

# 수지 충전 공정을 이용한 복합재 조종봉 제조 기술 개발

이상관\* · 엄문광\* · 변준형\* · 양승운\*\* · 김광수\*\*

## Development of Manufacturing Process of Composite Control Rods using Resin Transfer Molding Process

Lee Sang-Kwan, Um Moon-Kwang, Byun Joon-Hyung,  
Yang Sung-Un and Kim Kwang-Soo

**Key Words:** Control rod, RTM, triaxially braided preform, permeability, CVFEM,

### Abstract

In order to commercialize the low cost composite fabrication technology in the area of domestic aerospace structure field, Resin Transfer Molding process has been considered as an alternative process to replace the high cost autoclave technology. The end part for the development of RTM process is the control rod of flight control system of aircraft. A braided preform was triaxially designed to improve the dimensional stability and mechanical property in the direction of external loads. Through the flow analysis using CVFEM, the resin filling time was calculated and the resin injection method was determined. The results of the flow analysis were directly applied to RTM mold design. The control rod was successfully manufactured by RTM process using internal pressure. The length and outer diameter of the manufactured part are 1148mm and 32mm, respectively.

## 1. 서 론

항공 분야에서의 복합재 실용화의 최종적인 목표는 항공기 전체의 구조물이지만, 국내산업 여건상 항공기 전체 구조물을 실용화 대상으로 확보하기에 어려운 점이 있으므로 핵심부품 수준에서 실용화 목표를 설정하는 것이 현실적인 접근방법이라 판단된다.

항공기 구조분야에서는 “경량화 설계기술”, “구조안전성 입증기술” 및 “저비용 생산 기술” 등의 3가지 요소기술이 유기적으로 결합되어야 만이 복합재 실용화라는 소기의 목적을 달성할 수 있다.

본 연구에서는 3가지 요소 기술중의 하나인

\* 한국기계연구원 재료공정연구부

\*\* KAI 창원공장 첨단 복합재 센터

저비용 생산 기술에 초점을 맞추어 복합재 항공기 부품의 국산화 개발의 가능성을 입증하고자 한다. 개발 대상 부품은 비행 조종 장치의 핵심 부품인 조종봉(control rod)이며, 적용 제조 기술은 최근 고비용 autoclave 공정의 대표적인 대체 기술로서 많은 각광을 받고 있는 수지 충전 공정(Resin Transfer Molding, RTM)을 이용하였다. Fig.1은 개발하고자 하는 복합재 조종봉의 외형을 나타낸 것이다.

## 2. 프리폼 설계 및 제조

### 2.1 프리폼 설계 및 탄성 계수 예측

#### 2.1.1 프리폼 설계

복합재 조종봉용 프리폼은 생산성이 우수한 3축 (triaxial) 브레이드 구조를 이용하였다. 이

구조는 치수 안정성과 길이 방향의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 서로 위나 아래를 지나는 두 종류 브레이딩 섬유에 종축 섬유를 부가한 것이다. Fig.2에 3축 브레이드의 패턴과 밀집된 구조를 나타내었다.

### 2.1.2 탄성 계수 예측

직물 복합재료의 성질은 직물 프리폼의 기하학적 패턴, 구성 재료인 섬유와 기지재료의 성질 및 섬유 함유량에 따라 달라진다. 프리폼의 미세 구조와 복합재료의 기계적인 특성을 연관시키기 위하여 3축 브레이드의 기하학적 모델이 필요하다. 본 연구에서 이용한 기하학적인 모델은 Byun<sup>1)</sup>이 발표한 체적 평균법을 사용하여 탄성 계수를 예측하여 프리폼 설계에 활용하였다.

기하학적 모델에 대한 검증은 섬유굴곡 각도와 섬유 체적율에 대하여 실험치와 예측치를 비교한 결과를 Fig.3에 나타내었다.

