

# Type 3 복합재 압력용기의 반복수명 예측 방법에 대한 연구

박지상\*·정상수\*\*·정재한\*\*

## Cycling life prediction method of the filament-wound composite cylinders with metal liner

Ji-Sang Park<sup>\*</sup>, Sang-Su Chung<sup>\*+</sup>, Jae-Han Chung<sup>\*\*</sup>

### Abstract

In manufacturing process of composite cylinders with metal liner, the autofrettage process which induces compressive residual stress on liner to improve cycling life can be applied. In this study, finite element analysis technique is presented, which can predict accurately the compressive residual stress on liner induced by autofrettage and stress behavior after. Material and geometry non-linearity is considered in finite element analysis, and the Von-Mises stress of a liner is introduced as a key parameter that determines pressure cycling life of composite cylinders. Presented methodology is verified through fatigue test of liner material and pressure cycling test of composite cylinders.

**Key Words:** Autofrettage Process, FEM, Filament-Wound Composite Cylinders

### 1. 서 론

복합재 압력용기는 근래에 들어 공기호흡기용이나 차량용 고압기체 저장 용기로 적용되면서 민수용으로도 그 적용 범위가 크게 확대되고 있다.<sup>(1)</sup>

일반적으로 항공우주·방산 분야에 적용되는 고압 용기들은 충전반복사용 횟수가 매우 제한적이기 때문에 설계 시 반복수명보다는 과열압에 중점을 두어 설계되어 왔다.<sup>(2)(3)</sup> 그러나 민수용으로 사용되는 고압 용기는 장기간에 걸쳐 반복 사용되는 경우가 대부분이어서 설계 시 반복수명이 중점적으로 고려되어야 한다.

복합재 압력용기에서 라이너는 내압을 지탱하는 비중은 높지 않지만 기밀유지라는 중요한 기능을 갖고 있으며 반복수명을 결정짓는 역할을

한다. 금속재 라이너를 가지고 있는 Type 3 복합재 압력용기는 피로특성에 있어서는 섬유강화 복합재에 비해 매우 취약하기 때문에 반복사용에 의한 용기의 파손모드는 라이너 균열에 의한 누출이다. 즉, 라이너의 피로 거동이 복합재 압력용기의 반복수명을 결정짓는 중요한 역할을 하게 되는 것이다.

따라서 금속재 라이너를 갖는 복합재 압력용기의 제조공정에서는 가압되지 않은 상태 (영 압력 상태)에서 라이너가 압축잔류응력 하에 있도록 하는 자긴처리 공정을 적용하여 라이너의 반복수명을 개선하는 방법이 사용된다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 자긴처리와 이후 반복가압에서 라이너의 응력분포를 정확히 예측할 수 있는 유한요소해석 기법을 제시하고 라이너의 응력분포로부터 복합재 압력용기의 반복수명을 결정하기 위한 실험적, 해석적 방법이 제안된다. 그리고 해석적으로 예측된 결과와 복합재 압력용기의 반복 시험 결과를 비교하여 제안된 방법의 타당성과 유효성을 입증한다.

\* 한국기계연구원

\*\* (주) 이노컴

## 2. 복합재 압력용기의 유한요소해석

### 2.1 유한요소 모델링 및 해석 절차

본 연구에서 다루고 있는 용기는 사용압 20.7 MPa, 내용적 70 liter 급의 천연가스차량용 복합재 압력용기로서, Al6061-T6 소재의 이음매 없는 금속재 알루미늄 라이너를 가지며 T700급 탄소섬유/에폭시를 헬리컬 및 홉 와인딩을 번갈아 풀랩한 용기이다.

금속재 라이너를 갖는 복합재 압력용기는 자긴처리 과정에서 라이너가 탄성역을 넘어 소성 변형을 일으키며 다시 영 압력 상태로 돌아왔을 때 압축잔류응력 상태에 놓이게 된다. 이 압축잔류응력이 라이너의 피로거동에 결정적인 영향을 미치기 때문에 유한요소 해석에서는 이러한 잔류응력의 영향을 고려할 수 있는 해석 기법을 도입한다. 여기서 알루미늄 재료의 구성 방정식은 탄성-완전소성으로 가정한다. Figure 1에서와 같은 단계로 재료 및 기하학적 비선형 해석을 수행하여 자긴처리에 의한 라이너의 압축잔류응력의 영향을 평가하고 해석에 반영한다. 이를 해석 구간별로 나누어 설명하면 다음과 같다.

