

고온·고습 환경 하에서의 계면수 변화에 따른 CFRP모자형 단면 부재의 압괴특성

양용준*, 차천석⁺, 양인영⁺⁺

(논문접수일 2008. 11. 21, 심사완료일 2009. 5. 21)

Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped members According to Variation of Interface Numbers under the Hygrothermal Environment

Yongjun Yang*, Cheonseok Cha⁺, Inyoung Yang⁺⁺

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 members in automobiles. We have studied to investigate collapse characteristics and moisture absorption movements of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) hat shaped sectional members when CFRP laminates are under the hygrothermal environment. In particular, the absorbed energy, mean collapse load and deformation mode were analyzed for side members which absorbed most of the collision energy. Variation of CFRP interlaminar numbers is important to increase the energy absorption capability. Therefore we have made a static collapse experiment to research into the difference of absorbed energy and deformation mode between moisture absorbed specimen and non-moisture absorbed.

Key Words : CFRP(탄소섬유 강화 플라스틱), Interface Numbers(계면수), Hat shaped sectional members(모자형 단면부재), hygrothermal(열습), Moisture Absorption(수분흡수), Static Collapse(정적압괴), Absorbed Energy(흡수에너지)

1. 서론

CFRP 섬유강화 복합재료는 금속재료에 비해서 그 중량

은 최대 50%정도 가벼우면서 비강도와 비강성이 높기 때문에 현재 여러 분야에서 널리 사용되고 있는 추세에 있으며 그 내열성과 내식성 등이 뛰어나 우주항공분야나 스포츠 오

* 조선대학교 첨단부품소재공학과
++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@mail.chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동

락분야 그리고 선박 등으로 그 이용분야가 점차 확대되고 있다.

그러나 CFRP 복합재료는 여러 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 충격 부하에 대해서는 그 우수한 역학적 특성을 보장받기란 매우 어렵다⁽¹⁻⁶⁾.

또한 구조부재의 성격상 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위 환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 고온 및 고습의 상황 하에서 수분이 복합재료내로 침투함으로써 연성재의 역할을 수행함으로써 인해 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재질의 기계적 성질을 저하시킴으로써 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다. 하지만 이런 고온·고습 환경 하에서 복합재료에 대한 연구로서 CFRP 적층판 구조부재에 대한 수분흡수 거동과 잔류응력 등의 강도평가에 관한 다양한 연구들이 진행되어 왔었지만 자동차용 구조부재의 형상을 갖는 CFRP 박육부재에 대한 연구는 미흡한 실정 이었다⁽⁷⁻¹¹⁾.

따라서 현재 차량용 구조부재로 사용되고 있는 모자형 단면부재와 비슷한 형상으로 제작된 CFRP 모자형 단면부재를 제작하여 고온·고습 환경 하에서 장시간 놓여있을 때의 기계적 성질의 변화 등에 중점을 두고 연구를 하였고, 온도와 습기의 작용을 동시에 평가할 수 있는 환경을 설정하기 위해 증류수를 이용하여 항온수조에 장시간 잠기게 함으로써 고온·고습 환경을 설정하였다.

또한 본 연구에서는 자동차용 구조부재로 널리 사용되어지고 있는 박육부재의 형상으로 제작된 시험편을 사용하여 그 계면수의 변화를 달리함으로써 고온·고습 상황에서 수분흡수 거동의 변화를 알아보았고, 나아가 수분을 흡수하지 않은 시험편과 조건을 같이하여 수분침투에 따른 강도 및 흡수에너지에 대해 비교 및 고찰해 보았다.

특히 CFRP 복합재료의 계면은 매트릭스 수지에서 강화섬유로 하중이 전달되는 부분으로 복합재료의 물성을 결정하는 중요한 부분이므로 이 실험에서는 CFRP 복합재료의 계면간의 특성에 중점을 두어 실험을 실시하였고 시험편 제작시 최외각층을 달리함으로써 최외각층의 변화에 따른 강도저하에 대해 비교해 보았다.

