

유전자 알고리즘을 이용한 수소 연료 자동차용 복합재 압력용기의 최적설계

강상국[†]·김명곤^{*}·김천곤^{**}

Optimal design of composite pressure vessel for fuel cell vehicle using genetic algorithm

Sang-Guk Kang, Myung-Gon Kim and Chun-Gon Kim

Key Words: Optimization(최적화), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Semi-geodesic path algorithm(준측지 궤적 알고리즘), Type 3(타입 3)

Abstract

To store hydrogen with high pressure is one of key technologies in developing FCVs (fuel cell vehicles). Especially, metal lined composite structure, which is called Type 3, is expected to effectively stand highly pressurized hydrogen since it has high specific strength and stiffness as well as excellent storage ability. However, it has many difficulties to design Type 3 vessels because of their complex geometry, fabrication process variables, etc. In this study, therefore, optimal design of Type 3 vessels was performed in consideration of such actual circumstances using genetic algorithm. Additionally, detailed finite element analysis was followed for the optimal result.

1. 서 론

기호설명

- x : 축방향 좌표
 r : 반경방향 좌표
 α : 와인딩 각도
 w : 섬유 폭
 λ : 미끄러짐 계수
 t : 와인딩 두께
 n_p : 한 층 와인딩에 필요한 총 밴드수
 m : 두 순환계적 사이에서 밴드가 원주방향으로 이동되는 수

초고압 압력탱크를 이용한 고압기체수소저장 기술은 가장 현실적인 수소 연료전지자동차 (Fuel Cell Vehicle, FCV)의 탑재용 연료저장기술로 인정되고 있으며, 연료전지 시스템과 함께 FCV 실용화를 위한 핵심기술로 인식되고 있다. 현재 미국, 일본, 유럽연합 등의 자동차 업계는 고압기체 수소저장 기술을 적용한 연료전지자동차의 실용화를 목전에 두고 있는 실정이다. 특히, 이들 자동차 업계는 구조물의 중량 대비 연료 효율성 구현을 위해 높은 비강성 및 비강도를 갖는 탄소섬유 복합재를 적용한 Type 3 및 Type 4 고압저장용기에 관한 연구개발을 주목표로 하고 있다[1].

탄소섬유를 이용하여 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법으로 제작한 고압저장용기는 무게 절감, 내열성, 내구성 등에서 뛰어난 특성을 보이지만 제작기법의 특성으로 인해 설계 및 해석에 있어 많은 어려움이 존재한다. 특히, Type 3 및

[†] 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

E-mail : sangguk@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3759 FAX : (042)869-3710

^{*} 한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정

^{**} 한국과학기술원 항공우주공학과 교수

Type 4 고압저장용기는 크게 실린더(cylinder), 돔(dome), 접속(junction) 부분 및 금속재 보스(boss) 부분으로 나눌 수 있는데 형상이 매우 복잡하고 기존의 복합재 적층판과는 다르게 섬유와 각도와 두께가 돔 부위에서 연속적으로 변하는 특성을 가지고 있다. 따라서 복합재 고압저장용기 개발을 위해서는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 고압용기의 압력에 따른 응력분포 해석 및 무게 경량화를 위한 최적설계 기법 확립의 선행적 연구를 필요로 한다.

