

인볼루트 구조물의 적층패턴설계 및 구조시험

이형식* · 원용구* · 이승구** · 주창환**

Pattern Design and Structural Test for the Involute Construction

Hyung-Sik Lee, Yong-Goo Won, Seung-Goo Lee and Chang-Whan Joo

Key Words: Pattern design, Involute construction, Laminate, Prepreg, Structural test

Abstract

In order to fabricate a involute construction structure, the pattern design for prepreg stacking was developed. For obtaining the demanded strength in the circumferencial and axial direction of the involute construction and the proper processability of prepreg stacking, the shaped pattern method was established which has a calculated length suitable for stacking. We can obtain the involute construction with clean interface between laminated plies and suitable dimension by using pattern design method developed in this study. Test specimens with varied arc angle were designed to test the structural properties of involute construction. Tensile and compressive strength decreased with the increase of arc angle. Tensile modulus and compressive failure strain were calculated under the condition of transformation of material properties successfully.

1. 서 론

복합재료 분야의 기술이 크게 발전됨에 따라 항공기 구조, 스포츠 용품 등과 같은 기존의 응용분야와 더불어 점차 특수한 구조까지 응용분야를 넓혀가고 있다. 복합재료를 형상을 갖는 구조물에 적용하려면 구조내에 섬유를 배열하는 방법이 중요하다. 현재 많이 사용되는 섬유배열방법들은 일방향 섬유배열에서부터 제직, 편성, 브레이딩 및 부직포 등이 있다. 최근에는 복합재료를 두꺼운 형상의 구조물에 적용하기 위하여 섬유를 3차원 구조로 배열하는 방법도 시도되고 있다. 개발된 방법들은 일체형 3차원 섬유배열구조를 가지지만, 제조장치가 너무 복잡하고, 속도가 느

려 경제성이 없다는 단점을 갖고 있으며, 탄성률이 높은 섬유들은 제직중 손상을 받을 수 있기 때문에 아직도 보완해야 할 부분들이 많이 있다. 그러므로 두꺼운 형상을 갖는 구조도 기존의 2차원 직물을 적층하는 방법을 경제성면에서 아직도 많이 사용하고 있다. 본 연구에서는 직물 프리프레그 적층방법으로 큰 형의 두꺼운 인볼루트(Involute) 구조물을 제조하고자 하였다. 인볼루트 구조물에 대해서는 여러 연구가 있었지만 내열성 구조에 주로 사용되므로 강도해석이 거의 없는 상태이었다 [1-4]. 그러나 인볼루트 구조를 강도가 요구되는 부품에 사용하려는 시도가 있었는데 [5], 이 경우 인볼루트 구조의 강도해석이 필수적으로 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 먼저, 인볼루트 구조물의 복잡한 형상을 고려하고 구조물내의 섬유배열을 최적화하기 위하여 직물 프리프레그의 패턴

* 국방과학연구소

** 충남대학교 섬유공학과

을 설계하였다. 설계된 패턴을 따라 적층하여 복합재료를 제조하였고, 제조된 인블루트 구조물의 기본적인 구조물성을 시험하여, 설계의 타당성을 입증하고자 하였다. 인블루트 구조물을 시험하기 위하여 섬유배열각도를 변화시킨 시험편을 고안하여 구조 시험하였고, 시험데이터를 해석하여 패턴 설계에 의한 적층법으로 제조된 인블루트 구조물이 적절한 구조성능을 갖는 것을 증명하고자 하였다.

2. 패턴설계

2.1. 설계인자.

