

하이브리드 복합재료 튜브의 Pultrusion 성형공정연구

성대영*·김태욱*·이광주**

A Study on the Pultrusion of Hybrid Composite Tube

Dae-Young Seung, Tae-Wook Kim, Kwang-Ju Lee

Hybrid composite, Pultrusion, Rule of mixture, 3 point bending

Abstract

Glass fiber reinforced plastic(GFRP) tent pole fabricated by the pultrusion process with unidirectional glass fiber is two times as heavy as aluminum tent pole owing to the low specific modulus

The first objective of this research is the design the high strength and light weight tent pole compete with. the second is the develop glass fiber carbon fiber hybrid tent pole pultrusion process. the third is the evaluate the mechanical properties of the hybrid tent pole compare to these of the duralumin tent pole.

1. 서론

인발성형공정(Pultrusion Process)은 연속적으로 공급되는 섬유가 수지에 함침되어 일정한 단면형상을 갖는 금형을 통과하는 동안 경화되면서 연속적으로 성형되는 공법이다. 이 성형공법은 긴 튜브, 봉 및 채널 등과 같이 길이 방향으로 똑같은 단면을 가진 제품을 제조하는데 주로 사용되며, 길이에 대한 제약을 받지 않아 대량생산이 가능하고 자동화하기가 쉬워 생산성이 높고 성형 단가가 저렴하다는 장점이 있다[1-2]. 본 연구에서는 복합재료 튜브 인발성형의 대표적인 예인 텐트폴을 성형하고자 한다. 유리섬유는 가격이 저렴하여 복합재료 튜브 인발성형에 많이 쓰이고 있으나, 무게가 다른 종류의 섬유에 비해 무거운 단점이 있다. 기존의 유리섬유강화 복합재료(Glass Fiber Reinforced Plastic) 텐트폴은 알루미늄 텐트폴에 비하여 저가이나 무게가 2배 이상

이 되어 시장 경쟁력이 떨어진다. 또한 탄소섬유는 비강성과 비강도가 높아 가볍고 기계적 특성이 좋으나 고가이기 때문에 텐트폴에 적용이 어렵다. 따라서 보강섬유로 유리섬유와 탄소섬유를 동시에 사용하여 GFRP 텐트폴 보다 가볍고, 알루미늄 텐트폴의 기계적 성능을 갖는 하이브리드 복합재료 텐트폴을 고려하게 되었다. 본 연구에서는 하이브리드복합재료 튜브를 인발성형 할 수 있는 공정을 개발하였으며 하이브리드복합재료 텐트폴의 기계적 특성을 이론적으로 예측하고 실험적으로 구한 기계적 특성과 비교하였다. 그림1에 하이브리드 복합재료 튜브의 인발성형공정 장비의 개략도를 나타내었다.

2. 하이브리드 복합재료 튜브 성형

2.1 하이브리드 복합재료 튜브의 단면형상

하이브리드 복합재료 텐트폴의 단면형상은 기존의 GFRP 텐트폴의 외경과 같은 외경을(d) 갖는 원형의 중공형상으로 그림1에 나타내었다.

텐트폴은 사용 특성상 무게는 가벼울수록 좋고 굽힘강성도는 너무 낮거나 높지않고 적당하여야 한다. 그러나 텐트폴의 요구 굽힘강성도는 명확히 정해져있지 않다. 따라서 본 연구에서는

