

論文

준측지궤적 알고리즘을 이용한 타입 3 복합재 압력용기의 최적설계 프로그램 개발

강상국*, 김명곤**, 김철웅***, 김천곤****+

Development of Optimization Code of Type 3 Composite Pressure Vessels Using Semi-geodesic algorithm

Sang-Guk Kang*, Myung-Gon Kim**, Cheol-Ung Kim*** and Chun-Gon Kim****+

ABSTRACT

Composite vessels for high pressure gas storage are commonly used these days because of their competitive weight reduction ability maintaining strong mechanical properties. To supplement permeability of composite under high pressure, it is usually lined by metal, which is called a Type 3 vessel. However, it has many difficulties to design the Type 3 vessel because of its complex geometry, fabrication process variables, etc. In this study, therefore, GUI (graphic user interface) optimal design code for Type 3 vessels was developed based on semi-geodesic algorithm in which various factors of geometry and fabrication variables are considered and genetic algorithm for optimization. In addition, hydrogen vessels for 350/700 bar that can be applied to FCVs(fuel cell vehicles) were designed using this code for verification.

초 록

복합재 고압 용기는 우수한 기계적 강도를 유지하면서 경쟁적인 무게절감을 얻을 수 있는 복합재의 장점으로 인해 최근에 많이 사용되고 있다. 하지만 고압에서 발생하는 복합재의 기밀 문제(permeability)를 보완하기 위해 금속으로 덧대는 Type 3 형태의 구조로 많이 사용된다. 그러나 복잡한 기하학적 형상, 제조공정 변수 등으로 인해 타입 3 형태의 압력용기를 설계하는 데에는 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 이러한 변수들을 고려하는 준측지궤적 알고리즘(semi-geodesic algorithm)과 최적화를 위한 유전자 알고리즘을 적용하여 타입 3 복합재 압력용기의 GUI(graphic user interface) 최적설계 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 프로그램을 이용하여 연료 전지 자동차에 적용되는 350/700 바 수소저장용기에 대해 최적설계를 수행하였다.

Key Words : 복합재 압력용기(composite pressure vessel), 최적설계(optimum design), 준측지궤적 알고리즘(semi-geodesic algorithm), 수소연료전지자동차(hydrogen fuel cell vehicle)

1. 서 론

높은 비강성, 비강도를 가지고 있는 탄소섬유 보강 복합재

료는 고압 가스를 저장하기 위한 적합한 재료로 기대되고 있다. 하지만 복합재는 기존의 금속과는 달리 고압에서 미소균열 등으로 인해 초래될 수 있는 기밀(permeability) 문제로 인

* University of Delaware Centers for Composite Materials

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

*** 현대자동차 차량해석팀

**** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

해 주로 금속을 덧댄 Type 3 형태의 구조를 가진다.

하지만 탄소섬유를 이용하여 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 고압 저장 용기는 무게 절감, 내열성, 내구성 등에서 뛰어난 특성을 보이지는 하지만 제작기법의 특성으로 인해 설계 및 해석에 있어 많은 어려움이 존재한다. 특히, Type 3 및 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 돔 부위에서 섬유의 각도와 두께가 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[1]는 reliability-based 방법을 이용하여 필라멘트 와인딩된 파이프에 대한 파손강도 최적화를 수행하였으며, 결정론적 수행과정을 통한 진화교배(evolutionary hybrid) 알고리즘을 사용하였다. Krikanov[2]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[3]은 고전 적층판 이론 및 평면 변형률 거동을 가정한 구조 모델을 가정하여 복합재 압력용기의 응력 거동 해석 및 최적설계 연구를 수행하였다. 박재성 등[4, 5]은 압력탱크의 두께 방향으로의 와인딩 각도 변화를 고려한 설계 기법을 제안하였으며, 수압시험을 통해 해석 결과와 비교하였다. 김철웅 등[6]은 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부의 검증 등 모두 고려한 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 와인딩 궤적 예측 알고리즘인 준축지궤적(semi-geodesic) 알고리즘을 정립하였다. 따라서 본 연구에서는 이 알고리즘을 바탕으로 한 유전자 알고리즘을 적용하여 GUI(graphic user interface) 최적설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 적용하여 연료전지 자동차 개발에 필수적인 연구인 350 바 및 700바 압력용기에 대한 최적설계 해석을 수행하고 그 결과를 확인하였다.