기존에 수행된 필라멘트 와인딩 구조물에 대한 최적설계 연구는 다음과 같다. Richard[2]는 reliability-based 방법을 이용하여 필라멘트 와인딩된 파이프에 대한 파손강도 최적화를 수행하였으며, 결정론적 수행과정을 통한 진화교배(evolutionary hybrid) 알고리즘을 사용하였다. Krikanov[3]는 변형률과 강도 제한조건을 둔 복합재 압력용기 구조물의 새로운 최적설계 기법을 제안하였는데, 도식적 해석과정을 통해서 얻어진 와인딩 각도 하에서 최적화된 복합재 층의 두께를 결정하였다. Parnas 등[4]은 고전 적층판 이론 및 평면 변형률 거동을 가정한 구조 모델을 가정하여 복합재 압력용기의 응력거동 해석 및 최적설계 연구를 수행하였다. 박재성 등[5, 6]은 압력탱크의 두께 방향으로의 와인딩 각도 변화를 고려한 설계기법을 제안하였으며, 수압시험을 통해 해석 결과와 비교하였다. 김철웅 등[7]은 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부의 검증 등 모두 고려한 필라멘트 와인딩된 복합재 축대칭 구조물의 와인딩 궤적 예측 알고리즘인 준측지궤적(semi-geodesic) 알고리즘을 정립하였다. 본 연구에서는 이 알고리즘을 바탕으로 한 유전자 알고리즘을 적용하여 FCV에 적용하기 위한 350바급 Type 3 압력용기에 대한 최적설계를 수행하였다.

2. 준측지 궤적을 이용한 유전자 알고리즘

본 연구에서 적용한 준측지궤적 알고리즘은 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부 검증 등을 통한 와인딩 궤적 예측 알고리즘으로써 김철웅[7] 등에 의해 제안되었다.

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

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

$$n_p = \frac{2\pi r_c \cos \alpha_c}{w} \quad (3)$$

식 (1)은 수지의 점성으로 인한 섬유와 맨드릴 사이의 마찰을 고려한 와인딩 각도 수식으로써, 특정부위의 각도로부터 적분을 통해 맨드릴 전 영역에서의 와인딩 각도를 계산할 수 있다.

식 (2)는 와인딩 두께에 대한 수식으로써 와인딩 각도와 마찬가지로 맨드릴 전 영역에서의 두께가 얻어진다.

식 (3)에서 표시된 n_p 는 와인딩 구조 단면을 기준으로 한 층을 와인딩 하는데 필요한 총 밴드 수를 의미하며, 한 순환 궤적에서 다음 순환 궤적으로 진행될 때 밴드가 원주 방향으로 이동(shift)되는 위치를 n_p 의 정수배 m 으로 표현할 때, 균일한 와인딩이 이루어지기 위해서는 정수 n_p 와 m 이 서로소(relatively prime)이어야 한다는 조건을 만족시켜야 한다.

이상의 조건들을 통해 주어진 맨드릴 형상에 대한 실제 가능한 와인딩 궤적이 예측된다.

한편, 본 연구에서는 필라멘트 와인딩된 복합재 축대칭 구조물의 최적 설계를 위하여 유전자 알고리즘이 사용되었다. 유전자 알고리즘은 자연 진화의 법칙인 적자 생존(survival of fittest)과 자연 도태(natural selection)의 원리를 바탕으로 정립된 최적화 알고리즘으로써, 교배(crossover)와 변종(mutation) 등의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 해를 진화시키는 방법이다.

유전자 알고리즘은 설계 영역에 다수의 설계점을 분포시켜서 목적함수 값과 제한조건의 위반 정도에 따라 각 설계점에 적합성(fitness)을 부여한다. 적합성이 클수록 교배와 변종에 참여할 확률을 크게하여 적합성이 좋은 설계점에 비슷한 형질을 가진 설계점들이 다음 단계에 보다 많이 형성되도록 유도함으로써, 과정이 진행될수록 전체 설계점들은 좋은 방향으로 탐색이 진행된다. 이러한 유전자 알고리즘은 복합재료 구조물과 같은 이산변수(discrete variables)를 다루는데 효율적

인 것으로 알려져 있다.

3. 350바 Type 3 수소 압력 용기의 최적설계

2장에서 설명한 준축지 궤적을 바탕으로 한 유전자 알고리즘을 적용하여 350바급 수소 저장용기에 대한 최적 설계를 수행하였다. Table 1은 350바급 수소용기에 대한 기본 형상이다.

