

Graphite/Epoxy로 만든 두꺼운 관의 저속 충격손상에 관한 연구

김형원* · 윤영주* · 나성엽*

Low-velocity Impact Damage of a Thick Graphite/Epoxy Case

Hyung-Won Kim* · Young-Ju Yun* · Sung-Youp Na*

ABSTRACT

Pressure vessels by composite materials were damaged sometimes during manufacturing or assembling. The state and the size of damage by low-velocity tests were investigated in this paper. Impactors of various masses and various tup shapes were dropped freely in the range of 120mm height to 700mm height. Compared with hemispherical tup of 12.7mm diameter, for hemispherical tup of 25.4mm diameter the size of surface dent was smaller but the size of delamination was bigger.

초 록

복합재로 만들어진 압력용기에 대해 작업 중 발생하는 손상의 크기나 상태를 파악하는 것이 본 연구의 관심이다. 충격자는 직경이 25.4mm와 12.7mm인 반구형 2종류와 모서리의 직경이 15mm인 원추형 1종류로 각각 무게가 다르며 떨어뜨리는 자유낙하 높이는 120mm에서 700mm로 종류에 따라 간격을 달리했다. 실험 장치로는 Dynatup 8250을 사용했으며 충격에너지, 최대충격력, 충격변위, contact radius를 측정하고 시험 후 시편은 방사선 촬영을 하여 충격자의 종류에 따라 손상의 정도가 어떻게 다른지를 파악했다. 직경이 25.4mm인 반구형의 충격자는 직경이 12.7mm인 반구형의 충격자에 비하여 표면의 손상은 적었으나 내부에 delamination크기가 컸다. Contact radius와 최대충격력과의 관계는 실험치와 이론치가 잘 일치했으나 충격에너지와 최대충격력과의 관계는 실험치와 이론치의 차이가 있었다.

1. 서 론

복합재로 만들어진 압력용기나 항공기 구조물은 제작 공정 중 작업자가 망치나 스페너 같은 공구를 떨어뜨리거나 이동 중 다른 물체에 부딪쳐 손상을 입게 되는 데 이러한 경우 복합적층 구조물은 금속 제품의 경우와 달리 수리가 용이하지 않아 손상된 상태로 계속 사용해야 할지

폐기 처분해야 할지를 판단해야 하는 사태가 발생하게 된다. 작업자가 공구를 떨어뜨릴 때 공구의 형상에 따라 충격 물체의 표면과 내면의 손상 정도가 달라진다. 즉 표면의 손상이 적더라도 내면에는 delamination과 같은 큰 손상을 입을 수 있다. 저속충격 손상에 관하여 많은 논문이 있는데 이러한 것들의 내용은 fracture toughness가 높은 수지를 개발하여 충격에 대한

* 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

손상을 최소화하는 것이 있고 저속 충격을 받은 구조물의 파괴모드와 손상거동에 대하여 조사하여 구조물에 얼마나 손상을 입었는지를 파악하는 것이 있는데 본 논문은 후자에 관한 것이다. 두께가 얇은 압력용기가 저속 충격 손상을 입었을 때 구조 강도가 상당히 저하된다는 것은 많은 논문에서 보여졌다.¹⁾ 그러나 두께가 두꺼운 압력용기가 저속 충격 손상을 입었을 때 압력용기가 얼마나 손상을 입었는지에 관한 연구 논문은 많지 않다. 압력용기 자체를 시편으로 사용하기에는 압력용기의 수량이 많지 않고 값이 너무 비싸므로 한 개의 압력용기를 잘라서 시편을 사용했다. 본 논문에 사용된 시편은 압력용기의 실린더 중앙 부위를 절단하여 가로 세로의 길이가 100mm×100mm이며 두께가 약 10mm이다. 실린더의 끝단 부위는 리벳으로 조립이 되므로 중앙 부위에 비하여 두꺼우므로 시편의 균일한 두께를 유지하기 위하여 가능한 한 실린더 중앙 부위를 택했다. 충격자는 모두 3종류로 2종류는 indenter의 모양이 실린더 형태이고 끝 부분의 직경이 25.4mm 와 12.7mm인 반구형이고 다른 한 종류는 indenter의 모양이 원추형으로 끝 부분의 직경이 15mm이다. 25.4mm 반구형 충격자의 무게는 3.9kg이고 12.7mm 반구형 충격자의 무게는 3.8kg이며 15mm 원추형 충격자의 무게는 4.5kg으로 각각 떨어뜨리는 자유낙하 높이는 120mm에서 700mm로 종류에 따라 범위와 간격을 달리했다. 실험 장치로는 Dynatup 8250을 사용했으며 contact radius를 측정하기 위하여 시편 위에 종이와 먹지를 대서 충격자가 시편을 칠 때 종이에 충격된 형태가 남도록 했다. Dynatup 8250 충격시험기로 속도, 충격에너지, 최대충격하중, 충격변위, 충격시간을 측정했다. 시험 후 시편은 방사선 촬영과 초음파 검사를 상호 보완적으로 하여 시편의 표면 뿐 만이 아니라 내부의 손상된 상태를 면밀히 조사했으며 충격자의 종류에 따라 손상의 정도가 어떻게 다른지도 파악했다. Hertzian 이론을 사용하여 contact radius와 충격변위를 구하여 측정된 자료와 비교 검토하였다. 직경이 25.4mm인 반구형의 충격자는 직경이 12.7mm인 반구형의 충격자에 비하여 표면의 손상은 적었으나 복합재 용기의 내부에 delamination이 생긴 범위가 상대적으로 넓었다. Contact radius와 최대충격력과의 관계는 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치했으나 충격에너지와 최대충격력과의 관계는 실험

