

다양한 열습환경하에서 최외각층 변화에 따른 CFRP 모자형 부재의 압괴특성

양용준^a, 황우채^b, 양인영^{b*}

Collapse Characteristics of CFRP Hat Member with Outer Laminated Angle Changes under Hygrothermal Environment with Temperature Changes

Yongjun Yang^a, Woochae Hwang^b, Inyoung Yang^{b*}^a Dep. of Fire Safety Management, College of Dongkang, 50, Dongmun-daero, Buk-gu, Gwangju, 500-714, Republic of Korea^b Dep. of Mechanical Design Engineering, University of Chosun, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	17	July	2013
Revised	26	March	2014
Accepted	6	May	2014

Keywords:

CFRP
Hygrothermal
Moisture absorption
Outer laminated angle
Static collapse
Absorption energy

ABSTRACT

Currently, CFRP composites are rapidly replacing steel plates, as they are lighter, stronger, and more elastic; however, they are poorly suited to hygrothermal and impact-collapsed environments because moisture can alter their molecule arrangement and chemical properties. In this study, environments are experimentally simulated in order to investigate changes in the moisture absorption inside a CFRP composite and to determine its weakest point. Moreover, changes in the moisture absorption ratio at temperatures of 60°C and 80°C are studied and compared in order to understand how changes in temperature affect moisture absorption inside CFRP composites. Results show that moisture absorption leads to a strength reduction of around 50%. In addition, the moisture absorption rate inside CFRP composites is shown to change rapidly with increasing temperature. Accordingly, it showed that the change in matrix also has a weak point.

1. 서론

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 금속재료에 비해 20~50% 정도 가벼우면서 그 강도 및 강성 등이 매우 우수하여 기존의 구조부재에 대해 약 10~15%의 경량화 설계가 가능하여 우주항공 분야를 비롯한 자동차 산업 및 선박 산업 등에 널리 사용되어지고 있으며, 점차 활용분야가 증가하고 있는 추세에 있다^{1,2)}.

하지만 금속재료와는 달리 섬유와 기지간의 정량적인 하중의 전달을 측정하기가 매우 어려우며 충격하중을 받는 경우 계면의 파단 및 그 압괴메커니즘이 매우 복잡하여 예측하기가 어렵다.

특히 섬유강화 복합재인 CFRP는 온도와 습기가 작용하는 환경 하에서는 섬유에 수분이 흡수됨으로써 계면간의 결합력이 현저하게 저하되는 현상이 발생하여 구조부재로서의 기계적 특성이 크게 감소되는 경향이 나타난다³⁻⁵⁾.

기존의 연구로는 GFRP에 대한 흡수상태에서의 잔류강도 저하 및 CFRP 적층판의 인장강도 등을 고찰한 연구결과가 대부분 이었고 일정한 형상을 갖는 CFRP 구조부재에 대한 흡수거동 및 강도평가와 적층방법에 따른 설계데이터 고찰에 대한 연구는 미비하였다⁶⁻⁹⁾.

따라서 본 연구에서는 차량의 사이드부재로 사용되어질 것을 가정하여 차량용 구조부재 형상인 모자형 단면을 갖는 시험편을 적층

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7170

Fax: +82-62-222-7705

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

순서 및 최외각층 변화에 따라 제작하였다.

또한 CFRP 복합재가 가혹한 환경하에서 구조부재로 사용되어 질 것을 가정하여 실험적으로 고온고습환경을 설정한 후 온도변화에 따른 복합재 내부의 흡습 변화 및 그에 따른 압계특성을 고찰함으로써 시험편 제작에 있어 유용하게 사용 가능한 데이터를 얻고자 하였다.

