

고온·고습 환경하에서의 압괴조건 변화에 따른 CFRP 모자형 단면부재의 강도평가

양용준*, 양인영⁺, 심재기⁺⁺

(논문접수일 2011. 08. 03, 수정일 2011. 09. 18, 심사완료일 2011. 09. 26)

Strength Evaluation of CFRP Hat-shaped Sectional Members Due to Variation of Collapse Conditions Under Hygrothermal Environment

Yongjun Yang*, Inyoung Yang⁺, Jaeki Sim⁺⁺

Abstract

CFRP composite material has the superior specific strength and rigidity compared to metallic materials, and is widely adopted in the various fields. However, CFRP composite material has the weakness in hygrothermal and crash environment. Especially, moisture ingress into composite material under hygrothermal environment can change molecule arrangement and chemical properties. In addition, interface characteristics and material component properties can be degraded. A collapse experiment has been made to research the differences of absorbed energy and deformation mode between absorbed specimens of moisture and non-moisture. As a result of this study, the effect of moisture absorption and impact loads of about 30~50% reduction in strength are shown.

Key Words : CFRP(탄소섬유 강화 플라스틱), Interface numbers(계면수), Hat shaped sectional members(모자형 단면부재), Hygrothermal(열습), Moisture absorption(수분흡수), Impact collapse(정적압괴), Absorbed energy(흡수에너지)

1. 서론

탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 이하 CFRP)은 기존의 금속재료에 비해 가벼운 중량을 가지면서 기계적 특성, 내열성 및 내마모성 등의 강도특성이 우수하여 최근 수송기계 등의 친환경설계에 그 적용범위를 넓혀가고 있다^(1,2).

하지만 CFRP는 충격하중이나 수분의 흡수와 같은 가혹한 환경하에서는 매우 취약한 단점을 가지고 있으며, 우수한 기계적 특성을 기대할 수 없게 된다.

특히, 수분이 흡수되는 열습 환경하에서는 수분이 연성재의 역할을 수행함으로써 기계적 성질 및 화학적 성질을 변화시키고 그로 인해 강도의 저하가 발생하게 된다⁽³⁻⁵⁾.

이제까지 CFRP 복합재의 강도저하에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔지만 실제 수송기계의 구조부재의 형상을 갖는 일정한 형상을 갖는 CFRP 복합재에 대한 연구는 미흡한 실정이다⁽⁷⁻¹³⁾.

따라서 본 연구에서는 다양한 적층구성을 갖는 CFRP 복합재가 가혹한 환경인 열습환경에 장시간 노출되어질 때의 흡수 거동과 강도평가를 실험적으로 설정한 후 고찰하였으며, 수분

* 동강대학교 소방안전관리과

+ 조선대학교 기계설계공학과

++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (jgsim@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 조선대학교

의 흡수로 인한 강도의 저하를 파악함으로써 실제 구조부재의 설계에 적용 가능한 데이터를 얻고자 하였다.

2. 시험편 제작

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 설계 시 차체의 충격에너지 흡수 목적으로 사용되어지고 있는 전면부 사이드부재의 형상인 모자형상을 이루고 있으며, 가혹한 환경하에서 다양한 적층방법을 통한 보강방법을 찾기 위해 시험편 축방향을 중심으로 CFRP 프리프레그시트를 탄소섬유의 배향각도가 90°와 0°를 갖게끔

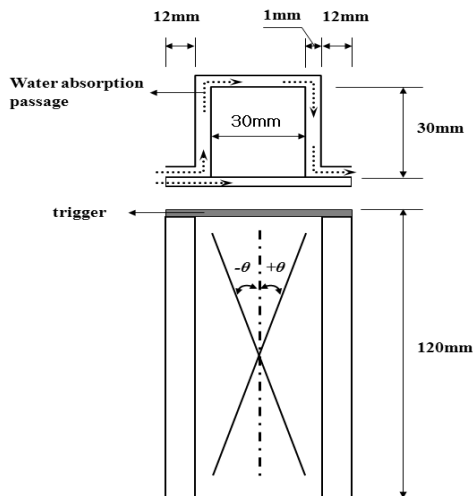


Fig. 1 CFRP hat-shaped sectional member

Table 1 Types of CFRP hat-shaped sectional members

Specimen		Experiment Condition	
2 interface	Outer angle 90°, 0°	Hygrothermal	Static collapse Impact collapse
3 interface			
4 interface			
6 interface			
7 interface			

모자형과 평판을 각각 8ply로 교차해서 적층하였고 Photo. 1의 오토클레이브를 이용한 고온·고압의 성형을 통해 제작하였다.