2. 시험편

2.1 시험편의 제작

본 실험에 사용된 시험편 제작에는 일방향 CFRP Prepreg sheet(CU125NS)를 사용하였다. 시험편 제작 방법으로는 알루미늄 사각 맨드릴 위에 차량용 충돌에너지흡수 박육부재

형상을 갖게끔 모자형(□)과 평판(—)을 적층하여 제작을 하였다. 시험편의 최외각층변화를 위해 최외각층 θ 가 90°와 0°가 되도록 시험편의 축방향을 중심으로 적층하였으며, 섬유의 적층각도가 0°와 90°가 되도록 방향과 순서를 달리하여 적층함으로써 각각 2, 3, 4, 6 및 7계면의 계면수 변화를 갖는 시험편을 제작하였다.

시험편의 성형은 모자형과 평판을 각각 8ply로 제작을 한 후, 경화온도까지 고온·고압을 가하는 오토클레이브 성형으로 제작을 하였다.

2.2 시험편의 형상 및 종류

실험에 사용된 시험편의 형상은 자동차용 충돌에너지흡수 구조부재로 널리 사용되고 있는 모자형상의 단면을 갖는 박육부재의 모양으로 제작을 하였고, 실험 중 일률적인 변형을 꾀함으로써 그로인한 압괴하중 및 흡수에너지를 얻기 위한 목적으로 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 함으로써 안정적인 압괴가 되도록 초기조건을 설정하였다⁽¹²⁾.

실험에 사용된 시험편의 형상에 대해서는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 실험방법

모자형 박육부재의 시험편을 이용하여 CFRP 박육부재의 수분흡수 거동에 대해 다음과 같은 흡수실험을 실시하였고,

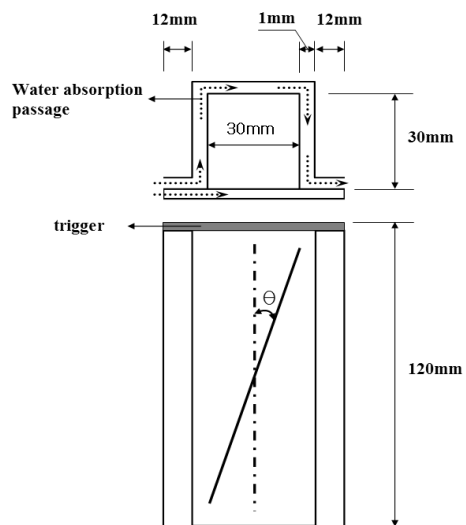


Fig. 1 Hat shaped sectional members

실험 후 수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않은 시험편들에 대해 정적 압괴실험을 수행하여 수분의 침투로 인한 CFRP 모자형 박육부재의 압괴특성을 알아보고자 하였다.

3.1 흡습실험

고강도·강성을 갖는 CFRP는 고온·고습과 충돌 환경과 같은 가혹한 조건 하에서는 그 뛰어난 강도 및 강성을 보장받기란 매우 어렵기 때문에, 가혹한 조건의 하나로써 항온항습기를 이용한 고온·고습의 환경을 설정하여 구조부재의 설계 목적상 장시간 사용될 것을 가정한 후 photo. 1의 항온항습기를 이용하여 흡습실험을 실시하였다.

온도 설정은 자동차 구조부재의 형상으로 사용될 목적으로 차량의 엔진룸 내부 온도에 근접하게 평가가 될 수 있는 온도인 60°로 설정하여 장시간 수분에 노출을 시켰으며, 매 72시간 마다 1/10,000g까지 측정이 가능한 정밀전자저울을 사용하여 시험편의 수분 흡수량을 측정한 후 Fick's law에 따른 수분 흡습률 공식 식 (1)을 이용하여 흡습 거동에 따른 흡습률을 측정하였다.

