

준측지계적 알고리즘을 적용한 내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적설계

김철웅*·강지호*·홍창선**·김천곤**

Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure based on the Semi-geodesic Path Algorithm

Cheol-Ung Kim, Ji-Ho Kang, Chang-Sun Hong and Chun-Gon Kim

Key Words: Filament Winding, Semi-geodesic Path Algorithm, FEM

Abstract

This research aims to establish an optimal design method of filament wound structures. So far, most design and manufacturing of filament wound structures have been based on manufacturing experiences, and there is no established design rule. In this research, possible winding patterns considering the windability and the slippage between fiber and mandrel surface were calculated using the semi-geodesic path algorithm. In addition, finite element analyses using a commercial code, ABAQUS, were performed to predict the behavior of filament wound structures. On the basis of the semi-geodesic path algorithm and the finite element analysis method, filament wound structures were designed using the genetic algorithm.

1. 서 론

필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 복합재 축대칭 구조물로는 항공우주 분야에서는 로켓의 연료 탱크, 산화제 탱크, 가압 탱크 및 고체 연료 엔진을 구성하는 연소관 등이 있고, 기타 분야에서는 다양한 목적의 파이프(pipe)와 축(shaft), 가스 자동차용 LNG 탱크, 소화기, 정화조(purifier tank) 등이 있다. 그러나 필라멘트 와인딩 공법은 구조 형상이 복잡할수록 맨드릴의 설계와 제작이 까다롭고, 제작에 관여하는 공정 변수가 매우 다양하기 때문에 설계 요구 조건에 부합하는 구조물을 제작하기 어려운 단점이 있다. 따라서 대부분의 실제 설계는 해석과 시험 제작 및 실험을

반복하는 경험적인 방법으로 수행되어 왔고, 설계에 많은 시간이 소요되며 최종 설계 모델의 최적화 신뢰도 또한 낮다.

필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물에 대한 기존의 연구를 정리하면 다음과 같다. Carvalho[1] 등은 섬유와 맨드릴 사이의 미끄러짐과 표면이 오목(concave)하게 들어간 면에서 섬유가 맨드릴과 분리되는(fiber bridging) 현상을 고려한 계적 예측식을 제시하였다. Rousseau[2] 등은 섬유의 균일한 와인딩 여부(windability)를 고려한 필라멘트 와인딩 된 파이프의 파손 거동에 대한 인자 연구를 수행하였다. Kabir[3]는 상용코드 NISA-II의 3차원 복합 적층 셀요소를 사용하여 라이너를 가진 압력탱크에 대한 해석과 라이너의 유무와 소성 변형을 고려한 해석을 수행하였다. 황태경[4] 등은 압력탱크의 확률 변형 및 강도 예측 연구를 수행하였다.

이와 같이 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물에 대한 연구는 와인딩 계적 예측 연구,

* KAIST, 항공우주공학전공 대학원
** KAIST, 항공우주공학전공

거동 해석 연구 등이 고르게 수행되어왔다. 그러나, 기존의 와인딩 궤적 예측에 대한 연구들은 중요한 와인딩 공정 변수를 포함하지 않거나 특정 모델에 대한 사례 연구에 국한되어 있기 때문에, 이를 임의의 맨드릴 형상에 대한 최적 설계 연구에 적용하기에는 한계가 있다. 그리고 필라멘트 와인딩 된 구조물의 설계 연구들도 압력탱크와 같이 구조적 특성이 복잡한 구조물에 대해서는 유한요소해석과 최적 설계 기법을 적용한 최적 설계 연구가 거의 수행된 바가 없다.

본 연구에서는 내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적 설계 방법을 정립하였다. 이를 위하여, 중요 와인딩 공정 변수에 대한 이론적인 접근을 수행하고 제작성을 고려한 준측지계적 알고리즘을 정립하였다. 최종적으로, 와인딩 궤적과 유한요소해석 및 최적 설계 기법을 모두 고려한 설계 방법을 정립하였다

2. 준측지계적 알고리즘

2.1 준측지계적 수식

필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 설계에서 성능에 큰 영향을 미치는 것은 맨드릴의 형상과 섬유와 와인딩 각도이다. 본 연구에서는 이와 같은 실제 와인딩 궤적을 수식적으로 묘사하기 위해서 식 (1)과 같은 준측지계적 수식 (semi-geodesic path equation)[5]을 적용하였다.

