

論文

유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 (Twintex)를 이용한 고정판 성형조건에 관한 연구

박석원*, 유성환*, 이재응**, 장승환***

A study on the forming condition of a bone plate made of a glass/polypropylene composite (Twintex)

Seok-Won Park*, Seong-Hwan Yoo*, Jae-Eung Lee**, Seung-Hwan Chang***

ABSTRACT

In this paper, tensile and bending tests of glass/polypropylene composite (Twintex) specimens fabricated by various forming conditions were carried out and the results were compared according to the forming conditions to find the appropriate condition for the forming composite bone plates. From the tests it was found that the most appropriate forming conditions were 230°C, 3MPa. Composite bone plates were formed using this condition by two different fabricating methods for screw holes: one was a net shape molding and the other was drilling. The forming and bending tests revealed that the drilling process provided much better bending stiffness of bone plates. This paper provided the most appropriate condition for forming composite bone plates and this result was also expected to offer informative data on forming of other Twintex structures.

초 록

본 연구에서는 열가소성 복합재료인 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료를 이용한 복합재료 고정판의 적절한 성형조건을 찾기 위해 다양한 성형조건으로 제작된 시편의 인장시험과 굽힘시험을 수행하여 성형조건에 따른 기계적 거동을 비교하였다. 실험 결과 성형온도와 압력이 각각 230°C, 3MPa일 때 가장 우수한 기계적 특성을 가짐을 확인하였다. 성형시험을 통해 결정된 성형조건을 이용한 복합재료 고정판의 성형방법으로는 고정판의 스크류 구멍을 한번에 성형하는 정형성형방법과 스크류 구멍을 후가공하는 방법을 사용하였으며, 성형시험과 굽힘시험 결과 스크류 구멍을 후가공 하는 경우 우수한 굽힘특성을 가지는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 복합재료 고정판의 적절한 성형을 위해 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료의 기초 성형정보와 그에 따른 고정판 성형에 대한 연구를 수행하였으며, 이 결과는 해당재료를 이용한 구조물 성형에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

Key Words : 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료(Glass/polypropylene composites), 성형조건(Forming conditions), 인장시험(Tensile test), 4점 굽힘시험(4-point bending test), 고정판(Bone plate)

1. 서론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성, 비강도 특성으로 인해 자동차, 선박, 건물, 스포츠, 의료 등 다양한 분야에서 많이 활용

되고 있다. 골절 치료 분야에서도 복합재료를 이용한 고정판 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 연구의 일환으로 복합재료 고정판의 성형방법 및 복합재료 고정판의 굽힘강성에 관한 연구가 진행되어 복합재료 고정판의 우수성을

접수: 2010년 10월 30일, 수정: 2010년 11월 24일, 게재승인: 2010년 11월 30일

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

*** 중앙대학교 기계공학부, 교신전자(E-mail:phigs4@cau.ac.kr)

입증하였다[1]. 현재 일반적으로 사용중인 고정판의 주재료인 스테인리스 강으로 제작된 금속 고정판은 뼈와의 강성 차이가 크기 때문에 응력방패현상을 유발시키지만, 섬유강화복합재료는 재료의 물성을 조절할 수 있기 때문에 응력방패현상을 효과적으로 줄일 수 있다 [2]. 본 논문에서는 골절부 치료효율을 증가시키기 위한 복합재료 고정판의 제작을 위해 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료(Twintex)를 사용하였다. 본 재료는 열가소성 복합재료로서 성형조건에 따라 압밀 정도와 기공함유량 등이 변화함에 따라 재료의 물성이 변화하기 때문에 고정판 제작에 적합한 물성을 보장하기 위한 적절한 성형조건을 찾는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 높은 성형압력과 성형온도는 본 재료의 성형성을 향상시키는 것으로 알려져 있으나, 과도한 성형온도와 압밀 시간에 의해 폴리프로필렌이 산화하여 물성이 저하될 수 있다[3-4]. 따라서, 본 복합재료를 구성하는 폴리프로필렌 기지의 최적 성형조건을 찾는 것은 복합재료 고정판 설계에 매우 중요하다. 열가소성 복합재료를 이용한 고정판 제작에 대한 대표적인 연구로서 Fujihara 등[1]은 탄소섬유/PEEK 복합재료 고정판을 성형온도와 성형압력을 변수로 하여 성형실험을 수행하였으며, 성형된 복합재료 고정판의 굽힘실험을 통해 최적의 성형조건을 제시한 바 있다. 하지만 탄소섬유/PEEK 복합재료의 성형온도와 시간이 과도하여 생산성이 저하되는 단점이 있다.

