

## 論文

## 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 구조 수명 평가

황태경<sup>\*\*\*</sup>, 박재범<sup>\*</sup>, 김형근<sup>\*</sup>, 도영대<sup>\*</sup>

## Evaluation of Service Life for a Filament Wound Composite Pressure Vessel

Tae-Kyung Hwang<sup>\*\*\*</sup>, Jae-Byum Park<sup>\*</sup>, Hyoung-Geun Kim<sup>\*</sup>, Young-Dae Doh<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

In this paper, the effect of the natural aging on the strength distribution and structural service life of a Filament Wound (FW) composite pressure vessel was studied. The fiber failure strain, which is varied significantly, was considered as the design random variable and the strength analysis was carried out by probabilistic numerical approach. The progressive failure analysis technique and the First Order Reliability Method (FORM) were embedded in this numerical model. As the calculation results, the probability of failure was obtained for each aging time steps and it is found that the strength degradation in FW composite pressure vessel, due to the natural aging, appears within 10 year-aging-time. As an example of the life prediction under natural aging using arbitrary laminated model, the service lifetime of 13 years was predicted based on the probability of failure of 2.5% and the design pressure of 3,250 psi.

## 초 록

본 논문에서는 자연 노화가 필라멘트 와인딩으로 제작된 압력용기의 강도 분포와 구조 사용 수명에 미치는 영향을 연구하였다. 자연 노화에 따라 변화되는 섬유 방향 파괴 변형률을 설계 확률 변수로 하는 확률 강도 해석을 수행하였다. 이때 확률 강도 해석은 정확한 파열 압력을 예측하기 위해 연속 파손 모드가 고려되었고, 비선형 한계식의 해를 구하기 위해 FORM 방법이 이용되었다. 해석을 통해 노화 시간별 파괴 확률 분포 선도를 구하였다. 복합재 구조물의 특성상 재료 물성 및 제작 공정 변수 영향으로 제품의 성능 변동성이 비교적 크게 나타났고, 노화로 인한 압력용기의 파열 압력 저하 현상은 대부분 10년 이내에서 발생하였다. 임의 적층의 복합재 압력 용기를 모델로 하여 수명을 평가한 결과, 파괴 확률 2.5%와 안전율 1.3을 고려한 설계 압력 3,250psi기준으로 약 13년의 사용 수명이 평가되었다.

**Key Words** : 복합재압력용기(composite pressure vessel), 자연 노화(natural aging), 신뢰도(reliability), 사용수명(service life)

## 1. 서 론

섬유강화복합재(fiber reinforced composites)는 기존의 금속 소재에 비해 경량 설계가 가능하고, 설계의 유연성이 뛰어나 그 적용성이 날로 확대되고 있으나 구조 신뢰성(reliability)와 재현성(reproducibility) 그리고 장기 노화(long term aging) 특성 등의 문제점으로 그 적용성이 제한되어왔다. 이러한 문제점

중 신뢰성과 재현성은 엄격한 품질 관리 및 품질 보증 그리고 통계적 해석 기법[1-2]으로 대처하고 있다. 장기 노화 특성 문제인 경우, 사용 실시간 동안의 재료 물성 및 제품 성능의 변화 값을 필요로 하기 때문에 많은 시간과 경제적 비용이 소요 되어 대부분의 연구가 시편을 이용한 단 시간 가속 노화 방법을 이용하고 있다[3-8]. 그러나 이러한 시편을 이용한 가속노화 시험 방법은 공정 변수 영향이 큰 복합재 구조물과 시편간의

\* 국방과학연구소 기술연구본부 추진기관부

\*\*\* 국방과학연구소 기술연구본부 추진기관부 교신저자(E-mail:cais99@hanmail.net)

물성 차이문제와 가속 노화 시간과 실제 노화 시간간의 정량적인 관계 규명등의 문제점이 존재한다. 그러므로 이러한 가속 노화 시험결과들은 노화의 정성적인 특성 확인 및 다른 재료와의 상대적 비교자료로 이용될 수 있으나, 실 구조물의 사용 수명 평가 자료로는 이용이 어렵다. 그러나 실 구조물을 사용한 자연 노화 시험 연구 결과는 많은 비용과 시간이 소요되고, 자체 보안문제로 발표된 연구 자료는 많지 않다[9-12]. 복합재 압력용기를 이용한 연구로서 Faddoul [10]은 S-글라스로 제작된 5.6 인치 고압 압력 용기를 옥내와 옥외에서 10년간 자연 노화 시험을 실시 후 파열 시험을 통해 환경 노화 영향을 평가하여, 10년 옥외 노화된 경우 약 28%, 옥내 노화된 경우 약 11%의 파열 압력이 저하된다는 결과를 제시하였으나, 노화 시간 별 시험 수량이 제한되어 복합재의 성능 변동성을 확인할 수 없었고 단지 평균 값 개념으로 노화율을 평가하였다. Babel[11]은 제품의 성능 변동성을 고려하기 위해 여러 개의 3.5 인치 직경의 그라파이트/에폭시 압력 용기의 내압 시험을 수행하여 2-파라미터 와이불 함수(Weibull function)로 사용 수명을 예측하였으나, 실제 노화 시간은 약 1년간만 진행하였고 이후 물성은 관련 문헌과 스트랜드(strand) 시험 결과를 이용하여 와이불 형상 파라미터 (shape parameter)와 척도 파라미터 (scale parameter)를 추정하여 사용하였다. 이를 이용하여 30년 생존 확률을 추정하였으나, 장기 노화 물성을 문헌과 시편 시험을 통해 예측, 적용함으로써 실제 제품의 수명평가로 보기에 다소 문제가 있는 것으로 판단된다. 그러므로 국방과학연구소에서는 신뢰성있는 복합재 연소관의 노화 특성과 사용 수명 평가를 위해 실물 연소관을 이용하여 15년간의 장기 자연 노화 시험을 실시하고, 성능의 변동성을 고려하기 위해 각 노화 시간 별로 15개 이상의 내압 파괴 시험을 실시하여 40년 이상의 섬유 파손 변형률 값의 와이불 함수를 예측하였다[13]. 본 논문은 복합재 압력용기의 노화 특성 연구의 두 번째 단계로서, 이러한 실 구조물의 노화 시간별 섬유 파손 변형률 분포를 설계확률변수(design random variable)로 이용하는 확률 강도 해석을 수행하여 노화 시험의 궁극적인 목적인 제품의 구조 사용 수명을 평가하였다.

