

論文

필라멘트 와인딩 공정에 의한 천연가스 차량용 복합재료 압력용기

김병선*, 김병하**, 김진봉**

Composite Pressure Vessel for Natural Gas Vehicle by Filament Winding

Byung-Sun Kim*, Byung-Ha Kim** and Jin-Bong Kim**

ABSTRACT

Composite pressure vessels with HDPE (high density polyethylene) liner with metal boss at each end were developed by Filament Winding Process. The vessel is composed of a dome-shaped part at each end and a cylinder-shaped part at the middle of the vessel. The environmental tests carried out for possible vessel materials such as High Density Polyethyln (HDPE), resins and reinforcing fibers up to a year showed no significant damages. The boss was designed to minimize the gas leak which was verified by FEM analysis. Most ideal fiber tension was obtained by experimental method and the fiber volume fraction, V_f , obtained by image analyzer were 55.4 % in cylinder and 55.6 % in dome parts, respectively. Winding pattern is programmed to control the composite thickness in the dome areas such that the failure of the vessel may occur in the cylinder. During the cure, the vessel was rotated and a constant internal pressure of 0.62 bar was applied. From this, the vessel's burst pressure is improved by 28 %. The burst and fatigue tests for under-wound and fully wound vessel showed satisfactory results.

초 록

HDPE (high density polyethylene) 라이너와 금속 boss를 가진 복합재료 압력용기가 필라멘트 와인딩 공정에 의해 개발되었다. 이 용기의 끝 부위는 dome-shape 부위 그리고 용기의 중앙부는 cylinder-shape로 형성되었다. 용기를 구성하는 재료인 HDPE, 수지 그리고 강화섬유와 같은 용기재료에 대해 환경시험이 1년 이상 실행되었다. Boss 설계는 FEM 해석으로 가스 누출을 최대한 방지해 주는 것으로 확인 되었다. 실험적인 방법에 의해 가장 이상적인 fiber tension이 얻어졌고, image analyzer에 의해 측정된 섬유의 체적율, V_f 는 실린더에서 55.4 %, dome part에서 55.6 % 이었다. Winding pattern은 용기의 파괴가 실린더 부위에서 일어나도록 dome 부위의 복합재료 두께조절을 하도록 프로그램 되었다. 경화 중 용기는 돌려졌었고 고정 내부압력 0.62 bar를 가함으로서 최종용기의 파괴압력이 28 % 향상되었다. Under-wound, fully wound된 용기의 파괴 및 피로시험결과를 충족하였다.

Key Words: 압력용기(pressure vessel), 환경시험(environmental test), 필라멘트 와인딩(filament winding), 파괴시험(burst test)

1. 서 론

천연가스 차량용으로 압축 천연가스가 들어있는 복합재

료 용기는 매우 엄격한 조건을 요구한다. 북아메리카 DOD 규정에 의하면, 천연가스 엔진에 대해 요구되는 용기의 사용압력과 파괴압력은 각각 25와 56 bar이다.

* 한국기계연구원 공정연구부 복합재료그룹, 교신저자(E-mail:kbs@kmail.kimm.re.kr)

** 한국기계연구원 공정연구부 복합재료그룹

천연가스 엔진은 가장 오염이 없는 엔진들 중의 하나이다[1]. 압축천연가스 압력용기는 알루미늄으로 만들어진 것보다 약 60 % 이하의 무게를 지닌 폴리에틸렌 라이너를 가진 carbon/epoxy 복합재료로 만들어졌고, 또한, 금속 용기와 비교하여 파괴 거동이 더욱 안전하다.

이 연구의 목적은 천연가스 차량용 복합재료 CNG 압력용기의 개발이다. CNG 압력용기에 사용된 라이너는 HDPE로 만들어졌고, 고강도 탄소섬유는 용기를 filament winding으로 감는데 사용되었다. 용기의 끝에 디자인된 “Metal End Nozzle”이 천연가스를 쉽게 주입하게 할 뿐만 아니라 제조의 편의성을 위해 삽입되었다.

