

적층구성과 충돌에너지의 변화에 따른 CFRP 구조부재의 충격특성

여인구^a, 최주호^a, 최영민^a, 양용준^b, 황우채^a, 양인영^{c*}

Impact Characteristics of CFRP Structural Member according to the Variation of Stacking Condition and Impact Energy

In-Goo Yeo^a, Ju-Ho Choi^a, Yeong-Min Choi^a, Yong-Jun Yang^b, Woo-Chae Hwang^a, In-Young Yang^{c*}^a Department of Advanced Parts & Materials Engineering, Graduate School, Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwang-ju 501-750, Republic of Korea^b Department of Fire Safety Management, Dongkang College 160 Dongmunro, Bukgu, Gwangju 500-714, Republic of Korea^c Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwang-ju 501-750, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	14	June	2013
Revised	26	August	2013
Accepted	26	November	2013

Keywords:

CFRP

Impact velocity

Absorbed energy

Dynamic characteristics

ABSTRACT

This aims to examine experimentally the absorption behavior and strength of circular CFRP members with different stacking configurations on exposure to a separate impact velocity. In addition, considered the dynamic characteristics. Circular and square CFRP members were prepared from 8-ply unidirectional prepreg sheets stacked at different angles ($0^\circ/90^\circ$ and $90^\circ/0^\circ$, where the 0° direction coincides with the axis of the member) and interface numbers (2, 4, and 6). Based on the collapse characteristics of the circular CFRP members. In this study, for the circular members, the impact energies at crosshead speeds of 5.52 m/s, 5.14 m/s, and 4.57 m/s are 611.52 J, 529.2 J, and 419.44 J (at circular members), respectively. Likewise, for the square members, the impact energies at crosshead speeds of 2.16 m/s, 1.85 m/s, and 1.67 m/s are 372.4 J, 274.4 J, and 223.44 J (at square members).

1. 서론

자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 전면충돌의 경우가 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 많이 발생하는 사고 형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능에 대한 차량개발이 중요한 문제 중의 하나이다. 또한, 자동차 설계 시 탑승자들의 안전뿐만 아니라, 배기가스를 줄이려는 친환경적인 면과 연비를 향상시키며 에너지 효율을 높이려는 경제적인 면을 고려해 설계 되어야 하므로 연비개선 및 배기가스 규제에 대한 차량의 경량화에 많은 연구가 진행되고 있다¹⁻⁵⁾.

따라서, 차량의 설계 단계에서는 차량전체의 전면 충돌을 예측하

기 전에 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수가 크고, 간단한 구조부재에 대해서 압궤거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악 하는 것이 중요한 문제이다⁶⁻¹⁰⁾.

그러나, 승객의 안전성과 승차감의 향상 및 다기능화의 문제는 다양한 부품장착 등으로 인해 오히려 무게를 증가시켰다. 따라서 자동차의 설계는 안전성을 고려하면서 차체중량을 줄이기 위한 방향으로 이루어져야 한다. 따라서, 본 연구에서는 비강도, 비강성이 뛰어나며 적층배향에 따라 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료인 CFRP 구조부재에 수직식 충격시험기를 이용하여 충격실험을 행하여 충격에너지의 변화에 따른 CFRP 적층구조부재의 충격특성 및 압궤특성에 대하여 연구하고자 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7840

E-mail address: iyyang@chosun.ac.kr (In-Young Yang).

충격에너지의 크기는 cross head의 낙하를 자동적으로 조절하는 장치를 설계 제작하여 cross head의 질량과 낙하 속도로부터 환산하였다.

특히, 적층구성의 차 즉 CFRP 구조부재의 형상(원형, 사각), 계면수 및 적층각의 차이에 따른 에너지흡수 능력과 충격속도의 크기에 따른 충격특성을 정량적으로 고찰할 수 있도록 하고자한다.