본 연구에서는 열가소성 복합재료 고정판의 적절한 성형조건을 찾기 위하여 여러 성형조건을 적용한 인장시편을 제작하여 성형조건에 따른 복합재료의 기초물성을 측정하였다. 또한 피로 특성이 우수한 아라미드 섬유와 탄소섬유를 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 사이에 첨가한 시편을 추가로 제작하여 기초물성을 측정하고, 이중 직물 (케블라 및 탄소 직물)이 함유된 시편의 계면평가를 위한 단면관찰을 수행하였다. 다양한 성형조건으로 고정판 시편을 제작하여 4점 굽힘실험을 통해 고정판의 거동을 실험적으로 평가하여 골절치료용 고정판 설계에 대한 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 시편제작

2.1 재료

본 연구에서 각종 시편제작에 사용된 재료는 플라이두께 1.9mm인 평직 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 (Twintex; TW-22-P, jb martin, France)이다. 제조사에서 권장하는 성형조건은 폴리프로필렌 기지의 녹는점보다 높은 온도인 180~230°C와 0.1~3.0MPa 범위의 성형압력 이다. 피로특성을 향상시키기 위해 아라미드 건직물과 탄소 건직물을 삽입한 시편도 추가로 제작하여 시편의 성형성과 기계적 물성을 비교하였다. 또한 시편의 인장 및 굽힘거동 결과를 비교하기 위하여 선형연구 [2]에서 우수한 특성을 가지는 것으로 평가된 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그(WSN3k, SK Chemical)를 이용한 대조군 시편을 추가로 준비하였다.

2.2 시편제작

시편의 형상과 치수는 국제규격 (ASTM D3039)에 따라 결정되었으며, 성형온도와 성형압력을 고려하여 총 10종의 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료를 적층하였다. 가장 높은 물성을 나타낸 성형조건에 대해서 두 가지 건직물 (케블라 및 탄소직물)을 첨가한 하이브리드 시편을 준비하여 재료의 물성을 측정하고 그 결과를 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 결과와 비교하였다. 첨가된 건직물에 기지가 원활하게 함침되도록 건직물을 시편의 윗면과 아랫면 세 번째 위치에 한 장씩 적층 하였으며, 핫프레스로 30분 동안 압축성형을 하였다. 탭과 시편의 접착은 에폭시 접착제(DP-460, 3M)를 사용하여 Fig. 1과 같이 인장시편을 제작하였다.

본 연구에서의 주요 성형변수는 성형온도와 성형압력으로서 권장 성형온도를 참고하여, 180°C ~ 230°C까지 10°C 간격으로 변화시켰으며, 성형압력은 2MPa과 3MPa의 두 가지 조건으로 한정하여 시편을 제작하였다 (Fig. 2 참조). 시편의 두께는 성형 온도와 압력이 증가함에 따라 재료의 압밀도가 증가하여 최종 시편의 두께가 점진적으로 감소하였다. 인장실험 결과를 통해 결정된 최적의 성형조건을 이용하여 고정판 시편을 제작하였다. 고정판을 관통하는 6개의 스크류 구멍은 핀 금형을 이용한 정형성형 (Net shape molding) 방법과 구멍 후가공 방법을 이용하여 제작하였다. 고정판 시편에 대한 각 형상정보는 Fig. 3과 같다.

