

〈논 문〉 SAE NO. 953768

충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구

An Energy Absorption Characteristic of Thin-Walled Structure Members by Crushing Load

양 인 영,* 심 재 기,* 김 선 규*
I. Y. Yang, J. K. Sim S. K. Kim

ABSTRACT

In this paper, the crushing tests of circular tubes under axial impact loading are conducted to investigate the energy absorption abilities. A cross head with 18kg launched by the compressed air collides against circular tubes.

Circular tubes used for this experiment are Al and CFRP laminates, which have 8 ply with 15° and 45°.

The absorbed energy unit mass and volume of the CFRP specimen with 15° are higher than those of aluminum specimen.

CFRP specimen having small stacking angle have better energy absorption abilities than that of large stacking angle.

주요기술용어 : CFRP(탄소섬유강화복합재), Crushing Load(충돌하중), Energy Absorption Characteristic(에너지흡수특성), Thin-walled Structure(박육구조)

1. 서 론

최근 국내에서의 1년간의 교통사고에 의한 사망자가 1만명을 넘어 큰 사회문제가 되고 있다. 이 사망자의 56% 정도는 승차중의 사망으로 그중 70%는 정면충돌에 의한 사고가 대부분이다.

따라서 차체구조부재는 충돌시에 적절히 에너

지를 흡수하고 객실의 변형을 억제하여 승객의 안전을 확보해야 한다는 개념이 점차 자동차 차체구조설계에 이용되고 있다.

특히 최근에는 연료의 절감 및 환경개선의 관점에서 종래부터 사용되고 있는 금속재료로부터 재료를 변형하여 안정성을 고려한 FRP(Fiber reinforced plastics)재 박육부재의 충격에너지 흡수특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1),2)}

이제까지의 차체박육 구조부재의 에너지 흡수 특성에 관한 연구결과를 보면 주로 정적 압축하

* 정회원, 조선대학교 공과대학

** 이리 농공전문대학

중을 받는 박육부재에 대한 연구결과가 대부분으로^{3)~6)} 튜브형 단면을 갖는 부재에 대하여 축봉재하중 작용시의 평균봉재응력을 구하는 이론식을 유도하였고 허니컴부재 및 원통박육부재의 축대칭모드 및 비축대칭모드에 대하여 해석하고 있다. 또한 비금속재료인 polyvinylchloride(PVC) 원추재를 축봉재실험하여 에너지 흡수특성에 관해 고찰하고 있다.⁷⁾ 그러나 이들 모두 평균봉재응력을 이론적으로 해석하므로써 에너지 흡수능력을 명확히 하고져 하였으나 봉재가 진행되는 과정의 하중변형관계나 재료의 차에 의한 영향까지 고려한 연구결과는 거의 찾아보기 어렵다. 특히 구조경량화를 고려한 탄소섬유강화 복합재(Carbon fiber reinforced plastics : 이하 CFRP라 한다) 박육부재의 충격에너지 흡수특성에 관한 연구결과는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 및 CFRP 적층 박육부재가 자동차 등의 수송기계의 기본적인 구조부재로 이용될 것을 상정하여 제작한 박육원통부재에 공기압 낙추식 충격시험장치로 충격을 가하여, 재료의 차 및 CFRP 박육원통의 섬유배향각의 차에 따라 나타나는 봉재모드의 변화와 에너지 흡수특성에 주목하여 어떠한 재질(Al, CFRP) 및 어떠한 배향각을 갖는 CFRP 적층재가 충격에너지 흡수특성이 좋은가를 실험적으로 고찰하고자 한다. 특히 CFRP 적층박육부재의 경량화의 타당성에 관해 고찰하고자 한다.

실험방법으로는 낙추식·충격압축시험기를 이용하여 박육부재에 충격압축하중을 가해 봉재시켰다. 또한 봉재과정중의 하중 및 변위를 측정하여 재료의 차 및 CFRP 적층재의 섬유배향각의 차에 따른 봉재의 형상 및 에너지 흡수특성을 명확히 했다.

2. 시험편

본 연구에서는 자동차 등에 많이 사용되는 구조부재의 기본요소로서 형상에 의해 파괴형태가 좌우되지 않는 축대칭 박육원통을 시험편으로 하였다. 시험편의 크기는 Table 1과 같다.

시험편 제작방법으로서 Al 박육시험편에 대하

여는 인발관(A6063)을 기계가공하여 내경을 30mm, 외경을 33mm가 되도록 하였다. Al 시험편은 풀림처리하여 시험에 이용하였다. CFRP 시험편은 핸드레이업법으로 소정의 섬유배향이 되도록 1방향프리프레그(TORAY P305S-25)를 직경 30mm의 연강봉에 8층으로 적층하여 그위에 나선상으로 열수축 테이프를 감아 130°C에서 2시간 동안 큐어링을 하여 제작하였다. 섬유 및 수지의 특성을 Table 2에 나타냈다. 외측에 감은 테이프는 반경방향에 외압을 작용시킴과 동시에 탈포를 촉진시킨다. 또 섬유배향은 시험편의 원주방향을 0°로 하여 15°, 45°로 변환시켜서 제작하였다. 시험편의 적층배향을 15°, 45°로 한 이유는 적층배향의 변화에 따른 충격에너지 흡수특성을 고찰하기 위해서이며 배향각이 90°에 가까워 질수록 축압축력에 대단히 약하기 때문에 배향각 45°까지만을 고려했다. 모든 시험편은 선반에서 길이가 100mm가 되도록 기계가공하였고 각 시험편의 수는 각각 정적시험 4개, 충격시험 5개씩 계 27개의 시험편을 이용하였다.

Table 1 Configuration of specimen

materials dimension	Al	CFRP	
		15°	45°
length(mm)	100	100	100
inner dia.(mm)	30	30	30
outer dia.(mm)	33	32.5	32.5
thickness(mm)	1.5	1.25	1.25

Table 2 Characteristics of carbon fiber and matrix

	Carbon fiber	Matrix
Densinty[kg/m ³]	1.80 × 10 ³	1.24 × 10 ³
Strength[MPa]	4,900	90
Modulus[GPa]	230	3.96
Fiber content[Wt, %]	37	
Curing Temp.[°C]		130

3. 시험장치 및 실험방법

본 연구에서는 Fig.1과 같은 낙추식 충격시험기를 이용하여 박육부재 시험편을 붕괴실험 하였다.

시험기의 원리는 로드셀 위에 놓은 시험편에 컴프레셔에 의해 압축된 공기가 실린더에 유입하여 폴리에틸렌 수지계의 탄환을 가속시킨 에어건에 의해서 크로스헤드를 충돌시켜서 시험편에 충격력을 부여하였다. 크로스헤드의 중량은 18kg이다. 또 충격속도는 시험편이 충분히 붕괴되도록 Al, CFRP 시험편 모두 대략 8m/sec로 하였다. 또한 각 시험편의 에너지흡수량을 조사하기 위하여 붕괴가 진행되는 동안의 변형 및 하중응답을 계측하였다. 변형응답은 크로스헤드에 붙어있는 마크의 이동을 광학식 변위계를 이용하여 비접촉으로 계측했으며 하중응답은 로드셀에 붙어있는 반도체 스트레인 게이지(Kyowa, KSP-2-120-E4)의 출력에 검출부의 단면적과 종탄성

계수를 곱하여 구하였다. 충격하중 및 변형응답의 측정 시스템은 Fig.2와 같다.

전압변화로부터 계측된 변형 및 하중응답은 파형기록계에 의해서 AD변환한 후 PC로 계산하였고 변형 및 하중응답으로 변화하였다. 이들 결과로부터 시간축을 소거하여 충격붕괴가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 구하였다. 또한 정적붕괴시험은 INSTRON 재료시험기를 이용하였으며 재료시험기의 척사이에 2개의 가압판을 끼워 시험편을 세트한 후 균일 압축하중을 작용시켰다. 재료시험기는 PC에 의해서 제어하고 압축도중의 변위와 하중의 데이터는 0.2초 마다 버퍼메모리내에 기억시켜 시험종료후에 GP-IB를 통해서 PC에 전송하여 변위와 하중의 수치데이터를 얻었다. 정적 시험조건은 붕괴속도 10mm/min, 시험편의 붕괴길이는 60mm로 하였다.