2. 시험편

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 시트는 한국화이바(주)에서 생산한 CU125NS 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트를 사용하였다. 실험에 사용된 시험편의 형상 및 적층방법은 Fig. 1에 나타내었다. 계면수의 변화, 적층각의 차 및 충격에너지 변화가 CFRP 구조부재의 충격특성에 어떠한 영향을 미치는가를 비교 고찰하고자 복합재료 적층판의 설계기준^[11]에 의하여 본 연구에서는 인장과 전단의 coupling 방식을 위한 $[\theta_n/\theta_n]$ 방법 및 인장과 굽힘 하중의 coupling 방식을 위한 $[\theta_n]_S$ 방식으로 적층하였으며, 여기서 n은 프리프레그시트 수이다. 계면수 변화에 따른 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 계면수를 변화(2계면, 4계면, 6계면)시켰고 최외각층의 각도를 90°, 0°로 변화시켜가며 성형하였다. 여기서, 6계면의 적층순서는 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ 이며 $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ 로 표시한다.

CFRP의 가장 취약한 문제점은 취성 문제이며, 압력 초기에 최대하중 이후 급격한 파괴가 진행되어 하중이 급격히 떨어지게 되

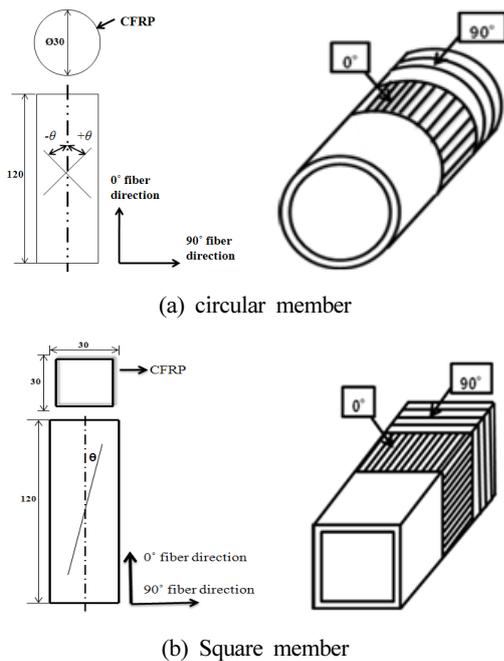


Fig. 1 Configuration of specimens

고, 이로 인해 층간 및 층 내 크랙이 성장하게 되어 초기 압력하중 이후 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 한쪽 끝단에 45°의 트리거를 주어 순차적으로 압력을 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하였고 시험편의 성형은 오토클레이브를 이용하여 제작하였다.

본 연구에서 사용된 CFRP 원형시험편의 치수는 내경 \varnothing 30이며 사각통 시험편의 치수는 30 × 30으로 하였으며 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압력이 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120 mm로 하였다.

3. 압력실험

충격압력실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험 장치로서 크로스헤드를 수직 하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격을 가하는 방식으로 충격시험기의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에서는 충격 속도를 정확히 계측하기 위하여 Fig. 2와 같이 수직식 충격 시험 장치를 지지하는 4개의 가이드레일에 전자석으로 위치를 자동 조절하여 원하는 위치에서 크로스헤드를 낙하할 수 있도록 컨트롤러를 설계 제작하여 실험하였다.

일반 강판으로 제작된 크로스헤드 위치 컨트롤러는 공기압 수직식 충격장치의 충격시험기의 사이트에 고정되어 공기압을 통해 크로스헤드의 높이를 제어함으로써 자동으로 일정한 위치에서 낙하

