1144 大韓機械學會論文集 第18卷 第5號, pp. 1144~1149, 1994

〈論 文〉

CFRP적층판의 충격손상특성 및 손상거동에 미치는 초기굽힘의 영향

신형섭* · 前川一郎** · 서창민*** · 황남성****

(1993년 7월 29일 접수)

Effect of Pre-Bending on the Properties of Impact Damage in CFRP Laminates

Hyung-Seop Shin, Ichiro Maekawa, Chang-Min Suh and Nam-Seong Hwang

Key Words: Impact Damage(충격손상), Preload(초기하중), Delamination(층간분리), Bending Rigidity(굽힘강성), CFRP Laminates(탄소섬유강화플라스틱 적층판)

Abstract

Damage caused in CFRP laminates by low energy impact of steel ball are investigated ultrasonically. Two types of laminated specimens having different stacking sequence are used as a target material. The effects of pre-bending on the behaviors of impact damage are specifically discussed. The initiation and progagation behaviors of delamination were largely dependent upon the bending rigidity of each specimen. Specimen C having higher bending rigidity produced larger delamination damage than the Specimen D. The influence of pre-bending on damage behaviors was pronounced in the case of Specimen D having relatively low bending rigidity, however it was little for the Specimen C. Application of pre-bending increased the apparent bending rigidity of target during impacting, it produced delamination at lower impact energy level compared to the case of no preload.

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료인 CFRP적층판은 고분자 모재(matrix)의 경량성으로 인해 비강도, 비강성이 높기 때문에 구조물의 경량화가 요구되는 항공우주분야의 구조용 부재로 적용되어 왔고, 현재는 에너지 및 육상교통분야로 그 용도가 확대되고 있다.

섬유강화복합재료는 일방향 섬유강화 단층판(laminar)을 각도를 변화시켜 적층함으로써 단층판에 나타나는 이방성 완화와 더불어 구조설계변수의 다양화를 기할 수 있다. 그러나 적층판의 경우, 두께방향으로는 섬유보강이 불충분할 뿐 아니라, 계면이 존재해 층간강도가 문제로 되고 있으며, 특히 충격으로 인한 손상을 받기가 쉽다.[1,2]

이러한 섬유강화복합재료 적층판을 항공기의 외벽과 같은 구조물에 사용할 경우, 보수 점검작업중 발생하는 공구의 낙하충돌 또는 비행도중 외래물체의 충돌과 같은 적층판에 대한 횡방향충격에 의해 발생하는 손상(FOD : foreign object damage)은 압축하에서 적층재의 강성 및 강도에 크게 영향을 미쳐서 부재의 하중담당능력의 저하를 초래한다.[2~5] 그리하여 복합재료적층판의 손상허용설계 관점에서

*정회원 東北大學 工學部 機械電子工學科
**東北大學 工學部 機械電子工學科
***정회원, 경북대학교 기계공학과
****경북대학교 대학원 기계공학과

충격손상의 특성 및 평가에 관한 연구는 중요하다.

지금까지 FRP적층판의 FOD에 관한 연구는, 적층판에 초기의 부하응력 또는 변형을 고려하지 않고 있는 경우가 대부분이다. 그러나, 실제로 적층판의 제작과 조립과정, 운항중의 공기 동력학적하중과 같은 사용환경에 따라서는 초기하중의 부하 또는 초기변형의 작용이 예상된다. 이러한 초기하중등의 부하는 일반적으로 충격시 접촉거동 및 구조물의 동적응답에 영향을 미치고,[6~9] 부하조건에 따라서는 충격손상을 더욱 증대시킬 수도 있다. 그리하여 실제 사용조건을 고려한 초기하중의 작용이 각종 복합적층재에서 발생하는 충격손상거동에 미치는 영향에 관한 검토가 필요하다.[10~12]

본 연구에서는, 鋼球의 低에너지 충격에 의해 적층순서를 달리하는 CFRP적층판에 발생하는 충격손상의 특성을 조사하였다. 특히 초기하중에 의한 정적굽힘의 작용이 층간분리의 발생 및 증대거동에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 형상

본 연구에 사용한 CFRP적층판은, Toley사의 프리프레그(탄소섬유는 T300, 에폭시수지는 #2500)를 12층 적층한 것으로, Table 1은 각각 0°와 ±45° 일방향 섬유강화재의 기계적 성질을 나타내고 있다. 각층은 36%의 에폭시수지를 함유하고 있다. 시험편은 0°층과 ±45°층의 적층순서(stacking sequence)를 판두께방향의 중립면에 대하여 대칭되게 배치한 2종류를 준비하였다. 본 연구에서는 다음의 적층순서를 갖는 시험편을 각각 시험편 C, 시험편 D로 부르기로 한다.

