

D.D.I 공정으로 제조된 금속라이너를 이용한 CNG 복합재 압력용기의 설계 자동화 시스템 개발

김의수*, 김지훈*, 박윤소*, 김 철**, 최재찬*

Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by D.D.I Process

Eui-Soo Kim*, Ji-Hoon Kim*, Yoon-So Park*, Chul Kim**, Jae-Chan Choi*

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. It has two main merits which are to cut down energy by reducing weight and to prevent explosive damage preceding to the sudden bursting which is generated by the pressure leakage condition. Therefore, Pressure vessels using this composite material in comparison with conventional metal vessels can be applied in the field such as defense industry, aerospace industry and rocket motor case where lightweight and the high pressure are demanded. 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 유한요소해석), Contact Element(접촉요소), Graphical User Interface(그래픽 사용자 인터페이스)

1. 서론

신소재로 각광을 받고 있는 섬유강화 복합재료(FRP)는 일반 금속재료에 비해 비강성(Specific stiffness)과 비강도(Specific strength)등의 우수한 기계적 성질을 나타내므로 구조물의 경량화가 요구

되는 여러 산업분야에서 널리 사용이 확대되고 있는 추세이다.^[1,2] 섬유강화 복합재료는 대부분 섬유(Fiber)와 매트릭스(Matrix)로 구성되어 있고 요구되는 구조물의 형상에 따라 성형방법을 달리하고 있는데 축대칭 혹은 회전체 복합재료 구조물을 제작하는데에는 제작비용, 시간, 대량생산 등 여러측

†† 2002년 7월 10일 접수

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 기계기술연구소

면에서 유리섬유나 케이블, 탄소섬유등의 높은 비강성 및 비탄성도를 이용한 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법이 가장 적절하다.^[3,4] 이러한 필라멘트 와인딩된 복합재 압력용기는 해석관점에서 금속재 라이너(Liner)와 적층판(Laminate)사이에서의 접촉(Contact), 자기처리(Autofrettage process)에 의한 잔류응력(Residual stress)발생, 시간에 따라 변하는 하중의 과도해석(Transient analysis) 수행, 내부에 밀봉된 고압가스에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하는 매우 복잡한 비선형문제이다. 이러한 구조물을 해석하기 위해서는 설계자에게 전문적인 지식 및 상당한 정도의 숙련이 요구된다.^[5]

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 유한 요소해석(Nonlinear FE analysis)을 위해 해의 정확성 및 유용성이 검증된 상용 소프트웨어인 ANSYS 를 이용하여 표준해석 모델을 개발하고, Auto LISP 및 ANSYS APDL(ANSYS Parametric design language)를 기반으로 필라멘트 와인딩 복합용기 해석 모듈을 개발하여 설계자가 간단한 설계변수 ; 와인딩 패턴, 와인딩 두께 및 적층각도, 압력의 입력만으로도 쉽게 해석을 수행할 수 있는 필라멘트 와인딩 CNG 복합재 압력용기용 설계자동화 시스템을 개발하고자 한다.^[6,7]

2. CNG 압력 용기의 제작

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

2.1 D.D.I 공정을 이용한 금속라이너 제작

D.D.I 공정은 하나의 펀치를 이용하여 디프 드로잉 및 여러 개의 아이어닝 다이를 통하여 금속 라이너를 연속적으로 성형하는 공정으로 D.D.I 장비에서 재드로잉 및 아이어닝을 연속적으로 수행하는 과정을 Fig. 2 에 나타내었다.^[8,9]

