

인장-비틀림 하중에 의한 섬유강화 복합재료의 피로수명 예측

박성완*

(논문접수일 2004. 4. 26, 심사완료일 2004. 9. 20.)

Fatigue Life Prediction of FRP Composites under Uniaxial Tension and Pure Torsion Loadings

Sung-Oan Park*

Abstract

A fatigue damage accumulation model based on the continuum damage mechanics theory was developed, where modulus decay ratios in tension and shear were used as indicators for damage variables D . In the model, the damage variables are considered to be second-order tensors. Then, the maximum principal damage variable, D^* is introduced. According to the similarity to the principal stress, D^* is obtained as the maximum eigen value of damage tensor $[D]$. Under proportional tension and torsion loadings, fatigue lives were satisfactorily predicted at any combined stress ratios using the present model in which the fatigue characteristics only under uniaxial tension and pure torsion loadings were needed. Fatigue life prediction under uniaxial tension and pure torsion loadings, was performed based on the damage mechanics using boundary element method.

Key Words : FRP(섬유강화 플라스틱), Fatigue Life(피로수명), Damage Mechanics(손상역학), Damage Variables(손상변수), Combined Stress Ratio(조합응력 비), Boundary Element Method(경계요소법)

1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Plastics)가 일차 구조부재로 사용되는 경향은 증가하고 있으나 금속재료에 비하면 적은 편이며 이용범위도 한정되어 있다. 그 이유는 FRP의 피로 손상 평가법, 즉 피로수명 예측법이 확립되어 있지 않기 때문이다. 보다 많은 분야에서 FRP가 일차 구조부재로 사용

되기 위하여 FRP의 피로손상 평가법 및 피로수명 예측법을 확립하지 않으면 안된다. 금속재료는 최종적으로 한 개의 균열이 피로파괴를 지배한다. 그래서 균열을 가진 구조물의 파괴나 변형을 취급하는 파괴역학이 피로손상 평가나 피로수명을 예측하기 위하여 많이 사용되고 있다.

그 방법으로 Miner법⁽¹⁾, Reinfo Counting모델⁽²⁾, Corten-Dolan법, Freudenthal-Heller법, Manson-Coffin법, 균열선

* 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과 (sopark@icc.ac.kr)
주소: 402-750 인천광역시 남구 도화2동 235

단에 작용하는 응력을 미시적으로 해석하는 방법 등⁽³⁾ 많은 예측법이 고안되고 있다. 그러나 FRP의 경우 반복하중 중에 모재균열, 섬유파단, 계면박리, 층간분리 등 여러종류의 내부손상이 발생하여 그들이 상호영향으로 결합하기 때문에 그 파괴 메카니즘은 대단히 복잡하며^(4,5), 파괴역학을 적용하여 피로손상 평가나 피로수명 예측을 하는 것은 어려움이 있다고 생각된다. 파괴역학의 적용이 곤란한 FRP의 피로손상 평가나 수명예측에 관한 연구는 파괴역학 이외의 방법이 사용되어져야 한다. 예를들면 Zako⁽⁶⁾은 균열길이를 사용하여 인장반복하중에서 피로수명 예측을 하였다. 그러나 피로시험 중에 균열길이를 측정하는 것은 곤란하다. 또한 Miner법⁽¹⁾은 반복횟수에 비례하여 내부손상이 축적되는 것으로 가정하였지만 FRP의 내부손상 축적은 반복횟수에 비례하지 않기 때문에⁽⁷⁻¹⁴⁾ 피로수명을 정확하게 예측하는 것은 어려움이 있다.