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - r r^n \cos^2 \alpha) - r' A^2 \sin \alpha}{r A^2 \cos \alpha} \quad (1)$$

$$\left(\text{단, } \left| \lambda \right| = \left| \frac{f'_b}{f'_n} \right| \leq \left| \mu \right|, A = \sqrt{1 + r'^2} \right)$$

식 (1)은 임의의 맨드릴 표면에 대해서 정의되었으며, α 는 와인딩 각도, x 는 축 방향 변수, θ 는 원주 방향 변수, r 는 반경 방향 변수, λ 는 미끄러짐 계수를 의미한다.

임의의 맨드릴 형상에 대해서 식 (1)을 이용하여 와인딩 각도를 계산하면 각 위치의 와인딩 두께도 계산 할 수 있다. 두께를 구하기 위해서는 다음의 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 섬유의 함유율(fiber volume fraction)이 일정하다. 둘째,

특정 부분을 자오선(meridian)의 수직(gradient) 방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다. 두 조건으로부터 두께 공식이 식 (2)와 같이 유도된다.

$$t = \frac{n_p w t_c}{2\pi r \cos \alpha} = \frac{2\pi r_c \cos \alpha_c w t_c}{2\pi r \cos \alpha} = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} \times t_c \quad (2)$$

여기서, r_c , α_c , t_c 는 각각 실린더 부분 반경, 실린더 부분 와인딩 각도, 한 층의 두께를 의미하고, n_p , w 는 한 층을 와인딩 하는데 필요한 섬유 밴드수와 밴드폭(band width)을 의미한다.

2.2 알고리즘

본 연구에서는 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부의 검증을 모두 고려한 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 와인딩 궤적 알고리즘을 정립하였고, 이를 준측지계적 알고리즘(semi-geodesic path algorithm)이라 하였다. 그리고, 수행을 위한 프로그램 MSGP를 c++ 언어를 사용하여 개발하였다.

Fig. 1은 정립된 준측지계적 알고리즘을 순서도(flow chart)로 표현한 것이다.

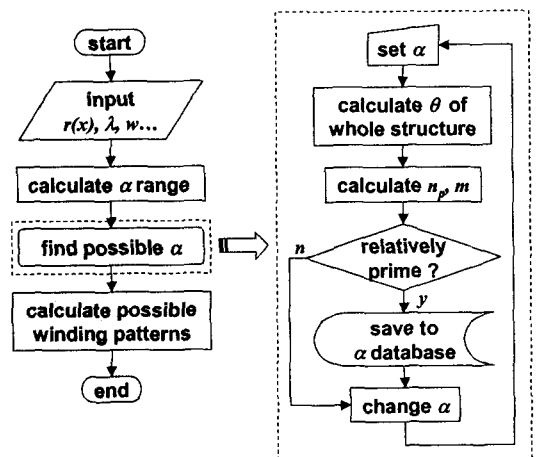


Fig. 1 준측지계적 알고리즘.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델링

본 연구에서는 3차원 요소를 사용하여 필라멘트 와인딩 된 구조물을 해석하였다. 해석이 수행된 모델은 ASTEB의 전방돔(forward dome) 모델이다. 상용프로그램 PATRAN을 이용하여 모델링된 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 사용된 요소는 상용프로그램 ABAQUS가 지원하는 C3D20이다. 와인딩 궤적은 실린더 와인딩 각도 27.5° 를 기준으로 준축지배적 알고리즘을 사용하여 계산하였으며, 계산된 궤적 정보를 각 요소에 부과하기 위한 전처리 프로그램(PREAFT2003)을 개발하여 사용하였다. 경계 조건(boundary condition)은 축방향 대칭성을 이용하기 위하여 1.5° 만 부분 모델링하여 반복 대칭(cyclic symmetric) 조건을 적용하였다.