시험편 C : $[0_2^\circ/\pm45_2^\circ]_S$

시험편 D : $[\pm45_2^\circ/0_2^\circ]_S$

이들 시험편의 기계적 성질의 일부를 Table 2에 나타내고 있다. 여기서, 시험편의 굽힘강성은 4점 굽힘시험에 의해서 얻어진 하중-변형곡선으로부터 구한 값으로, 굽힘변형에 대한 저항의 정도를 나타낸다. 또 압축강도는 압축시 시험편에 횡방향굽힘이 일어나지 않도록 고안한 치구를 사용하여 시험편의 적층간에 발생하는 좌굴하중을 측정하여 평가하였다.

시험편의 형상은 길이 70 mm, 폭 15 mm 그리고 두께 1.5 mm의 판상으로, 섬유의 0°방향이 시험편 길이방향과 일치하도록 하였다. 이때 시험편의 폭은 충격으로 인해 생기는 손상의 폭보다 넓어, 시험편의 측면단효과가 손상형태에 영향을 미치지 않도록 배려하였다. 한편 시험편의 형상과 크기, 지지방식 또한 CFRP적층판의 FOD에 영향을 미칠 것으로 예상되지만,[10] 본 연구에서는 低에너지의 충격에 의해 적층판에 발생하는 손상특성을 파악하는데 주안점을 두어 실구조물에 사용되는 적층판보다 소형인 시험편을 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of unidirectional laminates

	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (GPa)	Shear strength (GPa)	Density (g/m^3)
0°	130	1.9	4.5	1.67
45°	16	0.15	32	1.67

Table 2 Mechanical properties of laminated specimen

Specimen	Young's modulus (GPa)	Bending rigidity ($\times10^5$ N/m)	Compressive strength (MPa)
C $[0_2^\circ/\pm45_2^\circ]_S$	53*	3.0	271
D $[\pm45_2^\circ/0_2^\circ]_S$	53*	0.79	112

* Represents the value calculated by the rule of mixtures.

2.2 충격시험 및 손상평가

충격시험은 Fig. 1에 보인 바와 같이 에어건(air-gun)식 장치를 사용하여 직경 5 mm(0.5 g)의 鋼球를 시험편에 충돌시켜 행하였다. 이때 시험편

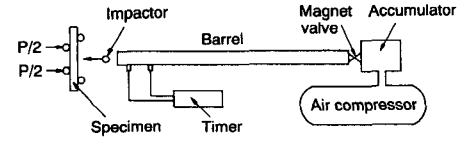


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

은 내측스팬이 20 mm, 외측스팬이 60 mm인 4점굽힘치구에 의해 지지되어, 초기하중을 가하지 않은 단순지지상태 및 초기하중에 의한 정적 순굽힘을 가한 상태(이하 초기굽힘으로 부르기로 한다.)에서 충격시험을 하였다. 鋼球의 충격속도는 콤퓨레셔의 공기압을 조절하여 20~80 m/s(충격에너지 : 0.1 J ~1.6 J)의 범위로 하였다. 본 연구에서는 강구가 갖는 충돌직전의 운동에너지를 계산하여 충격에너지로 정의하였고, 단위는 J을 사용하였다.

초기굽힘(pre-bending)의 부하는, Fig. 1에 보인 4점 굽힘치구를 사용하여 행하였다. 이때 정적굽힘에 의한 각 시험편 압축부의 횡방향변형률을 0.002로 일정하게 하여, 시험편의 인장측을 충격방향으로 실험하였다. 본 연구에서 부가한 초기굽힘에 의한 변형률값은 탄소섬유강화적층재의 설계시 탄소섬유의 설계 변형률한계(limit of design strain)가 0.004 이하인 것을 고려한 값이다.[3]

충격시험후 시험편에 발생하는 손상은 육안검사와 광학현미경을 사용하여 조사하였고, 내부에 발생한 손상은 초음파탐상(C-scan) 영상장치(Hitachi AT5000 ; 주사주파수 10 MHz)를 사용하여 충격부를 상부로 하여 관찰하였다. 한편 충격부중심을 지나는 폭방향으로 시험편을 절단해, 입도 1 μm의 알루미나분말로 연마한 후, 그 단면상의 손상형태를 실체현미경으로 관찰하였다. 초음파 탐상영상과 비교검토해 시험편내부 손상의 발생상황을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 적층순서에 따른 손상특성

