

<논 문> SAE NO. 953764

탄소섬유강화 복합재 적층판의 충격파괴 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Impact Fracture in CFRP Laminate Plates

양 인 영,* 정 종 안**
I. Y. Yang J. A. Jung

ABSTRACT

In this paper, an experimental study on the effects of the impact damage and the perforation characteristic of CFRP laminates with different fiber stacking orientation and ply number was done through an observation of interrelations between the impact energy vs. transmitted energy and the impact energy vs. absorbed energy per unit volume.

The velocities of the ball before or after impact are measured by the high-speed camera. And when CFRP laminates are subjected to tranverse impact by a steel ball($\phi 10$), the delamination shapes generated by impact damage are observed by using SAM(Scanning acoustic Microscope)

주요기술용어 : CFRP(탄소섬유 강화 복합재), Steel Ball(강구), Transmitted Velocity(관통속도), Impact Damage(충격손상), Impact Energy(충격에너지), Absorbed Energy per Unit Volume(단위 체적당 흡수에너지), 손상패턴(Damage Pattern)

1. 서 론

최근 산업구조의 개혁에 따라 종래부터 이용되어 오고 있는 철등의 금속 대신에 세라믹이나 각종의 복합재료등 보다 부가가치가 높은 소재가 요구되고 있으며 이들 소재중에도 탄소섬유 강화 복합재(이하 CFRP라고 한다)는 중심적인 역할

이 기대되고 있다.

특히, CFRP는 경량이고 고강도이기 때문에 원심력장의 구조재로서 또 항공기의 수평미익, 헬리콥터의 회전익, 로켓트의 연료탱크 등 항공 우주 구조용 재료로서 상당히 주목 받고 있다.

그러나 CFRP는 상당히 강한 취성을 가지고 있기 때문에 충격흡수 능력이 낮아 정적부하에 대하여는 우수한 역학적 특성을 가진 반면 충격 부하에 대하여는 우수한 역학적 특성을 기대할 수 없다. 따라서 실제로 구조물에 CFRP 적층재

* 정회원, 조선대학교 공과대학 기계설계공학과

** 정회원, 조선대학교 대학원 기계공학과

를 사용할 경우 충격하중에 의한 파괴의 위험성을 충분히 고려하여 이것을 미연에 방지하지 않으면 안된다.

내충격 설계에 대한 최저한의 설계조건은 손상이 생겨도 완전히 파괴되어 파단하지 않고 기본적으로는 원형에 가까운 형상을 기대하는 것이다. 그러나 아직까지 어떠한 파괴모드에서 어떤 손상이 진전 하는가를 정량적으로 파악하는 수법은 아직 확립되어 있지 않기 때문에 CFRP의 신뢰성은 실험에 의한 수법에 의해 보증되고 있다¹⁻²⁾.

따라서 파괴모드나 손상 진전의 메카니즘을 해명하는 것은 아주 중요하다. 이와 같은 이유로부터 CFRP적층판이 큰 충격에너지를 어느 정도 흡수 할 수 있을까 하는 문제는 종래부터 중요시 되어 왔다³⁾.

그러나 현재 행해지고 있는 연구는 질량이 비교적 큰 충돌체에 의한 충격속도가 작고 응력파의 영향이 작은 범위에서의 충격시험인 경우가 대부분이며 고속 충격시험은 GFRP섬유강화수지에 대한 탄환의 관통특성⁴⁾, Cristescu, Sierakowski 등^{5,6,7)}에 의한 CFRP 직교적층판을 이용한 연구결과는 보여지지만 GFRP적층판에 대한 연구결과는 거의 없으며 CFRP적층재의 고속 충격파괴의 손상기구 사이에는 만족할 만한 연구결과가 없다.

따라서 본 연구에서는 고속 충격체가 CFRP 적층판을 관통할 정도의 손상 정도가 높고 고속

인 충격파괴의 실험적 해석을 행하여 적층구성이 다른 각 직교이방성 적층재의 관통 파괴현상 특히, 각각의 적층재에 대하여 충격에너지의 크기와 CFRP 적층재의 손상과의 관계, 관통 후의 에너지 손실과의 관계 및 임계관통 에너지의 한계를 명확히 함과 동시에 같은 적층구조를 갖는 시험편의 적층수의 차에 따라 또 같은 적층수를 갖는 적층재의 계면수의 차에 따라 어떤 구조의 적층재가 내충격성 특히, 관통저항이 강한가를 명확히 하고자 한다.

2. 충격실험 장치 및 실험 방법

2.1 시험편의 특성 및 형상

본 연구에서는 Table 1과 같은 1방향 프리프레그(prepreg) CF/EPOXY(日本 TORAY, P3051-5, 탄소섬유 : T300-3000, 매트릭스 # 2500)를 이용하여 오토크레브 방법으로 제작된 CFRP 적층판을 이용하였다. 시험편의 종류 및 섬유배향을 Table 2에 나타냈다.

시험편 표면층의 섬유배향은 0° 로 했으며 시험편의 크기는 180×180 mm 정방형판으로 하였다.

2.2 충격실험 장치

본 연구에서 사용한 충격 시험장치의 개략도는 Fig.1과 같다. 직경 10mm의 강구를 가속화 한후 시험편의 중앙에 발사 시켰고 충격 속도는 가속

Table 1 Characteristic of CF/EPOXY Specimen

특성 \ 종류	탄소섬유	EPOXY수지	Prepreg
제작회사	日本 TORAY	일본 TORAY	
호칭	T300-3,000	#2,500	P.3,051-15
밀도	1.75×10^3 (kg/m ³)	1.24×10^3 (kg/m ³)	
인장강도	3,530(MPa)	78(MPa)	
인장탄성률	230(GPa)	3.96(GPa)	
신장률	1.5(%)	2.0(%)	
수지 함유량			37(%WT)

Table 2 Stacking Sequence of Specimens

종류	섬유배향	적층매수	판두께	재질
A	$[0^\circ_2/90^\circ_4/0^\circ_2]$	8	1.25	CF/EPOXY
B	$[0^\circ_4/90^\circ_8/0^\circ_4]$	16	2.50	"
C	$[0^\circ_6/90^\circ_{12}/0^\circ_6]$	24	3.75	"
D	$[0^\circ_2/90^\circ_4/0^\circ_4/90^\circ_4/0^\circ_2]$	16	2.50	"
E	$[0^\circ_4/90^\circ_8/0^\circ_3/(0^\circ, 90^\circ)_1]$	16	2.65	"

튜브내의 발사구의 2정점간의 거리를 강구가 통과하는 시간을 측정하여 산출하였으며, 강구의 발사속도를 충격 속도로 하였다. 또한 시험편을 관통한 후의 강구의 속도는 고속카메라(cordin社의 Dynafax)로 측정하였다.

2.3 충격 실험 방법

강구가 CFRP 시험편을 관통할 정도의 충격 속도를 이용하여 CFRP 적층재의 관통 파괴 실험을 행했다. 시험편의 지지조건은 120mm의 원공을 갖는 10mm 두께의 원판 사이에 시험편을 끼운후 클램프로 고정하였다. 충격손상을 받은 CFRP 적층판의 내충격성 및 관통 파괴 특성을 고찰하기 위해 같은 적층구조를 갖는 직교이방성 적층 시험편의 적층수에 따라 또 적층수가 같은 직교이방성 적층재의 계면수의 차이에 따라 내충격성 특성을 고찰 하였다. 또한 충격 시험 후의 CFRP 적층판의 외관 관찰은 주로 시험편의 충격면의 생긴 관통공과 충격면 배면의 손상에 주목하여 행 했으며 시험편의 내부 박리 관찰은 초음파 현미경(Olympus Pulse 100, 30MHz)에 의해 행하였다. 층간박리의 관찰은 충격면에서 가까운 계면을 계면 A, 다음의 계면들을 각각 계면 B, 계면 C, 계면 D, 계면 E로 하여 각 층에 색깔을 부여한 후 각 계면의 박리면적을 관찰 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격면 및 배면의 외부 손상 패턴

충격면은 거의 모든 시험편이 취성적으로 떨어져 나가고 관통공이 형성 되었으며 Fig.2와 같은 0° 와 90° 방향 섬유에 의 영향으로 부터 정방형의 관통공(대략 1cm×1cm)이 형성되는 경우가 대부분 이었다.

충격 속도가 낮은 경우는 관통공은 섬유 방향의 크랙을 수반하는 경우가 많지만 충격속도가 증가 함에 따라 크랙길이가 감소하는 경향이 있었다.

또한 충격면 배면의 외부손상 패턴을 보면 시험편의 배향방향 및 층수의 영향이 현저하게 나

타났다. 충격면 배면의 손상은 크게 두가지로 대별 되는데 하나는 Fig.3과 같이 수개의 크랙이 섬유방향의 시험편 지지부까지 미치고 있고 그 내측이 떠상으로 박리하는 패턴이었으며, 또 하나는 Fig.4와 같이 시험편 중앙부에 십자(+)의 크랙이 생겨 마름꼴로 박리하는 패턴이었다.