원주방향의 강도가 요구되는 인블루트 구조물은 300장 이상의 프리프레그를 적층하는 구조로서 Fig.1(a, b, a, d)과 같이 Arc angle과 Surface angle에 따라 섬유배열방향이 바뀐다. 이에 따라 2차원 직물을 사용하여도 방향에 따른 강도를 조절할 수 있다. Arc angle은 프리프레그의 두께와 적층매수로 결정되며 Surface angle은 적층 기준면의 각도로 결정한다. 따라서 적층매수가 많을수록 프리프레그의 두께가 두꺼울수록 Arc angle은 증가하며, 동일한 단면에서 반경위치가 클수록 Arc angle은 감소한다. Arc angle의 감소는 원주방향의 적층이 증가하는 것이므로 원주방향강도가 증가한다. 따라서 원주방향의 강도가 필요한 경우에는 적층매수를 줄여 원주방향의 강도를 증가시켜야 한다. 그러나 현실적으로 패턴의 길이를 공정가능성에 맞도록 조절하면 강도상의 한계를 갖게 된다. 예를 들어 원통형 부품의 패턴은 Arc angle을 최소로 하면 직사각형 패턴 하나로 붕을 감는 형상이 된다. 목적하는 프리폼이 원통형이라면 가능하지만 콘(cone)형이라면 패턴은 중심각이 무한대인 부채꼴이 된다. 이와 같은 패턴으로 적층하는 것은 불가능하다. 또한 중심각이 비교적 작아도 여러 장의 패턴을 장미꽃잎처럼 적층하는 것은 숙련이 필요하다. 따라서 요구강도가 클 경우 Arc angle을 최소로 하여 패턴을 정하면 적층공정이 불가능하고, 공정이 용이하도록 Arc angle을 증가시키면 요구강도를 만족시킬 수 없으므로 공정가능성을 고려한 인자결정이 필요하다. 곡면의 정확성 문제, 패턴 적층에서의 정확성 문제, 성형공정에서 각 층의 이동문제 등이 고려된 패턴설계가 필요하다.

Surface angle은 Fig.1에서 중심축에 대한 섬유 배향각으로 축방향의 강도를 결정하게 된다. 적층 공정에서 Surface angle도 충분히 고려되어야만 요구되는 축방향 물성을 얻을 수 있으며, 더불어 패턴설계에 대한 공정가능성도 고려해야만 한다.

즉, 패턴설계의 기본개념은 적층이 가능하도록 인블루트의 외면과 프리프레그 패턴의 한 면을 직선이 되도록 하는 것과 구조강도를 극대화할 수 있는 Arc angle과 Surface angle을 갖도록 섬유배열을 만드는 것이다.

2.2 패턴설계

섬유배열 방향에 대한 설계인자와 적층공정의 가능성을 고려하여 설정한 프리프레그의 적층 패턴은 전보[5]의 방법과 동일하게 하였다. 전보[5]에서는 인블루트 구조를 형성하기 위하여 Fig. 2와 같은 패턴을 고안하였으며 이 패턴을 적층매수에 따라 일정간격으로 겹치게 적층하여 인블루트 구조를 구성하면 Fig. 3의 형상이 된다. Fig. 4는 제조된 복합재료를 나타낸다.

3. 실험

3.1 실험재료

보강재로는 S-2 유리섬유직물(Owens Corning 사 제품, #1581 8매 주자직)을 사용하였고, 매트릭스 수지로는 페놀수지(한국화이바 제품 F-940)를 사용하였다. 유리섬유 직물을 페놀수지에 함침시켜 수지함량 30%±3%인 프리프레그로 만들어 실험에 사용하였다.

3.2 복합재료 시편제조

인블루트 구조물의 구조성능을 직접 시험하기는 불가능하므로 인블루트 구조를 모사한 시편으로 대체 시험하였다. 구조시험을 위한 복합재료 시편 제조는 실제 인블루트 구조에서와 같이 단면의 Arc angle이 0, 3, 5, 10도가 되도록 Fig. 5와 같이 적층배열하여 제조하였다. 복합재료 성형은 오토클레이브에서 경화온도 150℃, 경화시간 8시간 및 압력 200psi의 조건으로 성형하였다.

