

# 멀티 스케일 접근법을 이용한 복합재 압력용기의 수명 예측

진교국<sup>1\*</sup>, 하성규<sup>1</sup>, 김재혁<sup>1</sup>, 한훈희<sup>1</sup>, 김성종<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교 기계공학과

## Life Prediction of Composite Pressure Vessels Using Multi-Scale Approach

Kyo-Kook Jin<sup>1\*</sup>, Sung-Kyu Ha<sup>1</sup>, Jae-Hyuk Kim<sup>1</sup>, Hoon-Hee Han<sup>1</sup>  
and Seong-Jong Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Hanyang University

**요약** 본 논문은 다축 하중을 받는 복합재 압력용기의 멀티 스케일 피로수명 예측 방법을 제시하였다. 멀티 스케일 접근법은 복합재료의 기본 구성재료인 섬유, 기지 및 섬유/기지 경계면의 거동으로부터 복합재 플라이, 적층판 및 구조물의 전체 거동을 예측한다. 멀티 스케일 피로수명은 거시적 응력 해석과 미시적 피로파손 해석을 통해 예측된다. 유한요소법을 이용하여 복합재 압력용기의 적층판에 가해지는 다축 피로하중을 구하며, 고전적층판이론을 이용하여 적층판의 플라이 응력을 계산하였다. 미소역학 모델을 이용하여 플라이 응력으로부터 각각 섬유, 기지 및 섬유/기지 경계면에 발생하는 응력을 계산하였다. 복합재 구성재료의 피로수명은 섬유에 대해서는 최대응력법을, 기지에 대해서는 등가응력법을, 섬유/기지 경계면에 대해서는 임계평면법을 사용하였다. 평균응력을 고려하기 위하여 수정된 Goodman 식을 적용하였다. 모든 피로하중에 의한 손상은 Miner 법칙을 이용하여 선형 누적이 되고, 이를 통해 최종 피로파손을 판단한다. 섬유와 기지의 물성값, 섬유체적비 및 와인딩 각도의 확률분포에 따른 복합재 압력용기의 피로수명 영향을 분석하기 위해 몬테카르로 시뮬레이션을 수행하였다.

**Abstract** A multi-scale fatigue life prediction methodology of composite pressure vessels subjected to multi-axial loading has been proposed in this paper. The multi-scale approach starts from the constituents, fiber, matrix and interface, leading to predict behavior of ply, laminates and eventually the composite structures. The multi-scale fatigue life prediction methodology is composed of two steps: macro stress analysis and micro mechanics of failure based on fatigue analysis. In the macro stress analysis, multi-axial fatigue loading acting at laminate is determined from finite element analysis of composite pressure vessel, and ply stresses are computed using a classical laminate theory. The micro stresses are calculated in each constituent from ply stresses using a micromechanical model. Three methods are employed in predicting fatigue life of each constituent, i.e. a maximum stress method for fiber, an equivalent stress method for multi-axially loaded matrix, and a critical plane method for the interface. A modified Goodman diagram is used to take into account the generic mean stresses. Damages from each loading cycle are accumulated using Miner's rule. Monte Carlo simulation has been performed to predict the overall fatigue life of a composite pressure vessel considering statistical distribution of material properties of each constituent, fiber volume fraction and manufacturing winding angle.

**Key Words** : Composite Pressure Vessel, Multi-Axial loading, Multi-Scale Approach, Fatigue Life, Monte Carlo Simulation

### 1. 서론

복합재료는 금속재료에 비해서 우수한 내부식성, 내피

로성 뿐 아니라 높은 비강도 및 비강성 특성으로 압력용기뿐 아니라 자동차, 항공기 분야 등 다양한 산업 현장에서 사용되고 있다.

\*교신저자 : 진교국(gogugi2@hanyang.ac.kr)

접수일 10년 07월 26일

수정일 10년 08월 19일

게재확정일 10년 09월 08일

복합재 구조물 파손은 피로하중에 의하여 유발되는 경우가 많아 구조물의 안전성과 신뢰도 확보를 위해서는 초기 설계 단계에서 피로하중에 대한 고려가 필수적이며, 각 구조물의 피로수명 평가가 요구된다. 금속 구조물의 피로 수명이론은 지금까지 많은 이론과 시험을 통해 그 신뢰성이 확보된 반면, 복합재료는 섬유 및 기지의 특성 및 제작 방법의 다양성으로 인해 정확한 수명을 예측할 수 있는 이론이 없다. 하지만 고압 복합재 압력용기와 같이 피로 하중을 받는 구조물에서는 반드시 피로수명을 고려한 설계가 이루어져야 한다.