치와 이론치의 차이가 있었다. 본 연구는 전체 압력용기를 시편으로 사용하지 않았으나 압력용기의 저속충격에 대한 손상 정도를 파악하는데 방향을 제시했으며 추후에 압력용기에 직접 저속충격시험을 실시하여 손상정도를 파악하는 것이 향후 과제이다.

2. 이 론

2.1 Nonisotropic materials인 두 물체 사이의 충격 곡률반경이 R_{1m} 과 R_{1M} 을 가진 impactor가 곡률반경이 R_{2m} 과 R_{2M} 을 가진 물체에 P 인 힘으로 충격을 가할 때 contact area는 다음과 같은 장, 단축을 가진 타원형이다. [Wittemore와 Petrenko (1921)]

$$a = m \left[\frac{3\pi}{2} P (k_1' + k_2') C_R \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$b = n \left[\frac{3\pi}{2} P (k_1' + k_2') C_R \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

여기에서 C_R 은 다음과 같이 곡률 효과를 고려한 항이다.

$$C_R^{-1} = \frac{1}{R_{1m}} + \frac{1}{R_{2m}} + \frac{1}{R_{1M}} + \frac{1}{R_{2M}} \quad (3)$$

충격시 접촉면에서 충격력(P)과 변형변위(α)와의 관계는 충격시간이 충돌하는 물체들의 진동주기와 비교하여 매우 긴 경우 진동문제는 고려하지 않아도 되므로(Rayleigh 1906) 정적상태에서 고려된 Hertz의 법칙을 충돌시에도 다음과 같이 이용할 수 있다.

$$P = n' \alpha^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

여기에서 n' 는 다음과 같이 정의된다.

$$n' = \left(\frac{16}{3\pi(k_1' + k_2')} \right) \left(\frac{C_R}{s^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

2.2 Isotropic Indentor와 Nonisotropic 물체와의 충격
2.2.1 Contact radius

R_1 의 곡률반경을 가지고 있는 isotropic indenter와 평평한 transversely isotropic 물체와

의 충격 시 $R_{1m}=R_{1M}=R_1$ 이고 본 시편은 $R_2/R_1 > 20$ 이므로 $R_{2m}=R_{2M}=\infty$ 로 가정할 수 있으며 Whittemore and Petrenko (1921)의 자료에 의하면 $m=1.0$, $r=1.0$ 이고 $s=2.0$ 이다. Contact radius는 식 (1)로부터³⁾

$$\begin{aligned} a &= \left[\frac{3\pi}{2} P [k_1' + k_2'] C_R \right]^{1/3} \\ &= \left[P \frac{3\pi}{2} [k_1' + k_2'] \frac{R_1}{2} \right]^{1/3} \\ &= \left[PR_1 \left[\frac{3\pi}{4} [k_1' + k_2'] \right] \right]^{1/3} \\ &= \left[\frac{PR_1}{n_0} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서,

