

복합재구조물에 대한 단순화된 수명평가방법 고찰

김성준*

A study on simplified fatigue design methodology for composite structures

Sung Jun Kim

Key Words : fatigue life, strength degradation parameter, fatigue shape parameter, probability

ABSTRACT

A simplified methodology is presented to predict fatigue life and residual strength of composite structures. To avoid excessive amount of tests that are required for model characterization, strength degradation parameter is assumed as function of fatigue life. $S-N$ curve is used to extract fatigue life that is required to characterize the stress levels comprising a randomly-ordered load spectrum. And different stress ratios are handled with Goodman correction approach(fatigue envelope). It is assumed that the residual strength is a function of the number of loading cycles and applied fatigue stress amplitude. And the residual strength distribution after an arbitrary load cycles is represented by two parameter Weibull functions.

초 록

복합재구조물에 대한 피로수명과 잔류강도를 평가하기 위한 단순화된 방법을 소개하였다. 모델의 특성화를 위해 필요한 실험을 줄이기 위하여 강도저하 파라미터수를 피로수명의 함수로 가정하였다. 임의의 순서로 배열된 하중 스펙트럼에서 응력수준에 따른 피로수명을 추출하기 위해 $S-N$ 선도를 사용하였다. 그리고 상이한 응력비(stress ratio)에 대한 영향을 고려하기 위해 Goodman 형식의 방법(fatigue envelope)을 사용하였다. 잔류강도는 하중 사이클 수와 응력진폭의 함수로 가정하였으며 임의의 하중사이클 후의 잔류강도분포는 2 모수 Weibull 분포로 표현하였다.

기호설명

- $B(n)$ 잔류강도에 대한 Weibull shape 파라미터
- R_0 정강도에 대한 Weibull scale 파라미터
- $R(n)$ 임의의 하중사이클 후의 잔류강도에 대한 Weibull scale 파라미터
- R 응력비(stress ratio)
- S_p 응력진폭에서 대한 최대응력
- v 강도저하 파라미터

1. 서 론

복합재료의 경우 복잡한 파손형태로 인하여 파괴역학적인 방법을 이용한 피로수명 평가가 어렵

다. 그러므로 일반적으로 복합재료 구조물은 현상학적인 방법으로 피로수명을 평가한다. 그러나 복합재 구조 부재인 경우 비슷한 부재라 하더라도 적층순서와 적층각도 및 응력상태 등에 따라 구조물의 기계적 특성이 달라지게 되므로 현상론적인 방법을 이용한 피로수명 평가에는 방대한 실험이 요구된다. 따라서 비교적 적은 실험결과를 이용하여 구조물의 잔여강도와 피로수명을 예측할 수 있는 수명평가 방법이 요구된다. 본 논문에서는 현상학적인 방법 중 강도기반모델을 이용하여 구조물의 잔류강도를 평가하려 한다. 강도저하 모델은 구조물의 잔류강도를 피로수명과 강도저하 파라미터의 함수로 가정하여 계산한다. 그러므로 복합재

*한국항공우주연구원

구조물의 피로수명과 강도저하 파라미터를 일차적으로 계산하여야 한다[1]. 본 논문에서는 Rotem이 제안한 fatigue envelope의 개념을 이용하여 응력상태에 따른 피로수명을 계산하려 한다[3]. 강도저하 파라미터는 하중사이클 수에 따른 강도의 저하량을 표현하는 매개변수로 재료와 응력상태에 따라 결정되는 값이다. Franke[5] 등은 강도저하 파라미터를 지수함수로 가정하여 임의의 응력진폭에서의 강도저하 파라미터를 계산하였다. Mahmood[6] 등은 응력 수준과 무관한 파라미터를 이용하여 모든 응력범위에 대한 강도저하율을 계산하였으나, 시험을 수행한 응력수준 이외의 응력수준에서는 정확도가 떨어진다. 본 연구에서는 최소의 시험 데이터를 이용하여 모든 응력 범위에서의 피로수명과 강도저하 파라미터를 계산할 수 있는 근사적인 방법을 구하고 이를 이용하여 복합재 구조물의 피로수명을 평가하려 한다.