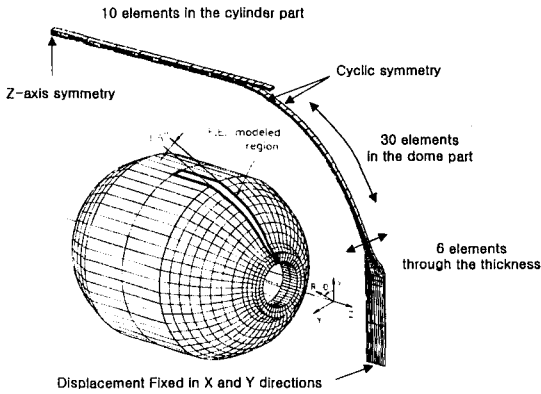


Fig. 2 ASTEB 전방돔의 유한요소모델.

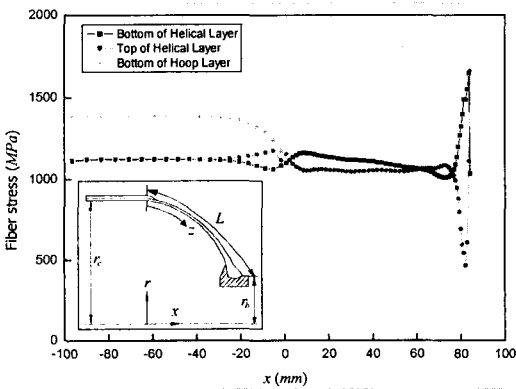


Fig. 3 전방돔의 섬유 방향 응력(13.76 MPa).

3.3 해석 결과

Fig. 3은 13.76 MPa에서 전방돔의 섬유 방향 응력을 두께 방향의 각 위치별로 표시한 그래프이다. 두께 방향의 위치에 따라서 섬유 방향 응력의 경향과 절대값이 다를 수 있다.

4. 최적설계

4.1 최적설계 알고리즘

본 연구에서는 내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적 설계를 위하여 준축지배적 알고리즘, 유한요소해석 및 유전자 알고리즘을 모두 고려한 최적 설계 알고리즘을 정립하였으며 이를 도시한 것이 Fig. 4와 같다. 유전자 알고리즘은 자연진화의 법칙인 적자 생존과 자연 도태의 원리를 바탕으로 정립된 최적화 알고리즘으로써, 교배와 변종 등의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 해를 진화시키는 방법이다.

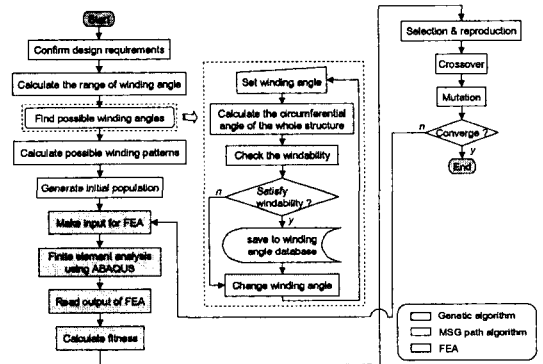


Fig. 4. 최적설계 알고리즘

4.2 압력탱크의 최적설계

내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 축대칭 구조물 중에서 가장 대표적인 압력탱크에 대하여 정립된 알고리즘을 적용해보았다. 기준이 된 모델은 금속 라이너를 갖는 ASTEB 전방돔 형상의 대칭형 복합재 압력탱크이며, 재료는 라이너를 AL alloy 7075 T6로, 복합재는 T800/Epoxy를 사용하였다.

기본적인 설계 조건 및 기준은 다음과 같다. 첫째, 작동 압력은 13.79 MPa이다. 둘째, 작동 압력에서 라이너의 항복을 허용하지 않는다. 셋째,

복합재료의 안전율을 3.0 이상으로 설계 한다. 넷째, 무게 절감을 최우선으로 한다.