시험편의 형상으로는 가로, 세로 각각 30mm의 단면 크기를 가지고 있으며 플랜지의 폭은 12mm, 압괴실험 시 오일러좌굴이 발생하지 않는 120mm의 길이로 제작하였으며, 압괴실험 중 일률적인 변형을 유도하기 위하여 하중을 받는 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 하였다⁽¹⁴⁾.

실험에 사용된 시험편의 종류로는 시험편 최외각층의 변화에 따른 흡습거동 및 압괴특성을 살펴보기 위하여 각각 90°, 0°의 최외각을 갖는 2계면, 3계면, 4계면, 6계면 및 7계면 시험편으로 분류하였다.

Fig. 1에는 본 연구에 사용된 시험편의 형상 및 크기를 나타냈다. Table 1에는 본 연구에 사용된 시험편의 종류를 나타냈다.

3. 실험방법

본 연구에서는 일반적인 환경과 가혹한 환경에서의 압괴특성 및 그에 따른 강도저하를 평가하기 위하여 실험적으로 설정된 환경하에서의 다음과 같은 실험을 실시하였다. 일반적인 환경으로는 정적압괴실험을 실시하였고, 가혹한 환경으로는 수분이 흡수되는 열습실험과 충격하중을 받는 충격압괴실험을 실시하였다.

3.1 열습실험

CFRP는 앞서 서론에서 살펴보았듯이 정적부하에서는 그 강도가 금속에 비해 매우 뛰어나지만 가혹한 환경하에서는 우수한 강도적 특성을 기대할 수 없게 된다.

특히 CFRP 내부에 수분이 흡수되어질 경우 수분으로 인한 계면간의 결합력 약화 및 화학적 반응으로 인한 섬유 열화현상이 발생함으로써 인하여 구조부재의 사용 시 매우 취약함을 보이게 된다.

따라서 본 연구에서는 시험편의 다양한 적층방법을 통한 열습환경하에서의 흡습거동을 살펴보았다.



Photo. 1 Autoclave



Photo. 2 Hot waterbath

열습실험은 Photo. 2의 항온항습기(Waterbath WNB 7-45)를 이용하여 CFRP의 매트릭스 변화가 발생하지 않으면서 차량의 전면부에 사용되어질 경우를 가정한 60°C의 온도로 시험편에 수분의 포화상태가 될 때까지 장시간 실험을 실시하였다.

CFRP 내부의 흡습거동을 파악하기 위하여 매 72시간마다 전자정밀저울을 이용하여 수분이 흡수된 시험편의 무게를 측정 후 식 (1)을 이용하여 흡습률을 구하였다.

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

여기서, M : 흡습률(%)

W_d : 흡습전의 재료의 무게(g)

W_m : 흡습후의 재료의 무게(g)

3.2 정적압괴실험

일반적인 환경에서의 사용을 통한 압괴특성을 파악하기 위하여 UTM을 이용한 정적압괴실험을 실시하였다.

실험방법으로는 변형률 속도의 영향을 받지 않는 10mm/min의 속도로 시험편 전체길이의 50%인 60mm까지 압괴실험을 실시하였다.

압괴실험을 실시한 후 Fig. 2와 같은 하중-변위선도를 얻을 수 있었으며, 하중변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 흡수에너지로 보고 식 (2)를 이용하여 흡수에너지를 구할 수 있었다.

$$E_a = \int_{L_0}^L F dl \quad (2)$$

E_a 는 시험편에 흡수된 에너지를 나타내며, F 는 압괴하중, l 은 압괴과정에서 압괴된 시험편의 길이를 나타낸다.

