



## ANSYS RSM을 이용한 CNG차량 용기 필라멘트 와인딩 적층판 최적설계에 관한 연구

†김의수

국립과학수사연구소

(2008년 12월2일 접수, 2009년 6월 1일 수정, 2009년 8월 13일 채택)

### A Study on the Optimal Design of Laminate for CNG composite vessel using ANSYS RSM

†Eui Soo Kim

National Institute of Scientific Investigation

(Received 2. December. 2008, Revised 1. June. 2009, Accepted 12. August. 2009)

#### 요 약

섬유강화 복합재료는 비강성과 비강도등의 우수한 기계적 성질을 나타내므로 구조물의 경량화가 요구되는 여러 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 복합재를 이용한 압력용기는 무게를 경량화함으로써 에너지를 절약할 수 있고 강한 내식성을 가지고 있기 때문에 장기간 사용에 유리하다. 본 연구에서는 유한요소법과 ANSYS 반응표면법을 이용하여 안정성 판단의 기준으로 Von-mises 항복 기준, Tsai-hill이론, 응력비를 만족시킬 수 있는 E-glass/epoxy로 필라멘트 와인딩된 CNG차량 복합재 압력용기 적층판의 최적설계 모듈을 개발하였다.

**Abstract** - The fiber reinforced composite material is widely used in the multi-industrial field where the weight reduction of the infrastructure is demanded because of their high specific modulus and specific strength. Pressure vessels using this composite material have two main merits which are to cut down energy by reducing weight and to have long-term life due to corrosion resistance. In this paper, we developed optimal design module of laminate for CNG composite pressure vessel winding E-glass/epoxy based on Von-Mises yield criterion, Tsai-Hill theory and stress ratio using finite element method and ANSYS RSM(Response Surface Method).

**Key words** : ANSYS RSM, CNG, FEM, stress ratio, Tsai-Hill theory

#### 1. 서 론

신소재로 각광을 받고 있는 섬유강화 복합재료는 일반 금속재료에 비해 비강성과 비강도등의 우수한 기계적 성질을 나타내므로 구조물의 경량화가 요구되는 여러 산업분야에서 널리 사용이 확대되고 있는 추세이다[1,2]. 섬유강화복합재료는 대부분 섬유와 매트릭스로 구성되어 있고 요구되는

구조물의 형상에 따라 성형방법을 달리하고 있는데 축대칭 혹은 회전체 복합재료 구조물을 제작하는데에는 제작비용, 시간, 대량생산등 여러측면에서 유리섬유나 케이블, 탄소섬유등의 높은 비강성 및 비탄성도를 이용한 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법이 가장 적절하다[3,4]. 이러한 필라멘트 와인딩된 복합재 압력용기는 해석관점에서 금속재 라이너와 적층판사이에서의 접촉, 자긴처리(Autofrettage process)에 의한 잔류응력(Residual stress)발생, 시간에 따라 변하는 하중의 과도해석(Transient analysis) 수행, 내부에 밀봉된 고압가스

\*주저자:es92kim@nisi.go.kr

에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하는 매우 복잡한 비선형문제이다. 이러한 구조물을 해석하기 위해서는 설계자에게 전문적인 지식 및 상당한 정도의 숙련이 요구된다[5].

본 연구에서는 트랙트릭스(tratrix) 다이를 이용한 초드로잉 공정 및 D.D.I(Deep Drawing & Ironing) 공정으로 제조된 내압을 받는 E-glass/ 에폭시 필라멘트 와인딩 압력용기에 대해 복합재 설계의 이론적 배경과 비선형 유한 요소해석(Nonlinear FE Analysis)을 바탕으로 고압용기 안전성에 영향을 미치는 설계변수(라이너 두께, 적층판 두께, 적층판 각도)의 영향도를 파악하고 해의 정확성 및 유용성이 검증된 상용 소프트웨어인 ANSYS RSM(Response Surface Method)과 APDL(Parametric design language)을 이용하여 설계자가 간단한 설계변수의 입력만으로도 쉽게 필라멘트 와인딩 CNG 복합재 적층판을 설계, 해석할 수 있는 최적설계 자동화 모듈을 개발하였고 상용압력에 대한 최적의 CNG 적층판 형상 또한 제시하였다[6,7].