2. 시험편

본 연구에서는 대표적인 경량화 재료인 CFRP 섬유강화 복합재료를 사용하여 실제 차량에 사용되는 모자형 사이드 부재 형상의 1/4 크기로 제작하였다. 시험편 제작에는 한국화이버(주) 일방향 CFRP Prepreg sheet (CU125NS)를 사용하였으며, 사각의 알루미늄 맨드릴 위에 섬유 방향이 0°와 90°가 서로 교차되게 적층함으로써 2계면, 3계면, 4계면, 6계면, 7계면의 계면수 변화를 설정하였으며 고온-고압의 오토클레이브 성형 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위해 다이아몬드 커터를 이용하여 시험편의 길이 120 mm로 절단하여 제작하였다. 압계실험중 일률적인 변형을 유도하기 위하여 하중을 받는 시험편 끝단에 45°의 트리거 가공을 하였다^[10].

또한 최외각의 변화에 따른 흡습거동과 그에 따른 압계특성을 비교하기 위하여 시험편의 축방향 θ 를 중심으로 각각 90°와 0°로 구분하여 제작하였다.

Fig. 1에서는 본 실험에 사용된 시험편의 형상 및 크기를 나타내었으며 Table 1은 본 실험에 사용된 시험편들의 종류와 적층순서를 나타내었다.

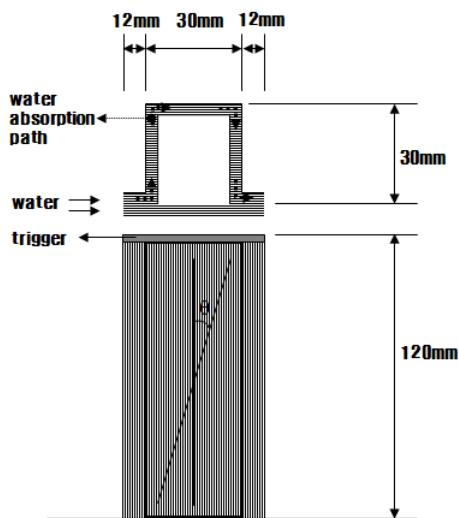


Fig. 1 CFRP Hat-shaped sectional member

Table 1 Description of specimens

Specimen		Condition			Outer Angle
2 Interface	[90 ₂ / 0 ₂] _s	Dry	60°C	80°C	90°
3 Interface	[0 ₂ / 90 ₂] ₂				
4 Interface	[90 / 0] _{s2}				
6 Interface	[90 / 0] _{2s}				
7 Interface	[0 / 90] ₄				0°
2 Interface	[0 ₂ / 90 ₂] _s				
3 Interface	[90 ₂ / 0 ₂] ₂				
4 Interface	[0 / 90] _{s2}				
6 Interface	[0 / 90] _{2s}				
7 Interface	[90 / 0] ₄				

3. 실험방법

3.1 흡습실험

온도변화를 갖는 흡습환경 하에서의 시험편 최외각층 변화에 따른 흡습거동을 고찰하기 위하여 온도에 따른 계면특성의 변화가 가장 적게 나타나는 온도인 60°C와 고온으로 평가할 수 있는 온도인 80°C로 설정한 후 Fig. 2의 항온수조를 이용하여 흡습실험을 실시하였다^[11]. 설정온도를 유지하면서 매 72시간 간격으로 1/10,000 g까지 측정이 가능한 정밀전자저울을 사용하여 시험편의 수분 흡습량을 측정 후 Fick's law에 따른 수분 흡습률 식 (1)을 이용하여 수분 흡습률을 구할 수 있었다^[12].

또한 흡습실험 종료시점인 시험편의 수분 포화상태를 측정하기 위하여 식 (2)를 만족하는 때에 시험편이 포화상태에 도달했다고 판단하고 흡습실험을 종료하였다^[13].

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

여기서 M 은 시험편의 흡습률, W_m 은 수분이 흡수된 시험편의 무게, W_d 는 수분이 흡수되기 전의 시험편의 무게이다.