여러종류의 내부손상이 존재하는 구조물의 거동을 거시적으로 취급하는 방법으로 연속체 손상역학이 있다. 손상역학의 초기에는 Kachanov(1958)⁽¹⁵⁾에 의하여 이루어졌다. Kachanov는 내부손상상태를 무차원화한 스칼라량 ϕ 로써 표현하였다. 미손상의 상태는 $\phi = 1$ 로 표시하고 $\phi = 0$ 은 하중을 부하하는 것이 가능하지 않은 상태, 즉 재료의 파단을 표시한다. 연속체에 사용되고 있는 ϕ 는 재료의 상태를 표시하기 때문에 ϕ 와 쌍을 이루는 양 $D \equiv 1 - \phi$ 를 재료의 특성 저하나 손상상태를 나타내는 척도를 나타낸다. $D = 0$ 은 미손상 상태를 나타내고, $D = 1$ 은 재료의 파괴를 나타낸다. 그래서 손상역학에서는 손상의 정도를 기술하는 상태량으로써 Kachanov가 사용한 ϕ 보다도 D 를 많이 사용하고 있다. Kachanov는 ϕ 를 스칼라량으로 가정하였지만 최근에는 손상의 방향성을 고려하여 손상을 고계의 텐서량 $[D]$ 로 표기하는 것이 시도되고 있다. 그러므로 연속체 손상역학을 사용한 FRP 피로손상 평가나 피로수명 예측에 관한 연구가 진행되고 있으며 단축응력상태에서 강성저하율을 손상변수로 사용한 손상역학적 방법이 성과를 거두고 있다^(16,21,23,24). 단축하중아래에서 강성저하율을 손상변수로 사용하여 복합응력상태의 FRP 피로손상 평가나 피로수명 예측을 하고 있다. Zvi Hashin⁽¹⁷⁾은 강성저하율을 사용하여 복합응력상태에서 피로수명 예측을 하였지만 FRP의 특징인 이방성을 고려하지 않았다. 또한 각 부하경로에서 시험을 해야하는 어려움이 있다. Morita등⁽¹⁸⁾은 손상변수로 강성저하율을 사용한 Ye⁽²²⁾의 연구를 인장-비틀림 조합하중아래에서 적용하였다. Morita등은 수직응력에 의한

손상 D_1 과 전단응력에 의한 손상 D_2 의 2개의 손상변수를 사용하였지만 그들을 개별로 취급하기 때문에 본래 재료에 대하여 일률적으로 적용할 수 있는 적절한 피로수명곡선이 2개 존재한다는 불합리가 발생한다.

본 연구에서는 연속체 손상역학적 방법에 의하여 손상텐서 $[D]$, 최대주손상 D^* 를 사용하여 인장-비틀림의 이축 조합반복하중을 받는 FRP의 피로수명 예측법을 제안한다. 예측된 피로수명을 평직물 유리섬유강화 불포화 폴리에스테르 수지제품 박판 원통형 시험편에 적용하여 인장-비틀림 이축 조합반복하중에 의한 경제요소법 수치해석 결과와 기존의 실험데이터와 비교하여 그 유용성에 관하여 검증한다.

2. 피로수명에측법

FRP에 반복하중이 부하되면, 재료내부에 층간분리, 계면박리, 섬유파단, 모재균열 등의 내부손상이 축적된다. 부하경로가 다르게 되면 내부손상의 축적과정도 다르게 된다. 그러나 편심 반복응력아래에서 최대반복응력에 이르기까지 부하경로는 잔류강도에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 부하경로의 틀림은 피로수명에 그다지 영향을 미치지 않기 때문에 최대반복응력을 변수로 한다. 최대반복응력이 크게 되는 만큼 이들의 내부손상 축적은 빠르게 되고 피로수명도 짧게 된다. Ye⁽²²⁾는 단축응력상태에서 내부손상 축적을 손상역학을 사용하여 평가한 후 식 (1)을 제안하였다. 본 연구는 식 (1)을 다축응력상태로 확장한다.

$$\frac{dD_{ij}}{dN} = c_{ij} \left(\frac{\sigma_{ij\max}^2}{D_{ij}} \right)^{m_{ij}} \quad (1)$$

여기서

$$D_{ij} = 1 - \frac{E_{ij}^{(N)}}{E_{ij}^{(0)}} \quad (2)$$

이다.

N : 반복횟수, m_{ij}, c_{ij} : 재료상수,

$\sigma_{ij\max}$: 최대반복응력, $E_{ij}^{(0)}$: 초기강성,

$E_{ij}^{(N)}$: 반복횟수 N 번째의 잔류강성,

i, j : 1, 2, 3이다.

