

복합재로 만든 두꺼운 압력용기의 저속충격에 관한 연구

김형원*

Low-velocity Impact Damage of a Thick Pressure vessel

Hyung-Won Kim*

ABSTRACT

Low-velocity impact damage of a thick pressure vessel by composite materials was studied using the modified Herzian contact radius theory. Impactors of various masses and various tup shapes were dropped freely in the range of 20mm to 200mm height. With acceleration gage and strain gage installed on the impactor, impact force and acceleration and Contact radius were measured. After a test, the samples were radiographed to scan the state of damage. Compared with hemispherical tup of 12.7mm diameter, the contact radius of hemispherical tup of 25.4mm diameter was bigger. And the experimental data and the theoretical data was different due to the mechanical properties difference. The acceleration value was changed linearly according to the height.

초 록

저속 충격을 받은 복합재로 만들어진 두꺼운 압력용기의 파괴모드와 손상 상태에 대하여 조사하여 이를 정량적으로 나타내는 것이 본 연구의 관심이다. 본 논문에 사용된 시편은 압력용기의 중앙을 길이 305mm로 잘른 원통형 ring모양이다. 충격자는 직경이 25.4mm와 12.7mm인 반구형 2종류와 모서리의 직경이 1mm인 원추형 1종류로 무게는 3.9kg이며 자유낙하 높이는 20mm에서 200mm로 종류에 따라 간격을 달리했다. 실험 장치로는 실린더가 충격에 흔들리지 않도록 고정하는 받침대와 자유낙하 하는 impactor이며 impactor의 윗면에 한 개의 가속도 게이지를 설치했으며 밑면에 90도 간격으로 4군에 스트레인 게이지를 붙여 충격에너지, 최대충격력, contact radius를 측정하고 시험 후 시편은 방사선 촬영을 하여 충격자의 종류에 따라 손상의 정도가 어떻게 다른지를 파악했다. Herzian 이론을 사용하여 contact radius를 구하고 측정된 자료와 비교 검토하였다. Contact radius값은 충격자의 직경이 클수록 큰 것을 알 수 있고 실험치 값은 이론치 값 보다 큰데 이는 실제 연소관의 기계적 성질의 값이 계산치 보다 적은 것이 원인이다. 직경이 25.4mm인 반구형의 충격자는 직경이 12.7mm인 반구형의 충격자에 비하여 내부에 delamination크기가 컸다. 가속도의 값은 높이에 따라 선형적으로 변하고 충격자의 모양이 둔탁할수록 가속도 값이 다소 커지는 것을 알 수 있다.

국방과학연구소(Agency for Defence Development)

1. 서론

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 손상을 최소화 하는 것이 있고 저속 충격을 받은 구조물의 파괴모드와 손상거동에 대하여 조사하여 구조물에 얼마나 손상을 입혔는지를 파악하는 것이 있는데 본 논문은 후자에 관한 것이다. 두께가 얇은 압력용기가 저속 충격 손상을 입었을 때 구조 강도가 상당히 저하된다는 것은 많은 논문에서 보여 졌다. 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 압력용기의 실린더 부위를 길이 305mm 잘라 사용했다. 본 논문에 사용된 시편은 길이 305mm인 원통부 ring 시편을 원 둘레를 따라 60mm 마다 축에 평행하게 하얀색으로 줄을 표시하고 충격자를 305x60x10mm 시편 중앙에 떨어뜨렸다. 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 1mm이다. 25.4mm 반구형 충격자의 무게는 3.9kg이고 12.7mm 반구형 충격자의 무게도 3.9kg이며 1mm 원추형 충격자의 무게도 3.9kg으로 각각 떨어뜨리는 자유낙하 높이는 20mm에서 200mm로 종류에 따라 범위와 간격을 달리했다. 실험 장치로는 실린더가 충격에 흔들리지 않도록 밑면을 고정했으며 실린더를 원주 방향으로 60mm 회전할 수 있게 했다. Impacter의 윗면에

한 개의 가속도 게이지를 설치했으며 스트레인 게이지를 90도 간격으로 4군데 붙여 충격력을 측정했다. Contact radius를 측정하기 위하여 시편 위에 종이와 먹지를 대서 충격자가 시편을 칠 때 종이에 충격된 형태가 남도록 했다. 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 radius를 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. 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. 이론

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 P인 힘으로 충격을 가할 때 contact area는 다음과 같은 장, 단축을 가진 타원형이다. [Wittemore와 Petrenko (1921)]

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

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

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)와 의 관계는 충격시간이 충돌하는 물체들의 진동주 기와 비교하여 매우 긴 경우 진동문제는 고려하 지 않아도 되므로(Rayleigh 1906) 정적상태에서 고 려된 Hertz의 법칙을 충돌시에도 다음과 같이 이 용할 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 indentor 와 평평한 transversely isotropic 물체와의 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 $m=1.0$, $r=1.0$ 이 고 $s=2.0$ 이다. Contact radius는 식 (1) 로 부터³⁾