Fig. 2 Hot waterbath

$$\frac{W_{m-1} - W_m}{W_d} < 0.0005 \quad (2)$$

여기서 W_{m-1} 은 흡습된 시험편 전의 시험편 무게, W_m 은 흡수된 시험편의 무게, W_d 는 수분이 흡수되기 전의 시험편의 무게이다.

3.2 정적압계실험

본 연구에서는 최외각층 변화를 갖는 CFRP 구조부재의 흡습여부에 따른 압계특성을 평가하기 위하여 흡습된 시험편과 흡습되지 않은 시험편에 대해서 변형률 속도의 영향이 미치지 않는 속도인 10 mm/min로 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 시험편의 전체길이인 60%까지 변위를 제어하면서 정적압계 실험을 실시하였으며, 압계실험 후 얻어진 하중변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 식 (3)을 이용하여 흡수에너지를 구하였다.

$$E_a = \int_{L_0}^L F dl \quad (3)$$

여기서 E_a 는 시험편에 흡수된 에너지를 나타내며, F 는 압계하중, l 은 압계과정에서 압계된 시험편의 길이를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 흡습거동

최외각층 변화에 따른 흡습거동을 살펴본 결과 60°C와 80°C 환경하에서 최외각층 90°의 조건을 갖는 2계면 시험편의 흡습률이 가장 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분이 주로 흡수되는 섬유방향인 0°방향의 섬유가 시험편 단면부분에 위치하고 있으며 시험편 표면층에 가깝게 적층되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

하지만 동일한 적층구성인 최외각층 0° 시험편에서는 0°섬유방향이 시험편 중심에 적층되어 흡습률이 적게 나타남으로써 알 수 있었다.

또한 최외각층 0°의 조건을 갖는 3계면 시험편의 적층 구성은 0°방향의 섬유가 시험편 단면부분과 플렌지 부분에서 시험편 표면층에 가깝게 적층됨으로써 수분의 흡수가 용이한 것으로 사료된다.

따라서 수분의 흡습은 섬유 방향이 0°의 구성을 갖고 시험편의 표면층에 가깝게 적층된 최외각층 90°의 구성을 갖는 시험편에서 흡수가 용이하게 나타남을 알 수 있었으며 최외각층 0°의 구성에 비해 최대 10%의 흡습률의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 3, 4는 흡습실험 종료 후 최외각층 구성에 따른 온도조건별 시험편의 흡습률을 나타낸 그래프이다.

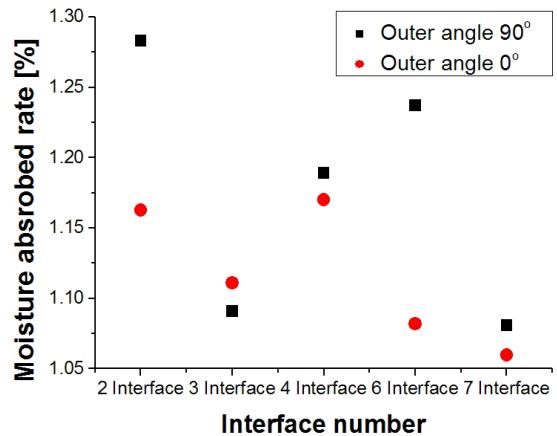


Fig. 3 Moisture absorbed rate of CFRP composite members for variation of outer angle under the 60°C temperature

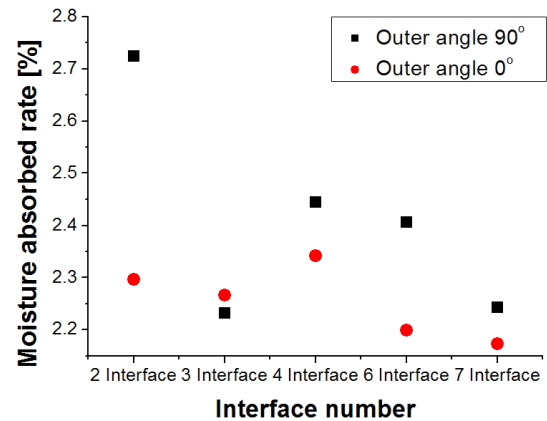


Fig. 4 Moisture absorbed rate of CFRP composite members for variation of outer angle under the 80°C temperature

4.2 압계모드

흡습 시험편과 흡습되지 않았던 시험편에 대해 정적압계실험을 실시한 결과 Fig. 5의 Farley and Jones가 정의한 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴의 압계모드가 나타남을 알 수 있었다^[14,15].

