

## 적층각도 변화를 갖는 CFRP 모자형 단면부재의 열습 및 충격손상 평가

양용준<sup>+</sup>, 심재기\*

(논문접수일 2010. 07. 05, 심사완료일 2010. 09. 30)

### Hygrothermal and Impact Damage Evaluation of CFRP Hat shaped sectional members with Stacking Angle Variation

Yongjun Yang<sup>+</sup>, Jaeki Sim\*

#### Abstract

It is important to satisfy the requirements and standards for the protections of passengers in a car accident. There are lots of studies on the crushing energy absorption of a structure member in automobiles.

In this paper, we have studied to investigate collapse characteristics and moisture absorption movements of CFRP(carbon fiber reinforced plastics) structure members when CFRP laminates are under the hygrothermal environment. In particular, the absorbed energy, mean collapse load and deformation mode were analyzed for CFRP members which absorbed most of the collision energy. Also, variation of stacking angle is important to increase the energy absorption capability. The purpose of this study is to evaluate the strength reduction and moisture absorption behavior of CFRP hat shaped member.

Therefore we have made a impact collapse experiment to research into the difference of absorbed energy and deformation mode between moisture absorbed specimen and non-moisture absorbed. As a result, the effect of moisture absorption and impact loads of approximately 50% reduction in strength are shown.

**Key Words :** CFRP(탄소섬유 강화 플라스틱), Stacking angle(적층 각도), Hat shaped sectional members(모자형 단면부재), Hygrothermal(열습), Moisture absorption(수분흡수), Impact collapse(충격 압괴), Absorbed energy(흡수에너지)

<sup>+</sup> 조선대학교 첨단부품소재공학과

<sup>\*</sup> 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (jgsim@chosun.ac.kr)

주소 : 501-759 광주광역시 동구 서석동 조선대학교

## 1. 서론

CFRP 섬유강화 복합재는 금속에 비해 비중이 월등이 가볍고 비탄성 및 비강도가 매우 우수하여 현재 여러 분야에 사용되고 있는 추세에 있으며, 친환경 구조부재로 각광받고 있다.

하지만 CFRP 복합재는 여러 정적부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 보이는 반면 충격하중 및 고온·고습 환경 하에서 구조부재의 특성상 장시간 놓여 있을 때에는 그 우수한 역학적 특성을 보장받기 매우 어렵다<sup>(1-4)</sup>.

이제껏 가혹한 환경하에서 CFRP 복합재의 역학적 특성에 관한 연구로서 적층판 복합재에 대한 수분흡수 거동 및 잔류 응력 등의 강도평가에 관한 다양한 연구들이 진행되어 왔지만, 실제 구조부재의 형상을 갖는 CFRP 복합재의 수분흡수 거동 및 충격특성 평가에 관한 연구는 미흡한 실정이다<sup>(5-8)</sup>.

따라서 본 연구에서는 현재 차량용 구조부재로 사용되고 있는 모자형 단면부재와 비슷한 형상을 갖는 CFRP 모자형 단면부재를 제작하여, 온도와 수분의 작용을 동시에 평가할 수 있는 고온·고습 환경을 설정하여 고온·고습 환경 하에서 장시간 사용되어질 때의 기계적 성질의 변화 등에 중점을 두고 연구를 하였으며, CFRP 복합재의 최적의 충격특성을 평가하기 위하여 시험편 제작 시 적층방향을 달리 함으로써 시험편의 각도 변화를 주었으며 이로 인한 고온·고습 상황에서 수분흡수 거동의 변화를 알아보고, 나아가 수분을 흡수하지 않은 시험편과 조건을 같이하여 수분침투에 따른 강도 및 흡수에너지에 대해 비교 및 고찰해 보았다.

## 2. 시험편

### 2.1 시험편 제작

본 연구에서는 일방향 CFRP Prepreg sheet(CU125NS)를 사용하였으며, 알루미늄 사각 맨드릴 위에 차량용 충돌에너지흡수 박육부재 형상을 갖게끔 모자형(∟)과 평판(—)을 각각 8장의 sheet로 적층하여 제작하였다.

시험편 축방향을 중심으로 [+15°/-15°]<sub>4</sub>, [+45°/-45°]<sub>4</sub>, [90°]<sub>4</sub>, [90°/0°]<sub>4</sub>, [0°/90°]<sub>4</sub>의 배향각도의 변화를 갖도록 적층하여 경화온도까지 고온·고압을 가하는 오토클레이브 형태로 제작을 하였다.