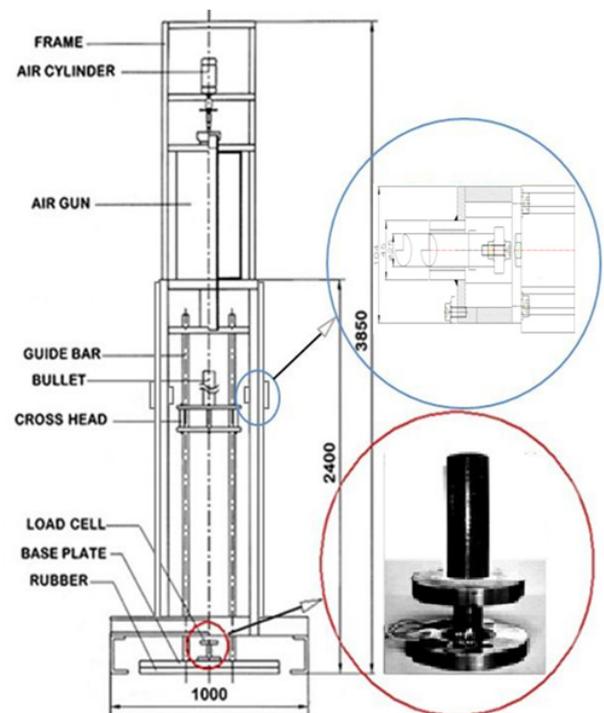


Fig. 2 Impact testing setup for crushing

하도록 하는 장치이다. 작동은 스위치를 통하여 공기압을 주입하거나 뺄 때 자동으로 제어되기 때문에 최소한의 오차손실을 줄이기 위함이다. 충격에너지의 크기는 크로스헤드(40 kg)의 낙하속도를 계측하여 산출 하였다. 로드셀 중앙에 놓인 시험편에 작용하는 충격하중의 계산은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 스트레인 게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 중심으로 각각 축방향 2매, 원주방향 2매를 대칭으로 부착하는 Full bridge 방식으로 부착하여

굽힘과 비틀림의 영향을 제거하여 구하였으며, 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다.

충돌 시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스와 동적변형증폭기를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO (Dynamic strain oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

충격압력실험 후 측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위 선도를 Fig. 3에 나타내었고 하중-변위 선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위 선도를 식 (1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지를 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} P dS \quad (1)$$

여기서 E_a 는 흡수에너지, P 는 압력하중, δ 는 압력된 시험편의 길이, S 는 압력과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

충격에너지는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

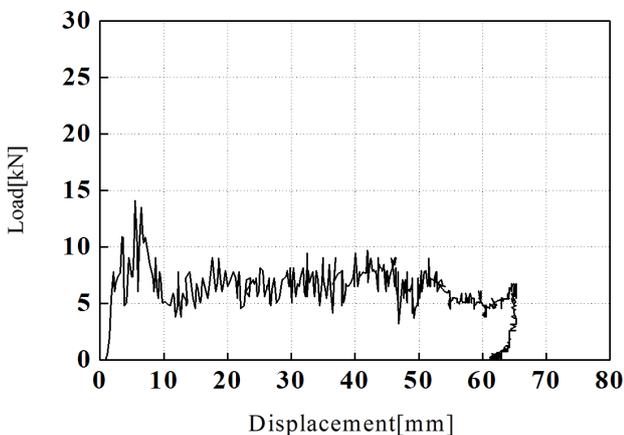


Fig. 3 Load- displacement curve

여기서, m 은 크로스헤드의 질량(40 kg)이며, v 는 충격압력 속도이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 에너지 흡수특성

연구에서는 CFRP 구조부재가 승용차용 사이드부재에 사용될 것을 상정하여 CFRP 구조부재의 단면형상의 변화, 적층계면수의 차 및 최외각층의 변화가 충돌에너지의 변화에 따라 CFRP 부재의 충격특성에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 고찰하여 수송기계의 경량화를 위한 사이드부재로 사용 될 수 있는 설계 데이터를 얻고자 하였다.

Fig. 4은 사각통 CFRP 부재가 여러 단계의 충격하중을 받았을 때의 계면수의 변화와 최외층 적층각의 변화에 따른 에너지흡수특성을 나타냈다. ●, ▲, ■ 표시는 최외층 적층각이 0°인 경우를 나타낸다.