초기 컵은 단동식 수직프레스(Vertical press)에 의해 원형블랭크로부터 디프 드로잉(Draw 1)으로

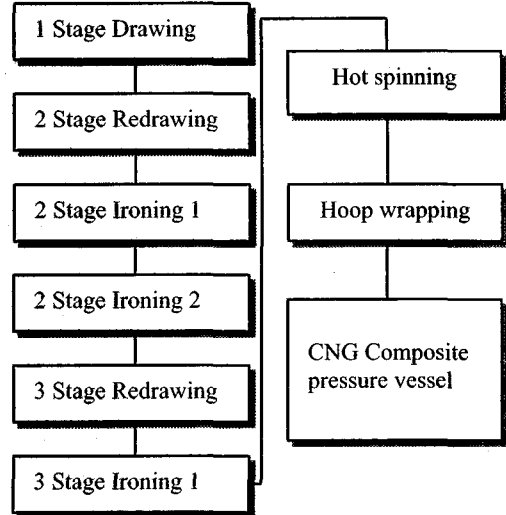


Fig. 1 Manufacturing process of CNG composite pressure vessel

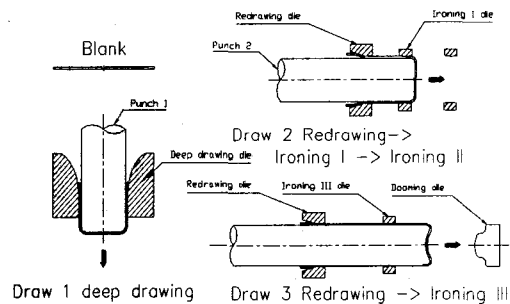


Fig. 2 D.D.I. forming process

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

(Metrix)를 함침시킨 후 회전하는 철강재 금속 라이너 주위에 일정하게 와인딩하여 오토클레이브(Autoclave)에 경화(Cure)시키는 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 후프랩(Hoop wrap) 및 헬리컬

로 라이너 원통부분 위에 원주방향으로 수지를 함침한 복합재를 후프 랩으로만 와인딩하여 복합재가 용기의 원주 방향으로 부가되는 응력만 부담하도록 하였다. Fig. 3 는 본 연구에서 사용된 전형적인 수평식 필라멘트 와인딩 기계를 나타내며, 실제 D.D.I 공정으로 제조된 용기에 필라멘트 와인딩하는 사진을 Fig. 4 에 나타내었다.

3. 시스템의 구성

일반적으로 복합재 압력용기는 원통(Cylinder), 돔(Dome), 보스(Boss) 및 접속부위(Junction part)로



Fig. 3 Photograph of the horizontal type filament winding machine

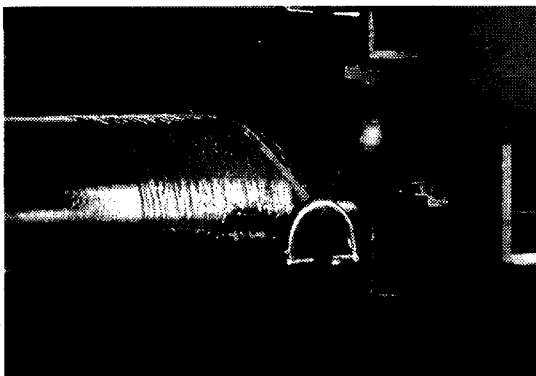


Fig. 4 Photograph of the filament winding process

랩(Helical wrap)을 복합시킨 풀랩(Full wrap)으로 나뉘어진다. 본 연구에서는 열간 벙 성형 공정 시 돔 부위의 두께가 두꺼워지고 돔 부위의 원주방향 응력이 실린더 부위의 원주방향 응력보다 작으므로

