기를 나타내는 합성사진이며, 적색은 A계면, 녹색은 계면 B를 나타낸다. Fig. 5(b)는 시편 A의 계면 B의 박리면적을 나타낸다. Fig. 6(a)는 계면수가 4개인 시편 B를 충격면에서 촬영한 계면 A, B의 박리면적을 나타낸것으로 적색은 계면 A, 녹색은 계면 B 이다. Fig. 6(b)는 시편B를 충격면의 반대측에서 촬영한 계면 C, D의 박리면적을 나타낸 것으로 청색은 계면 C, 적색은 계면 D이다.

시편규약은 다음과 같다.



손상재의 박리면적 측정결과 및 3점굽힘시험결과는 Table 1과 같다.

Fig. 7에는 시편 A, B의 충격 에너지와 박리 면적과의 관계를 나다낸다.

Fig. 7 중의 실선은 최소자승법에 의해서 계산된 것으로 시편 A, B 모두 선형적인 관계를 나타내며, 계면수가 많은 시편일수록 초기박리를 생기게 하는 충격에너지가 더 커지는데 계면수가 4개인 시편 B의 임계박리에너지는 0.860으로서 계면수가 2개인 시편 A의 임계박리에너지 0.41보다 배이상 커짐을 알 수 있다. 즉 계면수가 많은 시험편이 임계박리에너지가 커서 충격손상이 작음을 알 수 있다. 또한 이들 관계를 수식으로 나타내면 시험편 A,B의 충격에너지의 크기에 따른 박리면적 S_A, S_B (mm^2)는 Fig. 7에서와 같이 계면수가 많은 시험편일수록 충격에너지의 크기에 따른 박리면적의 크기를 나타내는 박리진전에너지(mm^2/J)는 작아짐을 알 수 있다.