### 2.2 시험편의 형상 및 종류

본 연구에 사용된 시험편은 자동차용 구조부재로 널리 사

용되고 있는 모자형상의 단면을 갖는 전면부 사이드부재로써 실재 크기의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30mm, 플랜지 길이=12mm로 모자형(∟) 단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였다. 압괴실험 중 안정적인 변형을 유도함으로써 최종 압괴 변위까지의 일률적인 변형을 통한 압괴하중 및 흡수에너지를 얻기 위한 목적으로 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 함으로써 초기조건을 설정하였다<sup>(9)</sup>.

Fig. 1과 Table 1 은 실험에 사용된 시험편의 형상 및 종류를 나타내고 있다.

## 3. 실험 방법

### 3.1 흡습실험

CFRP 복합재는 금속에 비해 가벼운 중량으로 비강도·강성이 우수하여 여러 분야에서 널리 사용되고 있지만, 고온·고습이 가해지는 열습환경과 충돌하중을 받는 가혹한 환경에서는 그 뛰어난 강도 및 강성을 보장받기란 매우 어렵다.

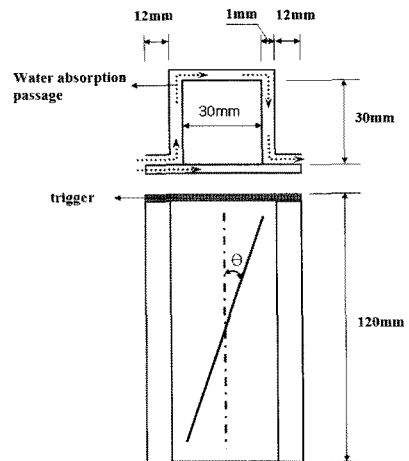


Fig. 1 Hat shaped sectional members

Table 1 Type of Specimen

Angle No.	Stacking Composition	Experiment Condition	
15°	[+15°/-15°] <sub>4</sub>	[NH] Non hygrothermal	[H] hygrothermal
45°	[+45°/-45°] <sub>4</sub>		
90°	[90°] <sub>8</sub>		
90°/0°	[90°/0°] <sub>4</sub>		
0°/90°	[0°/90°] <sub>4</sub>		

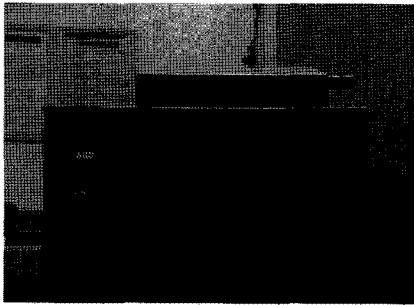


Fig. 2 Hot waterbath

따라서 본 연구에서는 구조부재의 설계 목적상 장시간 사용될 것을 가정하여 여러 가혹한 환경 중 고온·고습 환경 하에서의 CFRP 복합재의 강도저하를 평가하기 위하여 100℃까지 설정 가능한 member사의 Waterbath(WNB 7-45)를 이용하여 시험편에 수분이 완전흡수상태에 도달 할 때까지 흡수실험을 실시하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 항온항습기인 waterbath이다.

실험 중 시험편 내부에 흡수되는 수분의 증가를 관찰하기 위하여 매 72시간 마다 1/10,000g까지 측정이 가능한 정밀 전자저울을 사용하여 시험편의 수분 흡수량을 측정 한 후 Fick's law에 따른 수분 흡수를 공식 식(1)을 이용하여 흡수 거동에 따른 흡습률을 측정하였다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서 M은 시험편의 흡습률,  $W_m$ 은 수분이 흡수된 시험편의 무게,  $W_d$ 는 수분이 흡수되기 전의 시험편의 무게이며, 이를 백분율로 환산함으로써 수분흡습률 M을 얻을 수 있었다.

### 3.2 충격 압쇄실험

충격압쇄실험은 Fig. 3의 공기압 수직식 충격장치를 사용하여 시험편이 흡수할 수 있는 에너지의 범위 내에서 자유낙하를 실시함으로써 Fig. 4와 같은 수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않았던 시험편의 하중 및 변위를 측정할 수 있었다.