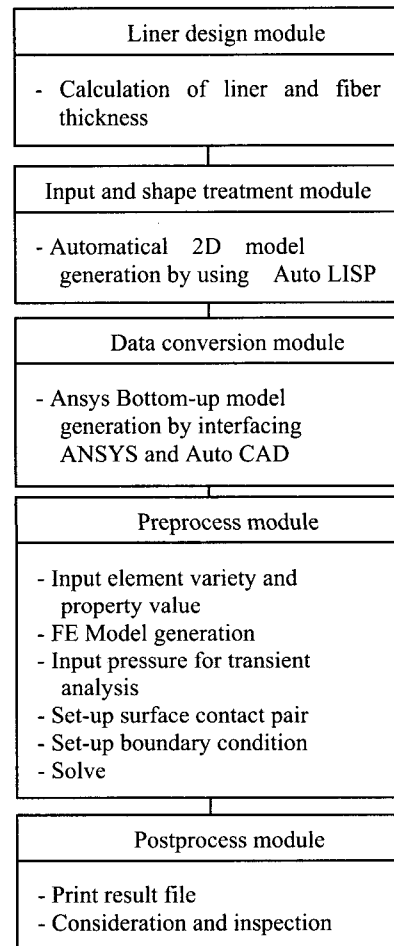


Fig. 5 Structure of the CNG composite vessel analysis program

이루어져 있다. 이와 같이 구성된 필라멘트 와인딩 압력용기의 구조해석을 위해 Liner 형상에 따른 돔의 두께 및 폭률, 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. 5 에 나타내었다. 각 모듈의 기능적인 설명을 아래에 간략히 기술하였다.

3.1 라이너 설계 모듈

라이너 설계 모듈은 금속라이너의 두께가 고압가스 안전관리기준에 준하여 상용압력(Working pressure) 2.11kgf/mm²의 1.25 배 내압을 견딜 수 있도록 하기 위하여 압력용기의 주응력을 식(1)과 같이 가정하고 식(2)의 Von Mises 항복조건이론을 적용시켜 최소두께를 계산한다.

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = pr/t, \quad \sigma_2 = \sigma_z = pr/2t$$

$$\sigma_3 = \sigma_r \approx 0 \quad (1)$$

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 6 = k^2 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = 2k \quad (3)$$

Von Mises 조건식에서 $k \approx Y.S / \sqrt{3}$ 이므로

$$\therefore t = \sqrt{3}pr / 2Y.S$$

where, p : Bursting test pressure

$Y.S$: Yield strength

r : Radius of the CNG vessel

또한 각 성형단계의 치수와 각 공정별 제품의 치수를 결정한다.

3.2 입력 및 형상처리 모듈

형상처리 모듈은 Auto LISP 을 이용하여 복합용기를 ANSYS 에서 유한요소 모델을 생성하기 위한 예비 단계로써 용기와 적층판의 적층형상 치수 데이터를 입력받아 CNG 복합용기의 형상을 2 차원 모델로 자동 생성시킨다.

3.3 데이터 변환 모듈

데이터 변환 모듈은 Auto CAD 에서 생성된 CNG 복합용기 모델의 형상치수 데이터를 Auto

LISP 을 이용하여 ANSYS 와 인터페이스 시킴으로써 마우스 클릭 작업만으로 형상치수 데이터를 ANSYS 해석에 필요한 행렬형식으로 불러들여 유한요소모델을 자동으로 재생성시킨다.

3.4 프리프로세스 모듈

CNG 복합용기의 표준해석 모델을 위한 ANSYS 프리프로세스 모듈은 Auto CAD 와 Auto LISP 을 이용하여 자동으로 생성시킨 복합용기 모델을 ANSYS APDL(Parametric design language) 및 Visual Basic 에 기반하여 그래픽 사용자 인터페이스(Graphical user Interface) 환경하에서 기본적인 데이터의 입력 및 마우스 버튼의 클릭 작업만으로 ANSYS 해석에 필요한 로그 파일을 Macro 화 하고, 시간에 따라 변하는 하중에 대한 과도해석을 자동으로 수행한다.

3.5 포스트프로세스 모듈

포스트프로세스 모듈은 표준모델의 과도해석이 완료된 다음 ANSYS 의 결과파일에서 필요한 하중의 해석결과를 읽어들이어 응력 및 변형률을 도식적으로 나타내고 또한 이를 원하는 형태의 파일로 저장,출력시킨다.

4. 시스템의 적용 및 고찰

4.1 라이너 설계 모듈에의 적용

식(3)에 의하여 라이너의 두께는 4mm 로 계산되었다. 1 차 성형단계에서는 한계드로잉비 2.2, 클리어런스 1.05 의 초드로잉 공정이 결정되었다. 초드로잉 금형은 블랭크 홀더가 없는 트랙트릭스(Tractrix) 다이로 설계되었고 2 차 성형단계에서는 재드로잉, 아이어닝 I, 아이어닝 II 순서로 공정이 결정되었다. 3 차 성형단계에서는 재드로잉 및 아이어닝 III 순서로 공정이 결정되었고 열간스피닝 공정에 의한 압력용기의 목(Neck) 성형 후 라이너 설계가 완료되었다. 이 모듈에서 창출된 공정 설계 도면을 Fig. 6 에 나타내었고 각 성형단계의 설계결과를 Table 1 에 나타내었다.