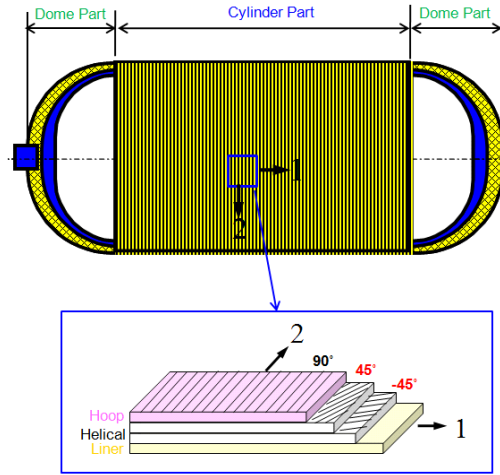
복합재료의 수명예측 이론 중 Miner[1]가 제시한 선형 손상누적모델은 시험 결과와 차이가 있으며, Sendechy[2]가 제시한 비선형 피해축적 모델은 특수한 조건의 시험결과를 바탕으로 만들어져 일반적인 복합재 구조물의 수명예측에 적용하기가 어렵다. Reifsnider[3]가 제시한 임계 요소(critical element) 관점을 이용한 비선형 피로수명 예측법은 복합재 적층판에 대하여 피로 파손의 시작부터 전이 과정뿐 아니라 최종 파괴 현상까지 설명이 가능하지만, 적층판들로 이루어진 전체 구조물의 피로수명은 예측이 불가능하다. Hiimel[4]의 실험정보를 바탕으로 하는 피로수명 예측법은 모든 경우의 복합재료 피로실험 정보가 없는 이상 일반화된 이론으로 사용하기가 어렵다.

본 논문에서는 복합재 구조물에 관한 멀티 스케일 피로수명 예측 방법을 제시하여 복합재 압력용기의 피로수명을 평가하고자 한다. 통계 프로그램을 이용하여 복합재 섬유와 기지의 물성값, 섬유체적비 및 와인딩 각도의 편차에 따른 복합재 압력용기의 피로 수명에 미치는 영향을 분석하고, 몬테카르로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 수행하여 압력용기의 피로수명에 대한 신뢰성 평가를 하고자 한다.

## 2. 연구 내용

복합재 압력용기는 그림 1과 같이 실린더와 돔부분으로 이루어져 있으며, 실린더 부분의 적층각은 돔부분을 감을 수 있는 헬리컬(helical) 각도와 실제 내압을 견딜 수 있도록 후프(hoop) 각도의 적층판으로 이루어져 있다. 표 1은 복합재 압력용기 실린더 부분의 직경과 적층판 두께를 나타낸다. 이 중 실린더 부분의 두께는 ISO[5] 규격에 명시된 파열 압력(burst pressure) 실험의 조건(섬유의 강도비(0.9) < 1)을 만족하는 압력인 60bar 정적 하중에서 설계되었다. 표 2는 각각 복합재 압력용기 실린더 부분의 복합재 구성재료인 섬유와 기지의 물성값[6,7]과 섬유체

적비(fiber volume fraction)를 나타낸다.



[그림 1] 복합재 압력용기의 실린더 부분

[표 1] 실린더 부분의 직경과 두께

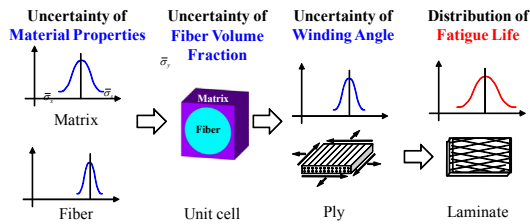
직경	실린더 부분	305 mm
두께	45도 각도층	2.85 mm
	-45도 각도층	2.85 mm
	90도 각도층	2.85 mm

[표 2] E-glass/Epoxy 물성값

재료	물성	값
에폭시	탄성계수	3.34 GPa
	푸아송비	0.35
섬유	탄성계수	74 GPa
	전단탄성계수	30.8 GPa
	푸아송비	0.2
섬유체적비		0.6