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

여기서 M 은 시험편의 흡습률, W_m 은 수분이 흡수된 시험편의 무게, W_d 는 수분이 흡수되기 전의 시험편의 무게이며, 이를 백분율로 환산함으로써 흡습률 M 을 구할 수 있었다.

3.2 정적 압괴실험

수분이 흡수된 시험편과 흡수되지 않은 시험편에 대해서 만능시험장치(UTM)를 사용하여 변형률 속도의 영향이 나



Photo. 1 Hot waterbath

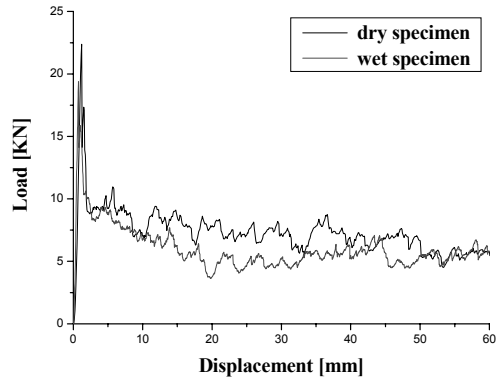


Fig. 2 Load-displacement curve of collapsed specimen

타나지 않는 충분한 속도인 10mm/min의 속도로 시험편 전체길이의 60%까지 변위를 제어하면서 정적 압괴실험을 실시하였다.

압괴실험 후 얻어진 Fig. 2와 같은 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 이를 식 (2)와 같은 식으로 적분하여 흡수에너지를 구하였으며, 시험편의 단면적으로 평균압괴하중을 나눔으로써 평균 압괴응력을 구할 수 있었다.

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

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

4. 결과 및 고찰

4.1 수분 흡습 거동

CFRP 모자형 단면부재의 수분 흡습률을 측정된 결과 시험편의 종류와 초기 시험편 제작 과정에서의 차이로 인하여 수분 흡습의 증가치의 차이가 발생하였다.

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

흡습실험을 통한 CFRP 모자형 단면부재 내의 수분흡습률을 시간의 변화에 따라 분석해본 결과 실험 초기부터 0.5% 정도의 수분이 흡습되었던 구간과 그 이후부터 완만한 경사로 꺾여지는 구간, 그리고 그 이후의 평행상태 구간으로 구

분이 됨을 알 수 있었다.

실험 초기부터 수분 흡습률이 0.5%가 될 때 까지 경과되었던 시간은 약 200시간 이었으며, 그 이후에는 수분흡습률이 약 1.0%에 가까워지는 400시간이 경과되면서 점차 수분 흡습률의 차이가 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 수분이 흡수되는 조건으로는 시험편의 섬유방향이 수분에 노출되는 방향으로 관찰할 때 0°의 섬유배향을 가질 때 수분흡수가 이루어짐을 알 수 있었으며, 시험편 적층 시 0°와 90°로 적층되는 조건에 따라서 그 흡습률의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 또한 시험편의 계면수가 적

을수록 0°방향의 시험편이 적층된 계면의 두께에 따라서 흡습률의 차이가 남을 알 수 있었으며, 시험편의 표면층에서 가까울수록 흡습의 증가가 큰 것을 알 수 있었다.

계면수의 변화에 따른 수분 흡습률의 변화를 조사한 결과 가장 흡습률이 높았던 시험편은 최외각층 90°를 갖는 2계면 시험편과 최외각층 0°를 갖는 3계면 시험편이 가장 높음을 알 수 있었으며, 최외각층 0°를 갖는 2계면 시험편의 경우 그 수분의 흡습률이 가장 낮을것 알 수 있었다. 이는 시험편의 계면수가 낮을수록, 시험편의 표면층에 가까울수록 나타나는 수분흡습의 차이로 알 수 있었다.