3.3 복합재료 구조시험

성형된 복합재료를 구조시험하기 위하여 ASTM

D-30 와 ASTM D-30 에 의거하여 Arc angle에 따른 인장과 압축시험을 시행하였다. 시험시 시편에 스트레인이게지를 붙여서 시편의 변형률을 측정하였다. 시험은 인장속도를 1mm/min으로 하였고, 결과는 인장강도와 탄성률로 나타내어 해석하였다.

4. 결론

4.1. 패턴설계에 의한 복합재료 제조결과

Fig. 4는 본 연구에서 패턴설계에 의하여 제조된 인볼루트 구조물의 사진을 나타낸다. 패턴설계 및 적층에 의하여 예측된 것과 같은 인볼루트 구조를 얻었다. 특히 적층 간에 겹쳐지는 부분에서 매끄러운 계면을 얻을 수 있었고, 적정범위의 공차를 갖는 우수한 복합재료를 얻을 수 있었다.

4.2. 복합재료 구조시험결과

Fig. 6과 7은 인볼루트 복합재료의 인장시험과 압축시험의 결과로서 인장강도와 압축강도가 평면내 적층각이 커질수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 정확한 강도 해석은 파괴모드 해석이 있어야 가능하므로 앞으로 인볼루트 구조물의 파괴해석연구가 필요하다. 인장탄성률과 압축탄성률은 유사하므로 인장탄성률과 압축강도로부터 압축파괴수축률을 구할 수 있다. 인장탄성률은 Fig. 8에 나타낸 것과 같은 관계로부터 그 타당성을 가질 수 있다. 즉, 재료상수들을 입력하여 2차원 재료물성 변환식을 사용하면 적층변화에 따른 물성을 예측할 수 있다. 결과식인 E_x 와 E_y 표현식에 먼저 평면내 각(α)을 대입하여 변환하고, 다시 평면의 각(ψ)을 대입하여 변환하면 인장탄성률을 계산할 수 있다.

Fig. 9와 10은 인볼루트 구조시편의 인장탄성률과 압축파괴 변형률을 나타낸 것이다. 실험치와 탄성률 예측치가 시편상의 오차와 시험상의 오차로 인하여 절대적인 값은 약간 다르지만 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 압축파괴 변형률에서 원주방향 최소수축률이 1.1% 이상이므로 인볼루트 구조물의 안전인자로 참고할 수 있는 값으로 할 수 있다.

5. 결론

인볼루트 구조물을 제조하기 위하여 프리프레그의 적층패턴을 설계하고 이를 적용하여 복합재

료를 제조하였고, 그 구조물성을 시험한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 원주방향 강도와 공정가능성을 고려한 적층 패턴설계에 의하여 우수한 인볼루트 구조물을 제조할 수 있었다.

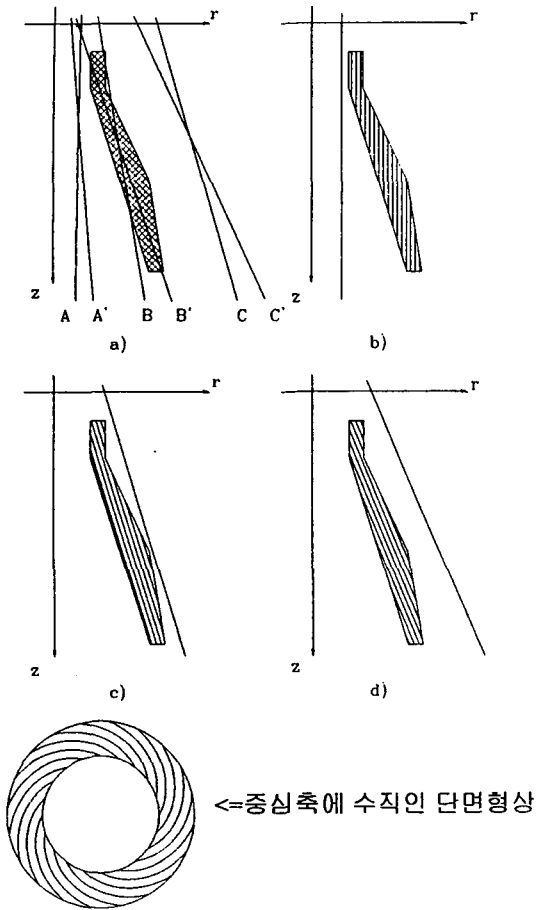
(2) 인볼루트 구조물의 구조시험용 시편을 고안하여 시험하므로써 인볼루트 구조의 인장강도 탄성률 및 압축파괴변형률 등을 구할 수 있었다.