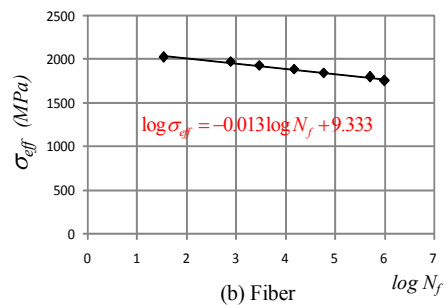
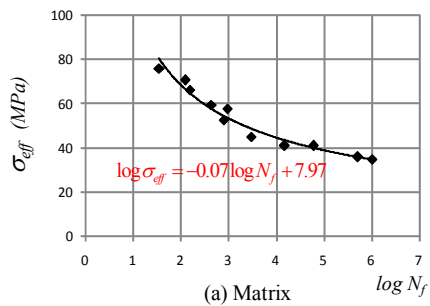
[표 3] 주요인자들의 정규분포값

정규분포	탄성계수(GPa)		섬유 체적비	헬리컬 각도
	에폭시	섬유		
평균	3.34	74	0.6	45
표준편차	0.1	1.92	0.014	0.26

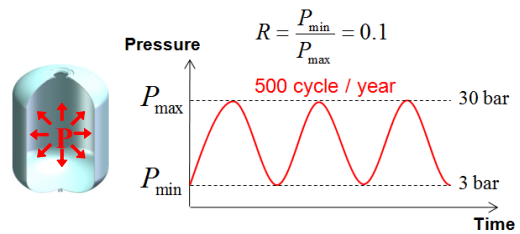


[그림 2] 복합재 압력용기의 피로수명에 영향을 미치는 주요인자들

그림 2는 복합재 압력용기의 피로수명에 영향을 주는 인자들로 복합재 섬유와 기지의 물성값과 제조공정상의 섬유체적비와 와인딩 각도를 나타낸다. 이들 중, 복합재 섬유와 기지의 물성값들은 어느 편차가 존재하게 되는데, 심지어 동일한 재료를 똑같은 실험장비로 측정하여도 오차가 존재한다. 또한, 제조공정 시 와인딩 각도도 와인딩 기계의 정밀도 및 적층면의 마찰 계수 등에 의해 편차가 존재하며, 섬유텐션에 의해 섬유체적비도 달라질 수 있다. 이와 같은 인자들의 불확실성은 최종적으로 복합재 압력용기의 피로수명에 영향을 미치게 되며, 이에 대한 신뢰성을 증가시키기 위해서는 인자들의 불확실성을 최대한 감소시켜야 한다. 이를 위해서 각 인자들에 대하여 복합재 압력용기의 피로 수명에 대한 민감도 분석과 신뢰성 평가가 필요하다[8-12]. 표 3은 복합재 압력용기의 민감도 분석과 몬테카르로 시뮬레이션을 위한 섬유와 기지의 탄성계수, 섬유체적비[13] 및 헬리컬 각도[14]의 정규분포값을 나타낸다. 섬유와 기지의 탄성계수의 정규분포값은 실제 측정을 통하여 얻었으며, 섬유체적비의 정규분포값은 실제 일방향 복합재의 단면 이미지로부터 측정 한 것이다. 그림 3(a)는 피로수명 평가를 위한 순수 기지의 S-N 선도로써, Tao[6]가 수행한 순수 에폭시인 Epon 826의 피로실험데이터를 이용하여 얻은 것이며, 그림 3(b)는 Philippidis[7]가 수행한 일방향 복합재 플라이의 피로실험데이터를 토대로 미시역학적 파손식을 이용하여 역계산으로 얻은 섬유의 S-N 선도를 나타낸다. 본 연구에서는 그림 4와 같이 ISO[5] 규격에 의하여 하중비 0.1인 최대 30bar, 최소 3bar의 피로하중을 연간 500사이클 수의 주기로 적용하였다.