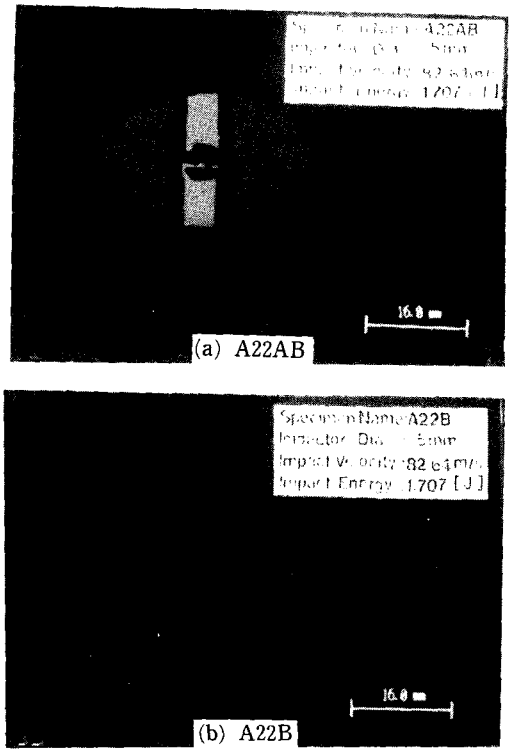


Fig. 5 Delamination Area of Specimen A

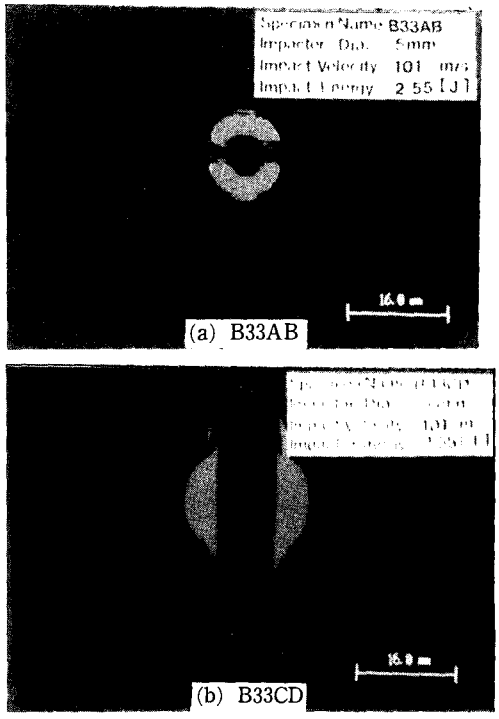


Fig. 6 Delamination Area of Specimen B

Table 1 Results of delamination area measurement and 3-point bending test

시험편명	충격시험							3점굽힘 시험	
	충격속도 (m/s)	충격에너지 (J)	박리면적 (mm^2) 계면A	계면B	계면C	계면D	Total	굽힘시험 조건	파괴굽힘응력 (GPa)
AN1	0	0					0		1.493
AN2	0	0					0		1.570
A21	82.64	1.707	110.13	453.00			563.13	충격면압축	0.789
A22	82.64	1.707	77.60	399.29			477.00		
A23	82.00	1.680	132.70	449.67			582.37	충격면인장	0.862
A24	82.64	1.707	93.60	390.00			483.6	충격면압축	0.890
A25	82.64	1.707	94.20	384.80			479.00	충격면인장	0.957
A31	95.24	2.267	128.26	553.82			682.08		
A32	102.00	2.601	139.67	678.64			818.31		
A33	101.00	2.550	130.43	630.17			760.60	충격면인장	0.792
A34	100.00	2.550	130.43	613.75			750.00	충격면압축	0.757
A35	102	2.601						충격면인장	0.769
A36	101	2.550						충격면압축	0.661
BN1	0	0					0		1.111
BN2	0	0					0		1.120
A21	82.64	1.707	36.60	37.73	93.55	0	167.88	충격면압축	0.983
B22	82.64	1.707	37.12	42.95	84.67	11.06	175.80		
B23	82.00	1.680	33.48	32.51	97.15	10.20	173.34	충격면인장	1.114
B31	94.30	2.223	59.67	40.31	115.75	41.60	257.33	충격면압축	0.843
B32	100.00	2.500	45.95	42.56	198.40	61.31	348.28	충격면인장	0.994
B33	101.00	2.550	66.14	63.86	208.10	93.90	432.00		
B34	101.00	2.550	74.14	64.14	243.73	133.87	520.88	충격면인장	1.010

3.2 정적 3점 굽힘 시험 결과

충격손상이 있는 시험편의 계면손상영역을 초음파현미경에 의해 관찰한후 잔류굽힘강도 저하관계를 고찰하기 위하여 정적 3점 굽힘실험을 행했다. Fig. 8에 시험편 A, B의 박리면적과 파괴굽힘강도와의 관계를, Fig. 9에 시험편 A, B의 충격에너지와 파괴굽힘강도와의 관계를 충격면인장과 충격면압축의 경우를 구별하여 나타낸다.

Fig. 10은 시편 A, B의 충격에너지와 잔류굽힘강도와의 관계를 나타낸것으로 잔류강도는 무충격시험편의 파괴굽힘응력을 100%로 했을때 충격손상이 있는 시험편과의 파괴굽힘응력의 비이다.

이상에서 알 수 있는 바와같이 시편 A, B 어느 경우나 충격면 압축인 경우가 충격면 인장인 경우보다 잔류강도의 저하가 더 크다. Fig. 8은 박리면적크기와 파괴굽힘강도와의 관계를 나타낸것으로서 시편A의 경우는 박리면적이 커짐에 따라 충격면압축인 경우에 비해 약간 강도가 저하하나 계면수

가 많은 시편 B의 경우는 급격히 저하함을 알 수 있다. 또한, Fig. 9에서 무충격의 경우는 계면수가 적은 시험편 A가 계면수가 많은 시편 B보다 강도가 약 38%정도 큼을 알 수 있으며 충격손상을 받을 때 충격면인장인 경우는 충격에너지가 1.45J,