- Step 1: Loading up to autofrettage pressure
- Step 2: Unloading to zero pressure
- Step 3: Loading up to cycling (service) pressure
- Step 4: Loading up to minimum burst pressure

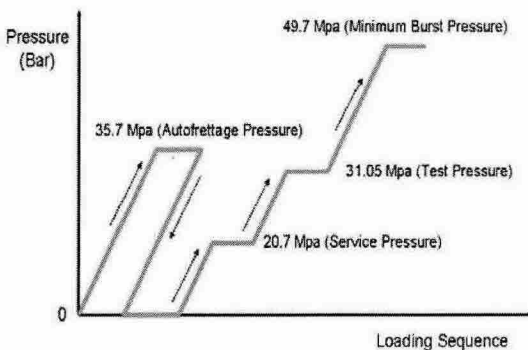


Fig. 1 Analysis sequence considering plastic deformation by autofrettage of liner material.

### 2.2 유한요소해석 결과

복합재 압력용기의 반복수명을 결정하는 인자

는 반복 사용압에서의 라이너 응력 분포와 크기이다. 사용압에서 라이너 응력분포는 자긴처리 시 라이너의 소성변형의 크기와 복합재 층과 알루미늄 라이너의 상대적 강성 비에 의해 결정된다.

Figure 2는 자긴압에서 변형 모습이며, Fig. 3은 자긴압을 제거하고 다시 영 압력 상태로 돌아왔을 때 변형모습이다. 자긴압에서 일으킨 소성변형으로 인해 자긴압을 제거한 후에도 라이너에 변형이 남아 있음을 알 수 있다. 이 상태에서 복합재 층은 인장응력 상태, 라이너는 압축 응력 상태에 있게 된다.

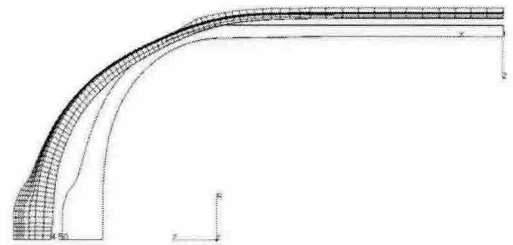


Fig. 2 Deformed shape under autofrettage pressure (35.7 MPa); 10 times magnified.

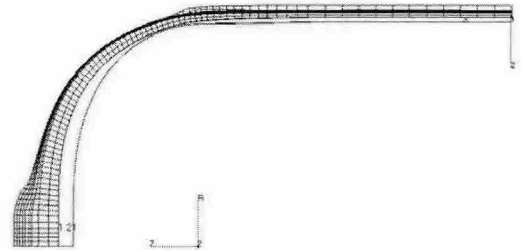


Fig. 3 Residual deformation after autofrettage at zero pressure; 10 times magnified.

Figure 4는 자긴압에서 라이너의 폰미세스 응력 분포를 나타낸 것인데, 실린더 부분은 항복응력 290 MPa를 넘어 완전히 항복되어 있으며 돔 부분도 너클부 아래까지 항복되어 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 자긴처리 후 영 압력 상태에서 압축 주응력 분포를 나타낸 것인데 모든 영역에서 압축응력 상태에 있어 자긴처리의 효과로 라이너에 충분한 압축응력이 유도되었음을 알 수 있다.



Fig. 4 Von-Mises stress distribution at autofretage pressure (35.7MPa).



Fig. 5 Minimum principal stress distribution at 0 pressure after autofretage.

Figure 6은 반복수명을 결정하는 사용압력에서 폰미세스 응력분포를 나타낸 것이다. 실린더에서 돔 쪽으로의 연결부를 바로 지난 너클부에서 최대응력 206 MPa이 발생하고 있어 압력 반복시험에서 이 부분이 가장 취약하며 라이너의 반복수명을 결정할 것으로 예측할 수 있다. 반면 실린더 부는 자진치리에 의해 발생한 높은 압축잔류응력의 효과로 60 MPa의 비교적 낮은 응력 수준을 보이고 있다.



Fig. 6 Von-Mises stress distribution at service pressure after autofretage.

### 3. 복합재 압력용기의 반복수명 예측 및 검증

#### 3.1 복합재 압력용기 반복수명 예측

유한요소 해석으로부터 반복시험 압력인 사용압에서 라이너의 너클부에 발생하는 최대응력이 복합재 압력용기의 피로수명임을 예측할 수 있으며 그 크기는 206 MPa 수준이었다.

라이너 재료의 피로 강도 데이터를 얻기 위해 라이너로부터 ASTM E8에 따라 도그본 형상의 쿠폰 시편을 절취하여 피로시험을 수행하였다.