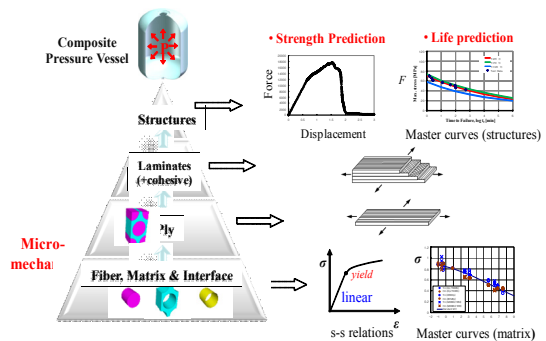
[그림 3] 기지와 섬유의 S-N 선도



[그림 4] 복합재 압력용기의 피로하중

### 3. 이론 전개

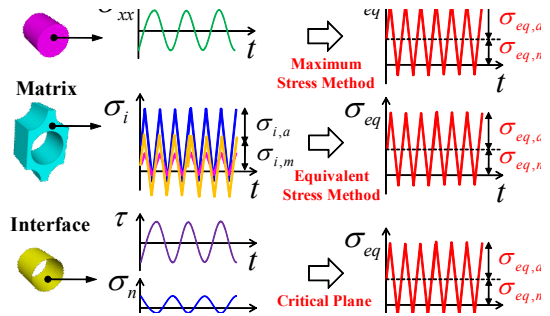
#### 3.1 멀티 스케일 피로수명 예측



[그림 5] 멀티 스케일 피로수명 예측

그림 5는 복합재료의 기본 구성재료인 섬유, 기지 및 섬유/기지 경계면의 거동으로부터 플라이, 적층판 더 나아가 전체 구조물의 거동을 예측하는 멀티 스케일 접근법을 도식화한 것이다. 복합재 구조물의 정적 거동을 예측하기 위해서는 복합재료의 기본 구성재료들의 비선형 응력-변형률 곡선이 요구되며, 피로수명을 예측하기 위해서는 각 구성재료들의 S-N 선도가 필요하다. 멀티 스케일 접근법은 복합재료 기본 구성재료들의 실험 데이터를 기반으로 하기 때문에 임의의 섬유체적비나 다양한 적층각도에 따른 추가적인 복합재의 실험이 필요하지 않아 시간과 비용을 절감할 수 있다는 이점이 있다.

이러한 멀티 스케일 접근법을 이용한 복합재 압력용기의 수명을 예측하는 방법은 그림 6과 같이 거시적 응력 해석 단계와 각 구성재료의 피로해석을 기반으로 한 미시적 파손(micromechanics of failure)해석 단계로 이루어진다. 거시적 응력 해석 단계에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 복합재 압력용기의 적층판에 가해지는 다축 피로하중을 구하며, 고전 적층판 이론(classical laminate theory)을 이용하여 적층판의 각 플라이에 발생하는 응력(on-axis stress 또는 macro stress)을 구한다. 미시적 파손 해석 단계에서는 미시 모델(micro model)을 이용하여 플라이 응력으로부터 섬유, 기지 및 섬유/기지 경계면에 발생하는 미시응력(micro stress)을 구하고[11-12], 이로부터 그림 7과 같이 각 구성재료의 피로파손식을 이용하여 등가응력의 진폭과 평균이 계산된다. 복합재 압력용기의 피로 파손을 판단하기 위해서 각 복합재의 구성재료별로 섬유는 최대응력파손식을, 기지는 등가응력파손식을, 그리고 섬유/기지 경계면에서는 임계단면파손식을 적용하였다. 섬유는 섬유방향의 응력이 섬유파손에 가장 큰 영향을 미치므로 섬유방향의 응력이 섬유의 인장이나 압축 강도보다 크게 되면 파손에 도달한다고 판단하는 최대응력파손식을 적용하였고, 다음과 같이 섬유의 등가응력 진폭과 평균을 나타낼 수 있다.