### 2.2 프리폼 제조

브레이드 프리폼을 제조하기 위하여 카본섬유 (T700S, 12K, Toray)를 사용하였으며 종축 섬유 개수는 16개, 브레이딩 섬유의 개수는 32개를 브레이딩 기계에 장착하였다. 조종봉의 내부 직경에 해당하는 튜브형 맨드렐을 프리폼 take-up 장치인 캐터필러에 고정된 후 30cm/분의 속도로 take-up 하였다. 한 층의 브레이드 두께는 약 0.7 mm 이므로 전체 두께가 2mm 정도가 되도록 3회에 걸쳐 over-braiding 하였다. Fig.4는 브레이딩 기계에서 프리폼이 제조되는 모습을 보인 것이다.

## 3. 수지 유동 해석

수지 충전 공정에서 프리폼을 통과하는 수지의 유동은 Darcy's law에 따르며, 수지 유동은 질량 보존식을 만족하여야 하며, 수지 충전시 압력장 계산에 사용되는 경계 조건은 아래와 같다.

- 수지 주입구 :

$$P|_{gate} = P_o(t), \text{ or } u|_{gate} = u_o(t)$$

$$\text{- 금형 벽면 : } \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{wall} = 0$$

- 수지 전진면 혹은 공기 배출구 :

$$P|_{vent} = P_{atm}$$

금형 충전 과정은 자유 표면이 존재하는 이동 경계 문제 (moving boundary problem)이므로, 격자 재생성이 불필요한 Control Volume Finite Element Method(CVFEM)를 이용하여 3차원 Shell 형상의 조종봉에 대한 압력 분포 및 유동 선단의 위치를 예측하였다.

유동 해석에 사용된 절점 및 요소 수는 각각 665, 1186 이며 선형 삼각형 요소를 사용하였다. 해석에서 공정 분석을 위하여 시도된 수지 충전 방식은 아래와 같다.

- 봉 가운데 원주에서의 line gate에 의한 주입
- 봉 측면에서의 line gate에 의한 주입

수지 충전압은 진공에 의해서 발생하는 1기압이 그대로 수지 사출 압력으로 작용한다고 가정하였다. 제품면에 절단 부위가 거의 없으므로 edge 효과는 무시하였다. 수지 점도는 상온에서 20분 경과시의 점도를 이용하였다. 아래에 두가지 주입 방식에 대한 해석 결과를 기술하였다.

먼저 봉 가운데 원주에서의 line gate에 의한 주입 시는 수지 충전이 파이프 길이 방향으로 고르게 전진하며 dry spot도 형성되지 않는 바람직한 유동 패턴을 보이나 완전 충전 시간이 6399초 (약 107분) 정도 걸리는 것으로 계산되었다 (Fig.5). 이는 겔 시간 보다 충전 시간이 길기 때문에 실제로는 완전한 수지 충전이 안 될 것으로 예상된다. 따라서 이러한 방식으로 수지 충전하는 것은 바람직하지 않다.

다음은 봉 측면에서의 line gate에 의한 주입시에 대한 유동 패턴을 고찰하였다. 수지 충전이 파이프 원주 방향으로 대체로 고르게 전진하며 dry spot도 형성되지 않는 바람직한 유동 패턴을 보이며 완전 충전 시간도 237초(약 4분)로 겔 시간 보다 충분히 작아 전체적으로 모두 건전한 유동 패턴을 보여주고 있다(Fig.6). 압력도 전체적으로 골고루 분포되어 있어 기포 존재에 의

한 결함도 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 과제 의 시제품용 금형도 이와 같은 유동이 형성 되도록 설계 제작하였다.

#### 4. 시제 제작

##### 4.1 조종봉 시제의 치수

길이가 1148mm, 외경은 32mm인 조종봉을 내압을 이용한 수지 충전 공정을 이용하여 제작하였다. 개발 대상 시제의 치수를 Fig.7에 나타내었다.