D_{ij} 는 응력 σ_{ij} 에 대응하는 손상변수이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 양변에 대수를 취하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{1}{E_{ij}^{(0)}} \frac{dE_{ij}^{(N)}}{dN} \right) \\ = \log c_{ij} + m_{ij} \log \left(\frac{\sigma_{ij\max}^2}{1 - E_{ij}^{(N)} / E_{ij}^{(0)}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 반복횟수 N 과 잔류강성 $E_{ij}^{(N)}$ 의 관계가 알려지면 $-\frac{1}{E_{ij}^{(0)}} \frac{dE_{ij}^{(N)}}{dN}$ 과 $\frac{\sigma_{ij\max}^2}{1 - E_{ij}^{(N)} / E_{ij}^{(0)}}$ 의 관계를 양대수 축으로 풀것할 때 기울기와 위치로부터 재료상수 m_{ij} , c_{ij} 는 구하여 진다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 반복횟수 N 에 관하여 적분하면 임의의 반복횟수 N 에 대한 손상변수 D_{ij} 는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{ij} = [Nc_{ij}(m_{ij} + 1)]^{\frac{1}{(m_{ij}+1)}} \sigma_{ij\max}^{\frac{2m_{ij}}{(m_{ij}+1)}} \quad (4)$$

또한 식 (4)에 식 (2)를 대입하면 잔류강성 $E_{ij}^{(N)}$, 반복 횟수 N , 최대반복응력 $\sigma_{ij\max}$ 의 관계를 알 수 있다.

$$\frac{E_{ij}^{(N)}}{E_{ij}^{(0)}} = 1 - [Nc_{ij}(m_{ij} + 1)]^{\frac{1}{(m_{ij}+1)}} \sigma_{ij\max}^{\frac{2m_{ij}}{(m_{ij}+1)}} \quad (5)$$

파단시의 손상변수의 값 D_{ijc} 로 식 (4)를 나누어서 손상을 무차원화 한다.

$$\begin{aligned} D'_{ij} &= \frac{D_{ij}}{D_{ijc}} \\ &= \frac{1}{D_{ijc}} [Nc_{ij}(m_{ij} + 1)]^{\frac{1}{(m_{ij}+1)}} \sigma_{ij\max}^{\frac{2m_{ij}}{(m_{ij}+1)}} \end{aligned} \quad (6)$$

단축응력상태에서 $D'_{ij} = 1$ 이면 파단된다. 복합응력상태에 있어서 여러개의 D'_{ij} 에 의한 재료내부의 손상상태가 표시된다. 이미 서술한 것과 같이 피로수명은 시험조건 등에 의하여 일률적으로 정해지지 않으면 안되기 때문에 손상의 대표값이 필요하다. 재료내부의 손상상태는 텐서량으로 있으며⁽²⁴⁾ 응력, 변형률의 2계의 텐서량으로 표시되기 때문에 이들과 유사한 형으로 손상텐서 $[D'_{ij}]$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$[D'_{ij}] = \begin{bmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{13} \\ D'_{21} & D'_{22} & D'_{23} \\ D'_{31} & D'_{32} & D'_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

최대주손상 D^* 가 재료의 내부손상 상태를 지배한다고 고려되기 때문에 최대주손상 D^* 를 손상텐서 $[D'_{ij}]$ 의 최대고유치 λ_{\max} 로써 정의한다.

$$\det \begin{bmatrix} D'_{11} - \lambda & D'_{12} & D'_{13} \\ D'_{21} & D'_{22} - \lambda & D'_{23} \\ D'_{31} & D'_{32} & D'_{33} - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

$$D^* = \lambda_{\max} \quad (9)$$

D^* 는 0에서 1까지의 값은 비가역적으로 변화하여

$D^* = 0$: 미시험 상태

$0 < D^* < 1$: 손상을 받는 상태

$D^* = 1$: 파단

을 나타낸다.

3. 반복응력해석 프로그램

균열이 없는 균질재료나 임의의 균열이 있는 등방성 및 이방성 물질을 해석할 수 있도록 설계하였으며 경계와 내부점에 있어서 변형률 에너지 밀도와 전단응력, 주응력, 응력, 변위 등의 경계트랙션(traction)의 계산과 임의의 미소 직선 형상으로 정의 될 수 있는 2차 불연속 요소의 양쪽의 경계를 자동 생성하고 반복응력 해석시 자동 노-리메싱(no-remeshing) 해석하여 계산한다^(25,26).