또한, 충격에너지의 크기는 크로스 헤드(40 kg) 수직식 충격 시험장치의 4개의 guide rail에 위치를 고정시켜 낙하시키는 Jig를 설계 제작하여 실험 시 충격에너지 크기의 재현성을 확보하였다. 충격에너지마다의 3개 이상의 CFRP 부재에 충격실험을 행하여 데이터를 평균하여 나타냈다.

Fig. 3 중에서 ○, △, □ 표시는 최외층 적층각이 90°인 경우이며 충격에너지의 변화에 따른 CFRP 부재의 에너지 흡수특성을 고찰하기 위하여 223.4 J, 274.4 J 및 372.4 J의 충격에너지를 가하여 실험했다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 형상의 CFRP 부재라 하더라도 계면수 및 최외층 적층각의 변화에 따라 흡수에너지가

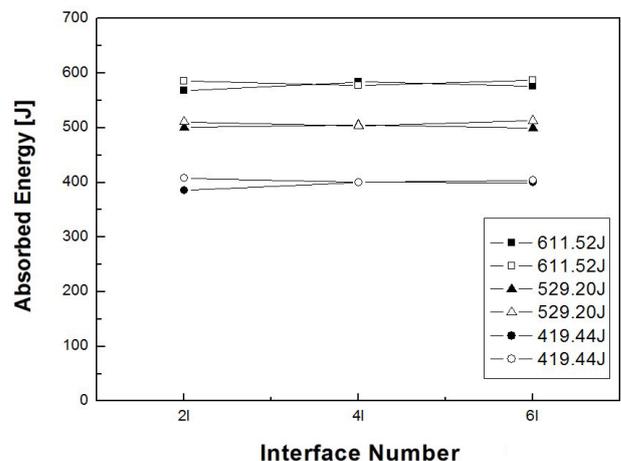


Fig. 4 Relationship between interface number of CFRP and total absorbed energy for CFRP square member according to impact velocity

크게 변화함을 알 수 있었다. 계면수가 2계면과 6계면 일 때, 충격 에너지가 증가할수록 흡수에너지도 증가했으며 최외층 적층각이 0°일 때가 90°일 때보다 각각 2계면일 때 8.7%, 6계면일 때 3.6% 정도 많은 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있었고 계면수가 6계면 일 때는 2계면일 때 보다 최외층각도의 변화에 따른 에너지흡수의 차가 약간 작게 나타났다. 그러나, 계면수가 4계면일 때는 최외층 적층각도의 변화에 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 이는 충격압력 시 압레드모드의 해석으로부터 알 수 있는데, CFRP 부재의 가장 큰 에너지 흡수인자는 섬유와 판의 접합 및 크랙 진전이며, 크랙 진전은 크게 층간 크랙과 층 내 크랙 및 중심 크랙으로 나눌 수 있다.

따라서 CFRP 부재의 경우, 계면수의 증가에 따라 층간 크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여 에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났다. 이는 충격압력하중을 받을 시 섬유방향이 90°일 때가 좀 더 하중에 견디는 힘이 크기 때문에 90°로 적층된 섬유의 두께가 얇아질수록 총흡수에너지 또한 낮게 나타난다고 사료된다.

그러나 2, 6계면의 경우 파쇄확장모드로 압레되며 많은 에너지를 흡수하였는데 이는, 축방향 0°의 섬유가 외측으로 확장되어 벗어날 수 있지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단 되어 압레된다.

또한, 0°와 90°의 CFRP 적층각도가 조합된 경우는 0°의 섬유의 라미나 굽힘과 90°섬유의 국부좌굴이 조합되어 섬유의 파단을 유도하면서 라미나 굽힘, 국부좌굴 및 섬유파단에 의해서 에너지를 흡수하기 때문에 사료된다.

Fig. 5는 원통 CFRP 부재가 충격하중을 받을 때 충격에너지의 변화에 따른 에너지 흡수 특성을 나타냈으며 사각 CFRP 부재에서와 같이 계면수의 변화와 최외층 적층각도의 변화에 따른 흡수에너지 특성을 나타냈다.