##### 4.2 금형 설계/제작

금형 제작에 사용한 재료는 6061 Al을 이용하였다. 금형은 봉 측면에 위치한 line gate, 진공을 확보하기 위한 gasket, 내압 튜브를 연결하기 위한 고정 치구, 수지 배출구, guide pin으로 구성되어 있다. Fig.8은 제작 완료된 상하 금형을 나타낸 것이다.

##### 4.3 시제 제작

조종봉 시제 제작에 사용한 보강재료는 탄소 섬유(Toray, 12K)를 이용하여 브레이딩한 프리폼을 사용하였다. 수지는 Ciba-Geigy 사의 에폭시 수지를 사용하였다. 시제 제작을 위한 성형 조건은 진공 분위기하에서 주입 압력은 22psi, 내압은 58psi를 이용하였다. Fig.9는 브레이드 프리폼을 이용하여 시제를 제작한 결과로서 봉의 두께도 균일하며, 표면의 결함도 없는 것을 알 수 있다. 이는 브레이드 프리폼이 시제 형상과 유사하게 준비되었기 때문에 내압에 의해 금형 벽면에 잘 밀착되었기 때문이다.

시제 제작의 결과로부터 내압을 이용한 RTM 공정의 개발로 저비용의 복합재 조종봉의 제작이 가능하다는 결론을 얻었다.

#### 5. 결론

(1) 체적 평균법으로부터 구한 탄성 계수 예측 모델로부터 3축 브레이드 구조 프리폼 설계 기법과 제조 공정을 확립하였다.

(2) 수지 유동 해석 기법을 이용하여 수지 주입 방법을 결정하였고, 그 결과를 금형 설계/제작에 직접 활용하여 제조 기술의 시행 착오를 최소화 하였다.

(3) 내압을 이용한 수지 충전 공정의 개발에 성공함으로써 조종봉 뿐만 아니라 튜브 형태의 복합재 부품의 제조가 가능하게 되었다.

#### 참고문헌

1. 변준형, "평직 및 주자직 복합재료의 탄성계수 예측", 대한기계학회논문집, vol.21, No.11, p1757~1764, 1997.
2. M.K. Um, S.K. Lee, " A Study on the Determination of In-Plane Permeability of Fiber Preforms, Polymer Composites, vol.20, No.6, 1999

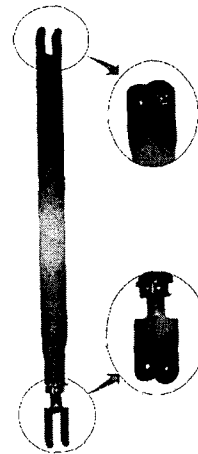


Fig.1 개발 대상 복합재 조종봉의 외형.

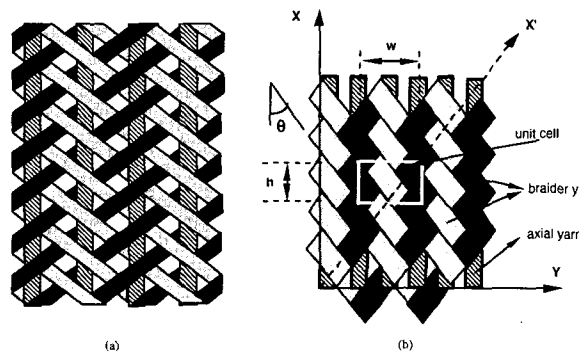


Fig.2 3축 브레이드 프리폼 구조: (a) 패턴, (b) 밀집된 구조.

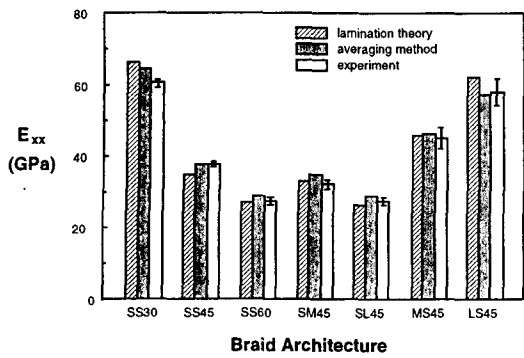


Fig.3 모델 예측치와 실험치의 강성도 비교 결과.