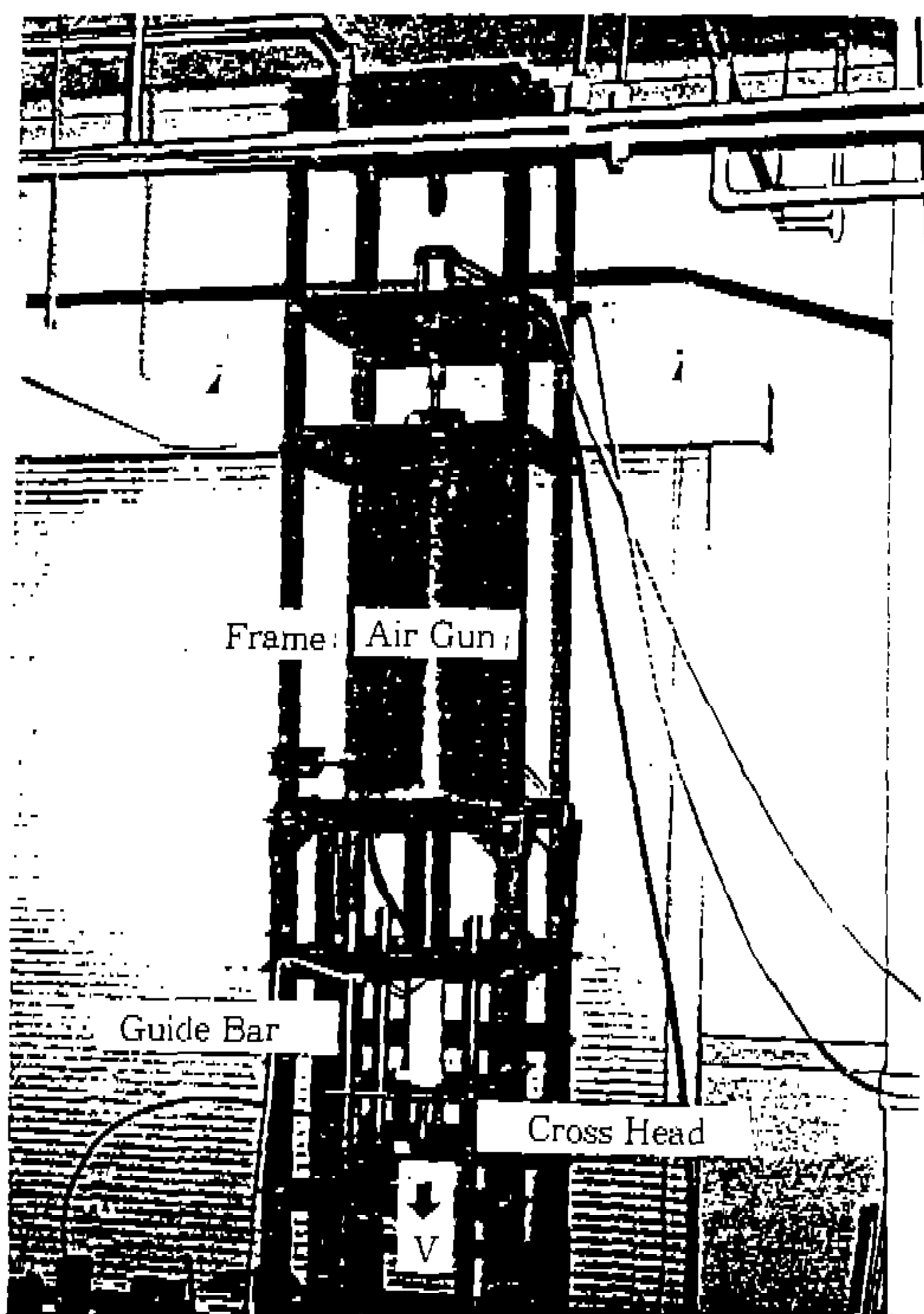


Fig.1 Impact testing machine for crushing

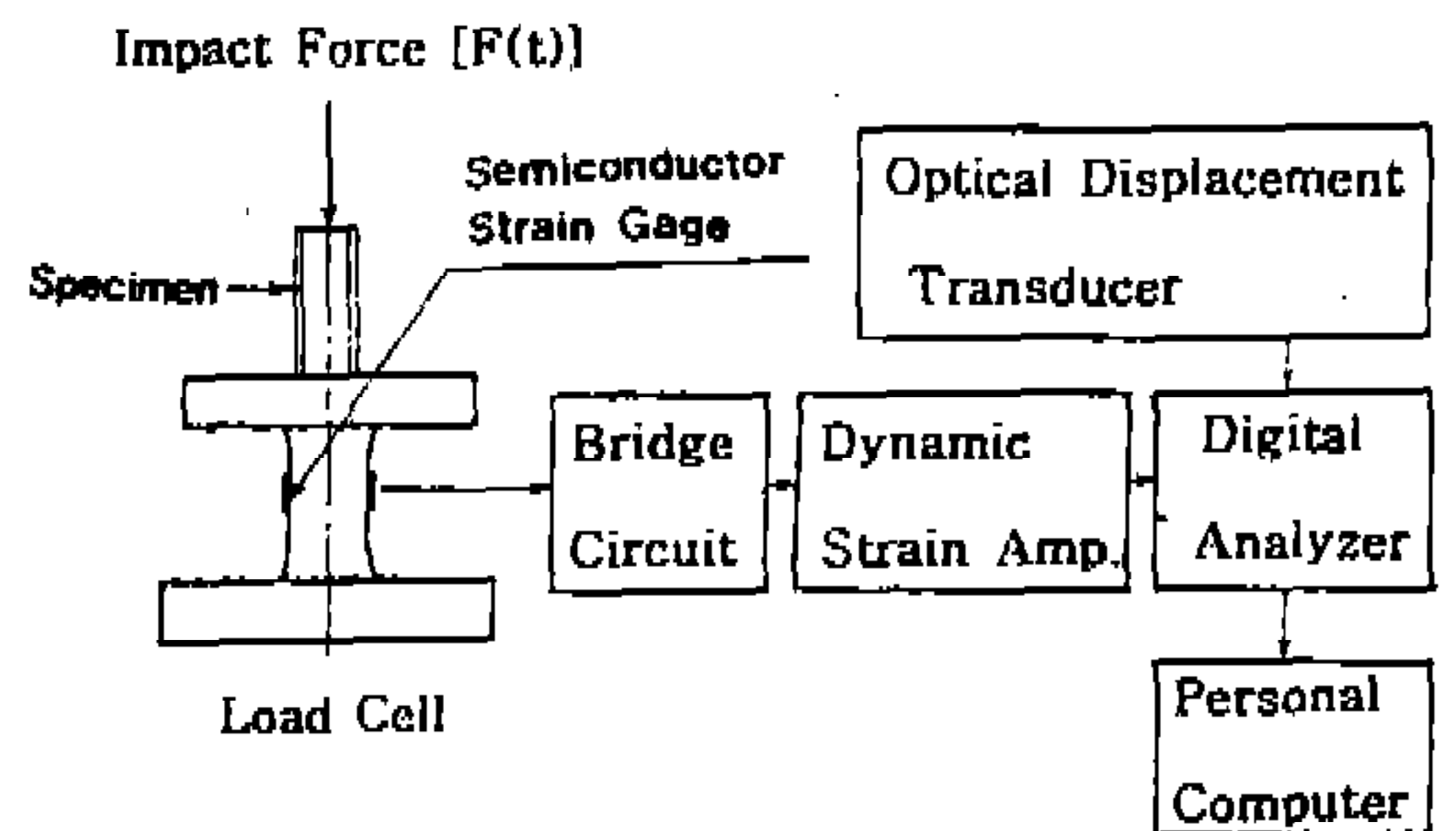


Fig.2 Measurement system of impact force and deformation response

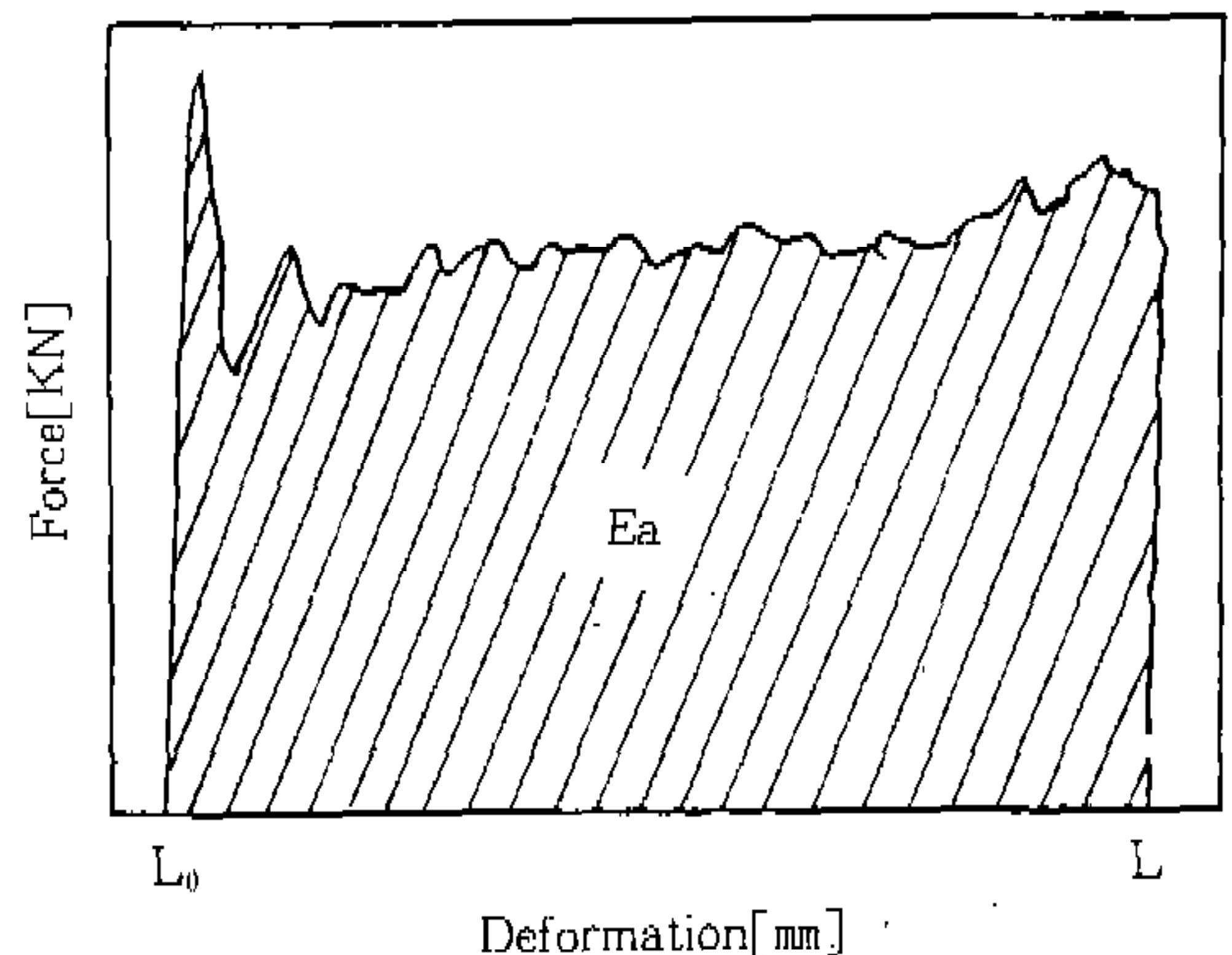


Fig.3 Absorbed energy by impact test

에너지 흡수량의 계산은 정적 및 충격붕괴 실험으로부터 얻은 Fig.3과 같은 하중-변위선도의 사선의 면적이 시험편에 흡수되는 에너지라고 생각하여 p-w선도를 다음식과 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가하였다.

$$E_a = \int_{l_0}^l P dl \quad (1)$$