정적압계실험 후 압계모드를 살펴본 결과 60°C와 80°C 흡습환경하에서의 흡습시험편과 흡습되지 않았던 시험편 모두에서 전단과 굽힘모드가 혼합되어 나타나는 취성파괴의 모드를 관찰 할 수 있었으며, 최외각층이 90°인 경우 최외측 ply의 섬유의 파단에의해 파쇄형 모드와 최외층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드 및 시험편 모서리의 찢어짐을 관찰 할 수 있었으며 압계모드의 차이는 발생하지 않았다.

최외각층이 0°인 경우 최외층 ply 섬유의 확장으로 인한 확장형 스프라인 모드가 나타났고, 시험편 내부에서는 최외층 90°에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성파괴 모드를 관찰할 수 있었다.

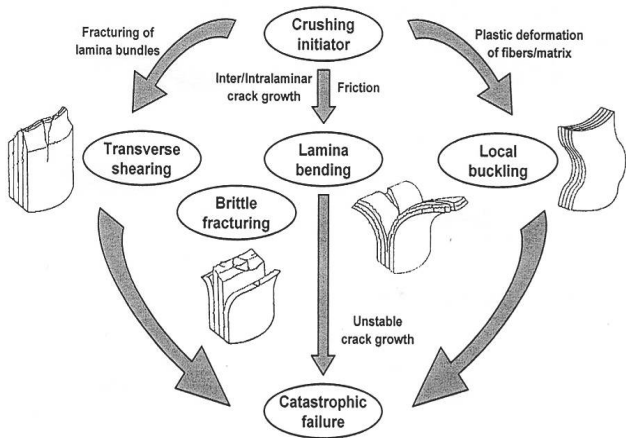


Fig. 5 Crushing process of continuous fiber reinforced composite tubes

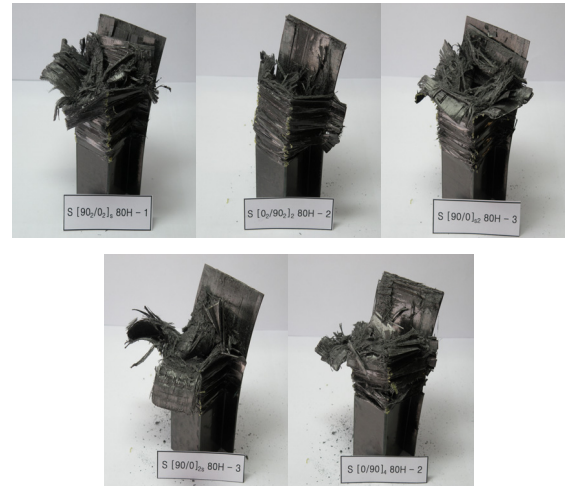


Fig. 8 Collapsed shaped of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°, 80 °C specimen)

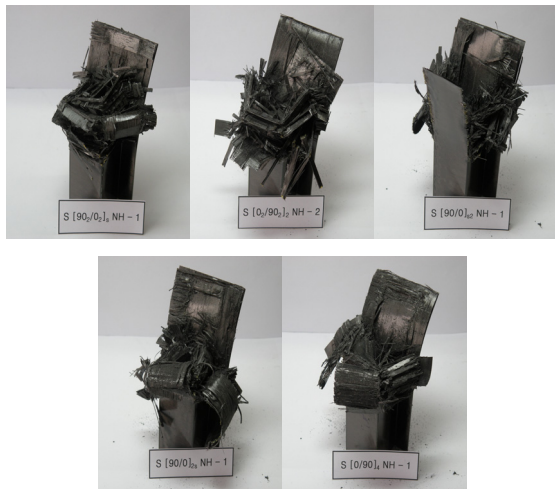


Fig. 6 Collapsed shaped of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 90°, dry specimen)

