

낙추식 충격시험에 의한 CFRP 적층판의 강도평가에 관한 연구

A Study on the Strength Assessment of CFRP Laminate Plates by Drop-Weight Impact Test

이 정 주* · 박 노 식** · 양 인 영***

J.J. Lee · N.S. Park · I.Y. Yang

(1999년 3월 3일 접수, 1999년 7월 12일 채택)

ABSTRACT

In this study, a drop-weight impact tester was manufactured to assess the strength of CFRP laminate plates. The tests were conducted on several laminates of different ply orientation. A system for the impact strength of CFRP laminates was made considering stress wave propagation theory using drop-weight impact tester as one of impact test. Results indicate that absorbed energy of quasi-isotropic specimen, having four interfaces is higher than that of orthotropic laminates with two interfaces. Absorbed energy in the specimen that ply number, interface number and fiber stacking sequences is same but having hybrid is higher than that of orthotropic laminates without hybrid.

1. 서 론

CFRP는 고강성, 고강도의 특성을 갖기 때문에 금속합금에 비해 대략 20~50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점이 있어서 우주, 항공분야에서 널리 사용되고 있다¹⁻³⁾. 그러나 CFRP는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특

성을 가진 반면에 충격을 받을 때 계면 특성 및 압축강도 저하 현상이 문제가 되고 있어, 최근에 Marvin⁴⁻⁶⁾ 등은 48-플라이 등방성 적층판을 이용하여 압축하중을 받은 CFRP 적층판의 파손 메카니즘과 손상 진전을 명확히 밝히기 위하여 파괴 메카니즘을 해석하였으며, Cantwell⁷⁻⁹⁾ 등은 탄소섬유 복합재료에 낙추를 이용하여 저속

* 조선대학교 대학원

** 광주직업훈련원

*** 조선대학교 기계공학부

충격을 가하여 초음파를 이용한 C-scan과 광학 현미경, 표면강화 활성제 x-방사선에 의해서 손상 진전현상을 보고하였다.

지금까지의 충격시험법으로써 금속재료를 대상으로 한 샤르피, 아이조트 충격시험과 다이넫 등을 이용하는 낙추식 충격시험법은 CAI (Compression After Impact)에서 문제되는 것처럼 손상 정도가 적고 어느 정도 잔류 강도를 가지고 있는 경우 충격에 대한 정확한 계측이 곤란하다.

따라서, 본 연구에서는 충격시험기로 낙추식 충격시험장치를 제작하고 낙추 중의 응력과 진파현상을 고려한 정확한 충격하중과 변위를 측정하는 방법을 개발하고 적층판의 흡수에너지를 구하여 강도를 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 시험편

CFRP 적층 시험편은 CF/Epoxy로 조합된 일방향 탄소섬유 프리프렉 시트(한국화이버, CU-125NS-Carbon fiber unidirection 125g/m² no scrim)를 적층한 후, 오토클레브를 이용하여 제작하였다.

적절한 섬유함유율과 원하는 시험편 크기에 따라 제작한 지그(200×200mm)를 사용하여 C-FRP 적층판을 성형하였으며 경화온도인 125℃로 90분 경화하였다. 또한, 성형 후 CFRP 적층판을 잔류응력이 발생하지 않도록 다이아몬드 커터를 이용하여 180×180mm의 정방형으로 절단했다.

3. 시험장치 및 방법

낙추식 충격시험 장치는 낙추의 정확한 충격 위치와 양호한 재현성을 확보하는 것이 중요하기 때문에 낙추식 충격시험 장치에 2개의 가이드 바를 수직으로 설치하고, 2개의 플라스틱 판을 붙여 낙추가 가이드 바를 따라서 일정한 자유낙하와 낙하속도를 얻을 수 있도록 했다. 시험장치 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 충격체는 부가질량이 없는 낙추 I (0.58kg), 부가 질량을 가진 낙추 II (0.84kg)의 2종류로 $\phi 10 \times 600$ mm의

연강 환봉을 사용하고 선단부는 지름 14mm 곡면으로 했다. 또한, 하중 검출부에 스트레인 게이지를 낙추 I에서는 길이를 2등분한 부분에, 낙추 II에서는 길이를 3등분한 2개 부분에 중심축에 대칭되도록 2매 붙이고, 굽힘 변형의 영향이 없도록 하기 위해서 직렬로 연결시켰다. 또한, 본 연구에서는 $\phi 150$ 의 구멍이 있는 180×180×10mm의 연강제 정방형판으로 지지상자를 만들고 방향성이 없도록 구멍 $\phi 150$ 윗면 상·하판 사이에 시험편을 끼워 실험을 했다. 시험편에 작용하는 충격하중은 낙추에 부착된 스트레인게이지의 출력으로부터 프로그램에 그 변형률을 입력하여 하중으로 환산하였다.

