

# 압흔을 고려한 항공기용 복합재료의 충격 후 잔류강도 평가

## Evaluation of the Residual Strength after Drop Impact Damage in Aircraft Composites Considering Indentation

\*강민성<sup>1</sup>, 최정훈<sup>1</sup>, 박홍선<sup>1</sup>, 구재민<sup>2</sup>, 석형성<sup>2</sup>

\*M. S. Kang<sup>1</sup>, J. H. Choi<sup>1</sup>, H. S. Park<sup>1</sup>, J. M. Koo<sup>2</sup>, #C. S. Seok(seok@skku.edu)<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>성균관대학교 대학원 기계공학부, <sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부

Key words : Residual Strength, Drop Impact Damage, Indentation, Aircraft Composites

### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 금속재료에 비해 비강성(Specific Stiffness, 탄성률/밀도), 비강도(Specific Strength, 인장강도/밀도)가 크기 때문에 금속 재료를 대체할 경우 약 20~50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 섬유강화 복합재료는 차세대 구조용 경량화 재료로서 항공우주 산업 분야로 점차 그 적용이 확대되고 있다.

복합재료는 두께방향의 강화(reinforcement) 부족으로 외부 충격 하중에 매우 취약하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유 때문에 충격 손상에 대한 보다 신뢰성 있고 안전한 설계 방안을 확립하기 위하여 충격 손상 거동 및 이로 인한 잔류강도 저하 양상에 대한 체계적인 연구의 필요성이 증가하고 있다.<sup>[1]</sup>

복합재료 구조물은 충격하중에 의해서, 큰 손상을 받기 때문에, 이에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해서는 충격손상에 의한 잔류강도 및 피로파괴에 대한 평가가 필요하며, 특히, 충격 손상에 따른 복합재료의 잔류강도 특성 평가는 복합재료의 설계와 손상허용성 평가의 관점에서 매우 중요하다. 충격에 의해 손상된 부위가 구조물에 존재하는 원공이나 결함과 동일한 강도저하를 야기한다는 가정 하에 기존의 인공적인 불연속부에 대한 잔류강도 예측모델을 기본으로 충격손상을 가진 복합재료의 잔류강도 특성 평가에 관한 연구가 수행되었다.

Caprino 등<sup>[2]</sup>은 충격 후 잔류강도 예측 모델을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left\{ \frac{E_{th}}{E_i} \right\}^\alpha \quad (1)$$

여기에서  $\sigma_0$ 와  $\sigma_R$ 은 각각 인장강도와 잔류강도이며,  $E_i$ 는 입사충격에너지,  $E_{th}$ 는 하한계 충격에너지이고,  $\alpha$ 는 상수인데, 시험편 또는 구조물의 형상, 크기와 경계조건, 충격자의 형상과 크기 등과 같은 구속조건들이 일정하게 유지된다면 하한계 충격 에너지  $E_{th}$ 와 상수  $\alpha$ 는 특성상수(Characteristic property)로 사용될 수 있다고 보고하였다.

외부 물체에 의하여 충격 손상을 받은 재료 또는 구조물의 경우 표면에는 충격 손상으로 인한 압흔이 발생하게 된다. 또한 동일한 충격에너지를 받은 구조물일지라도 충격손상 변수에 따라 잔류강도 특성이 달라진다. 따라서 충격 후 잔류강도를 평가하기 위해서는 충격 손상에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 저속 충격손상을 받은 복합재료의 충격 후 잔류강도 특성을 평가하기 위하여 충격 손상 부위의 영구 압흔을 고려하였다. 이를 통해 잔류 강도 특성을 평가할 수 있는 방법을 검토함으로써 충격손상을 받는 복합재료 구조물의 안전성을 확보하고자 한다.

### 2. 잔류강도 시험

#### 2.1 시험편

본 연구에서는 국내 한국 카본(주)에서 시판되는 직물(Woven) 구조 탄소섬유 프리프레그(Carbon Prepreg)인 WSN-3K(두께 0.27mm)를 사용하여 최종 두께가 3.6mm 되게 하였다. 적층판은 16ply로 Autoclave에서 140℃, 60kg/cm<sup>2</sup>의 온도와 압력에서 60분간 성형한 후, 25mm×250mm 규격의 시험편을 가공하였다. 충격 손상을 주기 위하여 추를 이용한 낙하식 충격시험기<sup>[1]</sup>를 제작하

여 시험편 중앙에 충격 손상을 가하였다. 충격자의 직경은 15.8mm, 25.4mm로서 끝이 둥근 반구 형태를 사용하며, 정확한 위치에 충격이 가해질 수 있도록 충격자 가이드를 사용하였다. 충격속도는 충격자의 낙하 높이로 조절하였으며 충격에너지는 충격자의 질량과 낙하높이로 조절할 수 있는데, 본 연구에서는 충격자의 질량을 고정시키고 낙하 높이를 조절하여 충격에너지를 변화시켰다. 이때 시험편을 평면위에 고정하였다. 한편, 잔류강도 평가를 위해 ASTM D-3039 규정에 따라 Shimadzu 사의 25 ton 용량의 만능시험기를 사용하여 인장 시험을 수행하였다.