2. 준축지궤적 알고리즘과 유전자 알고리즘

본 연구에서 적용한 준축지궤적 알고리즘은 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부 검증 등을 통한 와인딩 궤적 예측 알고리즘으로써 김철웅[6] 등에 의해 제안되었다.

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

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

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

식 (1)은 수지의 점성으로 인한 섬유와 매트릴 사이의 마찰을 고려한 와인딩 각도 수식으로써, 특정부위의 각도로부터 적분을 통해 매트릴 전 영역에서의 와인딩 각도를 계산할 수 있다. 여기서 α , x , r , λ 는 와인딩 각도, 축방향 좌표, 반경 방향 좌표, 섬유와 매트릴 사이의 slippage tendency 값을 나타낸다.

식 (2)는 와인딩 두께에 대한 수식으로써 와인딩 각도와 마찬가지로 매트릴 전 영역에서의 두께가 얻어진다. 여기서 r , α , t 는 각각 반경방향 좌표, 와인딩 각도, 두께를 나타내며 아랫첨자 'c'는 실린더 부분을 의미한다.

식 (3)에서 표시된 n_p 는 와인딩 구조 단면을 기준으로 한 층을 와인딩 하는데 필요한 총 밴드수를 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 매트릴 형상에 대한 실제 가능한 와인딩 궤적이 예측된다.

한편, 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 최적 설계를 위하여 유전자 알고리즘이 사용되었다. 유전자 알고리즘은 자연진화의 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 효율적인 것으로 알려져 있다.

3. 복합재 Type 3 고압용기의 최적설계 프로그램 개발

본 프로그램에서 설계변수는 헬리컬 층(helical layer) 수, 후프 층(hoop layer)의 수, 라이너 두께, 가능한 와인딩 각도

등 총 4가지이다. 준촉지계적 알고리즘과 유전자 알고리즘이 적용된 최적화 알고리즘은 Fig. 1과 같다[6].

먼저 기본적으로 라이너의 형상 (등장력 돔(isotensoid dome) 혹은 사용자 정의 돔)의 형상을 결정하고 이에 대해 fiber bandwidth 등과 같은 실제 제작 공정을 고려한 가능한 와인딩 각도를 준촉지계적 알고리즘 프로그램으로부터 구한다. 다음으로 복합재와 라이너의 물성을 입력하고 실제 탱크의 사용 환경 및 설계 응력 등을 결정한 후 가능한 와인딩 각도, 헬리컬/후프층의 레이어 수, 라이너두께 등의 설계 변수 범위를 결정하여 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용한 최적설계를 수행한다. 이 과정에서 population내의 각각의 설계변수 조합에 대해 ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 수행하고 라이너와 복합재에 작용하는 최대 응력과 전체 무게를 계산한다. 이로부터 식 (4)에 있는 목적함수의 Fitness 값을 계산하고 우수한 Fitness 결과를 보이는 조합을 이용하여 다음 세대로 진화하며 최종적으로 수렴조건을 만족할 때까지 최적설계가 진행된다.