* 한국기계연구원
** 한국기술교육대학교

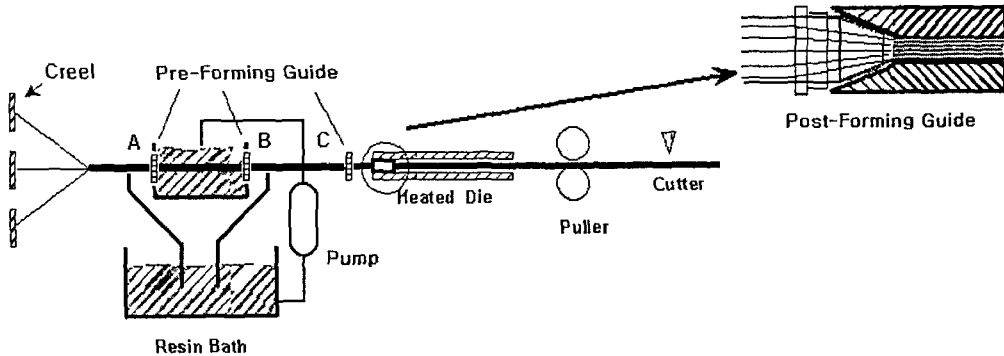
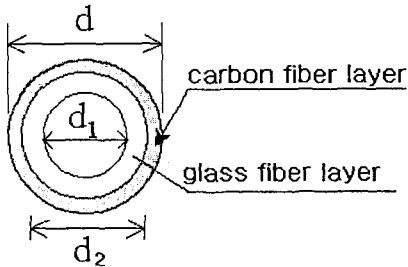


그림 1. 하이브리드 복합재료 튜브 인발성형공정 장비 개략도

알루미늄 텐트폴의 무게 및 굽힘강성도를 설계기준으로 설정하였다. 복합재료 텐트폴은 단일방향(Unidirection, UD) 섬유를 사용하므로 하이브리드 복합재료 텐트폴의 탄성계수를 혼합법칙(rule of mixture)으로 구하였다[3]. 또한 강성이 큰 탄소 섬유 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 층을 외부에 위치시켜 하이브리드 텐트폴의 굽힘강성도(EI)에 대한 기여도를 크게 하였다. 이상의 설계조건으로 하이브리드 텐트폴의 d_1 , d_2 를 결정하였으며 구속조건 및 계산 결과는 표1과 같다.



d : CFRP 외경, d_1 : GFRP 내경
 d_2 : CFRP와 GFRP의 경계층 직경
 그림 2. 하이브리드 복합재료 튜브 단면

표 1. 구속조건 및 구조설계 결과

무게 [g]	굽힘강성도 [Nmm ²]	d [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	시편길이 [mm]
80	27.4×10^6	11	8	10.5	1000

2.2 하이브리드 복합재료 튜브 인발성형공정

탄소섬유와 유리섬유를 성형하고자 하는 단면에 배열되도록 유도하기 위해서는 두 종류의 섬유가

서로 간섭하지 않으면서 계획된 단면의 위치로 배열시킬 수 있는 특별한 섬유 유도 장치가 필요하다. 유리섬유와는 달리 탄소섬유는 급격한 각도 변화에 의해 부러지는 취약한 특성이 있어 실패(creel)에서 금형까지 직진도를 유지해 주어야 한다. 본 연구에서는 탄소섬유의 직진도를 유지하면서 수지를 함침시키기 위해 그림 2에서와 같은 resin bath를 사용하였으며, 탄소섬유와 유리섬유를 계획적으로 유도할 수 있는 forming guide를 개발하였다.

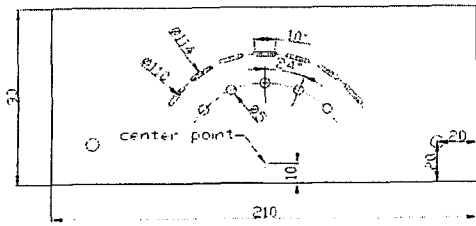
2.3 Forming guide

섬유는 실패(Creel)로부터 여러 가닥의 섬유 묶음 형태로 나오게 되는데 forming guide는 섬유들을 성형하고자 하는 단면 형상으로 유도하는 역할을 하며 유도되는 섬유들이 서로 간섭하지 않도록 하고 수지에 함침된 섬유가 자중에 의하여 밑으로 처지는 것을 방지하는 역할을 한다.

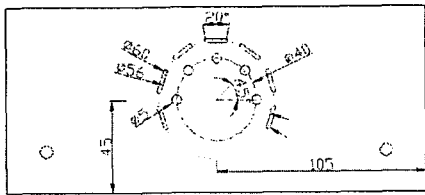
본 연구에서는 이러한 역할을 하는 forming guide를 4단계로 나누어 개발하였으며, 최초 1,2,3 단계를 Pre-forming guide A, B, C, 4단계를 Post-forming guide로 명명하였다.