피로수명은 조합반복하중에 의한 피로균열 성장을 균열 경로가 미소직선으로 가정된 균열확장 증분해석으로 최대 고유치를 계산한다. 균열성장 증분의 방향은 최대주응력 크라이테리온(criterion)에 의하여 예측되어지며 균열성장의 구분을 위하여 수정된다. 계산된 방향에 따라서 균열은 한 단계씩 증가한다. 인접요소의 상대적인 크기와 관련된 수치 문제를 해결하기 위하여 균열증분길이는 균열선단요소의 크기의 항으로 정의된 유효한계 경계를 유지한다.

3.1 최대주응력 크라이테리온(criterion)

최대주응력 크라이테리온은 균열성장이 최대주응력의 수

직방향으로 진행된다고 가정한다. 국소 균열성장방향 θ_i 는 국소전단응력이 0이 되는 상태에 의하여 결정되며 다음과 같이 표현된다.

$$K_I \sin \theta_i + K_{II} (3 \cos \theta_i - 1) = 0 \quad (10)$$

여기서 K_I, K_{II} 는 모드 I, 모드 II의 응력확대계수이다. θ_i 는 균열궤적에 직교하는 좌표계이며 중심이 균열선 단이고 균열선단 전면축으로부터 측정되는 값이다.

균열증분해석에 있어서 식 (10)에 의하여 예측되어지는 균열궤적의 궤도는 실제 균열확장 증분의 방향을 수정하도록 한다. n 번째 균열확장증분의 방향을 정의하기 위하여 Fig. 1과 같이 최대주응력 크라이테리온에 의하여 예측되어지는 접선 방향 $\theta_{\kappa(n)}$ 에 수정각 β 를 도입한다. 이 수정각은 $\theta_{\kappa(n+1)}$ 가 다음 균열확장증분의 방향인 경우 $\beta = \frac{\theta_{\kappa(n+1)}}{2}$ 로 주어지며 최대주응력 크라이테리온에 의하여 계산된다. 이 예측 수정절차는 수정이 이전의 것보다 작을 때 적용할 수 있다.

3.2 프로그램의 검증

본 프로그램의 검증을 위하여 균질등방 탄성체를 대상으로 Fig. 2에 표시한 것과 같이 Srawley⁽¹⁹⁾의 해석모델과 동일한 모델인 CT 시험편에 대하여 대칭성을 고려하여 시험편의 1/2 영역을 53요소로 요소분할하여 해석하였다. 해석

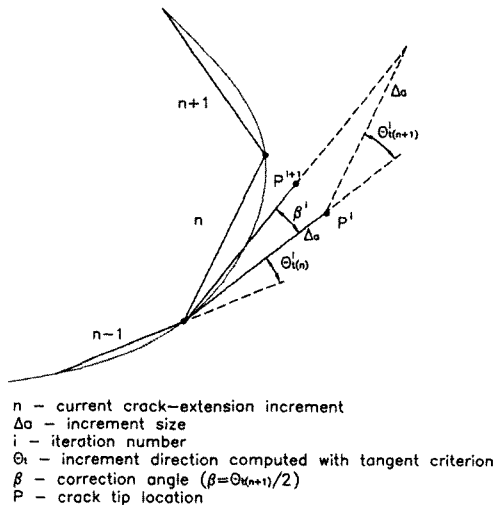


Fig. 1 Incremental crack-extension direction

한 결과를 Table 1에 표시하며 오차는 3.7% 이내의 좋은 일치를 보여주고 있으며 Fig. 3은 CT 시험편의 요소분할도이다. 균열확장 증분해석을 위하여 Flaker⁽²⁰⁾ 등이 변동하중아래에서 치차의 이뿌리에서 균열전파 해석을 동일모델 Fig. 4와 같이 하여 해석하였으며 해석한 결과를 Fig. 5에 표시하며 5% 이내의 좋은 일치를 보여주고 있다. 따라서 이상의 샘플 테스트 결과 본 프로그램의 유효성을 확인할 수 있었다.