$$n_0 = \frac{4}{3\pi [k_1 + k_2]} \quad (7)$$

이고 impactor는 isotropic material 이므로

$$k_1' = \frac{(1 - \nu_1^2)}{\pi E_1} \quad (8)$$

이며 충격되는 물체는 transversely isotropic material 이므로 k_2' 는 Conway (1956)의 결과에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_2' = \frac{\sqrt{A_{22}} \left[(\sqrt{A_{11}A_{22} + G_{zr}})^2 - (A_{12} + G_{zr})^2 \right]^{1/2}}{2\pi \sqrt{G_{zr}(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)}} \quad (9)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} A_{11} &= E_z(1 - \nu_r)\beta \\ A_{22} &= \frac{E_r\beta(1 - \nu_{zr}^2\delta)}{1 + \nu_r} \\ A_{12} &= E_r\nu_{zr}\beta \\ \beta &= \frac{1}{1 - \nu_r - 2\nu_{zr}^2\delta} \\ \delta &= \frac{E_r}{E_z} \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 변형 변위(local displacement, or indentation)

충돌시 impactor에 의해 충격되는 물체의 패진 부분의 변형 변위는 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$\alpha = \left(\frac{P}{n'} \right)^{2/3} \quad (11)$$

여기에서 n' 는 식 (5)에서 $s=2.0$ 이고 C_R 은 $R_1/2$ 이므로

$$\begin{aligned} n' &= \left(\frac{16}{3\pi(k_1 + k_2)} \right) \left(\frac{R_1}{2} \frac{1}{2^3} \right)^{1/2} \\ &= \frac{4}{3\pi(k_1 + k_2)} \sqrt{R_1} \\ &= n_0 \sqrt{R_1} \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 n_0 는 impactor나 충격물체의 기계적 성질에 따라 결정되는 상수이다.

식 (11)을 정리하면 impactor에 의해 충격되는 물체의 패진 부분의 변형 변위는 충격력(P)과 indenter의 직경(R_1)의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = R_1^{-1/3} \left(\frac{P}{n_0} \right)^{2/3} \quad (13)$$

2.2.3 충격력과 충격에너지와의 관계

충격에너지가 에너지의 손실이 없이 모두 물체를 변형시키는데 소모되었다면 충격에너지와 최대 충격력과의 관계는 다음과 같다.

$$ImpactE = \int_0^a P da \quad (14)$$

식(13)을 이용하여 정리하면 다음과 같은 최대 충격력과 충격에너지와의 관계를 얻을 수 있다.

$$P_{max} = \left[\left(\frac{5}{2} ImpactE \right)^3 R_1 n_0^2 \right]^{1/5} \quad (15)$$

위의 충격력에 관한 식을 식(13)에 대입하면 다음과 같은 충격에너지와 변형 변위와의 관계를 얻을 수 있다.

$$\alpha = \left[R_1^{-1} n_0^{-2} \left(\frac{5}{2} ImpactE \right)^2 \right]^{1/5} \quad (16)$$

3. 실험

3.1 재료

본 시험에 사용된 복합적충판 시편의 크기는

가로, 세로높이가 100mm×100mm×10mm이고 재료는 Graphite T800/Epoxy이며 Lamination 이론에 의해 구한 기계적 성질은 Table 1에 나타나있다.

3.2 실험 장치 및 방법

3.2.1 충격시험

본 저속 충격시험에 사용된 충격시험기는 Dynatup 8250을 사용했으며 Fig. 1에서는 이 시험장치의 구성도를 간단히 설명해 주고 있다. 충격자는 솔레노이드에 의해 고정되어 정해진 높이에 위치해 있다가 스위치를 누르면 솔레노이드가 충격자를 놓아 자유낙하 하여 photointerrupt를 지나는 동안 속도가 측정되며 충격자 밑에 장착된 transducer가 시편을 충격하는 순간 amplifier를 통해 신호가 증폭되고 oscilloscope로 신호를 측정하여 interface software로 신호를 분석하여 PC를 통해 데이터를 저장하고 모니터에 충격속도, 충격에너지, 최대충격력, 충격시간, 변형변위 등을 보여준다. 시편 위에는 종이와 먹지를 놓아 충격자가 시편에 충격을 가할 때 시편이 변형되는 형태를 종이에 나타나게 했다.

Table 1. Elastic constants of the sample

기계적 성질	값
Ex(GPa)	74.
Ey(GPa)	56.
Ez(GPa)	10.
Gxy(GPa)	18.
Gzx(GPa)	5.
vxy(GPa)	0.26
vxz(GPa)	0.31
vyz(GPa)	0.34



Fig. 1 Schematic diagram of Dynatup 8250 impact test system.