여기서 E_a 는 박육부재에 흡수된 에너지이다.

또 단위체적당의 흡수 에너지량 E_v 와 단위질량당 흡수 에너지량 E_ρ 의 계산식은 다음과 같다.

$$E_v = \frac{E_a}{V}, \quad E_\rho = \frac{E_a}{V_\rho} \quad (2)$$

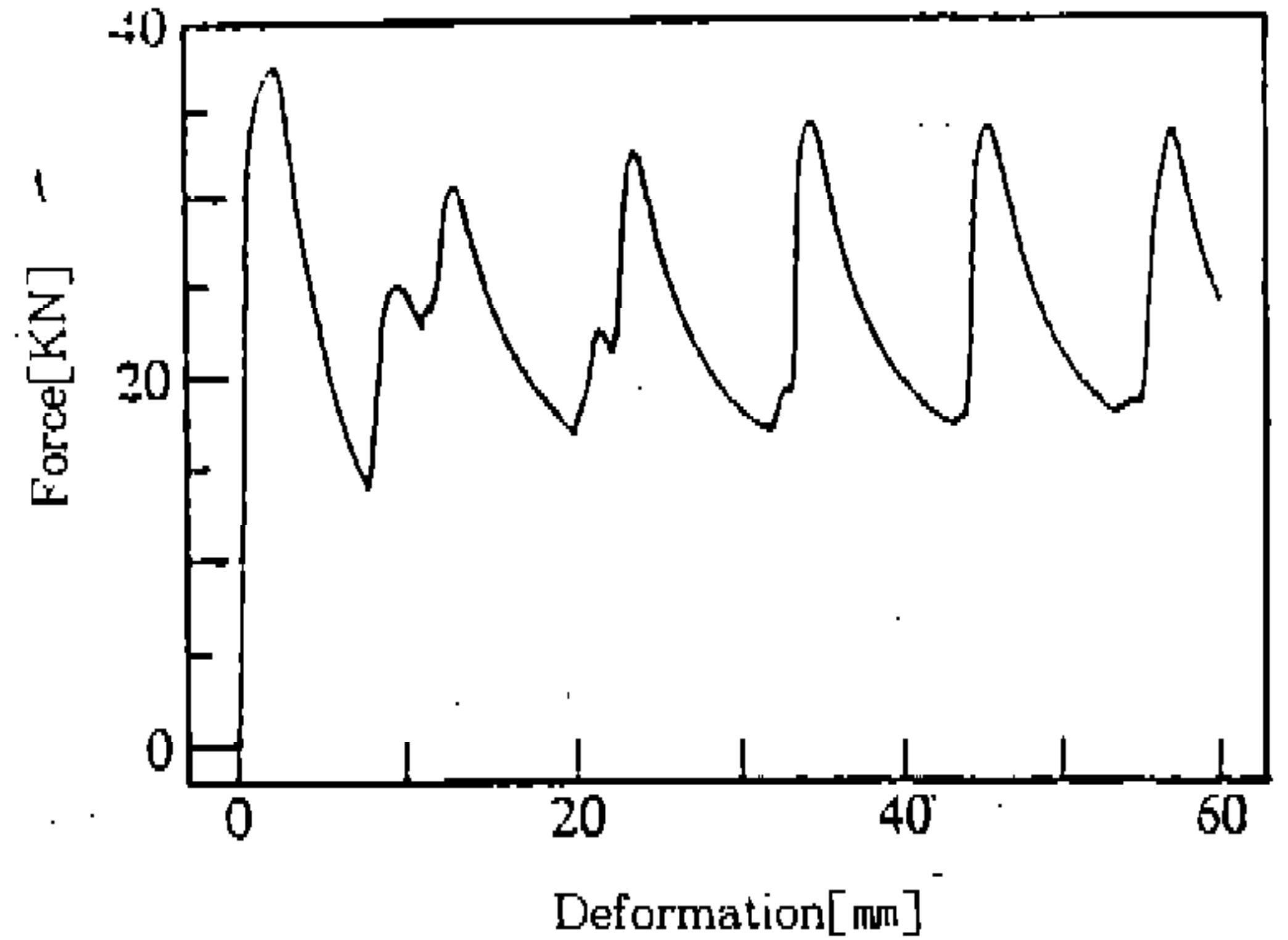
여기서 V 는 붕괴된 체적, V_ρ 는 붕괴된 질량이다.

4. 정적 및 충격에너지 흡수특성

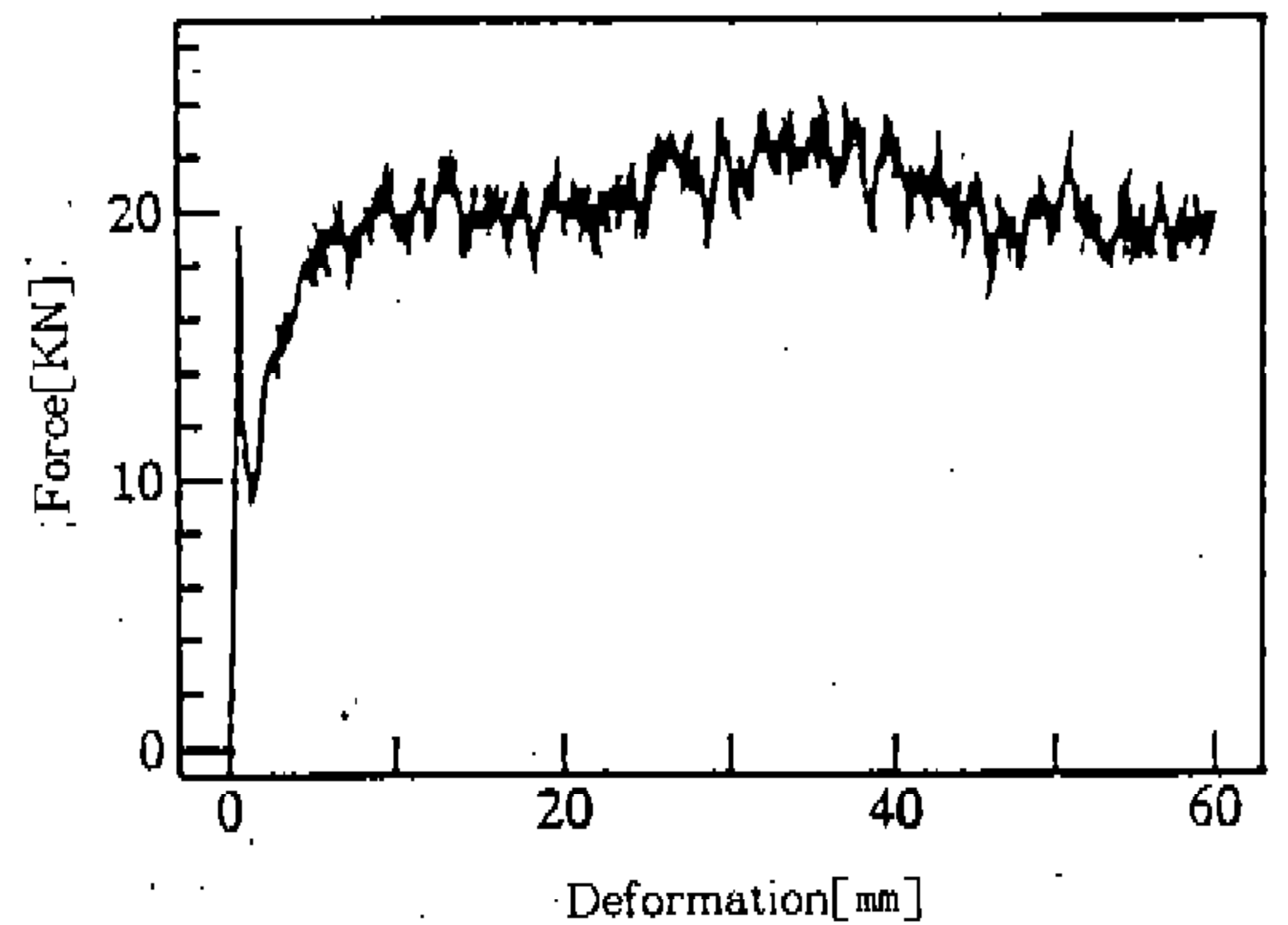
3장에서 기술한 측정시스템 (Fig.2)으로부터 하중응답 및 변위응답을 계측하여 에너지 흡수특성에 관해 고찰한다. CFRP 적층재의 섬유배향에 따라 에너지 흡수특성을 고찰하여 Al 시험편과 비교하였다. Fig.4(a)에 Al 박육원통 시험편, Fig.4(b)(c)에 CFRP적층 박육원통 시험편의 정적 붕괴시험결과를 나타내었다.