(3) 패턴설계에 의한 물성예측과 구조시험결과로부터 계산된 자료는 인볼루트 구조물의 안전인자로 사용가능하다.

본 연구에서 인볼루트 구조물의 구조시험과 해석결과로 강성률에 관한 예측은 어느정도 가능하였지만 강도에 관한 해석은 파괴모드해석연구가 선행되어야만 필요하다. 이를 토대로 인볼루트 구조물의 변형거동에 대한 유한요소해석이 필요하므로 앞으로 이 부분의 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

- (1) Pagano, N.J., "Elastic Involute Bodies of Revolution", Report AFWAL-TR80-4152, May, 1981.
- (2) Pagano, N.J., and Hsu, P.W., "Geometric Analysis of Rosette Exit Cones", J. Spacecraft, Vol.16, 311, 1979.
- (3) Pagano, N.J., "General Relations for Exact and Inexact Involute bodies of Revolution", Report AFWAL-TR-82-4053, April, 1982.
- (4) Stanton, E.L., and Crain, L.M., "Patches-III User's Manual", PDA Engineering, Report AFRPL-TR-81-42, April, 1981.
- (5) Lee, H.S., Yeh, B.H., Jung, B, "Pattern Design of Composite Rocket Nozzle for Involute Construction", J. Kor. Soc. Comp. Mat., Vol.4, No.2, pp38-53, 1991.



Involute construction

Fig.1 r - z cross-section of involute construction (top : (a), (b), (c), (d)) and r - θ cross-section in pattern(bottom)

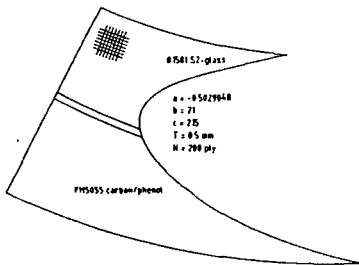


Fig.2 A prepreg pattern developed in this study

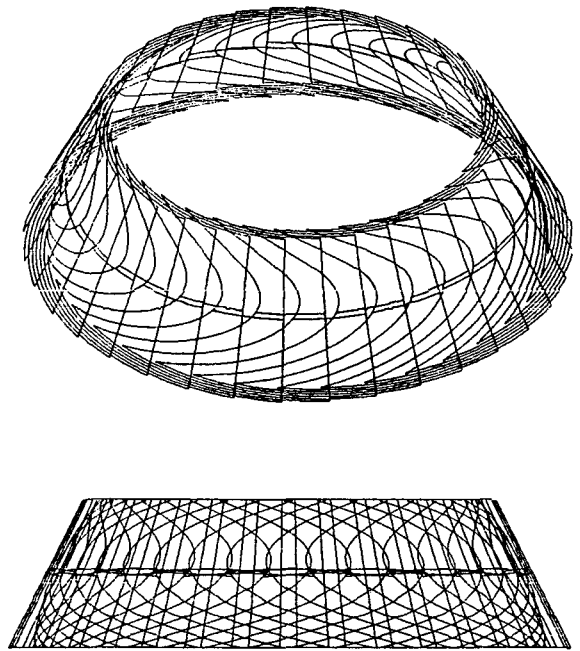


Fig.3 Shape of the prepreg stacked structure using the pattern design: 45 view(top) and side view(bottom)