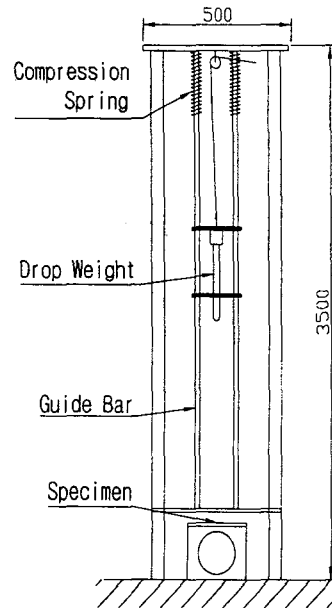


Fig. 1 Schematic diagram of drop test

충돌시 나타나는 스트레인 게이지의 저항변화는 실드선으로부터 브리지 회로를 통하여 동적변형 측정기로 입력되어 전압변화를 증폭하고 기억된 파형을 PC에 의해 데이터 처리하여 변형률로 환산한다. 충격체 낙추가 CFRP 적층판에 충돌할 때 충격체의 선단부와 시험편이 접하는 위치의 이동량 즉, 변위의 측정은 낙추에 부착한 표적의 이동을 광학식 변위계(Zimmer, 100

F)를 사용하여 측정한다. 광학식 변위계는 광학 렌즈를 이용하여 표적의 백색부와 흑색부의 경계선의 변위량을 전압변화로 환산하는 것이며, 렌즈를 교환하여 측정 가능한 변위량을 변화시킬 수 있다. 낙추의 충격속도는 시험장치에 설치된 레이저에 의해 시간을 체크해서 측정한다. 측정시스템은 Fig. 2와 같다.

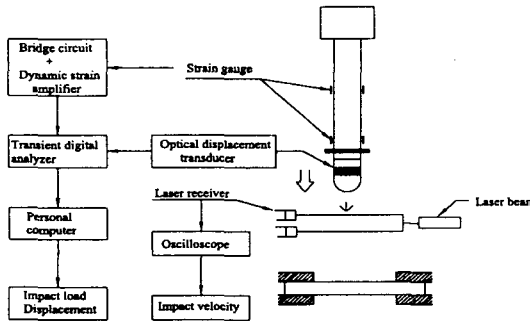


Fig. 2 Measuring system

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정적실험

충격실험과 같이 CFRP 적층판을 지지상자에 고정하고 지름 14mm폭면의 봉을 U.T.M에 장착하여 압축시험을 행했다. 이때 하중-변위 데이

Table 1 Definition of specimens

| A | II | I |
|------------------------------------------------------------|----|---|
| A: $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]$ | | |
| B: $[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]$ | | |
| C: $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_4/0^{\circ}_2]$ | | |
| D: $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4; (\theta_1)/0^{\circ}_4]$ | | |
| II: Drop-weight with added mass | | |
| L: Drop-weight without added mass | | |
| Specimen number | | |

터로부터 파괴할 때까지의 하중-변위 선도를 구했다. 시험편 기호와 정적시험 결과를 Table 1과 2에 나타냈다. 정적실험에 사용한 시험편 크기는 충격시험편과 동일하다.

Table 2 Results of static test

| Specimens Type | A | B | C | D |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| Maximum Load F_{max} [kN] | 2.92 | 3.04 | 4.34 | 4.04 |

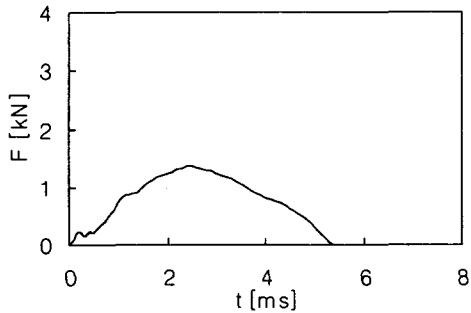
4.2 낙추 충격시험

낙추를 CFRP 적층판에 충격을 가할 때 CFRP의 적층구성에 따라 하중, 변위, 흡수에너지의 특성을 고려하였다. 낙추시험시의 낙추시험 결과를 Table 3에 나타냈다. Fig. 3은 부가질량이 있는 낙추 II를 이용하여 계면수가 2계면인