횡방향충격에 의해 적층재에 생기는 손상형태는 모재균열(matrix crack), 섬유파단(fiber breaking) 그리고 층간분리(delamination)로 크게 나눌 수 있다.[2,3]

충격시험후 적층순서가 다른 각 시험편에 발생한 손상형태를 살펴보면, 충격부에는 영구변형을 나타내는 작은 크레이터(crater)가 생겼다. 그리고 시험편 C의 경우 충격에너지가 0.4 J(충격속도 : 40 m/s), 시험편 D의 경우는 0.9 J(60 m/s)에 달하면 충격부 반대측면에 섬유방향의 모재균열과 더불어 마름모형상의 변형이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 충격에너지가 더욱 증가하여 약 1.43 J(75 m/s)에 달하면, 시험편 C와 시험편 D의 충격부표면에는 섬유방향에 수직되게 섬유의 파단이 크레이터에 인접하게 발생하였다.

Fig. 2는 시험편 D의 충격부에 발생한 표면손상의 예를 나타내고 있다. 충격에너지가 비교적 큰 경우로 크레이터를 중심으로 다수의 섬유방향 모재균열과 더불어 섬유파단이 발생한 것을 볼 수가 있다. 그리하여 본 실험범위 이상으로 충격에너지의 증가는 섬유파단과 모재균열 등 표면에서 감지가능한 손상형태보다 현저한 발생을 가져 올 것으로 예상된다. 한편 시험편내부에 발생한 손상은 먼저 초음파탐상에 의해 조사하였다.

Fig. 3은 각각의 충격에너지 레벨에서 각 시험편에 발생한 내부손상의 투영영상을 나타내고 있다. 손상은 각 섬유방향을 따라서 발생해 충격에너지의 증가와 더불어 손상의 평면적 범위는 확대되어 갔다. 그리하여 전체적 투영영상은, (a) 시험편 C의 경우는 0°방향을 축으로 하고 있는데 대하여, (b) 시험편 D의 경우는 ±45°방향을 축으로 손상이 발생하여 전체적으로 원형에 가까운 형상을 하고 있다. Fig. 3(a) 시험편 C의 충격에너지가 비교적 낮

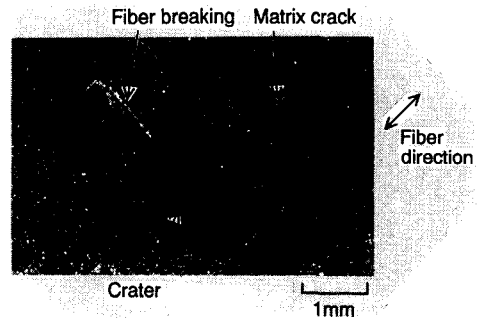
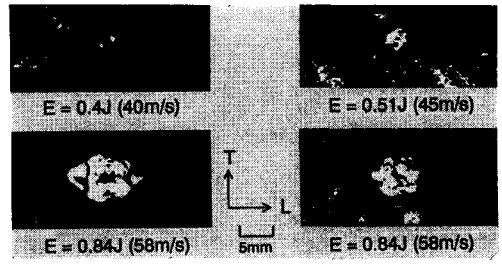


Fig. 2 *Typical example of surface damage induced at impact site of the specimen D (no preload, E =1.6 J)*



(a) Specimen C (b) Specimen D

Fig. 3 Ultrasonic images of internal damage in each specimen after impact. (no preload)

은 0.4 J의 경우에도 내부손상이 발생한 것을 볼 수가 있다. 이것으로부터 적층복합재의 내부에 발생하는 층간분리는 다른 손상형태보다 낮은 충격에너지하에서 일어나는 것을 알 수가 있다.

다음은 시험편 내부에 발생한 손상의 형태를 조사하기 위하여 충격부를 가로질러 절단하였다. Fig. 4는 절단면상에서의 내부손상을 보여주고 있다. 내부손상은 인접층간 섬유방향이 급격한 변화를 나타내는 ±45° 층간계면과 ±45°층과 0°층 사이의 계면에서 발생한 층간분리(delamination)와 층간분리를 연결하면서 충격부를 중심으로 발생하는 콘형상의 횡방향모재균열(translaminar matrix crack)이 차지하는 것을 알 수가 있다. 이때 층간분리는 시험편의 두께방향에 걸쳐 충격부에서 반대측으로 갈수록 넓게 발생하였고,[11] 이것은 강구의 충격시 발생하는 압축응력파가 시험편내부로 전파하여 충격반대면에서 위상을 바꾸어 반사되는 인장응력파에 기인한 것으로 생각되어진다. 그러나, 동일한 섬유방향을 갖는 0° 층간계면에는 층간분리가 생기지 않아, (b) 시험편 D의 경우에서 볼 수 있듯이 중립면 부근에는 횡방향파괴가 발생하였다.