라이너 설계 모듈에서 계산된 4mm 두께를 갖는 라이너의 안정성을 검증하기 위하여 고압가스 안전관리기준에 준한 상용압력(Working pressure) 2.11kgf/mm²의 1.25 배를 만족하는 2.64kgf/mm²의 내압을 가했을 때 Ansys 에서 수행된 라이너의 응

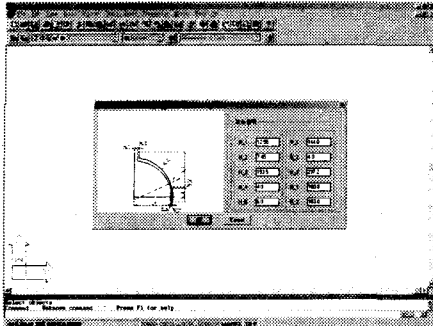


Fig. 9 Basic window of the input and shape treatment module

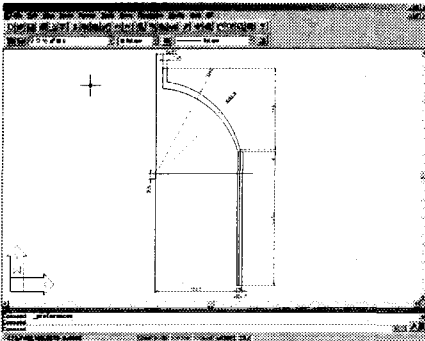


Fig. 10 Result carried out in the input and shape treatment module

4.3 데이터 변환 모듈에의 적용

입력 및 형상치수 모듈이 실행됨과 동시에 형상치수 데이터는 자동으로 파일로 저장되어 데이터 변환 모듈에 의해 Fig. 11 과 같이 Ansys 에서 읽어 들일 수 있는 행렬형식으로 변환된다.

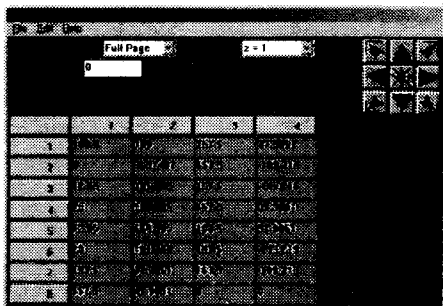


Fig. 11 Result carried out in the data conversion module

4.4 프리프로세스 모듈에의 적용

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

Table 2 Material properties of liner (34CrMo4)

Properties	Value(kgf/mm ²)
Elastic Modulus(E)	2.04 ₅ 10 ⁴
Poission's Ratio(v)	0.25
Yield Strength	85.8
Tensile Strength	96.7

Table 3 Material properties of composite material

Properties	Value(kgf/mm ²)
Longitudinal Modulus(E ₁₁)	5483.946
Transverse Modulus(E ₂₂)	1827.982
Transverse Modulus(E ₃₃)	1927.982
Poission's Ratio(v ₁₂ , v ₁₃)	0.25
Transverse Shear Modulus(G ₁₂)	913.991
Longitudinal Tensile Strength(X _t)	105.46
Transverse Tensile Strength(Y _t)	2.81
Transverse Shear Strength(S)	4.22
Longitudinal Compressive Strength(X _c)	105.46
Transverse Compressive Strength(Y _c)	14.0614

본 모듈에서는 34Cr-Mo4 와 E-Glass/Epoxy 의 물성치에 대한 기본 입력값을 설정하였으며 이를 Table 2 와 Table 3 에 나타내었다.^[10]