그러나 충격에너지의 값의 크기에 따라 충격면 배면의 손상 패턴에 변화가 있었다. 따라서 충격면 배면의 손상 패턴을 떠상 박리, 마름모꼴 박리 패턴으로 분류하여 충격에너지와 손상 패턴의 관계를 Fig.5에 나타냈다.

Fig.5로 부터 알 수 있는 바와 같이 섬유배향이 같고 층수가 다른 시험편 A, B, C 3종류의 시험편중에서 층수가 16매인 시험편 B와 층수가 24매인 시험편 C에 관해서는 관통속도 전역

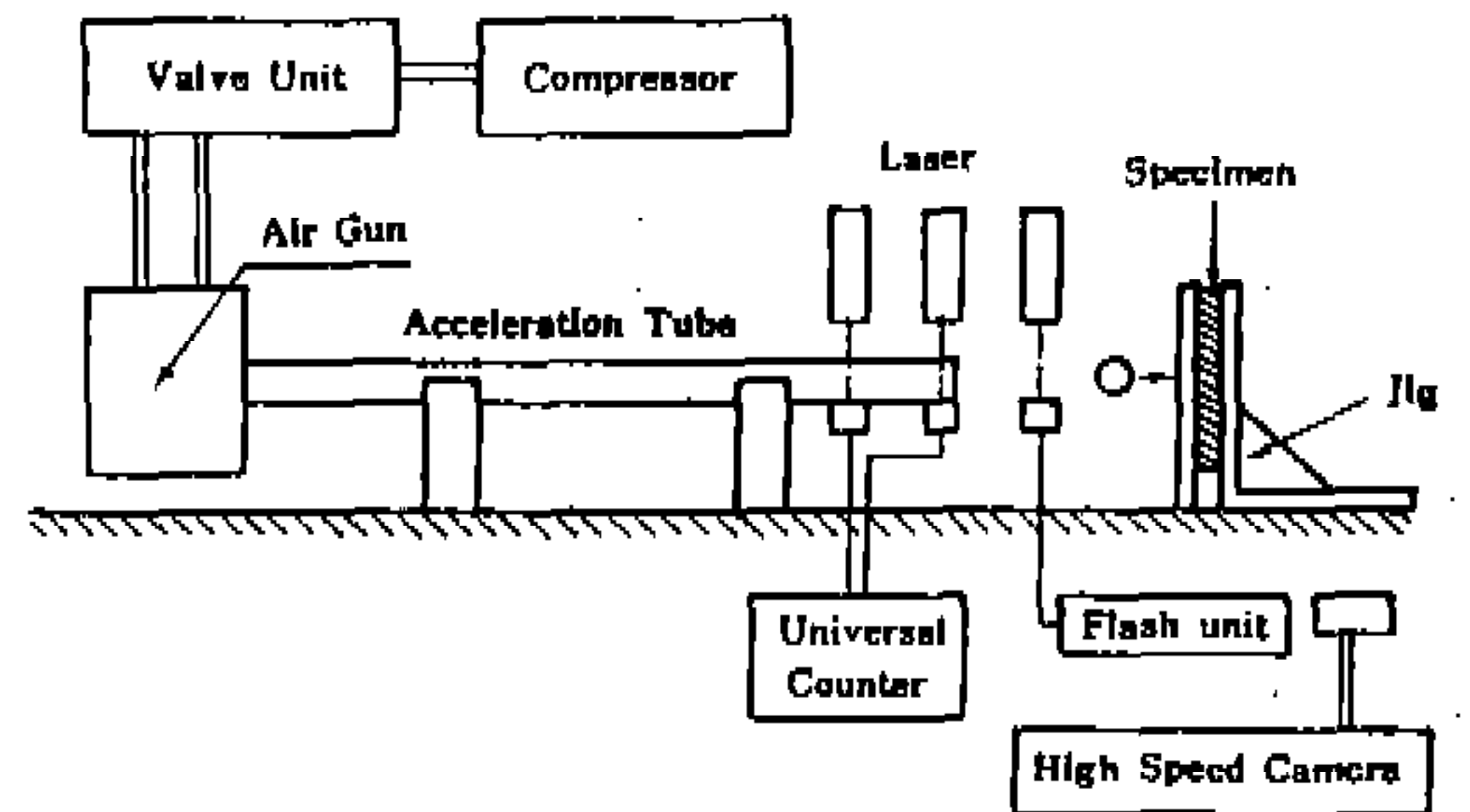


Fig.1 Schematic Diagram of Impact Apparatus

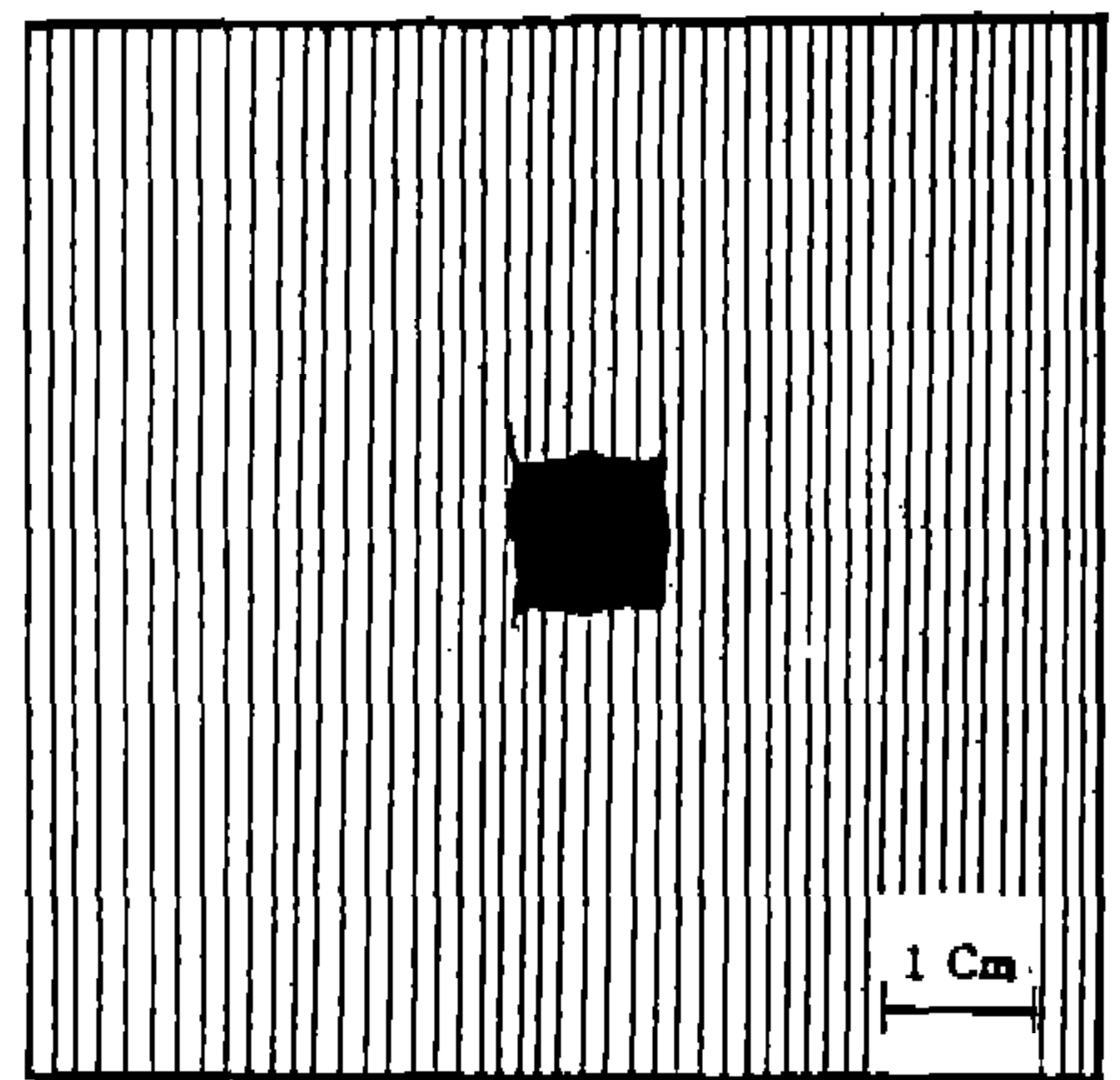


Fig.2 Damage Shape in Impacted Surface (Specimen B, Impact Energy : 52.1J)