3.3 충격압괴실험

충격압괴실험은 Photo. 3과 같은 수직식 공기압 충격시험장치를 이용하여 로드셀의 전압값을 브릿지를 통해 동적변형증

폭기와 파형기억장치를 거쳐 하중값을 측정하였으며, 비접촉 변위측정기를 이용하여 시험편의 변위를 측정 후 Fig. 3과 같은 하중-변위선도를 얻을 수 있었다.

측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압괴가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 나타냄으로써 흡수에너지 E_a , 전체흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 식 (3)과 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압괴 효율의 역수⁽¹⁵⁾를 사용하여 식 (4)를 이용하여 총흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (3)$$

여기서, ρ_0 는 압괴효율, L 은 시험편의 길이, δ_f 는 충격압괴 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (4)$$



Photo. 3 Impact testing device

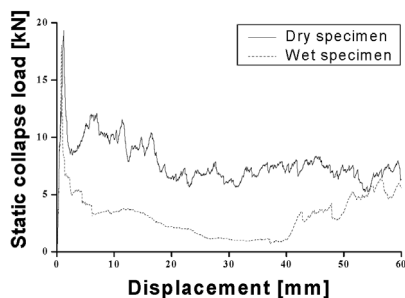


Fig. 2 Load-displacement curve of collapsed specimen (static experiment)

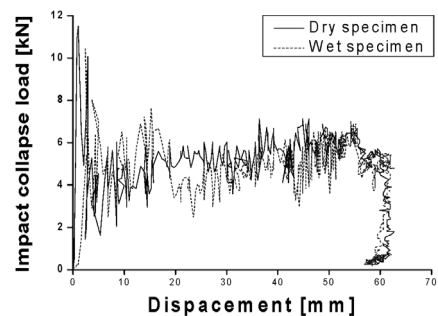


Fig. 3 Load-displacement curve of collapsed specimen (impact experiment)

로드셀위의 시험편이 흡수하는 충격에너지는 식 (5)와 같은 위치에너지로 보고 적절한 충격에너지인 419.44J를 가하였다. 시험편에 가해지는 충격에너지 E_I 는 다음과 같다.

$$E_I = mgh \quad (5)$$

여기서, m 은 크로스헤드의 질량, g 는 중력 가속도, h 는 시험편에 가해진 크로스헤드의 높이이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 흡습거동

CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동을 살펴본 결과 Figs. 4, 5에서와 같이 시간 경과에 대한 구간별 흡습률의 변화를 관찰할 수 있었다. 실험 시작 200시간이 경과할 때까지는 수분의 흡수가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었으며 이때의 흡습률은 약 0.5%가 되는 것을 알 수 있었다. 이후 흡습률이 1.0%가 되는 400시간이 경과된 시점에서부터 점차 흡습률의 증가가 둔화되는 것을 알 수 있었으며 약 2000시간이 경과되면서 부터는 흡습률의 증가는 거의 발생하지 않았다. 그리고 약 2500시간이 경과되면서 부터는 시험편의 흡습률은 일정하게 진행되는 것을 알 수 있었으며 이 시점에서 시험편 내부가 수분포화상태가 되었다고 판단하여 열습실험을 종료하였다.

열습실험을 실시한 후 시험편 내부의 흡습률을 비교해본 결과 최외각층의 변화와 계면수 변화에 따라 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편에서 흡습률의 증가치가 매우 높음을 알 수 있었다. 이는 수분이 흡수가 되는 0° 방향의 섬유배향이 시험편 단면 부분에서는 시험편의 표면과 안쪽에 4ply로 두껍게 적층되어 있고 플렌지 부분에서는 시험편 표면에 가깝게 4ply씩 적층되어 있기 때문에 그 흡습률 또한 다른 시험편들에 비해 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 이와 반대로 같은 적층구성이지만 적층순서를 달리한 최외각층 0°의 조건을 갖는 2계면 시험편의 경우 0°방향의 섬유배향이 시험편 단면부분에서는 모자형과 평판형의 중심에 위치하면서 시험편 표면과는 멀리 떨어져 있기 때문에 그 흡습률 차이가 발생한 것으로 사료된다.