시간의 경과에 따른 수분 흡습률을 다음의 그래프로 나타내었다. Fig. 3은 최외각층이 90°인 경우의 수분흡습률이며, Fig. 4는 최외각층이 0°인 경우의 수분흡습률을 나타낸 그래프이다.

4.2 압괴모드

흡습실험을 통해 수분에 노출된 시험편과 노출되지 않았던 시험편들에 대해 정적압괴실험을 실시한 후 다음과 같은 압괴모드를 관찰할 수 있었다.

수분에 노출되지 않았던 시험편과 수분에 노출되었던 시험편 모두에서 층간 파괴로 인한 전단과 굽힘 모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰할 수 있었다.

또한 최외각층이 90°인 경우 최외층 플라이(ply) 섬유의 파단에 의해 높은 압괴특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다.

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.

수분이 흡수된 시험편의 경우에서도 마찬가지로 계면의 변화와 최외각층의 변화에 따른 압괴모드 또한 수분이 흡수되지 않았던 시험편에서 나타났었던 취성파괴와 같이함을 알 수 있었다.

하지만 수분의 흡수로 인해 탄소강화섬유와 에폭시 간의 결합력의 약화로 섬유와 층간 파괴보다는 굽힘이 주를 이루는걸 알 수 있었고, 더 나아가 최외각층 90°의 경우에는 최외층 섬유가 횡방향으로 접히는 압괴모드를 관찰할 수 있었다. 이는 수분이 흡수됨으로 인하여 시험편 내부의 탄소강화섬유와 에폭시 사이의 결합력이 완화가 되면서 압괴 시 취성의 성격을 갖는 섬유의 파괴나 파단보다는 연성의 굽힘과 접힘이 주를 이루고 있는걸 알 수 있었다. 그로인해 수분

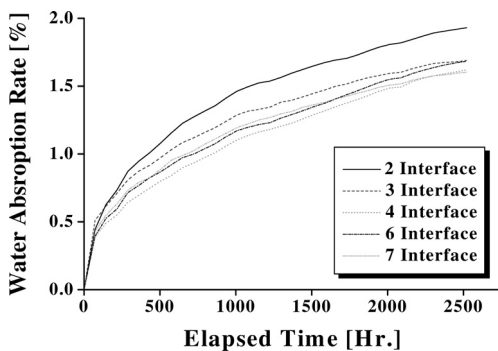


Fig. 3 Water absorption rate according to elapsed time of specimen (outer angle 90°)

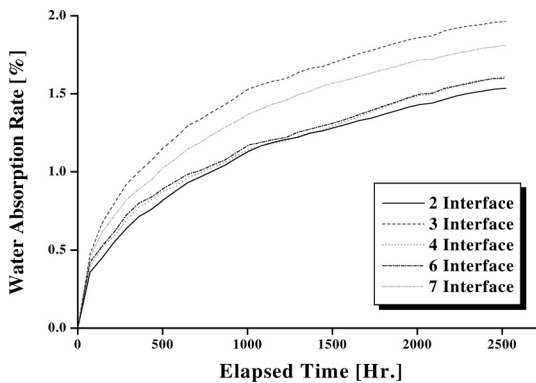
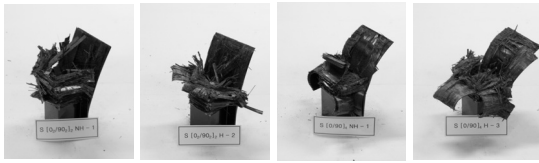
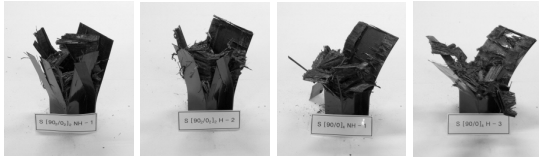


Fig. 4 Water absorption rate according to elapsed time of specimen (outer angle 0°)



(a) 3 Interface specimen (b) 7 Interface specimen
(1) Outer Angle 90° dry & wet specimen



(a) 3 Interface specimen (b) 7 Interface specimen
(2) Outer Angle 0° dry & wet specimen

Photo. 2 The shape of dry and wet CFRP specimen

이 침투되지 않은 시험편 보다 안정적인 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.