2. CNG 환경에서의 구성 재료실험

CNG 환경의 영향을 확인하기 위해서, 섬유(탄소, 유리, 케블라등), 수지 그리고, 폴리에틸렌을 상온에서 CNG 환경의 chamber 안에 투입하였다. 시편은 1년 이상 실험하기 위해서 chamber 안에 넣었다. CNG 환경이 되도록 35 bar의 내부 압력이 chamber 안에서 천연가스 상태로 유지되었다. 각각의 시편은 chamber 안에 넣기 전에 인장시험이 행해졌다. 시편의 인장강도는 1년 동안 정기적으로 시험되었다. 순수 섬유는 ASTM D3379에 의해 인장 시험되었고 나머지 시편들의 인장강도 손실도 거의 관측되지 않았다(Fig. 1). 시험된 재료들은 vinyl ester (National), epoxy (Ciba-Geigy), carbon fiber (high strength, Taekwang Ind. Ltd.), fiber glass (Hankuk Fiber Glass Co.), Kevlar 49 (Dupont), HDPE1 (Honam Petroleum Ind.) 그리고, HDPE2 (SamSung Chemical Co.) 이었다. 이런 모든 시편은 CNG환경의 chamber에 놓여졌고, 1년 동안 정기적으로 시험되었다.

3. 금속 BOSS 설계

HDPE 라이너의 효과적인 제조는 금속 boss의 디자인에 의존한다. 그 디자인은 또한 내부 압력의 반복변화에 따라 금속과 HDPE가 분리되어 발생할 가스 누출을 막을 수 있다. 이러한 이유로 boss는 디자인되었고, 그것의 개략도는 각각 Fig. 2와 3에 보여졌다. 두꺼운 선은 HDPE와 금속사이 가 붙은 영역을 나타낸다. 둥근 영역은 notch를 나타낸다. HDPE 라이너가 제조되고, 접착제가 이 영역 위에 첨가될 때 이 notch 안으로 채워졌다. 압력용기가 사용될 때, 내부 압력은 접착제와 HDPE에 압력을 가하므로 HDPE가 금속에 더욱 딱 붙도록 해주기 때문에 가스누출방지에 더욱 도움을 준다.

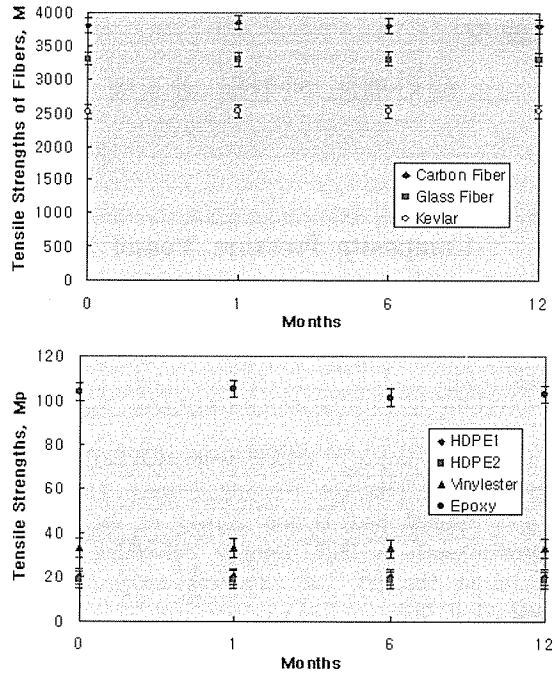


Fig. 1 Specimens' tensile strength vs. time in CNG environment (HDPE1 : Honam Petroleum Ind., HDPE2 : SamSung Chemical Co.).

디자인의 유효성은 NISA FEM 소프트웨어 패키지에 의해 확인 되었다. 해석을 위해 사용되었던 요소는 NISA NKTP #3, axisymmetric 2D 이고 경계조건은 $D_{x,y,z} = 0$ 이었다. 사용재료의 특성에 있어서 금속은 $E_x = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ 그리고 HDPE는 $E_x = 3.4 \text{ GPa}$, $\nu = 0.35$ 이었다. 하중은 0.62 bar의 내부 압력만 적용하였다. 노즐 형상의 반으로만 modeling하였다(Fig. 4). 밝은 색 부분이 금속이며, 어두운 부분은 HDPE이다. 화살표는 적용된 내부 압력을 나타내고, 화살표 다발은 구속조건을 나타낸다. 그림 5와 6은 해석 후의 변형도와 von Mises stress를 나타낸다.