충격하중의 계산은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 스트레인게이지(KYOWA, KFG-5-120-C1-11L1M2R)를 Full bridge 방식으로 부착하여 굽힘과 비틀림의 영향을 제거하도록 설정하여 실시하였으며, 변위의 측정은 압쇄가 진행하

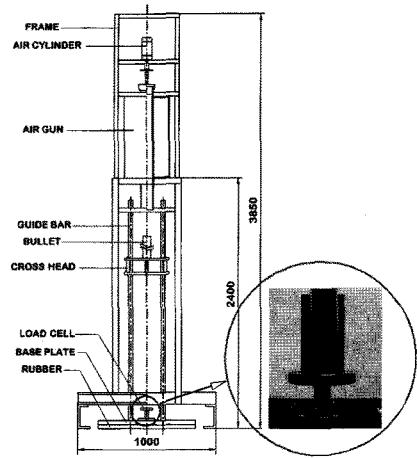


Fig. 3 Impact setup

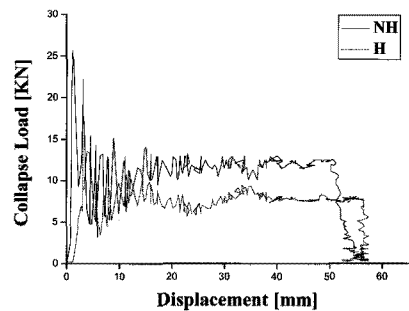


Fig. 4 Load-displacement curve

고 있는 사이 시험편의 변위량과 크로스헤드의 이동량이 일치한다고 보고 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식 변위계(Zimmer OHG사, 100F)로 비접촉 계측하여 변위 데이터를 구하였다.

측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압쇄가 진행되는 동안의 하중-변위선도를 나타냄으로써 흡수 에너지  $E_a$ , 전체흡수에너지  $E_T$ , 및 시험편의 변형된 길이  $\delta$ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압쇄길이 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압쇄되었다고 가정하여 식 (2)와 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압쇄 효율의 역수<sup>(10)</sup>를 사용하여 식(3)을 이용한 총

흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_0$  는 압계효율,  $L$ 은 시험편의 길이,  $\delta_f$  는 충격압 계 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (3)$$

여기서,  $E_T$  는 전체흡수에너지,  $E_a$ 는 흡수에너지 이다.

로드셀 위의 시험편이 흡수하는 이론적인 충격에너지  $E_i$  는 식(4)와 같이 크로스헤드의 위치에너지와 같으므로 시험편에 따라 시험편의 압계형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지 419.44J를 가하였다. 하지만 적층각이 90°의 경우 419.44J의 충격에너지를 가했을 경우 시험편이 파괴가 되어 데이터가 획득되지 않았다. 때문에 해석에 필요한 충분한 압계가 이루어지도록 341.04J의 충격에너지를 가하였다.

$$E_i = mgh \quad (4)$$

여기에서  $E_i$ 는 충격에너지,  $m$ 은 크로스헤드의 질량,  $g$ 는 중력 가속도,  $h$ 는 시험편에 가해진 크로스헤드의 높이이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 수분 흡습 거동

수분의 흡습은 약 2500시간이 경과되면서 수분흡습률 곡선의 경사가 완만해 짐을 알 수 있었으며, 이를 시험편 내부의 수분 포화상태로 보고 흡습실험을 종료하였다.

Fig. 5(1)은 적층 변화에 따른 수분흡습의 변화를 고찰하기 위하여 각 시험편의 적층 형상을 도식화 하였으며, Fig. 5(2)는 시간 경과에 따른 시험편 내부의 수분흡습률의 그래프를 나타내었다.

Fig. 5(2)의 CFRP 모자형 단면부재의 수분 흡습률을 측정한 결과 시험편의 종류와 초기 시험편 제작 과정에서의 차이로 인하여 초기 수분 흡습의 증가치의 차이가 발생하였지만, 시간이 경과함에 따라 대부분 시험편에서의 수분흡습은 일정하게 평가됨을 알 수 있었다. 실험 초기부터 수분 흡습률이 0.5%가 될 때 까지는 수분의 흡수가 급격하게 증가하는걸 알 수 있었으며, 이때까지 경과되었던 시간은 약 200