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

여기에서,

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

이고 impactor은 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 의 해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서,

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

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{1 - \nu_r - 2\nu_{zz}^2\delta} \\ \delta &= \frac{E_r}{E_z} \end{aligned}$$

2.2.2 변형 변위(local displacement, or indentation)

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

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

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 변형변위는 충격력(P)과 indenter의 직경(R_1)의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

2.2.3 충격력과 충격에너지와의 관계

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

$$ImpactE = \int_0^{\alpha} P da \quad (14)$$

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

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

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

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

3. 실험

3.1 재료

본 시험에 사용된 복합적충관 시편의 크기는 가로, 세로높이가 305mm×60mm×10mm이고 재료는 Graphite T800/Epoxy이며 Lamination 이론에 의해 구한 기계적 성질은 Table 1에 나타나있다.

3.2 실험 장치 및 방법

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

3.2.1 충격시험

본 저속 충격시험에 사용된 시험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 연소관을 충격시 움직이지 않도록 받침대에 올려놓았다. 시편은 지상연소시험한 연소관을 길이 305mm인 원통부 ring 시편을 만들어 원 둘레를 따라 60mm 마다 축에 평행하게 하얀색으로 줄을 표시하고 충격자를 시편 중앙에 떨어뜨렸다. 시편의 크기는 길이 폭 두께가 305x60x10mm이다. 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 1mm이다. 25.4mm 반구형 충격자의 무게는 3.9kg이고 12.7mm 반구형 충격자의 무게도 3.9kg이며 1mm 원추형 충격자의 무게도 3.9kg으로 각각 떨어뜨리는 자유낙하 높이는 20mm에서 200mm로 종류에 따라 범위와 간격을 달리했다. Impacter의 윗면에 한 개의 가속도 계이

지를 설치했으며 스트레인 게이지를 90도 간격으로 4군데 붙여 충격력을 측정했다. Contact radius를 측정하기 위하여 시편 위에 종이와 먹지를 대서 충격자가 시편을 칠 때 종이에 충격된 형태가 남도록 했다. 시험 후 시편은 방사선 촬영과 초음파 검사를 상호 보완적으로 하여 시편의 표면뿐 만이 아니라 내부의 손상된 상태를 면밀히 조사했으며 충격자의 종류에 따라 손상의 정도가 어떻게 다른지도 파악했다.

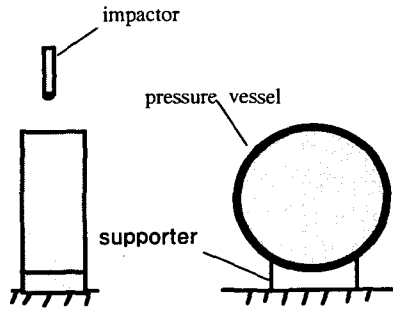


Fig.1 Free falling impact tester

4. 결과 및 고찰

4.1 Contact diameter

R_1 의 곡률반경을 가지고 있는 isotropic indenter와 평평한 transversely isotropic 물체와의 충격시, contact radius는 식 (15)에서 보는 바와 같이 충격력과 indenter의 반경의 1/3승에 비례하여 증가하며 또한 재료의 기계적 성질에 따라 변한다. 그림 (2)는 직경 25.4mm 반구형 indenter의 충격력에 대한 contact radius에 관한 것으로 실선은 식 (16)을 사용하여 얻은 n_0 의 값 15GPa을 식 (15)에 대입하여 구한 선이고 회색선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터를 식 (15)을 사용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 충격량이 6.0kN까지는 충격자가 시편에 충격을 가해도 표면 손상이 나타나지 않았으며 표면 손상이 나타나기 시작한 6.0kN 이후 부터는 그림 (2)에서 보는 바와 같이 contact radius의 실험치가 이론치보다 더 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 이론으