Fig.4로부터 알 수 있는 바와 같이 Al 시험편과 배향각을 15°, 45°로 변환시킨 CFRP 시험편을 정적 압축시험한 경우 Al 시험편에서는 붕괴파괴가 일어난후 계속해서 시험편에 압축력이 작용하면 다시 에너지의 축적과 해방이 반복되어 에너지 흡수가 순차적으로 행해진다. 또한 배향각이 15°인 시험편에서는 안정적으로 하중이 지속하는 순차적인 압축모드가 생기나 배향각이 45°인 시험편에서는 약 1%정도 변형한 곳에서 섬유배향에 따라 큰 균열이 생겨 취성적인 파괴에 이른다. Fig.4(C)에 취성재료의 전형적인 하중-변위 응답 특성을 나타내었다.

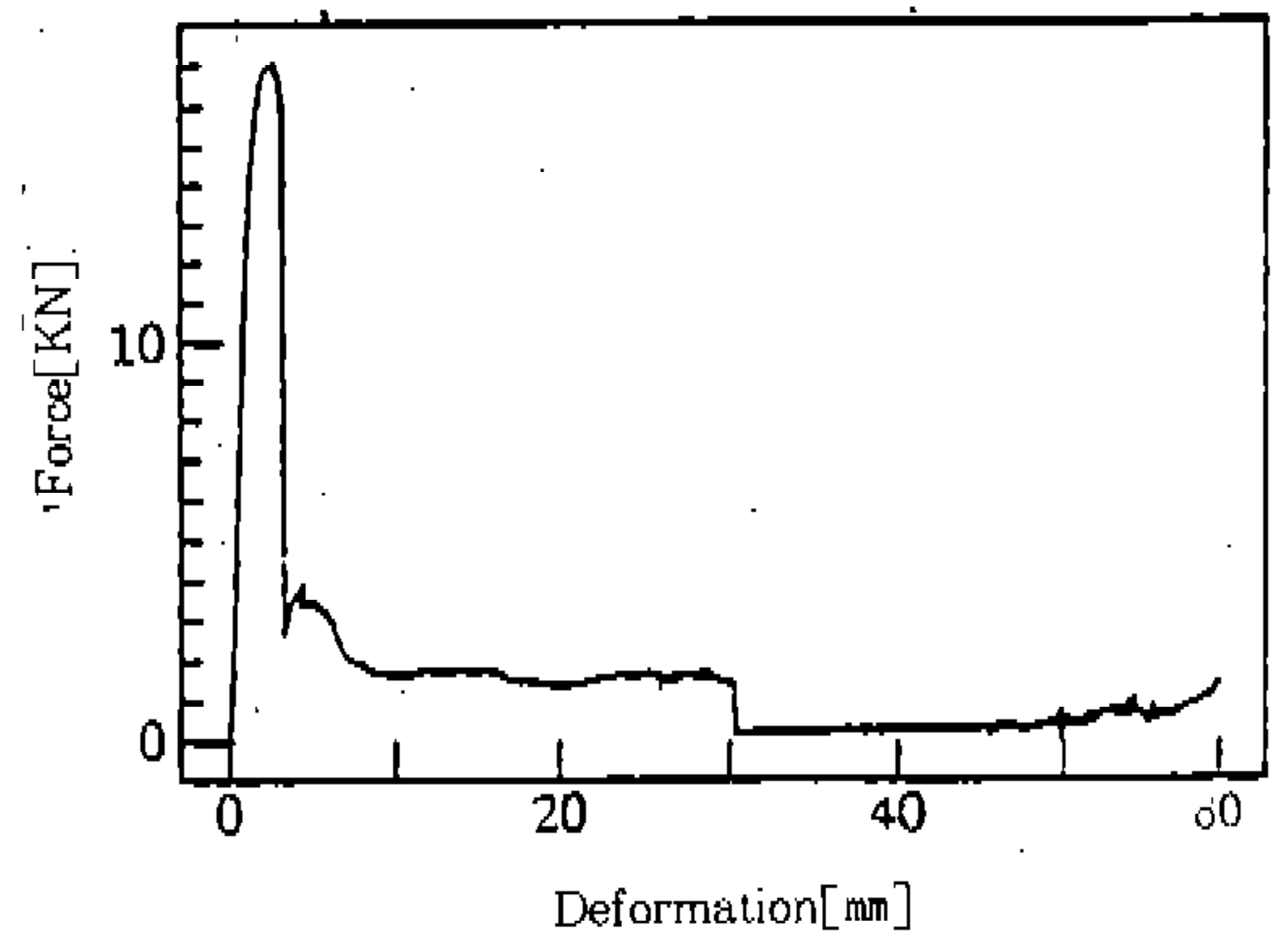
정적 붕괴의 경우 평균흡수에너지는 Al시험편



(a) Al

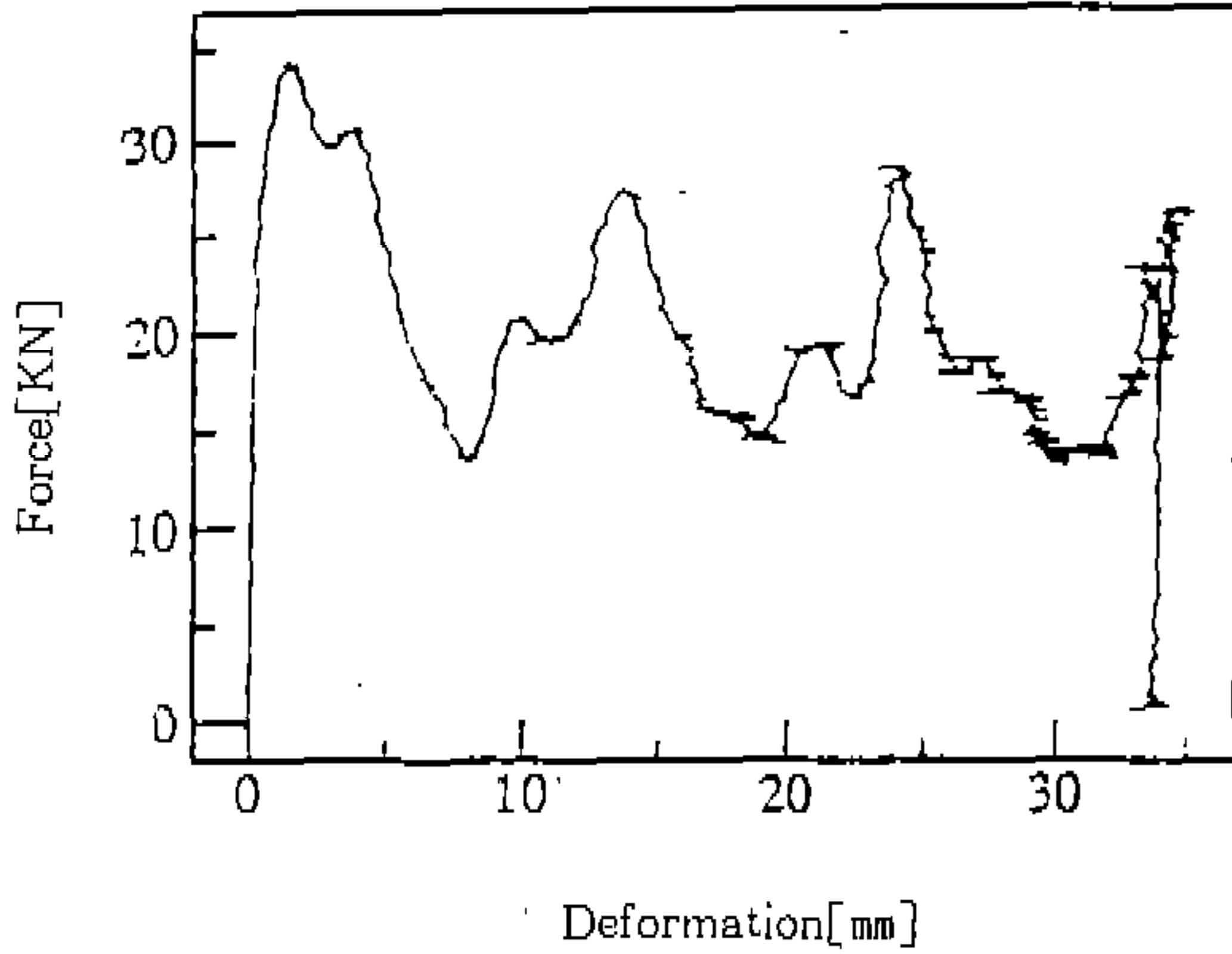


(b) CFRP(15°)