2. 현상학적인 피로수명 모델

현상학적인 방법을 이용한 복합재 구조물의 피로수명평가 방법은 크게 강성기반 모델(stiffness-based model)과 강도기반 모델(strength-based model)로 나뉜다. 강성기반 모델은 피로손상을 탄성계수의 함수로 설명하는데, 일반적인 파손조건을 충족시키기 어려운 단점이 있다. 반면에 강도저하 모델은 강도와 응력에 대한 값을 이용하여 작용 응력이 잔여강도보다 크거나 같을 때 파손이 일어난다는 일반적인 파손조건을 이용하므로 실제 설계에 적용하기가 쉽다[1]. 본 논문에서는 복합재구조물의 잔류강도를 계산하기 위해 강도기반 모델을 사용하였다. 즉 임의의 하중사이클 후의 잔류강도는 아래와 같이 표현된다.

$$R(n) = R_0 - (R_0 - S_p) \left(\frac{n}{N} \right)^v \quad (1)$$

여기서 $R(n)$ 은 현재 사이클에 대한 잔류강도, R_0 는 정강도, S_p 는 Peak 응력의 크기, N 은 피로수명, v 는 강도저하 파라미터이다. 결국 복합재료의 잔류강도와 잔여수명을 평가하기 위해서는 임의의 하중상태에서의 피로수명과 강도저하 파라미터를 구해야 한다.

2.1 복합재구조물의 피로수명계산

식(1)을 이용하여 피로하중을 받는 부재의 잔류강도를 계산하기 위해서는 임의의 응력상태에서의 피로수명을 계산해야 한다. 일반적으로 금속재료의 피로거동은 $S-N$ 선도와 Goodman 형식의 선도를

이용하여 설명된다. 전자는 보통 임의의 응력진폭에서 재료가 파손되는 사이클 수를 50%의 확률을 가지고 계산하고, 후자는 평균응력의 영향을 설명한다. 그러나 복합재료의 경우 인장하중과 압축하중 상태에서의 파손양상이 다르므로 피로수명 계산 시 응력상태에 대한 고려가 필요하다. Rotem은 인장강도와 압축강도의 평균값인 cross over 응력을 정의하고, 평균응력과 응력비를 이용하여 파손모드를 결정한다. 그리고 응력비가 R_{11} 인 $S-N$ 선도 상의 두 점 S_1 과 S_2 을 이용하여 응력비가 R_{12} 인 경우의 $S-N$ 선도는 아래와 같이 계산된다. 만약 $S-N$ 선도가 (2)식으로 표현되면

$$S = S_0 N^K \quad (2)$$

응력비 R_{11} 에서의 파손점(failure point)은 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} S_1 &= S_{011} N_1^{K_{11}} \\ S_2 &= S_{011} N_2^{K_{11}} \end{aligned} \quad (3)$$

S_{12} 와 S_{22} 는 기하학적인 형상을 이용하여 식(4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{12} &= \frac{1 - R_{11}}{(R_{12} - R_{11})/S_{11} + (1 - R_{12})/(S_{011} 10^{K_{11}})} \\ S_{22} &= \frac{1 - R_{11}}{(R_{12} - R_{11})/S_{11} + (1 - R_{12})/(S_{011} 10^{6K_{11}})} \end{aligned} \quad (4)$$

결국 응력비 R_{12} 에서의 $S-N$ 선도는 식(5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{6 \log S_{12} - \log S_{22}}{5} \\ K_{12} &= \log(S_{12}) - Q \\ S_{012} &= 10^Q \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 강도저하 파라미터 평가방법

강도저하 파라미터는 재료와 응력상태에 따라 결정되는 값으로 이론적인 파손확률과 피로수명에 대한 Weibull 분포로부터 얻어진 실험적 파손확률의 비교를 통해 두 값이 가장 근접되도록 결정한다[1]. 강도저하 파라미터는 정해진 응력진폭과 응력비에서 하중사이클에 따른 잔류강도 곡선의 특성을 결정한다. 예를 들어 $v \gg 1$ 이면 sudden death 모델이 되고, $v = 1$ (선형강도저하모델)이면 강도가 선형적으로 감소한다. 그리고 $v \ll 1$ 이면 급작스런 초기 파손(Wear-out Model) 양상을 보인다. 잔류강도는 피로하중 스펙트럼의 각 사이클의 손상량을 계산하여 (1)식에 의해 계산된다. 실험

을 수행하여 구해진 일정 응력수준에서의 강도지하 파라미터 값으로는 임의의 응력 진폭에서의 강도 지하량을 계산할 수 없으므로 최소의 실험데이터를 이용하여 모든 응력상태에서의 강도지하 파라미터를 결정해야 한다.