위와 같은 설계 기준을 만족하기 위하여 설정한 목적함수는 식 (3)과 같다.

$$f = \begin{cases} \frac{W_{max}}{W} + 0.1 \times \frac{\sigma_{f,design}}{\sigma_{fiber}} + 0.1 \times \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{liner}}, & \sigma_{liner} \leq \sigma_{yield} \text{ \& } \sigma_{fiber} \leq \sigma_{f,design} \\ \frac{\sigma_{f,design}}{\sigma_{fiber}} + 0.1 \times \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{liner}}, & \sigma_{liner} \leq \sigma_{yield} \text{ \& } \sigma_{fiber} > \sigma_{f,design} \\ \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{liner}}, & \sigma_{liner} > \sigma_{yield} \end{cases} \quad (3)$$

라이너의 항복을 허용하지 않기 위하여 라이너의 최대 von Mises 응력이 항복 응력보다 작은 경우에는 무게와 복합재료의 응력에 관계없이 von Mises 응력을 줄이는 방향으로 설정하였다. 그리고 복합재료의 안전율을 3.0 이상으로 설정하기 위하여 설계 응력을 섬유 방향 강도의 1/3로 설정하였다. 복합재료와 라이너가 설계 기준 응력을 만족하는 경우에는 작동 압력에서의 탱크 무게, 복합재료 섬유 방향 최대 응력, 라이너 최대 von Mises 응력을 각각 정규화하여 합하였으며, 응력에 비해 무게에 대한 비중을 10배로 설정하기 위하여 각 응력항에 0.1을 곱하였다.

본 연구의 목표가 개발된 코드의 검증이기 때문에 설계 변수를 최대한 줄여서 헬리컬 층수, 후프 층수, 와인딩 각도, 라이너 두께의 4개로 설정하였다. 유전자 알고리즘에 적용하기 위하여 각각을 변수 범위 내에서 2 bit, 4 bit, 5 bit, 4 bit로 이산화 했다. 그리고 population 크기를 100, 최대 generation 수를 100, 교배 확률을 0.7, 돌연변이 확률을 0.1, tournament 크기를 10으로 설정하였다. 초기 seed 값을 무작위로 설정하여 10회의 설계를 수행하였으며, 최종 설계 결과는 Table 1과 같다.

Design	헬리컬층 수	후프층 수	와인딩 각도	라이너 두께	탱크 무게
1	2	9	33.5°	1.9 mm	4.44 kg
2	3	10	34.5°	1.7 mm	4.47 kg
3	2	9	31.5°	1.9 mm	4.45 kg
4	3	10	28.0°	1.7 mm	4.50 kg
5	2	10	33.0°	1.9 mm	4.51 kg
6	2	9	33.5°	1.9 mm	4.44 kg
7	2	9	33.5°	1.9 mm	4.44 kg
8	3	10	33.0°	1.7 mm	4.48 kg
9	3	9	34.0°	1.8 mm	4.58 kg
10	2	9	31.5°	1.9 mm	4.45 kg

Table 1. 최적설계 결과

5. 결론

본 연구에서는 내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적 설계를 위하여, 중요 와인딩 공정 변수에 대한 이론적인 접근을 수행하였고 제작성을 고려한 준축지계적 알고리즘을 정립하였다. 그리고 필라멘트 와인딩 구조물의 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 정립된 준축지계적 알고리즘과 유한요소해석 방법을 유전자 알고리즘에 적용한 내압을 받는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적화 알고리즘을 정립하였다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원에서 지원하는 "위성 발사체 경량 복합재 구조 개발"의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. De Carvalho, M. Lossie, D. Vandepitte and H. Van Brussel, "Optimization of Filament-Wound Parts Based on Non-geodesic Winding," *Composites Manufacturing*, Vol. 6, No. 2, 1995, pp. 79-84
- (2) J. Rousseau, D. Perreux and N. Verdiere, "The Influence of Winding Patterns on the damage behaviour of Filament-Wound Pipes," *Composite Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 1439-1449
- (3) M. Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner," *Composite Structures*, Vol. 49, 2000, pp. 247-255
- (4) T. K. Hwang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Probabilistic Deformation and Strength Prediction for a Filament Wound Pressure Vessel," *Composites: Part B*, Vol. 34, 2002, pp. 481-497
- (5) J. Scholliers, "Robotic Filament Winding of Asymmetric Composite Parts," Ph. D Thesis (K.U.Leuven), 1992.