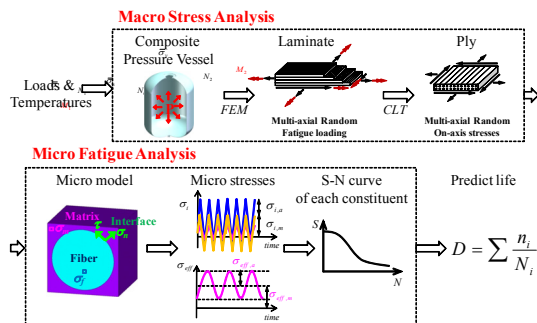
[그림 7] 각 구성재료의 등가응력

$$\begin{aligned} \sigma_{eq,a}^{(f)} &= \sigma_{xx,a} \\ \sigma_{eq,m}^{(f)} &= \sigma_{xx,m} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{xx,a}$ 과  $\sigma_{xx,m}$ 은 섬유방향 응력성분의 진폭과 평균이다. 다축 응력상태를 고려한 등방성 재료의 피로 파손식은 현재 대부분 정립되어 있다. 하지만, 기지의 강성은 등방성 특징을 가지고 있지만 인장과 압축강도가 전혀 다른 특징을 지니고 있다. 최근 기지와 같은 특성을 지닌 재료들의 피로수명 평가를 위한 연구가 진행 중에 있으며, 그 중 등가응력모델(equivalent stress model)이 가장 잘 알려져 있다[6]. 기지의 등가응력 진폭과 평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{eq,a}^{(m)} &= \frac{(\beta-1)I_{1,a} + \sqrt{(\beta-1)^2 I_{1,a}^2 + 4\beta\sigma_{VM,a}^2}}{2\beta} \\ \sigma_{eq,m}^{(m)} &= \frac{(\beta-1)I_{1,m} + \sqrt{(\beta-1)^2 I_{1,m}^2 + 4\beta\sigma_{VM,m}^2}}{2\beta} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 압축과 인장강도의 비( $\beta = C/T$ ),  $I_{1,a}$ 과  $I_{1,m}$ 은 1차 응력 불변량의 진폭과 평균,  $\sigma_{VM,a}$ 과  $\sigma_{VM,m}$ 은 von Mises 응력의 진폭과 평균이다. 섬유/기지의 경계면을 위한 피로 파손식은 임계단면파손식(critical plane model)으로, 피로균열이 임계단면을 따라 진행된다는 관측에 근거한 것으로 피로실험결과가 잘 일치하는 것으로 알려져 있지만, 모든 방향의 단면을 고려해야 하기 때문에 수치계산량이 많아진다는 단점이 있다. 하지만 미시모델에서 섬유/기지의 경계면은 이미 단면 방향이 결정되어 있어 빠른 계산이 가능하다. 섬유/기지 경계면의 등가응력 진폭과 평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 6] 복합재 압력용기의 피로수명 예측 흐름도

$$\begin{aligned} \sigma_{eq}^{(i)} &= \text{sign}(\sigma_n, \tau) \sqrt{\sigma_n^2 + (k\tau)^2} \\ \sigma_{eq,a}^{(i)} &= (\sigma_{eq,max}^{(i)} - \sigma_{eq,min}^{(i)})/2 \\ \sigma_{eq,m}^{(i)} &= (\sigma_{eq,max}^{(i)} + \sigma_{eq,min}^{(i)})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_n$ 은 단면의 수직응력,  $\tau$ 는 단면의 전단응력이며,  $k$ 는 재료상수이다. 본 연구에서는 섬유/기지 경계면의 피로강도가 높다고 가정하여 경계면의 피로파손을 무시하였다.

등가응력의 진폭이 일정하지만 평균응력이 다르면 피로수명이 달라지는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 평균응력의 효과와 인장과 압축강도가 다른 재료 특성을 고려한 수정된 Goodman 식을 적용하였다. 평균응력의 효과를 고려한 유효응력은 다음과 같다. 여기서,  $T$ 와  $C$ 는 인장과 압축강도이다.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{eq,a} \sqrt{TC}}{\frac{T+C}{2} - \sqrt{\sigma_{eq,m} - \frac{T-C}{2}}} \quad (4)$$

평균응력효과를 고려한 유효응력과 피로파손사이클수의 상관관계를 나타내는 S-N 선도는 단축 인장 및 비틀림 피로실험을 통해 얻을 수 있고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log \sigma_{eff} = a \log N_f + b \quad (5)$$

여기서,  $a$ 와  $b$ 는 재료상수들이다. 이 S-N 선도에 의해 유효응력에 대한 피로파손사이클수가 결정되면 Miner's rule에 의한 누적손상계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D = \sum \frac{n}{N_f} \quad (6)$$

여기서,  $n$ 은 피로하중사이클수이고,  $N_f$ 은 피로파손 사이클수이다. 복합재 구성재료 중 피로가 가장 많이 축적되는 요소가 가장 먼저 파손되며, 이는 전체 구조물인 복합재 압력용기의 수명을 결정한다. 이처럼, 멀티 스케일 접근법을 이용한 복합재 압력용기의 파손 예측은 적층판의 어느 플라이가 파손되었는지 뿐만 아니라, 구성재료인 섬유, 기지 및 섬유/기지 경계면 파손모드를 구분할 수 있다.

### 3.2 멀티 스케일 접근법을 이용한 신뢰성 평가

복합재료의 피로수명은 물성값이나 제작과정의 불확

실성에 의해 통계 분포를 이루게 되며 불확실성의 원인이 되는 주요인자의 정확한 추정이 요구된다. 멀티 스케일 접근법을 이용하면 복합재의 구성재료인 섬유와 기지의 불확실성으로부터 플라이나 적층판 더 나아가 복합재 구조물의 불확실성을 정확히 유추할 수 있는 장점이 있다. 이러한 불확실성이 피로수명에 미치는 영향을 알아보기 위하여 통계학 소프트웨어인 Dataplot (by NIST[17])으로 민감도 해석을 수행하였다. Dataplot을 통한 민감도 해석은 주요 인자들의 최대, 최소값의 극한값을 이용하여 각 인자들의 영향을 블록 다이어그램으로 보여준다.