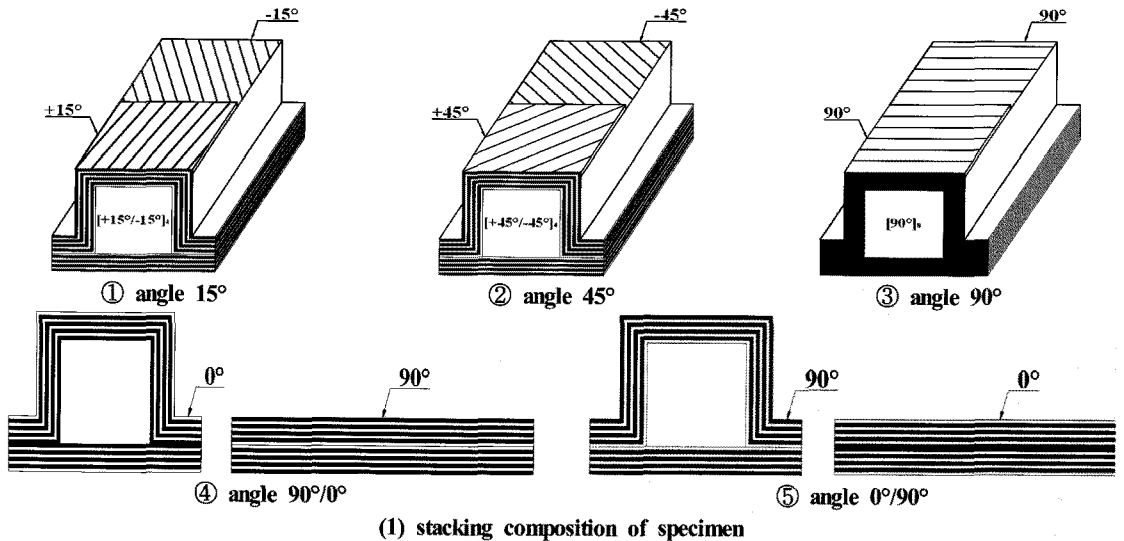
시간이 소요가 되었다. 이후 수분흡습률이 약 1.0%에 가까워지는 400시간이 경과되면서 점차 수분흡습률의 증가가 완만해짐을 알 수 있었으며, 경과 시간 또한 현격하게 증가함을 알 수 있었다. 그리고 약 2000시간이 경과된 시점에야 비로써 시험편 내부의 수분이 포화상태가 됨을 알 수 있었으며, 약 2500시간이 경과되면서 모든 시험편에서 수분흡습률의 증가는 거의 일정하게 나타남을 알 수 있었다.

시험편 내부로 수분의 흡수는 시험편의 섬유방향이 수분에 노출되는 방향으로 관찰할 때 90° 이하의 섬유 배향, 즉 +15°, -15°, +45°, -45°, 0°의 섬유배향에서에서 수분흡습률이 이루어짐을 알 수 있었으며, 특히 0°의 적층 방향의 경우에는 초기에 수분의 흡수가 크게 발생하여 시간이 지남에 따라서 수분의 흡수가 평형을 이룰 때까지의 수분 흡습률의 수치 또한 높음을 알 수 있었다. 시험편의 단면부분 보다는 플렌지 부분에 수분의 흡수가 가장 큼을 알 수 있었다.

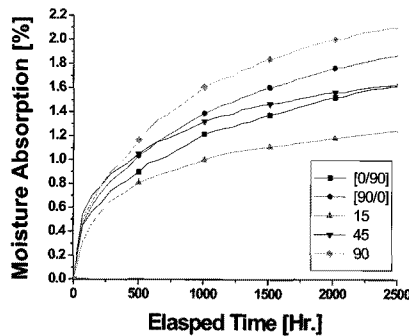
수분 흡습 증가량이 가장 큰 시험편은 90°의 적층각을 가지고 있는 시험편임을 알 수 있었다. 이는 수분이 가장 많이 흡수될 수 있는 시험편 측면, 즉 플렌지 부분에서 90°의 시험편은 모자형과 평판이 각각 8ply의 sheet로 모두 적층방향 0°를 가짐으로써 수분에 완전히 노출되었기 때문으로 사료된다.