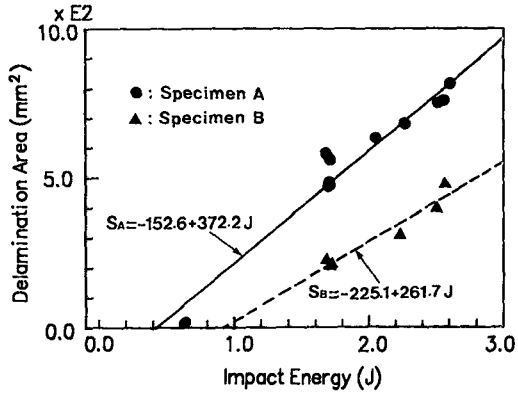


Fig. 7 Relation between impact energy and delamination area of specimen A, B

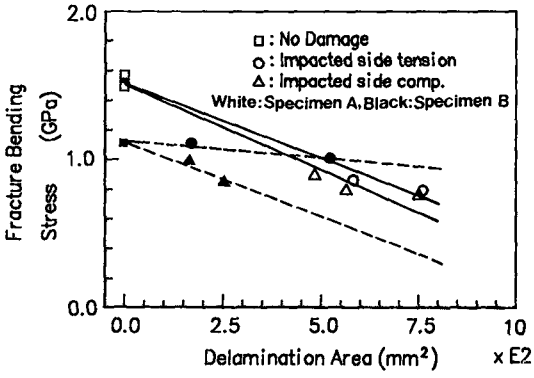


Fig. 8 Relation between delamination area and fracture bending stress of specimen A, B

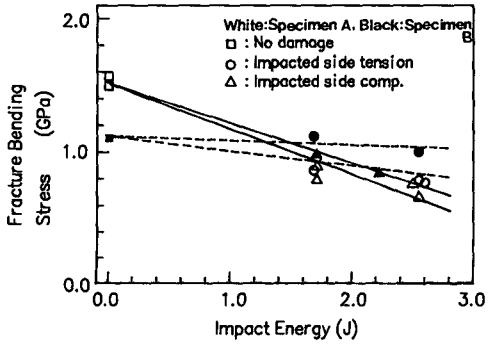


Fig. 9 Relation between impact energy and fracture bending stress of specimen A, B

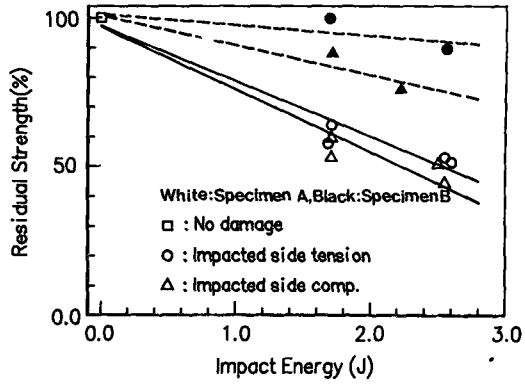


Fig. 10 Relation between impact energy and residual strength of specimen A, B

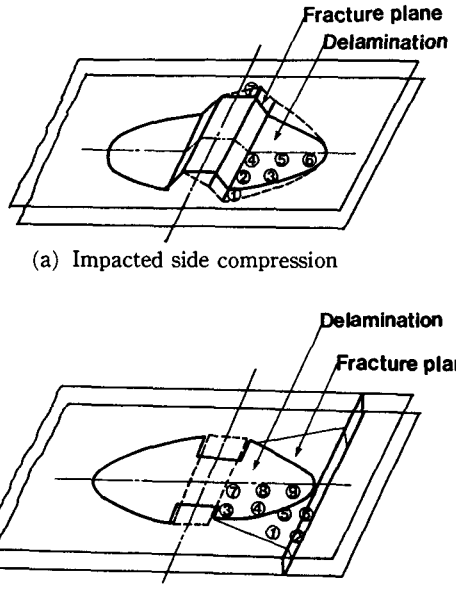
충격면 압축인 경우는 충격에너지가 1.65J 범위 이내의 충격손상을 받는 경우는 계면수가 2계면인 시편 A가 계면수가 4계면인 시편 B보다 충격에 강하며, 이 이상의 충격범위에서는 계면수가 적은 시편 A가 시편 B보다 잔류굽힘강도 작음을 알 수 있다. 다시 말하면 계면수가 적은 시험편은 충격손상에 의해 잔류강도가 크게 저하하며, 계면수가 많은 시험편은 충격손상에 의해 잔류강도가 그다지 저하되지 않음을 알 수 있다.

따라서 충격손상에 의해 잔류강도가 크게 저하하는 시편 A에 대해서 주사 전자 현미경을 이용하여 파면관찰을 행해 파괴메카니즘을 고찰한다.

4. 파괴메카니즘

3.2절에서와 같이 충격손상이 있는 시편 A의 급격한 잔류강도 저하관계를 고찰하기 위하여 충격손상을 받은 시편을 충격면 인장 및 충격면 압축인 각각의 경우에 대하여 정적 3점 굽힘 시험을 행한 후 파면을 주사 전자현미경으로 관찰하였다. 파면 관찰위치는 충격손상이 있는 CFRP적층판의 계면 박리 및 파괴 진전현상을 관찰하기 위하여 박리 및 파괴진전부분을 다이아몬드 커터로 절단하여 주사 전자현미경을 이용하였고, 파면 관찰용 시편의 절단은 내부박리면적이 절단되지 않도록 하였으며, 박리면 및 파면을 스파팅 처리하였다. Fig. 11은 박리면 및 파면의 관찰 위치를 나타낸 것으로 박리면적을 중심으로 대략 대칭이기 때문에 1/4면 만을 관찰하였다.