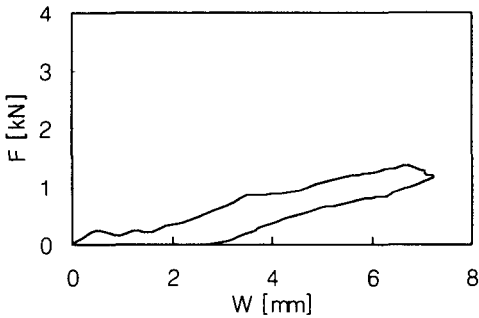
Table 3 Result of drop-weight impact test

| Specimens | Impact velocity [m/s] | Impact Energy [J] | Velocity after Impact [m/s] | Energy after Impact [J] | Absorbed Energy [J] | Maximum Load F_{max} [kN] |
|-----------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|
| AH1 | 3.19 | 4.27 | 2.05 | 1.77 | 1.35 | 1.35 |
| AH2 | 3.62 | 5.50 | 2.34 | | 2.8 | 1.63 |
| AH3 | 3.98 | 6.65 | 2.55 | | 2.69 | 1.85 |
| AH4 | 4.83 | 9.8 | 3.04 | | 4.1 | 2.4 |
| AH5 | 5.17 | 11.23 | 2.87 | | 2.31 | 2.51 |
| BH1 | 3.09 | 4.01 | 2.23 | 2.09 | 1.26 | 1.63 |
| BH2 | 3.65 | 5.6 | 2.44 | | 3.66 | 1.97 |
| BH3 | 4.27 | 7.66 | 2.98 | | 4.29 | 2.45 |
| BH4 | 4.53 | 8.62 | 2.77 | | 4.53 | 2.63 |
| BH5 | 5.35 | 12.02 | 2.67 | | 4.33 | 2.72 |
| CL1 | 3.02 | 2.65 | 1.86 | 1.1 | 1.51 | 1.16 |
| CL2 | 4.45 | 5.74 | 3.19 | | 2.68 | 1.79 |
| CL3 | 5.69 | 9.39 | 3.51 | | 5.54 | 2.4 |
| CH1 | 2.94 | 3.63 | 1.99 | | 3.23 | 1.24 |
| CH2 | 4.6 | 8.89 | 3.24 | | 5.86 | 2.13 |
| CH3 | 5.61 | 13.22 | 4.02 | | 8.31 | 2.73 |
| DH1 | 3.12 | 4.09 | 2.13 | 1.91 | 1.69 | 1.47 |
| DH2 | 3.51 | 5.17 | 2.32 | | 2.90 | 1.79 |
| DH3 | 4.04 | 6.86 | 2.76 | | 4.31 | 1.92 |
| DH4 | 5.14 | 11.10 | 3.54 | | 5.71 | 2.65 |
| DH5 | 5.49 | 12.66 | 3.89 | | 5.6 | 2.99 |

직교이방성인 시험편 A의 낙추 충격시험 결과를 하중과 시간, 하중과 변위 곡선으로 나타냈다. 이 때 충격전·후 에너지는 낙추의 질량과 충격전·후의 속도를 이용하여 구할 수 있었으며, 충격시 시험편에 흡수된 에너지는 하중-변위선도에서 폐곡선의 면적으로 구한다.



(a) Load history



(b) Load-displacement curve

Fig. 3 Drop-weight test of AH1(Impact energy : 4.27J)

5. 낙추 충격시험 특성

5.1 적층배향의 차

Fig. 4는 적층수가 같고 계면수, 적층방향이 다른 CFRP 적층판의 낙추 충격시험 결과를 나타냈다. 그림중 ■표는 계면수가 2계면인 직교이방성 적층재 시험편 A, □표는 계면수가 6계면인 의사등방성 적층재 시험편 B를 나타냈다. 대략 충격에너지가 4J 정도에서 시험편 A, B의 흡수에너지는 거의 차이가 없다. Fig. 5는 충격에너지 크기에 따른 최대 충격하중을 나타냈다.

시험편 A, B 모두 충격에너지가 증가함에 따라서 낙추 충격하중도 증가함을 알 수 있었다.