## II. CNG 압력 용기의 제작

### 2.1. CNG 복합재 용기 제작 공정

특수용 고강도 후판을 이용한 디프 드로잉과 아이어닝의 연속공정인 D.D.I공정으로 제조된 금속 라이너에 필라멘트 와인딩하여 CNG 복합재 압력용기를 제작하는 공정도를 Fig. 1 에 나타내었다.

### 2.2. 와인딩을 이용한 CNG차량 용기 제작

필라멘트 와인딩 공정은 섬유에 수지를 함침시킨 후 회전하는 철강재 금속 라이너 주위에 일정하게

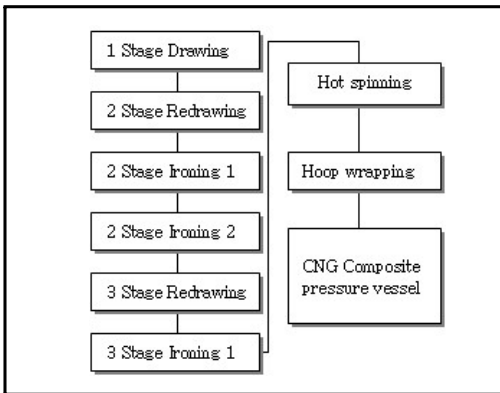


Fig. 1. Manufacturing process of CNG composite pressure vessel.

와인딩하여 오토클레이브(Autoclave)에 경화시키는 공정이다. 이러한 공법은 다른 복합재료 가공법에 비하여 사용되는 재료의 가격이 저렴하고 인건비가 적게들며, 제품의 복제성(Reproducibility)이 좋다는 잇점이 있어 현재 복합용기 제작에 가장 널리 활용되고 있다.

와인딩 방법은 크게 축방향에 대해 직각방향으로 라이너의 실린더 부분만 보강한 후프랩(Hoop wrap)과 축방향에 대해 임의의 각도로 라이너 전체를 강화하기 위해 후프 랩(Hoop wrap) 및 헬리컬 랩(Helical wrap)을 복합시킨 풀 랩(Full wrap)으로 나뉘어 진다. 본 연구에서는 열간 벵 성형 공정 시 돔 부위의 두께가 두꺼워지고 돔 부위의 원주방향 응력이 실린더 부위의 원주방향 응력보다 작으므로 라이너 원통부분 위에 원주방향으로 수지를 함침한 복합재를 후프 랩으로만 와인딩하여 복합재가 용기의 원주 방향으로 부가되는 응력만 부담



Fig. 2. Photograph of the horizontal type filament winding machine.

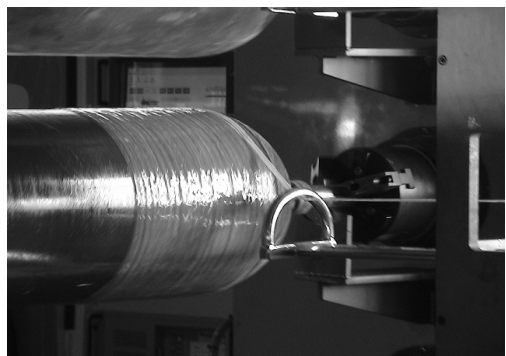


Fig. 3. Photograph of the filament winding process.

하도록 하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 전형적인 수평식 필라멘트 와인딩 기계를 나타내며, 실제 D.D.I공정으로 제조된 용기에 필라멘트 와인딩하는 사진을 Fig. 3에 나타내었다.[8-11]

### III. 최적설계 모듈

본 연구에서는 ANSYS/PDS(Probabilistic Design System)를 실험계획법 관점에서 수행하여 각각의 설계변수가 상태변수에 미치는 영향의 정도를 검증하였고, 이를 토대로 ANSYS/ RSM을 이용하여 최적화 설계를 위한 설계변수(와인딩 두께, 와인딩 각도)를 선택하여 고압가스 안전관리기준을 만족하는 최적의 설계변수 값을 자동으로 결정한다.