Schaff[1]는 강도지하 파라미터를 응력진폭의 실험함수로 가정하였다. σ_u 는 응력진폭 이다.

$$v_a = \sigma_u \times C_1 + C_2 \quad (6)$$

Subramanyan[5]은 강도지하 파라미터를 응력진폭의 함수로 가정하였다.

$$v_s = \frac{\sigma_i - \sigma_d}{\sigma_r - \sigma_d} \quad (7)$$

σ_r 은 첫 번째 응력 진폭이고, σ_i 는 두 번째 응력진폭, σ_d 는 내구한계(endurance limit)에서의 응력진폭 이다.

Hashin[5]은 강도지하 파라미터를 피로수명의 함수로 가정하였다.

$$v_h = \frac{\log(N_i / N_d)}{\log(N_r / N_d)} \quad (8)$$

N_r 은 첫 번째 응력진폭의 피로수명이고, N_i 는 두 번째 응력진폭의 피로수명, N_d 는 내구한계의 피로수명이다.

Manson[5]은 두 가지 응력진폭에서 강도지하 파라미터를 피로수명과 curve fitting parameter(m)의 함수로 표현하였다.

$$v_m = \left(\frac{N_r}{N_i} \right)^m \quad (9)$$

N_r 은 첫 번째 응력진폭의 피로수명이고, N_i 는 두 번째 응력진폭의 피로수명 이다. 금속재료인 경우 m의 값은 약 0.3~0.5 정도의 값이 된다.

(7) - (9)식은 두 가지 응력진폭을 갖는 피로 스펙트럼에 대한 강도지하 파라미터를 계산하는 식으로 임의의 응력진폭을 갖는 피로 스펙트럼에 적용하기 위해서 다음과 같이 가정하였다.

가정 1. 두 가지 응력수준에서 첫번째 항 (σ_r, N_r)에 해당하는 성분을 기준이 되는 일정한 값으로 결정하여 사용

가정 2. 시험을 통하여 얻어진 강도지하 파라미터 값과 가장 근접하는 값으로 σ_r 과 N_r 및 m

값을 결정

위의 가정을 이용하여 참고문헌[1]의 시험결과를 이용하여 각 강도지하 파라미터를 이용하여 임의의 응력수준에 대한 강도지하 파라미터 값을 계산하였다(Fig.1).

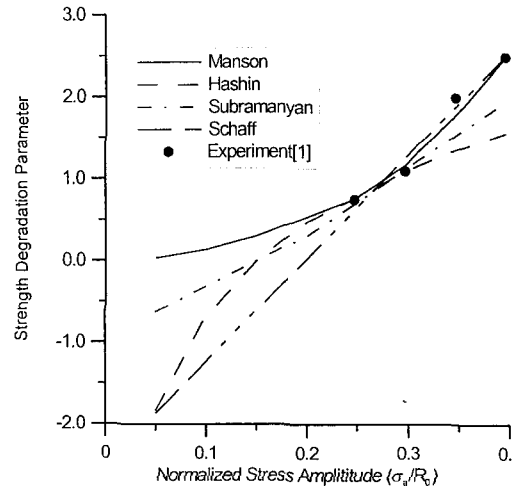


Fig.1 Comparison of experiments with strength degradation models

Fig.1 에서 σ_u 는 응력진폭이고, R_0 는 정강도 이다. 강도지하 파라미터는 물리적으로 0.0 보다 큰 값을 가져야 하므로 Manson의 모델이 가장 적절함을 알 수 있다. 또한 강도지하 파라미터를 응력진폭의 함수로 가정하는 경우 응력비에 대한 고려를 할 수 없지만, 강도지하 파라미터를 피로수명의 함수로 가정하는 경우 응력진폭과 응력비에 의한 효과를 고려할 수 있으므로 강도지하 파라미터를 피로수명의 함수로 가정하는 것이 타당하다.

2.3 잔류강도 계산

선형강도지하 모델과 Manson의 강도지하 모델을 이용하여 복합재 구조물의 잔류강도를 계산하여 비교하였다. 그림에서 Block Number는 각 응력수준에서 피로수명의 1%를 의미 한다. 계산에 사용한 복합재는 Glass/epoxy로 정강도(R_0)는 464 MPa이다. Fig.2에서 보듯이 선형 강도지하식에 의한 잔류 강도평가는 응력상태에 따라 보수적이지 않은 결과를 주는 것을 알 수 있다.