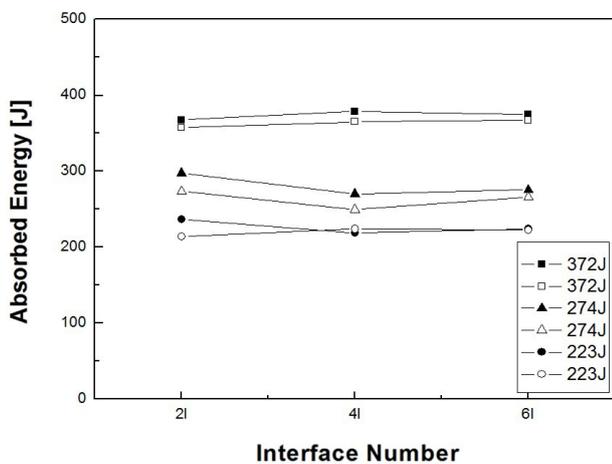


Fig. 5 Relationship between interface number of CFRP and total absorbed energy for CFRP circular member according to impact velocity

원통 CFRP 부재의 경우는 사각 CFRP 부재보다 더 많은 에너지를 흡수할 수 있어 충격에너지를 419.44 J, 529.2 J 및 611.52 J의 3단계 충격에너지를 가하여 실험하였다.

Fig. 5에서 보는바와 같이 Fig. 4의 사각 CFRP 부재와는 반대의 흡수에너지의 변화가 경향을 나타내고 있다. 계면수가 변함에 따라 사각 CFRP 부재보다 최외층각도의 변화에 90°일 때가 0°일 때보다 2계면일 때 5.7%, 6계면일 때 2.7%정도의 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 2계면의 경우가 최외층각도의 변화에 민감함을 알 수 있다.

Fig. 4, 5로부터 형상에 따라서 최외층각에 따른 흡수에너지가 반대로 나타남을 알 수 있다.

4.2 충격 특성

본 연구에서는 계면수 및 형상이 다른 CFRP 구조부재가 충격하중을 받을 때 충격에너지가 변화 할 때의 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 자체 제작한 수직식 공기압 충격 시험 장치를 이용하여 3단계의 충격속도 범위에서 충격 압력실험을 행하였다.

충격 속도의 크기는 원형 및 사각형CFRP 시험편의 흡수 능력을 고려하여 결정하였다. Fig. 6~9는 충격속도의 변화에 따른 원형 CFRP 부재 및 사각형 CFRP 구조부재의 동적특성과 계면수와의 관계를 최소 자승법으로 Plot하여 나타냈다.

Fig. 5~8에서 ϕ 는 동적특성을 나타내는 동적특성계수 ϕ 로 나타냈다.

$$\phi = \frac{\sigma_I}{\sigma_s} \text{ (정적압력 : } \sigma_s, \text{ 충격압력 : } \sigma_I)$$

$\phi = 1$ 인 경우는 정적압력상태이며 충격에너지가 증가할수록 정적압력에 기울기를 더한 값만큼 충격에너지가 증가함을 알 수 있다.

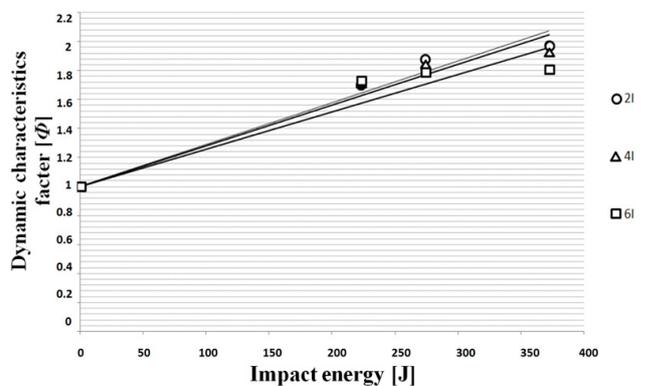


Fig. 6 Relationship between interface number of CFRP and dynamic characteristics for CFRP square member according to impact velocity (outer angle 0°)

Fig. 2I, 4I 및 6I는 계면수가 2, 4 및 6을 나타낸다.