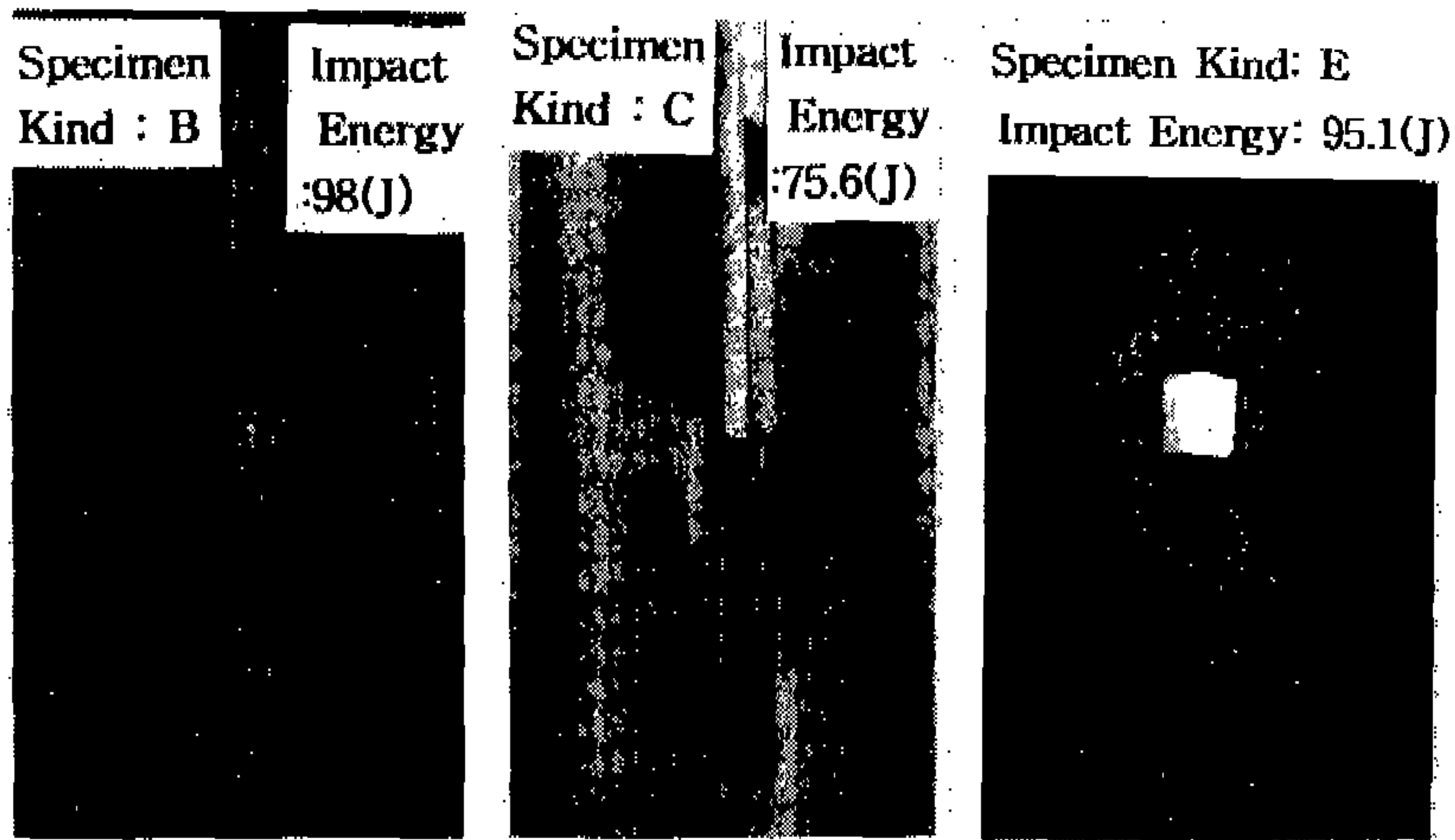


Fig.3 Photo. of Damage Patterns of Band Shape in the Back Surface of Specimen

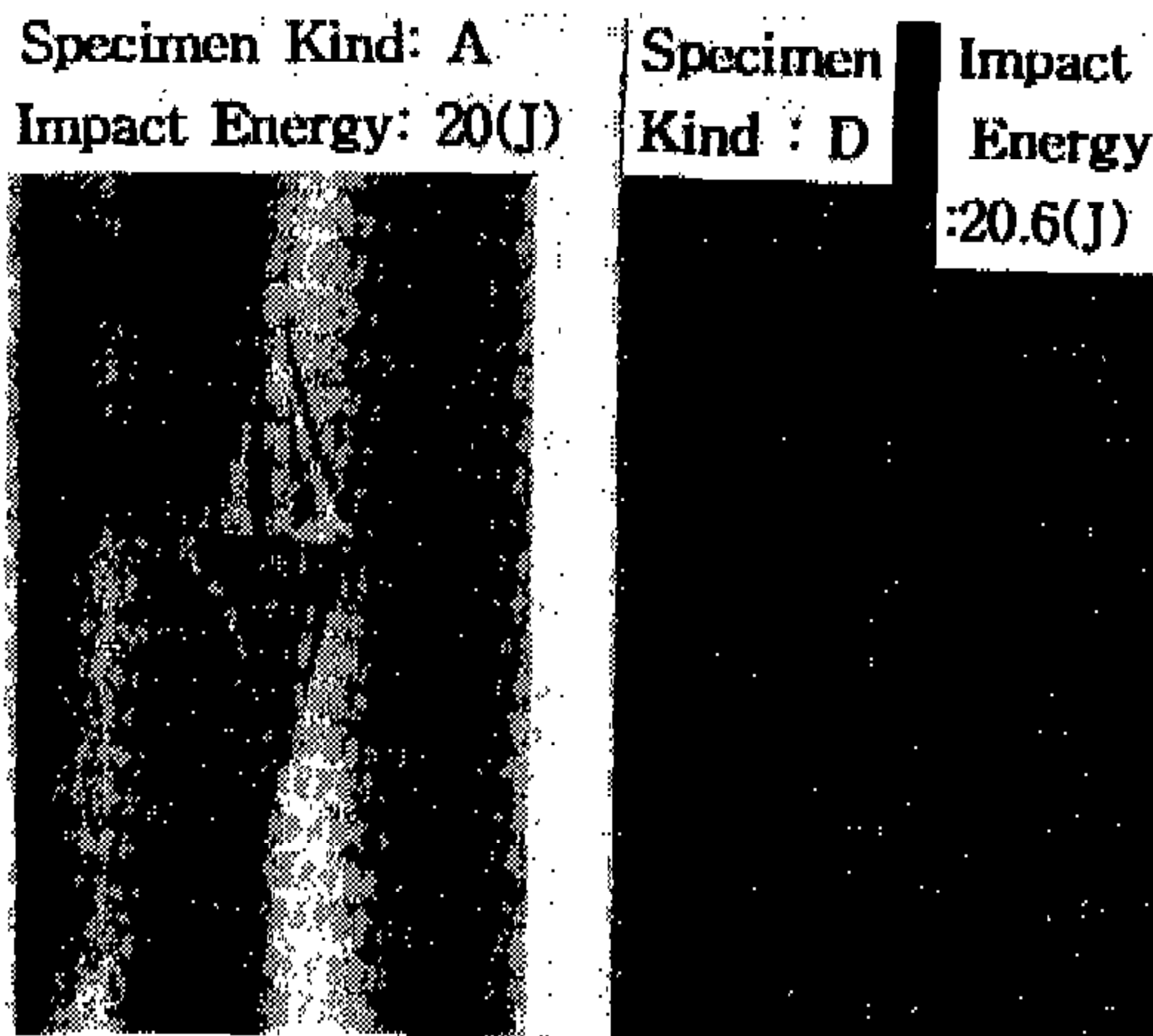


Fig.4 Photo. of Damage Patterns of Lozenge shape in the Back Surface of Specimen

Impact Energy	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Damage Pattern										
Band Shape		△		△	○ △		●	○ △ □		△
Lozenge Shape	○	○	○							
		● ▲		●● ▲						

○: Specimen A △: Specimen B □: Specimen C
●: Specimen D ▲: Specimen E

Fig.5 Impact Damage Patterns in the Back Surface of Specimens

에서 충격면 배면은 피상으로 박리하는 파괴였다. 그러나 층수가 8매인 시험편 A의 경우는 낮은 충격에너지(약 20J까지)에서는 마름꼴상의 박리를, 높은 충격에너지(약 50J이상부터)에서는 피상으로 박리하는 파괴였다.

따라서 배향이 같은 3종류의 시험편의 관통 시험결과로부터 시험편의 적층수를 증가 시킬수록 충격면 배면의 파괴 패턴은 피상으로 파괴하는 경향이 있음을 알았다. 또한 시험편 B와 층수는 같고 계면이 4계면인 시험편 D의 충격면 배면의 파괴 패턴은 거의 시험편 A와 유사한 경

향을 나타내고 있으며 충격 속도의 증가에 따라 마름모꼴의 패턴에서 피상 박리의 패턴으로 변화했다. 전체적으로는 충격속도가 낮을 수록 마름모꼴 파괴패턴이 대부분이 이었고 충격속도가 증가함에 따라 거의 모든 시험편이 피상파괴로 변화해 감을 알수 있었다.