본 실험에 사용한 충격자는 모두 3종류로 2종류는 indenter의 모양이 실린더 형태이고 끝부분의 직경이 25.4mm와 12.7mm인 반구형의 형태로 되어 있고 다른 한 종류는 indenter의 모양이 원추형으로 끝부분의 직경이 15mm이다. 충격자는 몸체부분과 indenter로 구성되어 있는데 몸체 부분은 100mm×80mm×10mm 형태의 금속으로써 중앙 밑 부분에 탭을 내어서 나사를 낸 indenter를 조립하였다. 25.4mm 반구형 충격자의 무게는 3.9kg이고 12.7mm 반구형 충격자의 무게는 3.8kg이며 15mm 원추형 충격자의 무게는 4.5kg이다. 각각 떨어뜨리는 자유낙하 높이의 범위는 25.4mm 반구형 충격자가 150mm에서 700mm이며 12.7mm 반구형 충격자가 165mm에서 700mm이며 15mm 원추형 충격자가 100mm에서 550mm로 종류에 따라 범위와 간격을 달리했다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Contact diameter

R1의 곡률반경을 가지고 있는 isotropic indenter와 평평한 transversely isotropic 물체의 충격시, contact radius는 식 (6)에서 보는 바와 같이 충격력과 indenter의 반경의 1/3승

에 비례하여 증가하며 또한 재료의 기계적 성질에 따라 변한다. Fig. 2는 직경 25.4mm 반구형 indenter의 충격력에 대한 contact radius에 관한 것으로 실선은 식 (7)을 사용하여 얻은 n_0 의 값 1.8GPa을 식 (6)에 대입하여 구한 선이고 은선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터를 식 (6)을 사용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 충격량이 7.7kN까지는 충격자가 시편에 충격을 가해도 표면 손상이 나타나지 않았으며 표면 손상이 나타나기 시작한 7.7kN 이후부터는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 contact radius가 이론치 보다 더 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 충격에너지에 따르는 충격력을 나타내며 실선은 기계적 성질의 값을 식 (15)에 대입하여 얻은 선이고 은선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터를 식 (15)를 사용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험치가 이론치보다 낮은 값을 갖는 이유는 충격에너지가 시편에 충격을 주는 동안 에너지가 다른 곳으로 소모되는 것을 알 수 있고 충격에너지가 증가하면서 충격력은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 충격에너지에 따르는 변형 변위를 나타낸 것으로 실선은 기계적 성질의 값을 식 (16)에 대입하여 얻은 선이고 은선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터로 식 (16)를 이용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 그림에서 보는 바와 같이 기계적 성질의 값으로부터 얻은 값과 실험치와 차이가 나타나는 것은 충격에너지가 일부는 곡률이 진 시편의 bending strain energy로 쓰이거나 또는 다른 곳으로 소모된 것을 알 수 있다.

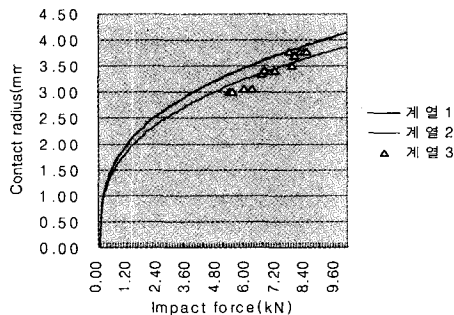


Fig. 2 Contact radius vs impact force for 25.4mm dia. hemisphere.

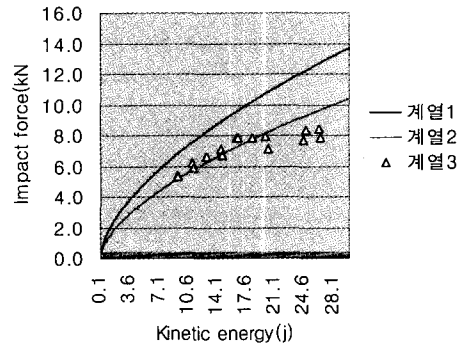


Fig. 3 Impact force vs Impact energy for 25.4mm dia. hemisphere.

