

CNG 복합용기의 필라멘트 와인딩 공정에 관한 연구

김 철(부산대 기계기술연구소), 김의수(부산대 기계공학부), 김지훈(부산대 기계공학부),
최재찬(부산대 기계공학부), 박윤소(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 is demanded from the defense and aerospace industry to rocket motor case due to the merits which are energy curtailment by the weight reduction and decrease of explosive damage precede 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 5.7.1, the general commercial program, 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), Composite material(복합재료), Autofrettage Process(자긴처리), ANSYS APDL(ANSYS 파라메트 디자인 언어), 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 요구되는 여러 산업분야에서 널리 사용이 확대되고 있는 추세이다. 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, 대량생산등 여러측면에서 유리섬유나 케이블, 탄소섬유등의 높은 비강성 및 비탄성도를 이용한 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법이 가장 적절하다. 이러한 필라멘트 와인딩된 복합

재 압력용기는 해석관점에서 금속재 라이너(Liner)와 적층판(Laminate)사이에서의 contact, 자긴처리(Autofrettage Process)에 의한 잔류응력(Residual stress)발생, 시간의 따라 변하는 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 내압을 받는 E-glass/에폭시 필라멘트 와인딩 압력용기의 비선형 유한요소해석(Nonlinear FE Analysis)을 위해 이미 해의 정확성 및 유용성이 검증된 상용 프로그램인 ANSYS 5.7.1를 이용하여 표준해석 모델을 개발하고, Auto LISP 및 ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language)를

기반으로 필라멘트 와인딩 복합용기 해석 전용의 전처리 프로그램(preprocessor)을 개발하여 설계자가 간단한 설계변수(와인딩 패턴, 와인딩 두께 및 적층 각도, 하중의 크기)의 입력만으로도 쉽게 해석을 수행할 수 있도록 하고 해석결과도 간단히 정리해 주는 후처리 프로그램(postprocessor)을 개발하였다.

2. 시스템의 구성

일반적으로 복합재 압력용기는 원통(cylinder), 돔(dome), 보스(boss) 및 접속부위(junction part)로 이루어져 있으며 이와 같이 구성된 필라멘트 와인딩 압력용기의 구조해석을 위해서는 Liner 형상에 따른 돔의 두께 및 곡률과 섬유방향을 생각하여 자긴처리(Autofrettage Process)에 의한 잔류응력(Residual stress)고려후 시간에 따라 변하는 하중에 대한 비선형 과도해석을 수행해야 한다. Fig. 1 은 ANSYS 를 이용한 CNG 복합용기 전후처리 해석 프로그램의 구성도를 나타내었다.

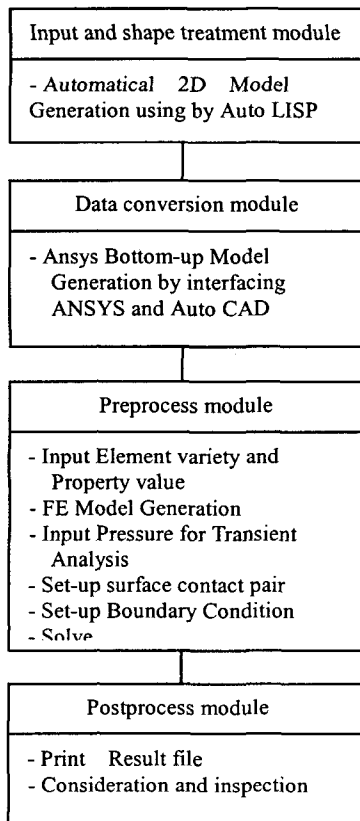


Fig. 1 Structure of CNG composite vessel analysis program

2.1 입력 및 형상처리 모듈

Fig. 2 와 같은 Auto LISP 을 이용한 복합용기 형상처리 모듈은 ANSYS 에서 유한요소 모델을 생성하기 위한 예비 단계로써 용기와 적층판의 적층형상 치수 데이터를 입력받아 CNG 복합용기의 형상을 2 차원 모델로 자동 생성시켜주는 프로그램이다.