Fig.6에 충격속도를 변화 시킨 경우 시험편 B의 충격면 배면의 손상 패턴의 변화 상태를 나타냈다. Fig.6-(a)는 충격 속도가 낮고 강구가 시험편을 관통하지 않은 경우이며, Fig.6-(b)는 충격속도를 더욱 증가 시킬 경우의 파괴 패턴으로

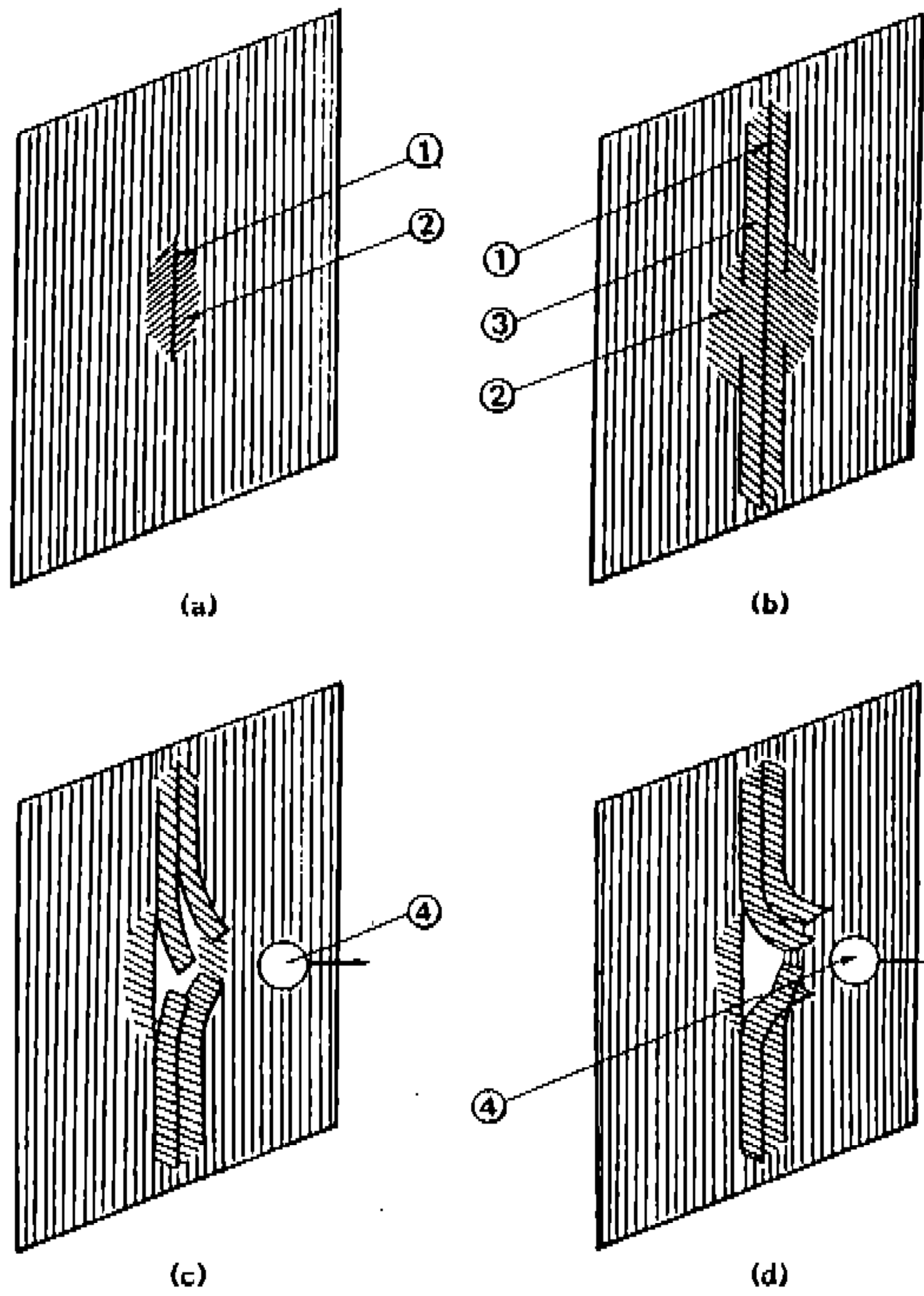


Fig.6 Damage Patterns in the Back Surface of Specimen B

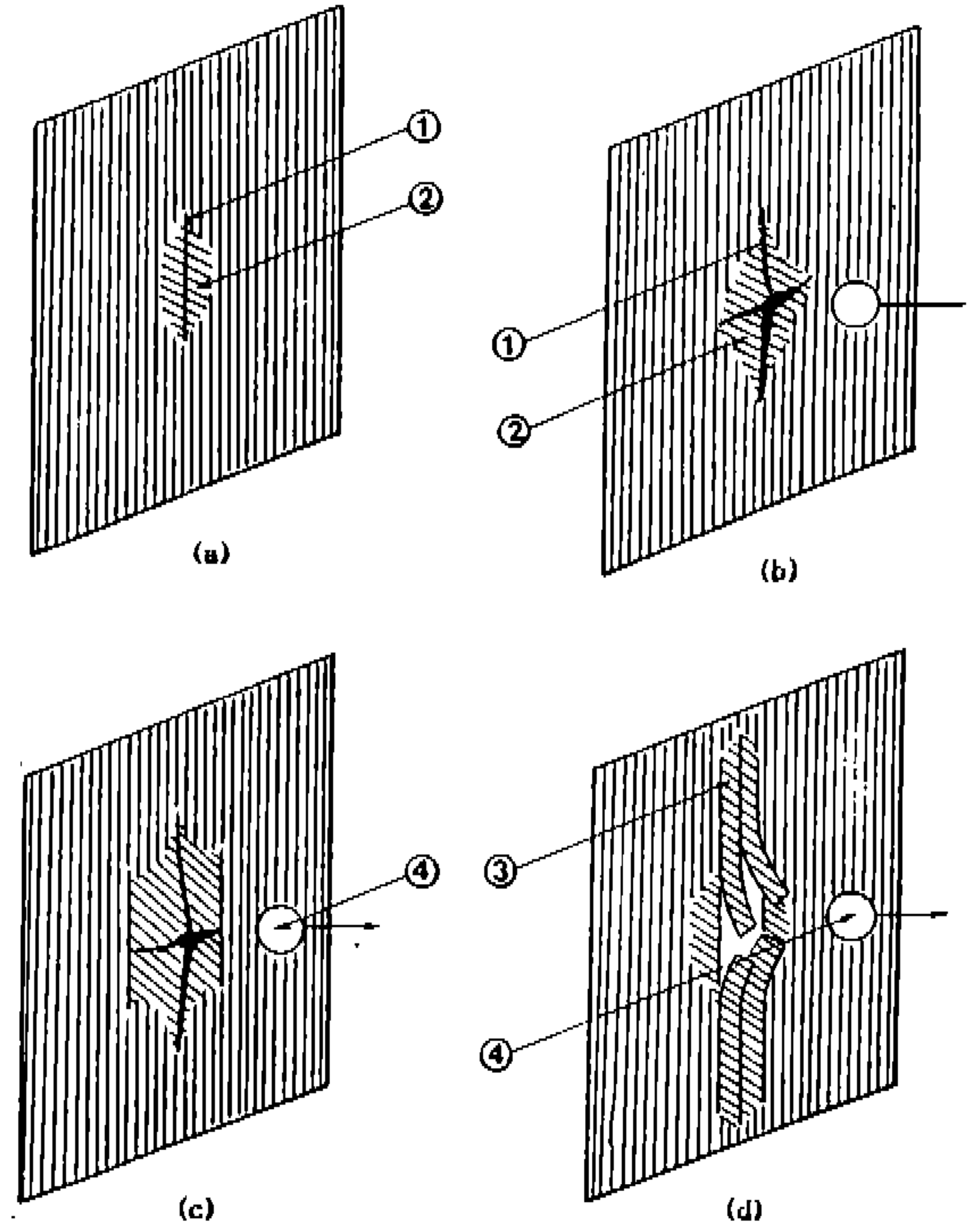


Fig.7 Damage Patterns in the Back Surface of Specimen A

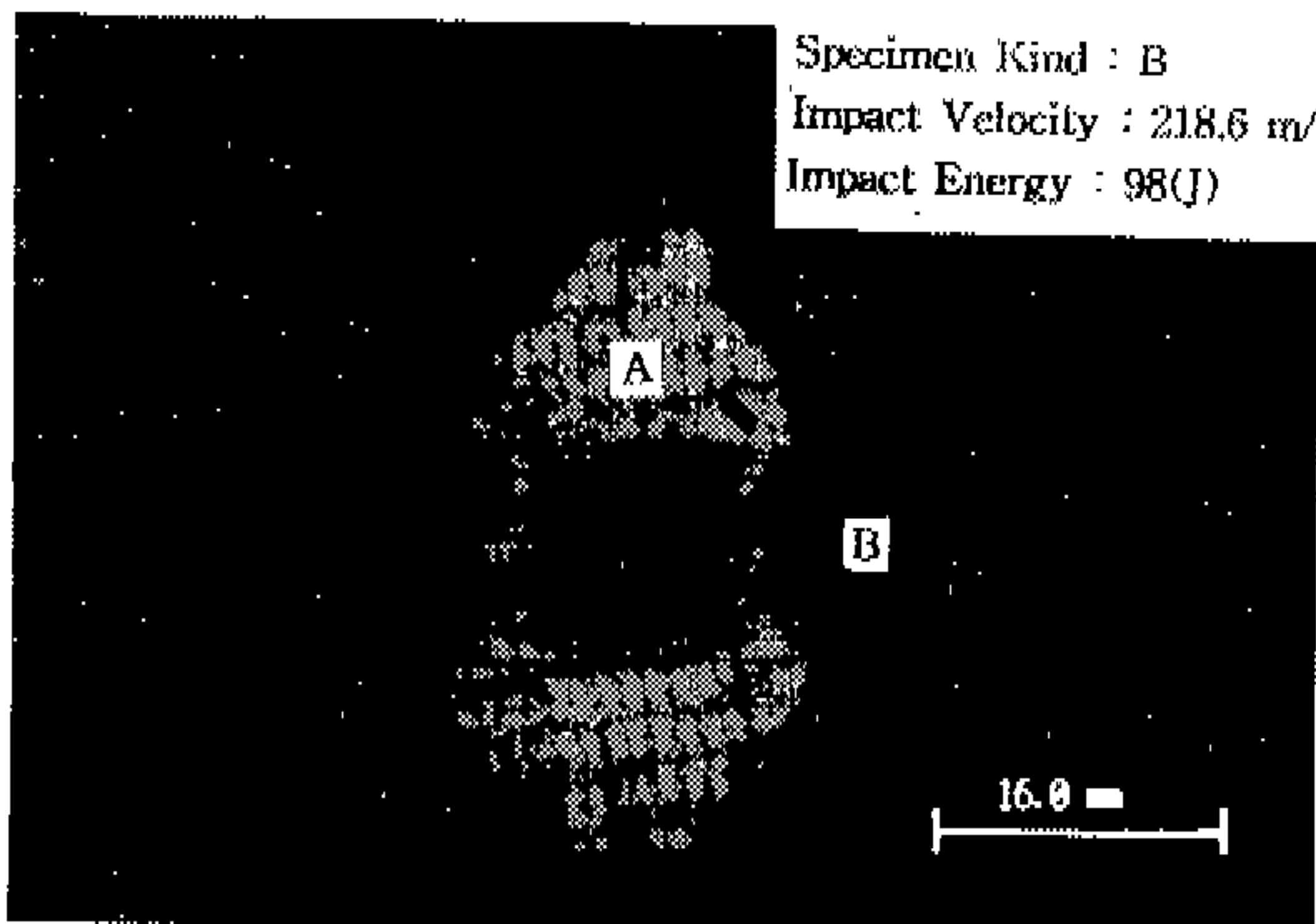


Fig.8 Delamination Shapes Specimen B

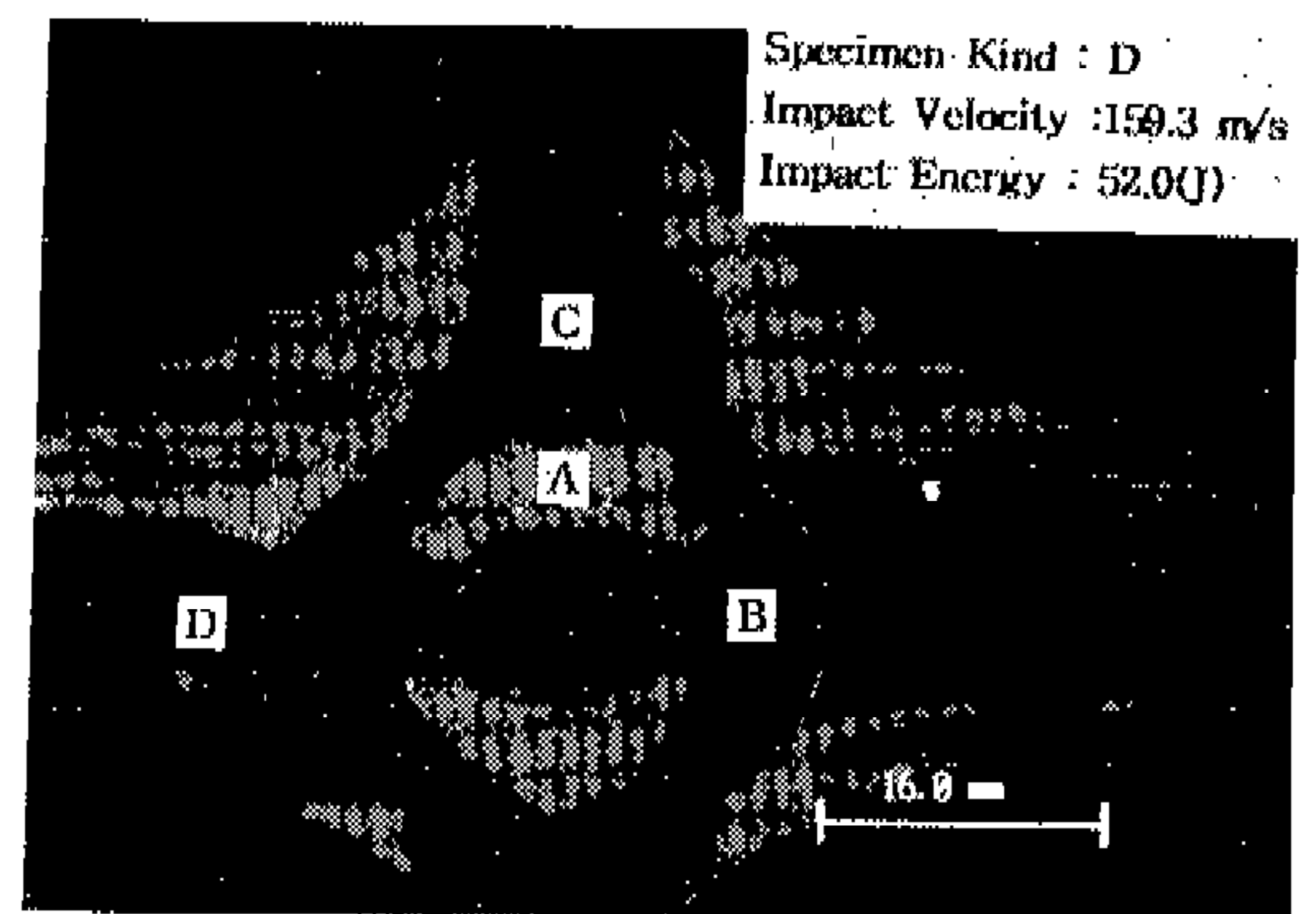


Fig.9 Delamination Shapes of Specimen D

서 충격속도가 관통 임계속도에 가까워지면 섬유 방향 크랙은 양단의 고정 지지부 까지 미친다. Fig.6-(c)는 더욱더 충격속도를 증가시켜 강구가 관통한 경우로서 파괴 패턴은 Fig.6-(b)와 같지만 떠상의 박리 부분의 증앙이 파단하여 강구가 관통하고 있으며 박리 영역은 Fig.6-(b)에