복합 소재의 물성치는 뚜렷한 이방성을 가지므로 인해 각도 변화에 따른 회전된 좌표방향의 물성치 계산이 요구되어진다. Fig. 12 는 회전 각도에 따른 좌표 방향의 물성치를 계산하기 위해 구축한 Visual Basic 변환 모듈을 나타내었다. 해석에 필요한 각각의 로그파일을 Macro 화하여 저장한 다음, 치수 및 물성치, 하중조건에 관한 데이터를 Fig. 13, Fig. 14 와 같이 그래픽 사용자 인터페이스 환경 하에서 DCL(Dialog control language)창을 이용

하여 입력받아 실행버튼을 클릭하면 유한요소해석을 자동으로 수행한다. Fig. 15 은 CNG 복합용기의 해석을 위한 표준모델의 유한요소 메쉬(Mesh)형상과 경계조건 및 하중조건을 나타내었다. 금속재 라이너에 대해서는 8 절점 6 면체 요소인 Solid 185 요소를, 적층판(Laminate)에 대해서는 8 절점 6 면체 쉘요소인 Solid 46 를 사용하였다. 해석시간을 줄이기 위해 라이너 상부 돔부분과 실린더의 일부만만을 모델링하였으며 쉘요소는 3 차원형상에만 적용됨으로 인해 원주방향으로 10°만큼 회전시켜 체적을 생성하였다.

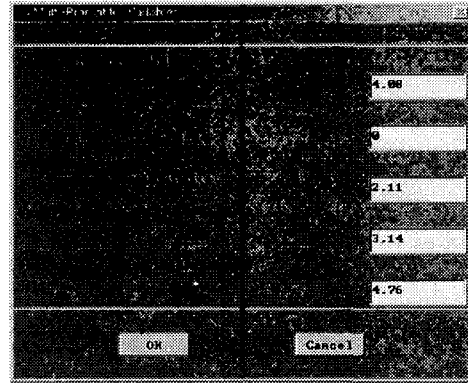


Fig. 14 Pressure data input window for transient analysis

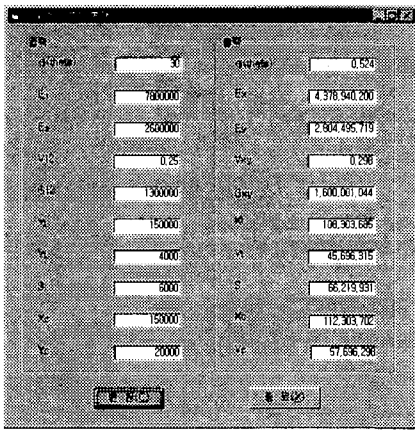


Fig. 12 Visual Basic program of the property conversion

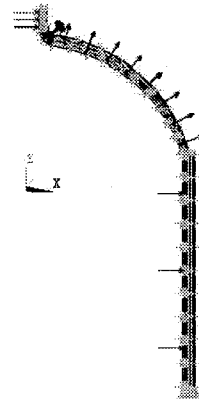


Fig. 15 Meshing and boundary condition

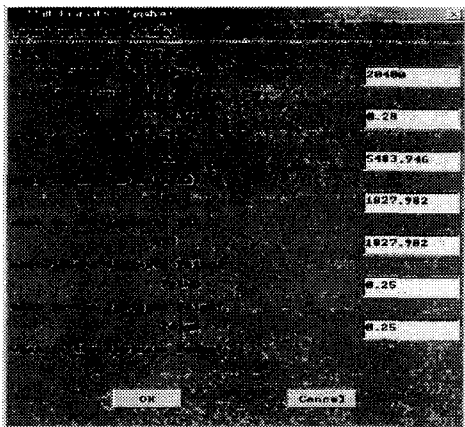


Fig. 13 Input window of material property data

응력해석에서 접촉이 일어나는 부분인 라이너 표면과 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 회복시켜 원주방향으로 압축잔류응력을 발생시킴으로

써 구조강도 향상에 기여하는 자긴압력 크기는 자긴압력 값을 변화시켜 최고의 압축잔류응력을 발생시키고 동시에 응력비를 만족시킬 수 있는 최적의 압력을 시행착오법으로 행하여 결정하였다. 여기서 응력비란 용기파열시험에서 결정된 섬유의 최대강도를 사용압력에서의 섬유의 등가응력으로 나눈 것을 말한다. 본 모듈에서는 응력비 2.75 이상을 만족하는 자긴압력을 시행착오법으로 4kgf/mm² 로 결정하였고 이때의 압축잔류응력(σ_0)은 30kgf/mm² 이다. 잔류응력분포 및 사용압력에서의 섬유의 등가응력분포를 Fig. 16, Fig. 17 에 나타내었다.