로 계산된 기계적 강도 보다도 실제의 연소관의 강도가 약하여 실제 측정된 contact radius가 크게 나타난 것으로 생각된다. 18kN까지는 n_0 를 변화시킨 예측곡선과 실험 데이터가 잘 일치 하지만 18kN이상에서는 실험데이터가 예측치에서 많이 벗어남을 알 수 있다. 이 이유는 18kN 이상에서 delamination이나 debonding이 일어나거나 충격자가 연소관 ring 시편에 충격을 가할 때 bending이 많이 일어나서 생긴 현상으로 생각된다. 그림 (3)은 직경 12.7mm 반구형 indenter의 충격력에 대한 contact radius에 관한 것으로 실선은 식 (16)을 사용하여 얻은 n_0 의 값 15GPa을 식 (15)에 대입하여 구한 선이고 회색선은 세모 모양의 실험에서 얻은 데이터를 식 (15)을 사용하여 n_0 의 값을 변화시켜 best fitting하여 얻은 선이다. 충격량이 5.0kN까지는 충격자가 시편에 충격을 가해도 표면 손상이 나타나지 않았으며 표면 손상이 나타나기 시작한 5.0kN 이후 부터는 그림 (3)에서 보는 바와 같이 contact radius의 실험치가 이론치보다 더 증가하는 것을 알 수 있다. 이것에 대한 이유는 indenter의 직경이 25.4mm인 경우와 같다. 16kN까지는 n_0 를 변화시킨 예측곡선과 실험 데이터가 잘 일치 하지만 16kN이상에서는 실험데이터가 예측치에서 많이 벗어남을 알 수 있다. 이 이유는 16kN 이상에서 delamination이나 debonding이 일어나거나 충격자가 연소관 ring 시편에 충격을 가할 때 bending이 많이 일어나서 생긴 현상으로 생각된다. 그림 4는 직경이 25.4mm충격자의 높이에 대한 가속도 값을 나타낸 것으로 높이가 높아짐에 따라 가속도 값이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 직경이 12.7mm충격자의 높이에 대한 가속도 값을 나타낸 것으로 높이가 높아짐에 따라 직경이 25.4mm인 충격자와 같이 가속도 값이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 무게가 3.9kg인 충격자가 높이 140cm에서 떨어질 때의 충격에너지는 53.5J이며 이때 가속도는 약 335g 정도이다. 직경이 25.4mm인 충격자에 비하여 작은 값이며 이는 충격자의 끝이 둔탁할수록 가속도의 값이 커지는 것을 알 수 있다.

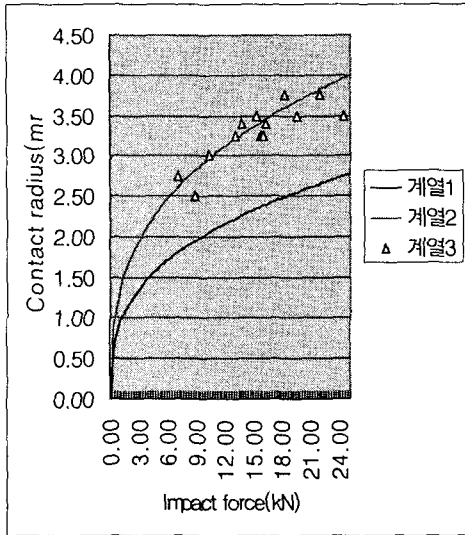


Fig. 2 Contact radius VS impact force for 25.4mm dia. hemisphere.

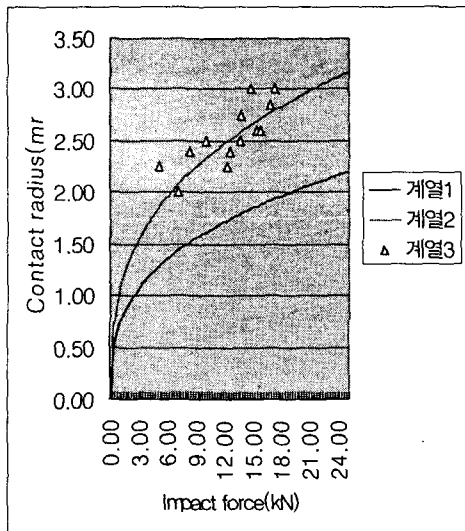


Fig. 3 Contact radius VS impact force for 25.4mm dia. hemisphere.

5. 결론

- Contact radius의 실험치 값은 기계적 성질을 이용하여 구한 이론치 값 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 실제 연소관의 강도값이 이론치보다 적은 것이 원인인 것으로 생각된다.
- 충격자의 모퉁이가 둔탁할수록 contact radius가 큰 것을 알 수 있다.
- 직경 25.4mm인 반구형 충격자에 대하여 충격력이 18kN까지는 이론 예측치와 잘 일치하지만 그 이상에서는 예측치와 많이 벗어나는 것을 알 수 있는데 그 원인은 연소관 시편 내에서 delamination이나 debonding이 일어 나가거나 연소관 ring 시편에 충격을 가할 때 bending이 일어나는 것이 원인인 것으로 추측된다.
- 가속도의 값은 높이가 높을수록 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 충격자의 모퉁이가 둔탁할수록 가속도 값이 다소 커지는 것을 알 수 있다.
- indenter가 둔탁할수록 표면손상을 내기에 많은 충격에너지를 요하지만 표면손상 뿐만 아니라 내부에 delamination도 같이 발생하는 경향이 있다.

후기

본 논문을 위해 도움을 주신 국방과학연구소 최용규 박사님, 원용구 박사님, 류백능 박사님께 감사드립니다.