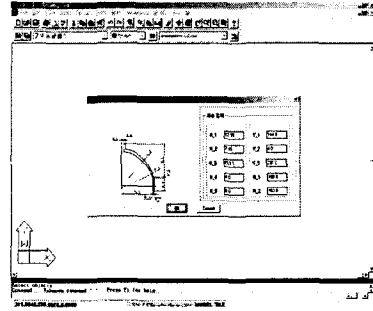


Fig. 2 Basic window of input and shape treatment module

2.2 Data Conversion 모듈

Data Conversion 모듈은 Auto CAD 에서 생성된 CNG 복합용기 모델의 형상치수 Data 를 Auto LISP 을 이용하여 ANSYS 와 인터페이스시킴으로써 마우스 클릭 작업만으로 형상치수 Data 를 ANSYS 해석에 필요한 행렬형식으로 불러들여 Fig. 3 와 같은 유한요소모델을 자동으로 재생성한다.



Fig. 3 Automatically generated FE model

2.3 Preprocess 모듈

CNG 복합용기의 표준해석 모델을 위한 ANSYS Preprocess 모듈은 Auto CAD 와 Auto LISP 을 이용하여 자동으로 생성시킨 복합용기 모델을 그래픽 사용자 인터페이스(Graphical user Interface) 환경하에서 기본적인 데이터의 입력 작업만으로 ANSYS 해석에

필요한 로그 파일을 Macro 화 하고, 시간의 따라 변하는 하중에 대한 과도해석을 자동으로 수행시켜 주는 역할을 한다.

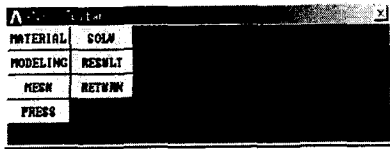


Fig. 4 Basic window of preprocess module

2.4 Postprocess 모듈

Postprocess 모듈은 표준모델의 과도해석이 완료된 다음 ANSYS 의 결과파일에서 필요한 하중단계의 해석결과만 읽어들이어 각각의 방향에 대한 응력 및 변형률을 도식적으로 나타낼 수 있으며 또한 이를 원하는 형태의 파일로 저장, 출력시켜 주는 역할을 한다.

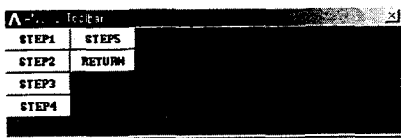


Fig. 5 Basic window of postprocess module

3. 시스템의 적용 및 고찰

3.1 입력 및 형상처리 모듈에의 적용

Fig. 6 는 해석을 위한 CNG 복합용기의 실제 형상을 나타내며 사용자의 편의를 위해 Auto LISP 을 기반으로 한 DCL(Dialog Control Language)창을 이용하여 해석되어질 용기의 형상치수를 입력하면 Fig. 7 과 같이 용기의 1/4 부분을 2 차원으로 자동 모델링한다.

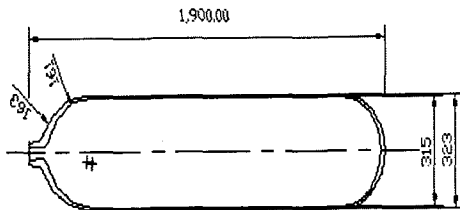


Fig. 6 Shape of CNG pressure vessel

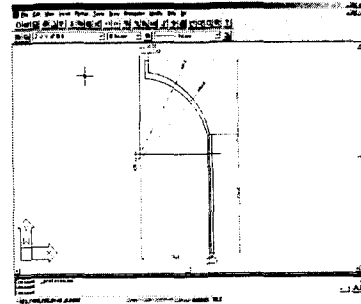


Fig. 7 Practice window of input and shape treatment module

3.2 Data Conversion 모듈에의 적용

입력 및 형상치수 모듈이 실행됨과 동시에 형상치수 데이터는 자동으로 파일로 저장되어지며 Data Conversion 모듈에 의해 Fig. 8 과 같이 Ansys 에서 읽어들이 수 있는 행렬형식으로 변환되어 Ansys 내 에 형성된다.