## 2. 수명 평가 기법 및 자연 노화 시험 결과

복합재 압력 용기의 노화 특성 및 사용 수명 평가를 위한 방법은 Fig. 1과 같이 3가지 방법으로 가능하다. 노화 시험을 통해 적용 소재나 구조물의 노화 특성을 구한 후, 이 값들을 이용한 확률 강도 해석 결과인 시간별 성능 분포 선도를 통해 제품의 사용 수명을 확률적으로 구하게 된다. 그림에서 보듯이 환경 노화 방법으로 실제 조건인 자연 노화 시험 방법과 단시간에 수행하는 가속 노화 시험 방법이 있고, 적용 시료로 구분하여 실제 제품 적용 방법과 시편 적용 방법이 있다. 이때 시편을 이용하는 가속노화 시험 방법은 단 시간에 시편을

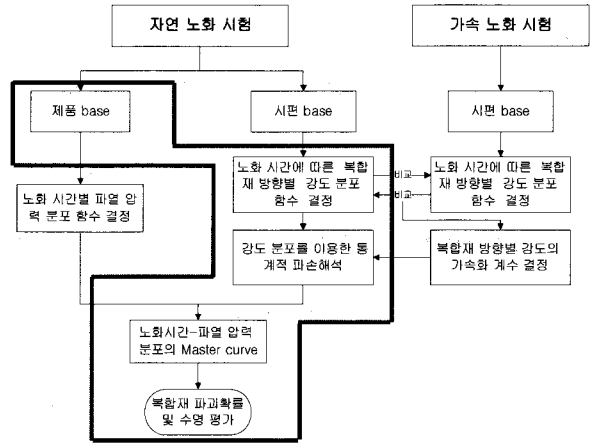


Fig. 1 Evaluation procedure to predict the service life of composite pressure vessel.

노화시킬 수 있다는 장점이 있지만, 실시간과의 관계를 나타내는 가속화 계수(acceleration factor)를 구하기 위한 자연 노화 시험 결과가 필요하고, 제품과의 물성 차이로 인해 신뢰성 있는 결과를 제시하는데 문제점을 갖는다. 반면에 실제 제품을 적용하는 자연 노화 시험의 경우가 가장 정확한 노화 특성 결과를 제시하지만, 복합재의 성능 변동성을 고려하기 위해 각 시험 주기별로 많은 시료가 필요하기 때문에 시간 및 경제적으로 많은 비용이 소요되는 단점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Fig. 1의 굵은 선과 같이 제품의 자연 노화 시험을 수행 후 제품으로부터 많은 시편을 채취하는 방법을 이용하였다.

즉 실제 연소관을 자연 노화 시험 시킨 후, 연소관으로부터 여러 개의 링 시편을 채취하여 내압 성능을 확인하는 방법을 적용하였다. 이와 같이 제품으로부터 여러 개의 시편을 채취하고 시험하여 복합재 압력 용기의 성능 변동성 분포를 구한 후, 이를 이용한 확률강도 해석을 통해 압력 용기의 사용 수명을 예측하였다. 본 노화 시험에 이용된 압력용기는 외경이 165.0(mm)이고 길이는 1,235.0(mm) 그리고 4.0(mm)의 두께를 가지며 소재, 제작 공정 및 시험 평가는 참고문헌[13]에 상세히 수록되어있다. 본 압력 용기가 저장 조건이 실내 창고 보관이므로, 실내에서 15년간 보관 후 시험에 적용하여 Fig. 2와 같이 노화 시간 별 섬유 인장 강도 분포를 구하였다. 각 노화 조건별 섬유 인장 파손 변형률 값들은 MIL-HDBK-17[14]에 따라 분포 함수 적합도 검사(goodness of fit test)를 수행하여 최적의 분포 함수값으로 변환되었다. 설계 확률 변수 값들의 분포 함수 적합도 검사를 통해 5% 유의 수준 내에서 최적의 분포 함수값을 찾게 된다. 모두 3가지 분포 함수 검사(정규 분포 함수(Normal), 와이불 분포함수(Weibull), 로그 정규 분포함수(Log-normal))를 거치게 되는데, 적합도 검사 결과 후프 링 시험 자료 모두가 5% 유의 수준에서 3가지 분포 함수를 만족하는 것으로 나타났다.