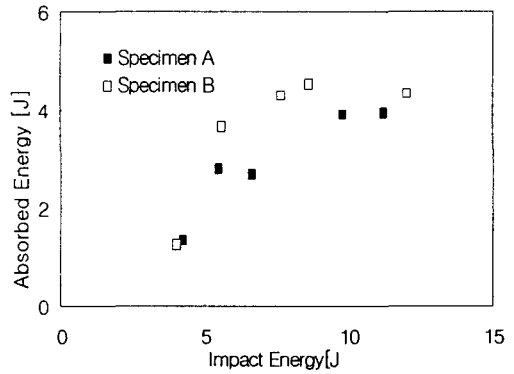


Fig. 4 Relation between absorbed energy and impact energy(A, B)

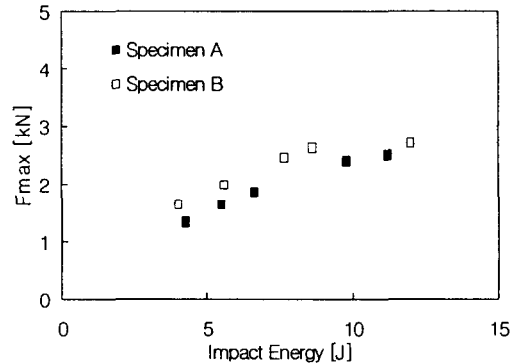


Fig. 5 Relation between maximum load and impact energy (A,B)

5.2 계면수의 차

Fig. 6은 적층수가 같고, 계면수가 다른 CFRP 적층판의 낙추 충격시험 결과를 나타냈다. 여기서 계면수란 적층방향이 다를 때 생기는 경계수를 의미한다. 이때 시험편 A, C, 모두 직교이방성으로, 시험편 A의 계면수는 2이며, 시험편 C는 4개의 계면이다. 충격에너지와 흡수에너지를 비교하면 초기에는 별로 차이가 없었지만, 충격에너지가 증가할수록 계면수가 더 많은 시험편 C가 시험편 A보다 흡수에너지가 증가하였다. 그리고 Fig. 7은 충격에너지의 크기와 최대

낙추 충격하중을 나타냈다. 시험편 A, C의 최대 낙추 충격 하중은 별로 차이가 없었다.

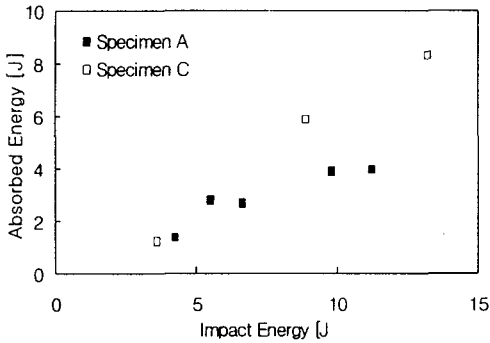


Fig. 6 Relation between absorbed energy and impact energy (A, C)

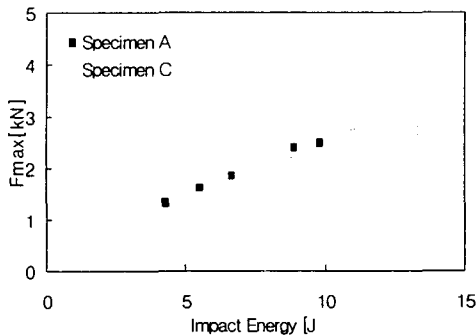


Fig. 7 Relation between maximum load and impact energy (A, C)

5.3 하이브리드(hybrid)의 차

복합재료에 있어서 hybrid는 두 종류 이상의 섬유를 이용한 복합재료로서 여기서는 탄소와 glass의 혼직(混織) cloth를 이용하여 CFRP에 비해 CF/GF가 어떤 특징이 있는지 살펴보았다. Fig. 8은 적층수 및 적층방향이 같고, GFRP 프리프랙를 삽입한 CFRP 적층판의 낙추 충격시험 결과를 나타냈다. 이때 시험편 A, D, 모두 직교 이방성으로 구성되었으며 시험편 D의 12번째에 GFRP 프리프랙(#210)을 삽입하여 낙추 시험을 행했다. GFRP 프리프랙이 삽입된 시험편 D가 시험편 A보다 동일한 충격에너지 하에서 흡수에너지가 대체적으로 높게 나타났으며,

시험편 A, D, 모두 충격에너지를 증가시킴에 따라 흡수에너지도 증가함을 알 수 있었다. 시험편 D가 흡수에너지가 높게 나타난 이유는 적층판의 층간 접착이 양호한 경우 hybrid 중에서 탄소섬유가 부분적으로 갈라져도 곧 전체의 파괴로 파급하지 않기 때문이라 생각한다. Fig. 9는 충격에너지와 최대하중을 나타냈다. 시험편 A, D의 최대 충격하중은 거의 비슷하였다.