	1	2	3	4
1	1900	315	323	323000
2		437000	315	190215
3	1235	190300	315	190215
4	23	190300	315	323000
5	1235	190300	315	323000
6	23	190300	315	190215
7	1525	323000	315	190215
8	1525	437000	315	

Fig. 8 Practice window of data conversion module

3.3 Preprocess 모듈에의 적용

CNG 복합용기 해석 Preprocess 모듈은 크게 물성치 입력부분, 유한요소모델 생성부분, 하중조건 입력부분으로 구분되며 먼저 해석에 필요한 각각의 로그파일을 Macro 화하여 저장한 다음 치수, 물성치, 하중조건에 관한 데이터를 Fig. 9, Fig. 10 과 같이 그래픽 사용자 인터페이스 환경 하에서 DCL(Dialog Control Language)창을 이용하여 입력받아 실행버튼을 클릭하면 ANSYS 유한요소해석을 자동으로 수행한다. 물론 치수, 물성치 및 하중조건에 관한 모든 데이터 입력창에서는 파일의 생성 및 기존파일의 수정이 가능하게 되어 있다.

본 모듈은 Auto LISP 및 ANSYS APDL (Parametric Design Language)과 Visual Basic 에 기반하여 개

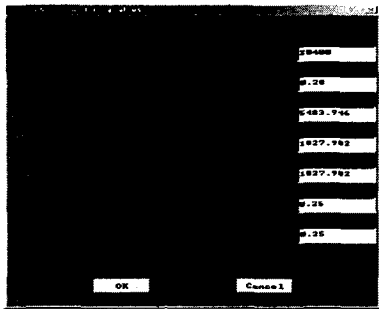


Fig. 9 Material property data input window

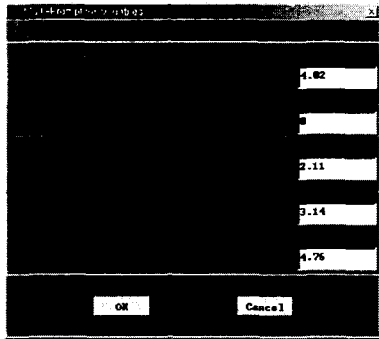


Fig. 10 Pressure data input window for transient analysis

발하였으며, 마우스 버튼의 클릭을 통한 접근방식을 채택하여 사용자가 프로그램을 쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

Fig. 11 는 CNG 복합용기의 해석을 위한 표준모델의 유한요소 메쉬(mesh)형상과 경계조건 및 하중조건을 나타내었다. 금속재 라이너(Liner)에 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 Liner 상부 dome 부분과 cylinder 의 일부분만 모델링하였으며 쉘요소는 3 차원형상에만 적용됨으로 인해 원주방향으로 10°만큼 회전시켜 채적을 생성하였다.

응력해석에서 접촉이 일어나는 부분인 Liner 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 할 필요가 있으며, Liner 가 변형을 일으킬 경우 섬유도 함께 변형하게 되고 이로 인해 고정된 전체좌표계에 대한 섬유의 상대적인 위치도 변하게 되므로 경계조건의 부여는 절점좌표계에 대해 정의 되어야 한다. 내부에 작용하는

가스의 압력은 하중단계에 따른 과도해석을 이용하여 Liner 내벽에 압력 경계조건으로 부여하였다.

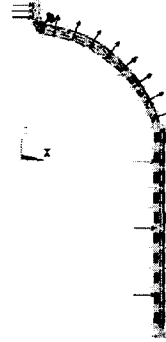


Fig. 11 Meshing and boundary condition

3.4 Postprocess 모듈에의 적용

Fig. 12 은 Postprocess 모듈의 실행창으로 자기처리에 의해 압축잔류응력을 발생시킨후 내압이 작용하는 여러조건의 해석중 상용압력의 조건(207bar)에 대한 해석결과를 나타내었다. 압력용기의 최대응력은 원통과 돔이 만나는 접속부위에서 발생하였고 보강 설계없이는 290bar 에서 파괴가 발생 되었으나, 필라멘트 와인딩으로 보강한 경우 475bar 이상의 압력에서 파괴되는 향상된 결과를 나타내었다.

