

풍력블레이드용 탄소/유리 하이브리드 섬유강화 복합재료의 충격 특성에 관한 연구

김 세영¹⁾, 한 인섭²⁾, 우 상국³⁾, 홍 기석⁴⁾

The impact strength properties of carbon/glass hybrid composite for wind turbine blade

Seyoung Kim, Insub Han, Sanguk Woo, Kiseok Hong

Key words : Impact(충격), Composite(복합재료), Carbon fiber(탄소섬유), Glass fiber(유리섬유)

Abstract : 탄소섬유가 중앙에 적층된 풍력발전용 블레이드 소재인 탄소-유리섬유 하이브리드 복합재료가 VARIM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)공법을 이용하여 제작되었다. 아이조드 충격시험법을 이용하여 온도, 하이브리드화 비율 그리고 노치에 대한 충격강도의 영향을 연구하였다. 온도 감소 및 탄소섬유의 증가에 의해 충격강도는 감소하는 경향을 보였으며, 노치에 의해 하이브리드 복합재료는 약 25~30%가량의 충격강도 감소를 보였다. 그러나 단일 탄소섬유 복합재료의 경우 노치민감도는 없었으며, 이에 소량의 유리섬유 첨가로 인해 하이브리드화 하였을 경우 충격강도 향상 및 저온 충격강도 안정성을 확보 할 수 있었다.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 금속의 대체 소재로서 많은 분야에 적용되고 있으며, 특히, 풍력 발전기의 블레이드 소재로 사용되고 있다. 최근 풍력 발전기의 대형화로 인해 현재 사용 중인 유리섬유보다 높은 강성의 탄소섬유가 주목을 받고 있는 상황 이지만 높은 가격으로 인해 적용이 쉽게 이루어지지 못하고 있다. 따라서 최근 탄소섬유와 유리섬유의 하이브리드화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{1,2)}

풍력발전기의 운영 중 파손의 원인은 초기 제작 시 결함 및 피로파괴 등 여러 가지가 있으나 그 중 외부 충격에 의한 파손이 약 16%의 높은 비율을 차지하게 된다. 따라서 풍력발전용 블레이드에 하이브리드 복합재료를 적용하기 전 충격강도에 대한 특성 파악은 반드시 이루어져야 한다. 충격 특성을 파악하기 위한 가장 효과적인 방법은 샤르피나 아이조드 충격시험법이 주로 사용된다.³⁾

Mallick과 Broutman은 하이브리드 복합재료의 충격특성에 대한 연구를 수행하여 하이브리드 복합재료의 충격특성 향상을 확인 하였다.⁴⁾ G. Dorey의 경우 탄소섬유와 유리섬유의 하이브리드화를 통해 탄소섬유 복합재료 대비 충격강도를 두 배 이상 향상 시킬 수 있었다.⁵⁾

또한 Asad A.Khalid는 실험 온도와 섬유 체적비의 증가가 충격강도를 향상 시킴을 밝혔으며,

1편의 노치 부분에서 섬유와 수지의 파손이 두드러짐을 보였다.²⁾ M.G Bader와 Donald F. Adams는 복합재료의 충격시험시 나타나는 노치영향에 대하여 연구를 수행 하였으며, 샤르피 시험 조건 하에서 복합재료의 노치 영향은 모두 매우 미미한 것으로 나타났다.^{3,6)} N.L. Hamcox는 탄소섬유 복합재료의 미미한 노치 영향 이외에도 탄소/유리섬유 샌드위치 복합재료의 충격 시험에서 탄소섬유의 증가가 충격 강도를 감소시킴을 보였다.^{7,8)}

이와같이 하이브리드 복합재료의 충격 강도에 대한 많은 연구가 진행 되었으며, 이에 대한 노치 영향도 역시 많은 학자들에 의해 연구되었다. 일반적으로 탄소섬유의 증가가 충격 강도의 저하를 야기 시키며, 유리섬유와 같은 연성 소재와의 하이브리드화는 충격 강도를 증가 시킴이 잘 알려져 있다. 그러나, 하이브리드 복합재료의 충격