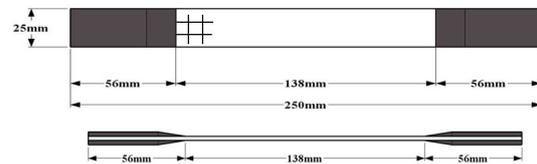


Fig. 1 Specimens for the static tensile test.

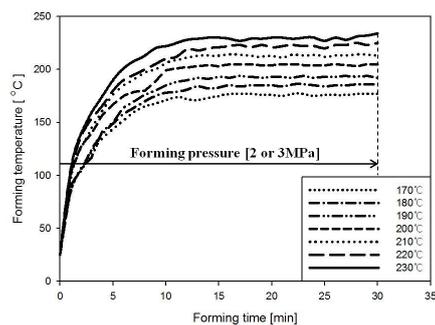


Fig. 2 Forming conditions.

3. 재료시험

3.1 정적 인장실험

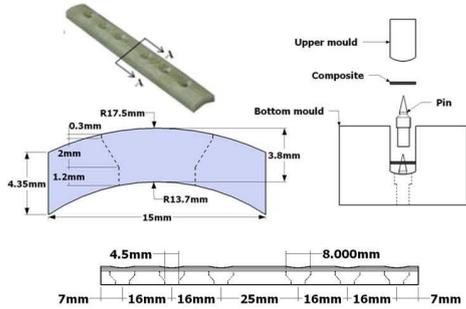


Fig. 3 Shape of bone plate mould and dimensions of composite bone plate.

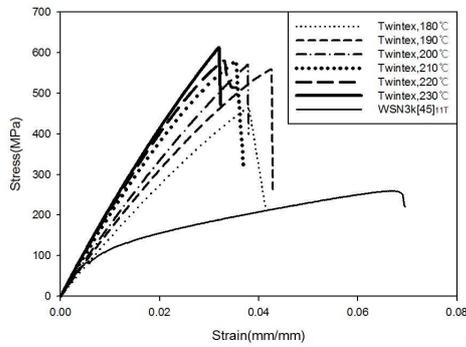


Fig. 4 Stress-strain curves for static tensile test.

다양한 성형조건으로 제작된 인장시편의 영계수와 강도를 측정하기 위해 만능시험기 (MTS810, USA)로 실험규격 (ASTM D3039 [5])에 따라 인장실험을 수행하였다. 인장속도는 2mm/min이다. 인장실험 결과 성형압력 2MPa보다 3MPa이 더 우수한 물성을 나타내었으며, 성형온도는 높을수록 우수한 기계적 물성을 보장함을 알 수 있었다. 이는 고온/고압 조건의 경우 성형과정 중 재료 내 기공 (Void)을 감소시키고, 섬유와 기지의 혼합을 보다 원활하게 하기 때문인 것으로 판단된다. 성형압력 3MPa로 성형한 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료와 탄소섬유/에폭시 복합재료의 인장시험 결과는 Fig. 4와 같고 성형압력 2MPa과 3MPa의 성형압력에 따른 영계수와 인장 강도는 다음 Table 1에 나타내었다. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 적층각도 (WSN3k, [±45]_{11T})는 선행연구 [2]에서 결정된 값을 사용하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료는 파손이 발생할 때까지 거의 선형거동을 하는 것을 알 수 있었다.

동일한 성형온도와 성형시간 조건에서 권장 성형압력보다 높은 압력으로 제작된 시편의 인장실험 결과와 동일한 성형 온도, 성형압력 조건에서 성형시간을 각각 20분, 30분, 40분으로 성형하였을 때의 인장실험 결과는 Fig. 5와 같다. 실험 결과에서 보이는 바와 같이 과도한 성형압력은 시편의 영계

Table 1 Static tensile test results

Forming Temperature [°C]	Young's modulus [GPa] / 3MPa	Strength [MPa] / 3MPa	Forming Temperature [°C]	Young's modulus [GPa] / 2MPa	Strength [MPa] / 2MPa
180	14.6	490	180	12.8	421
190	16.9	560	190	13.8	458
200	17.4	570	200	15.0	475
210	19.6	572	210	17.1	500
220	19.7	563	220	16.6	525
230	21.8	601	230	19.6	596