4. 수치해석 및 고찰

Fig. 6과 같은 평직물 유리섬유강화 불포화 폴리에스테르 수지제품 박판 원통형 시험편에 인장-비틀림 이축 조합반복하중을 적용하여 경계요소법으로 수치해석을 하였다. 수치

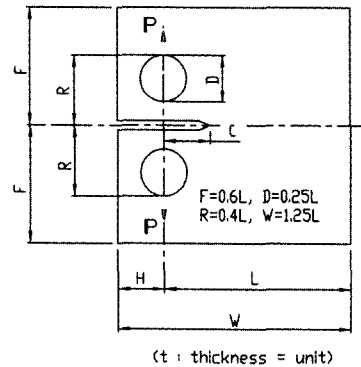


Fig. 2 Geometry of CT specimen

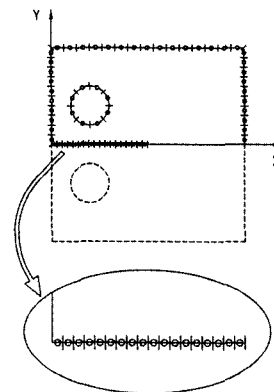


Fig. 3 Mesh pattern of CT specimen

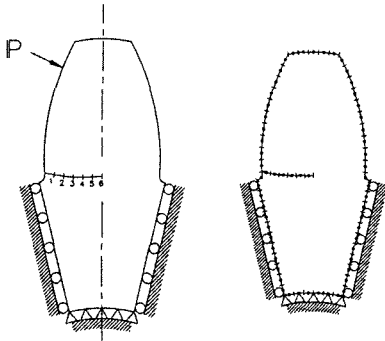


Fig. 4 Model geometry with applied loading

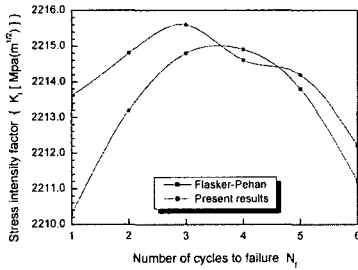


Fig. 5 Stress intensity factors crack growth for the gear tooth

Table 1 Stress intensity factor of compact test specimen

c / L	Present results	Srawley ⁽¹⁹⁾
0.1	3.440	-
0.2	4.433	4.274
0.3	5.725	5.621
0.4	7.302	7.279
0.5	9.658	9.659
0.6	13.660	13.650
0.7	21.440	21.450
0.8	41.250	41.200

해석은 균열이 성장할 때 마다 최대고유치를 계산하였다. 요소는 고차요소로 3차원 경계요소법 프로그램을 개발하여 수치해석 하였다. 사용한 컴퓨터는 IBM PC(Pentium, 2.4 GHz, RAM 1GB) 호환기종으로 계산시간은 문제당 50분 정도 소요되었다. 시험편의 형상은 지름 ($2R$) = 50, 길이 ($2L$) = 300인 박판 원통형 시험편을 Fig. 7과 같은 축대

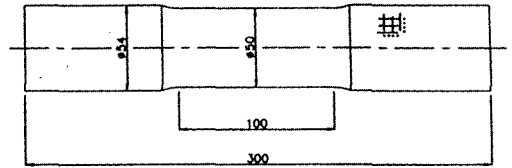


Fig. 6 Thin-walled cylindrical specimen

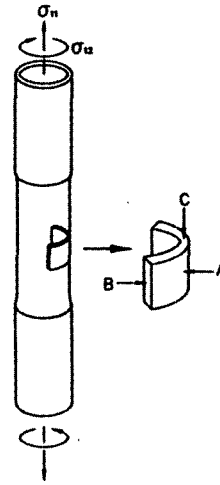


Fig. 7 Geometry of test specimen

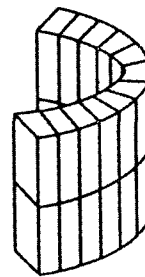


Fig. 8 Mesh pattern of test specimen

칭을 고려하여 요소의 1/8 부분을 평면응력 상태에서 총요소수를 164요소로 요소분할 하였다. Fig. 8은 요소분할을 표시한 것이다.