또한 수분흡습의 증가가 가장 작은 시험편은 적층방향 [+15°/-15°]<sub>4</sub>을 갖는 시험편으로써, 플렌지 부분에는 적층각도가 점차 90°에 가까게 구성이 됨으로써 수분의 흡수가 가장 많이 발생하는 플렌지 부분 보다는 시험편 단면 부분에서 수분의 흡수가 용이하였기 때문에 다른 시험편의 적층각도에 비해 수분의 흡수가 낮았던 결과로 사료가 된다.

[0°/90°]<sub>8</sub> 시험편과 [+45°/-45°]<sub>4</sub> 시험편은 2500시간이 경과가 되는 시점에서는 수분 흡습률이 거의 일치함을 알 수 있었다. 다만 초기 0.5%, 약 200시간이 경과되는 시점부터 수분 흡습 증가량이 다소 차이가 남을 알 수 있었는데, 이는 수분 흡수가 가장 많이 발생하는 부분인 플렌지 부분에서 45°의 각도 보다는 0°의 각도가 수분흡습률이 많이 발생하는걸 알 수 있는 부분이라 사료가 된다. 또한 시험편의 최외각층 각도만 다르게 적층하였던 [0°/90°]<sub>4</sub> 시험편과 [90°/0°]<sub>4</sub>의 시험편의 경우 [0°/90°]<sub>4</sub>로 적층한 시험편이 수분흡습 증가량이 낮음을 알 수 있었는데, 이는 [0°/90°]<sub>4</sub> 시험편의 최외각층 섬유 적층 각도는 수분 흡수가 가장 많이 발생하는 플렌지 부분에서 90°를 이루고 있고, 단면부분에 수분이 흡수될 수 있는 적층각도 0°를 이루고 있기 때문에 같은 적층각도 배향 일지라도 수분의 흡수에서는 차이가 나타남을 알 수 있었다.



(1) stacking composition of specimen



(2) Moisture absorption rate according to elapsed time of specimen

Fig. 5 Stacking composition and moisture absorption curve

#### 4.2 압괴형상

수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않았던 시험편에 대해 충격압괴실험을 실시한 결과 모든 시험편에서 Fig. 6의 Farley and Jones가 정의한 횡방향 전단, 라미나(Laminar) 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태의 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

수분이 흡수되었던 시험편들은 초기 압괴 시 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 동일한 취성파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴 보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압괴가 진행됨을 알 수 있었다. Fig. 7은 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 수분이 흡수된 시험편의 압괴실험 후 얻을 수 있었던 압괴형상을 나타낸

그림이다.

수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 섬유간의 층간 파괴보다는 굽힘이 발생하는걸 알 수 있었다. 특히 90°의 경우에서는 최외각 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드가 주를 이룸을 관찰할 수 있었으며, 45° 시험편의 경우 또한 횡방향으로 접히는 압괴모드와 취성파괴 모드가 혼합됨을 관찰할 수 있었다. 이는 수분이 흡수됨으로 인하여 시험편 내부의 탄소강화섬유와 에폭시 사이의 결합력이 완화가 되면서 압괴시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루고 있는 걸 알 수 있었다. 그로인해 수분이 침투되지 않은 시험편 보다 안정적인 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

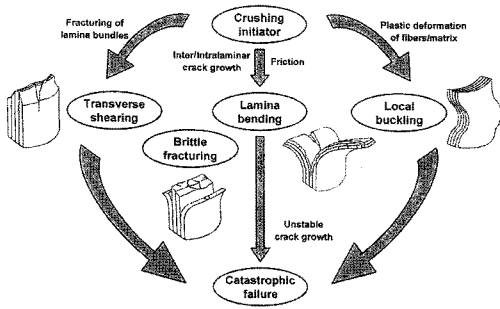


Fig. 6 Crushing process of continuous fiber reinforced composite members

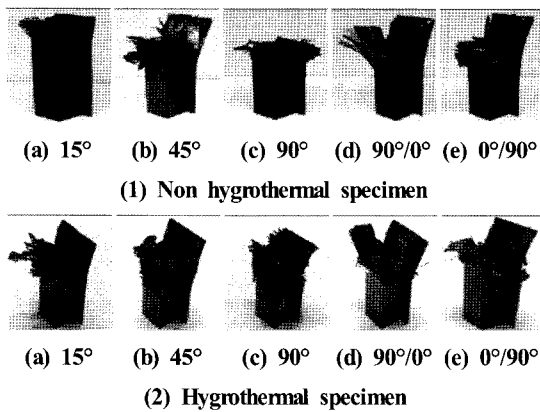


Fig. 7 The collapse shape of NH and H CFRP specimen

### 4.3 압궤특성

수분의 침투로 인한 CFRP 박육부재의 강도저하를 알아보기 위해 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 대해 충격압궤실험을 실시한 결과 Fig. 8~Fig. 10의 결과를 얻을 수 있었다.