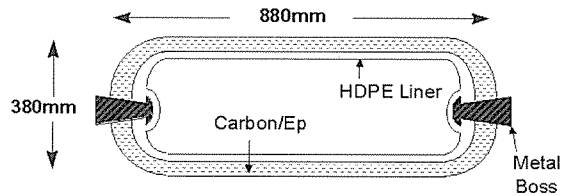


Fig. 2 Schematic drawing of CNG vessel.

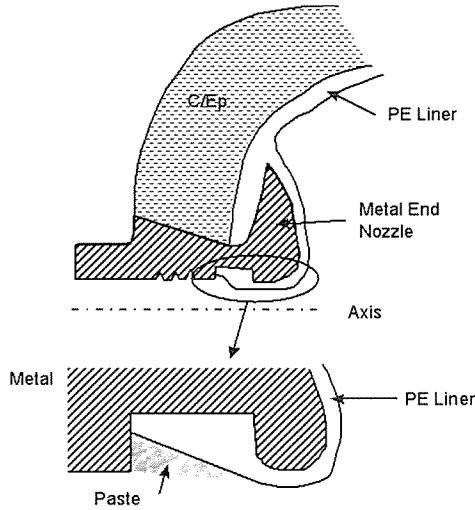


Fig. 3 Schematic drawing of a boss.

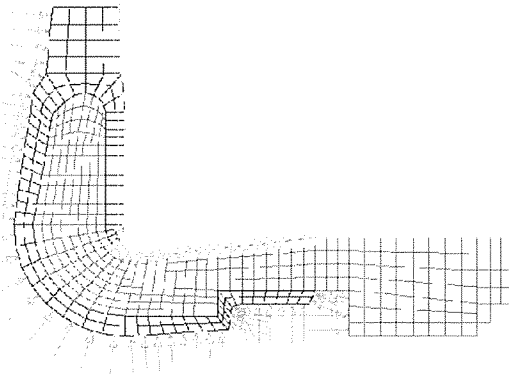


Fig. 4 Modeling with one half of the boss.

Fig. 5의 변형된 형상은 boss의 안쪽 부분에서 금속과 HDPE 사이의 분리가 없음을 보여준다. 또한, von Mises 응력해석으로 계산된 최대응력은 금속에서 단지 26.36 바리였고, 이것은 금속의 강도보다 훨씬 낮아서 어떤 영향도 끼치지 않을 것으로 판단된다. 금속의 강도는 20,000 bar이고 HDPE의 강도는 340 bar이다. 이 결과는 가스 누출이 일어나지 않는 것을 나타낸다.

돔 영역은 용기의 boss와 실린더를 연결한 영역이다. 이 영역을 부드럽게 연결시키면, 응력집중은 피할 수 있었고, 쉽게 winding이 달성될 수 있었다. 특히, 내압이 걸릴 때 굽힘모멘트가 없어야 돔 및 cylinder 부위의 복합재료가 최대한의

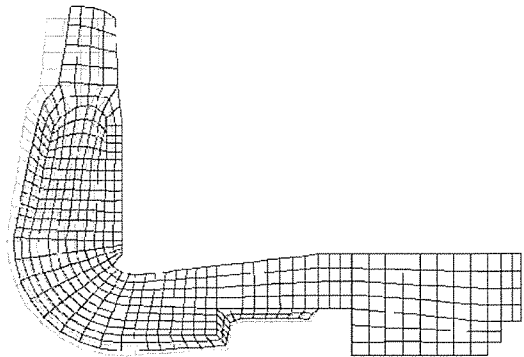


Fig. 5 Deformations after FEM analysis.