Fig. 9~Fig. 11에 최대주손상 D^* 를 사용하여 예측한 피로수명과 경계요소법 비례부하 피로수치해석에 의한 결과와 비교를 나타낸다. 각 그림의 종축은 정적강도로 무차원화하

였다. 그림중의 곡선은 손상텐서, 최대주손상을 사용하여 예측한 피로수명곡선이다. 재료상수 m_{ij} , c_{ij} 를 구하기 위하여 $-\frac{1}{E_{ij}^{(0)}} \frac{dE_{ij}^{(N)}}{dN}$ 과 $\frac{\sigma_{ijmax}^2}{1 - E_{ij}^{(N)}/E_{ij}^{(0)}}$ 의 관계를 Fig. 12, Fig. 13에 표시한다. 재료상수 m_{ij} , c_{ij} 는 각각 최소자승법을 사용하여 그림중의 직선의 기울기와 위치로부터 구하였다.

$$\begin{aligned} m_{11} &= 7.06 \\ c_{11} &= 1.35e-40 \\ m_{12} &= 8.68 \\ c_{12} &= 1.00e-37 \end{aligned}$$

반복횟수와 잔류강성의 관계를 Fig. 14, Fig. 15에 표시한다. 종축은 초기강성으로 무차원화 하였다. 그림 중에 곡선은 재료상수 m_{ij} , c_{ij} 를 식 (5)에 대입하여 계산한 잔류강성이다. 잔류강성은 1사이클때 급격하게 저하하고 그 이후는 완만하게 저하하여 파단에 이르게 된다. 또한 최대 반복응력의 크기에 의존하지 않는 파단시의 강성은 동등하다. 이들의 그림에 의하여 D_{11c} , D_{12c} 를 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} D_{11c} &= 0.200 \\ D_{12c} &= 0.382 \end{aligned}$$

인장-비틀림 이축조합하중(수직-전단복합응력) 아래에서 손상텐서의 고유다항식 (8)은 다음과 같이 표시된다.

$$\det \begin{bmatrix} D_{11} - \lambda & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

식 (11)에 의하여 최대주손상 D^* ($= \lambda_{max}$)는 다음과 같이 표시된다.

$$D^* = \frac{D_{11} + \sqrt{D_{11}^2 + 4D_{12}^2}}{2} \quad (12)$$

식 (12)를 사용하여 예측한 복합응력아래의 피로수명은 경계요소법에 의한 수치해석 결과와 좋은 일치를 나타내고 있다. 다른 조합응력비에서 예측된 피로수명과 수치해석 결과의 비교, 검정을 위하여 참고문헌 (18) 중의 시험결과를 사용한 피로수명 예측과 수치해석 결과와의 비교를 하였다. 참고문헌 (18)에서 사용되어진 시험편의 소재구성, 기계적

특성, 정적강도를 Table 2 ~ Table 4에 표시한다. 또한 재료상수 m_{ij} , c_{ij} 를 구하기 위하여 $-\frac{1}{E_{ij}^{(0)}} \frac{dE_{ij}^{(N)}}{dN}$ 과 $\frac{\sigma_{ijmax}^2}{1 - E_{ij}^{(N)}/E_{ij}^{(0)}}$ 의 관계 Fig. 16, Fig. 17에, 반복횟수와 잔류강성의 관계를 Fig. 18, Fig. 19에 표시한다. 이들의 그림에 의하여 6개의 재료상수는 각각 다음과 같이 구하였다.