- 1) 한국에너지기술연구원
e-mail : saykim@kier.re.kr
Tel:(042)860-3471 Fax:(042)860-3133
- 2) 한국에너지기술연구원
e-mail : ishan@kier.re.kr
Tel:(042)860-3147 Fax:(042)860-3133
- 3) 한국에너지기술연구원
e-mail : skwoo@kier.re.kr
Tel:(042)860-3142 Fax:(042)860-3133
- 4) 한국에너지기술연구원
e-mail : kshong@kier.re.kr
Tel:(042)860-3144 Fax:(042)860-3133

Sample	Stacking sequence	Glass fiber Vf (%)	Density(g/cm ³)	Flexural strength(MPa)	Elastic modulus in bending (GPa)
G0	[CF32]	0	1.401	243	41
G25	[GF2/CF24/GF2]	24.6	1.509	218	31
G50	[GF4/CF16/GF4]	49.4	1.645	298	25
G75	[GF6/CF8/GF6]	74.5	1.798	275	21
G100	[GF16]	100	1.891	241	22
Resin	-	-	1.130	66	0.91

Table 1. Lay-up sequences and properties of hybrid composites

특성과 온도와의 관계를 명확히 하는 연구는 수행되지 않았으며, 많은 복합재료는 외부에서 항상 온도변화에 노출되어 있으므로 온도에 의한 충격 강도의 특성 연구가 매우 필요하다.

본 연구에서는 다섯 종류의 하이브리드 복합재료의 충격 강도에 대하여 온도, 하이브리드 비율 그리고 노치에 대한 영향을 아이조드 충격 시험법을 사용하여 평가 하였다. 각 시편의 파면역시 현미경을 이용하여 분석하였으며, 시편의 제조는 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)공법을 이용하여 탄소섬유가 내부에 위치하고, 유리섬유가 상하에 위치하도록 제작되었다. 시편조건에 대한 자세한 내용은 표 1에 나타내었다.

2. 실험

2.1 시편 제작

시험에 사용된 복합재료의 강화 섬유는 탄소 섬유(한국화이버)와 유리섬유(한국오웬스코닝)이며, 섬유를 그림 1에 나타내었다. 모재로 사용된 수지는 VARTM공정에 적용 가능한 200cps이하의 점도를 가지는 저점도 에폭시 수지를 사용하였다. 경화된 시편은 ASTM D256-06a에 의거하여 아이조드 시편 사이즈에 적합하도록 가공하였다. 노치는 45도°의 각도를 가지며, 깊이는 2.5mm로 가공 되었다. 이렇게 제작된 아이조드 시편을 그림 2에 나타내었다.

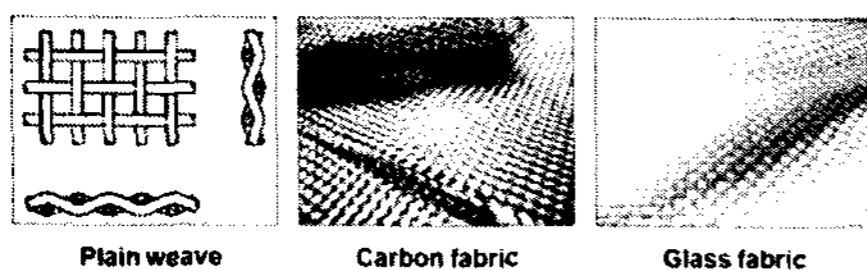


Fig. 1 Plain weave carbon and glass fabrics

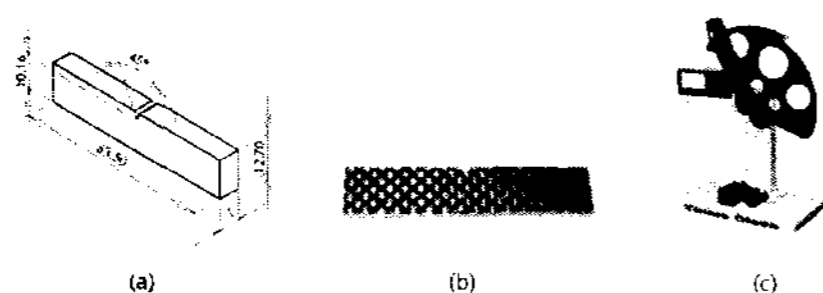


Fig. 2 The dimension of izod impact test specimen (a), sample (b), and tester (c)