충격압궤실험결과 평균하중보다 최대하중에서 강도의 감소가 현격함을 알 수 있었다. 이는 시험편 내부에 수분이 흡수됨으로써 초기 하중을 견딜 수 있는 부분인 시험편 끝단에서의 계면의 결합력 약화가 그 원인인 것으로 사료가 된다.

15°와 45° 및 90°의 시험편의 경우 최대하중의 감소는 약 50%정도로 나타났으나, 0°/90° 시험편과 90°/0° 시험편의 경우 약 70% 까지의 강도저하를 보였다. 이는 15°와 45° 시험편에 비해 수분의 흡수가 용이하였고, 그에 따른 수분 흡수량 또한 많았기 때문으로 사료가 된다. 다만 90° 시험편의 경우 수지와 매트릭스의 특성상 초기 하중에 견딜 수 있

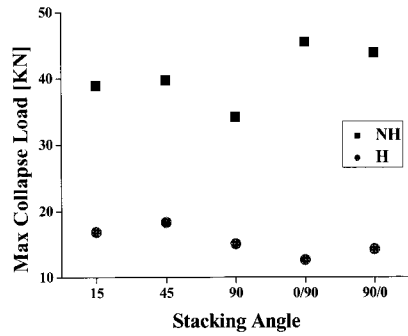


Fig. 8 Relationship between mean collapse load and variation stacking angle

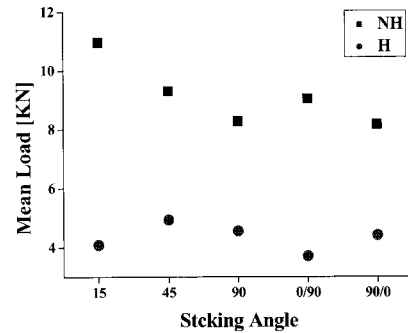


Fig. 9 Relationship between max collapse load and variation stacking angle

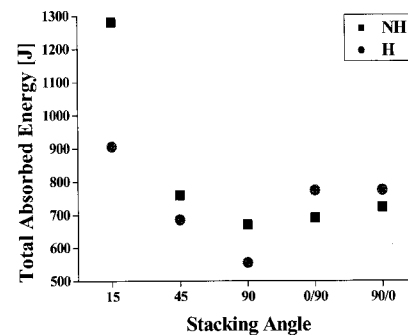


Fig. 10 Relationship between absorbed energy and variation stacking angle

는 여건이 충분하였기에 최대하중의 감소치가 낮았던 것으로 사료가 된다.

평균하중의 경우 대부분의 시험편이 약 50%의 강도 저하를 보이는데 알 수 있었다. 단 90도 시험편의 경우 최대하중 이후 집힘모드를 갖는 안정적인 압괴모드가 나타났으며, 수분의 흡수로 인하여 계면과 수지와의 연성화로 인하여 보다 더 안정적인 압괴가 발생함으로써 평균하중의 감소치가 가장 낮았던 것으로 사료가 된다.

최대하중 및 평균하중과는 달리 흡수에너지에서는 약 20%정도의 저하만이 발생함을 알 수 있었다.

이는 수분이 CFRP 복합재 내부에 흡수됨으로써 수지의 연성화 및 계면간의 결합력을 약화시켜 취성파괴모드 보다는 굽힘과 접힘 및 주름의 발생을 유도함으로써 점차 흡수에너지는 증가하는 경향을 보였다.

특히, 앞서 선행된 정적압괴시험에서의 경향과 유사하게 0°/90°, 90°/0° 시험편에서는 흡수에너지의 증가가 나타남을 알 수 있었다.

본 실험결과 수분의 흡수는 계면간의 결합력을 약화시키고 수지의 연성화를 초래함으로써 초기 하중을 받았을 때의 계면의 결합력을 기대할 수는 없지만 점차, 수지의 굽힘과 접힘이 주름 이루면서 안정적인 압괴가 발생하게 됨을 알 수 있었다.