#### 3.1. 복합재 최적설계 이론적 배경

Fig. 4와 같이 복합재가  $N_x, N_y, N_{xy}$ 의 하중만 고려된 단축 복합재의 단순 모델을 가정하면,

$$\sigma_1 \gg \sigma_2, \tau_{12}, \quad \sigma_2 = \tau_{12} = 0 \quad (1)$$

$i$ 번째 층에 대한 평형식(구속 조건)은,

$$\begin{aligned} N_x &= \sum_{i=1}^k \sigma_x^{(i)} h_i = \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \cos^2 \phi_i, \\ N_y &= \sum_{i=1}^k \sigma_y^{(i)} h_i = \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \sin^2 \phi_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_{xy} &= \sum_{i=1}^k \tau_{xy}^{(i)} h_i = \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \sin \phi_i \cos \phi_i \\ \sigma_1^{(i)} &= E_{1, \epsilon_1}^{(i)} = E_1 (\epsilon_x \cos^2 \phi_i + \epsilon_y \sin^2 \phi_i + \gamma_{xy} \sin \phi_i \cos \phi_i) \end{aligned} \quad (3)$$

Lagrange 승수법 사용하면( $h$ 를 최소화),

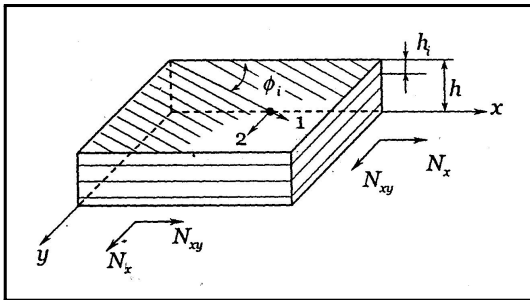


Fig. 4. A laminated plate in a plane state of stress

$$L = \sum_{i=1}^k h_i + \lambda_x (N_x - \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \cos^2 \phi_i) + \quad (4)$$

$$\lambda_y (N_y - \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \sin^2 \phi_i) +$$

$$\lambda_{xy} (N_{xy} - \sum_{i=1}^k \sigma_1^{(i)} h_i \sin \phi_i \cos \phi_i) +$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i [\sigma_i - E_1 (\epsilon_x \cos^2 \phi_i +$$

$$\epsilon_y \sin^2 \phi_i + \gamma_{xy} \sin \phi_i \cos \phi_i)]$$

$$\frac{\partial L}{\partial h_i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \phi_i} = 0,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_x} = \frac{\partial L}{\partial \lambda_y} = \frac{\partial L}{\partial \lambda_{xy}} = \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\lambda_i}{h_i \sigma_1^{(i)}} = \frac{\lambda_x}{E_1 \epsilon_x} = \frac{\lambda_y}{E_1 \epsilon_y} = \frac{\lambda_{xy}}{E_1 \gamma_{xy}} = \frac{1}{c^2} \quad (6)$$

식(5), 식(6)을 (4)식에 대입하여 나타내면,

$$(\sigma_1^{(i)})^2 = c^2 \quad (7)$$

$\sigma_1^{(i)} = c \leq \bar{\sigma}_1$  (파단 응력) 두면,

$$h = \frac{1}{\sigma_1} (N_x + N_y) \quad (8)$$

위의 식에서 설계변수와 작용력과 최적조건에서의 관계를 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^k h_i (N_x (\sin^2 \phi_i - N_y \cos^2 \phi_i)) = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^k h_i [(N_x + N_y) (\sin \phi_i \cos \phi_i - N_{xy})] = 0$$

일반적인 압력용기에서 하중은,

$$N_x = \frac{1}{2} pR, N_y = pR, N_{xy} = 0 \text{ 이고,}$$

설계 변수들의 관계는,

$$h = \frac{3pR}{2\sigma_1}, \quad \sum_{i=1}^k h_i (3\cos^2 \phi_i - 1) = 0 \quad (10)$$