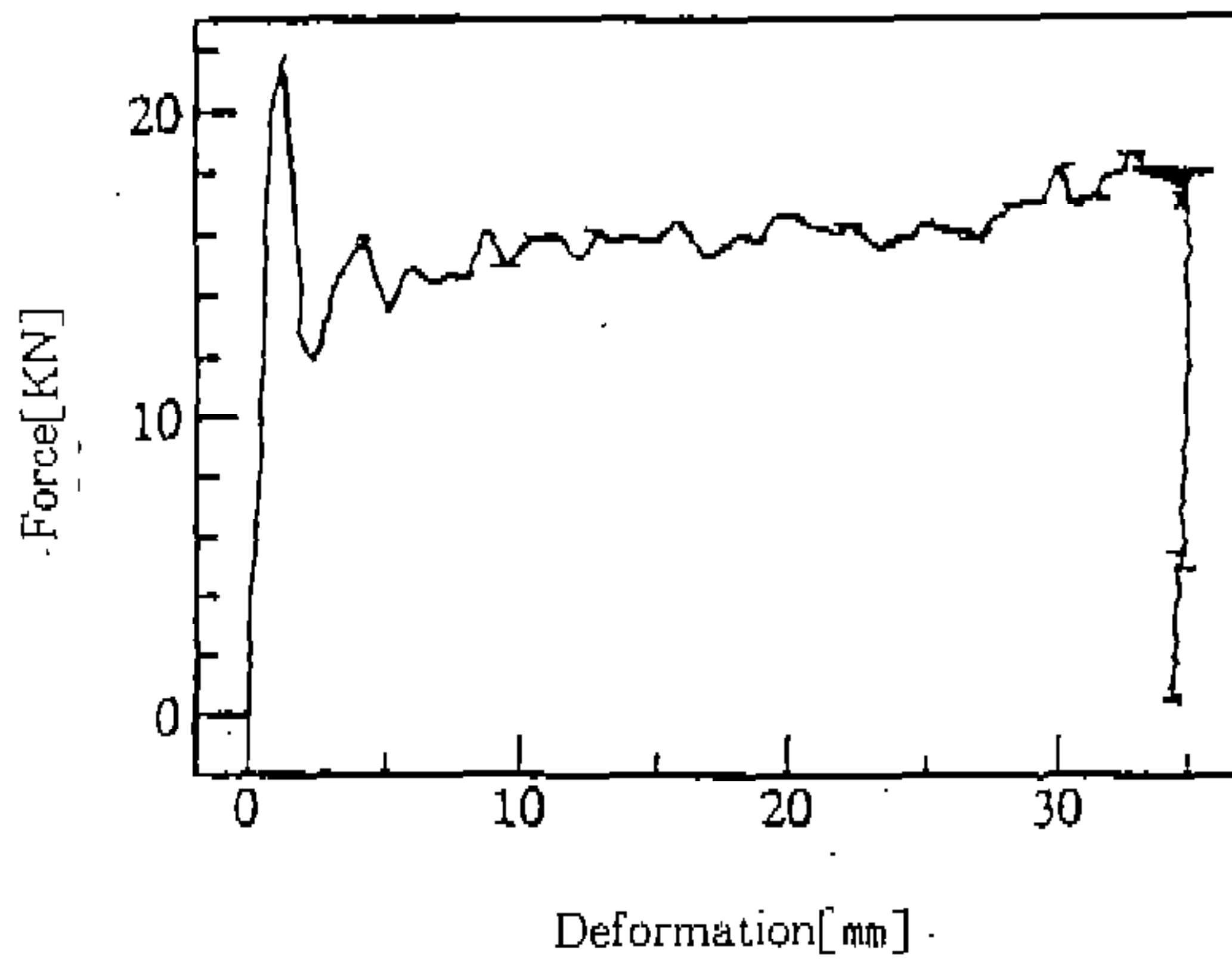


(c) CFRP(45°)

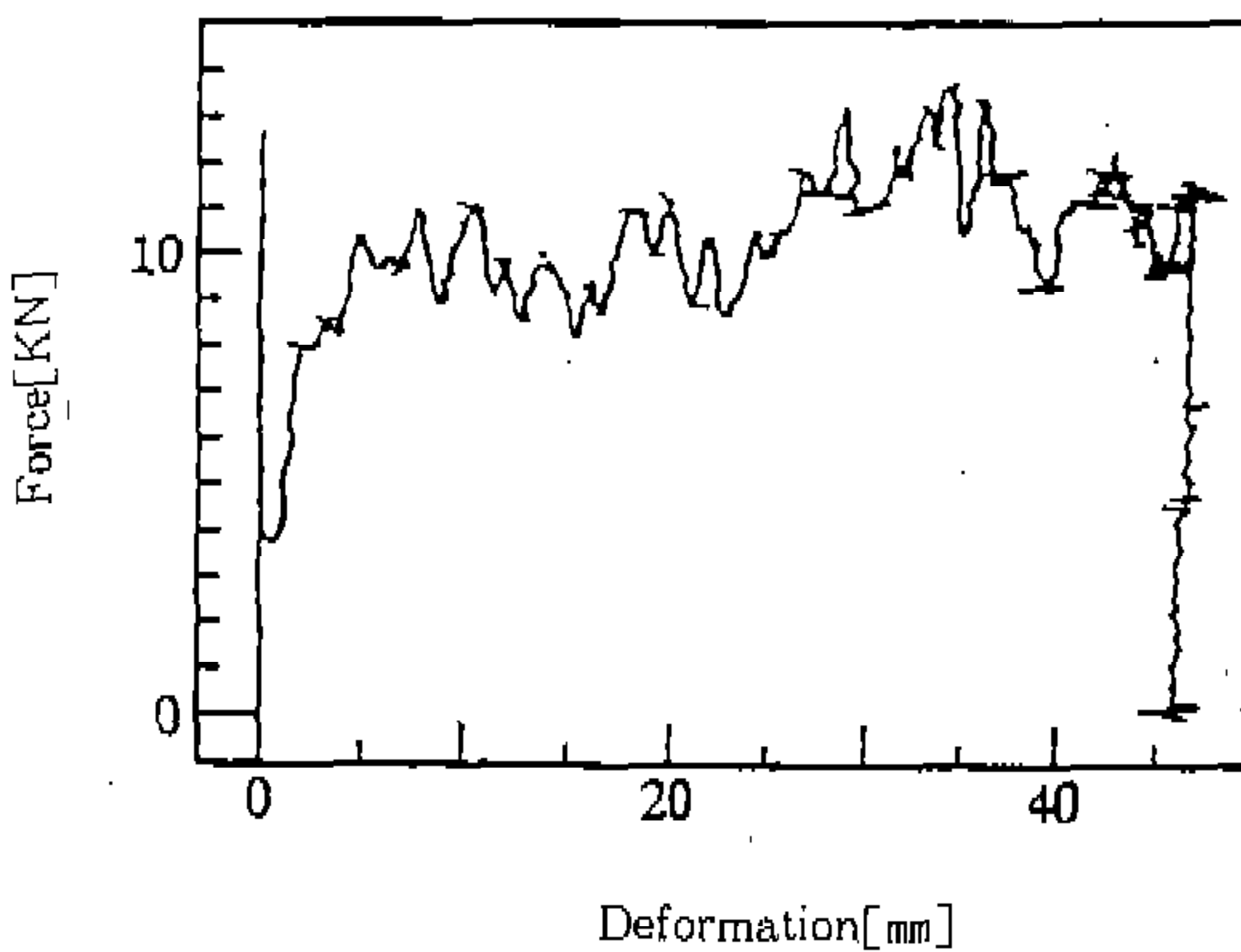
Fig.4 Force and deformation curve by static collapse test



(a) Al



(b) CFRP(15°)



(b) CFRP(45°)

Fig.5 Force and deformation curve by static collapse test

에서는 1.418[KJ], 배향각이 15°, 45° 인 CFRP 시험편에서는 각각 1.181[KJ] 및 0.12[KJ]이었다. Fig.5에 충격 붕괴시험으로부터 얻은 하중-변위선도를 Fig.6은 붕괴된 시험편의 형상을 나타내었다.