Table 1 Dimensions of 350 bar H₂ pressure vessel

동형상	등장력 동
실린더 외부 반경	200 mm
보스 외부 반경	36 mm
실린더 길이	671.4 mm
전체 길이	900 mm

Table 2 Design variables for optimization

	Min	Max	Bits
Helical layer 수	2	9	3
Hoop layer 수	2	17	4
라이너 두께	1.9 mm	5.0 mm	5
	Feasible angles		
와인딩 각도	2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 8°, 12°, 13°, 15°, 16°, 17°, 22°, 24°, 25°		

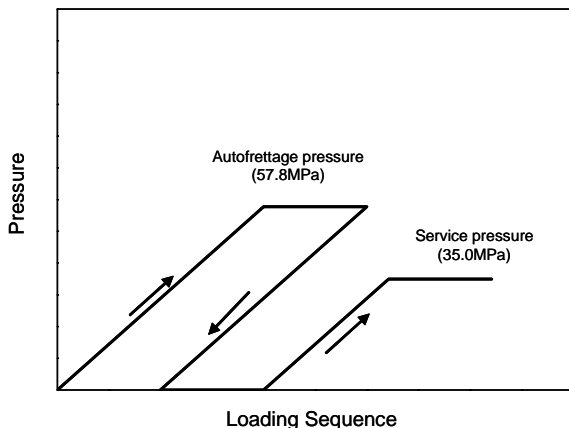


Fig. 1 Loading history for H₂ pressure vessel

최적설계를 위한 설계 변수는 라이너의 두께, 헬리컬 층의 레이어 수, 후프 층의 레이어 수, 헬리컬 층의 실린더 와인딩 각도 등 총 4개로 설정하였다. 설계 변수와 설계 범위는 Table 2와 같다. 여기서 와인딩 각도는 실제로 windability를 고려한 결과이다.

최적화 과정에서의 하중이 Fig. 1에 나타나 있다. 운용 전에 라이너의 피로수명을 증가시키기 위해 적용되는 57.8MPa의 자긴압력(autofrettage pressure)을 부가하고 해중한 후 다시 35.0MPa (350 bar)의 운용압력을 부가하였다.

$$\frac{W_{\max}}{W} + 0.1 \times \frac{\sigma_{f,\text{design}}}{\sigma_{\text{fiber}}} + 0.1 \times \frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sigma_{\text{liner}}} , \sigma_{\text{liner}} \leq \sigma_{\text{yield}} \ \& \ \sigma_{\text{fiber}} \leq \sigma_{f,\text{design}}$$

$$\frac{\sigma_{f,\text{design}}}{\sigma_{\text{fiber}}} + 0.1 \times \frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sigma_{\text{liner}}} , \sigma_{\text{liner}} \leq \sigma_{\text{yield}} \ \& \ \sigma_{\text{fiber}} > \sigma_{f,\text{design}}$$

$$\frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sigma_{\text{liner}}} , \sigma_{\text{liner}} > \sigma_{\text{yield}}$$

(4)

식 (4)에는 유전자 알고리즘을 적용한 최적설계를 수행하기 위해 정의한 목적함수가 나타나 있다. W_{\max} 는 설계영역 이내에서 선정되는 최대 무게이며 본 연구에서는 35kg으로 설정하였다. 목적함수에서 무게 경량화에 제일 큰 비중을 두었으며 유한요소해석 후 최대 응력이 복합재나 알루미늄의 설계응력을 넘을 경우에는 다음세대에서 도태되도록 가중치를 부가하였다. 여기서 복합재의 설계응력은 878MPa로 설정하였다. 이는 실제 복합재의 파손강도가 2000MPa 이상이지만 복합재의 특이성을 고려하여 높은 안전계수를 부가하였다. 한편 알루미늄은 항복응력을 설계응력으로 설정하였다. Table 3과 Table 4는 해석에 사용된 복합재와 알루미늄 라이너의 물성을 나타낸다.