2.3.1 Pre-forming guide

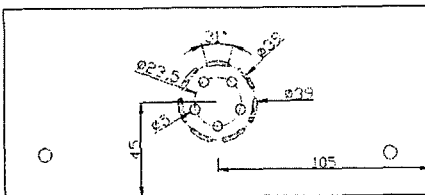
탄소섬유와 유리섬유가 유도되는 동안 계획된 단면의 형태로 배열되도록 하기 위해 탄소섬유가 통과하는 hole과 유리섬유가 통과하는 hole을 상·하로 구분하여 배열하였다. Pre-forming guide A는 resin bath 전면에 설치하였고 Pre-forming guide B는 resin bath 후면에 설치하였으며 좀더 원형에 가까운 모양으로 hole이 배열 되어있다. Pre-forming guide C는 완전한



① Pre-forming guide A



② Pre-forming guide B



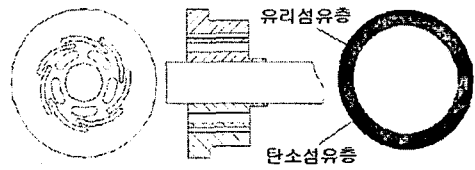
③ Pre-forming guide C

그림 3. Pre-forming guide의 설계도

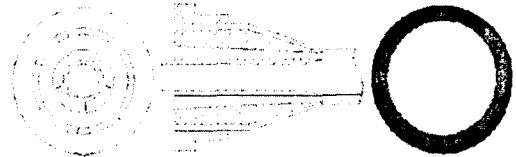
동심원으로 섬유를 배치시킨다. 그림 3에 Pre-forming guide A, B, C의 설계도를 나타내었다.

2.3.2 Post-forming guide

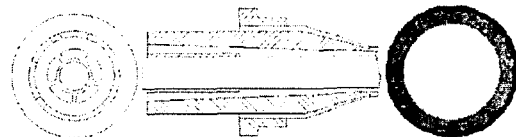
post-forming guide는 Pre-forming guide C에서 동심원으로 배열된 섬유들을 성형하고자 하는 하이브리드 복합재료 튜브의 단면형상으로 유도하는 역할을 한다. 이 과정에서 유리섬유는 중공축을 형성시키는 mandrel를 고르게 감싸면서 glass fiber reinforced plastic(GFRP)층을 형성하여야 하며 탄소섬유는 GRFP층을 고르게 감싸야 한다. post-forming guide를 개발하는 과정에서 그림 4와 같이 크게 3가지 형태로 설계 및 수정을 하였다. 그림 4의 post-forming guide의 형태에 따른 하이브리드 복합재료 튜브의 성형 단면을 보면 Type I, II는 CFRP층과 GFRP층의 경계가 모호하고 불규칙적으로 서로 섞여있는 것을 볼 수 있으며 Type III은 그 경계가 동심원으로 분명히 구분되며 CFRP층과 GFRP층이 서로 섞이지 않은 것을 볼 수 있다.



① Post forming guide type I



② Post forming guide type II



③ Post forming guide type III

그림 4. Post forming guide 설계

2.4 하이브리드 성형 메커니즘

post-forming guide는 고정 치구에 결합되어 최종적인 성형단면으로 섬유들을 집속하고 배치시킨다. post-forming guide 후미 부분의 경사각과 고정치구 벽면의 경사각을 서로 다르게 가공하여 post-forming guide 후미부분과 고정치구 벽면의 틈새가 점점 좁아지게 되는데 끝 부분에서는 설계한 CFRP층의 두께보다 약 1.2배 정도 넓게 분포시킨다. 탄소섬유는 탄소섬유 hole을 통과한 후 puller의 당기는 힘으로 인해 고정치구 벽면을 따라 유도되고 post-forming guide와 고정치구 벽면 사이에서 압력이 유발되어 여분의 수지가 제거됨과 동시에 그림 5의 a와 같은 수지유동이 발생하여 탄소섬유가 금형 벽면 주위로 균일하게 배열된다. 또한 유리섬유는 hole을 통과한 직후 mandrel 주위를 고르게 감싸며 모두 합쳐진다. 유리섬유가 GFRP층을 이루기 전에 탄소섬유가 유리섬유와 섞이지 않도록 하기 위해 유리섬유 hole의 길이를 짧게 가공하였고 탄소섬유는 post-forming guide의 후미부분까지 강제 유도되므로 탄소섬유와 유리섬유가 분리되어 동심원으로 배열하게 된다.