서의 박리영역 보다 오히려 작게 되어 있다. 더욱더 충격속도가 높은 경우인 Fig.6-(d)의 경우는 계면 B의 박리 면적이 더욱 작아 파괴가 국부적으로 된다. 계면 B의 박리 부분은 충격 초기에 충격면 배면에 떠상 박리가 생기기 이전에 발생한 박리라고 생각되며, 일반적으로 층간박리

의 손상파면을 나타내고 있다. 한편 피상의 박리 부분은 층간박리의 파면과 층간에 의한 박리는 아니고 오히려 충격면 배면의 0° 층내에서의 박리였다.

Fig.7은 충격속도를 변화시킨 경우의 시험편 A에서의 충격면 배면의 손상 패턴의 변화를 나타냈다. Fig.7-(a)는 충격속도가 낮고 강구가 시험편을 관통하지 않은 경우로서 시험편 B에서와 거의 같았고, Fig.7-(b)는 강구가 시험편을 관통한 경우로서 시험편 배면의 중앙에 (+)자의 크랙이 생기고 계면 B에서 마름꼴 모양의 박리가 생겼다. 더욱더 충격속도를 증가시키면 계면 B의 마름모꼴 박리의 형상이 변해 간다. 이것은 시험편의 충격면 배면에 생긴 섬유방향과 직각 방향인 크랙과 섬유방향 크랙의 발생시기와 관계가 있다고 생각된다. 결국 Fig.7-(c)에서 박리형상이 마름모꼴로 되지 않는 것은 섬유방향과 직각 방향의 크랙이 섬유방향의 크랙이 생긴 곳에서 크랙이 정지하고 있기 때문이라고 생각된다. 더욱 충격속도를 증가시키면 시험편 B에서와 같이 충격면 배면의 섬유방향 크랙의 내측이 피상으로 박리하는 파괴가 된다.

