

필라멘트 와인딩 압력용기의 최적설계와 CNG 자동차 연료 충전용기 개발

김의수(부산대 기계공학부), 김지훈(부산대 기계공학부), 박윤소(부산대 기계공학부),
김 철(부산대 기계기술연구소), 최재찬(부산대 기계공학부),

A Study on Filament Winding Process of A CNG Composite Pressure Vessel

C. Kim(R.I.M.T. BNU), E. S. Kim(Mecha. Eng. Dept. BNU), J. H. Kim(Mecha. Eng. Dept. BNU),
J. C. Choi (Mecha. Eng. Dept. BNU), Y. S. Park (Mecha. Eng. Dept. BNU)

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 in comparison with conventional metal vessels can be applied in the field where lightweight and the high pressure are demanded from the defense and aerospace industry to rocket motor case due to the merits which are energy cutdown the weight reduction and decrease of explosive damage preceding to the sudden explosion which is generated by the pressure leakage condition. In this paper, for nonlinear finite element analysis of E-glass/epoxy filament winding composite pressure vessel receiving an internal pressure, the standard interpretation model is developed by using the ANSYS, general commercial software, which is verified as the accuracy and useful characteristic of the solution based on Auto LISP and ANSYS APDL. Both the preprocessor for doing exclusive analysis of filament winding composite pressure vessel and postprocessor that simplifies result of analysis have been developed to help the design engineers..

Key Words : Filament winding process(필라멘트 와인딩 공법), ANSYS APDL(ANSYS 파라메트 디자인 언어), Composite material(복합재료), Autofrettage Process(자긴처리), Nonlinear FE Analysis(비선형 유한요소 해석), Contact Element(접촉요소), Graphical user Interface(그래픽 사용자 인터페이스)

1. 서론

신소재로 각광을 받고있는 복합재료(FRP)는 무게에 비하여 비강도(specific strength)과 비강성(specific stiffness)이 높고 내식성과 내피로성등의 우수한 기계적 성질을 가지기 때문에 경량화 및 파괴시 안전성이 요구되는 방위산업, 우주항공용 압력용기, 로켓트 모터케이스등 매우 다양한 분야에 응용되고 있다. 이러한 복합재료의 여러 성형 방법중 축대칭 혹은 회전체 복합재료 구조물을 제작하는데에는 제작비용, 시간, 대량생산등 여러측면에서 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법이 가장 적절하다. 특히 전서계적으로 공해물질의 배출 규제가 강화됨에 따라 필요성이 대두되고 있는 차량용 CNG 압력용기의 제작에 널리 사용되고 있다.

필라멘트 와인딩된 복합재 압력용기는 해석관점에서 금속재 라이너(Liner)와 적층판(Laminate)사이에서의 contact, 자긴처리(Autofrettage Process)에 의한 잔류응력(Residual stress)발생, 시간의 따라 변화는 하중에 대한 과도해석(Transient Analysis) 수행등 내부에 밀봉된 고압가스에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하는 상당히 복잡한 비선형문제이므로 설계자가 이러한 구조물을 해석하기 위해서는 전문적인 지식 및 상당한 정도의 숙련을 요구하고 있다.

본 연구에서는 트랙트릭스(tractrix) 다이를 이용한 초드로잉 공정 및 D.D.I(Deep Drawing & Ironing) 공정으로 제조된 금속 라이너에 내압을 받는 E-glass/에폭시 필라멘트 와인딩 압력용기의 비선형 유한요소해석(Nonlinear FE Analysis)을 위해 이미 해

의 정확성 및 유용성이 검증된 상용 프로그램인 ANSYS 5.7.1 를 이용하여 Auto LISP 및 ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language)를 기반으로 설계자가 간단한 설계변수(와인딩 패턴, 와인딩 두께 및 적층각도, 하중의 크기)의 입력만으로도 쉽게 해석을 수행할 수 있는 필라멘트 와인딩 CNG 복합재 압력용기 설계 자동화 시스템을 개발하고자 한다.

2. CNG 압력 용기의 제작

특수용 고강도 후판을 이용한 디프 드로잉과 아이어닝의 연속공정인 D.D.I 공정으로 제조된 금속라이너에 필라멘트 와인딩하여 CNG 복합재 압력용기를 제작하는 공정도를 Fig. 1 에 나타내었다.