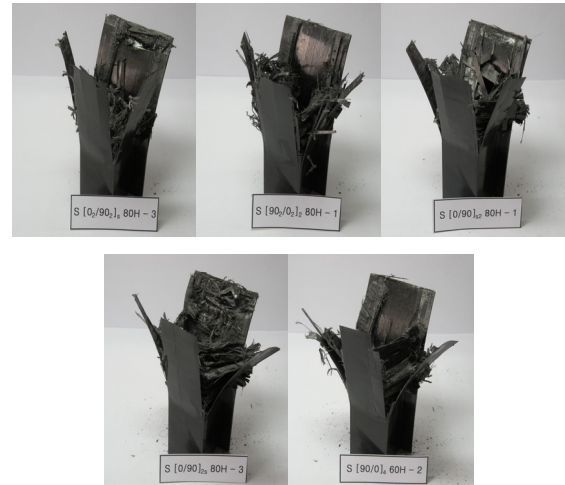


Fig. 9 Collapsed shaped of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°, 80 °C specimen)

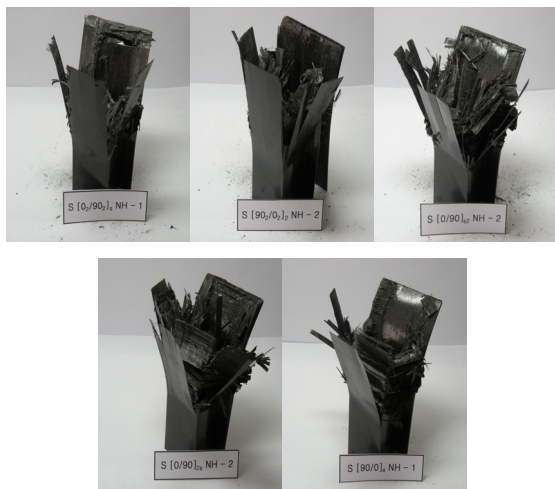


Fig. 7 Collapsed shaped of CFRP hat-shaped sectional members (outer angle 0°, dry specimen)

수분이 흡수된 시험편의 경우 흡습되지 않았던 시험편과 동일한 압괴모드가 나타났으나 전단과 모서리 찢어짐 보다는 굽힘과 접힘이 주로 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 수분이 복합재 내부의 계면의 결합력을 약화시킴으로써 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 6, 7, 8, 9는 최외각층 변화에 따른 압괴형상을 고찰하기 위하여 흡습된 시험편과 흡습되지 않았던 시험편의 압괴형상을 얻을 수 있었다.

4.3 압괴특성

정적압괴실험을 통한 시험편의 압괴특성을 살펴본 결과 Fig. 10, 11, 12, 13의 최대하중 및 흡수에너지 그래프를 얻을 수 있었다.

정적압괴실험 후 최대하중에 있어서는 흡습률이 가장 높았던 시험편의 경우 강도의 저하가 크게 나타남을 알 수 있었다.

또한 80°C의 온도조건하에서는 60°C 온도조건하에서의 최대하중보다 약 50%의 더 큰 저하가 나타남을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수로 계면간의 결합력을 저하시킴으로써 초기 발생하는 하중에 취약한 면을 보이는 것을 알 수 있었으며 온도가 증가하면서 초기 흡습률이 증가함에 따라 저하가 크게 발생하는 것으로 사료된다. 최외각층 구성에 따른 압축특성을 비교해본 결과 최외각층 90°보다 0°의 구성을 갖는 시험편의 대부분이 최대하중의 저하가 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 최외각층 0°의 구성을 갖는 시험편의 경우 수분의 흡수가 용이하지 못한 관계로 흡습률 또한 낮게 나타났으며 그로인해 계면간의 결합력 저하가 적게 발생함으로써 나타난 결과라 사료된다.