$$k=1 \text{ 일 경우 } \frac{\bar{h}_1}{h} = 1$$

$$\bar{h}_1(3\cos^2\phi - 1) = 0 \text{ 이므로 } \phi = 54.44^\circ$$

$$k=2, \phi_1 = 90^\circ (\text{후프}), \phi_2 = 30^\circ \text{ 일 경우,}$$

$$\bar{h}_1(3\cos^2 90^\circ - 1) + \bar{h}_2(3\cos^2 30^\circ - 1) = 0$$

$$\text{이므로 } \frac{h_{90}}{h_0} = \frac{h_1}{h_2} = \frac{5}{4} \text{ 이다.}$$

### 3.2. 반응표면법

최근의 최적설계 경향은 다분야 통합 최적설계와 같이 설계하고자 하는 시스템이 복잡해지고, 해석 시 드는 시간적 수치적 비용이 증가하고 있으며, 상용 해석 소프트웨어나 실험 데이터를 이용한 최적설계에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 민감도에 기반한 기존의 최적설계 기법으로는 위와 같은 문제를 효율적으로 처리할 수 없을 뿐만 아니라 해석 시 노이즈가 존재하는 경우 최적해로의 수렴이 불가능하게 된다. 이러한 기존의 최적설계 기법의 어려움을 극복하기 위한 방법들 중의 하나가 반응표면법을 이용한 근사 최적 설계 기법이다. 반응표면법은 관심 있는 반응이 여러 설계변수들에 의해 영향을 받을 때 설계 변수에 대하여 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합을 말한다.

본 연구에서 적용된 실험계획법은 구해야 하는 설계공간상에서 적절한 점들을 선택하는 방법으로, 반응표면법에서 실험점들의 선택은 반응표면 근사화의 정확도와 비용에 중요한 영향을 준다. 그러므로 최소의 점을 선택하여 가장 정확한 근사 반응 함수를 생성할 수 있는 실험점들을 선택하는 것이 실험계획법의 가장 큰 관심사이다.

### 3.3. 안정성 판단 근거

고압가스 안전관리기준(ISO 9809-2)을 만족하는 최적의 설계변수 값을 결정하기 위해 Von-mises 항복조건식, Tasi-Hill 항복조건식, 응력비식을 활용하였으며, 다음의 식(11), 식(18), 식(19)에 각각 제시한다.

#### 1) Von-Mises 항복 조건식 :

라이너의 파괴를 판정하기 위한 기준으로 파열 시험 압력에서 등가응력(equivalent stress)이 소재의 항복강도를 넘으면 파열된다.

$$\frac{1}{2} [ (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) + (\sigma_3^2 - \sigma_1^2) ] \leq \sigma_y^2 \quad (11)$$

평면응력(plane stress)의 경우에  $\sigma_3 = 0$ . 이므로,

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_y^2 \quad (12)$$

#### 2) Tsai-Hill 항복 조건식 :

CNG 복합 용기에서 복합재 부분의 안전성을 평가하기 위하여 이방성 소재에 대해 일반화된 Tsai-Hill 항복조건식을 채택하여 검토한다.

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 \quad (13)$$

$$- 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 +$$

$$2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1$$

여기서  $F, G, H, L, M, N$  : Failure strength parameters 이며  $X, Y, Z$ 와 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$(G+H) = \frac{1}{X^2} \quad (14)$$

$$(F+H) = \frac{1}{Y^2}$$

$$(F+G) = \frac{1}{Z^2}$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (15)$$

$$2G = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}$$

$$2F = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}$$

$$2N = \frac{1}{S^2}$$

단축 적층판의 1-2평면 응력에 대해서

$$\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0 \text{ 이므로,}$$

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (16)$$

여기서,

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta, \sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta, \tau_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta$$

이므로

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left( \frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (17)$$

Tasi-Hill 조건식은

$$\left( \sigma_x^2 \right) \times \left( -\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left( \frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} \right) \quad (18)$$

3) 응력비(Stress ratio)식 :

강화섬유재료(유리섬유, E-glass)의 응력비는 2.65이상을 만족하여야 한다.

$$\text{응력비 (stress ratio)} = \quad (19)$$

$$\frac{\text{섬유의최대강도(용기과열시험)}}{\text{섬유의 응력(사용압력)}}$$

#### IV. 유한요소해석

Fig. 5는 CNG 복합용기의 해석을 위한 표준모델의 유한요소 메쉬(Mesh)형상과 경계조건 및 하중조건을 나타내었다. 금속재 라이너에 대해서는 8절점