Fig. 12는 충격면 압축시의 계면 B의 박리면 및



(a) Impacted side compression

(b) Impacted side tension

Fig. 11 *Observation point of fracture and delamination surface*

파면의 관찰사진을, Fig. 13은 충격면인장시의 계면 B의 박리면 및 파면의 관찰사진을 나타낸다. 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 충격면을 압축한 경우의 파면은 충격점에서 생긴 모재크랙(transverse crack)을 기점으로 하여 인장측인 (90°/0°) 계면(B계면) 전체의 박리에 의하여 파괴된다. 전단파괴할때 생기는 수지모양을 나타내는 허클방향[9]로 부터 전단방향을 쉽게 추측할 수 가 있는데 충격면이 압축인 경우는 Fig. 12와 같이 허클방향을 보면 박리면 중앙(Fig. 11(a)의 point 4, 5, 6)의 박리 진전방향은 계면B의 0°방향 박리단을 향하고 있으며, 박리폭 방향(90°방향)으로 갈수록 (Fig. 11(a)의 point 2, 3)시편 길이방향(0°)대해 약 20~30°정도 기울어져감을 알 수 있다. 계면 A의 파면(Fig. 11(a) point 7)은 90°방향으로 진전하며 모재크랙 근방에서는 폭 방향에 대하여 30°정도의 각도로 진전함을 알 수 있고, 계면 B의 파면(Fig. 11(a)의 point 1)은 충격손상에 의한 박리와는 구별이 되나, 이 역시 박리방향과 같은 방향으로 파괴가 진전됨을 알 수 있다.

충격면이 인장을 받는 경우는 압축 측에 있는 계면 B의 박리의 끝부분에서 모재크랙(transverse crack)이 생겨 충격점을 향하여 계면 B를 따라 파괴된다. 충격면이 인장을 받는 경우는 Fig. 13에서와 같이 허클방향을 보면 계면 B의 박리면(Fig. 11(b)의 point 3, 4, 7, 8, 9)은 충격면이 압축을 받는 경우와 같이 0°방향으로 박리가 진전하나 충격손상이 있는 시험편의 파면은 (Fig(b). 11 의 point 1, 2, 5, 6) 충격면이 압축을 받는 경우와는 반대로 계면B의 박리단에서 생긴 모재크랙을 기점으로 충격점을 향하여 파괴가 진점됨을 알 수 있다.

Fig. 12, 13의 파면사진으로부터 충격에 의해 생긴 박리 진전방향과 충격손상이 있는 시험편의 정적3점 굽힘시험에 의한 파괴모드를 Fig. 14, 15에 나타낸다.

Fig. 14(a)와 같이 충격면이 압축인 경우는 충격점아래에 생긴 모재크랙을 따라서 계면 A, B의 박리가 진전하며 진전폭이 넓은 박리는 인장측계면에 있는 계면B의 박리이다. 이를 설명하기 위하여 Fig. 14(a)에 전단응력 외에 면내 인장, 압축을 고려한 파괴진전 모드를 나타낸다.

이 모드에서는 모재크랙이 인장방향으로 변형하면 개구변위가 크게 되며, 반대로 압축방향으로 변형하면 닫힘현상이 생긴다. 즉 인장측에 있는 모재크랙이 압축측에 비하여 개구변위가 크게 되기 때문에 (mode $I+II$)인장측에 있는 박리의 쪽이 진전하기 쉽게 된다. 따라서 박리가 진전 할 때의 파괴모드를 Fig. 14(a)와 같이 추측할 수 가 있는데, 이는 충격에 의해 생긴 모재크랙은 3점 굽힘시험시에 생긴 전단변형에 의해서 박리를 진전시켜 이것이 파괴의 원인이 됨을 알 수 있다. Fig. 14(b)는 박리 및 파면 진전방향을 나타낸다.