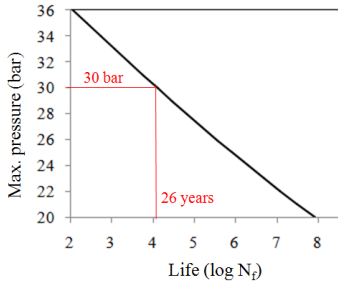
하지만, 이러한 민감도 해석은 주요 인자들의 통계 분포가 아닌 극한값만을 이용하기 때문에 피로수명 분포를 검토하기에는 불충분하다. 본 연구에서는 좀 더 정확한 확률변수들의 추정을 위해 실험량을 줄일 수 있는 몬테카르로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)에 의한 방법을 적용하였다. 몬테카르로 시뮬레이션은 인자들의 확률 분포에 근거하여 사용자가 원하는 양의 샘플조합을 추정하고 이에 따른 결과의 확률분포를 빠르고 정확하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 복합재 피로수명에 영향을 미칠 수 있는 여러 인자들 중 기지와 섬유의 탄성계수, 섬유체적비 및 와인딩 각도만을 고려하여 이들의 확률분포에 근거한 난수 발생을 통해 몬테카르로 시뮬레이션을 수행하였으며 총 10000개의 샘플이 사용되었다.

## 4. 결과 및 고찰

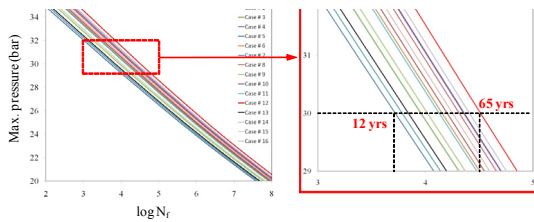
그림 8은 섬유와 기지 물성값과 섬유체적비의 평균을 사용하고, 헬리컬 각도의 편차를 고려하지 않은 경우에 멀티 스케일 접근법을 이용하여 복합재압력용기의 피로수명 S-N 선도를 예측한 것을 나타낸다. 이 S-N 선도로부터 압력용기가 모든 내압의 피로조건에 대한 피로수명 평가가 가능하다. ISO[5]에서 요구하는 실험 압력인 30bar가 연간 500 사이클의 주기로 작용할 경우, 26년의 피로 수명을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 9는 섬유와 기지 물성값, 섬유체적비 및 헬리컬 각도의 편차를 고려한 경우의 압력용기의 피로수명 S-N 선도를 나타낸 것이며, 네 가지 주요 인자를 16가지 경우로 조합하여 각 각의 피로수명 곡선을 생성하였다. ISO[5]에서 요구하는 실험 압력인 30bar가 연간 500 사이클의 주기로 작용할 경우, 네 가지 주요 인자의 불확실성을 고려하면 12년에서 65년까지의 피로수명을 가질 수 있음을 보여 준다. 네 가지 주요 인자들은 확률분포를 가지고 있기 때문에 본 연구에서 파열압력으로부터 설계한

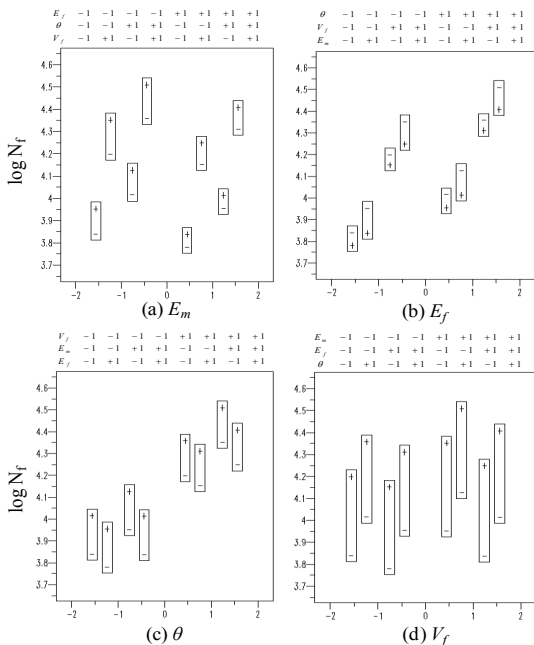
압력용기의 피로수명이 12년이라고 단정하기는 어렵다. 이러한 확률분포를 고려한 신뢰성 평가가 이루어져야 할 것이다.