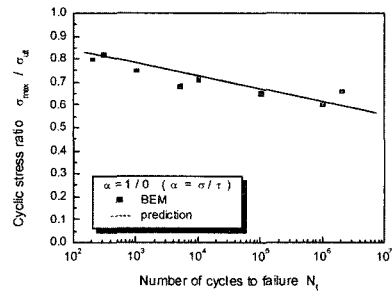


Fig. 9 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones

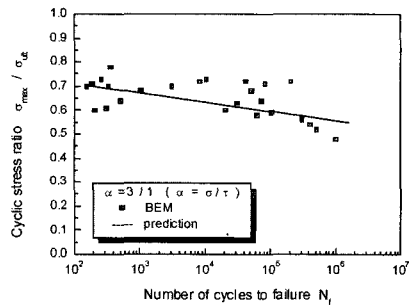


Fig. 10 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones

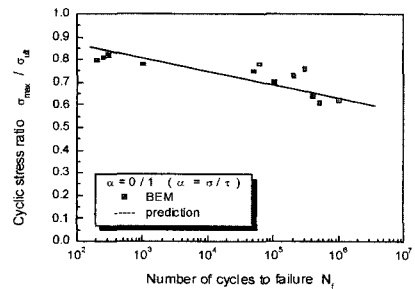


Fig. 11 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones

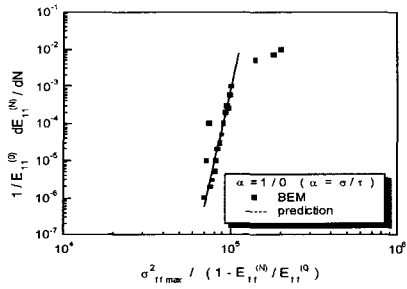


Fig. 12 A plot of equation (3)

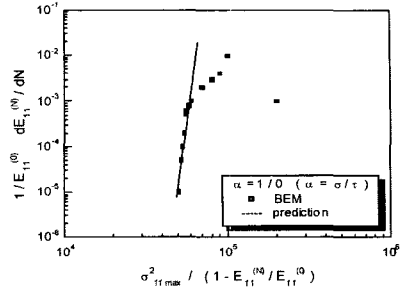


Fig. 16 A plot of equation (3)(data from ref.(18))

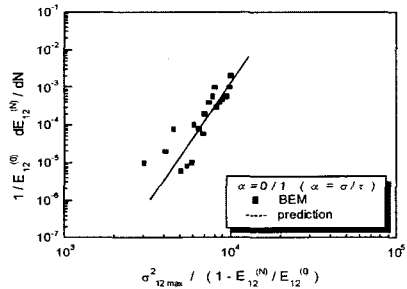


Fig. 13 A plot of equation (3)

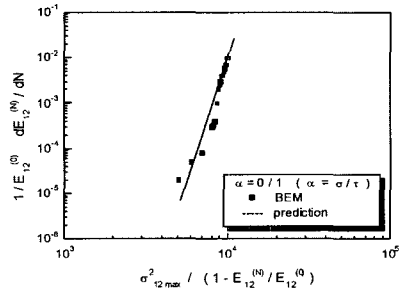


Fig. 17 A plot of equation (3)(data from ref.(18))

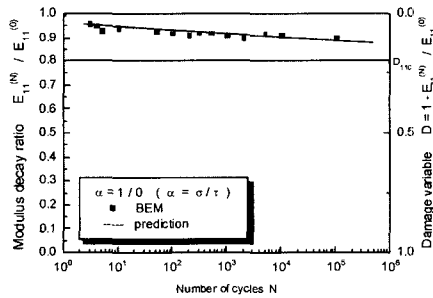


Fig. 14 Comparison of predicted modulus decay ratio and experimental ones

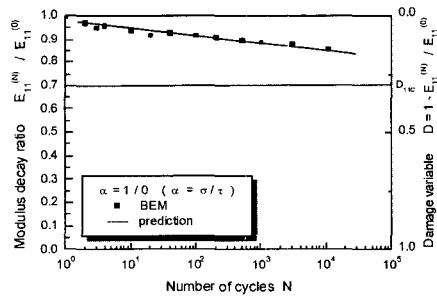


Fig. 18 Comparison of predicted modulus decay ratio and experimental ones(data from ref.(18))