Forming Pressure [MPa]	Young's modulus [GPa] / 230°C	Tensile strength [MPa] / 230°C	Forming Time [min]	Young's modulus [GPa] / 230°C	Tensile strength [MPa] / 230°C
3	21.8	601	20	19.9	511
6	21.4	386	30	21.8	601
10	20.1	311	40	20.5	564

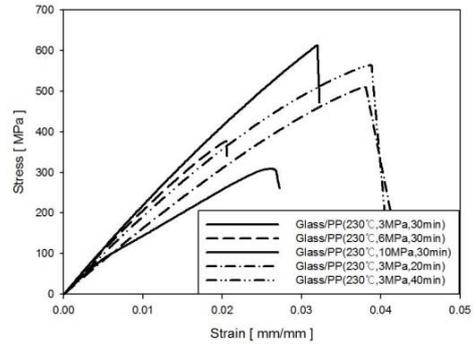


Fig. 5 Stress-strain curve w.r.t. the forming pressure and forming time at 230°C.

수와 인장강도의 저하를 유발하였으며, 이는 성형과정에서 과도한 성형압력에 의한 복합재료 내 유리섬유 배열의 왜곡에 기인한 것으로 판단된다. 또한 동일한 성형온도와 성형압력에서 성형시간이 20분에서 30분으로 증가함에 따라 기계적 물성이 증가하였지만, 40분으로 제작된 시편은 성형시간 30분의 경우보다 물성이 저하되었으며, 이는 재료의 산화에 의한 기지물성 저하에 의한 것으로 판단된다.

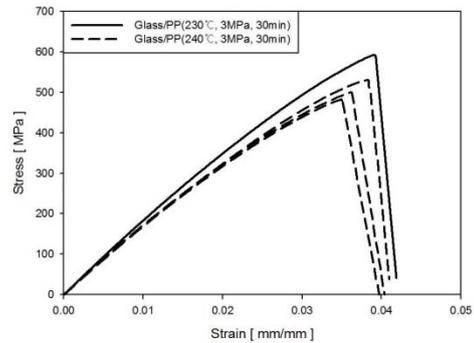


Fig. 6 Stress-strain curve w.r.t. the forming temperature.

Fig. 6은 권장 성형온도보다 높은 온도로 제작된 시편의 인장실험 결과이다. 권장 성형온도 이상에서 제작된 시편의 영계수와 강도가 저하되었고 시편이 변색된 것으로 보아 산화에 의한 기지물성 저하가 발생되었다고 판단된다.

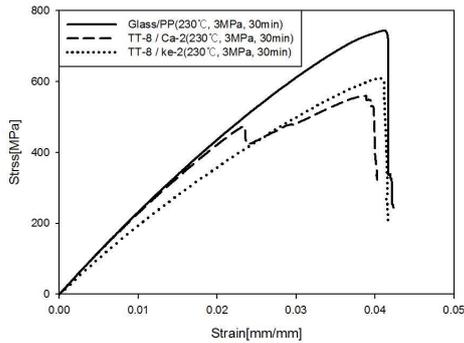


Fig. 7 Stress-strain curves of glass/PP composites (Twintex) containing dry fabrics.

실험을 통하여 얻은 최적의 성형조건 (230°C, 3MPa, 30분)으로 아라미드 직물 또는 탄소 직물을 첨가하여 시편을 제작한 후 인장실험을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. 건직물이 첨가된 시편은 예상과는 달리 오히려 더 낮은 물성을 나타내었으며, 그 원인을 찾기 위해 현미경을 통하여 시편의 단면관찰을 수행하였다. 단면관찰을 통해 유리섬유/폴리프로필렌과 건직물 계면에서 층간 분리현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 폴리프로필렌 기지가 성형과정 중에 건직물에 충분히 함침되지 않았기 때문으로 판단된다 (Fig. 8 참조).