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

$$\frac{\sigma_{f,design}}{\sigma_{fiber}} + 0.1 \times \frac{\sigma_{l,design}}{\sigma_{liner}}, \sigma_{liner} \leq \sigma_{l,design} \ \& \ \sigma_{fiber} > \sigma_{f,design} \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{l,design}}{\sigma_{liner}}, \sigma_{liner} > \sigma_{l,design}$$

식 (4)에서 W_{max} 는 설계영역 이내에서 선정되는 최대 무게이며 W 는 해당 설계조합의 무게이다. $\sigma_{f,design}$ 과 $\sigma_{l,design}$ 는 각각 복합재와 알루미늄의 설계응력이며 σ_{fiber} 와 σ_{liner} 는 유한요소해석 결과로 얻은 해당 설계조합에서의 복합재와 알루미늄 라이너의 최대 응력이다. 목적함수에서 알 수 있듯이 무게 경량화에 제일 큰 비중을 두었으며 유한요소해석 후 최대 응력이 복합재나 알루미늄의 설계응력을 넘을 경우에는 다음세대에서 도태되도록 가중치를 부가하였다.

본 연구에서는 제품개발시간의 단축 및 비용의 절감을 위해 객체지향언어인 Visual C++을 이용하여 타입 3 고압수소 저장용기 최적설계 프로그램인 Doc.PV (Design and optimization code for Pressure Vessels)를 개발하였다.

Doc.PV는 Fig. 2와 같은 구성을 가진다. 프로그램의 진행은 Step 1부터 Step 5까지 탭을 이용하여 단계별로 진행되며 각 Step의 내용은 다음과 같다.

- Step 1: 돔의 형상 결정
- Step 2: 가능한 와인딩 각도의 결정
- Step 3: 사용 재료의 물성 및 사용 압력 입력
- Step 4: 최적화 수행
- Step 5: 최적설계 결과 정리

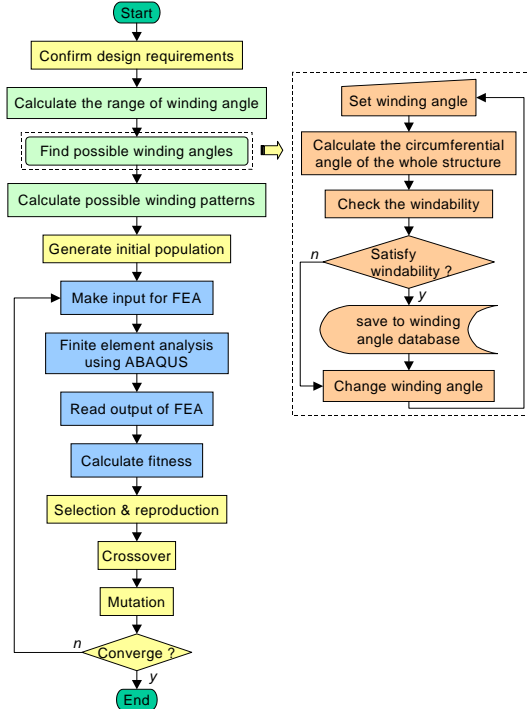


Fig. 1 Flowchart for optimization code.

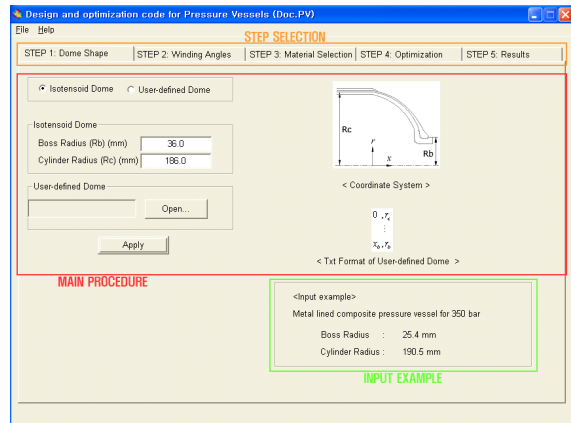


Fig. 2 Overview of Doc.PV.