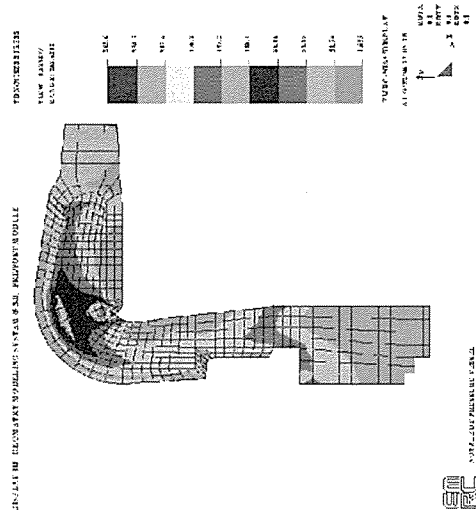


Fig. 6 Von Mises stresses after FEM analysis.

강도를 발휘할 수 있다. 이 돔 형상은 실린더 주위에서 간단한 기하학적 구조와 그리고, 돔 영역에서 굽힘모멘트가 0인 조건하의 돔 영역으로부터 얻어질 수 있었다.

4. Filament Winding 공정에 의한 최적 섬유 체적율, V_f

필라멘트 와인딩 프로세스에서 최적의 V_f 를 얻기 위해서, hoop 부위에서 다양한 수의 복합재료 층에 대해 변하는 섬유 인장력에 대한 V_f 를 image analyzer로 측정하였다. Fig. 7에서 보여진 결과에서 V_f 가 가장 일정할 때가 섬유

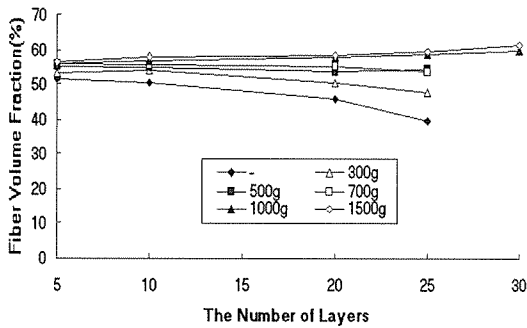


Fig. 7 V_f vs number of layers with varying fiber tension in hoop direction.

의 인장력이 약 800-850 g이었을 때이며 1000 g보다 높은 인장력에서는 증가하고, 750 g보다 낮은 경우에는 감소하였다. 이 인장력으로 감고난 후, hoop와 helical 방향에서의 V_f 는 각각 55.4 %와 55.6 %로 측정되었다.

5. USER FRIENDLY PROGRAM

User friendly program (KIMM-PV)이 fiber directions, thickness of helical layer, thickness of hoop layer, thickness of liner 등을 가장 편리하게 계산하기 위해서 개발되었다. 이 프로그램은 각각 실린더와 shell에 대해 laminated plate theory로부터 유도되었다. 경계조건은 실린더와 shell 주변에서의 응력접합조건이다. 이 프로그램은 hybrid 압력용기의 최적 구조성능에 대한 조건을 찾기 위해서 이용된다.

6. MANUFACTURING

HDPE 라이너가 filament winding machine에 장착된 다음, 용기는 정해진 각도와 두께로 가진 carbon fiber strands로 감아졌고 용기는 섬유융체가 추천한 cure cycle에 따라 성형하였다. Fig. 8은 FRP 압력용기 제조의 흐름을 나타내었다. 성형하는 동안 0.62 bar의 내부 압력을 가하여 제조 공정 중에 HDPE라이너의 함몰을 막았다.

Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이, regular winding에서는 “steel boss” 주위의 복합재료 두께는 용기를 제작하기에 너무 어려울 정도로 두꺼웠고, “dome” 과 “cylinder part”가 만나는 부위는 너무 얇아서 파괴 실험에서 이 부위에 매우 위험한 파괴가 있었다. Fig. 9(b)에는 돔 영역의 두께의 개선 후의 개략도를 나타낸다. 돔 영역에서 복합재료 두께의 개선은 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 winding sequence를 바꾼 후 이루어졌다.