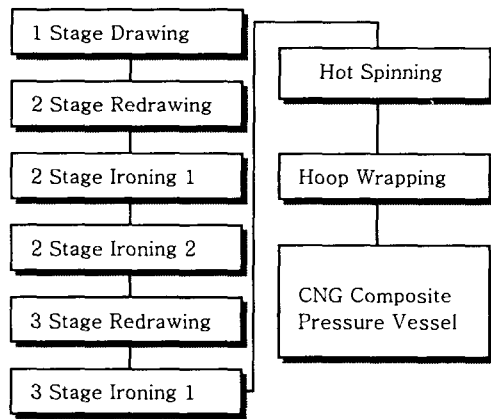


Fig. 1 Process Design of the CNG Composite Pressure Vessel

2.1 D.D.I 공정을 이용한 금속라이너 제작

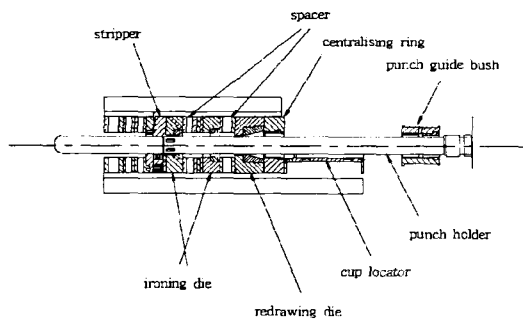


Fig. 2 D.D.I. forming process

D.D.I 공정은 하나의 펀치를 이용하여 디프 드로잉 및 여러 개의 아이어닝 다이에서 연속적으로

성형하는 공정으로 금속라이너를 생산하기 위한 재드로잉 및 아이어닝의 연속적인 공정을 Fig. 2 에 나타내었다. 초기 컵은 단동식 수직프레스(Vertical Press)에 의해 원형블랭크로부터 디프 드로잉(Draw 1)으로 제작되고 수평식 프레스를 이용하여 Fig.2 의 Draw2, Draw3 에서 각각 재드로잉과 아이어닝이 연속적으로 진행되며 Draw3 의 펀치행정 마지막 단계에서 바닥성형(dome forming)이 이루어진다. 각 성형 이전의 소재는 완전 풀림 및 구상화 열처리, 윤활(인산염 피막) 처리가 요구되며 이렇게 성형된 컵은 상부돔과 보스부를 형성하는 열간스피닝(hot spinning) 공정에 의해 금속라이너로 만들어진다.

2.2 필라멘트 와인딩 공정을 이용한 CNG 복합재 용기 제작

필라멘트 와인딩 공정은 섬유(Fiber)에 수지(Matrix)를 함침시킨 후 회전하는 철강재 금속 라이너 주위에 일정하게 와인딩하여 오토클레이브(Autoclave)에 경화(Cure)시키는 공정이다. 와인딩 방법은 크게 축방향에 대해 직각방향으로 라이너의 실린더 부분만 보강한 후프랩(Hoop Wrap)과 축방향에 대해 임의의 각도로 라이너 전체를 강화하기 위해 후프랩(Hoop Wrap) 및 헬리컬랩(Helical Wrap)을 복합시킨 풀랩(Full Wrap)으로 나뉘어진다. 본 연구에서는 열간 넥 성형 공정 시 돔 부위의 두께가 두꺼워지고 돔 부위의 원주방향 응력이 실린더 부위의 원주방향 응력보다 작으므로 라이너 원통부분 위에 원주방향으로 수지를 함침한 복합재를 후프랩으로만 와인딩하여 복합재가 용기의 원주방향으로 추가되는 응력만 부담하도록 하였다. 본 연구에서 사용된 전형적인 수평식 필라멘트 와인딩 장비와 실제 D.D.I 공정으로 제조된 용기에 필라멘트 와인딩하는 사진을 Fig. 3 에 나타내었다.

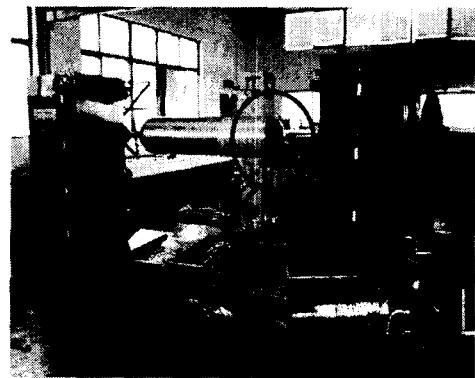


Fig. 3 Structure of the horizontal type filament winding machine

3. 시스템의 구성 및 적용

일반적으로 복합재 압력용기는 원통(cylinder), 돔(dome), 보스(boss) 및 접속부위(junction part)로 이루어져 있다. 이와 같이 구성된 필라멘트 와인딩 압력용기의 구조해석을 위해 Liner 형상에 따른 돔의 두께 및 곡률, 섬유방향 자긴처리에 의한 잔류응력을 고려한 후 시간에 따라 변하는 하중의 비선형 과도해석을 수행한다. 개발된 시스템은 라이너 설계, 입력 및 형상처리, 데이터변환, 프리프로세스 및 포스트프로세스 모듈로 구성되었으며 시스템의 구성도를 Fig. 4에 나타내었다. 각 모듈의 기능적인 설명을 아래에 간략히 기술하였다.