한편, 최적설계 수행 과정에서 각각의 설계점들에 대해 상용프로그램인 ABAQUS를 통한 유한요소해석을 수행하게 된다. 그 결과는 유전자 알고리즘에 전달되어 최적설계가 진행된다. 유전자 알고리즘의 진행을 위해 필요한 교배(crossover)와 변종(mutation) 등의 변수가 Table 5에 나타나 있다. 한 세대의 인구수(population size)는 20이며 연속한 5세대에서 같은 적합성(fitness)을 보일 경우 최적해로 간주하게 된다.

Table 3 Material property of Graphite/epoxy

E ₁ (GPa)	149
E ₂ (GPa)	10.6
E ₃ (GPa)	10.6
ν ₁₂	0.25
ν ₁₃	0.25
ν ₂₃	0.42
G ₁₂ (GPa)	4.14
G ₁₃ (GPa)	4.14
G ₂₃ (GPa)	3.31
density (kg/mm ³)	1.61E-6

Table 4 Material property of Aluminum liner

E (GPa)	68.0
Poisson's ratio, ν	0.33
Yield stress (MPa)	286
density (kg/mm ³)	2.71E-6

Table 5 Genetic algorithm variables

Population size	20
Probability of crossover	0.7
Probability of mutation	0.1
Maximum generation	20

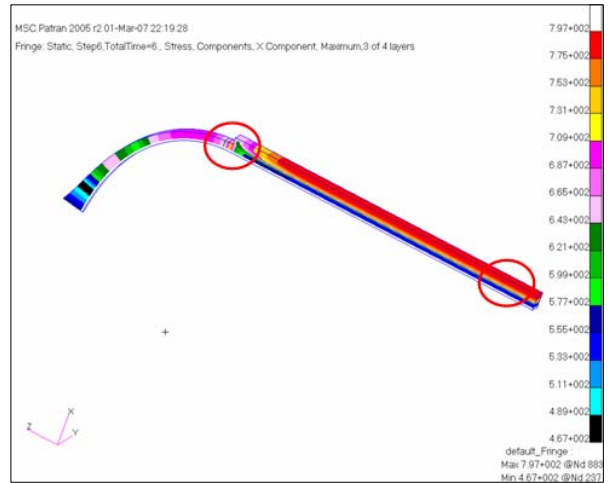
유전자 알고리즘을 이용하여 총 10회의 최적설계 수행 결과가 Table 6에 요약되어 있다. 표에서 처럼 헬리컬 3층, 후프 7층, 라이너 두께 1.9mm, 와인딩 각도 25°일 때 가장 높은 fitness값을 보임을 알 수 있으며, 이 경우 복합재와 알루미늄에 작용하는 최대 응력과 무게는 각각 801.5MPa, 147.5MPa, 27.82kg으로 나타났다.

한편, 수소저장용기는 운용 중에 수많은 수소 가압과 방출을 경험하게 되며 이는 알루미늄 라이너의 피로수명(fatigue life) 문제에 중대한 영향을 미친다. 따라서 기존에 수행된 연구[8]를 참조하여 식 (5)와 같은 피로수명 예측식으로부터 최적설계의 경우에 대한 라이너 수명을 예측해보았다.

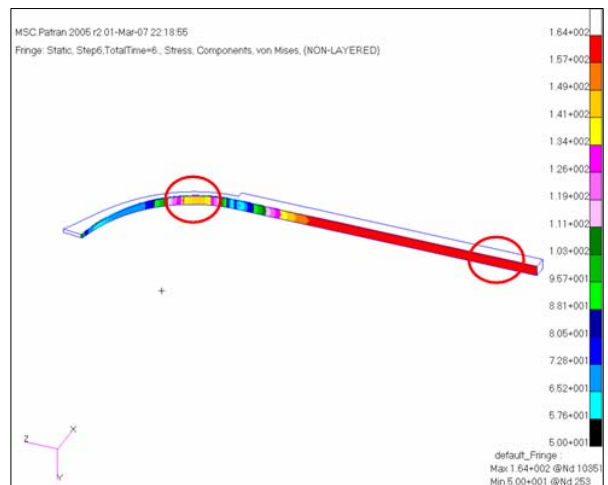
$$\sigma = 3238N_f^{-0.2757} \quad (5)$$