Fig. 6, 7은 각각 2, 4, 6계면의 사각형 CFRP 구조부재에 대하여 충격에너지 변화에 따른 충격응력의 변화관계를 나타냈고, 90°

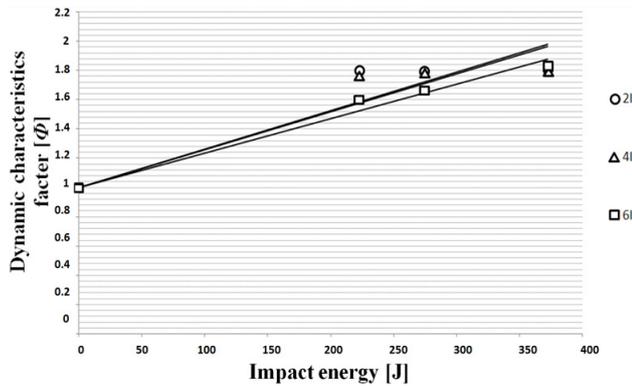


Fig. 7 Relationship between interface number of CFRP and dynamic characteristics for CFRP square member according to impact velocity (outer angle 90°)

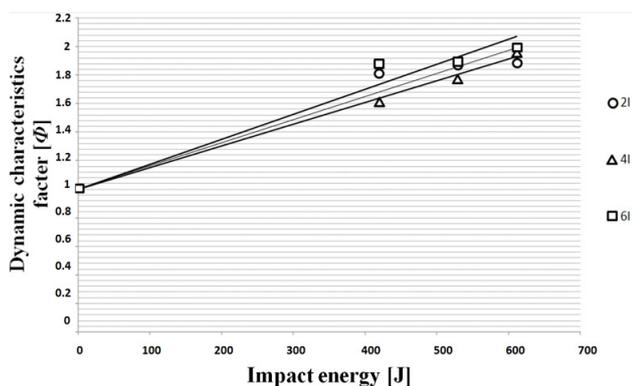


Fig. 8 Relationship between interface number of CFRP and dynamic characteristics for CFRP circular member according to impact velocity (outer angle 0°)

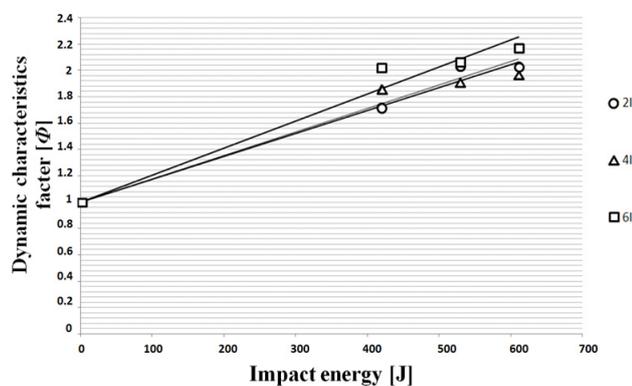


Fig. 9 Relationship between interface number of CFRP and dynamic characteristics for CFRP circular member according to impact velocity (outer angle 90°)

로 적층된 사각형 부재의 경우 4계면일 때 기울기가 가장 높음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 8, 9로부터 최외각 0°일 때 원형부재의 경우 6계면일 때 기울기가 가장 높았다고, 최외각 90°인 경우 역시 6계면일 때의 기울기가 가장 높았으며, 사각형 CFRP 구조부재가 원형 CFRP 구조부재보다 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 증가함을 알 수 있었다. 충격에너지의 변화에 따른 충격응력의 변화를 정리하면, 사각형 CFRP 구조부재의 경우 최외각층에 따라서 2계면과 4계면일 때 가장 높은 충격응력의 증가를 보여주었고, 반대로 원형 시험편의 경우 최외각층에 관계없이 6계면 일 때 가장 높은 충격응력의 증가를 보여주었다.