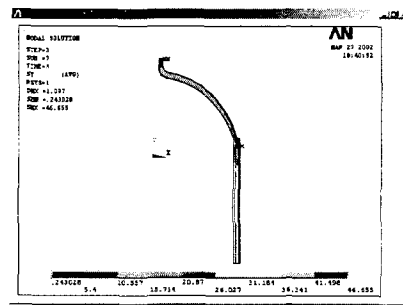


Fig. 12 Practice window of postprocess module

4. 결론

본 연구에서는 기하학적으로 3 차원 형상의 금속재 라이너(Liner)와 적층판(Laminate)사이에서의 contact, 자기처리(Autofrettage Process)에 의한 잔류응력(Residual stress)발생, 시간의 따라 변하는 하중에 대한 과도해석(Transient Analysis) 수행등 내부에

밀봉된 고압가스에 의한 기계적 변형이 복합적으로 작용하고 있는, 고도의 신뢰성을 요구하는 CNG 복합용기의 설계를 위한 유한요소해석 모델을 개발하였고, 이 해석 모델을 바탕으로 해서 전후 처리 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 해의 신뢰성과 사용자 편의성이 입증된 ANSYS 5.7.1 를 이용하여 표준해석 모델을 개발하였고, 이 모델을 기준하여 전처리 프로그램을 개발함으로써 시간이 과도하게 소요되면서도 사용의 편의성, 정확성등에 어려운 점이 있는 전용해석 프로그램의 개발대신 상용 프로그램인 Auto CAD 와 ANSYS 의 연계를 통해 각각의 활용도를 극대화 하고 기능을 최대한으로 이용하면서, 사용자의 편의성을 최대한으로 살리고자 하였다.

전처리 프로그램은 Auto LISP 과 그래픽 사용자 인터페이스 환경을 이용하였기 때문에 설계단계에서 화면상에서 지시하는 대로 설계자가 간단한 몇 개의 설계데이터만을 수정,입력함으로써 쉽게 표준해석 모델을 생성시킬 수 있으며, 후처리 프로그램으로 해석 모델의 원하는 결과만을 마우스 원클릭만으로 볼 수 있어 매우 효율적이다.

이러한 전용 전후처리 프로그램의 개발은 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 수도 있어, 설계자가 설계고유의 업무 및 최적화 설계에 더욱 충실하게 매진할 수 있는 장점이 있다.

후 기

본 연구는 2001 년도 기계기술연구소 산학공동과제의 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 태성에스엔이 FEA 사업부, "유한요소해석 입문과 선형해석", 도서출판 계림, 제 3 판, 2000.12
2. 디엔디이, "ANSYS APDL 교육자료", 2001.12
3. 김찬우, "Visual LISP", 크라운출판사, 2000.2
4. 손제호, "Visual LISP", 청호출판사, 2000.1
5. 전성문, 서의권, 심현보, 김태완, 이부윤, "원자력주기용 볼트 개폐구조물의 해석과 ANSYS 를 이용한 전용 해석 프로그램의 개발", 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 4 호, pp.731-742,
6. Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov, "Mechanics And Analysis of Composite Materials", Elsevier, 2001.
7. R. F. Lark, "Recent Advances in Lightweightm

Filament-Wound Composite Pressure Vessel Technology" ASMEPVP-PB-021 pp.17-50

8. 古田敏康, "新 複合材料의 研究開發 現狀 問題點", The Internation Technical Information Institute,
9. Robert M.Jones, "Mechanics of Composite Materials", Institute of Technology Southern Methodist University, Scripta Book Company
10. D. V. Rosato, C. S. Grove, "Filament Winding : its developmentm manufacture, applications, and design" John Wiley & Sons Inc, pp. 216-248
11. Hisao Fukunaga, Tsu-Wei chou, 1998, "Simplified Design Techniques for Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Stiffness and Strength Constraints", Journal of Composite Materials, Vol. 22, pp.1156-1169
12. Li Yongsheng. 1992, "Sensitivity Analysis in Shape Optimization Design for a Pressure Vessel." International Journal of Pressure Vessel & Piping, Vol. 49, pp.387-397