시험 결과를 Fig. 7에 나타내었는데 응력과 사이클 수를 모두 로그 단위로 표현한 것이다. 알루미늄의 S-N 선도는 전형적으로 로그-로그 선도에서 선형으로 나타나며 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = m_1 N_f^{m_2} \quad (1)$$

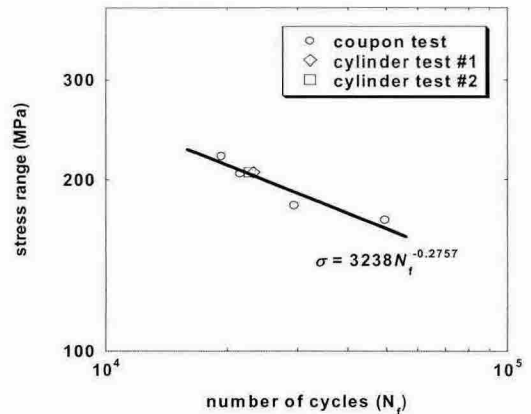


Fig. 7 Fatigue test results of liner coupon specimen.

쿠폰 시험에서 얻어진 라이너 재료의 S-N 선도 식 (1)에 최대응력 206 MPa을 대입하여 예측된 복합 용기의 반복수명은 21,854 cycles 이다.

#### 3.2 복합재 압력용기 반복시험

제작된 2개의 복합재 압력용기에 대해 반복시험을 수행하였다. 반복가압 조건은 020.7 MPa 사이의 압력을 분당 3회의 가압속도로 반복하였

다.

Figure 8은 압력 반복시험에 의해 복합재 압력 용기에 파손이 발생한 후에 파손모드를 보인 것이다. 너클부에서 라이너 균열에 의한 누출 모습을 보여주고 있는데 유한요소 해석에서 예측했던 위치와 잘 일치하고 있다. 결과의 반복 수명은 Table 1와 같다. 전절에서 유한요소 해석과 라이너 재료의 S-N 선도를 이용하여 예측된 수명과 매우 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Pressure cycling test results of composite cylinders

Test article	Number of cycles to failure	Failure mode
cylinder #1	23,264	leak around knuckle
cylinder #2	22,720	leak around knuckle

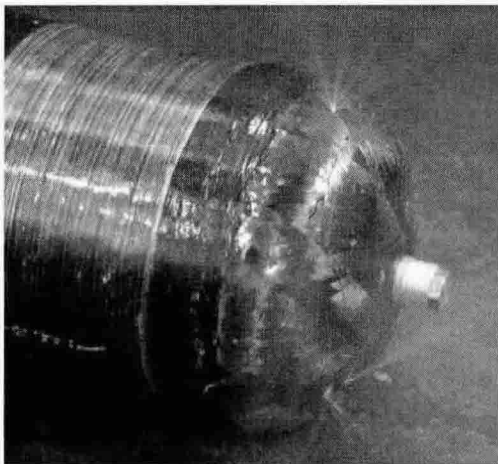


Fig. 8 Leak around knuckle part after failure by pressure cycling test of composite cylinders.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속재 라이너를 갖는 복합재 압력용기의 반복 수명을 결정하는 금속재 라이너의 응력 거동을 정확히 예측할 수 있는 유한요소 해석기법과 라이너 재료에 대한 S-N 선도로부터 복합재 압력용기의 반복수명을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 그 타당성을 복합재 압력용기에 대한 압력반복시험을 통해 입증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 복합재 압력용기의 반복수명에 결정적인 영향을 미치는 라이너의 응력 거동은 3차원유한요소 모델링 기법과 경로의존적 증분 해석 절차를 도입하여 정확히 예측할 수 있었다.
- 2) 유한요소해석을 통해 얻은 라이너의 폰미세스 응력 분포와 라이너 재료에 대한 단순인장 피로 시험에서 얻어진 피로강도로부터 복합재 압력용기의 반복수명과 파손모드를 정확히 예측할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C 프론티어 사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) B. S. Kim et al, "Developing of Composite CNG pressure Vessels," ICCM-11, Intl Conf. on Composite Materials, Gold Coast, Australia, July 14-18, 1997, pp. 401-418
- (2) D. E. James and A. Y. James, "Graphite Epoxy Pressure Vessel Dome Reinforcement Study," 32nd International SAMPE Symposium, April, 1987.
- (3) Mohammad Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner," Composite Structure, Vol.49,2000, pp.247-255.
- (4) 박지상, 김태욱, 정제한 "대체연료 차량용 Type3 복합재 압력용기 개발 및 인증," 한국 수소 및 신에너지 학회 2004 추계학술대회, 2004. 10
- (9) J. De Carvalho, M. Lossie, D. Vandepitte and H. Van Brussel, "Optimization of Filament-Wound part Based on Non-geodesic Winding," Composites Manufacturing, Vol.6, No.2, 1995, pp.79-84.