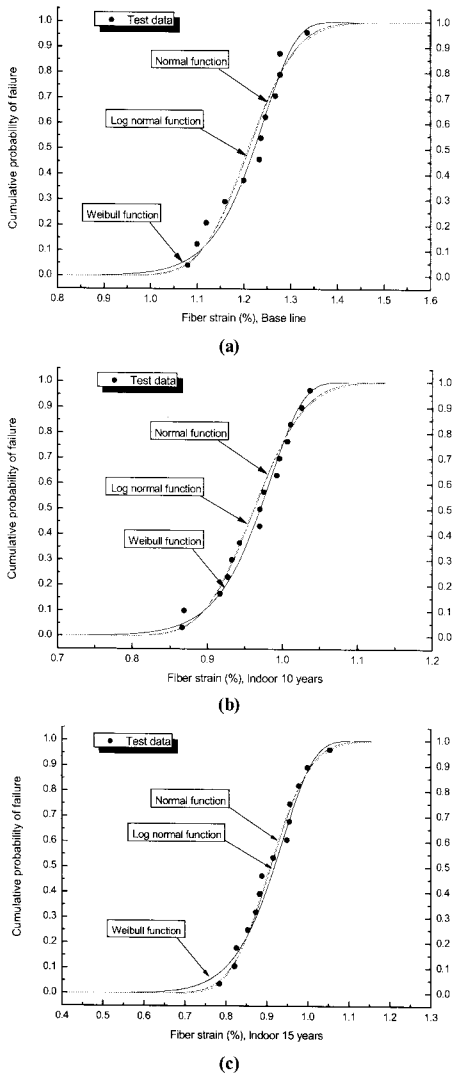


Fig. 2 Comparison of predicted cumulative distribution function and test data for fiber failure strain: (a) baseline specimens; (b) 10-year aged specimens ; (c) 15-year aged specimens.

Table 1 Weibull coefficients of fiber failure strain measured from natural aged specimens

	Shape Parameter ( $\alpha$ )	Scale parameter ( $\beta$ , %)	비 고
Present	19.0	1.18	2006 제작
실내 5년	Failure strain=1.0%		1조 수압 파열시험
실내 10년	23.0	0.986	-
실내 15년	13.5	0.944	-

Fig. 2는 각 노화 조건별 섬유 방향 파손 변형률 값과 예측된 3가지 분포함수를 비교한 것으로, 그림에서 보듯이 좋은

일치를 보이고 있다. 해석의 편의상 와이블 함수를 시험 분포 값으로 선택하여 Table 1에 정리하였다. Table 1의 실내 5년 노화 시험 결과는 시험 당시(2000년)에 후프 링 시험 장치가 없던 관계로 노화된 연소관의 수압 파괴시험으로부터 구한 섬유 방향 파손 변형률 값이다.

### 3. 구조 수명 평가

노화 시간이 증가함에 따라 연소관의 성능이 저하되어 시스템에서 요구하는 구조 안전율보다 낮은 안전율을 보일 때의 노화 시간을 구조 수명이라 정의하였다. 본 논문의 복합재 압력용기는 확률적 개념으로 시스템 요구 구조 안전율인 1.3 (압력기준: 3,250psi)보다 낮아질 확률이 2.5% 보다 클 때의 노화 시간을 구조 수명으로 설정하였다. 이때 2.5%는 100개를 시험했을 경우 약 2.5개정도가 3,250psi이하에서 파열될 확률로서 초기 설계 요구조건으로 정의된 값이다. Fig. 3은 복합재 압력용기의 원통부(cylinder) 내압 파열 압력(내압신뢰도)에 영향을 미치는 인자를 찾기 위해 수행된 설계 확률 변수의 설계 민감도 해석 결과[15]로서, 그림에서 보듯이 후프 층 두께와 섬유 인장 강도가 복합재 압력 용기의 구조 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 반면 수지관련 물성의 영향은 미미함을 볼 수 있다. 이러한 이유로 노화 시험으로부터 구한 섬유 파손 변형률 분포 값을 섬유 인장 강도로 전환하여 확률 변수로 이용하였고, 후프층 적층 두께는 균일하다는 가정으로 무시하였다. 나머지 물성 값들은 상온 물성 값을 적용하여 복합재 압력 용기의 구조 신뢰도 및 사용 수명을 예측하였다. Fig. 3에서  $t_{helical}$ ,  $t_{hoop}$ 은 각각 헬리컬층과 후프 층의 적층 두께이고,  $X_T$ ,  $Y_T$ ,  $S$ 는 복합재의 섬유 방향, 섬유 횡 방향 그리고 평면 내 전단 강도를 나타낸다.

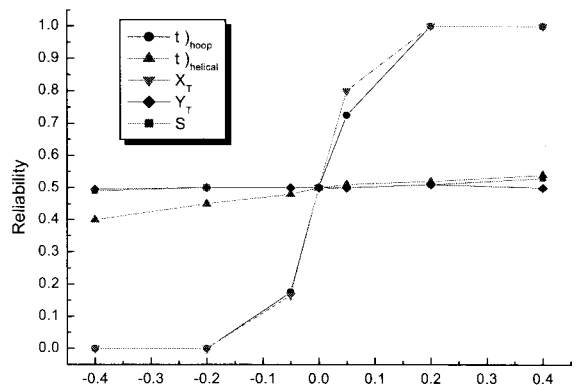


Fig. 3 The variation of reliability for the changing of design random variables [15].