평균하중과 흡수에너지에서는 흡습률 증가보다는 적층 특성인 계면수의 증가가 압축특성에 영향이 미치는 것을 알 수 있었다. 수

분이 흡수되지 않았던 시험편에서는 평균하중과 흡수에너지가 계면수 증가에 따라 증가하다가 7계면 적층구성을 갖는 시험편에서는 저하되는 것을 알 수 있었다.

하지만 흡습된 시험편의 경우 계면수의 증가에 따라 평균하중과 흡수에너지는 계속 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 수분의 흡수로 인하여 계면수가 증가함에 따라 전단을 수반하는 취성 파괴보다는 접합의 특성이 강하게 나타남으로써 그로인한 강도의 증가가 나타났던 것으로 사료된다.

따라서 정적압축실험을 실시한 결과 고온고습 환경하에서 흡수에 따른 강도저하는 최외각층 구성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 고온고습 환경의 온도 증가에 따라 시험편 내부의 흡습률이 크게 좌우되는 것을 알 수 있었다.

정적압축실험 후 흡수되지 않았던 시험편과 60°C 및 80°C 환경

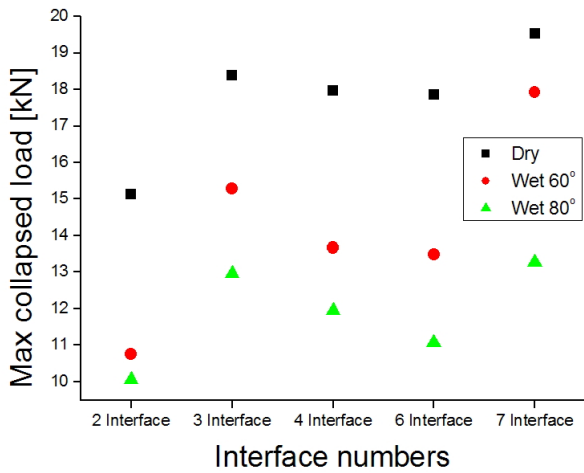


Fig. 10 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 90°)

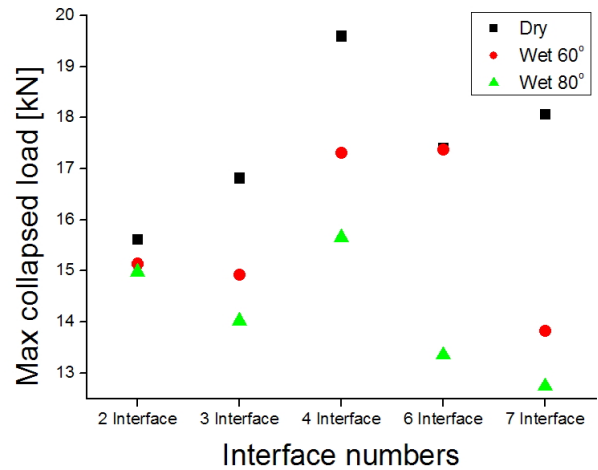


Fig. 12 Relationship between max collapse load and variation interface numbers (outer angle 0°)

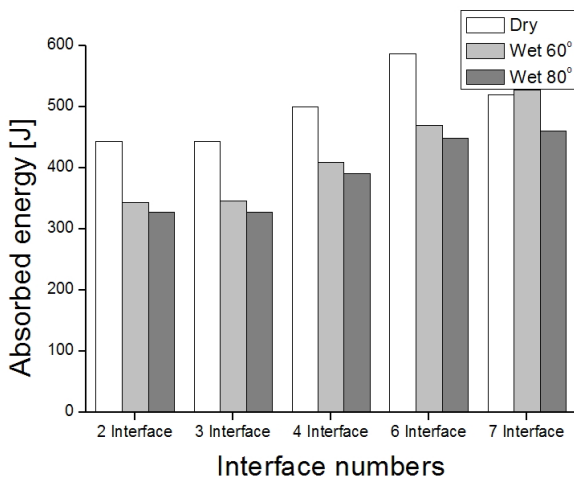


Fig. 11 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 90°)