4. 연료전지 자동차용 350/700바 고압수소 저장용기의 최적설계

4.1 개요

본 절에서는 개발된 최적설계 프로그램인 Doc.PV를 이용

하여 연료전지 자동차용 350/700바 용기의 최적설계에 적용하였다. 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 업체는 고압기체수소저장 기술을 적용한 연료전지자동차의 실용화를 목전에 두고 있는 실정이다. 특히, 이들 자동차 업체는 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[7].

4.2 350바 수소저장 용기의 최적설계

Table 1은 350바급 수소용기에 대한 기본 형상 정보이다. 등장력 돔이며 실린더 직경 200 mm, 보스 직경 36 mm이다. 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. 본 연구에서 사용된 복합재료와 라이너는 각각 T700/epoxy와 Al 6061이다.

최적화 과정에서 하중이 Fig. 3에 나타나 있다. 운용 전에 라이너의 피로수명을 증가시키기 위해 적용되는 57.8MPa의 자진압력(autofrettage pressure)을 부가하고 해중한 후 다시 350바의 운용압력을 부가하였다.

Table 1 Dimensions of 350 bar hydrogen pressure vessel

등형상	등장력 돔
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 of 350 bar pressure vessel

	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°		

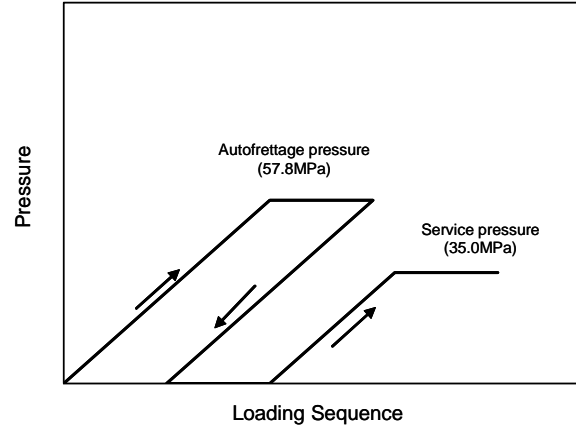


Fig. 3 Loading history for H₂ pressure vessel.

일반적으로 금속재 라이너를 사용하는 Type 3 복합재 압력 용기에 있어 라이너는 복합재에 비해 피로 특성이 취약하기 때문에 반복사용에 의한 복합재 압력용기의 파손이 주로 라이너 균열에 의한 누출로 발생한다. 따라서 Type 3 압력용기의 제조공정에 있어서, 사용 전 라이너가 압축잔류응력 하에 있도록 사용압의 1.5배에서 1.6배의 압력을 미리 가하는 자진처리 공정(auto-frettage)을 적용하여 라이너의 반복수명을 개선하는 방법이 사용된다[8]

식 (4)에서 정의한 목적함수를 적용하여 fitness값을 계산하였다. W_{max} 는 35kg으로 설정하였다. 또한 복합재의 설계응력은 878MPa로 설정하였다. 실제 복합재의 파손강도가 2000MPa 이상이지만 복합재의 특이성을 고려하여 높은 안전계수(2.3)를 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.

유전자 알고리즘을 이용하여 총 10회의 최적설계 수행 결과가 Table 6에 요약되어 있다. 표에서 나타난 것처럼 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 응력은 각각 801.5MPa, 147.5MPa으로 나타났다. 또한 최적설계 안에 대한 Type 3 복합재 압력 용기의 무게는 27.82kg인 것으로 나타났다. 무게 산출은 유한요소모델과 밀도로부터 이루어진다. 유한요소모델에서 라이너의 두께는 돔 부위와 실린더 부위에서 일정하게 모델링 되며

실제 돔 부위의 두께가 보스 부위로 갈수록 더 두꺼워짐을 고려해볼 때 실제 무게보다 다소 적은 값이 얻어진다. 이러한 가정은 최적화 속도를 증가시키며 구해진 압력용기 구조의 최대 응력이 상한값(upper bound)으로 고려되어 질 수 있다.