3.1 구조 신뢰도 평가 절차

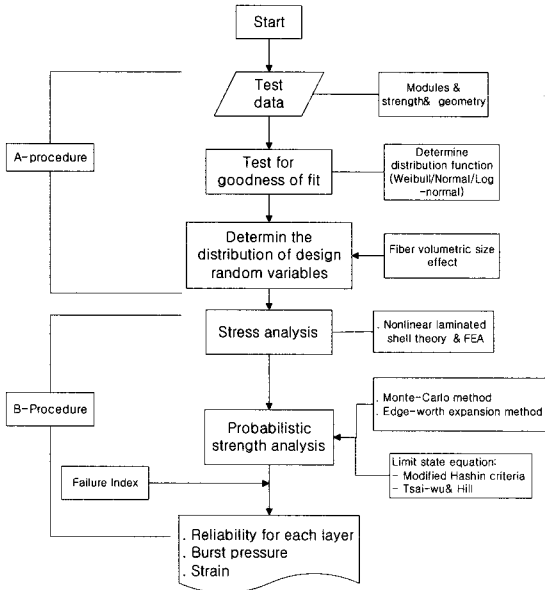


Fig. 4 Flow chart for the probabilistic strength analysis of composite pressure vessel.

Fig. 4는 복합재 연소관 구조 신뢰도 예측 순서도로서, 크게 나누어서 A와 B part로 나누어 볼 수 있다. A part는 시험을 통해 구한 설계 확률 변수 값 들을 확률 강도 해석 입력 값으로 적용하기 위해 통계적 분포 함수로 전환하는 것으로 이러한 절차는 MIL-HDBK-17E에 따라 5% 유의 수준에 의해 적합도 검사가 수행된다. B part는 A part에서 구한 통계적 분포함수를 입력 값을 이용하여 압력 용기의 내압 확률 강도 해석을 수행하여 최종적으로 내압 구조 신뢰도 값을 구하게 된다. Fig. 5는 연소관의 내압확률 강도 해석 순서도로서 응력 해석과 파괴 확률 해석으로 구성되어있다. 본 논문에 적용한 설계 확률 변수는 노화된 연소관으로부터 구한 섬유 방향 파손 변형률 값으로 섬유 방향 인장 강도 값으로 변환되어 적용하였다. 확률 강도 해석법으로는 효율성과 정확성이 뛰어난 FORM(First Order Reliability Method) 방법이 이용되었다. 그리고 파손 판정식은 복합재의 각 방향별 파손성을 잘 구현하는 Modified Hashin criteria이 이용되었고, 파손 후 파손 관련 물성을 저하시키는 방법으로 연속 파손 해석을 수행하였다.

3.2 파손 해석 및 구조 신뢰도 해석

• 파손 해석

적용한 파손 판정식은 Chang[16]에 의해 제안된 개선형 Hashin 파손 판정식으로서 식 (1)-(2)에 보듯이 복합재의 각

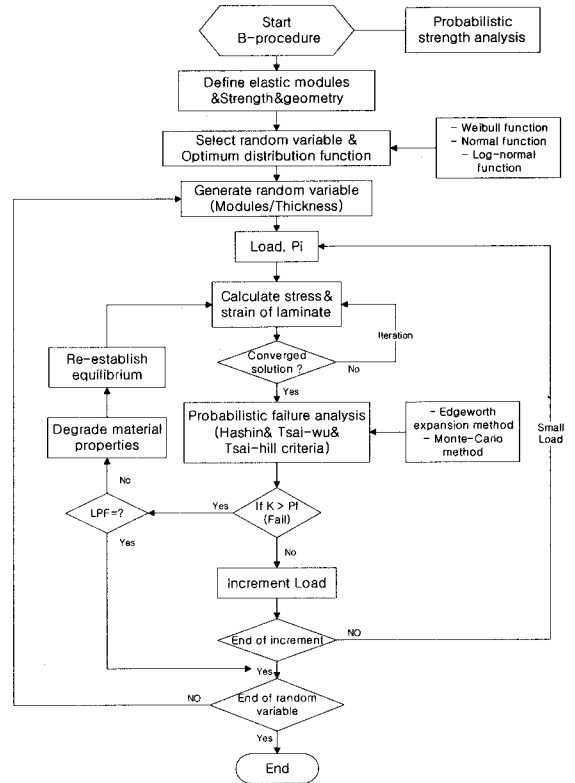


Fig. 5 Flow chart to determine the reliability of the composite pressure vessel.

방향 별, 하중 종류 별 파손 판정이 가능하여, 그에 따른 적합한 강성 저하 입력이 가능하다.