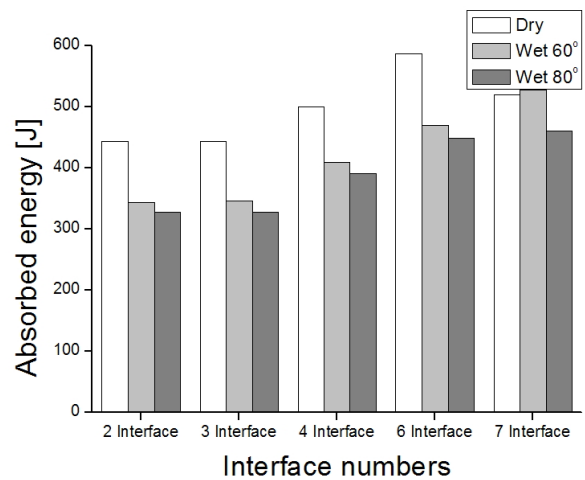


Fig. 13 Relationship between absorbed energy and variation interface numbers (outer angle 0°)

의 고온-고습 실험 후 흡습된 시험편의 압력데이터를 Table 2에 나타내었다.

5. 결론

온도변화를 갖는 열습환경하에서 흡습된 시험편과 흡습되지 않았던 시험편의 압력특성을 비교해본 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

온도가 증가할수록 시험편 내부의 흡습률은 포화상태에 도달하기까지 최대 50%의 큰 증가를 보이는 것을 알 수 있었으며 최외각

층 구성에 따른 흡습률은 흡습이 용이했던 최외각층 90°의 적층구성이 최대 10%의 큰 흡습률을 보이는 것을 알 수 있었다.

흡습에 따른 압력형상으로는 흡습되지 않았던 시험편에서 볼 수 있었던 취성과파괴와 모서리 찢어짐의 형태가 아닌 접힘과 주름의 압력형상이 주로 나타남을 알 수 있었다.

정적압력실험을 실시한 후 최외각층 구성에 따른 압력특성을 살펴본 결과 흡습이 용이하였던 최외각층 90°의 구성을 갖는 시험편의 경우 약25%~40%의 강도저하를 보이는 반면 흡습이 용이하지 못했던 최외각층 0°의 구성을 가는 시험편의 경우는 대부분의 시험편이 약20% 정도의 저하가 나타남을 알 수 있었다.

Table 2 Collapse characteristics of the dry and wet specimens according to temperature changes