특히 시험편 C의 경우는 충격부 반대측에 가까운 +45°층과 0°층간에 층간분리가 하부층의 0°방향을 따라서 가장 현저하게 발생하여, 이것을 Fig. 3(a)의 초음파 탐상영상과 비교하면, 층간분리는 경계면 하부층의 섬유방향(0°방향)을 따라서 진전함을 알 수 있다.[13] 이상의 손상관찰 결과, 본 연구와 같이 鋼球의 低에너지충격에 의해 생기는 적층판의 손상은 내부의 층간분리가 큰 부분을 차지하는 것을 알 수 있다.

여기서, 초음파 탐상에 의한 영상으로부터 손상부의 면적을 구하여 투영 층간분리면적(projected delamination area)으로 정의하였다. 이것은 적층재의 각 층간에 발생한 층간분리면적의 총합과 다르지만, Malvern 등의 연구결과[15]에 따르면 양자간에는 선형적으로 비례하는 관계에 있으므로 본 연구에서는 투영 층간분리면적을 가지고 충격에너지의 증가에 따른 내부손상의 발생 및 진전거동을 평가하였다.

시험편의 적층순서가 손상특성에 미치는 영향을 보기 위하여, Fig. 5는 鋼球의 충격에너지와 이때 발생한 투영 층간분리면적의 관계를 나타내고 있다. 초기하중이 작용하지 않은 상태에서 초음파탐상에 의해 감지가능한 층간분리의 발생임계 에너지

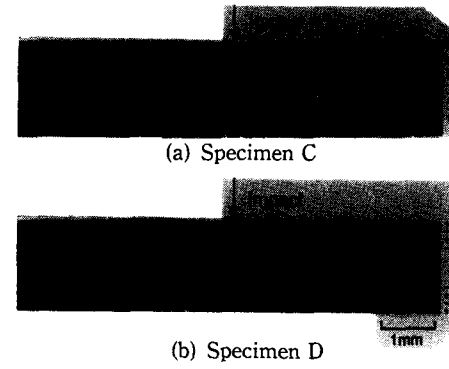


Fig. 4 Damage morphologies on the sectioned surface (no preload)

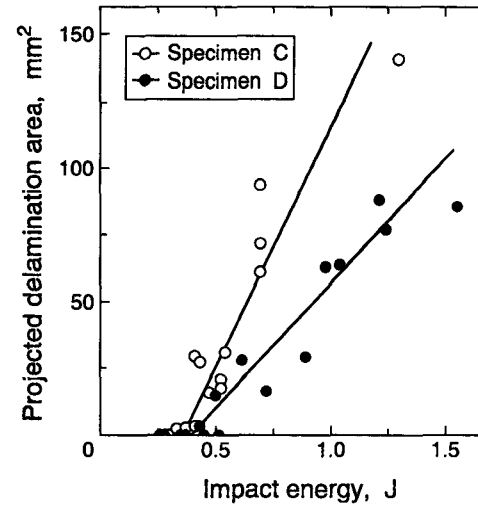


Fig. 5 Relation between projected delamination area and impact energy

는, 시험편 C에서 약 0.4 J 그리고 시험편 D에서 약 0.5 J로, 시험편 C가 층간분리손상이 보다 쉽게 발생하는 적층구조임을 알 수가 있다. 그후 충격에너지의 증가와 더불어 층간분리면적은 다소 분산되어 있으나 충격에너지에 거의 비례하는 관계를 나타내고 있다. 또 그 기울기는 적층구조에 따라서 차를 나타내고 시험편 C가 시험편 D보다 큰 값을 나타내었다. 이리하여 ±45°층을 바깥쪽에 배치한 시험편 D의 적층순서가 시험편 C의 경우보다 층간분리의 발생 및 진전에 대하여 큰 저항을 나타내었다.