1) 수지 균열

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha^o \cdot \tau_{12}^4, \quad \text{When } \sigma_2 > 0$$

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha^o \cdot \tau_{12}^4, \quad \text{When } \sigma_2 < 0 \quad (1)$$

2) 섬유 및 섬유 계면 파괴

$$e_{fs}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha^o \cdot \tau_{12}^4, \quad \text{When } \sigma_1 > 0$$

$$e_{f_b}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha^0 \cdot \tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha^0 \cdot S_{12}^4}, \quad \text{When } \sigma_1 < 0 \quad (2)$$

if  $\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2$  or  $\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1.0 \rightarrow$  섬유 파손

( $X_b, X_c, Y_b, Y_c$  : 일 방향 복합 적층판의 섬유 방향 인장 및 압축 강도, 횡 방향의 인장 압축 강도,  $S_{12}$ : 평면 내 전단 강도)

이상과 같은 각 방향 별 파손에 따른 관련 물성의 저하는 식 (3)-(4)와 같이 부여하는데, 각 하중 단계에서 발생한 파손은 순간적인 파손 관련 응력 성분의 저하를 유발한다. 특히 섬유 관련 강성 저하는 섬유 다발(Strand) 인장 강도의 통계 분포 값을 이용한 하중 증가에 따른 점진적 강성 저하 현상을 고려하였다.

1) 수지균열

$$E_2 = \nu_{12} = \nu_{23} = G_{23} = 0 \quad (3)$$

2) 섬유 및 섬유 계면 파괴

$$\nu_{12} = \nu_{23} = G_{12} = 0, \quad \begin{aligned} \frac{E_{11}^d}{E_{11}} &= \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{11}}{\beta_0}\right)^\alpha\right] \\ \frac{G_{12}^d}{G_{12}} &= \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{11}}{\beta_0}\right)^\alpha\right] \end{aligned} \quad (4)$$

( $E_b, E_2, V_{ij}$ : 일 방향 복합재의 섬유 방향과 횡 방향 탄성 계수, 포와송 비,  $\alpha, \beta_0$ : 섬유 다발 시편의 인장 강도 웨이블(Weibull) 형상 및 척도 파라미터)

• 구조 신뢰도 해석

노화 시간별 섬유 강도 분포 값들을 설계확률변수로 하고 파손 판정식을 한계식(limit state equation) 으로서 구조 신뢰도를 FORM으로 구하였다. Fig. 6에서 보듯이 신뢰지수(reliability index),  $\beta$ 는 원점에서 표준 정규분포로 표현된 파손 한계식까지의 최소 거리로 나타나고, 이때의 구조 신뢰도 값은  $R = \Phi(\beta)$ 로 구해진다. 여기서  $\Phi$ 는 표준 누적 정규 분포 함수를 나타낸다. 이때 신뢰도 지수 값은 식 (1)과 같이 표준 정규 분포 공간내의 최적화 문제의 해(solution)로 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \beta &= \sqrt{U^T U} \\ \text{Subject to } g(U) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

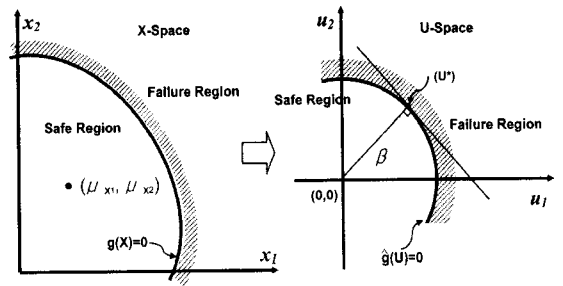


Fig. 6 Mapping of failure surface from X-space to U-space.

비선형 한계식인 경우, (5)식으로부터 최단 거리 지점인  $U^*$ 를 찾기가 쉽지 않다. 이를 위해 여러 가지 방법이 제안되고 있으나, 본 논문에서는 비선형 한계식에 대해서도 비교적 간단하고 빠른 시간 내에 정확한 결과를 제시하는 HL-RF method [17]를 적용하였다. 본 방법에 대한 신뢰성은 약 10,000회 발생 변수를 가진 몬테카를로(Monte-Carlo)방법과의 비교를 통해 입증하였다. 파손 한계식을 식 (6)과 같이 표준정규분포 변수로 변경 후, 구하고자하는 설계점(design point) 기준으로 Taylor 급수로 전개 후 first order 항목을 이용한다. 이때 각 변수 값들은 상호 독립적이어야 한다.

$$\begin{aligned} g(X) = 0 &\rightarrow g(U) = g(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n) = 0 \\ g(U) &\approx g(U^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(U^*)}{\partial u_i} (u_i - u_i^*) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 g(U^*)}{\partial^2 u_i} (u_i - u_i^*)^2 \\ &+ \dots \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식을 이용하여, 한계함수의 첫 번째와 2번째 모멘트 값과 방향 벡터를 구하여 식 (7)의 새로운 설계 점을 찾는 과정을 신뢰도 지수 값,  $\beta$ ,이 수렴될 때까지 수행한다.

$$U_{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(U_k)|^2} [\nabla g(U_k) U_k - g(U_k)] \nabla g(U_k)^T \quad (7)$$

이때 섬유 및 섬유 계면 파손인 경우, 파손식을 한계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g(X_i, S) &= 0 \\ g(X_i, S) &= X_i^2 (\tau_{12}^2 + 1.5\alpha^0 \tau_{12}^4 G_{12} - S^2 - 1.5\alpha^0 S^4 G_{12}) \\ &+ \sigma_1^2 (S^2 + 1.5\alpha^0 S^4 G_{12}) \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 연속 파손 해석을 위해 수지 관련 파괴는 파괴 확률이 0.5이상인 경우, 파괴로 규정하고 관련 물성을 저하시키고, 섬유 계면 관련 파괴는 식 (4)와 같이 와이بل 함수에 따라 관련

물성을 점진적으로 저하시켰다. 최종적으로 가장 높은 섬유 파괴 확률 값을 구조 파괴 확률로 선정하여 구조 신뢰도를 결정하였다.