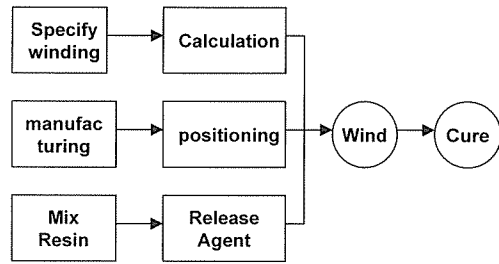
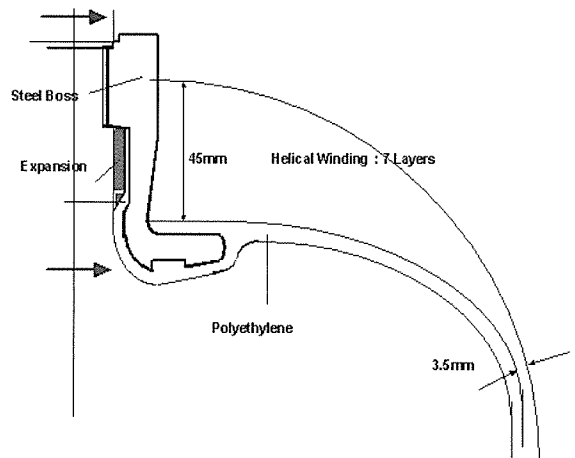
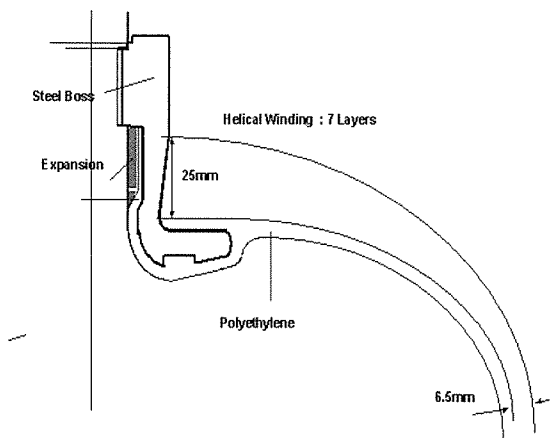


Fig. 8 Flow of manufacturing.



(a) regular winding



(b) improved winding

Fig. 9 Schematic view of vessel end after winding adjustment.

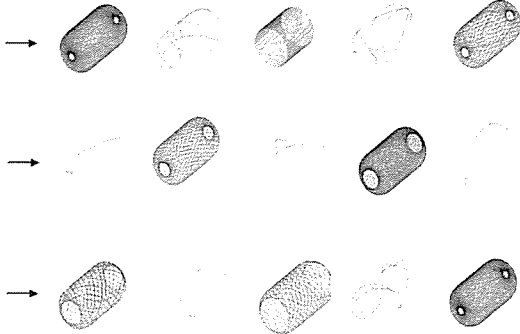


Fig. 10 Winding sequence for composite thickness improvement.

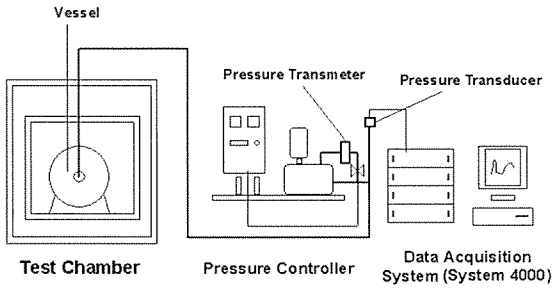


Fig. 11 Schematic drawing of safe test set up.

7. SPECIFICATIONS

CNG 압력용기의 사양은 Table 1에 요약되어졌다.

Table 1 Specifications of a CNG pressure vessel

Type	F/W pressure vessel with non-load sharing PE Liner	
Pressure	Operating pressure	25 bar
	proof pressure	35 bar
	burst pressure	56 bar
Outer Diameter of the liner	380 mm	
Length of the liner	880 mm	
Weight	> 30 kg	
Internal volume	80 liter	

8. 파괴실험

파괴 시험된 용기와 그 결과를 Table 2에 요약하였다.

Table 2 Burst test results (*internal pressure of .62 bar is applied during the cure) (1 bar = 10 Mpa).