Fig.5에 Al 시험편, CFRP 시험편 2종류의 충격 붕괴시험결과를 나타내었다. Al 시험편에서는 정적 붕괴시험결과와 비슷하게 충격 붕괴파괴가 일어난후 계속해서 에너지의 축적과 해방이 반복되어 에너지 흡수가 순차적으로 행해진다. 또한 배향각이 15° 인 CFRP 박육원통 시험편의 경우는 하중이 거의 일정하게 유지되면서 붕괴가 진행해가는 순차적인 붕괴가 생기고 있으나 배향각이 45° 인 시험편에서는 하중이 일시적으로 저하하는 붕괴초기단계에 균열이 진전하며 섬유방향에 따라 균열이 발생한다. 시험후의 모양과 대응시켜 보면 시험편의 상하단면이 섬유방향에 따라서 파괴되는 것을 알 수 있으며 하중이 저하하기 때문에 하중 지속시간이 길어 붕괴 변위도 크다. 크로스헤드의 운동에너지가 시험편에 완전히 흡수되어서 붕괴가 종료할 때까지 요하는 시간은 배향각이 15°, 45° 일때 각각 10.5sec, 15sec였고 시험편의 붕괴길이는 각각 35mm, 47mm였다. 또한 Al시험편은 붕괴길이가 약 33mm였다.

충격 붕괴시험의 경우 평균흡수에너지는 Al 시험편의 경우는 0.694[KJ], 배향각이 15°, 45° 인 CFRP 시험편의 경우는 각각 0.56[kJ], 0.494[kJ]로서 15° 인 시험편이 크게 나타났다. 배향각이 15° 인 CFRP 시험편에 대해서는 Fig. 6(b)를 보면 섬유가 파단하지 않고 원통벽의 단면중앙에 생기는 원환상의 썩기형 크랙이 진전하여 원통벽의 내측과 외측으로 확장되는 붕괴모드(Splaying mode) 즉 원환상 크랙이 생긴다. 이는 적층이 분리하는 모드이다. 또 배향각이 45° 인 시험편은 Fig.6(C)와 같이 섬유방향에 따라서 일시에 크랙이 진행되는 전단모드가 생기지 않고 단면으로부터 순차적으로 붕괴가 진행된다.

이상으로부터 우수한 에너지 흡수특성을 실현하기 위하여는 안정한 순차적인 붕괴를 생기게 할 필요가 있는데 하중-변위선도 및 붕괴된 시험편으로부터 알 수 있는 것과 같이 CFRP 적층

박육 시험편의 경우는 배향각이 적은 시험편이 안정되게 붕괴됨을 알 수 있었다.

Fig. 7, 8은 정적 붕괴실험으로부터 얻은 단위 체적당의 에너지 흡수량 및 단위질량당의 에너지 흡수량을 Al, CFRP 시험편을 비교하여 나타냈다.

Fig. 7, 8로부터 단위체적당 평균흡수에너지는 Al 시험편의 경우는 $1.63[\text{KJ}/\text{m}^3]$ 배향각이 15° , 45° 인 CFRP 시험편의 경우는 각각 $1.716[\text{KJ}/\text{m}^3]$, $0.21[\text{KJ}/\text{m}^3]$ 로서 15° 인 시험편이 Al 시험편보다 약 5.3% 크게 나타났다. 단위질량당 평균흡수에너지는 Al 시험편의 경우는 $59[\text{KJ}/\text{kg}]$, 배향각이 15° , 45° 인 CFRP 시험편의 경우는 각각 $110.4[\text{kJ}/\text{kg}]$, $10[\text{kJ}/\text{kg}]$ 로서 배향각이 15° 인 CFRP 시험편이 45° 인 CFRP

시험편 보다 10배이상 컷고 Al 시험편 보다도 87% 정도 컷다.

이상으로부터 알 수 있는 바와같이 배향각이 15° 인 CFRP 시험편이 45° 인 CFRP 시험편보다 단위체적당 및 단위질량당 에너지 흡수량이 훨씬 크며 Al 시험편 보다도 큰 에너지를 흡수한다. 특히, 단위질량당의 흡수에너지량은 배향각이 15° 인 CFRP 시험편이 Al 시험편 보다도 훨씬 큼을 알 수 있다.

Fig.9, 10은 충격 붕괴실험으로부터 얻은 단위 체적당의 에너지 흡수량 및 단위 질량당의 에너지 흡수량을 Al, CFRP 시험편을 비교하여 나타냈다.

Fig.9, 10으로부터 단위체적당 평균흡수에너지는 Al 시험편의 경우는 $1.33[\text{KJ}/\text{m}^3]$, 배향각이 15° , 45° 인 CFRP 시험편의 경우는 각각 $1.50[\text{KJ}/\text{m}^3]$, $0.94[\text{KJ}/\text{m}^3]$ 로서 15° 인 시험편이 크게 나타났다. 단위질량당 평균흡수에너지는 Al 시험편의 경우는 $51.04[\text{KJ}]$, 배향각이 15° , 45° 인 CFRP 시험편의 경우는 각각 $96.1[\text{kJ}/\text{kg}]$, $61[\text{kJ}/\text{kg}]$ 로서 15° 인 시험편이 45° 인 CFRP 시험편보다 컷다.

Fig.9로부터 배향각이 15° 인 CFRP제 시험편에서 순차적인 붕괴에 의해서 붕괴될 경우에는 Al제 시험편의 에너지 흡수특성을 상회함을 알 수 있다. 그러나 배향각이 45° 인 CFRP 시험편에서는 Al 시험편 보다도 41.5% 정도, 배향각이