### 3.3 구조 수명 평가

Kamal 식[4]에 의해 물성이나 성능의 노화는 노화 시간의 지수 함수에 비례하여 변화된다고 알려져 있으며 실제로 여러 노화 시험 결과[5,7]에서 증명이 되었고, 특히 대형 복합재 연소관인 Peacekeeper(미)의 파열 압력과 노화시험 간에도 지수 관계가 성립한다고 보고되고 있다[12]. 즉 성능 저하와 노화 시간의 로그(log) 스케일 간에는 선형 관계가 존재하므로, 이를 이용하여 연소관의 노화 초기 파열 압력을 추정하여 연소관 구조 신뢰도 예측에 사용하였다. 이와 같은 섬유 방향 강도 분포를 설계 확률 변수로 이용하여 다음과 같은 적층 구조를 갖는 복합재 압력용기를 수명 평가 모델로하여 구조 사용 수명을 예측하였다.

T800/Epoxy
$[(\pm 18)_3 / 90_2 / (\pm 55)_2 / 90_4]_r$
$t_{18} = 1.48(mm), t_{55} = 0.67(mm), t_{90} = 1.028(mm)$
Design pressure: 3,250 psi

Fig. 7은 성능과 노화 시간의 지수 관계식으로부터 구한 환경 노화 시간의 로그 스케일과 실제 노화 파손 변형률간의 선형관계식으로, 5년 노화 결과는 연소관 1개의 파열 시험 결과로부터 구한 것이다. Fig. 7의 선형 식으로부터 연소관 노화 초기의 척도 파라미터(scale parameter)를 구하여 Fig. 8과 같은 노화 시간별 와이블 척도 파라미터 선도로 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 노화의 대부분은 10년 이내에 발생하고 이후에는 수렴하는 현상을 나타내고 있다. 이때 형상 파라미터는 15년 이후는 13.5를 적용하였고, 15년 이내는 20.0을 적용하였다. 이와 같은 척도 파라미터의 변화 값과 형상 파라미터를 이용하여 연속 파손 모드를 고려한 확률 강도 해석을 수행하였다. 이때 나머지 물성은 연소관 파열 압력에 큰 영향을 미치지 않으므로 Table 2와 같이 시편 시험으로부터 구한 노화 전(前) 재료 물성을 이용하였다. 또한 파손 해석에 적용하기 위해 섬유 방향 파손 변형률의 와이블 척도 파라미터 값에 탄성 계수 값을 곱하여 Table 2와 같이 섬유 방향 인장 강도의 척도 파라미터를 구하였다. 이때 강도 값 분포는 와이블 함수를 따르지만, Fig. 2의 시험결과에서 보듯이 정규 분포 함수도 만족하므로 식 (9)를 이용하여 노화 시간별 강도 분포를 정규 분포로 전환하여 FORM 신뢰도 해석에 적용하였다. 식에서  $\mu_i$ 와  $s_i$ 는 평균값과 표준편차를 나타내고,  $\Gamma$ 는 감마함수(gamma function)을 의미한다.

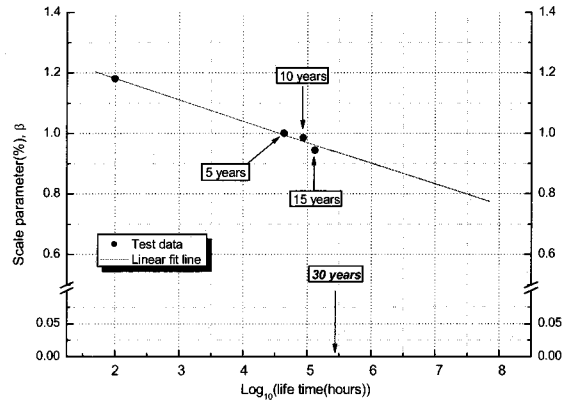


Fig. 7 Log scale plot of Weibull scale parameter and aging time for fiber failure strain.

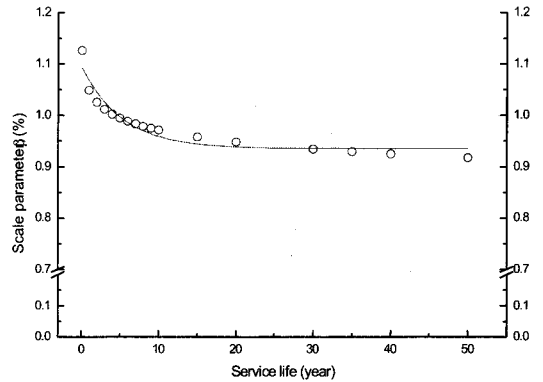


Fig. 8 Predicted Weibull scale parameter for fiber failure strain according to the increase of service life.

$$\mu_i = \beta_i \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_i}\right), s_i^2 = \beta_i^2 \cdot \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha_i}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha_i}\right)\right) \quad (9)$$

Fig. 9는 노화 전 강도의 평균값을 적용한 전형적인 연속 파손 해석 결과로서, 그림에서 보듯이 내압 하중에 대한 연소관 원통부의 연속 파손 거동을 잘 구현하고 있다. 내압 초기에 내부 헬리컬 층의 수지 균열로 시작하여 최종적으로 후프 층 섬유 파손으로 연소관 파괴가 발생한다.