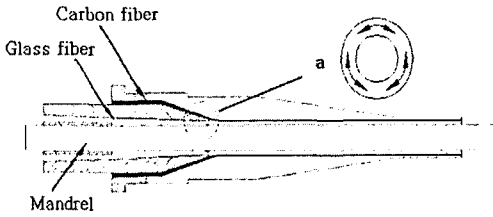


그림 5. 하이브리드성형 메커니즘

3. 하이브리드 복합재료 튜브의 기계적 특성

유리섬유와 탄소섬유층의 탄성계수를 계산하여 시제품의 굽힘강성도를 예측하고 3점 굽힘실험을 통하여 검증하였다. 실험방법은 복합재료에 대한 굽힘실험을 규정한 ASTM D-790의 기준하여 실행하였으며 실험 조건은 표 2와 같다.

표 2. 3점 굽힘강성도 실험조건

specimen length	450 mm
support span length	400 mm
cross head speed	4 mm/min

실험은 INSTRON 4206(최대하중 10 ton)으로 수행하였으며 하중-변위 곡선을 그림 6에 하중-변위 곡선을 나타내었다.

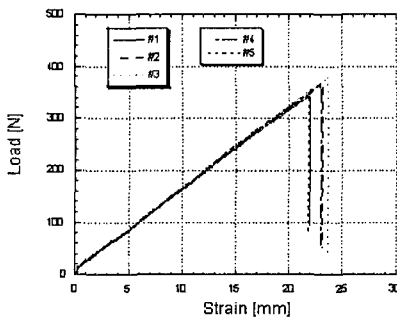


그림 6. 3점 굽힘실험 결과

표3에 실험 굽힘강성도와 무게를 이론값과 비교하였다. 무게는 오차가 거의 없으나 굽힘강성도는 오차가 약 17%로 큰 것을 알 수 있다. 이것은

단일방향 섬유로 성형하였기 때문에 원주 방향에 대한 보강이 이루어지지 않아 섬유방향으로 쪼개짐이 발생하였기 때문인 것으로 사료된다.

표 3. 기계적특성 실험 결과

	이론값	실험값	오차[%]
무게[g]	80	82	2
굽힘강성도 [Nmm ²]	27.40×10 ⁶	22.84	17

4. 결론

본 연구에서는 유리섬유와 탄소섬유를 조합하여 하이브리드 복합재료 튜브를 인발성형하기 위한 인발성형 기술을 연구 개발하였으며 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1. 탄소섬유와 유리섬유를 동시에 인발성형함에 있어서 각각의 섬유들이 서로 간섭되어 섞이지 않고 설계한 성형 제품의 단면모양으로 균일하게 배열되도록 하기 위하여 섬유들을 계획적으로 유도하는 pre-forming guide와 post-forming guide장치가 필요하다.

2. 본 연구에서 성형한 복합재료 튜브의 CFRP층과 GFRP층의 경계가 동심원으로 경계가 명확하므로 본 연구의 하이브리드 복합재료 인발성형 공정은 매우 성공적인 것으로 사료된다.

3. 하이브리드 복합재료 텐트폴의 원주방향 응력을 보강하고 이를 해석하는 방법의 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 전의진, 윤광준, 이우일, 김태욱 최신복합재료, (주)교학사, 1995.
2. J.E. Sumerak, "Understanding Pultrusion Process Variables for the First Time", Proc. 40th SPI RP/C, session 2-b, 1985.
3. Spencer, Anthony James Merrill. "Continuum theory of the mechanics of fibre-reinforced composites", Wien;NewYork::Springer-Verlag, 1984.