[그림 8] 주요인자들의 평균값을 이용한 복합재 압력용기의 피로수명 예측



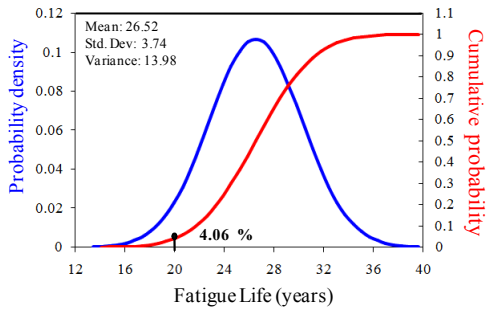
[그림 9] 주요인자들의 편차를 이용한 복합재 압력용기의 피로수명 예측



[그림 10] 민감도 블록 다이어그램

우선, 네 가지 주요 인자들의 불확실성이 압력용기의 피로수명에 미치는 영향을 알아보기 위해 통계학 소프트웨어 Dataplot을 사용하여 민감도를 분석하였다. 그림 10은 주요 인자들이 피로 수명 예측에 미치는 영향을 민감도 블록 다이어그램으로 나타낸 결과를 나타낸다. 세 개의 서로 다른 주요인자들의 최대(+) 및 최소(-)값의 조합 조건에 대해 하나의 주요인자의 최대(+) 및 최소(-)값에 대한 복합재 피로수명을 보여준다. 다시 말하면, 그림 10(a)은 섬유의 탄성계수, 헬리컬 각도 그리고 섬유체적비의 세 가지 다른 최대(+) 및 최소(-)값의 조합 조건에 대해 예측시 탄성계수의 최대(+) 및 최소(-)값에 대한 복합재 피로수명을 나타낸 것으로 (+)(-) 막대의 길이가 가장 긴 조합 조건인 섬유 탄성계수가 최소(-), 헬리컬 각도가 최소(-), 섬유체적비가 최대(+인 경우에 섬유의 탄성계수 영향이 가장 큰 것을 의미한다. 그림 10(d)의 섬유체적비의 블록 다이어그램을 보면 다른 블록 다이어그램보다 (+)(-) 막대의 길이가 가장 크므로 복합재의 피로수명에 가장 큰 영향을 미치는 것을 쉽게 알 수 있다. 이러한 섬유체적비의 편차는 압력용기의 와인딩 제작 과정에 섬유텐션의 차이나 섬유토크의 불균일이 원인일 수 있다. 또한 그림 10(c)에서 보면, 헬리컬 각도의 편차가 커질수록 복합재 압력용기의 피로수명 편차 또한 커지게 됨을 알 수 있다. 이러한 헬리컬 각도의 편차를 줄이기 위해서는 제작 시 와인딩 각도의 정확도가 요구된다. 그림 10(c, d)에서 보면 모든 섬유체적비와 헬리컬 각도의 편차에서 피로수명이 최소가 되는 섬유와 기지의 탄성계수의 조건은 섬유가 최대값이고 기지가 최소값인 경우이다. 이는 섬유와 기지의 재료 불균일이 가장 심해 기지 내부에 응력집중이 발생하기 때문이다.

네 가지 주요 인자의 확률분포를 고려한 압력용기의 피로수명 분포를 예측하기 위해 몬테카르로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11은 총 10000개의 주요 인자들의 조합샘플을 이용하여 복합재 압력용기의 피로수명 확률분포를 나타낸 것이다. ISO[5] 기준에 의하면 압력용기의 최소수명은 20년이어야 한다. 앞에서 이미 보여준 주요 인자들의 평균값을 이용한 예측결과에 의하면 최대 30bar 인 압력이 매년 500 사이클 수만큼 가해졌을 때, 수명은 26년이였다. 하지만 상술한 네 가지 주요인자들이 확률분포를 통해 얻은 압력용기의 피로수명은 20년 보다 작은 확률이 4.06% 인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 설계자에게 정확한 신뢰성 평가를 제공한다.



[그림 11] 복합재 압력용기의 피로수명 확률분포

## 5. 결론

본 논문은 다축 하중을 받는 복합재 압력용기의 멀티 스케일 피로수명 예측 방법을 제시하였다. 또한, 통계학 소프트웨어인 Dataplot과 몬테카르로 시뮬레이션을 통해 복합재 섬유와 기지의 물성값, 섬유체적비 및 와인딩 각도의 편차에 따른 복합재 압력용기의 피로수명의 민감도 분석과 확률분포를 제시하였다. 복합재 압력용기의 피로수명은 섬유체적비와 와인딩 각도의 편차에 가장 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었고, 멀티 스케일 접근법을 이용하면 복합재 압력용기 피로수명의 불확실성에 대한 근본적인 원인 분석이 가능함을 보였다. 이를 통하여 주요 인자들을 고려한 압력용기의 설계나 제작이 용이할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

[1] M. A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, No. 3, pp. 159-164, 1945.