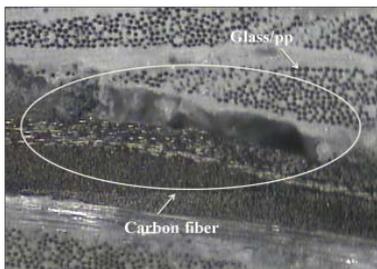


Fig. 8 Microscopic observation.

3.2 섬유 부피분율 측정 및 단면관찰

Fig. 4와 Table 1에서 보이는 바와 같이 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료는 230°C, 3MPa에서 가장 높은 영계수와 강도를 가짐을 확인하였다. 이는 열성형에 의해 기지인 폴리프로필렌과 유리섬유가 적절히 혼합되고, 재료 내에 기공의 함유량이 감소하여 결과적으로 섬유 부피분율이 증가하였기 때문으로 판단된다. 성형된 복합재료 시편의 섬유 부피분율을 측정하기 위해서 복합재료의 기지인 폴리프로필렌을 태워 섬

유의 부피를 측정하였다. 로 (Furnace)를 이용하여 700°C에서 2시간 동안 복합재료 시편을 태운 후 다음 식(1)을 이용하여 Table 2와 같이 성형조건에 따른 섬유 부피분율을 계산하였다. 섬유 부피분율, 섬유의 질량, 기지의 질량을 각각 V_f , W_f , W_m 으로 나타내었고, 유리섬유의 밀도(ρ_f)와 폴리프로필렌의 밀도(ρ_m)는 각각 2,619kg/m³와 911kg/m³이다.

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (1)$$

실험결과 고온(230°C)에서 성형된 시편의 섬유 부피분율은 저온(180°C) 성형의 경우에 비해 매우 높은 값 (52.4%)을 가짐을 확인하였으며, 높은 섬유 부피분율은 시편의 높은 강성과 강도의 원인임을 확인하였다.

Fig. 9는 기공함유량을 확인하기 위해 시편단면을 촬영한 사진이다. 고온(230°C)에서 성형한 시편의 경우 압밀이 잘 되어 낮은 기공함유량(3.35%)을 가짐을 확인하였다.

Table 2 Fiber volume fraction of Twintex according to the forming conditions

Forming Temperature[°C] /3MPa	W_c [g]	W_f [g]	W_m [g]	V_f [%]
180	4.2300	2.7025	1.5275	38.2
200	3.3600	2.2725	1.0875	42.5
230	2.9410	2.2254	0.7156	52.4

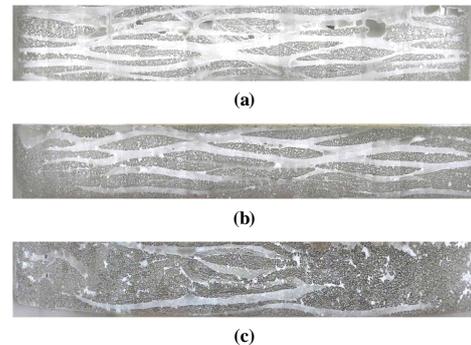


Fig. 9 Micrographs of tow geometry for specimens formed under (a) 180°C / 3MPa, (b) 200°C / 3MPa, (c) 230°C / 3MPa conditions.

3.3 고정판의 4점 굽힘실험

인장실험을 통하여 가장 물성이 높게 나타난 성형조건인 3MPa, 230°C에서 고정판 시편을 제작하였다. 제작된 시편으로 4점 굽힘실험을 수행하였다. 시편의 성형조건과 스크류 구멍 가공조건이 굽힘거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 스크류 구멍의 제작방법 (정형성형 및 드릴링 가공)에 따른 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 고정판 시편을 제작하였으며,

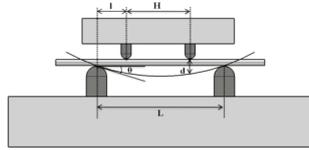


Fig. 10 Experimental jig for 4-point bending tests.