Fig. 10은 노화 전 연소관의 내압 누적 파괴 확률 선도로서 파열 압력은 약 4000psi부터 5700psi까지 발생 가능하며, 확률적으로 가장 빈번한 파괴가 발생 할 수 있는 50% 파괴 확률의 압력은 약 5,100psi를 나타내고 있다. 이러한 파괴 압력의 분포는 대부분 섬유 인장 강도 분포에 의해 결정된다. 이와 같이 확률 강도 해석을 각 노화 시간 별 (현재, 5년, 10년, 15년, 30년, 40년)로 수행하여 Fig. 11과 같이 노화 시간별 파열 압력 분포를 나타내는 마스터 선도를 구하였다. 즉 노화 시간별 파열 압력 분포의 마스터 선도가 결정되면 복합

재 압력 용기의 사용 수명 및 노화 시간 별 파열 압력 변화를 정량적으로 결정할 수 있게 된다. Fig. 11에서 보면 노화 시간별 파열 압력의 확률 밀도 함수(probability density function) 값이 결정되어, 설계자 주관으로 1.96σ 값을 기준으로 설정하였다. 1.96σ은 one-side 관점에서 약 2.5% 발생 확률 값으로서 low bound에서 97.5%의 구조 신뢰성을 나타낸다. 즉 임의 압력에서 100개의 내압 시험을 할 경우 약 2.5개가 깨질 확률을 의미한다. 그리고 기준 압력은 설계 압력으로서 예상 최대 작동 압력(MEOP)의 1.3배인 3,120psi의 압력을 적용하였다. 이와 같이 설계 요구 파괴 확률과 설계 압력이 결정되면 Fig. 11에 의해 연소관 사용 수명이 결정된다. 그림에서 보듯이 설계 압력과 마주치는 1.96σ의 파열 압력 선도 위치가 사용 수명으로서 약 13년을 나타내고 있다. 이러한 사용 수명은 확률적이며로서 실제 사용 수명과는 다소 차이가 존재할 수 있다. 즉 설계 압력에 이미 1.3의 안전율이 부여되어있고, 파괴 확률 범위인 2.5% 값도 인위적이지만 구조 안전 설계 측면에서 설계 기준 값으로 사용 가능하다. 이러한 통계적 수명 예측 법은 실제 발생 가능한 확률 값을 제시하기 때문에 보다 안전하고 우수한 성능의 연소관 개발에 필수적이라고 할 수 있다.

Table 2 Weibull coefficients of FRP for each directional strength

Unit: MPa,	Shape parameter (α)	Scale parameter (β)	No. of specimen
X <sub>T</sub>	20/13	$\sigma_f \beta \rightarrow \text{value} \times E_1$	Hoop ring
X <sub>C</sub>	13.42	770.8	29
Y <sub>T</sub>	15.89	43.1	30
Y <sub>C</sub>	46.0	164.6	29
S <sub>LT</sub>	21.6	93.2	29

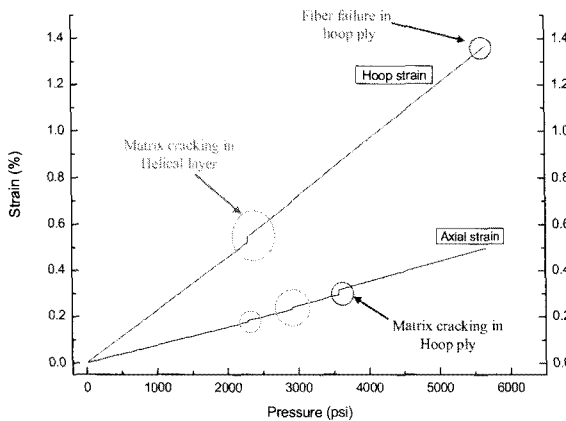


Fig. 9 Conventional hoop and axial strain curve for inner pressure loading.

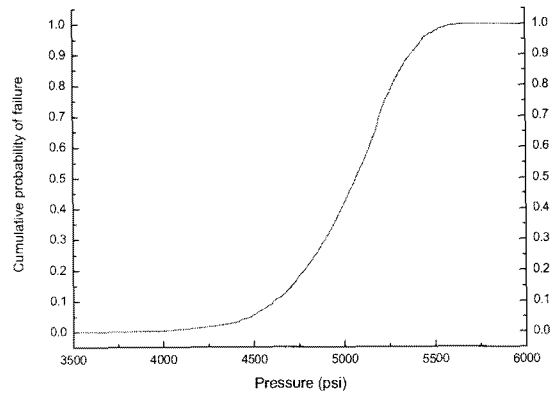


Fig. 10 The cumulative distribution function of the probability of failure for non-aged pressure vessel.