#### 2.2 충격 시험

낙하식 충격 시험기를 이용하여 시험편 중앙부에 충격 손상을 가하였다. 이때, 시험편은 평면에 고정하고 충격자의 낙하 높이를 조절하여 충격 에너지의 크기를 변화시켰다. 충격 에너지는 0J~35J 의 구간에서 가하였다.

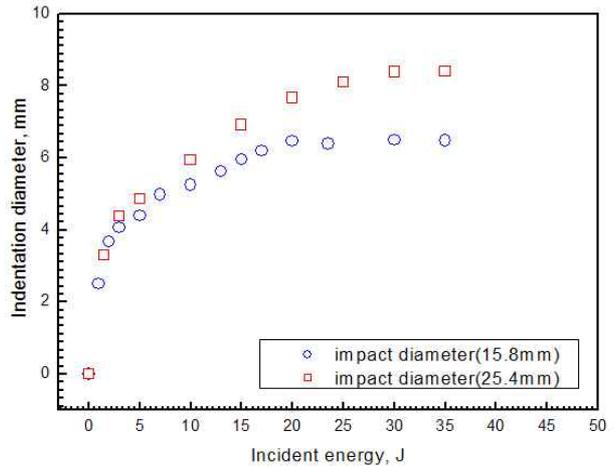


Fig. 1 Indentation diameter after drop impact damage

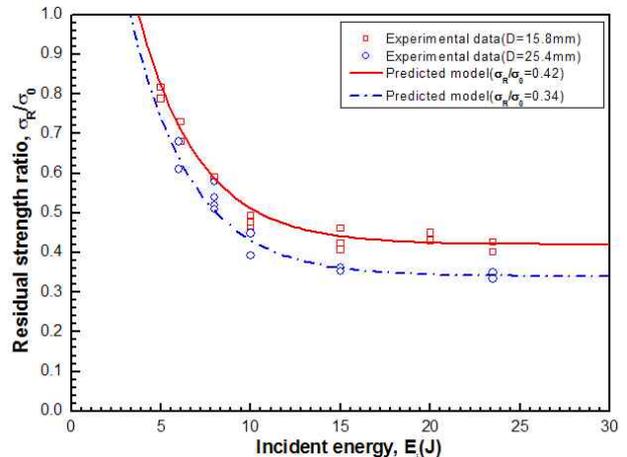


Fig. 2 Residual strength reduction behavior

충격 에너지가 입사된 시험편의 표면에 발생한 영구 압흔의 직경을 측정하여 Fig. 1 에 나타내었다. 충격 에너지와 압흔 직경의 관계를 살펴보면, 일정 수준의 에너지 구간에서 수렴 구간을 갖는 것을 알 수 있다.

2.3 잔류 강도 시험

충격 손상이 가해진 시험편을 대상으로 인장 시험을 수행하여 잔류 강도를 평가하였다. 시험을 통해 얻은 잔류 강도는 충격 손상이 없는 시험편의 인장강도와와의 비( $\sigma_R/\sigma_0$ )로 Fig. 2에 나타내었다. 실선은 식 (1)의 Caprino 모델의 잔류 강도 예측식을 적용한 결과를 나타낸 것이다.

3. 압흔 깊이 평가

충격 손상으로 인해 시험편 표면에 발생한 영구 압흔의 깊이를 평가하기 위하여 아래와 같은 식을 사용하여 이론적인 압입 깊이를 계산하였다.

$$\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2) = \int_{\alpha} P d\alpha \tag{2}$$

여기서  $V_1, V_2$ 는 각각 충격 전 후의 속도,  $P$ 는 접촉력,  $\alpha$ 는 압흔 깊이,  $m$ 은 충격자의 질량이다. 국부변형으로 인한 Hertz의 접촉법칙을 적층복합재의 경우에 적용한 Sun의 수정된 접촉법칙으로부터 접촉력  $P$ , 압흔 깊이  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$P = k\alpha^{\frac{3}{2}}, \quad \alpha = \left[ \frac{5}{4} \frac{v_1 - v_2}{kM} \right]^{\frac{2}{5}} \tag{3}$$

여기서,  $M$ 과  $k$ 는 아래와 같다.

$$M = \frac{1}{m}, \quad k = \frac{4}{3} \times \frac{\sqrt{R_s}}{\frac{1-v_s^2}{E_s} + \frac{1}{E_2}} \tag{4}$$

위 (3)의 식을 이용하여 충격 에너지에 따른 이론적 압흔 깊이를 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 조도 측정기를 사용하여 직경이 15.8mm인 충격자를 이용하여 충격 에너지를 입사시킨 시험편 표면에 발생한 영구 압흔의 깊이를 측정하여 Fig.3 에 함께 나타내었다.