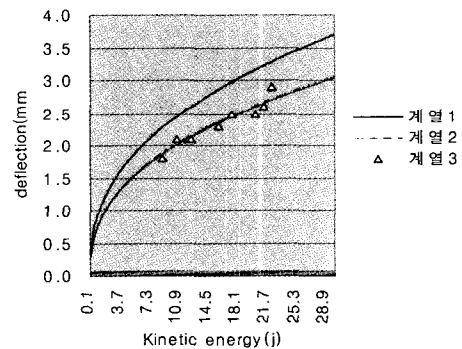


Fig. 4 Deflection vs Impact energy for 25.4mm dia. hemisphere.

Fig. 5는 직경 12.7mm의 반구형 indenter에 관한 것으로 실선은 기계적 성질을 이용하여 구한 최대충격력에 따르는 contact radius의 선이고 은선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터를 식 (6)을 사용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 실험 데이터가 산발적인 것을 알 수 있는데 직경 25.4mm의 반구형 indenter보다 모서리가 날카로워서 측정하는데 오차가 크고 시편을 고정하는 조건에 상당히 민감한 것으로 생각된다. 표면 손상은 충격력이 6.0kN에서부터 나타나기 시작했으며 6.0kN 이후부터는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 contact radius 측정치가 이론치 보다 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 충격에너지에 대한

충격력에 관한 것으로써 보는 바와 같이 충격에너지가 증가하면서 실험치가 이론치 보다 낮은 값을 갖는 이유는 충격에너지가 증가할수록 시편에 충격을 주는 동안 에너지가 다른 곳으로 더 소모되는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 충격에너지에 따르는 충격변위를 나타낸 것으로 실선은 기계적 성질의 값을 식 (16)에 대입하여 얻은 선이고 은선은 세모모양의 실험에서 얻은 데이터로 식 (16)을 이용하여 no의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다.

그림에서 보는 바와 같이 기계적 성질의 값으로부터 얻은 값과 실험치와 차이가 나타나는 것을 알 수 있고 충격에너지가 증가하면서 변형 변위는 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 직경 15.0mm원추형 indenter의 충격력에 대한 contact radius에 관한 것으로 실험 데이터가 산발적이거나 직경 12.7mm 반구형 indenter보다는 덜 한 것을 알 수 있는데 직경 25.4mm의 반구형 indenter보다 모서리가 날카로워서 측정하는데 오차가 크고 시편 고정 조건에 더 민감한 것으로 생각된다.

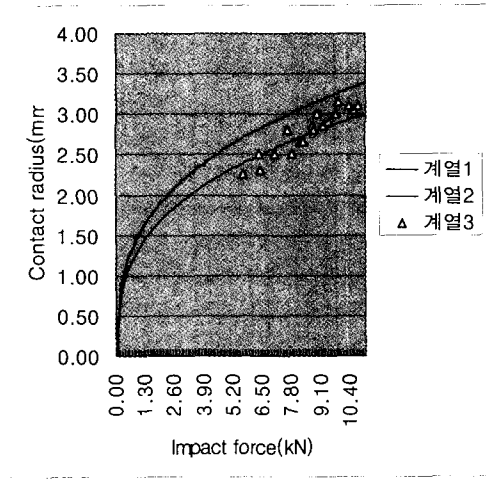


Fig. 5 Contact radius vs impact force for 12.7mm dia. hemisphere.

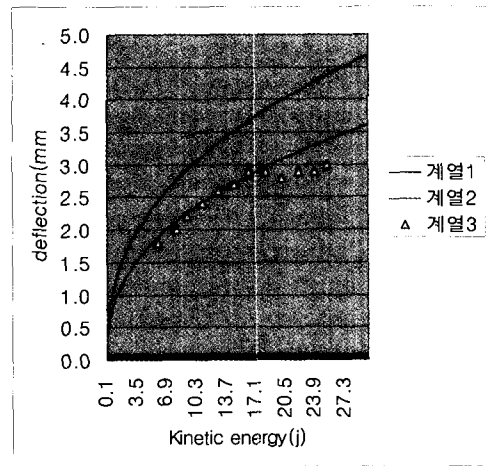


Fig. 7 Deflection vs Impact energy for 12.7mm dia. hemisphere.