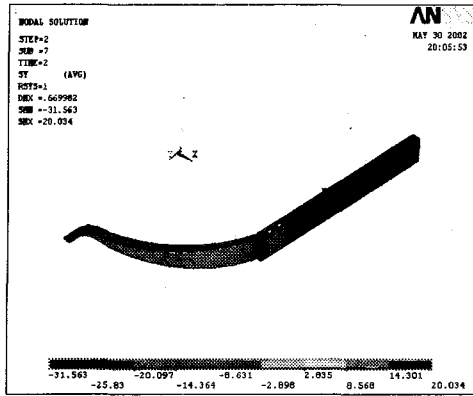


Fig. 16 Distribution of the residual stress on unloading

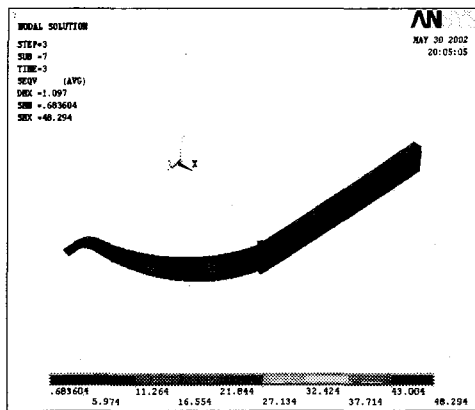


Fig. 17 Distribution of the equivalent stress after unloading

4.5 포스트프로세스 모듈에의 적용

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 요구되어지는 최소파열압력 475bar 를 넘는 618bar 에서 파괴가 일어났는데 CNG 복합재 용기의 파열되는 양상을 Fig. 18 에 나타내었다. 또한 사용압력에서 응력비 (3.25 > 2.75)를 만족함과 동시에 이방성 소재에 대해 일반화된 Tsai-Hill Thoery 로 안정성 평가(0.5 < 1)시 양호함을 확인하였다.

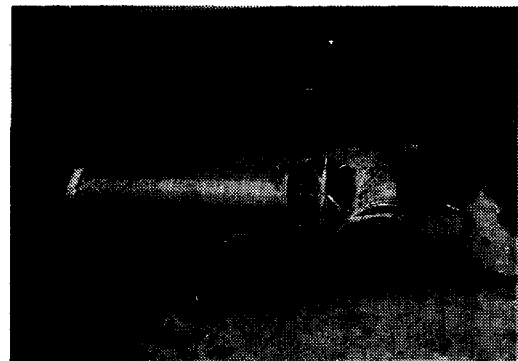


Fig. 18 Photograph of the burst composite vessel

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 하중

에 대한 과도해석을 수행하여 내부에 밀봉된 고압 가스에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하고 있는, 고도의 신뢰성을 요구하는 CNG 복합용기의 설계 자동화 시스템을 개발했다. 이로 인하여 전용 해석 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 설계단계부터 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 chou, "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 주기기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS 를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발," *대한기계학회논문집 A 권*, 제 22 권, 제 4 호, pp.731-742.
8. S.B. Park, Y. Choi, B.M. Kim, J.C. Choi, "A CAD/CAM system for deep drawing dies in a simple-action press," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, No. 15, pp. 258-265, 1999.
9. J.C.Choi, Chul Kim, "A compact and practical CAD/CAM system for the blanking or piercing of irregular shaped-sheet metal product for progressive working," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 36-46, 2001. 4.
10. Robert M.Jones, "Mechanics of Composite Materials," *Institute of Technology Southern Methodist University, Scripta Book Company*.