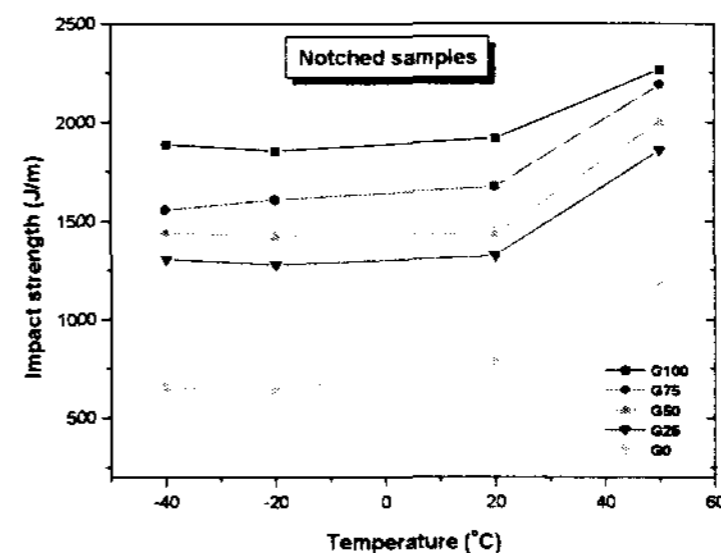
2.2 충격 시험

모든 충격 시험은 특수하게 제작된 Tinius & Olsen社의 아이조드 충격시험기를 사용하였으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 시험기의 충격에너지는 팬들럼의무게를 조절하여 11.33J로 조절하였다. 온도 변화 시험을 위하여 시편을 고정하는 부분에 온도 조절 챔버를 설치하였다. 챔버내의 온도 조절은 액체질소와 실리콘 히터를 사용하여 -40~50℃까지 조절 하였다. 모든 시편은 챔버내에서 시험 온도에 충분히 노출 시킨 후 충격이 가해졌다.