Stacking Sequences	Burst P kg/cm ²	Burst Area
Hoop : [90] ₂₅ , Helical : [15] _s , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 65, 92.5, 130}	424.7	Nozzle
Hoop : [90] ₂₅ , Helical : [15] _s , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 65, 92.5, 130, 130}	494.5	Nozzle
Hoop : [90] ₂₀ , Helical : [15] _s , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 65, 92.5, 130, 130}	473.1	Nozzle
Hoop : [90] ₂₆ , Helical : [15] ₆ , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 130, 65, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130}	624.3	Nozzle/ cylinder
Hoop : [90] ₂₀ , Helical : [15] ₆ , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 130, 65, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130}	606.3	Nozzle/ cylinder
Hoop : [90] ₂₀ , Helical : [15] ₆ , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 130, 65, 92.5, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130}	611.8	Nozzle/ cylinder
Hoop : [90] ₁₇ , Helical : [15] ₆ , Dome Helical 50% : [15] _{32.5, 92.5, 130, 65, 92.5, 92.5, 130, 92.5, 130, 92.5, 130}	602.3	Nozzle/ cylinder

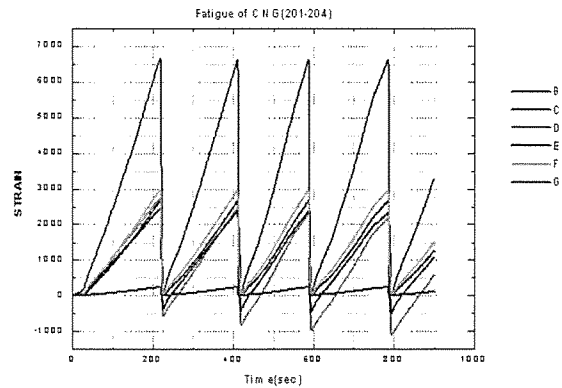
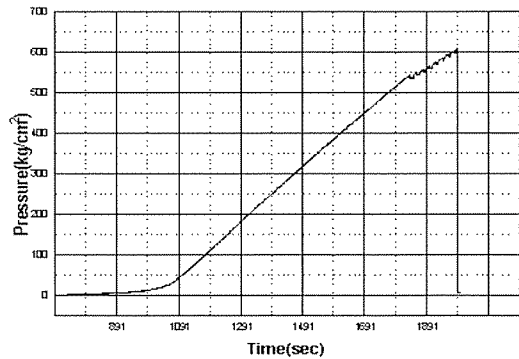


Fig. 12 Typical burst test result and strain readings during fatigue test.

9. TEST SET UP

Fig. 11의 개략도에서 보여진 설치에 따른 안정성 시험에 의한 파괴시험이 수행되었다. 전형적인 폭발시험의 결과와 피로시험 시의 변형 기록은 Fig. 12에서 볼 수 있으며 용기의 파괴(Fig. 13)는 cylinder 부위에서 파괴 안정성을 보이며 이루어졌음을 알 수 있다.



Fig. 13 A picture of fractured vessel.

10. 결 론

- 1) 용기제작에 사용되는 모든 섬유, 수지, HDPE 등은 CNG 환경에서 1년 이상 실험하였는데 모든 재료의 경우 손상이 발견되지 않았다.
- 2) FEM 해석으로 metal end nozzle의 디자인이 가스 누출을 막아주는 것을 확인하였다.
- 3) CNG 압력용기는 0.62 bar의 내부압력을 가하면서 제작/성형되었고 이는 용기의 최고 파괴 압력을 28 % 향상시켰을 뿐만 아니라 용기의 외부 표면을 더욱 매끈하게 해주었다.
- 4) Image analyzer에 의해 얻어진 V_r 는 각각 hoop에서 55.4 %, helical directions에서 55.6 % 이었다.
- 5) 끝으로, 용기는 평균 59.5 bar로 실린더 부위에서 파괴하였고 그것들의 평균 무게는 27.3 kg이었다. 또한, 용기는 200 회 피로시험 후에도 57.5 bar로 파괴하였다.

참고문헌

- 1) B. S. Kim et al, "Developing of Composite CNG Pressure Vessels," ICCM-11, Int'l Conf. on Composite Materials, Gold Coast, Australia, July 14-18, 1997, pp. 401-418

- 2) E. J. Jun et al, *Development of Technology on High-precision Filament Winding Technology*, KIMM Report, 1991. 12, BSM 231-1609.C.
- 3) E. J. Jun et al, *Development of FRP Pressure Vessel (I, II)*, KIMM Report, '89-'90, BSN160-1244.C.