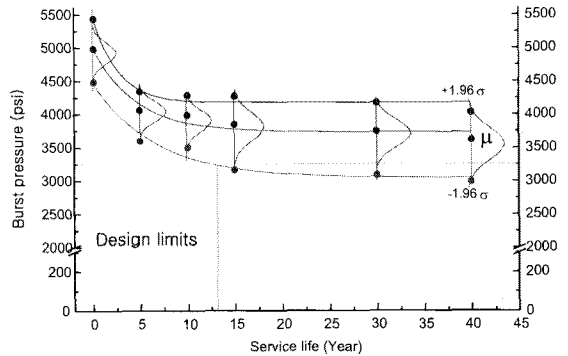


Fig. 11 Master curve of probabilistic density function of burst pressure and service life.

#### 4. 결론

카본 에폭시로 제작된 복합재 연소관의 구조 사용 수명 평가를 위해 실내에서 15년간 자연 노화 시험을 실시하고, 수압 파괴 시험을 통해 구한 노화 시간별 섬유 강도 분포 값을 설계 확률 변수로 이용하는 확률 강도 해석을 수행하였다. 해석을 통해 노화 시간별 파열 압력 분포를 구하고, 이를 이용하여 적용 복합재 압력용기의 사용 수명을 평가하였다. 재료 노화로 인한 파열 압력 저하 현상은 대부분 노화 10년 이내에 발생하였고 평가 모델인 임의의 복합재 용기의 사용 수명을 평가한 결과, 파괴 확률 2.5%, 설계 압력 3,250psi 기준으로 약 13년의 사용 수명이 예측되었다. 섬유 강화 복합재 압력용기의 경우 재료 물성 및 제작 공정 변수의 영향으로 제품 성능의 변동성이 비교적 크게 나타나므로 안전하고 성능이 우수한 제품 개발을 위해서는 신뢰성 있는 사용 수명 평가 연구가 필수적인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 1) C. Chamis, "Probabilistic Composite Mechanics Assurance for Better Cheaper Faster Products," *AIAA-98-1939*, 1998.
- 2) L. Minnetyan and C. Chamis, "Design of Composite Structures with Uncertainties," *AIAA-2002-1475*, 2002.
- 3) J. Kerr and J. Haskins, "Effect of 50,000 Hours of Thermal Aging on Graphite/Epoxy and Graphite/Polymid Composites," *AIAA-82-0657*, 1982, pp. 101-108
- 4) 서울대학교 부속 농업개발연구소, "Environmental Effects on the Carbon Fiber/Epoxy Composite," *한국화이버 용역보고서*, 1986.
- 5) J. F. Wlodarski, G. Pergantis, J. Mulkern and D. Kleinmeyer, "Environmental Effects on the Durability of Filament Wound Composite Structures," *AIAA-96-2639*, July 1-3, 1996, pp. 1-12.
- 6) 홍성혁, 신광복, 정발, 황태경, 김종식, 김천근, 홍창선, "가속노화 시험을 이용한 복합재료의 환경 영향에 대한 장시간 성능 예측," *한국복합재료학회지*, 11권, 5호, 1998, pp. 1-13.
- 7) 충남대학교 공과대학 산업기술연구소, "국산압력용기 시편의 가속 노화 환경시험," *한국화이버 용역보고서*, 2000.
- 8) M. Taylor and Y. Lin, "Aging Effects on the Interlaminar Shear Strength of High Performance Composites," *Journal of Aircraft*, Sept.-Octo. Vol. 40, No. 5, 2003, pp. 971-976.
- 9) R. Trabocco and M. Stander, "Effect of Natural Weathering on the Mechanical Properties of Graphite/Epoxy Composite Materials," *ASTM STP 602*, 1975, pp. 67-84.
- 10) J. Faddoul, "Ten Year Environmental Test of Glass Fiber/Epoxy Pressure Vessels," *AIAA-85-1198*, 1985, pp. 1-9.
- 11) H. Babel, B. Vickers and D. Thomas, "Sustained Load Behavior of Graphite/Epoxy Metal-Lined Pressure Vessels for Long-Life Space Applications," *AIAA-89-2644*, 1989, pp. 1-8.
- 12) Aging and Surveillance (A&S) Program for Peacekeeper Stage I, Morton Thiokol, Inc., 1997.
- 13) 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, "자연 노화에 따른 카본 에폭시 압력 용기의 섬유 인장 강도 변화," *한국복합재료 학회지*, 20권, 2호, 2007, pp.1-9.
- 14) Composite Materials Handbook, Volumel. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, *MIL-HDBK-17-1F*, June, 2002.
- 15) Tae-Kyung Hwang, Chang-Sun Hong and Chun-Gon Kim, "Probabilistic Deformation and Strength Prediction for a Filament Wound Pressure Vessel," *Composites Part B: engineering*, Vol.34, 2003, pp.481-497.
- 16) K. Y. Chang, S. Liu and F. K. Chang, "Damage Tolerance of Laminated Composites containing an Open Hole and Subjected to tensile Loadings," *Journal of Composite materials*, Vol.25, 1991, pp.274-300.
- 17) A. M. Hasofer and N. C. Lind, "Exact and Invariant Second-Moment Code Format," *Journal of the engineering Mechanics Division*, ASCE, 100(EM), 1974, pp. 111-121.