또한 충격면이 인장인 경우는 Fig. 15(a)와 같이 압축측에 있는 계면B의 박리가장자리에서 모재크랙이 생겨 충격점을 향하여 계면 B의 박리가 진전됨을 알 수 있다. 이를 설명하기 위해 Fig. 15(a)에 전단응력외에 면내 압축, 인장을 고려한 파괴진전 모드를 나타낸다.

이 모드(mode $I+II$)에서는 모재크랙이 압축방향으로 변형하면 계면B의 개구변위가 크게되어 박리가 진전 하게된다. 따라서 박리및 파면의 진전방향은 Fig. 15(a)와 같이 추측할 수가 있는데 이 역시 전단변형에 의해 박리를 진전시켜 이것이 파괴의 원인이 된다. Fig. 15(b)에 박리 및 파면의 진전방향을 나타낸다.

따라서 Fig. 14, 15로부터 알 수 있는 바와 같이 충격면 압축인 경우의 파괴기점이 충격면 인장인

경우의 파괴기점보다 충격점으로부터 곡율반경이 더 작기 때문에 작용모멘트가 커서 충격면이 인장인 경우보다 충격면이 압축인 경우가 빨리 파괴가 이른다고 생각된다. 또한, 충격손상을 받는 CFRP 적층재는 통상 인장을 받는 경우보다 압축을 받는 경우가 내충격성이 약하다. 이는 충격손상에 의해