## 5. 결론

CFRP 박육부재에 대해 수분 흡수 거동 및 수분 침투로 인한 강도 저하를 알아보기 위해 흡습 실험과 정적 압괴실험을 병행하여 수행한 후 그 결과를 비교 및 고찰을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 적층각도 변화에 따른 수분흡수 거동을 살펴본 결과 90°의 적층각도를 갖는 시험편이 초기 흡습률이 크게 증가하는 경향을 보인 반면, 15°적층각을 갖는 시험편이 흡습률이 가장 저하됨을 알 수 있었다. 이는 탄소섬유 복합재에 수분이 흡수되는 조건으로는 첫째 수분의 방향과 탄소섬유 방향이 일치하는, 즉 0°의 적층배향을 이루고 있을 때이며, 두 번째로는 주위환경의 온도에 얼마만큼 영향을 받느냐 이다. 이는 에서 보다 잘 나타나는 현상으로 사료가 된다. 또한 대부분의 시험편들이 0.5%에서 1.0% 구간 사이에서 흡습률 증가가 둔화되는 걸 알 수 있었다.
- (2) 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않은 시험편의 압괴 형상을 살펴본 결과 수분의 침투로 인해 CFRP 내부의 열화현상의 발생으로 인하여 계면간의 결합력

또한 약해짐을 알 수 있었고, 시험편의 압괴 형상 또한 수분이 흡수된 시험편의 경우가 보다 더 안정적인 압괴모드를 이루는 것을 알 수 있었다.

- (3) 충격실험결과 최대하중에서는 수분의 흡수로 인한 강도의 감소가 최대 70%까지 발생함으로써 수분의 흡수는 최대하중에서 가장 큰 감소치를 보이는 것을 알 수 있었다. 평균하중과 흡수에너지에서는 최대하중에서와는 달리 강도의 감소치가 낮은 걸 알 수 있었는데, 수분의 흡수로 인한 안정적인 압괴가 주요 원인인 것으로 판단이 되며, 특히 흡수에너지에서의 0°/90° 시험편과 90°/0° 시험편에서의 강도의 감소보다는 증가치를 보이는 것이 그 판단 근거로 사료가 된다.

## 후 기

이 논문은 2009년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Ma, C. C. M., Huang, Y. H., and Chang, H. J., 1991, "Hygrothermal Effect on the PEEK/CF and PPS/CF under Impact Loading(I)," *ANTEC*, Vol. 46, pp. 2092~2096.
- (2) Karasek, M. L., Strait, L. H., Amateau, M. F., and Runt J. P., 1995, "Effect of Temperature and Moisture on the Impact Behavior of Graphite/Epoxy Composites : Part 1 - Impact Energy Absorption," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 3~10.
- (3) Weitsman, Y., 1990, *Moisture in Composites : Sorption and Damage, Fatigue of Composite Materials*, Elsevier Science Publishers B, New York, pp. 384~429.
- (4) Ishai, O. and Shragai, 1990, "Effect Impact of Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beam," *Composites Struct.*, Vol. 14, No. 4, pp. 310~337.
- (5) Choi, H. S., Ahn, K. J., and Nam, J. D., 1998, "Hygroscopic Behavior of Unidirectional Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*,

- Vol. 22, pp. 1486~1500.
- (6) Sala, G., 2000, "Composite degradation due to fluid absorption," *Composites Part B*, Vol. 31, pp. 357~373.
- (7) Yuichiro, A., Yamada, K., and Takashi, I., 2007, "Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates," *Composites science and technology*, Vol. 68, pp. 1376~1383.
- (8) Kook, J. S., Yang, I. Y., and Adachi, T., 2000, "Characteristics of Delamination in Graphite/Epoxy Laminates under Static and Impact Loads," *Key Engineering Materials*, Vol. 183-187, pp. 731~736
- (9) Kim, Y. N, Choi, H. S., Cha, C. S., Im, K. H., Jung, J. A., and Yang, I. Y., 2000, "Influence of Stacking Sequence Conditions on the Characteristics of Impact Collapse using CFRP Thin-Wall Structures," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 24, No. 12, pp. 2945~2951.
- (10) White, M. D., Jones, N., and Abramowicz, W., 1999, "A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and doubles-hat thin-walled sections," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, No. 99, pp. 209~233.