3.2 층간 박리 형상

Fig.8에 98J로 충격을 받은 적층수가 16ply이고 계면수가 2계면인 시험편 B의 층간박리 형상을 나타냈다. 초음파 현미경으로 층간박리 형상을 관찰할 때 계면 A, B에 색깔을 부여하여 구분하였으며, 적색은 계면 A의 박리형상이고 녹색은 계면 B의 박리형상을 나타낸다. 계면 90° 방향(계면 A) 박리 길이를 폭으로 한 계면 B의 박리가 생기고 있음을 알 수 있다. 충격 에너지가 19.2J, 52.1J 및 75.8J일 때 90° 방향 박리 길이는 각각 약 42mm, 39.2mm 및 34.6mm로 충격 에너지가 클수록 90° 방향 박리 길이는 작아짐을 알 수 있었다. 계면 B의 박리 부분이 불 균일하게 찍혀져 있는 것은 초음파 현미경으로 층간박리를 촬영할 때 물을 매질로 사용하기 때문에 박리가 생긴 부분에 물이 들어 갔기 때문이며 시험편 B의 경우는 언제나 피상 박리가 발생했다.

또한 Fig.9에 52.0J로 충격을 받은 계면수가

4계면인 시험편 D의 층간 박리형상을 나타냈다. 박리형상은 충격면으로부터 촬영했으며, Fig.9에 계면 A, B, C, D, E를 표시했다. 박리형상을 보면 계면 A의 90° 방향 박리 길이를 폭으로 한 계면 B의 0° 방향 박리가 생기고, 똑같이 계면 B의 0° 방향 박리 길이를 폭으로 한 계면 C의 박리가 생기며, 90° 방향 박리 길이를 폭으로 한 계면 D의 박리가 생기고 있음을 알 수 있다. 이것은 충격면에서 멀어질수록 박리면적이 커지는 순차적인 층간박리의 발생 패턴이다. 충격 에너지가 증가하면 각 계면의 층간 박리형상은 원형에 가깝고 박리 면적이 작게 되는 경향이 보여졌다.

충격면 배면에 가까울수록 박리의 형상은 충격 에너지의 크기에 따라 상당히 다르며, 충격 에너지가 작을 경우 마름모꼴로 형성되는 박리패턴이, 충격 에너지가 클수록 피상으로 박리하는 패턴이 지배적이었다.

3.3 임계 관통속도

강구가 적층구성이 다른 각각의 CFRP 적층재 시험편을 관통하지 않는 최대 충격속도(또는 최대 충격에너지)를 구하는 데는 상당히 많은 시험편을 이용하여 관통의 한계 값을 구하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 본 연구에서와 같이 고가인 시험편으로 수 많은 관통시험을 행하는 것은 형편상 어려운점이 많으므로 수매의 시험결과로부터 적층구성이 다른 CFRP 적층재의 임계관통 속도를 구하는 것이 필요하다.

Fig.10은 적층배향이 같고 적층수가 다른 직교이방성 적층재 시험편의 임계 관통속도($V_{crit.}$)를 나타낸 것으로 Fig.10 중의 실선은 최소자승법에 의해서 계산된 값이다. 실험 데이터로부터 임계 관통속도의 계산은 $V_{crit.} = A + B \times \log(V_{impact})$ 의 식이 가장 적절했으며, 계산된 값으로부터 시험편 A, B, C의 임계 관통속도는 각각 52.082m/sec(5.426J), 85.14m/sec(14.5J) 및 118.5m/sec(28.09J)이었다. Fig.10으로부터 적층배향이 같고 적층수가 다른 적층재의 경우 임계관통속도는 적층수에 비례해서 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다.

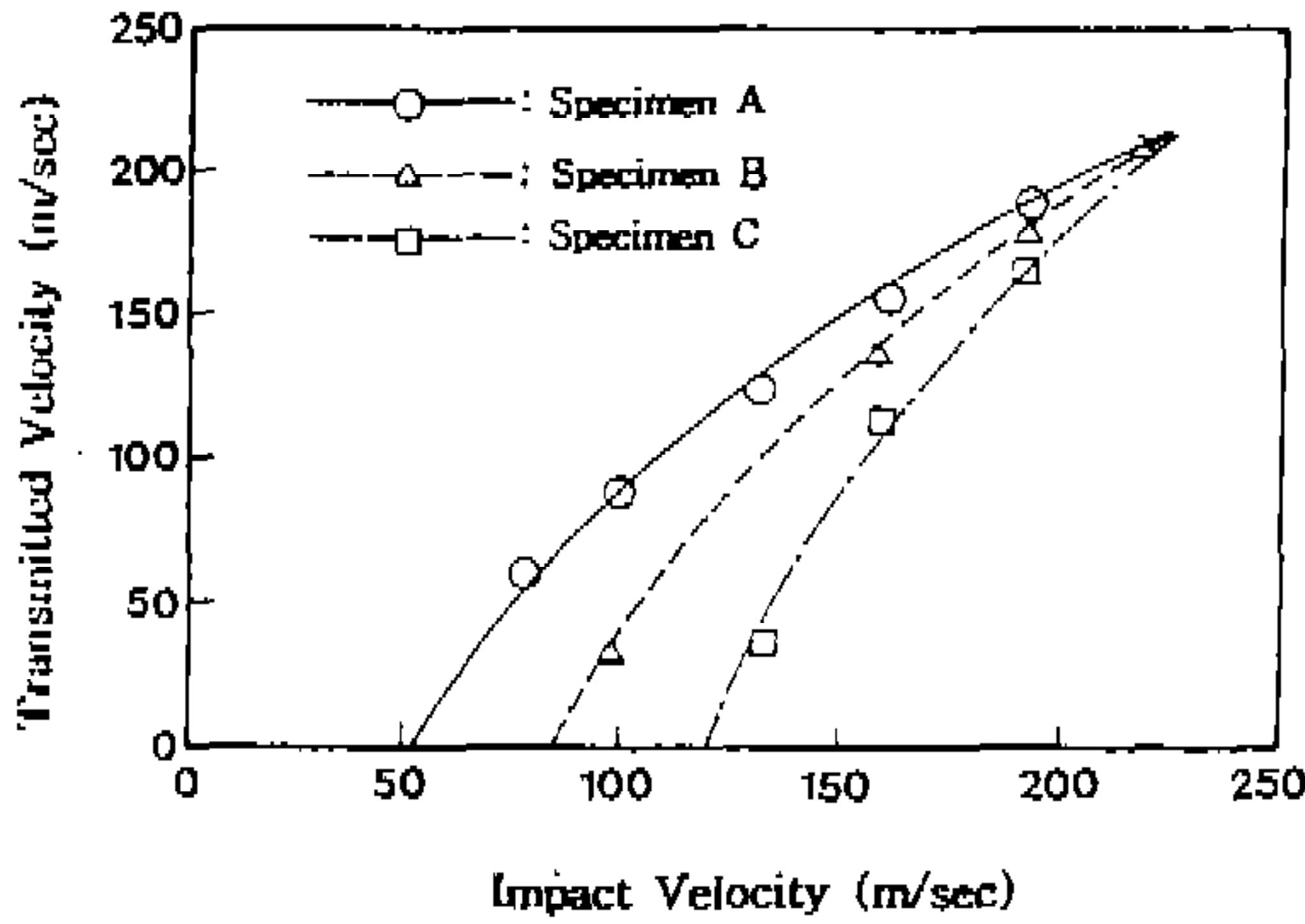


Fig.10 Relation Between Impact Velocity and Transmitted Velocity of Orthotropic Laminates by the Difference in the Number of Stacking Ply