또한 최외각층 0°의 조건을 갖는 3계면과 7계면 시험편의 경우 흡습률이 높음을 알 수 있었다. 특히 3계면 시험편의 경우 시험편 단면부분에는 0°방향의 섬유배향이, 플렌지 부분에서는 90°방향의 섬유배향이 시험편 안쪽과 표면에 집중됨으로써 수분의 흡수가 가장 유리하였다고 사료된다.

따라서 열습실험 후 시험편 내부의 흡습거동을 살펴본 결과 계면수가 적을수록, 적층된 0°방향 계면의 두께가 두꺼울수록, 0°

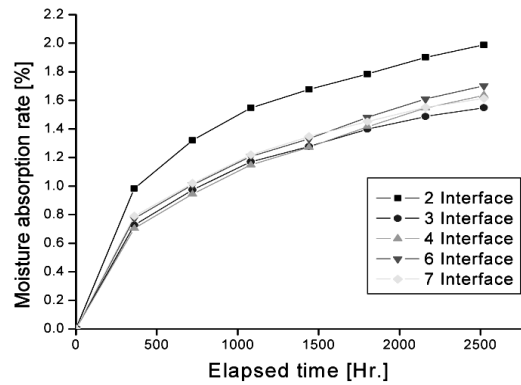


Fig. 4 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members(outer angle 90°)

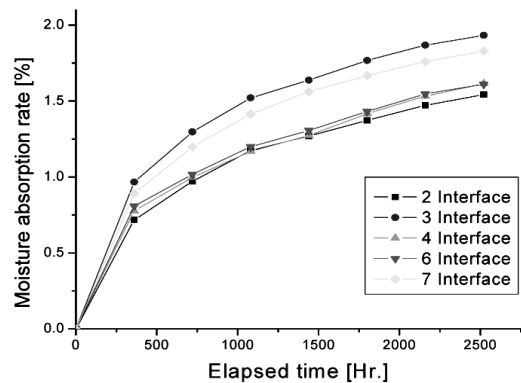


Fig. 5 Moisture absorption rate according to elapsed time of CFRP hat-shaped sectional members(outer angle 0°)

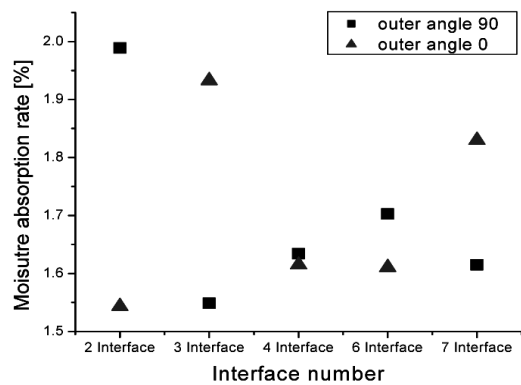


Fig. 6 Moisture absorption rate of CFRP hat-shaped sectional members for variation of outer angles

방향 계면이 시험편 표면층에서 가까울수록 흡습률의 증가가 큰 것을 알 수 있었다.

4.2 압궤모드

가혹한 환경에서의 강도저하를 비교하기 위하여 흡습된 시험편과 흡습되지 않았던 시험편에 대해 정적 압궤실험과 충격 압

괘실험을 실시한 결과 Fig. 7의 Farley and Jones⁽¹⁶⁻²⁰⁾가 정의한 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 모드가 조합된 형태 등의 압괴모드가 나타남을 알 수 있었다.