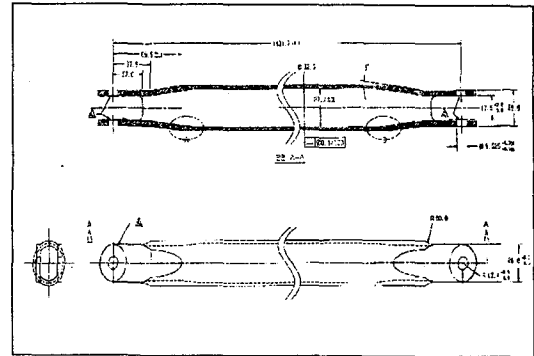


Fig.7 조종봉 시제의 치수.

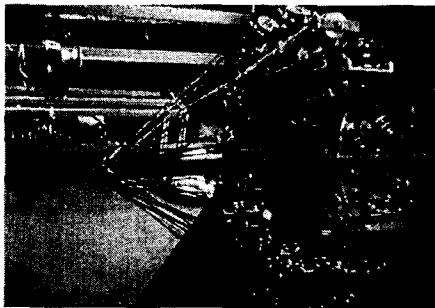


Fig.4 프리폼 브레이딩 장면.

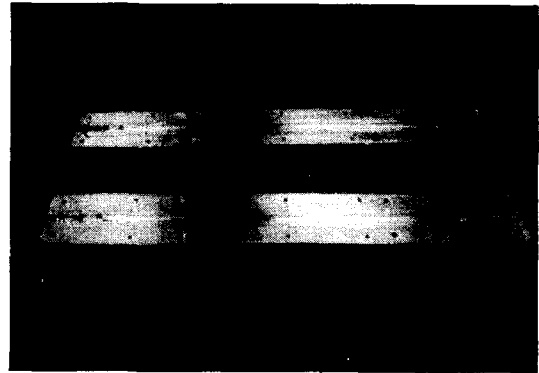


Fig.8 제작 완료된 수지 충전 금형.

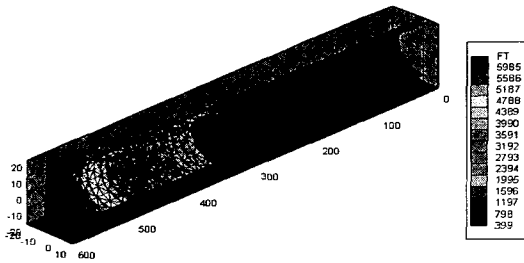


Fig.5 원주에서의 line gate에 의한 유동 해석 결과.

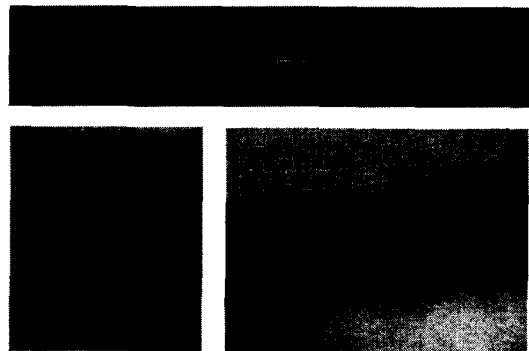


Fig.9 제조 완료된 조종봉 시제 외형.

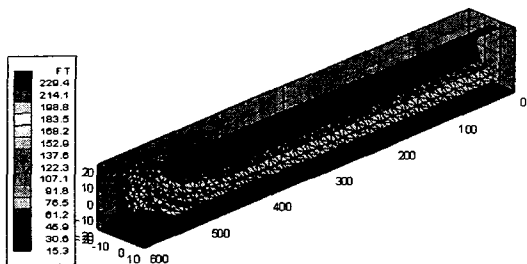


Fig.6 봉 측면에서의 line gate에 의한 유동해석 결과.