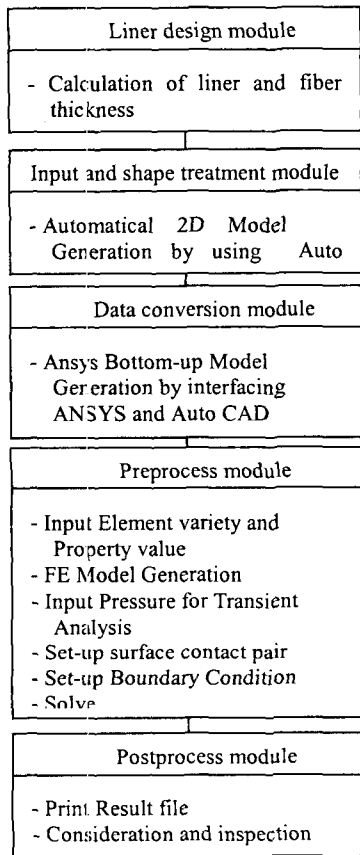


Fig. 4 Structure of CNG composite vessel analysis Program

3.1 라이너 설계 모듈

라이너 설계 모듈은 금속라이너의 두께가 고압 가스 안전관리기준에 준하여 상용압력(Working Pressure) 2.11kgf/mm²의 1.25 배 내압을 견딜 수 있

도록 하기 위하여 Von Mises 항복조건이론을 적용시켜 최소두께를 계산한다. 본 연구에 적용된 라이너의 두께는 4mm로 계산되었으며, 4mm 두께 라이너의 검증을 위하여 라이너에 파열시험압력(bursting test pressure) 2.64kgf/mm²의 내압을 가했을 때 Ansys에서 수행된 라이너의 응력분포를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 7의 응력분포를 통해 계산된 라이너의 두께는 적절함을 알 수 있다.

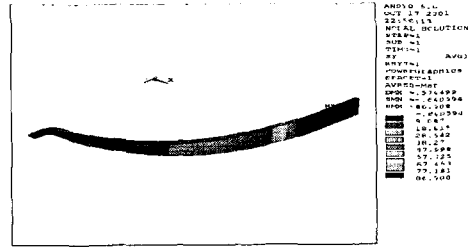


Fig. 5 Stress Distribution of the liner in bursting testing Pressure

D.D.I 공정 후 열간 스프닝 공정에 의하여 제조되는 라이너의 돔부위가 실린더 부위보다 두껍기 때문에 가장 취약한 실린더 부위의 원주방향의 후 프래핑 (hoop wrapping)만을 고려한다. 복합재의 두께는 파열시험압력(Bursting test pressure) 4.76 kgf/mm²에 대하여 두께를 변화시켜 가면서 시행착오법으로 시뮬레이션을 수행하여 최적 두께 6mm를 결정했다.

3.2 입력 및 형상처리 모듈

형상처리 모듈은 Auto LISP을 기반으로 한 DCL(Dialog Control Language)창을 이용하여 용기와 적층판의 적층형상 치수 데이터를 입력받아 CNG 복합용기의 형상을 2차원 모델로 자동 생성하는데 이를 Fig. 6에 나타내었다.

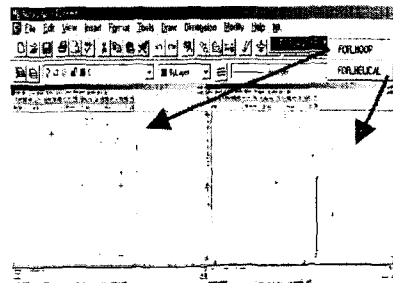


Fig. 6 Basic window of the input and shape treatment module

3.3 데이터 변환 모듈

입력 및 형상치수 모듈이 실행됨과 동시에 형상치수 데이터는 자동으로 파일로 저장되어 데이터 변환 모듈에 의해 Fig. 7 과 같이 Ansys 에서 읽어 들일 수 있는 행렬형식으로 변환된다.