Table 6 Optimal result of 350 bar pressure vessel

Case	Helical layer	Hoop layer	Liner thickness (mm)	Winding angle	Weight (kg)	Fitness
1	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
2	3	8	1.9	25	29.16	1.5640
3	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
4	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
5	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
6	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
7	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
8	3	7	1.9	25	27.82	1.5755
9	3	8	1.9	25	29.16	1.5640
10	3	10	1.9	22	31.97	1.5634



(a) Fiber directional stress of composite layers



(b) Von Mises stress

Fig. 2 Stress distribution of optimal H₂ pressure vessel under operating condition (350bar)

그 결과 73,408회의 피로수명을 가지는 것을 예측할 수 있었다. 또한 더 높은 피로수명을 얻기 위해서는 최적설계 과정에서 라이너의 설계응력을 요구조건에 부합하도록 설정가능하다.

350바 고압수소 저장용기의 운용 과정에 대한 최적설계안의 유한요소해석 결과는 Fig. 2와 같다. 먼저 복합재 층의 경우를 살펴보면 실린더 근처의 후프층 최외곽 층에서 섬유방향 최대 응력이 발생했으며 돔과 실린더의 정선(junction) 부위에서 헬리컬 층의 최대 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 한편 알루미늄 라이너의 경우 실린더 부위와 너클(knuckle) 부위에서 높은 응력이 발생하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부의 검증에 모두 고려한 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 와인딩 궤적 예측 알고리즘인 준축지궤적 알고리즘을 바탕으로 유전자 알고리즘을 적용하여 수소 연료전지자동차에 적용하기 위한 350바급 Type 3 압력용기에 대한 최적설계를 수행하였다. 그 결과 무게 27.82kg의 최적설계안을 얻었으며 유한요소해석 결과로부터 최대응력의 크기 및 발생 위치를 확인할 수 있었다. 또한 기존의 알루미늄 라이너의 피로 예측식으로부터 최적설계안에 대해 70,000회 이상 사용가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 (주)로템의 위탁연구 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

(1) J. S. Park, T. W. Kim and J. C. Chung, 2004, "Current status and road map of compressed hydrogen storage technologies for fuel cell vehicle," Machinery and Materials, pp. 90-99.

(2) F. Richard and D. Perreux, 2000, "A Reliability Method for Optimization of $[+\theta/-\theta]_n$ Fiber Reinforced Composite Pipes," Reliability

Engineering and System Safety, Vol. 68, pp. 53-59.

(3) A. A. Krikanov, 2000, "Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness," Composite Structures, Vol. 48, pp. 119-127.

(4) L. Parnas and N. Katirci, 2002, "Design of Fiber-reinforced Composite Pressure Vessels under Various Loading Conditions," Composite Structures, Vol. 58, pp. 83-95.

(5) J. S. Park, C. S. Hong, C. G. Kim and C. U. Kim, 2002, "Analysis of Filament Wound Composite Structures Considering the Change of Winding Angles through the Thickness Direction," Composite Structures, Vol. 55, pp. 33-71.

(6) J. S. Park, C. U. Kim, H. K. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, 2002, "Structural Analysis and Strain Monitoring of the Filament Wound Motor Case," Journal of Composite Materials, Vol. 36, No. 20, pp. 2373-2388.

(7) C. U. Kim, J. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, 2005, "Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm" Composite Structures, Vol. 67, No.4, pp. 443-452.

(8) J. S. Park, T. W. Kim and J. C. Chung, 2004, "Cycling life prediction method considering compressive residual stress on liner for the filament-wound composite cylinders with metal liner," Journal of the Korean Society For Composite Materials, Vol. 19, No. 1, pp. 22-28.