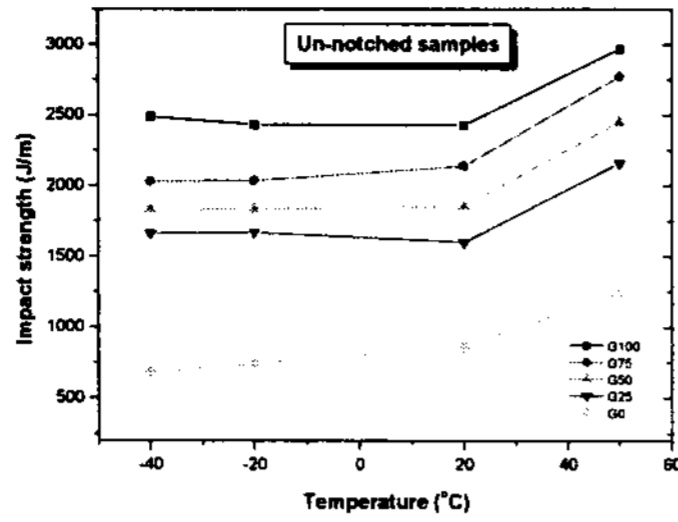
3. 결과 및 토의

3.1 하이브리드 효과

아이조드 충격 강도는 시험편의 파괴시 흡수된 에너지로 계산되었다. 그림 3에 다섯 종류의 하이브리드 복합재료의 온도별 충격강도 결과를 나타내었다. 그림 3과 같이 모든 온도 영역에서 유리섬유 복합재료의 충격 강도 값이 다른 하이브리드 복합재료보다 큰 값을 보인다. 또한, 그림 4와 같이 탄소섬유의 비율이 증가함에 따라 선형적으로 충격 강도의 값이 저하됨을 보이며, 탄소섬유 복합재료의 경우는 급격한 강도 저하를 보였다. 결과에서 알 수 있듯 유리섬유의 높은 파단 허용 변형률에 기인하여 적은 양의 유리섬유 하이브리드화로도 탄소섬유 복합재료의 충격 강도를 크게 향상 시킬 수 있음을 보인다.⁸⁾ 이는 하이브리드 시편내의 균열 전파를 지연 시키는 역할을 하며, 탄소섬유의 조기 파손을 방지하게 된다.⁹⁾



(a) Notched samples



(b) Un-notched samples

Fig. 3 Temperature effect on impact strength of hybrid composites

3.2 온도 효과

그림 3과 4에 하이브리드 복합재료 충격강도의 온도에 대한 영향을 나타내었다. -40~20°C의 온도 변화에서는 충격 강도의 변화가 매우 적음을 보이며, 20~50°C에서의 온도 변화에서는 충격 강도가 매우 크게 변화함을 알 수 있다. 그림 5는 온도 변화에 따른 각 시편의 충격 강도의 변화량을 표시 하였으며, -40°C에서 20°C로 온도가 증가 하게 될 경우 G0 시편을 제외한 모든 시편들이 매우 작은 충격 강도의 변화를 보인다. 그러나 G0시편은 동일 온도 조건에서 약 15~20%의 충격 강도 변화를 보인다. 온도가 20°C에서 50°C로 증가 할 경우 G0시편 및 다른 모든 시편의 충격 강도가 모두 증가 함을 보인다. 하이브리드 복합재료에 있어서 온도에 따른 충격 강도 특성은 다른 단일 섬유 복합재료의 경향과 같이 나타나며, 유리섬유의 하이브리드화로 인해 복합재료의 저온 충격 안정성을 부여할 수 있음을 확인 하였다.