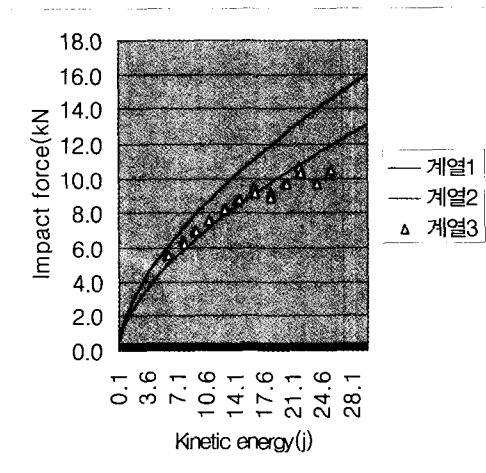


Fig. 6 Impact force vs Impact energy for 12.7mm dia. hemisphere.

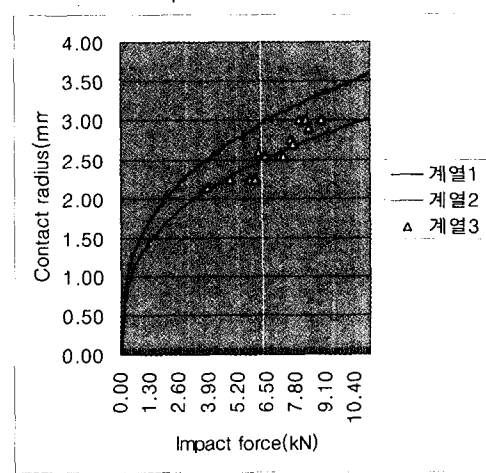


Fig. 8 Contact radius vs impact force for 15.0mm dia. cone.

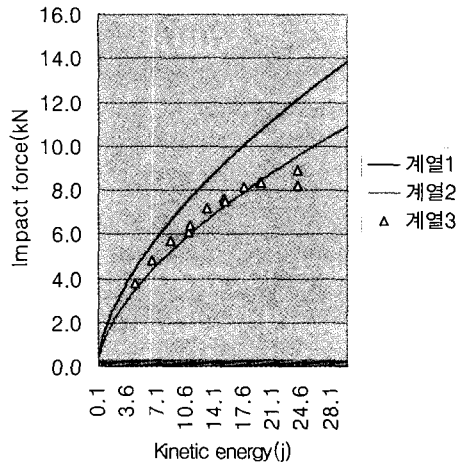


Fig. 9 Impact force vs Impact energy for 15.0mm dia. cone.

표면 손상은 충격력이 6.5kN에서부터 나타나기 시작했으며 6.5kN 이후 부터는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 contact radius 측정치가 이론치보다 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 충격에너지에 따르는 변형 변위를 나타낸 것으로 실험치와 이론치가 대체적으로 잘 맞는 것을 알 수 있다.

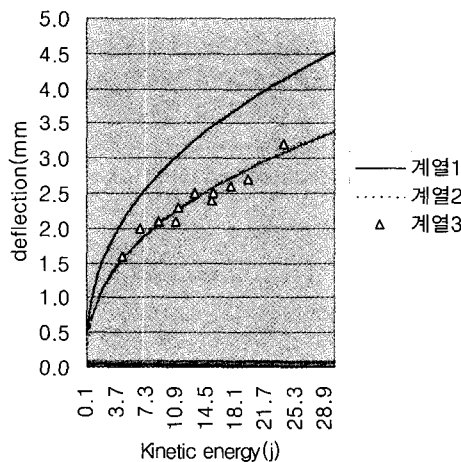


Fig. 10 Deflection vs Impact energy for 15.0mm dia. cone.

4.3 충격자의 형상에 따른 손상 차이 결과

Table 2. Various kinds of damage according to a indenter shape.

충격자 무게 (kg)	충격자 직경 (mm)	충격 높이 (mm)	충격 에너지 (Joule)	결합종류 및 크기 (a : 장경, b : 단경)		
				표면 흠집 (Dent)	Crack & Fiber Fracture	Delamination
3.9	25.4	300	10.8	없음	없음	없음
3.9	25.4	450	15.9	없음	없음	없음
3.9	25.4	600	19.8	깊이 0.1, a4.0×b4.0	없음	깊이 5.5, a53×b50
3.9	25.4	700	21.3	깊이 0.3, a4.5×b4.5	없음	깊이 5.5, a83×b85
3.8	12.7	255	8.6	깊이 0.2, a4.3×b4.3	없음	없음
3.8	12.7	350	11.8	깊이 0.3, a4.5×b4.5	없음	깊이 5.5, a45×b45
3.8	12.7	550	19.2	깊이 0.35, a5.0×b5.0	없음	깊이 5.5, a58×b50
3.8	12.7	650	23.3	깊이 0.4, a5.3×b5.3	깊이 1.0, a15×b10	깊이 5.5, a30×b25
3.8	12.7	700	24.6	깊이 0.5, a5.7×b5.7	깊이 1.0, a20×b12	깊이 5.5, a55×b50
4.5	15.0	100	4.4	없음	없음	없음
4.5	15.0	250	11	깊이 0.2, a4.4×b4.5	없음	깊이 5.5, a42×b40
4.5	15.0	400	15.3	깊이 0.45, a5.5×b5.5	없음	깊이 5.5, a40×b35