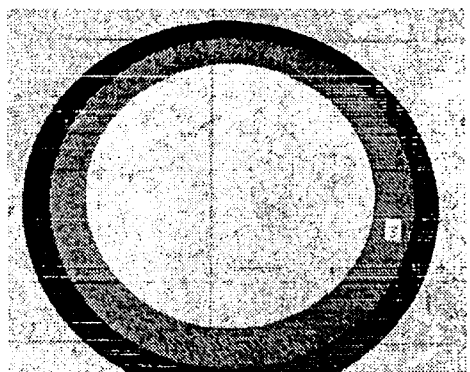


Fig.4 Photograph of manufactured involute construction by using the pattern design method

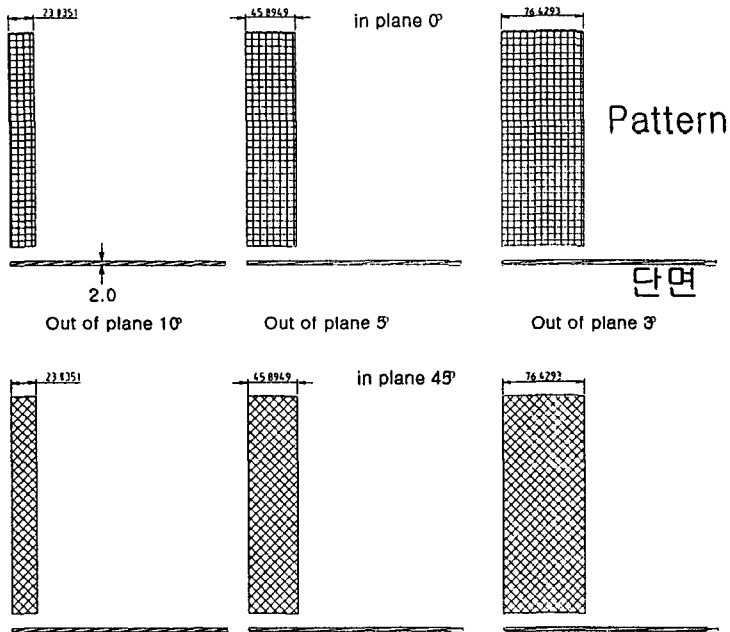


Fig.5 Design of specimens for structural test of involute construction

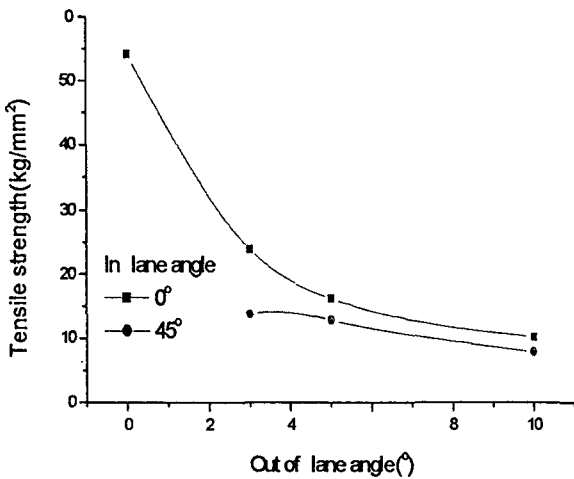


Fig.6 Effect of out of plane angle on the tensile strength.

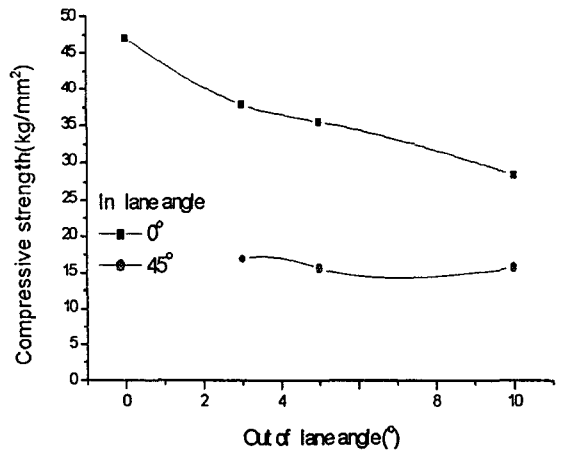


Fig.7 Effect of out of plane angle on the compressive strength.