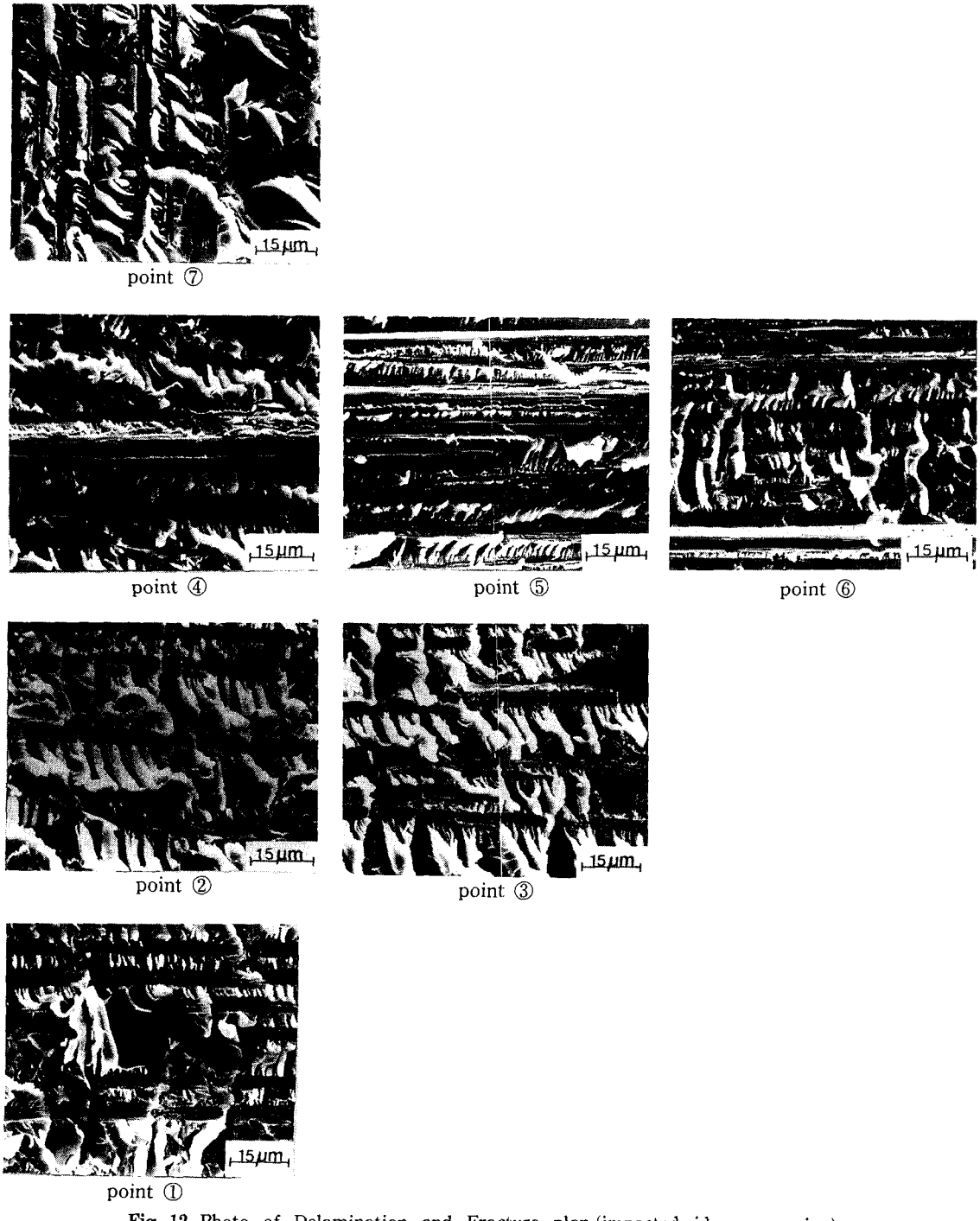


Fig. 12 Photo of Delamination and Fracture plan (impacted side compression)

충격점에 생긴 파단된 섬유는 잔류인장강도 보다 잔류압축강도에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 이와같은 이유로부터 충격 손상재의 BAI(bending strength after impact)시험에서도 충격면이 압축을 받는 경우가 충격면이 인장을 받을 경우보다도 더 빨리 파괴에 이른다고 생각된다.

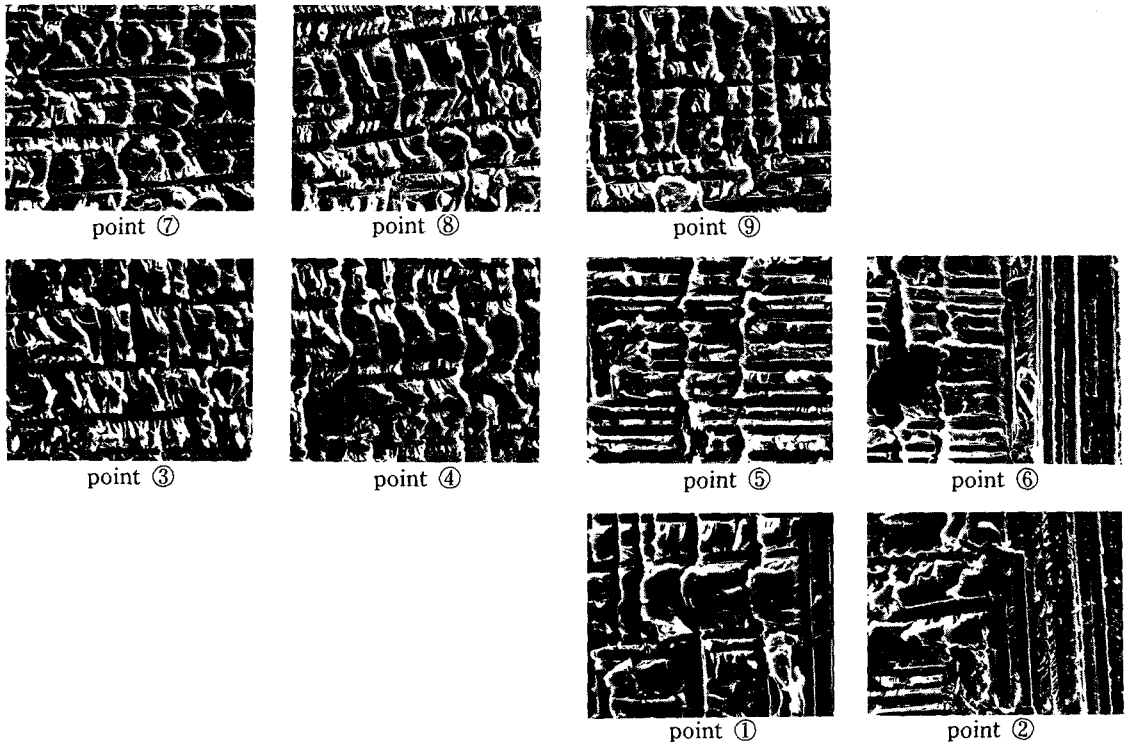
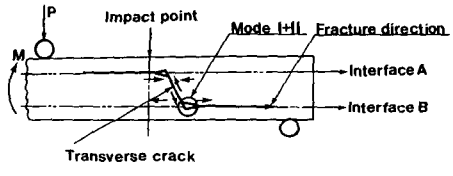
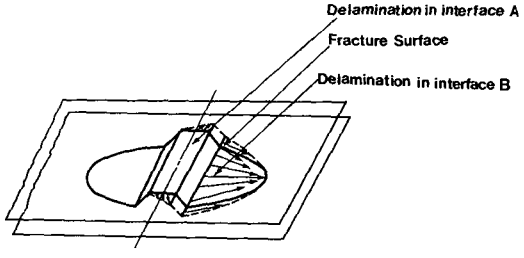