Interface Numbers	Conditions	Max load [kN]	Decrease [%]	Mean load [kN]	Decrease [%]	Energy [kJ]	Decrease [%]
[90 ₂ /0 ₂] _s	Dry	15.13		7.39		443.41	
	60	10.76	40.61	5.72	29.19	343.44	29.10
	80	10.06	50.39	5.45	35.59	326.92	35.63
[0 ₂ /90 ₂] ₂	Dry	18.39		7.4		443.91	
	60	15.28	20.35	5.76	28.47	345.92	28.32
	80	12.96	41.89	5.46	35.53	327.77	35.43
[90/0] _{s2}	Dry	17.97		8.33		499.89	
	60	13.67	31.45	6.81	22.32	408.48	22.37
	80	11.95	50.37	6.52	27.76	390.99	27.85
[90/0] _{2s}	Dry	17.86		9.77		586.44	
	60	13.48	32.49	7.83	24.77	469.69	24.85
	80	11.07	61.33	7.46	30.96	447.88	30.93
[0/90] ₄	Dry	19.53		8.66		519.59	
	60	17.93	8.92	8.79	-1.47	527.64	-1.52
	80	13.27	47.17	7.67	12.90	460.02	12.94
[0 ₂ /90 ₂] _s	Dry	15.61		6.38		383.04	
	60	15.13	45.10	6.22	2.625	373.29	2.61
	80	14.98	4.22	5.1	25.16	305.79	25.26
[90 ₂ /0 ₂] ₂	Dry	16.80		7.3		437.98	
	60	14.92	12.64	6.45	13.17	387.08	13.15
	80	14.02	19.87	6.04	20.86	362.45	20.84
[0/90] _{s2}	Dry	19.59		10.95		657.35	
	60	17.31	13.19	8.69	26.08	521.7	26.00
	80	15.66	25.11	8.08	35.60	485	35.53
[0/90] _{2s}	Dry	17.4		10.54		632.70	
	60	17.37	0.17	8.43	25.02	505.7	25.11
	80	13.36	30.23	7.91	33.24	474.94	33.21
[90/0] ₄	Dry	18.06		8.39		503.48	
	60	13.82	30.68	8.68	-3.26	520.65	-3.29
	80	12.74	41.75	8.37	0.31	502.27	0.24

후 기

이 연구는 2013년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] Jcantwell, W. J., Morton, J., 1985, Detection of Impact Damage in CFRP Laminates, *Composite Structures* 3 241-257.
- [2] Song, S. I., Bae, K. J., Lee, K. H., Park, G. G., 2002, Light Weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments, *Transactions of KSAE* 10:1 125-132.
- [3] Zheng, Q., Morgan, R. J., 1993, Synergistic Thermal-moisture Damage Mechanism of Epoxies and Their Carbon Fiber Composites, *Journal of Composite Materials* 27:15 1465-1479.
- [4] Rief, C., Lindner, M., Kromp, K., 1990, Experimental Investigations and a Model Proposal on Damage Mechanisms in a Reinforced Carbon-Carbon Composite, *ASTM STP* 1059:9 564-579.
- [5] Hwang, W. C., Sim, J. K., 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* 20:3 219-224.
- [6] Choi, H. S., Ahn, K. J., Nam, J. D., 1998, Hygroscopic Behavior of Unidirectional Carbon Fiber/epoxy Composite Laminates, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 22:8 1486-1500.
- [7] Jung, J. A., Yang, I. Y., 1996, Impact Damages and Residual Strength of CFRP Laminates under the Hygrothermal Environment, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 20:12 3748-3758.
- [8] Sala, G., 2000, Composite Degradation due to Fluid Absorption, *Composites Part B* 31:5 357-373.
- [9] Yuichiro, A., Ken, Y., Takashi, I., 2008, Effect of Hygrothermal Condition on Compression Sfter Impact Strength of CFRP Laminates, *Composites Zcience and Technology* 68:6 1376-1383.
- [10] Kim, Y. N., Choi, H. S., Cha, C. S., Im, K. H., Jung, J. A. 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* 24:12 2945-2951.
- [11] Park, J. S., 1994, Impact damage and residual bending strength of CFRP composite laminate plates subjected to transverse impact loading under high temperatures Doctorate Thesis, Chosun University Republic of Korea.
- [12] Shen, H., Springer, G. S., 1976, Effects of Moisture and Temperature on The Tensile Strength of Composite Materials, *Journal of Composite Material* 2 2-16.
- [13] Tomblin, J., Seneviratne, W., Mckenna, J., Ng., Y., 2001, B-Basis Design Allowables for 2x2 Biaxially Braided RTM Composite Material Systems, National Institute for Aviation Research, Wichita State University.
- [14] Farley, G. L., Jones, R. M., 1992, Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes, *Journal of Composite Materials* 26:1 37-50.
- [15] Farley, G. L., Jones, R. M., 1992, Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes, *Journal of Composite Materials* 26:1 78-89.