일반적으로 본 연구에 사용한 시험편과 같이 비

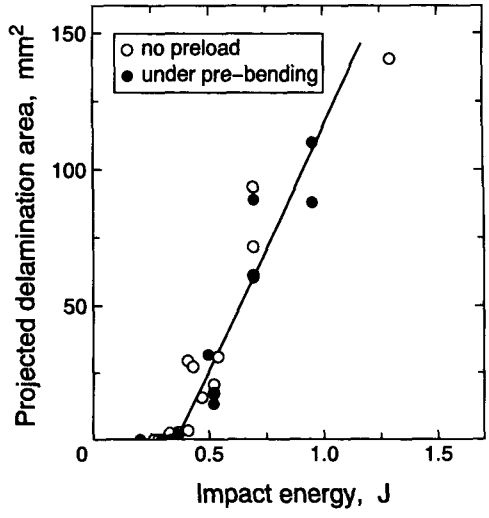
교적 얇은 적층판의 경우, 횡방향충격시 적층판은 주로 굽힘변형을 일으키게 되어, 충격부 반대측면에 가까운 층에 높은 인장응력을 발생시킨다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 반대측면에 모재균열을 발생시키고 나아가 층간분리를 초래한다. 또 상부의 층간으로도 연속적인 손상을 가져오게 된다. 이때 상대적으로 굽힘강성이 큰 시험편 C의 경우는 충격부 크레이트주위에 발생하는 높은 접촉응력이 또한 손상에 영향을 미치게 되어,[14] 충격에너지가 증가함에 따라 손상거동에 비교적 큰 차를 가져왔다. 결국 비교적 낮은 굽힘강성을 나타내는 시험편 D의 경우는 탄성적 변형에 충격에너지의 상당부분이 사용되어 발생한 내부손상은 시험편 C에 비하여 적게 되었다고 생각되어진다.

3.2 충격손상거동에 미치는 정적 초기굽힘의 영향

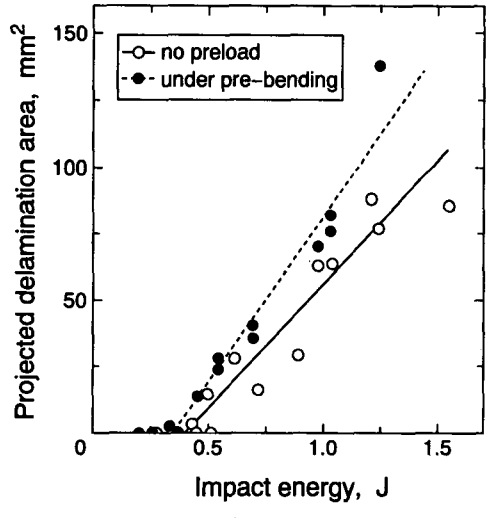
적층재에 초기하중 또는 변형의 작용은 충격시 접촉거동과 구조물의 동적응답에 영향을 미치고 특히 압축하중하에서는 손상의 증대를 가져오므로,[12] 각 부하형태에 따른 손상거동에 대한 연구가 필요하다.

초기굽힘의 작용이 충격손상의 형태에 미치는 영향을 앞서의 초기하중이 작용하지 않는 경우와 비교하면, 시험편 표면 및 내부에 발생하는 손상형상에 특별한 변화는 나타나지 않고, 손상의 발생임계치 및 그 정도에 있어서 다소 차를 나타내었다.

Fig. 6(a), (b)는 각 시험편에 발생하는 층간분리의 발생 및 증대거동에 미치는 초기굽힘의 영향을 나타내고 있다. 초기하중이 작용하지 않은 경우를 함께 표시하였다. 먼저, (a) 시험편 C의 경우는 층간분리의 발생 및 진전거동에 초기굽힘은 거의 영향을 미치지 않는데 대하여, (b) 시험편 D의 경우는 초기굽힘의 작용이 손상거동에 영향을 미쳐, 층간분리발생 임계에너지의 저하를 가져왔고, 동일 충격에너지에 대하여 투영 층간분리면적의 증대를 가져왔다. 이것은 각 시험편에 따라 굽힘강성(bending rigidity)의 차에 의한 것으로 생각되어진다.[2,4] 즉, Table 2에서 알 수 있듯이 비교적 높은 굽힘강성을 나타내는 시험편 C의 경우, 초기굽힘의 작용은 鋼球충격시 시험편의 탄성굽힘 변형거동에 별 영향을 미치지 않았지만, 굽힘강성이 상대적으로 적은 시험편 D의 경우는 정적 초기굽힘의 작용은 鋼球충격시 시험편의 변형을 구속하여 겉보기



(a) Specimen C



(b) Specimen D

Fig. 6 Influence of pre-bending on the relation between projected delamination area and impact energy

굽힘강성의 증대를 가져왔다. 이것은 충격시 시험편의 탄성변형에 따른 사용에너지의 저하를 가져오는 동시에 손상진전에 사용되는 에너지를 증대시켜 층간분리의 증대를 초래하였다고 생각되어진다.