Fig. 13 Photo of Delamination and Fracture plan (impacted side tension)

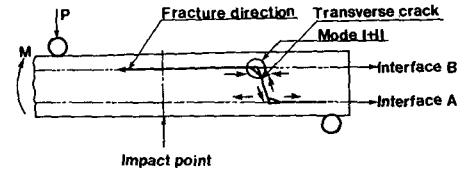


(a) Damage develement mode

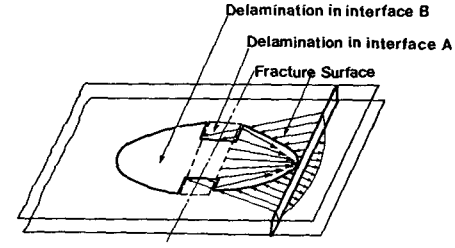


(b) Fracture develement direction

Fig. 14 Fracture Mechanism (impacted side compression)



(a) Damage develement mode



(b) Fracture develement direction

Fig. 15 Fracture Mechanism (impacted side tension)

5. 결 론

CFRP적층판에 충격을 가하여 충격 손상면적을 관찰하고, 3점 굽힘시험에 의한 잔류강도를 계산하여, 적층 계면수의 차에 따라 잔류강도의 저하관계 및 파괴메카니즘에 관해 고찰한 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면수가 많은 시험편 일수록 임계박리에너지가 더 커짐을 알 수 있으며, 계면수가 많을 수록 박리진전에너지는 작아진다.

(2) 충격면압축인 경우 충격에너지가 1.65J, 충격면인장인경우 1.45J의 충격범위 이내에서는 시편A가 시편 B보다 잔류강도가 더 크나, 그 이상의 충격에너지 범위를 넘으면 시편A가 시편 B보다 작다.

(3) 모든 시편에 대해서 충격면인장인 경우보다 충격면압축의 경우가 충격손상에 의한 잔류강도의 저하가 크다.

(4) 충격면압축의 경우는 충격점근방에 생긴 모재크랙(transverse crack)을 기점으로 파괴가 진전하나, 충격면인장의 경우는 계면 B의 박리가장자리를 기점으로 충격점을 향하여 파괴가 진전한다.

참고문헌

(1) 田中吉 え助, 黑川知明ら, 1989, "橫衝擊を 受ける CFRP板の損傷と殘留曲け强度," 日本航空宇宙學會誌 第37券 第25號, pp. 29~36.

(2) MA C.C.M., HUANG Y.H. and CHANG M. J., 1991, "Hydrothermal effect on the PEEK/C. F. and pp. s/c. F. under Impact Loading(I)," ANTEC, pp. 2029~2096.

(3) 武田 展雄, "複合材料の 衝擊應答と 破壞(I)," 1985, 日本複合材料學會誌, 11, 4, pp. 151~161.

(4) Greszczuk, L. B. and Chao, H., 1977, "Impact Damage in Graphite-Fiber-Reinforced Composites," A STM STP 617, ASTM. Philadelphia, pp. 389~408.

(5) Challenger, K. D., 1986, "The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composites", A Workshop Summary, Composites Struct., pp. 295~318.

(6) Ishai, O. and Shragi, A., 1990, "Effect of Impact Loading on Damage and Residual Compressive strength of CFRP Laminated Beams," Composites struct., 14~4, pp. 319~337.

(7) Rotem, A., 1988, "Residual Flexural Strength of FRP Composites Specimens Subjected to Transverse Impact Loading," SAMPE Journal, pp. 19~25.

(8) Malvern, L. E., Sun, C. T. and Liu, D., 1989, "Delamination Damage in Central Impacts at Subperformation Speeds on Laminated Kevlar/EPOXY plates," ASTM. STP. 1012, pp. 387~405.

(9) Smith B.W. and Grove R. A., 1987, "Determination of Crack Propagation Directions in Graphite/Epoxy Structures," Composites and Metals, ASTM. STP. 948, pp. 154~173.