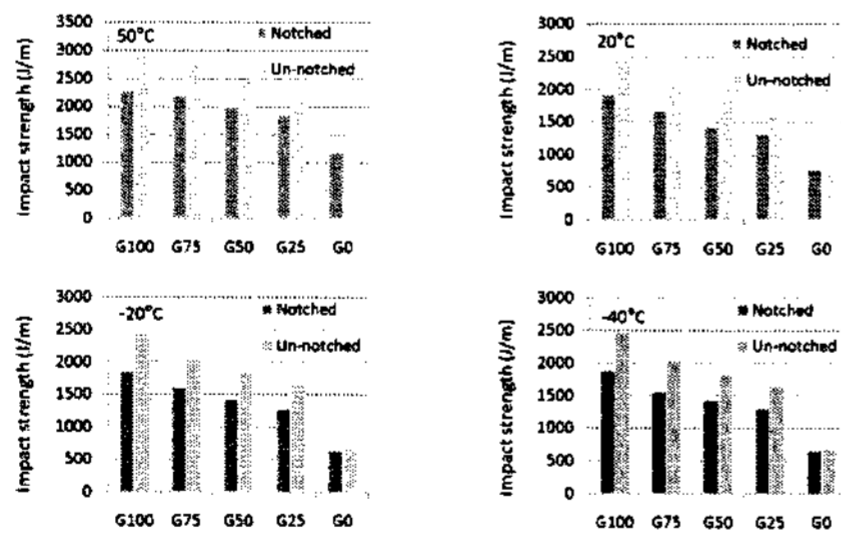


Fig. 4 Comparison of notch and un-notched samples at each temperature

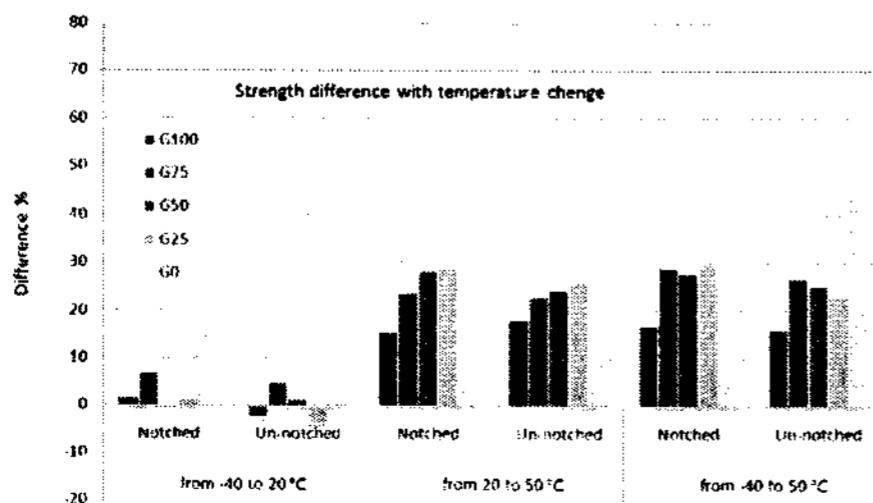


Fig. 5 Strength difference due to temperature change

3.3 노치 효과

하이브리드 복합재료의 노치에 대한 민감도는 아래의 식에 의해 표현 되었으며, 그 값들은 그림 6에 나타내었다.

$$\text{Notch Sensitivity} = [U / N] - 1$$

U : Impact strength of un-notched sample

N : Impact strength of notched sample

그림 4와 6에 나타내었듯이 노치에 의해 하이브리드 복합재료의 충격 강도가 약 30% 가량 감소 하였으나, G0 시편의 경우 노치 시편과 비노치 시편간의 충격 강도 차이는 없는 것으로 나타났다. 유리섬유의 첨가로 인해 하이브리드화된 시편의 경우 노치 민감도를 가지게 되는데, 이는 유리섬유에 의해 노치가 없는 부분의 Crack opening이 G0 시편보다 어렵기 때문이다. 그림 6의 결과에서 나타나 듯이 소량의 유리섬유 하이브리드화에 의해서 복합재료의 Crack opening resistance를 증가 시킬 수 있음을 확인 하였다.