Photos 4, 5는 가혹한 환경하에서의 대표적인 압괴형상인 충격압괴실험 후의 CFRP 모자형 단면무재의 압괴형상을 나타낸

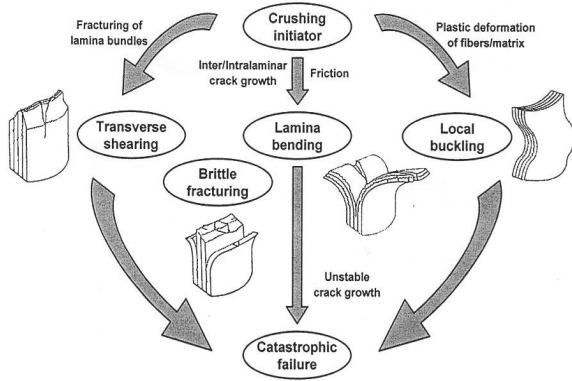


Fig. 7 Crushing process of continuous fiber-reinforced composite tubes

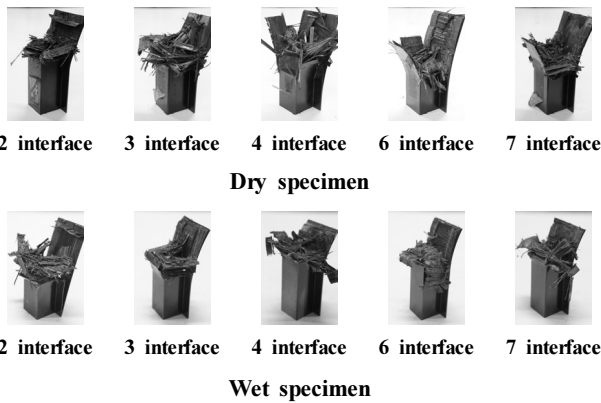


Photo. 4 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (outer 90°)

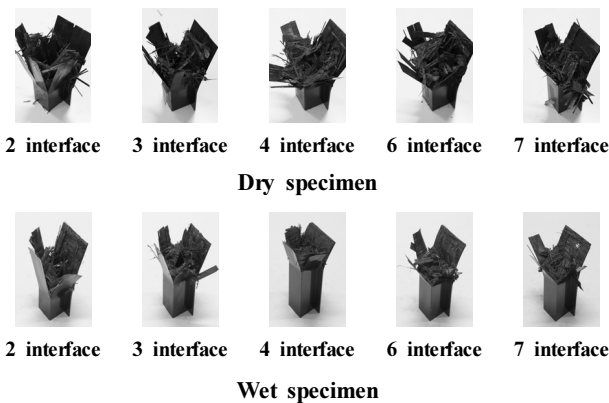


Photo. 5 Collapsed shape of CFRP hat-shaped sectional members (outer 0°)

것으로써, 무흡수 시험편과 흡수 시험편 모두 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 90°인 경우 최외층 플라이(ply) 섬유에 의한 높은 압괴특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 시험편 모서리의 찌어짐을 관찰할 수 있었으며, 최외각층이 0°인 경우 최외층 플라이 섬유의 확장으로 인한 확장형 스프라인 모드가 나타났고, 시험편 내부에서는 최외층 90°에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다.

하지만 수분의 흡수로 인해 초기 압괴 시 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 동일한 취성파괴를 관찰할 수 있었지만 점차 파괴보다는 굽힘이 주를 이루면서 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압괴가 진행됨을 알 수 있었으며, 모서리의 찌어짐 또한 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

4.3 압괴특성

흡수유무에 따라 정적압괴실험과 충격압괴실험을 실시한 결과 Figs. 8~13의 압괴특성을 관찰할 수 있었다.

Figs. 8~10의 정적압괴특성을 살펴본 결과 계면수가 증가함에 따라 최대하중과 평균하중 및 흡수에너지가 증가하는 경향을 알 수 있었다. 또한 수분의 흡수로 인한 압괴특성을 살펴본 결과 수분의 흡수로 인하여 무흡수 시험편에 비해 저하의

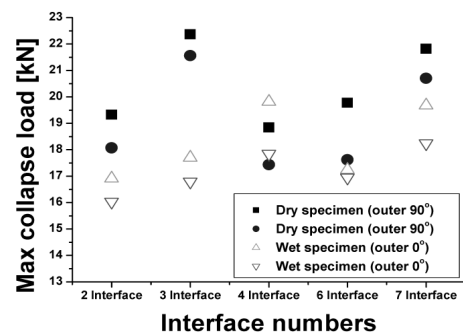


Fig. 8 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (static experiment)