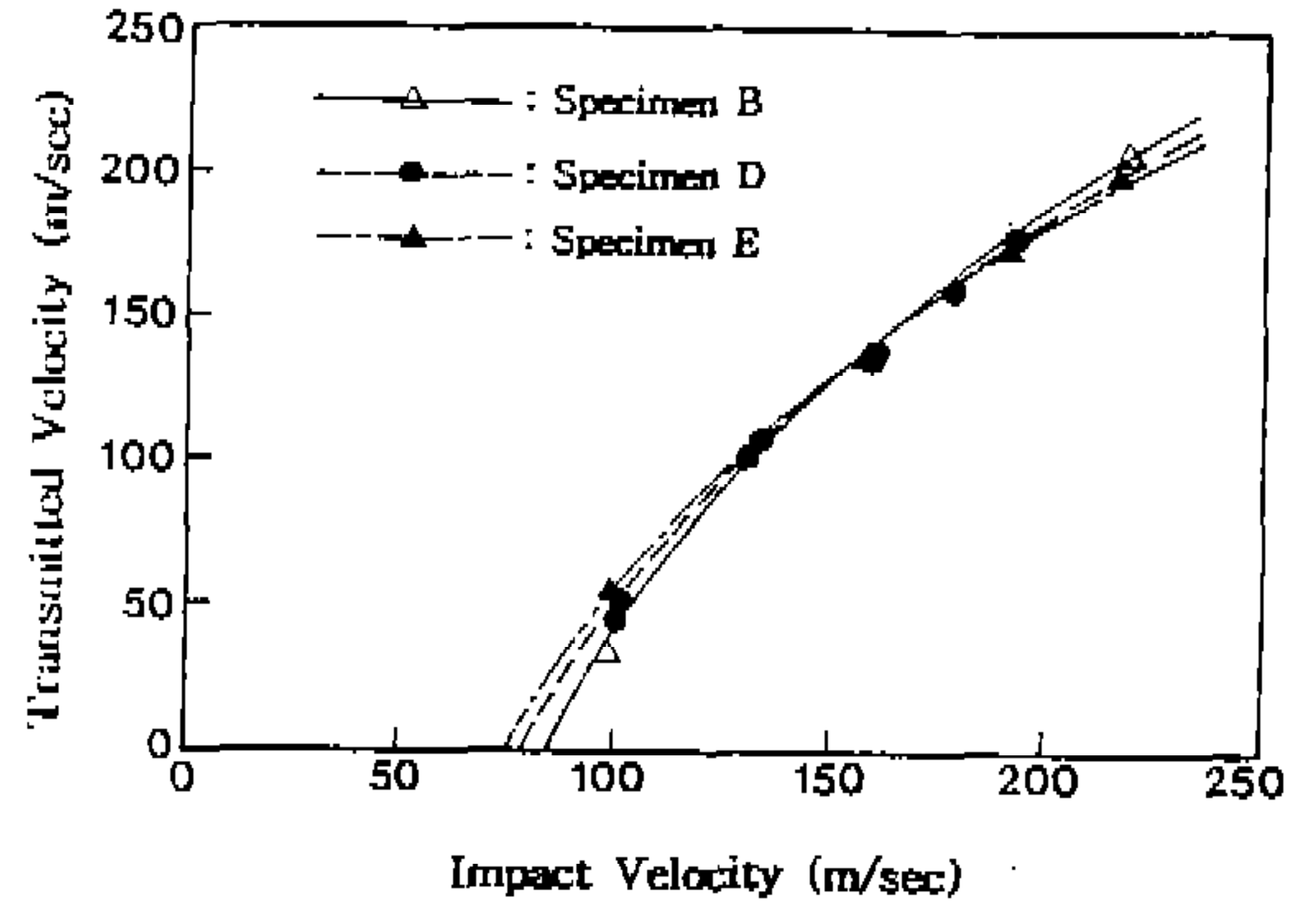


Fig.11 Relation Between Impact Velocity and Transmitted Velocity of Orthotropic Laminates by the Difference in the Interface Number

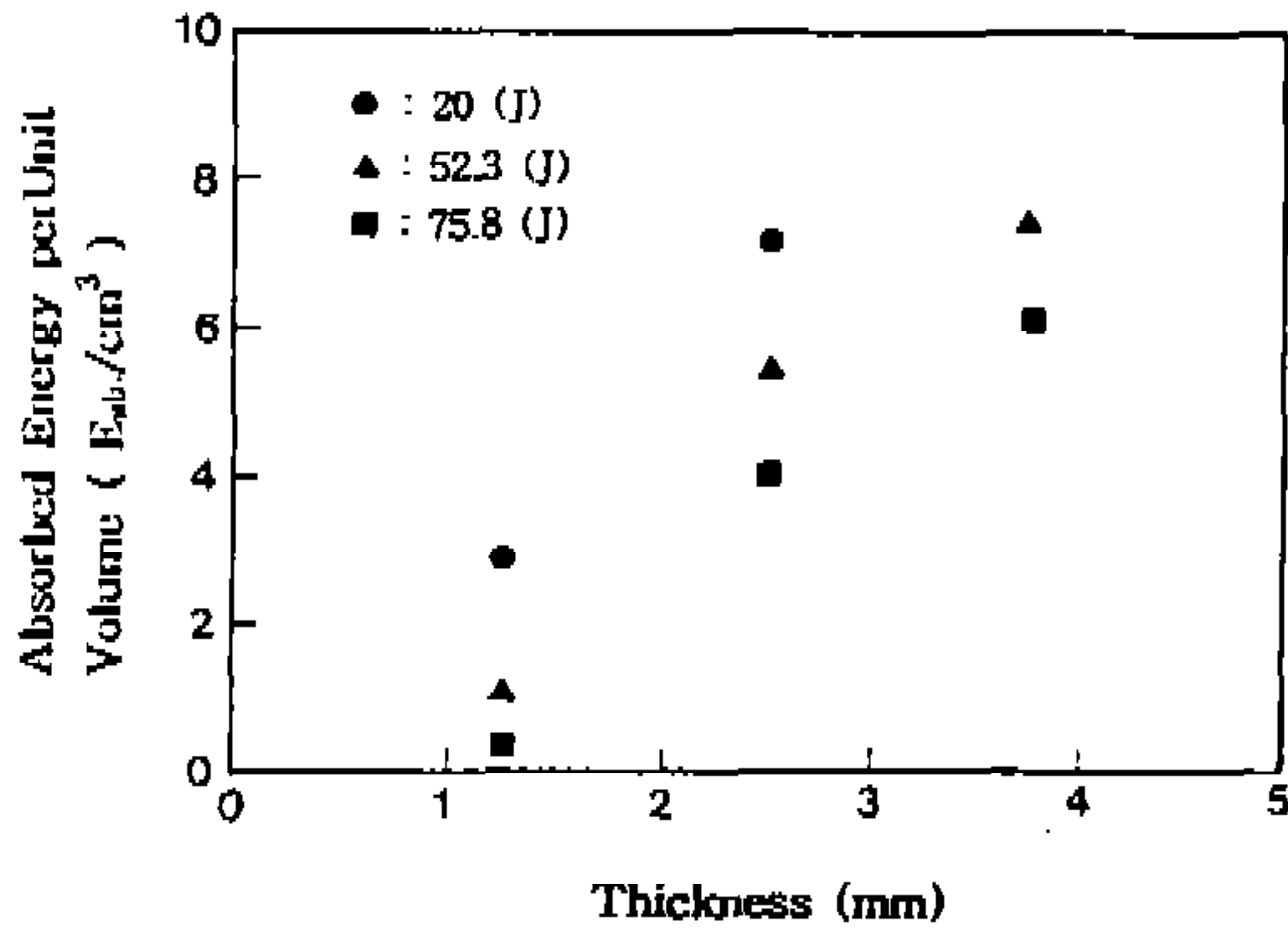


Fig.12 Relation Between Absorbed Energy per Unit Volume and Thickness of Orthotropic Laminates with the same Interface Number