한편, 수소저장용기는 운용 중에 수많은 수소 가압과 방출을 경험하게 되며 이는 알루미늄 라이너의 피로수명(fatigue life) 문제에 증대한 영향을 미친다. 따라서 기존에 수행된 연구[9]를 참조하여 식 (5)와 같은 피로수명 예측식으로부터 최적설계의 경우에 대한 라이너 수명을 예측해보았다.

$$\sigma = 3238N_f^{-0.2757} \tag{5}$$

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

350바 고압수소 저장용기의 운용 과정에 대한 최적설계안의 유한요소해석 결과는 Fig. 4와 같다. 먼저 복합재 층의 경우를 살펴보면 실린더 근처의 후프층 최외곽 층에서 섬유방향 최대 응력(797MPa)이 발생했으며 돔과 실린더의 정선(junction) 부위에서 헬리컬 층의 최대 응력(797MPa)이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 한편 알루미늄 라이너의 경우 실린더 부위와 너클(knuckle) 부위에서 높은 응력(164 MPa)이 발생하는 것을 확인하였다.

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

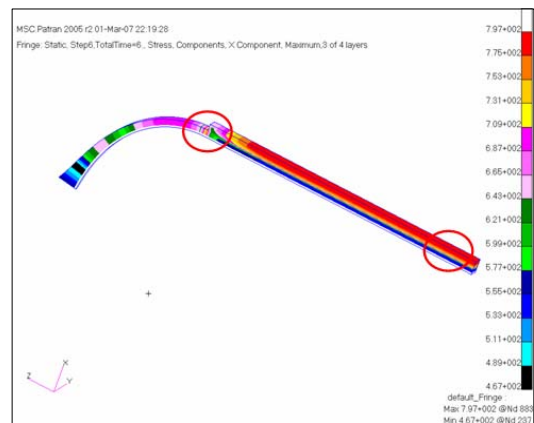
E (GPa)	68.0
Poisson's ratio, ν	0.33
Yield stress (MPa)	286
density (kg/mm ³)	2.71E-6

Table 5 Genetic algorithm variables

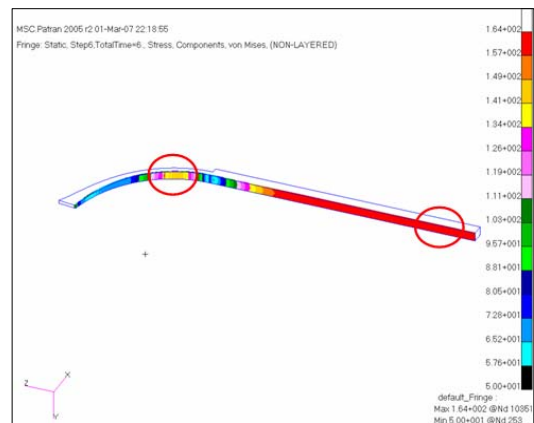
Population size	20
Probability of crossover	0.7
Probability of mutation	0.1
Maximum generation	20

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. 4 Stress distribution of optimal hydrogen pressure vessel under operating condition (350bar).

4.3 700바 수소저장 용기의 최적설계

700바 고압수소 저장용기의 최적설계는 350바의 경우와 동일한 방법으로 수행되었다. 라이너의 형상은 Table 1에 나타난 350바의 경우와 동일하게 유지한 채로 최적설계를 수행하였다.

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 7과 같다. 최적화 과정에서 적용되는 하중과정은 112MPa의 자기압력과 70MPa (700bar)의 운용압력을 가진다.