	1	2	3	4
1	1.12	1.12	1.12	1.12
2	1.12	1.12	1.12	1.12
3	1.12	1.12	1.12	1.12
4	1.12	1.12	1.12	1.12
5	1.12	1.12	1.12	1.12
6	1.12	1.12	1.12	1.12
7	1.12	1.12	1.12	1.12
8	1.12	1.12	1.12	1.12

Fig. 7 Result carried out in the data conversion module

3.4 프리프로세스 모듈

CNG 복합용기 해석을 수행하기 위하여 프리프로세스 모듈은 크게 물성치 입력부분, 유한요소모델 생성부분, 하중조건 입력부분으로 구분된다. 본

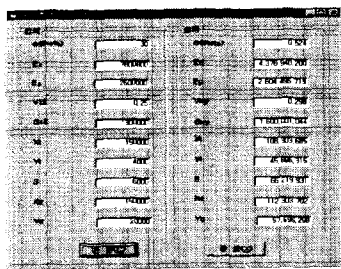


Fig. 8 Visual Basic Program of the property conversion

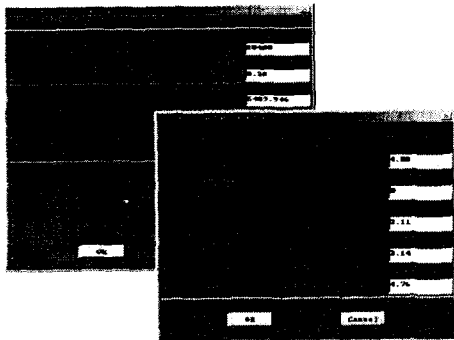


Fig. 9 Input window of Material property data and Pressure data for transient Analysis

모듈에서는 34Cr-Mo4 와 E-Glass/Epoxy 의 물성치에 대한 기본 입력값을 설정하였으며 여기서 복합 소재의 물성치는 뚜렷한 이방성을 가지므로 인해 각도 변화에 따른 회전된 좌표방향의 물성치 계산이 요구되어진다. Fig. 8 은 회전각도에 따른 좌표 방향의 물성치를 계산하기 위해 구축한 Visual Basic 변환 모듈을 나타내었다. 치수 및 물성치, 하중조건에 관한 데이터를 Fig. 9와 같이 그래픽 사용자 인터페이스 환경 하에서 DCL(Dialog Control Language)창을 이용하여 입력받아 실행버튼을 클릭하면 유한요소 해석을 자동으로 수행한다. 라이너 표면과 적층판 사이에서의 접촉처리는 면 대 면 접촉요소(point to surface contact element)를 사용하였고 내부에 작용하는 가스의 압력은 하중단계에 따른 과도해석을 이용하여 라이너 내벽에 압력 경계조건으로 부여했다.

압력용기 제품을 사용하기 전에 원주방향으로 압축잔류응력을 발생시킴으로써 구조강도 향상에 기여하는 자긴압력 크기는 자긴압력 값을 변화시켜 최고의 압축잔류응력을 발생시킴과 동시에 응력비를 만족시킬 수 있는 최적의 압력을 시행착오법으로 행하여 결정하였다. 여기서 응력비란 용기파열 시험에서 결정된 섬유유 최대강도를 사용압력에서의 섬유유의 등가응력으로 나눈 것을 말한다. 본 모듈에서는 응력비 2.75 이상을 만족하는 자긴압력을

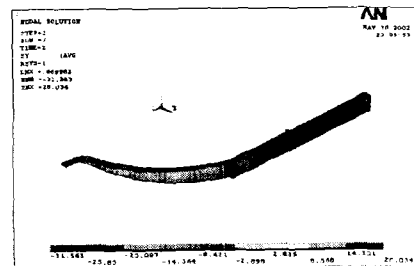


Fig. 10 The Distribution of Residual stress on unloading

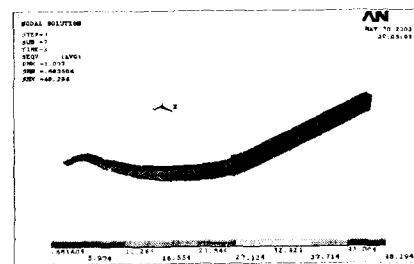


Fig. 11 Distribution of the Equivalent Stress after unloading

시행착오법으로 4kgf/mm^2 로 결정하였고 이때의 압

축간류응력(σ_θ)은 30kgf/mm^2 이다. 잔류응력분포 및 사용압력에서의 섬유응력분포를 Fig. 10, Fig. 11 에 나타내었다.