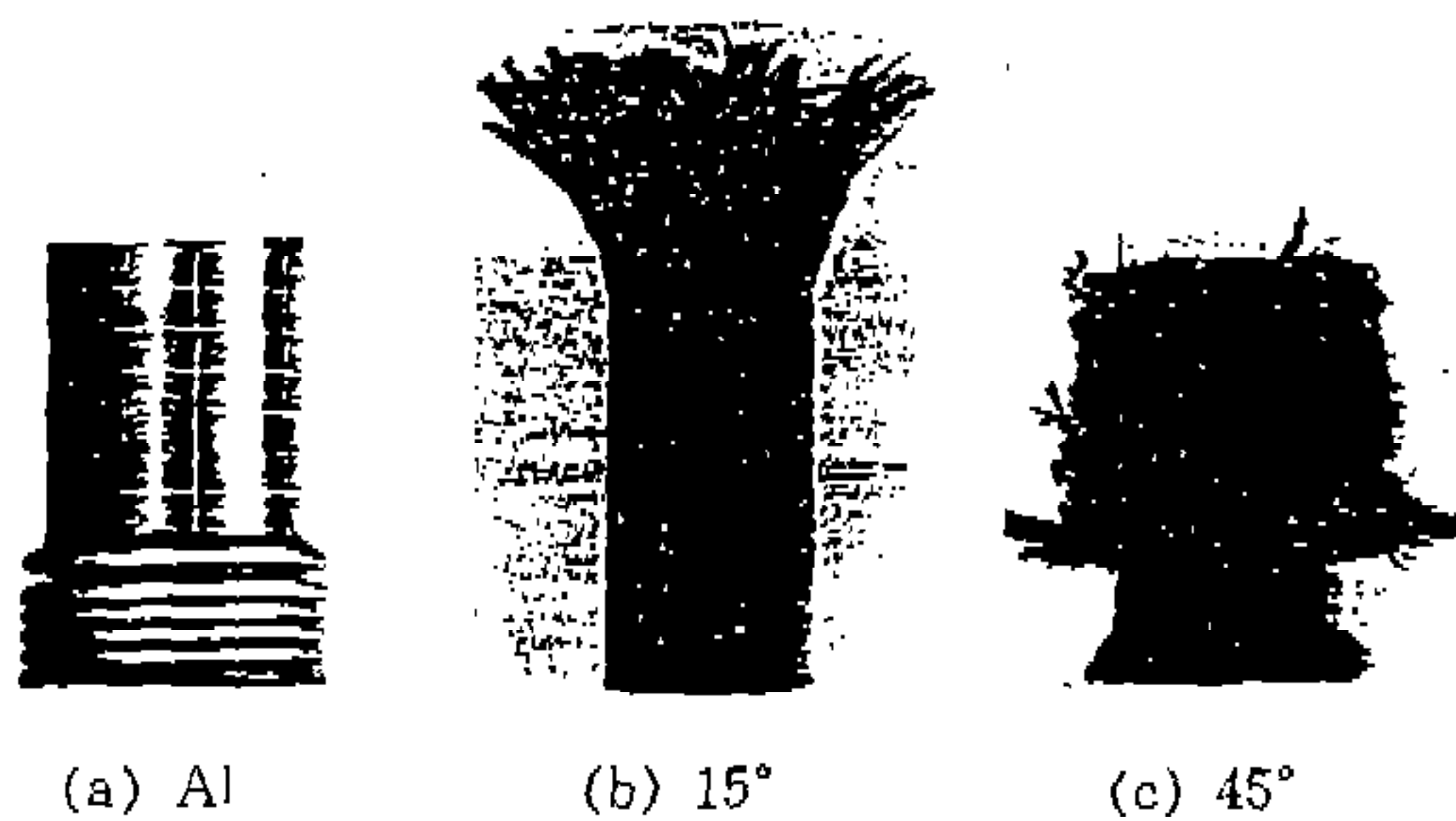


Fig.6 Collapse shapes of specimen by impact collapse test

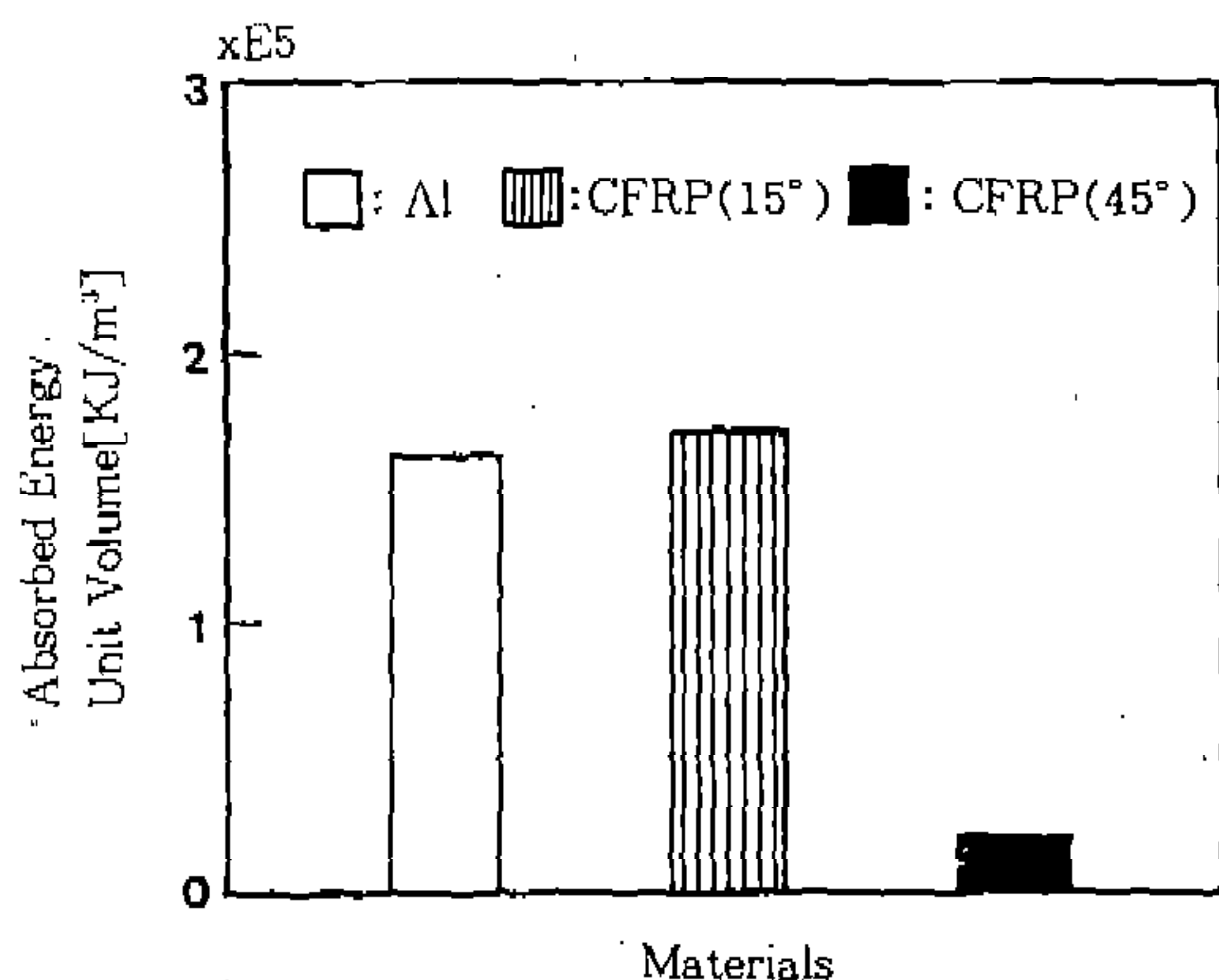


Fig.7 Absorbed energy per unit volume by static collapse test

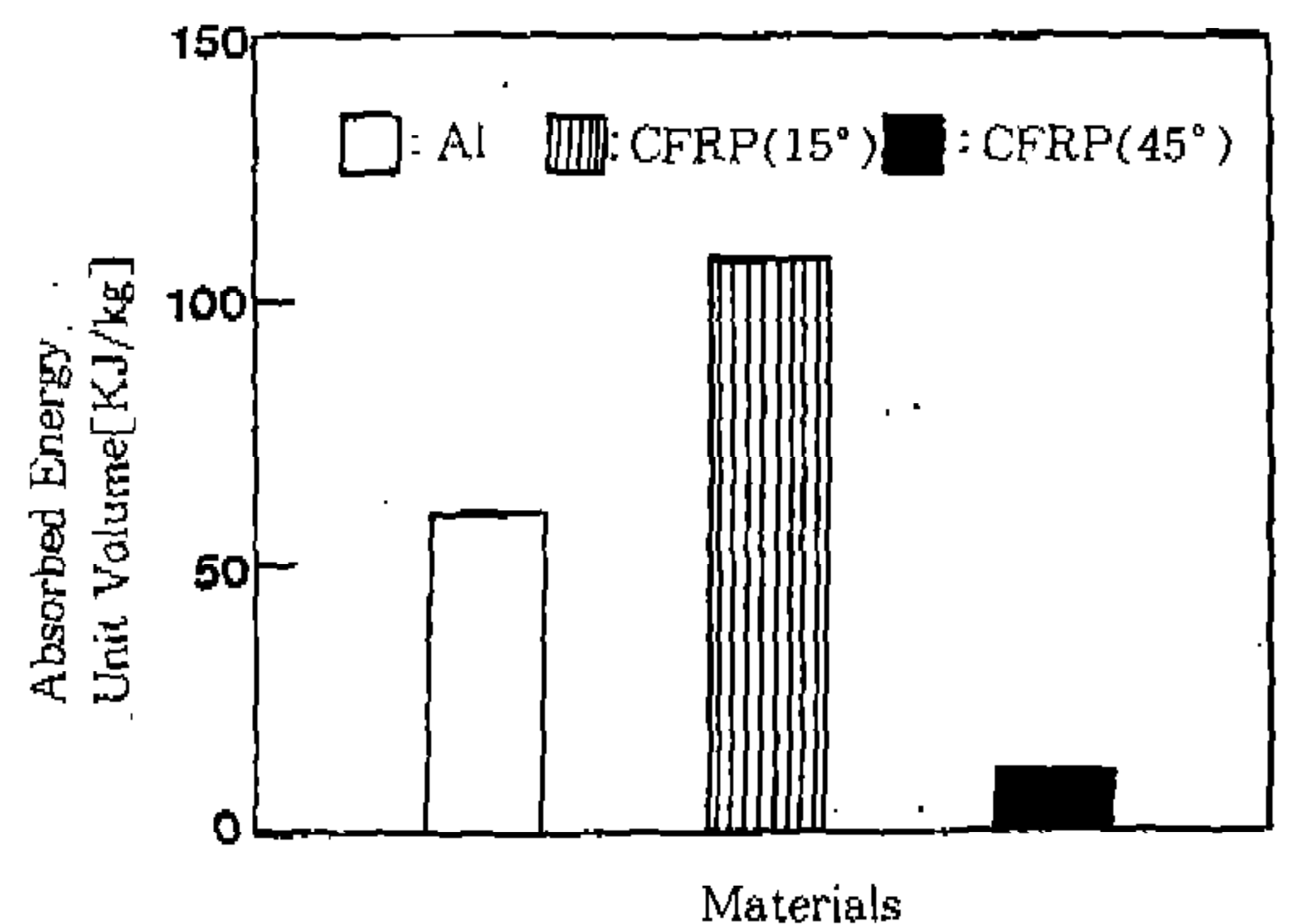


Fig.8 Absorbed energy per unit mass by static collapse test

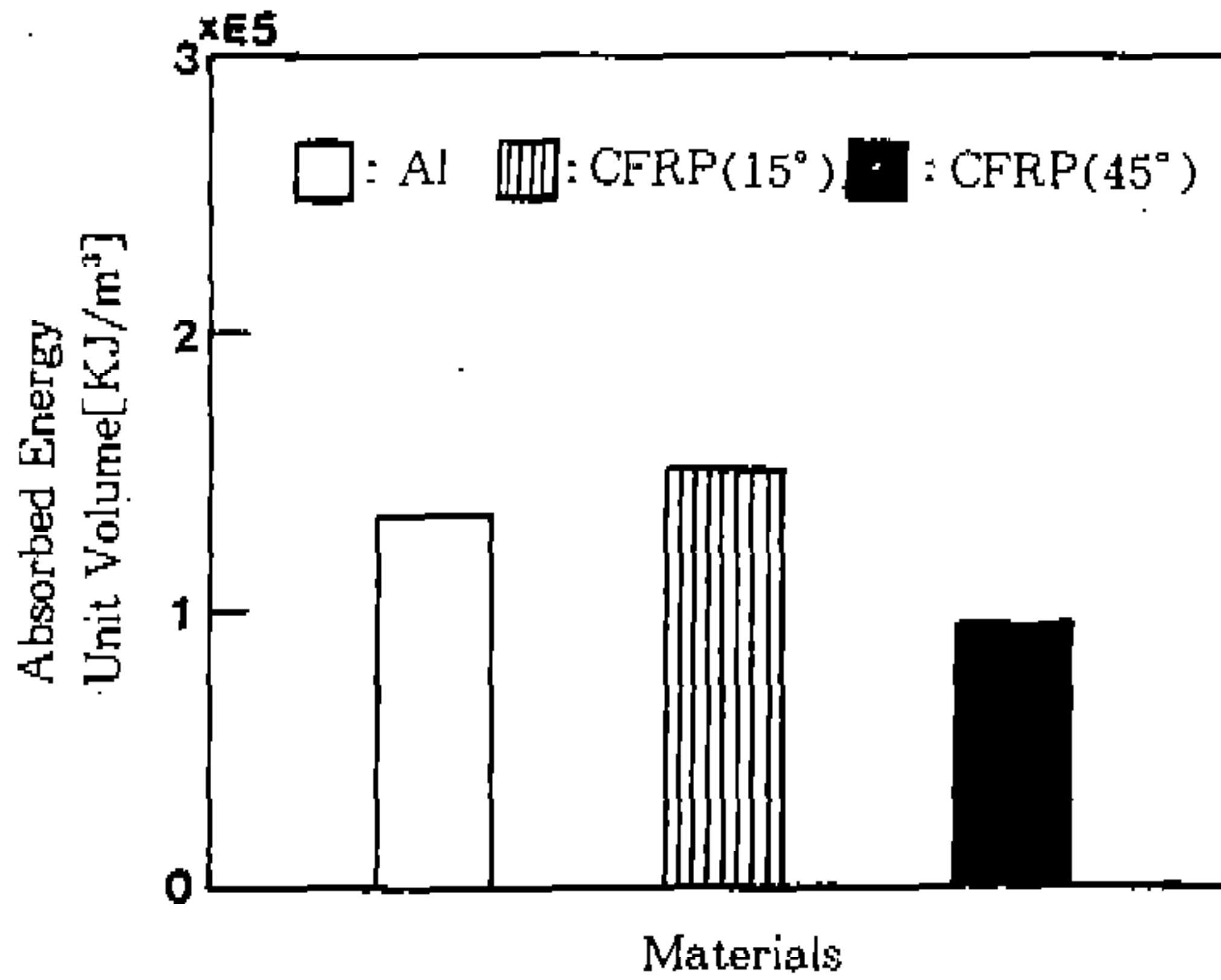


Fig.9 Absorbed energy per unit volume by impact collapse test

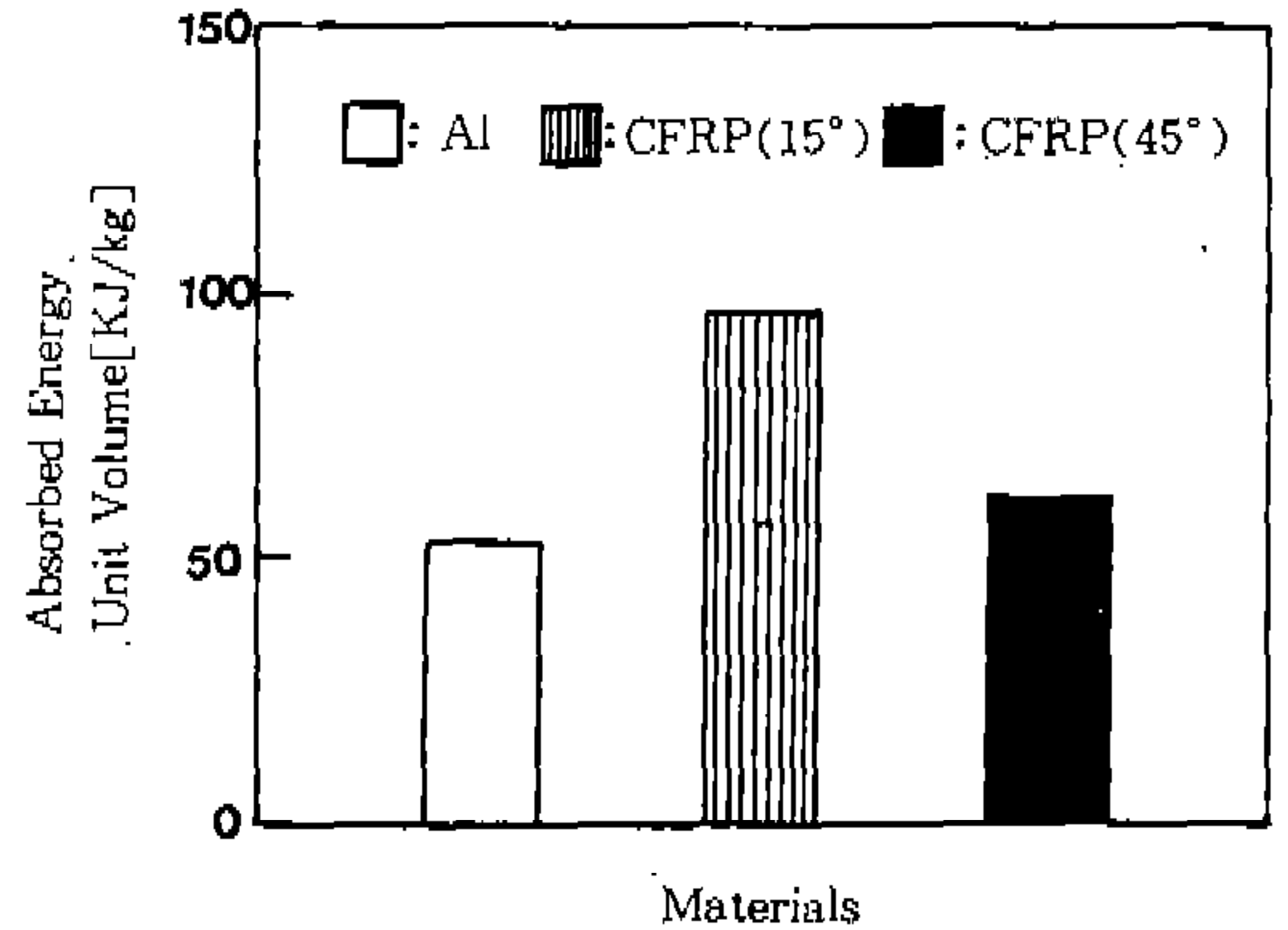


Fig.10 Absorbed energy per unit mass by impact collapse test

Table 3 Results of static and impact collapse test

	Absorbed energy[KJ]			Absorbed energy Unit volum[KJ/m³]			Absorbed energy Unit mass[KJ/kg]		
	Al	CFRP (15°)	CFRP (45°)	Al	CFRP (15°)	CFRP (45°)	Al	CFRP (15°)	CFRP (45°)
static collapse test	1.148	1.181	0.12	1.63	1.716	0.21	59	110.4	10
Impact collapse test	0.694	0.56	0.494	1.33	1.50	0.94	51.04	96.1	61

15°인 CFRP 시험편에 비해서는 59.6% 정도 단위체적당의 흡수에너지는 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 단위질량당 흡수에너지는 배향각이 15°인 CFRP 시험편이 Al 시험편 보다도 88%, 배향각이 45°인 CFRP 시험편 보다는 57.5% 정도 상회함을 알 수 있다. 따라서 종래 부터 구조부재에 적용되어 왔던 경량재로서 FRP와 쌍벽을 이루는 Al과 비교해도 CFRP 적층재가 에너지 흡수특성이 우수하여 경량화를 필요로 하는 구조부재로서 CFRP가 유효함을 알 수 있다.

5. 결 론

구조경량화를 필요로하는 박육구조부재의 에

너지 흡수특성을 고찰하기 위하여 Al 박육원통 및 CFRP 박육원통을 정적 및 충격붕괴 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적 및 충격붕괴시험결과 적층 배향이 15°인 CFRP 적층재가 Al 및 적층배향이 45°인 CFRP 적층재 보다는 안정적인 에너지 흡수 특성을 나타냈다.