Photo. 2는 대표적인 압괴모드를 보인 3계면과 7계면을 갖는 시험편의 압괴실험 후 얻을 수 있었던 압괴형상을 나타낸 그림이다.

4.3 압괴특성

수분의 침투로 인한 CFRP 박육부재의 강도저하를 알아보기 위해 수분이 흡수된 시험편과 수분이 흡수되지 않았던 시험편에 대해 압괴실험을 실시한 결과 Fig. 4, 5, 6, 7과 같은 최외각층을 달리하여 최대하중 및 평균하중 그리고 흡수에너지 그래프를 얻을 수 있었다.

그림에서 알 수 있듯이 수분의 침투로 인하여 최대하중에서는 약 5% 내외의 감소가 있었던 반면에 평균하중과 흡수에너지에서는 그 감소가 약 12% 정도로 저하가 됨으로써 수분의 흡수는 최대하중 보다는 평균하중과 흡수에너지에 더 많은 저하요인을 갖는걸 알 수 있었다.

수분의 흡수에 따른 시험편의 압괴특성으로는 수분이 흡수되지 않았던 시험편에서는 계면수가 증가함에 따라 평균 압괴하중과 흡수에너지는 점차 증가하는 경향을 보였지만 최외각층 90°인 시험편의 경우 계면수가 6계면을 지나는 7

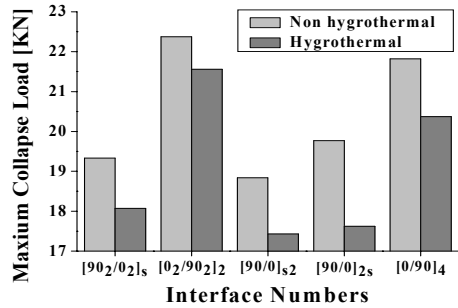


Fig. 5 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

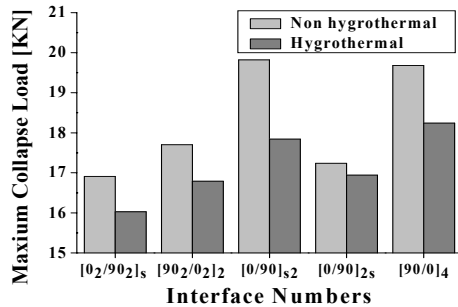


Fig. 6 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

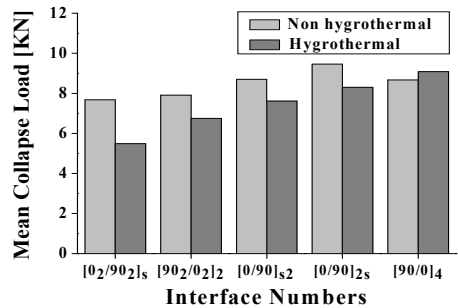


Fig. 7 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

계면 시험편 부터는 그 강도가 감소되는 경향을 보였고, 최외각층이 0°인 시험편에서는 4계면을 갖는 시험편의 경우 최외각층 90°인 경우보다 상대적인 증가치를 보이다 그 이후 다시 감소하는 경향을 보였다.