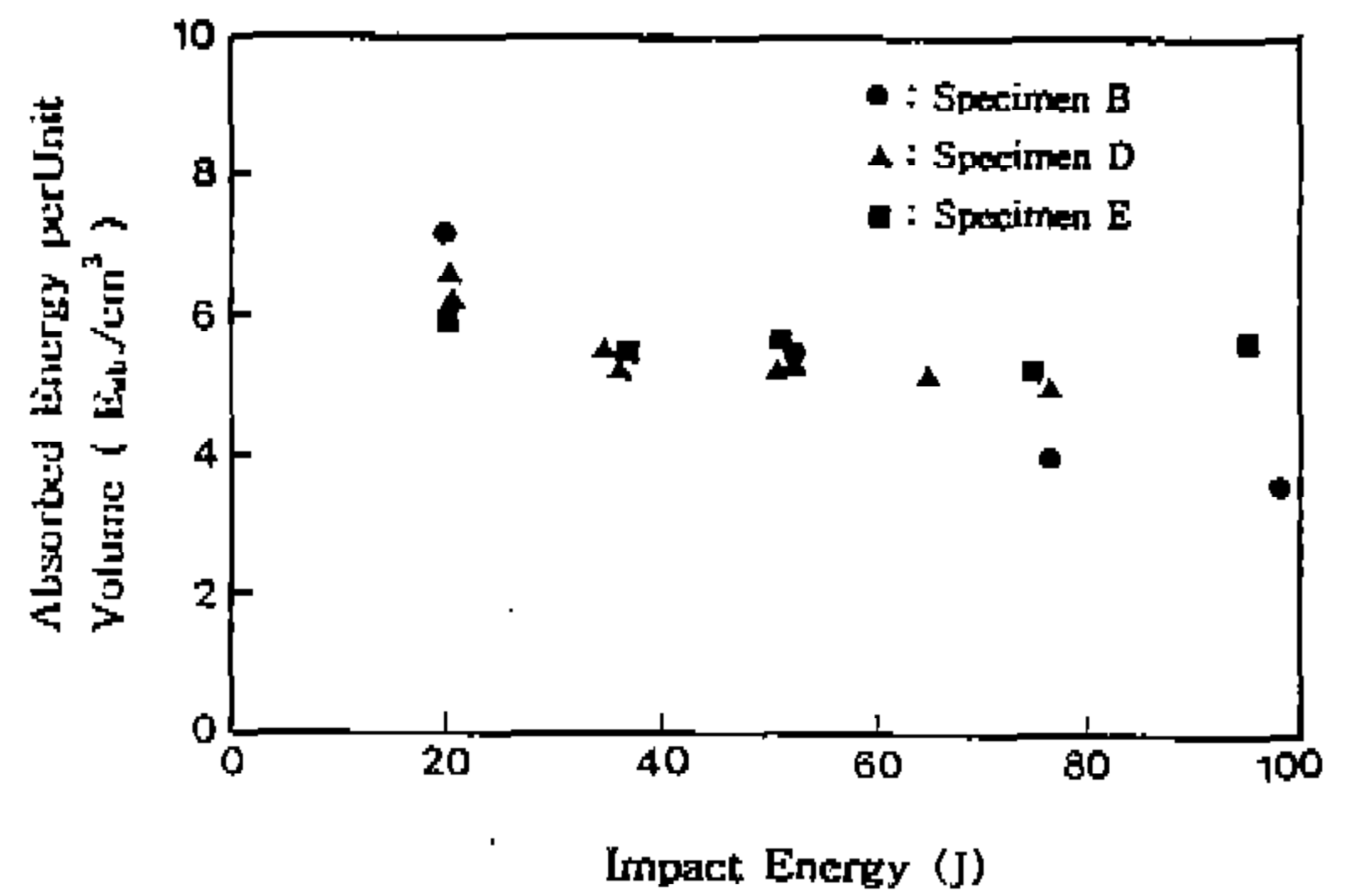


Fig.13 Relation Between Absorbed Energy per Unit Volume and Impact Energy of Orthotropic Laminates by the Difference in the Interface Number

또한 Fig.11은 적층수가 같고 계면수가 다른 시험편 B, D, E의 임계 관통속도를 나타낸 것으로 시험편 B, D, E의 임계 관통속도는 각각 85.14m/sec(14.5J), 78.25m/sec(12.25J) 및 74.802m/sec(11.19J)이었다. 이상으로 부터 알 수 있는 바와 같이 같은 적층수와 적층재일 경우 계면수가 적은 시험편 B가 가장 임계관통속도가 높았으며 다음으로 시험편 D, 시험편 E순 이었다. 계면수가 3계면인 시험편 E가 계면수가 4계면인 시험편 D보다 임계 관통속도가 낮은 것은 시험편 E는 탄소섬유 1매 대신에 직물 1매가 적

층되었기 때문에 탄소섬유 1매 보다 관통저항이 낮기 때문이라 생각된다.

3.4 관통특성

강구가 시험편에 충돌하여 관통한 후의 속도를 고속카메라를 이용하여 측정하여 충돌 속도로부터 강구가 관통 파괴 과정에서 소실된 에너지량을 산출하여 시험편의 관통부에 흡수되는 단위체 적당 에너지를 구하여 같은 적층구조를 갖는 시험편의 적층수에 따라 또 적층수가 같은 시험편의 계면수의 차에 따라 시험편 마다의 관통특성

을 평가했다.

3.4.1 적층구성이 같은 시험편의 적층수의 차

Fig.12에 섬유배향이 같고 적층수가 24매인 시험편 C, 적층수가 16매인 시험편 B, 적층수가 8매인 시험편 A의 관통부에 흡수되는 단위 체적당의 에너지를 시험편 두께에 따라 나타냈다.

충격에너지가 20J, 52.3J 및 75.8J인 경우의 시험편 두께에 따른 관통부에 흡수되는 단위 체적당의 에너지는 모두 선형적으로 증가하고 있으며, 충격에너지가 클수록 판 두께가 얇을 수록 흡수에너지는 작아짐을 알 수 있었다. 시험편 C의 경우는 적층수가 24매 이므로 충격에너지가 20J의 범위에서는 충격파괴가 발생하지 않았으므로 실험결과를 나타낼 수 없었다.

3.4.2 적층수가 같은 시험편의 계면수의 차

Fig.13에 적층수가 같고 계면수가 다른 CFRP 적층재 각 시험편에 대하여 충격에너지와 관통부에 흡수되는 단위 체적당의 에너지 손실과의 관계를 나타냈다. 시험편 B, D 및 E는 모두 적층수가 16매로써 섬유배향 및 계면수가 다른 시험편이며, 이들 3종류의 시험편의 관통실험을 행하여 관통 특성에 미치는 섬유배향 및 계면수의 관계를 조사했다. 계면수가 2계면인 시험편 B는 관통임계점 부근에서 가장 강구의 에너지 손실이 크며 충격에너지가 증가함에 따라 에너지 손실량은 급격히 감소해간다. 또한 계면수가 4계면인 시험편 D는 계면수가 2계면인 시험편 B보다 임계관통점이 약간 낮으나 충격속도가 클 경우는 시험편 B보다 에너지 손실량(흡수에너지)은 크다. 그러나 충격면 배면에 직물 프리프래그 1층(0°, 90°)을 적층한 계면이 3계면인 시험편 E는 충격에너지가 증가하여도 충격 전후의 손실 에너지는 거의 변화가 없다. 이는 충격면 배면에 적층한 1층의 직물이 충격면 배면에 발생하는 굽힘 크랙을 억제하기 때문이라 생각된다.

이상으로 부터 충격 에너지가 낮은 영역(임계 관통점 부근)에서는 계면 수가 2계면인 시험편 B가 가장 관통저항이 높고 다음으로 4계면인 시험편 D, 직물을 1층 적층한 시험편 E순으로 낮았다. 그러나 충격 에너지가 높은 범위에서는 반대로 시험편 E, 시험편 D, 시험편 B순으로 관통

저항이 높았다.

4. 결 론

- 1) 비교적 저속의 충격 범위에서는 층간 박리 면적 및 손상영역이 넓고 강구의 관통 전후의 에너지 손실도 크며, 고속의 충격 범위에서는 손상영역이 국소화 되어 강구의 에너지 손실은 적었다.
- 2) 충격에너지가 낮은 영역에서는 마른모퉁 모양의 파괴와 피상파괴가 병존하지만 충격에너지가 증가함에 따라 거의 모든 시험편에서 피상의 파괴로 변화하였다.
- 3) 적층수가 같고 계면수가 다른 CFRP 적층재의 경우 임계관통 에너지는 시험편 B가 14.5J(85.14m/sec), 시험편 D가 12.25J(78.252m/sec), 시험편 E가 11.19J(74.802m/sec)로 계면수가 가장 적은 시험편 D가 가장 높았고, 직물을 1ply 적층한 시험편 E가 임계관통 에너지는 가장 낮았으나 고속 충격의 범위에서는 가장 관통저항이 높고 충격에너지의 변화에 관계 없이 관통저항이 거의 일정 하였다.
- 4) 계면수가 같고 적층수가 다른 CFRP 적층재의 경우 적층매수가 8매, 16매 및 24매인 시험편 A, B, C의 임계관통 에너지는 각각 14.5J(85.14m/sec), 12.25J(78.252m/sec), 11.19J(74.802m/sec)로 적층수에 따라 거의 선형적으로 증가 하였다. 또한 단위 체적당 관통에 손실되는 흡수 에너지는 시험편의 두께에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.
- 5) CFRP 적층재의 관통파괴 시험결과로 부터 임계 관통속도는 $V_{crit} = A + b \times \log(V_{impact})$ 의 식으로 추정하는 것이 가장 정확했다.

후 기

이 논문은 1994년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참 고 문 헌

1. 長坂邦宏, 1989, “航空宇宙機器に見る CFRP 利用技術”, 日經 カニカル, 5, 15, pp.16-30
2. 日本 材料 科學會 編, “1989”, 破壊と 材料, 裳華房
3. 武田 展雄, 1986, “複合材料の 衝撃應答と 破壊”, 日本複合材料學會誌, 12卷, 2號, pp. 32-42.
4. Bless S.J., Benyam M., 1990, “Penetration through glass-reinforced phenolic”, A0244A., Int. SAMPE Tech. Conf.(Adv. Mater. Process Eng.), Vol.22, pp.293-303
5. Ristescu N., Malvern L.E. and Sirakowski, “Failure Mechanisms in Composite plates impacted by Blunt-Ended Penetrators”, Foreign Object Impact Damage to Composite STP 568
6. Takeda, N, Setakowski. R.L. and Malvern, L.E., 1982, “Microscopic Observations of Cross sections of Impacted Composite Laminates”, Composite Technology Review, vol. 4. No.2, pp.40-44
7. Kurokawa, T., Tanaka. K., and Fujinaga, s., 1989, “Damage of Graphite/Epoxy Laminates Composite plates subjected to a Transverse Impact”., dynamic fracture, pp. 183-182.