향 후 더 많은 충격 실험을 통하여 충격압계 시 시험편의 변형에 어느 정도의 흡수에너지가 소요되는지, 시험장치의 반발에너지, 마찰에너지 등의 영향은 없는지를 검토할 필요가 있다고 생각된다.

5. 결론

연구에서는 계면수 및 형상이 다른 CFRP 구조부재에 다양한 충격이 가해질 때의 CFRP 구조부재의 충격특성을 고찰 하였다. 특히, 각각의 형상의 변화, 계면수의 변화에 따른 흡수에너지 및 동적 특성을 정량적으로 고찰하여 경량화를 고려한 수송기계의 개발 및 설계 시 유용한 자료를 얻고자 하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 사각형 CFRP 부재의 경우 계면수 및 최외각각의 변화에 따라 충격에너지가 변화 하였는데, 최외각각이 0°인 경우 90°일 때 보다 2계면일 때 약 8.7%, 6계면일 때 3.6%정도 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있었다.
- (2) 원형 CFRP 부재의 경우 사각형 CFRP 부재와 반대의 경향을 보이고 있으며, 최외각각이 90°일 때 가 0°일 때 보다 각각 5.7%, 2.7% 이상 많은 에너지를 흡수하였다. 특히, 2계면일 때가 최외각각도의 변화에 민감함을 알 수 있었다. 이는 최외각각이 90°일 때 섬유와 파단에 의해 섬유의 굽힘이 혼합되어 나타나는 취성파괴의 특성 때문이라 생각된다.
- (3) 사각형 및 원형 CFRP 부재 모두 충격에너지의 크기에 따라 충격응력이 선형적으로 증가하였으며, 정적압축응력에 충격에너지의 변화에 따른 기울기 값을 더한 값만큼 선형적으로 증가하였다. 사각형 CFRP 부재는 계면수가 적을수록 원형 CFRP 부재는 계면수가 많을수록 큰 기울기를 나타낸다.

References

- [1] Abramowicz, W., 1981, Simplified Crushing Analysis of Thin-walled Column and Beams, Engineering Transaction, 29 5-26.

- [2] Abramowicz, W., Wierzbicki, T., 1986, On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structure, *J. Appl. Mech.*, 50 157-174.
- [3] John, F., 1996, *Handbook of Vehicle design analysis*, Society of automotive engineers, Inc, 9-12.
- [4] Donald, F. A., 1990, *Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes A Thesis for a Doctorate*, Technomic Publishing Company, USA.
- [5] Farley, G. L., Jones., R. M., 1991 Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes, *Journal of composite Materials*, 26 388-404
- [6] Farley, G. L., Jones., R. M., 1992, Relationship between mechanical - property and energy-absorption trends for Composite Tubes, *Journal of composite Materials*, 26 388-404
- [7] Lee, K. S., Cha, C. S., Yang, I. Y., 2005 A Study on the Axial Crushing Behavior of Aluminum CFRP circle Members for Light Weight, *Transaction of KSAE*, 13:5 50-56.
- [8] Wang, Q., Fan, Z., Gui, L., 2003, Theoretical analysis for axial crushing behavior of aluminum foam-filled hat section, *Int. J. Mech .Sci.*, 49 515-521.
- [9] Yang, Y. J., Yang, I. Y., Sim, J. K., 2009, Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped Members under the Hygrothermal Environment According to Stacking Angle, *Journal of KSMTE*, 18:5 507-513.
- [10] Yang, Y. J., Cha, C. S., Yang, I. Y., 2009, Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped members According to Variation of Interface Numbers under the Hygrothermal Environment, *Journal of KSMTE*, 18:3 .241-247.
- [11] Michael., 1992, *Niu, Composite Airframe structures*, Hong Kong, Conmilit Press Ltd., Hong Kong.