수분이 흡수된 시험편의 정적압괴실험 결과를 살펴보면 수분이 흡수되지 않았던 시험편과 비슷한 증가와 감소를 보

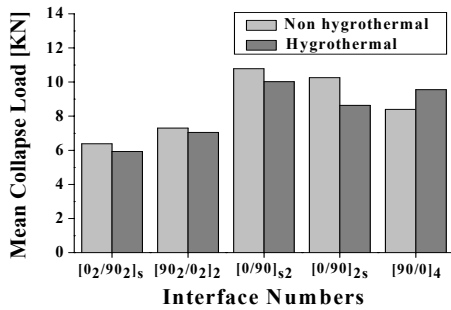


Fig. 8 Relationship between mean collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

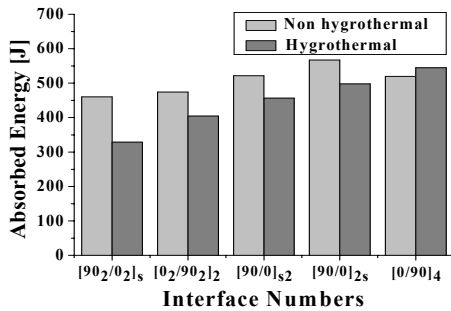


Fig. 9 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 90°)

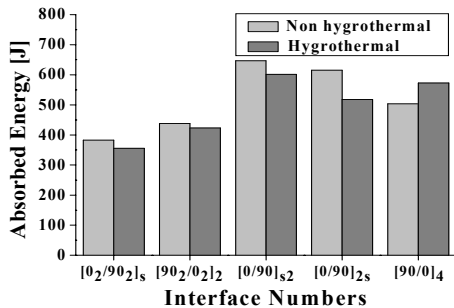


Fig. 10 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 0°)

였지만 최외각층 90°와 0° 모두 다 7계면까지 계면수의 증가에 따라 평균하중과 흡수에너지가 증가하는걸 알 수 있었다. 이는 수분으로 인해 계면과 수지간의 결합력이 약화됨으로써 최대하중은 감소가 되었지만 최대하중 이후로는 압괴 모드에서 살펴봐왔듯이 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 안정적인 압괴를 보이면서 특히 계면수가 많은 7계면의 시

험편에서는 그 계면수의 영향을 받은 결과 평균하중과 흡수 에너지가 높게 나타나는 것으로 사료가 된다.

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) 계면수 변화에 따른 수분흡수 거동을 살펴본 결과 섬유 방향이 두꺼운 즉, 계면수가 적은 2계면 시험편의 경우가 초기 흡습률이 크게 증가하는 경향을 보였으며, 그 흡습률 또한 매우 높음을 알 수 있었다. 또한 대부분의 시험편들이 0.5%에서 1.0% 구간 사이에서 흡습률 증가가 둔화되는걸 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 압괴 모드를 이루는 것을 알 수 있었다.
- (3) 정적압괴실험을 통해 그 강도를 비교해 본 결과 수분의 흡수는 최대하중 보다는 평균하중과 흡수에너지에 더 많은 저하요인을 갖는 것을 알 수 있었으며, 그 강도의 저하는 수분이 흡수되지 않았던 시험편보다 약 12% 정도가 됨을 확인할 수 있었다.

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*, 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 I - 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.* pp. 384~429.
- (4) Wnag, H. and Vu-khanh, T., 1995, “Fracture Mechanics and Mechanical of Impact-Induced Delamination in Laminated Composites,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 2, pp. 156~179.
- (5) Chllenger, K. D., 1986, “The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composite,” *A Workshop Summary, Composite Structure*, Vol. 6, pp. 295~318.
- (6) Ishai, O. and Shragi, 1990, “Effect Impact of Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beam,” *Composites Struct.*, Vol. 14, No. 4, pp. 310~337.
- (7) 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.
- (8) G. Sala, 2000, “Composite degradation due to fluid absorption,” *Composites Part B*, Vol. 31, pp. 357~373.
- (9) Yuichiro, A., Ken, Y., Takashi I., 2007, “Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates,” *Composites science and technology*, Vol. 68, pp. 1376~1383.
- (10) Lool, 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, 731~736.
- (11) Im, K. H. and Yang, I. Y., 2000, “A Study on Effects to Residual Fatigue Bending Strength of Orthotropy CFRP Composite Laminates under High Temperature and Moisture,” *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 8, No. 6, pp. 247~258.
- (12) 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.