2. 충격붕괴길이는 Al 시험편, 배향각이 15°인 CFRP 시험편에서는 비슷하였으나 배향각이 큰 CFRP 시험편 일수록 더 컸다.
3. 배향각이 15°인 CFRP 적층시험편이 배향각이 45°인 CFRP 적층시험편 및 Al 시험편 보다는 단위체적당 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지가 훨씬 컸으며 특히, 단위질량당 흡수에너지 특성이 우수하였다.

4. 본 충격붕괴 실험의 범위에서는 정적 붕괴시험시의 에너지 흡수능력 보다도 약 15% 정도 감소하였다.

후 기

이 논문은 1994년 산학협동재단 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. P. H. Thornton and R. A. Jeryan, 1988, "Crash Energy Management in Composite Automotive Structures", Int. J. Impact Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 167~180
2. 강수춘, 전완주, 1991, "섬유강화복합재료 Box Tube의 Crush거동", 한국자동차공학회지, Vol.13, No. 5, pp. 65~72
3. W. Abramowicz, 1981, "Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams", Engineering Transactions Vol. 29, No.1, pp. 5~26
4. W. Abramowicz, T. Wierzbicki, 1983, "On the crushing mechanics of thin-walled structures" J. Appl. Mech. Vol. 50, pp. 727~734
5. T. Wierzbicki, 1986, "Crushing analysis of metal honeycombs" Int. J. Impact Engineering Vol. 1, No. 2, pp 157~174
6. Johnes, N, 1989, "structural impact", Cambridge university press
7. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, 1986, "On the inextensional axial collapse of thin PVC conical shells" Int. J. Mech. Sci. Vol. 28, No. 5, pp. 323~335