2.4 파손확률 계산

일반적으로 복합재 구조물의 피로수명과 잔류강도는 통계적 확률값으로 나타나게 된다. 실험에 의해 얻어진 피로수명과 정강도는 Weibull 분포를 나타내는 것으로 알려지고 있다. 2모수 weibull 분포를 사용하여 임의의 하중사이클 후의 잔류강도의

확률분포를 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$P[\hat{R}(n) \leq S_p] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{S_p}{R_0 - (R_0 - S_p) \left(\frac{n}{N} \right)^m} \right)^m \right]^{B_f(n)} \quad (10)$$

여기서 $B_f(n)$ 은 임의의 하중 사이클 수 후의 피로수명 Shape 파라미터이다.

Fig.3 은 하중사이클 수에 대한 파손확률을 의미한다.

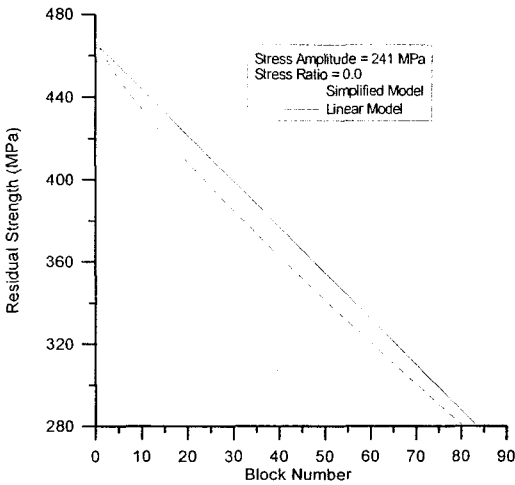


Fig. 2 Residual strength vs. Loading Block Number (Stress Amplitude = 241 MPa)

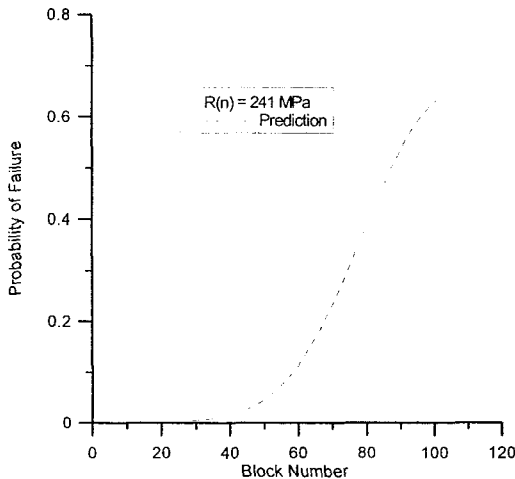


Fig.3 Probability of failure vs. block number (Stress Amplitude = 241 MPa, Stress Ratio = 0.0)

3. 결론

본 논문에서는 비교적 간단하게 복합재 구조물의 잔류강도와 피로수명을 평가할 수 있는 방법을 검토하였다. 여러 가지 강도저하 파라미터 모델을 실험결과와 비교한 결과 Manson 의 모델이 가장 좋은 결과를 보였다. 또한 피로수명에 대한 평균응력의 영향을 고려하기 위해 fatigue envelope 의 개념을 이용하여 임의의 응력비에서의 피로수명을 계산하였다. 계산된 모델변수를 이용하여 임의의 사이클 후에 복합재료의 잔류강도와 파손확률 분포를 계산하였다. 본 연구에서는 모델 파라미터를 구하기 위한 시험을 최소화하기 위하여 강도저하 파라미터를 피로수명의 함수로 가정하여 계산함으로써 수명평가의 절차를 단순화하려 하였다. 하지만 제한된 실험 결과에 대한 비교를 수행하였으므로 향후 많은 시험을 통하여 검증되어야 한다.

참고문헌

- (1) Schaff, J. R., B. D. Davidson, "Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part I - Constant Amplitude and Two-Stress Level Fatigue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, 1997, pp. 128-157.
- (2) Schaff, J. R., B. D. Davidson, "Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part II - Spectrum Fatigue," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, 1997, pp.158-181.
- (3) Rotem, A., " The Fatigue Behavior of Composite Laminates under Various Mean Stresses," *Composites Structures*, Vol. 17, 1991, pp. 113-126.
- (4) Rotem, A., " Tensile and Compressive Failure Modes of Laminated Composites Loads by Fatigue with Different Mean Stress," *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 12, 1990, pp. 201-208.
- (5) Franke, L., Dierkes, G., "A non-linear fatigue damage rule with an exponent based on a crack growth boundary condition," *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, 1999, pp. 761-767.
- (6) Mahmood M. Shokrieh, Larry B. Lessard, "Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments," *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, 1997, pp. 201-207.