3.5 포스트프로세스 모듈

Table 4 는 포스트프로세스 모듈의 결과값으로 자긴처리에 의해 압축잔류응력을 발생시킨후 내압이 작용하는 경우와 자긴처리 없이 내압이 작용하는 조건에 대한 해석결과를 나타내었다. 압력용기의 최대응력은 원통과 돔이 만나는 접속부위에서

Table 4. Results of the Ansys analysys

Pressure	Autofrettage Process				Non-Autofrettage Process			
	$\bar{\sigma}$	σ_θ	σ_z	σ_r	$\bar{\sigma}$	σ_θ	σ_z	σ_r
207bar	48.3	46.65	42.04	-0.78	57.38	64.07	44.92	-0.91
311bar	65.81	68.01	62.53	-0.75	85.2	95.18	66.72	-1.3
467bar	87.21	90.82	90.65	-0.29	87.13	91.22	90.36	-0.39

발생하였으며, 자긴처리에 의해 구조강도가 향상된 결과를 보였고, 보강 설계없이 290bar 에서 파괴가 발생 되었으나, 필라멘트 와인딩으로 보강한 경우 475bar 이상의 압력에서 파괴가 발생하였으며 CNG 복합재 용기의 파열되는 양상을 Fig. 19 에 나타내었다. 또한 사용압력에서 응력비 ($3.25 > 2.75$)를 만족함과 동시에 이방성 소재에 대해 일반화된 Tsai-Hill Theory 로 안정성 평가($0.5 < 1$)시 양호함을 확인하였다.

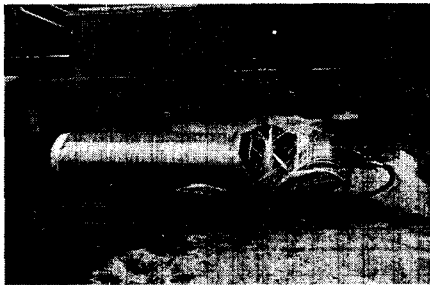


Fig. 19 Photograph of the burst composite vessel

5. 결론

본 연구에서는 D.D.I 공정으로 제조된 철강재 금속 라이너를 이용하여 기하학적으로 3 차원 형상의 라이너와 적층판 사이에서의 접촉, 자긴처리에 의한 잔류응력 발생, 시간의 따라 변하는 하중에 대한 과도해석을 수행하여 내부에 밀봉된 고압가스에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하고 있는,

고도의 신뢰성을 요구하는 CNG 복합용기의 설계 자동화 시스템을 개발했다. 이로 인하여 전용해석 프로그램의 개발대신 상용 프로그램인 Auto CAD 와 ANSYS 의 연계를 통해 각각의 활용도를 극대화하고 기능을 최대로 이용하였다. Auto LISP 과 그래픽 사용자 인터페이스 환경을 이용하였기 때문에 설계 단계에서 화면상에서 지시하는 대로 설계자가 설계 데이터만을 수정,입력함으로써 쉽게 표준해석 모델을 생성시킬 수 있고 해석 모델의 원하는 결과를 마우스 원클릭만으로 볼 수 있다. 또한 설계자가 상용프로그램을 숙달하는데 소요되는 시간과 노력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 데이터 준비의 미숙 및 복잡한 비선형 접촉처리 등에서 수반될 수 있는 모델링 오류의 가능성을 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 2002 년도 부산테크노파크 산학공동 과제의 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Hisao Fukunaga, Tsu-Wei chow, "Simplified Design Techniques for Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Stiffness and Strength Constraints", Journal of Composite Materials, Vol. 22, pp.1156-1169 1998
2. 古田敏康, "新 複合材料의 研究開發 現狀 問題點", The Internation Technical Information Institute
3. D. V. Rosato, C. S. Grove, "Filament Winding : its developmentm manufacture, applications, and design" John Wiley & Sons Inc, pp. 216-248
4. R. F. Lark, "Recent Advances in Lightweightm Filament-Wound Composite Pressure Vessel Technology" ASMEPVP-PB-021 pp.17-50
5. Li Yongsheng., "Sensitivity Analysis in Shape Optimization Design for a Pressure Vessel." International Journal of Pressure Vessel & Piping, Vol. 49, pp.387-397, 1992
6. Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov, "Mechanics And Analysis of Composite Materials", Elsevier, 2001
7. 전성문, 서의권, 심현보, 김태완, 이부윤, "원자력 주기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS 를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발", 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 4 호, pp.731-742
8. Robert M.Jones, "Mechanics of Composite Materials", Institute of Technology Southern Methodist University, Scripta Book Company