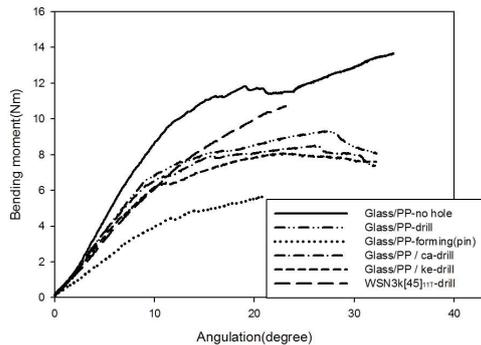


Fig. 11 Bending moment-angulation curves for 4-point bending tests.



Fig. 12 The specimen which was formed using pins.

Table 3 Bending stiffness for 4-point bending test

Glass/PP (no hole)	Glass/PP (drilled holes)	Glass/PP (formed holes)
1.00 Nm/degree	0.80 Nm/degree	0.43 Nm/degree
Glass/PP/carbon (drilled holes)	Glass/PP/Kevlar (drilled holes)	WSN3k[45] _{IT} (drill)
0.71 Nm/degree	0.60 Nm/degree	0.75 Nm/degree

인장실험에 사용했던 두 가지 건직물을 포함한 하이브리드 복합재료 고정판도 추가로 준비하여 실험을 수행하였다. 4점 굽힘실험 치구에 관한 형상 정보는 Fig. 10과 같다.

외부롤러의 거리 (L)는 73mm이고 하중을 가하는 내부롤러 (H)의 거리는 41mm이다. 외부와 내부 롤러 사이의 거리 (l)는 16mm이다. 실험을 통해 얻은 결과와 다음 식 (2-4)을 이용하여 시편의 굽힘강성을 계산하였다[6].

$$M = \frac{P}{2}l \tag{2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d}{l} \cdot \frac{180}{\pi} \tag{3}$$

$$BS = \frac{M}{\theta} \tag{4}$$

여기서, M , θ , d , BS 는 각각 굽힘모멘트, 회전각, 처짐량 및 굽힘강성을 나타내고 4점 굽힘실험에 대한 결과는 Fig. 11과 같다.

정형성형으로 스크류 구멍을 제작 한 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 고정판 시편의 굽힘강성은 동일한 재료로 구멍이 없는 고정판 시편의 굽힘강성인 1Nm/degree보다 매우 낮은 0.43Nm/ degree이다. 이와 같이 낮은 굽힘강성의 원인은 정형성형 중에 스크류 구멍 주위의 섬유 배열이 왜곡되고 시편을 형성해야 할 섬유들이금형 외부로 배출되어(Fig. 12 참조) 결과적으로 고정판의 섬유 부피분율이 낮아져서 물성이 저하된 것으로 판단된다.

성형 중 섬유 배출현상을 방지하기 위해 시편의 구멍을 드릴링 가공한 후 4점 굽힘실험을 수행한 결과 0.80Nm/dgree로 굽힘강성이 향상되는 것을 확인하였다. 인장실험에 사용했던 두 가지 건직물을 포함한 하이브리드 복합재료 고정판과 탄소섬유/에폭시 프리프레그 고정판도 추가로 제작(구멍가공 방식)하여 굽힘강성을 측정하였다 (Table 3). 실험결과 탄소섬유/에폭시 고정판의 경우 열가소성 복합재료 (Twintex)와는 달리 성형 중 점도가 낮은 에폭시레진의 유동에 의해 상대적으로 높은 굽힘강성을 가짐을 알 수 있었다. 그러나 두 가지 종류의 건직물이 함유된 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료의 경우 건직물이 함유되지 않은 경우에 비해 11% ~ 25% 낮은 굽힘강성을 가짐을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 열가소성 복합재료인 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료를 이용한 복합재료 고정판의 적절한 성형조건을 찾는 것을 목표로 다양한 성형조건에 따른 인장실험 및 굽힘실험 등의 실험을 수행하여 영계수, 인장강도, 섬유부피분율, 굽힘강성 등을 실험적으로 구하여 성형조건을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 제조사가 권장한 성형조건을 참고하여 다양한 성형압력, 성형온도 및 성형시간의 조합에 따른 시편의 기계적 물성을 측정하여 성형온도, 성형압력 및 성형시간이 각각 230°C, 3MPa, 30분일 경우 가장 우수한 기계적 특성을 가지는 것을 확인하였다. 이 성형조건은 폴리프로필렌 기지의 산화가 빨리 진행되지 않으면서 높은 섬유 부피분율과 낮은 기공함유량을 제공하였다. 결정된 성형조건으로 성형한 경우 시편의 영계수와 인장강도는 각각 21.8GPa과 601MPa이었다.