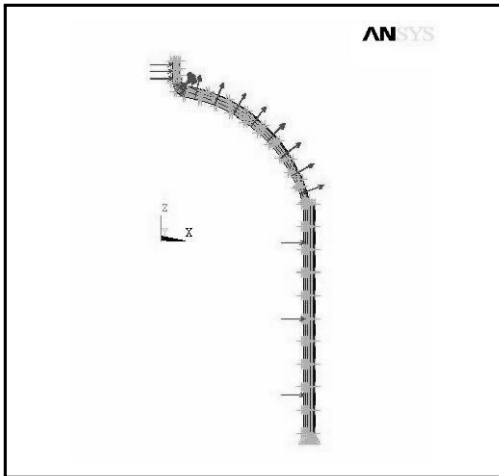


Fig. 5. Meshing and boundary condition of CNG FE model

6면체 요소인 Solid 185요소를, 적층판(Laminate)에 대해서는 8절점 6면체 쉘요소인 Solid 46를 사용하였다. 해석시간을 줄이기 위해 라이너 상부 돔부분과 실린더의 일부분만을 모델링하였으며 쉘요소는 3차 원형상에만 적용됨으로 인해 원주방향으로 10만급 회전시켜 체적을 생성하였다. 응력해석에서 접촉이 일어나는 부분인 라이너표면과 적층판 사이에서의 접촉처리는 면 대 면 접촉요소(Point to surface contact element)를 사용하여 접촉처리를 하고 있기 때문에 인접하고 있는 면에서는 절점의 위치가 같아야 하고 라이너가 변형을 일으킬 경우 섬유도 함께 변형하게 되고 이로 인해 고정된 전체 좌표계에 대한 섬유의 상대적인 위치도 변하게 되므로 경계조건은 절점좌표계에 대해 부여 했다. 내부에 작용하는 가스의 압력은 하중단계에 따른 과도해석을 이용하여 라이너 내벽에 압력 경계조건으로 부여했다. 압력용기 제품을 사용하기 전에 과도한 내압을 가하였다 제거한 후 라이너의 내주근방을 항복시켜 원주 방향으로 압축잔류응력을 발생시킴으로써 구조강도향상에 기여하는 자긴압력 크기는 자긴압력 값을 변화시켜 최고의 압축잔류응력을 발생시킴과 동시에 응력비를 만족시킬 수 있는 최적의 압력을 시행착오법으로 행하여 결정하였다.

#### V. 최적설계 모듈에의 적용

3장의 이론을 토대로 여기에서는 실제 현장에서 적용되고 있는 복합재 층이 단층( $k=1$ )인 경우만을 고려하여 설계변수를 변화시켜 상대함수를 동시에 모두 만족시키는 경우중에 HT가 최소가 되는 조건을 최적의 설계변수 값으로 결정한다.

- 목적함수 ;  $Min HT$
- 설계변수 ;  $LT, HT, AN$
- 상태변수 ;  $smax, shymax, sratio$

여기서,  $LT$ 는 라이너의 두께,  $HT$ 는 적층판의 두께,  $AN$ 는 적층판의 각도,  $smax$ 는 라이너 등가응력,  $shymax$ 는 적층판 등가응력,  $sratio$ 는 응력비이다.

##### 5.1. ANSYS RSM 수행

반응표면법의 실험계획법관점에서 각각의 설계변수가 각각의 상태변수에 미치는 영향의 정도를 비교, 검증하였다. 각각의 설계변수가  $smax, shymax, sratio$ 에 미치는 민감도를 히스토그램으로 나타내면 위 Fig. 6-Fig. 8과 같고  $smax$ 의 경우를 살펴보면