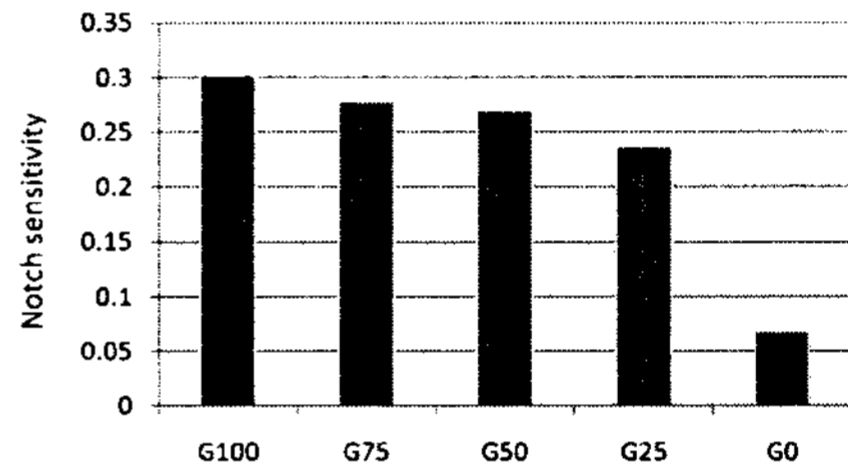


Fig. 6 The average notch sensitivity of hybrid composites in izod test method

3.4 파면 관찰

그림 7에는 시험이 완료된 아이조드 충격 시편의 사진을 나타내었다. -40°C에서 파단된 시편들은 모두 완전 분리가 발생 하였으나, 50°C에서 파단된 시편은 G0 시편을 제외한 모든 시편의 분리가 발생하지 않는 연성 파단의 형태를 보인다. 그러나 탄소섬유의 비율이 증가 할 수록 완전 분리 형태의 파단이 증가함을 확인 하였다. 파단면의 인장 영역에서는 유리섬유의 Pull-out 현상이 두드러지게 나타나며, G0 시편의 경우 유리섬유가 포함된 하이브리드 복합재료보다 Pul-out 현상이 현저하게 적음이 관찰 되었다. G0의 경우 매우 적은 양의 Pull-out 현상으로 인해 흡수되는 에너지가 작아져 G100의 충격 강도 보다 작은 충격 강도 값을 보이게 된다. 또한, 그림 8에 보이는 것과 같이 G0를 제외한 시편들의 충격 뒷면(압축하중이 인가되는 부분)에 층간 분리 현상이 관찰 되었다. 이는 인장 하중이 인가되는 부분에서 필요한 Crack opening 하중이 압축하중이 인가 되는 부분에서의 층간 분리발생 하중보다 크기 때문이며, G0의 경우는 반대로 Crack opening 하중이 작음으로 인해 층간 분리가 일어나지 않음을 관찰 할 수 있었다.