Table 7 Design variables for optimization of 700 bar pressure vessel

	Min	Max	Bits
Helical layer 수	4	11	3
Hoop layer 수	4	19	4
라이너 두께	3.9 mm	7.0 mm	5
Feasible angles			
와인딩 각도	2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 8°, 12°, 13°, 15°, 16°, 17°, 22°, 24°, 25°		

Table 8 Optimal result of 700 bar pressure vessel

Case	Helical layer	Hoop layer	Liner thickness (mm)	Winding angle	Weight (kg)	Fitness
1	6	16	3.9	25	60.43	1.4456
2	5	16	3.9	13	56.06	1.5067
3	5	16	4.1	17	56.54	1.5019
4	5	16	3.9	16	55.98	1.5111
5	5	16	3.9	17	55.95	1.5116
6	6	13	3.9	24	56.09	1.4798
7	5	13	3.9	25	51.26	1.5901
8	5	14	3.9	25	52.68	1.5679
9	5	13	4.1	25	51.85	1.5773
10	5	13	3.9	25	51.26	1.5901

유전자 알고리즘을 이용하여 총 10회의 최적설계 수행 결과가 Table 8에 요약되어 있다. 표에서처럼 헬리컬 5층, 후프 13층, 라이너 두께 3.9mm, 와인딩 각도 25°일 때 가장 높은 fitness값을 보임을 알 수 있으며, 이 경우 복합재와 알루미늄에 작용하는 최대 응력은 각각 869.0MPa, 231.6MPa, 무게는 51.26kg으로 나타났다. 또한 식 (5)의 피로수명 예측식으로부터 구한 알루미늄 라이너의 수명은 14,290회의 피로수명을 가지며 350바의 경우와 마찬가지로 최소 10,000회 이상의 요구조건을 만족하는 결과이다. 더 높은 피로수명을 가지도록 설

계하기 위해서는 라이너의 최대 응력이 더 낮은 최적설계 결과를 사용하면 된다.

5. 결론

본 연구에서는 와인딩 각도 수식, 와인딩 두께 수식, 균일한 와인딩 여부의 검증 등 모두 고려한 필라멘트 와인딩 된 복합재 축대칭 구조물의 와인딩 궤적 예측 알고리즘인 준축지배적 알고리즘과 복합재와 같은 이산변수 최적화에 적합한 유전자 알고리즘을 적용하여 타입 3형태의 압력용기 최적설계를 위한 GUI 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 적용하여 최근 큰 관심을 끌고 있는 연료전지 자동차 개발에 필수적인 수소저장용기에 대한 최적설계를 수행하였고 그 결과 경량 이면서도 구조적 역할을 잘 감당할 수 있는 설계 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- 1) F. Richard and D. Perreux, "A Reliability Method for Optimization of $[+\theta / -\theta]_n$ Fiber Reinforced Composite Pipes," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 68, 2000, pp. 53-59.
- 2) A. A. Krikanov, "Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness," *Composite Structures*, Vol. 48, 2000, pp. 119-127.
- 3) L. Parnas and N. Katirci, "Design of Fiber-reinforced Composite Pressure Vessels under Various Loading Conditions," *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp. 83-95.
- 4) J. S. Park, C. S. Hong, C. G. Kim and C. U. Kim, "Analysis of Filament Wound Composite Structures Considering the Change of Winding Angles through the Thickness Direction," *Composite Structures*, Vol. 55, 2002, pp. 33-71.
- 5) J. S. Park, C. U. Kim, H. K. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Structural Analysis and Strain Monitoring of the Filament Wound Motor Case," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 20, 2002, pp. 2373-2388.
- 6) C. U. Kim, J. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim,

- “Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm” *Composite Structures*, Vol. 67, No. 4, 2005, pp. 443-452.
- 7) J. S. Park, T. W. Kim and J. C. Chung, “Current status and road map of compressed hydrogen storage technologies for fuel cell vehicle,” *Machinery and Materials*, 2004, pp. 90-99.
- 8) 박지상, 김태욱, 정재한, “대체연료 차량용 Type 3 복합재 압력용기 개발 및 인증,” 한국수소 및 신에너지 학회 추계학술대회, 2004.
- 9) J. S. Park, T. W. Kim and J. C. Chung, “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, 2004, pp. 22-28.