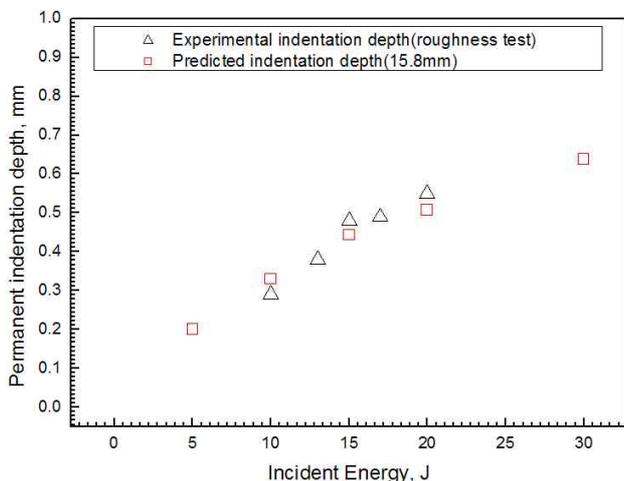


Fig. 3 Permanent indentation depth

4. 결론

충격 손상에 따른 잔류 강도 거동을 평가하기 위하여 복합재료 시험편에 충격 에너지를 입사시킨 다음 인장 시험을 통해 잔류

강도를 평가해 보았고, Caprino 모델의 잔류 강도 예측식을 적용하여 충격 에너지에 따른 잔류 강도를 예측해 보았다. 하지만 동일한 압흔 직경을 가지더라도 충격자의 직경이 다를 수 있고, 입사된 충격 에너지가 다르다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 동일한 압흔 직경이라 하더라도 입사된 충격 에너지의 크기도 다르기 때문에 충격 손상을 받은 재료의 잔류 강도를 평가하는데 있어서 압흔의 깊이를 고려하여 평가를 해야 할 것이다.

후기

이 논문은 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 서울시의 서울장학 생사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

1. Choi J.H., Kang M.S., Shin I.H., Koo J.M., Seok C.S., "Evaluation of Residual Strength in Aircraft Composite Under Impact Damage", KSPE, Vol. 27, No. 2, pp. 94 ~ 101, 2010.
2. Caprino, G., " On the Prediction of Residual Strength for Notched Laminates", Journal of Material Science, Vol. 18, pp. 2269 ~ 2273, 1983
3. Waddoups, M. E., Eisenmann, J. R., and Kaminski, B. E., "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 5, pp. 446 ~ 454, 1971
4. Nuismer, R. J., and Whitney, J. M., "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations", ASTM STP 593, pp. 117 ~ 142, 1975
5. Husman, G. E., Whitney, J. M., and Halpin, J. C. "Residual Strength Characterization of Laminated Composite Subjected to Impact Loading", ASTM STP 568, pp. 92 ~ 113, 1975
6. Kang K.W, Kim J.K, " Impact Damage Behavior and Evaluation of Residual Strength in Plain Woven Glass/Epoxy Composites ", The International Journal Key Engineering Materials, Vol. 183 ~ 187, pp. 271 ~ 276, 2000
7. Kim J.H, Kim M.S, "A study on residual strength evaluation and failure mechanism for high velocity impacted CFRP ", KSME(A), Vol. 18, No. 3, pp. 600 ~ 611, 1994
8. V.P.W. Shim, L.M. Yang, "Characterization of the residual mechanical properties of woven fabric reinforced composites after low-velocity impact ," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 17, pp. 647 ~ 665, 2005
9. Giangiacomo Minak, Daniele Ghelli, "Influence of diameter and boundary conditions on low velocity impact response of CFRP circular laminated plates ", Composite : Part B 39, 962-972, 2008
10. Naik NK, Borade SV, Arya H, Sailendra M, Prabhu SV. Experimental studies on impact behaviour of Woven fabric composites: effect of impact parameters. Journal of Reinforced Plastics and Composites; 21(15):1347-62, 2002
11. ASTM D 3039-93, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite"
12. Tai, N.H., Yip, M.C. and Lin, J.L., "Effects of Low-energy Impact on the Fatigue Behavior of carbon/Epoxy Composites", Composites Science and Technology , Vol. 58, No. 1, pp. 1 ~ 8, 1998
13. Reissner, E., "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates", Journal of Applied Mechanics, Jun., Vol. 18, pp. 67 ~ 69, 1945