한편 지금까지 기술한 충격손상거동이 부재의 강도저하에 영향을 미칠 것이 예상되지만, 잔류강도 측정법을 포함한 손상평가에 관하여는 다음기회에 보고할 예정이다.

4. 결 론

적층순서를 달리하는 CFRP적층판에 鋼球의 低에너지충격시 발생하는 손상특성을 초음파 탐상영상장치를 사용하여 층간분리의 발생 및 진전거동에 미치는 정적 초기굽힘의 영향을 검토하였다.

그 결과, 발생하는 손상형태는 충격에너지와 더불어 변화해, 충격에너지의 증가는 모재균열, 섬유파단과 같은 표면손상의 현저한 발생을 초래하였다. 한편 시험편내부에 발생하는 손상, 특히 층간분리의 발생 및 진전거동은 시험편의 굽힘강성에 크게 의존해, 상대적으로 낮은 굽힘강성을 나타내는 시험편 D가 시험편 C보다 층간분리의 발생 및 진전에 대하여 큰 저항을 나타내었다. 손상거동에 미치는 초기굽힘의 영향은 굽힘강성치가 작은 시험편 D에는 크게 나타났으나 시험편 C에는 그다지 나타나지 않았다. 즉, 초기굽힘 하중의 작용은 鋼球충격시 시험편의 겉보기 굽힘강성을 증대시켜 층간분리의 발생 및 진전을 보다 용이하게 하였다.

참고문헌

(1) *Foreign Object Impact Damage to Composites,* 1975, ASTM STP 568.

(2) Abrate, S., 1991, Impact on Laminated Composite Materials, *Appl. Mech. Rev.,* Vol. 44, pp. 155~190.

(3) Garg, A. C., 1988, "Delamination-A Damage Mode in Composite Structures," *Engng. Fracture Mech.,* Vol. 29, pp. 557~584.

(4) Caprino, G., 1984, "Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminats," *J. of Composite Materials,* Vol. 18, pp. 508~518.

(5) Chang, F. K. and Kutlu, Z., 1990, "Delamination Effects on Composite Shells," *J. Eng. Mater. Tech., Trans. of ASME,* Vol. 112, pp. 336~340.

(6) Sun, C. T. and Chen, J. K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates," *J. of Composite Materials,* Vol. 19, pp. 490~504.

(7) Sankar, B. V. and Sun, C. T., 1985, "Low Velocity Impact Response of Laminated Beams Subjected to initial Stresses," *AIAA Journal,* Vol. 23, pp. 1962~1969.

(8) Luo, X., Kou, C. and Yang, B., 1992, "On the Foreign Object Impact on Composite Laminates," *Proceddings of International Symposium on Impact Engineering,* Vol. 2, pp. 314~319.

(9) Chen, J. K. and Sun, C. T., 1985, "Analysis of Impact Response of Buckled Composite Laminates," *Composite Structures,* Vol. 3, pp. 97~118.

(10) Cantwell, W. J. and Morton, J., 1989, "Geometrical Effects in the Low Velocity Impact Response of CFRP," *Composite Structures,* Vol. 12, pp. 39~60.

(11) Lin, H. J. and Lee. Y. J., 1990, "Impact Induced Fracture in Laminated Plates and Shells," *J. of Composite Materials,* Vol. 24, pp. 1179~1199.

(12) Ishikawa, H. and Murakami, K., 1990, "Impact Damage in FRP Laminates under Axial Static Loading and their Residual Compressive Strength(CFRP, AFRP and their Hybrid FRP)," *Trans. of JSME,* Vol. A-56, pp. 1343~1347.

(13) Ishikawa, H., Koimai, T. and Natsumura, T., 1992, "Studies on Impact Loading in CFRP Laminate by the Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis," *Proc. of JSME/MMD,* pp. 359~360.

(14) Cantwell, W. J. and MortoN, J., 1985, "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates," *Composite Structures,* Vol. 3, pp. 241~257.

(15) Malvern, L. E., Sun, C. T. and Liu, D., 1989, "Delamination Damage in Central Impacts at Subperforation Speeds on Laminated Kevlar/Epoxy Plates," *ASTM* 1012, pp. 387~405.