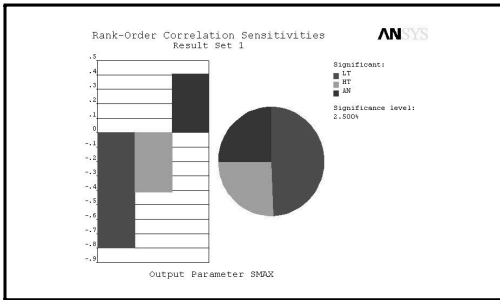


Fig. 6. A Result of the Response surface method for *smax*

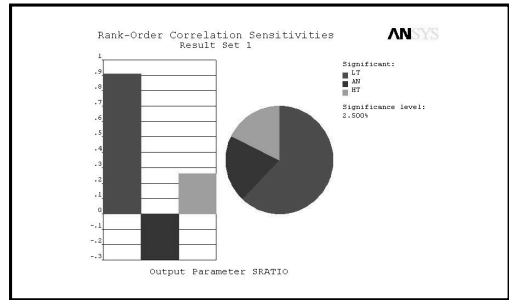


Fig. 8. A Result of the Response surface method for *sratio*

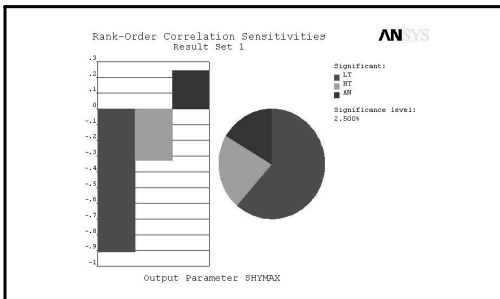


Fig. 7. A Result of the Response surface method for *shymax*

LT, HT, AN 의 순으로 민감도가 큰 것을 알 수 있다. LT와 HT는 값이 커질수록  $\sigma_{max}$  가 작아지는 경향을 보이며 (-값), AN는 값이 커질수록  $\sigma_{max}$  가 커지는 경향을 보인다(+값). 그러므로  $\sigma_{max}$  를 작게 하고 싶으면 LT와 HT는 허용 범위 내에서 크게 하고, AN은 작게 하면 된다. *shymax, sratio*의 상태변수에 대해서도 같은 방법으로 평가되어 진다. 그러나 가장 *smax* 값에 영향을 미치는 설계변수 LT의 경우는 DDI 공정으로 제작된 라이너는 실제 현장에서 라이너 기준에 적합한 두께로 이미 결정되어 생산되고 있고, 또한 열간 벅 성형 공정 시 돔 부위의 두께가 두꺼워지고 돔 부위의 원주방향 응력이 실린 더 부위의 원주방향 응력보다 작으므로 라이너 원통부분을 원주방향으로만 와인딩 한, 즉 AN 이 0인 후프 랩만을 고려하므로 설계변수는 HT만으로 단순화 되어 지며 본 시스템에서는 HT 만을 설계변수로 하는 최적 설계 문제를 다루었다.

5.2. 최적설계 모듈의 수행

상용프로그램인 ANSYS에서 지원하는 설계 최적

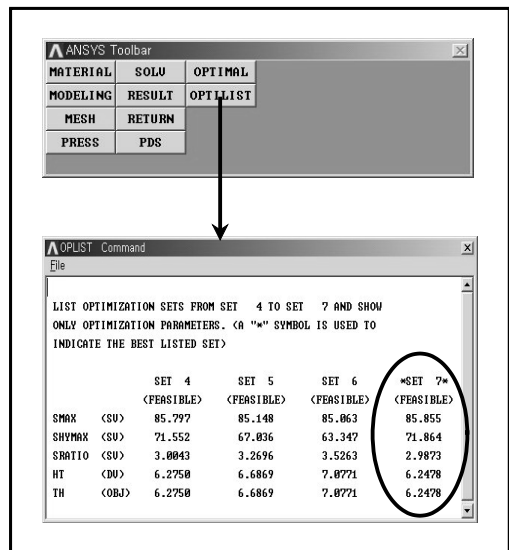


Fig. 9. Actual window of the optimal design module

화 메뉴를 이용하여 Optimization looping에 사용될 모델을 정의하고, 위에서 가정하고 결정되어진 설계변수 및 상태함수를 지정한 후 설계변수 HT를 변화시켜 상태함수를 만족하는 Design set을 열거하고 Subproblem Approximation Method를 적용해서 나온 결과중 가장 좋은 값, 즉 HT가 최소가 되는 경우를 최적의 설계값으로 결정하였고 이를 비속련자가 쉽게 접근 사용할 수 있도록 매크로화 하여 ANSYS내 최적설계 모듈로 구축하였다. 고압가스 안전관리기준에 준한 상용압력(Working pressure) 2.11kgf/mm<sup>2</sup>의 1.25배에 해당하는 2.64kgf/mm<sup>2</sup>의 내압을 가했을 때 안정성을 만족하는 라이너 두께