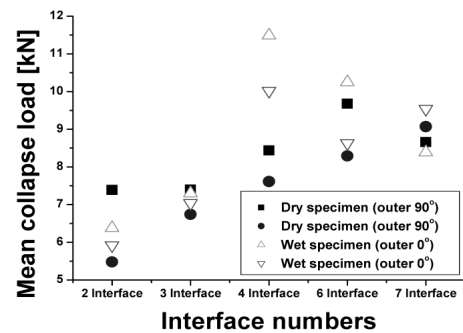


Fig. 9 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (static experiment)

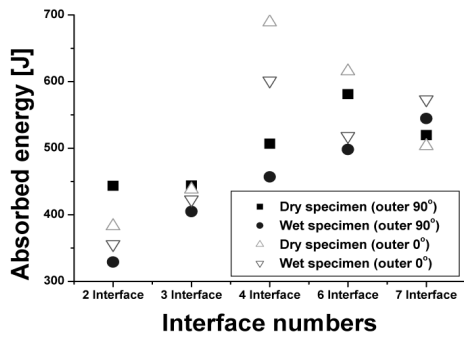


Fig. 10 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (static experiment)

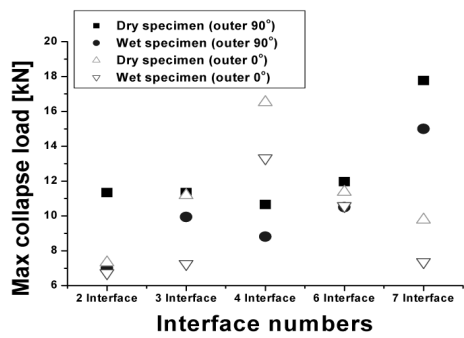


Fig. 11 Relationship between maximum collapse load and variation interface numbers (impact experiment)

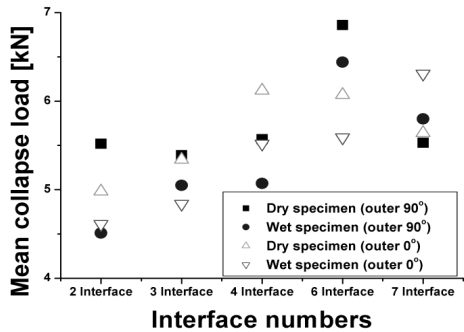


Fig. 12 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (impact experiment)

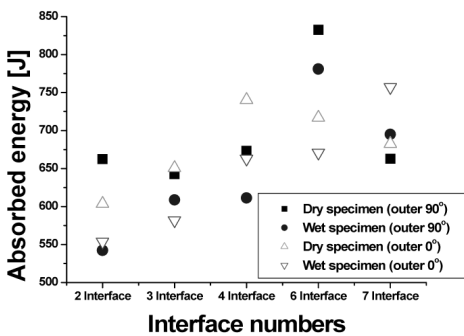


Fig. 13 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (impact experiment)

경향을 보였지만 계면수 증가에 따른 압괴특성은 수분이 흡수되지 않았던 시험편의 압괴특성과 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

하지만 7계면 시험편의 경우 최대하중을 제외한 평균하중과 흡수에너지에서는 감소의 경향이 나타남을 알 수 있었다. 이는 7계면 시험편의 경우 흡습률이 높기 때문인 것으로 사료된다.

또한 7계면 시험편의 경우 흡습시험편이 무흡습 시험편에 비해 최대하중에서는 감소의 경향을 보였던 반면, 평균하중과 흡수에너지에서는 증가경향이 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수로 인하여 계면이나 섬유 및 수지 등의 파괴보다는 굽힘과 접합의 발생이 그 원인인 것으로 사료된다.

Figs. 11 ~ 13의 충격압괴특성을 살펴본 결과 정적압괴특성과 유사한 경향이 나타남을 알 수 있었다.