선행연구[2]에서 응력방패현상을 효과적으로 줄이기 위해서 뼈와 강성이 유사한 직물 탄소섬유/에폭시 복합재료 고정판([45]_{IT})을 제안하였다. 본 연구에서는 인장실험을 통하여 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료가 적절한 성형조건으로 성형이 될 경우 탄소섬유/에폭시 복합재료와 유사한 영계수를 가지며, 인장강도와 굽힘강도는 더 우수함을 확인하였다.

유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 고정판의 피로특성을 향상시키기 위한 방안으로 아라미드 직물 및 탄소직물을 삽입한 시편을 준비하여 인장시험 및 고정판 굽힘시험을 수행한 결과 상기 건직물이 삽입되지 않은 시편에 비해 낮은 정적 물성을 가짐을 확인하였으며, 이는 삽입된 건직물에 폴리프로필렌 기지가 효과적으로 함침되지 못하여 낮은 하중에서 이종재료간 계면에서 박리가 발생한 것에 기인한 것임을 확인하였다. 따라서 이중 건직물을 포함한 하이브리드 복합재료 구조를 성공적으로 성형하기 위해서는 보다 다양한 성형 변수의 조합이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 열가소성 복합재료 고정판은 선행연구[2]에서 제시된 열경화성 복합재료 고정판 (탄소섬유/에폭시)보다 빠른 성형시간 및 재사용이 가능하다는 장점이 있으며, 골절치료 시술 시 국부적 가열을 통해 형상을 용이하게 변경시킬 수 있기 때문에 보다 개선된 복합재료 고정판이라 판단된다.

본 연구를 통해 열가소성 복합재료인 유리섬유/폴리프로필렌 복합재료 고정판의 적절한 성형조건을 찾았으며, 이 결과는 일반적인 복합재료 구조물 성형을 위한 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 하지만, 보다 정확한 성형조건을 찾기 위해서는 예열온도, 예열시간 등을 포함한 보다 세부적인 성형변수를 고려한 심도있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국연구재단(NRF)을 통해 교육과학기술부의 중견연구지원사업(핵심연구지원) (2010-0009372)의 재정지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) K. Fujihara, Z. M. Huang, S. Ramakrishna, K. Satknanantham, H. Hamada, "Performance study of braided carbon/PEEK composite compression bone plates," *Biomaterials*, Vol. 24, 2003, pp. 2661-2667.
- 2) 김주호, 장승환, "골절 치료를 위한 복합재료 고정판 기초 설계 및 특성 평가," 한국복합재료학회지, 제20권, 제5호, 2007, pp. 7-12.
- 3) M. D. Wakeman, T. A. Cain, C. D. Rudd, R. Brooks, A. C. Long, "Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro- mechanical properties II. glass-mat-reinforced thermoplastics," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 709-726.
- 4) A. C. Long, C. E. Wilks, C. D. Rudd, "Experimental characterisation of the consolidation of a commingled glass/polypropylene composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, 2001, pp. 1591-1603.
- 5) ASTM D3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- 6) Keith Tayton, John Bradley, "How Stiff Should Semi-Rigid Fixation of the Human Tibia be?," *The journal of bone & Joint Surgery*, Vol. 65-B, No.3, 1983, pp. 312-315.