시험 후 특이한 시편을 채취하여 방사선 촬영과 초음파 검사를 상호 보완적으로 하여 시편의 표면 뿐만이 아니라 내부의 손상된 상태를 면밀히 조사했으며 충격자의 종류에 따라 손상의 정도가 어떻게 다른지를 파악한 결과가 Table 2에 나타난 바와 같다. 직경이 25.4mm인 반구형의 충격자는 충격에너지가 19.8J에 표면 흠집과 delamination이 나타나기 시작했으며 직경이 12.7mm인 반구형의 충격자는 충격에너지가 8.6J에서 표면 흠집이 나타나기 시작했으며 11.8J에 delamination이 나타나기 시작했다. 직경이 25.4mm인 반구형의 충격자는 직경이 12.7mm인 반구형의 충격자에 비하여 표면의 손상은 적었으나 시편의 내부에 delamination이 생긴 범위가 상대적으로 넓었다.

5. 결 론

1. 직경 25.4mm 반구형 indenter의 경우에 충격

- 에너지가 19.8 Joule에 표면손상과 내부에 delamination이 나타나기 시작하며 이 이후부터 contact radius가 이론치 보다 증가한다.
2. 직경 12.7mm 반구형 indenter의 경우에 충격 에너지가 5.5 Joule에 표면손상이 나타나며 11.8Joule에 delamination이 생기기 시작한다.
 3. 직경 15.0mm 원추형 indenter의 경우에 충격 에너지가 11 Joule에 표면손상과 내부에 delamination이 생기기 시작한다.
 4. indenter가 둔탁할수록 표면손상을 내기에 많은 충격에너지를 요하지만 표면손상 뿐만 아니라 내부에 delamination도 같이 발생하는 경향이 있다.
 5. 충격력은 충격에너지가 증가하면서 이론치 보다 감소하는데 원인은 곡률을 가진 시편이 충돌 되는 동안 충격에너지가 bending strain 에너지나 그 밖의 delamination, debonding, fiber breaking 등 다른 에너지로 소모되기 때문이다.
 6. 충격변위는 시편의 고정상태나 충격자의 형상에 따라 실험 데이터의 편차가 크다.

후 기

본 논문을 위해 도움을 주신 국방과학연구소 최용규 박사님, 원용구 박사님, 김인철 실장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Materials", Appl. Mech. Rev. Vol. 44, No. 4, April 1991, pp.155-190.
2. Adams, D.F. (1977), in Composite Materials: Testing and Design (Fourth Conference) ASTM STP 617, 409.
3. Greszczuk, L. B., "Damage in Composite Materials Due to Low Velocity Impact," Impact Dynamics, Wiley, New York, 1982, pp. 55-94.
4. Poe, C. C. Jr., "Summary of a Study to Determine Low-Velocity Impact Damage and Residual Tension Strength for a Thick Graphite/Epoxy Motor Case," NASA Technical Memorandum 102678, June 1990.
5. Harris, C. E., and Morris, D. H., "Preliminary Record on Tests of Tensile Specimens with a Part-Through Surface Notch for a Filament-Wound Graphite/Epoxy Material," NASA CR-172545, March 1985.
6. Madaras, E. I., Poe, C. C., Jr., Illg, W., and Heyman, J. S., "Estimating Residual Strength in Filament Wound Casings from Non-Destructive Evaluation of Impact Damage," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 6B, Plenum Press, New York, 1987, pp. 1221-1230.
7. Chatterjee, S. N., "Surface Cracks in Thick Laminated Fiber Composite Plates," Surface Crack Growth: Models, Experiments and Structures, edited by W. G. Reuter, J. H. Underwood, and J. C. Newman, Jr., American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1060, Philadelphia, PA, 1990, pp. 177-193.