4.4 강도저하

흡습으로 인한 압괴조건에 따른 강도저하를 살펴본 결과 정적압괴하중을 받았을 경우는 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편과 최외각층 90°와 0°의 조건을 갖는 7계면 시험편을 제외한 모든 시험편에서 약 10%~15%의 강도저하가 나타남을 알 수 있었다.

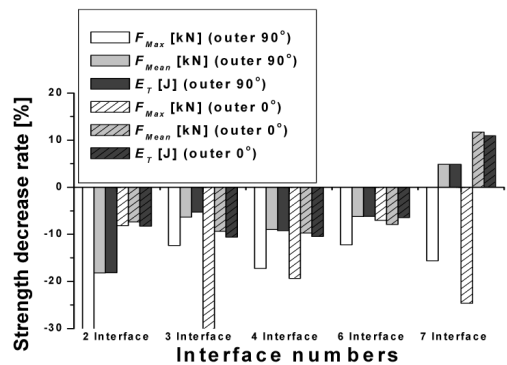


Fig. 14 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (static)

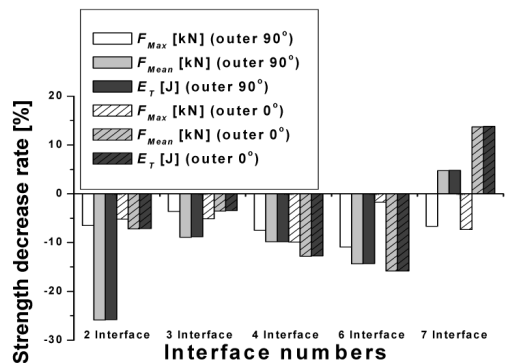


Fig. 15 Relationship between strength decrease rate and variation interface numbers (impact)

흡습률이 가장 높았던 최외각층 90°의 2계면 시험편의 경우 평균하중과 흡수에너지에서는 약 70% 이상의 강도저하가 나타남을 알 수 있었으며, 7계면 시험편의 경우는 최대하중에서는 약 10%의 강도의 저하가 나타났지만 평균하중과 흡수에너지에서는 오히려 흡습시험편이 증가하는 경향을 보였다. 이는 앞서 살펴보았던 압궤특성에서의 굽힘 등의 발생이 그 원인인 것으로 사료된다.

특히 최외각층 0°의 7계면 시험편의 경우는 흡습률이 더 높았던 이유로 강도의 증가치 또한 더 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

충격 압궤실험 후 강도의 저하를 살펴본 결과 흡습으로 인하여 최대하중은 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었다. 특히 최외각층 90°의 2계면 시험편과 최외각층 0°의 3계면 시험편의 경우 계면수 변화 시험편 중에서 흡습률이 가장 높았기 때문에 약 35% 이상 최대하중의 감소를 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 최대하중의 감소율과는 달리 평균하중에서는 낮은 감소율을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수는 시험편 끝단에서의 하중에 대한 저항을 저하시킴으로써 초기 피크하중까지는 높은 저하를 보였지만, 이후 수분이 CFRP 복합재의 성질 중 하나인 취성의 성격을 연성화 시킴으로써 안정적으로 압궤가 진행되었고 일률적인 하중 데이터의 확보로 인하여 평균하중에서는 최대하중에서의 감소치 보다 약 50% 이상의 낮은 감소율을 보이는 것을 알 수 있었다.

7계면 시험편의 경우 평균하중과 흡수에너지는 증가하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 정적 압궤특성에서 살펴보았듯이 계면수 증가와 흡습으로 인한 안정적인 압궤가 그 원인인 것으로 사료된다.

5. 결론

CFRP 모자형 단면부재가 가혹한 환경인 열습환경과 충격하중을 받는 환경에 노출되어질 때 수분 흡수에 따른 강도의 저하를 평가함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) CFRP 모자형 단면부재의 흡습거동을 살펴본 결과 실험 초기부터 흡습률 0.5% 구간까지는 흡습률의 증가가 높았지만 흡습률이 1%가 지나면서 부터는 그 증가가 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.
- (2) 수분 흡수가 용이한 적층구성은 흡수방향과 일치하는 0° 섬유구성과 0° 적층구성의 위치인 것을 알 수 있었다.
- (3) 무흡습 시험편과 흡습 시험편의 압궤 형상을 살펴본 결과 수분의 흡수가 취성의 성질을 가지는 복합재를 연성화 시킴으로써 취성파괴보다는 굽힘의 형상이 주를 이루었으며, 특히 최외각층 90°의 변화를 갖는 시험편의 경우 모서리의

찢어짐이 적게 발생함을 알 수 있었다.