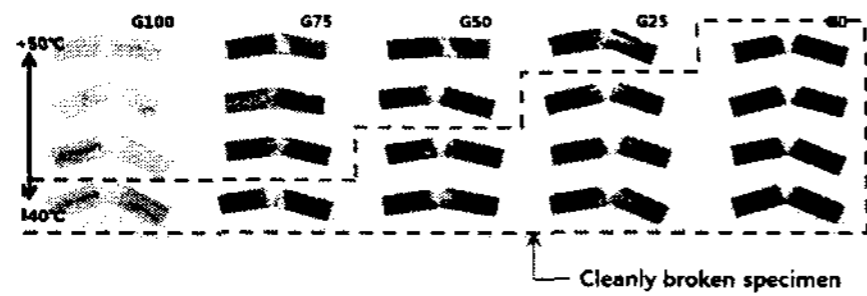


Fig. 7 Specimen breakage after impact test

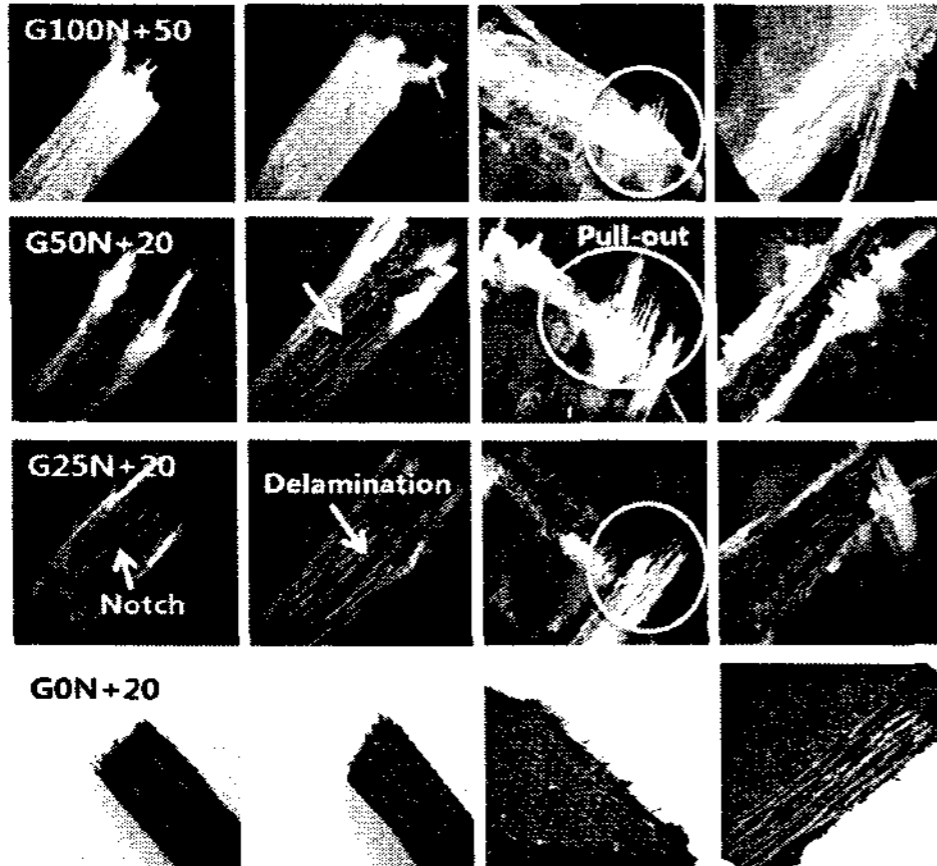


Fig. 8 Fracture surface observation

4. 결론

본 연구에서는 탄소/유리섬유 하이브리드 복합재료를 제작하여 온도와 하이브리드 비율 그리고 노치 여부에 따른 아이조드 충격 특성에 대하여 조사 하였다. 시험 온도는 -40°C 에서 50°C 이며, 하이브리드 비율은 유리섬유의 체적비를 기준으로 100, 75, 50, 25 그리고 0%의 시편을 제작 하였다. 수행된 시험을 통해 얻게 된 결과는 다음과 같다.

(1) 탄소섬유의 함량 증가는 하이브리드 복합재료의 충격 강도를 저하 시켰으며, 다른 시편에 비해 탄소섬유 복합재료는 매우 낮은 충격 강도 값을 나타냈다. 이는 소량의 유리섬유 첨가로 인해 충격 강도가 크게 향상될 수 있음을 보인다.

(2) 온도의 증가에 따라 하이브리드 복합재료의 충격 강도는 증가함을 보인다. $-40\sim 20^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도에서 하이브리드 복합재료는 거의 강도의 변화를 보이지 않으나, G0의 경우 약 15%의 충격

강도 변화를 보였다. 즉, 유리섬유의 하이브리드화로 인해 저온 영역에서의 충격 강도 안정성을 확보할 수 있음을 확인 하였다.

(3) 하이브리드 복합재료는 노치에 의해 약 25~30%의 충격 강도 저하가 나타나며, G0의 경우 노치의 영향을 거의 받지 않는 0.07의 노치 민감도를 가진다.

References

- [1] P.W. Sonparote, S.C. Lakkad, 1982. "Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced hybrids", *Fibre Science and Technology*, 16, 209-312
- [2] Asad A. Khalid, 2006. "The effect of testing temperature and volume fraction on impact energy of composites", *Materials and Design*, 27, 499-506
- [3] M. G. Bader, R. M. Ellis, 1974. "The effect of notches and specimen geometry on the pendulum impact strength of uniaxial CFRP", *Composites*, November, 253-258
- [4] Mallick PK, Broutman LJ., 1977. "Static and impact properties of laminated hybrid composites", *J Test Eval*, 5, 190-200
- [5] G. Dorey, G. R. Sidey, J. Hutchings, 1978. "Impact properties of carbon fiber/kevlar49 fiber hybrid composites", *Composites*, January, 25-32
- [6] Adams DF, John LP., 1975. "Instrumented charpy impact tests of several unidirectional composite materials", *Fibre science and technology*, 8, 275-302
- [7] Hancox NL., 1971. "Izod impact testing of carbon-fiber-reinforced plastics", *Composites*, March, 41-45
- [8] Hancox NL., 1973. "Wells H. Izod impact properties of carbon-fiber/glass-fiber sandwich structures", *Composites*, January, 26-30
- [9] Subhash C., Khatri, Michael JK., 1996. "Thick-section AS4-graphite/E-glass/PPS hybrid composites: Part II. Flexural response", *Composites Science and Technology*, 56, 473-482