[2] G. P. Sendeckyj, Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials. In: Fatigue of Composite Materials, Reifsnider K.L (ed), Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, pp. 431-83, 1991.

[3] K. L. Reifsnider and W.W. Stinchcomb, A Critical-Element Model of the Residual Strength and Life of Fatigue-Loaded Composite Coupons. In: Composite Materials: Fatigue and Fracture, ASTM STP 907, Hahn H.T (ed), pp. 298-313, 1986.

[4] N. Himmel, "Fatigue Life Prediction of Laminated Polymer Matrix Composites", International Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 2, pp. 349-360, 2001.

[5] ISO Standard 11119-3, 2002, First edition - Gas

cylinders of composite construction-Specification and test methods; Part 3: Fully wrapped fiber reinforced composite gas cylinders with non-load-sharing metallic or non-metallic liners.

[6] G. Tao, et al., "Mean Stress/Strain Effect on Fatigue Behavior of an Epoxy Resin", International Journal of Fatigue, Vol. 29, No. 12, pp. 2180-2190, 2007.

[7] T. P. Philippidis, et al., "Fatigue Design Allowables for GRP Laminates Based on Stiffness Degradation Measurements", Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 15, pp. 2819-2828, 2000.

[8] J. T. Fong, et al., "Uncertainty in Finite Element Modeling and Failure Analysis: A Metrology-Based Approach", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 128, No. 1, pp. 140-147, 2006.

[9] J. T. Fong, "Inservice Data Reporting Standards for Engineering Reliability and Risk Analysis", Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol. 60, No. 1, pp. 159-161, 1980.

[10] J. T. Fong, et al., "An Intelligent Flaw Monitoring System: From Flaw Size Uncertainty to Fatigue Life Prediction with Confidence Bounds in 24 Hours", Proceedings of the 8th World Congress on Computational Mechanics, Venice, Italy, June 30-July 5, 2008.

[11] J. T. Fong, et al., "A Web-Based Uncertainty Plug-In (WUPI) for Fatigue Life Prediction based on NDE Data and Fracture Mechanics Analysis" ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, Czech Republic, July 26-30, 2009.

[12] J. T. Fong, et al., "A Design-of-Experiments Plug-In for Estimating Uncertainties in Finite Element Simulations", International SIMULIA Customer Conference, London, England, May 18-21, 2009.

[13] T. Hobbiebrunken, et al., "Influence of Non-Uniform Fiber Arrangement on Microscopic Stress and Failure Initiation in Thermally and Transversely Loaded CF/epoxy Laminated Composites", Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 15-16, pp. 3107-3113, 2008.

[14] P. A. Zinoviev, et al., "The Behaviour of High-Strength Unidirectional Composites under Tension with Superposed Hydrostatic Pressure", Composites Science and Technology, Vol. 61, No. 8, pp. 1151-1161, 2001.

[15] K. K. Jin, et al., "Distribution of Micro Stresses and Interfacial Traction in Unidirectional Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 42, No. 18, pp.

1825-1849, 2008.

- [16] Y. Huang, et al., "Effects of Fiber Arrangement on Mechanical Behavior of Unidirectional Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 42, No. 18, pp. 1851-1871, 2008.
- [17] J. J. Filliben, et al., Dataplot: A Statistical Data Analysis Software System, A Public Domain Software by NIST, 2007.

**진 교 국(Kyo-Kook Jin) [정회원]**



- 2005년 8월 : 한양대학교 기계공학 (공학석사)
- 2009년 8월 : 한국대학교 기계공학 (공학박사)
- 2010년 2월 ~ 현재 : 한양대학교 BK21사업 혁신설계기계인력양성사업단 신진연구인력

<관심분야>  
복합재역학, 구조해석, 피로수명예측

**하 성 규(Sung-Kyu Ha) [정회원]**



- 1988년 12월 : Stanford University (공학박사)
- 1991년 7월 : Stanford University 박사후 연구원
- 1991년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 교수

<관심분야>  
복합재역학

**김 재 혁(Jae-Hyuk Kim) [정회원]**



- 2006년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>  
플라이휠 에너지저장 시스템, 모니터링

**한 훈 희(Hoon-Hee Han) [정회원]**



- 2006년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>  
플라이휠 에너지저장 시스템, 최적설계, 구조해석

**김 성 종(Seong-Jong Kim) [정회원]**



- 2007년 8월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>  
플라이휠 에너지저장 시스템, 압력용기, 구조해석