- (4) 열습환경에서의 강도평가를 실시한 결과 충격하중에서의 강도저하 현상이 정적하중에서의 강도저하보다 약 50% 이상 높게 나타남을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2010년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Jcantwell W. J., and Morton J., 1985, "Detection of Impact Damage in CFRP Laminates," *Composite Structures*, Vol. 3, No. 3-4, pp. 241~257.
- (2) Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H., and Park, G. G., 2002, "Light Weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments," *Transactions of KSAE*, Vol. 10, No. 1, pp. 125~132.
- (3) Zheng Q., and Morgan R. J., 1993, "Synergistic Thermal-Moisture Damage Mechanism of Epoxies and Their Carbon Fiber Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 15, pp. 1465~1479.
- (4) 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, No. 8, pp. 1486~1500.
- (5) Sala, G., 2000, "Composite Degradation due to Fluid Absorption," *Composites Part B*, Vol. 31, No. 5, pp. 357~373.
- (6) Yuichiro, A., Ken, Y., and Takashi, I., 2008, "Effect of Hygrothermal Condition on Compression Sfter Impact Strength of CFRP Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 6, pp. 1376~1383.
- (7) Rief, C., Lindner, M., and Kromp, K., 1990, "Experimental Investigations and a Model Proposal on Damage Mechanism in a Reinforced Carbon-Carbon Composite," *Composite Materials : Testing and Design*, ASTM STP 1059, Philadelphia, Vol. 9, pp. 564~579.
- (8) Aoki, R., and Heyduck, J., 1990, "An Experimental Study of Impact-Damaged Panels under Compression Fatigue Loading," *Developments in the Science and Technology of Composite Materials, Fourth European*

- Conference on Composite Materials*, pp. 633~642.
- (9) Avva, V., 1983, "Effect of Specimen Size on the Buckling Behavior of Laminated Composites Subjected to Low Velocity Impact," *ASTM STP 808*, pp. 140~159.
- (10) Chamis, C. C., 1974, *Fracture and Fatigue Composite Materials*, Academic Press, New York, Vol. 5, pp. 94.
- (11) Arakawa K. and Takahash K., 1993, "Analysis of Mode I Interlamina Fracture Behavior in Unidirectional CFRP Laminates," *JSME(A)*, Vol. 59, No. 568, pp. 2831~2836.
- (12) Tratt M. D., 1991, "Analysis of Delamination Growth in Compressively Loaded Composite Laminates", *Composite Materials : Fatigue and Fracture*, ASTM STP 1110, Vol. 3, pp. 359~372.
- (13) Cantwell W. J., 1986, "An Assessment of the Impact Performance of CFRP Reinforced with High Strain Carbon Fibers", *Composites Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, PP. 133~148.
- (14) 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 Mechanical Engineers A*, Vol. 24, No. 12, 2945~2951.
- (15) Karasek M. L., Strait L. H., Amateau M. F., and Runt J. P., 1995, "Effect of Temperature and Moisture on the Impact Behavior of Craphite/Epoxy Composites : Part II - Impact Energy Absorption," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 11~16.
- (16) Choi, J. H., Lee, K. S., and Yang, I. Y., 2010, "Energy Absorption Characteristics of CFRP/Form Circular Members according to Interface Number," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 603~608.
- (17) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1992, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 37~50.
- (18) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1992, "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 78~89.
- (19) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1992, "Crushing Characteristics of Composite Tubes with Near-Elliptical Cross sectionals," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 1741~1751.
- (20) Hwang, W. C., Sim, J. K., and Yang, I. Y., 2011, "A Study on the Collapse Characteristics of Al/CFRP Square Structural Member for Light Weight," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 219~224.