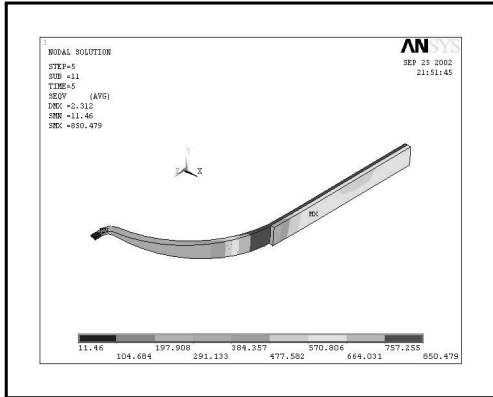


Fig. 10. Stress distribution of the  $\phi 340$  composite vessel

4mm에 대해 원주방향의 후프래핑 (Hoop wrapping)만을 고려한 적층판 최적설계 모듈 수행 결과를 Fig. 9에 나타내었다. “\* \*”로 표시된 Result set이 Best design set임을 나타내며 이렇게 결정된 파열 시험압력(Bursting test pressure)  $4.76 \text{ kgf/mm}^2$ 에 대한 복합재의 최적 두께는 6.25t로, ANSYS 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었고 실제로 생산되고 있는  $\phi 340$ 의 용기에 이를 적용하였을 때 안정성이 만족됨을 또한 확인하였다.

## VI. 결론

본 연구에서는

1. ANSYS/PDS(Probabilistic Design System)를 실험계획법 관점에서 수행하여 라이너의 두께, 적층판의 두께, 각도 설계변수가 상태변수에 미치는 영향의 정도를 검증하였고,
2. 이를 토대로 ANSYS/ RSM을 이용하여 최적화 설계를 위한 설계변수를 선택하여 고압가스 안전관리기준(등가응력, 응력비등)을 만족하는 최적 설계 모듈을 구축함으로써
3. 설계자가 전문적인 지식 및 상당한 정도의 숙련 없이도 DCL창의 원클릭 작업만으로 복합재 용기에 대한 최적설계를 수행할 수 있는 최적설계 자동화 시스템을 개발하였다.
4. 이렇게 결정된 파열시험압력  $4.76 \text{ kgf/mm}^2$ 에 대한 복합재의 최적 두께는 6.25t로 실제로 생산되고 있는  $\phi 340$ 의 용기에 이를 적용하였을 때 안정성이 만족됨을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Hisao, F., Tsu-Wei C. “Simplified Design Techniques for Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Stiffness and Strength Constraints”, *Journal of Composite Materials*, **22**, 1156-1169, (1998)
- [2] 古田敏康, “新 複合材料의 研究開發 現狀 問題點”, *The International Technical Information Institute*, (1980)
- [3] Rosato, D.V., Grove, C.S., “Filament Winding : its development manufacture, applications, and design” John Wiley & Sons Inc, 216-248, (1984)
- [4] Lark, R.F., “Recent Advances in Light weightm Filament-Wound Composite Pressure Vessel Technology”, *ASMEP VP-PB-021*, 17-50, (1997)
- [5] Li, Y., “Sensitivity Analysis in Shape Optimization Design for a Pressure Vessel.” *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, **49**, 387-397, (1992)
- [6] Youyun, L., Shuyao, L., Junzhi, C., “Finite element computation for mechanics parameters of composite material with randomly distributed multi-scale grains”, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **32**, 290-298, (2008)
- [7] 전성문, 서의권, 심현보, 김태완, 이부윤, “원자력 주기기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발”, *대한기계학회논문집 A 권*, **22**(4), 731-742, (1998)
- [8] 김의수, 김지훈, 박윤소, 김철, 최재찬, “D.D.I 공정으로 제조된 금속라이너를 이용한 CNG 복합재 압력용기의 설계 자동화 시스템 개발”, *한국정밀공학회*, **20**(1), 205-213, (2003)
- [9] 김지훈, 김의수, 김철, 최재찬, “강재(34CrMo4)를 사용한 대형 고압가스 용기의 설계 자동화 시스템 개발”, *한국정밀공학회*, **20**(8), 21-29, (2003)
- [10] 김철, 김의수, 김지훈, 최재찬, 박윤소, “CNG 복합용기의 필라멘트 와인딩 공정에 관한 연구”, *한국정밀공학회 춘계학술대회*, 656-660, (2002)
- [11] 김의수, 김지훈, 박윤소, 김철, 최재찬, “필라멘트 와인딩 압력용기의 최적설계와 CNG자동차 연료 충전용기 개발”, *한국정밀공학회 추계학술대회*, 933-937, (2002)