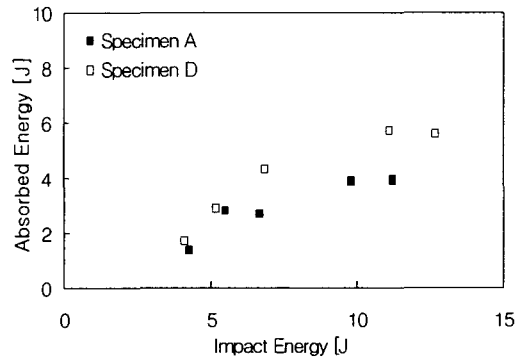


Fig. 8 Relation between absorbed energy and impact energy (A, D)

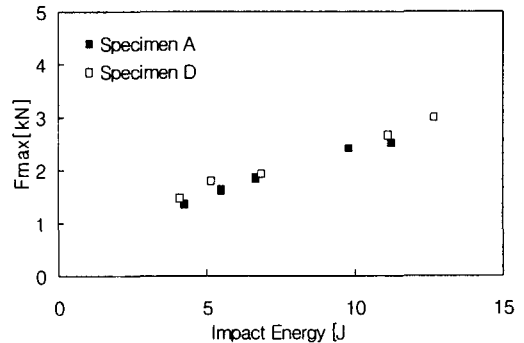


Fig. 9 Relation between maximum load and impact energy (A, D)

6. 결 론

본 연구에서는 CFRP 적층판의 충격시험장치로 낙추식 충격시험장치를 제작하고, 적층방향과 계면수를 변화시킨 각각의 적층판에 따른 충격실험을 행한 후, 적층판의 흡수에너지 특성을

고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충격시험법으로서 낙추식 충격시험장치를 이용하여 낙추의 응력과 전파 현상을 고려한 CFRP 적층판의 강도 평가가 가능하였다.
- 2) 적층방향이 다른 직교이방성 시험편 $A[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_s$ 와 의사등방성 시험편 $B[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_s$ 의 충격에너지와 흡수에너지 관계를 보면 의사등방성 시험편이 흡수에너지가 높게 나타났다.
- 3) 적층수가 같고 계면수가 다른 직교 이방성 적층재를 충격에너지와 흡수에너지를 비교하면 계면수가 2인 시험편 $A[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_s$ 에 비해 계면수가 4인 시험편 $C[0^{\circ}_2/90^{\circ}_4/0^{\circ}_2]_s$ 가 흡수에너지가 증가하였다. 즉, 계면수가 많은 시험편이 충격을 받을 때 충격에너지를 많이 흡수한다는 것을 알 수 있었다.
- 4) 적층수 및 적층방향이 동일한 경우, GFRP 프리프랙을 삽입한 시험편 $D[0^{\circ}_4/90^{\circ}_7(\theta_1)/0^{\circ}_4]_i$ 이 GFRP 프리프랙이 없는 시험편 $A[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_s$ 보다 흡수에너지가 높게 나타났다.

이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Cantwell, W.J. and Morton, J.: "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates", Composite Structures, Vol. 3, pp. 241~257, 1985.
- 2) 強化プラスチック協會編: 新版FRP入門, p. 8, 1987.

- 3) Lubin, G.: Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, p. 147, 1982.
- 4) Rhodes, M.D.: "Impact Tests on Fibrous Composite Sandwich-Structures", NASA TM-78755, 1978.
- 5) Rhodes, M.D., Williams, J.G. and Starnes, J.H.: "Effect of Filamentary-Composite Hat-Stiffened Panels", "Society for the Advancement of Material and Process Engineering", 23, 300, 1978.
- 6) Starnes, J.H., Thodes, M.D and Williams, J.G.: "The Effect of Impact Damage and Circular Holes on the Compression Strength of a Graphite-Epoxy Laminate", N-ASA TM-78796, 1978.
- 7) Cantwell, W.J., Curtis, P.T. and Morton, J.: "An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced With High-strain Carbon Fibers", Composites Science and Technology, 25: 133-148, 1986.
- 8) Bishop, S.M., Curtis, P.T. and Dorey, G.: "A Preliminary Assessment of a Carbon fibre/PEEK Composite". RAE TR to be published.
- 9) Curtis, P.T.: "An Initial Evaluation of a High-strain Carbon Fibre Reinforced Epoxy", RAE TR 84004, 1984.
- 10) 이교성, "복합재료학", 광화문출판사, pp. 407~412.
- 11) 이정주, "낙추식 충격시험장치에 의한 CFRP 적층판의 손상평가에 관한 연구", 조선대학교 석사논문, 1998.