$$\{\sigma_u\} = [T]^{-1} \cdot [Q_u] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} \cdot \{\epsilon_u\} \quad , j = x, y$$

$$= [\bar{Q}_u] \cdot \{\epsilon_u\}$$

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} \cdot \cos^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{12}}{E_1} \right) \cdot \sin^2 2\theta + \frac{1}{E_2} \cdot \sin^4 \theta$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_1} \cdot \sin^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{12}}{E_1} \right) \cdot \sin^2 2\theta + \frac{1}{E_2} \cdot \cos^4 \theta$$

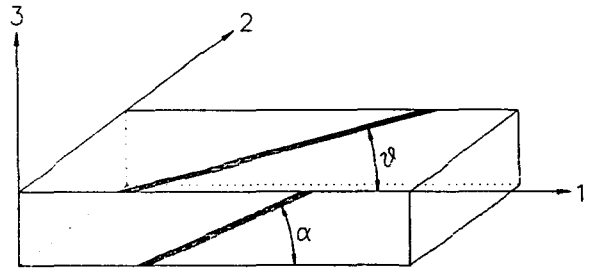


Fig. 8 Considerations on the tensile modulus calculations

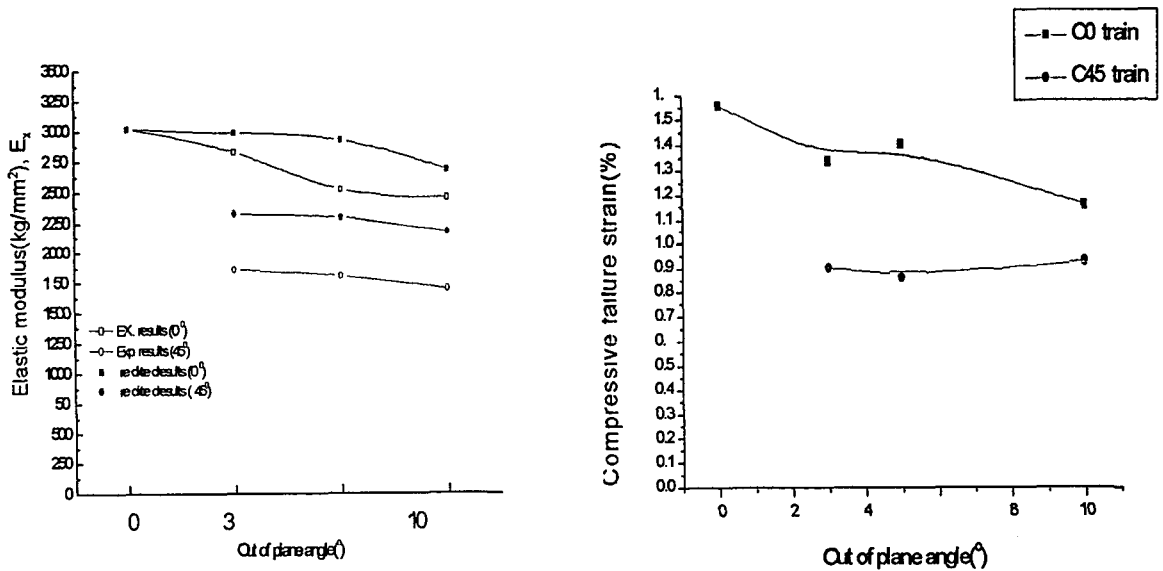


Fig.9 Effect of out of plane angle on the tensile modulus

Fig.10 Effect of out of plane angle on the compressive failure strain