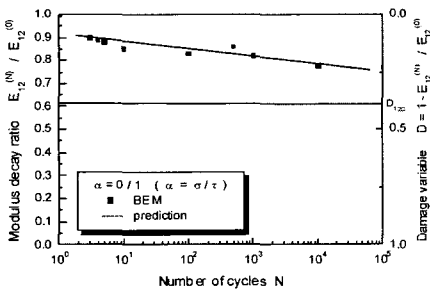


Fig. 15 Comparison of predicted modulus decay ratio and experimental ones

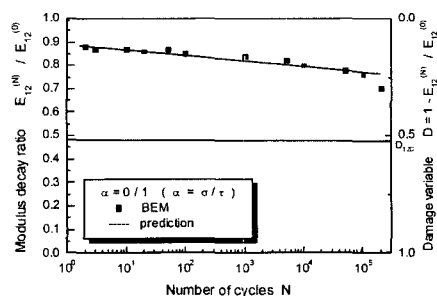


Fig. 19 Comparison of predicted modulus decay ratio and experimental ones(data from ref.(18))

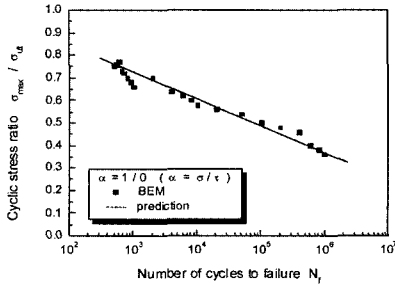


Fig. 20 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

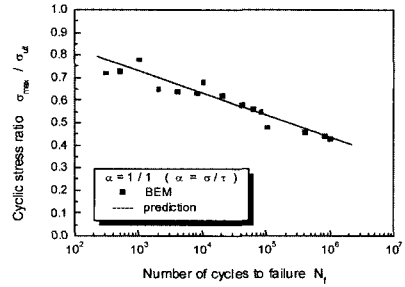


Fig. 23 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

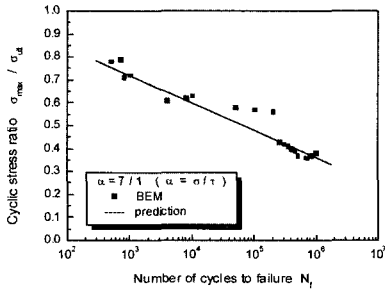


Fig. 21 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

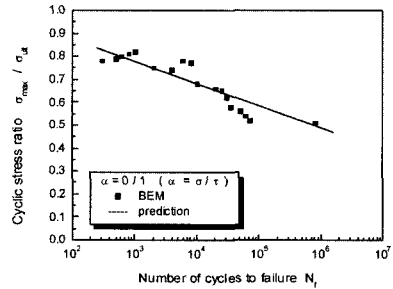


Fig. 24 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

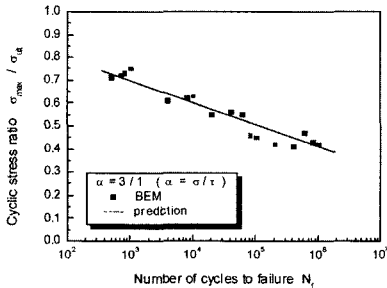


Fig. 22 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

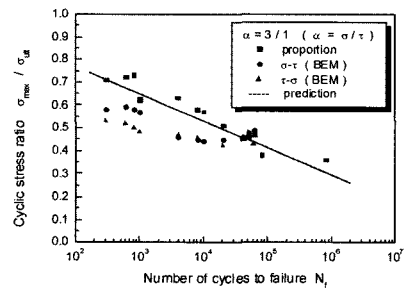


Fig. 25 Comparison of predicted fatigue lives with experimental ones(data from ref.(18))

$$\begin{aligned}
 m_{11} &= 5.32 \\
 c_{11} &= 8.45e-31 \\
 m_{12} &= 6.11 \\
 c_{12} &= 3.65e-28 \\
 D_{11c} &= 0.30 \\
 D_{12c} &= 0.52
 \end{aligned}$$

이들의 값을 사용하여 계산한 피로수명과 경계요소법에 의한 수치해석 결과의 비교를 Fig. 20~Fig. 25에 표시한다. Fig. 20~Fig. 25에 의하여 조합응력비는 반복응력에

의존하지 않는 것을 알 수 있다. 식 (12)를 사용하여 예측한 복합응력아래에서 피로수명은 경계요소법에 의한 수치해석 결과와 좋은 일치를 표시하는 것을 알았다.

5. 결론

연속체 손상역학을 사용하여 복합응력을 받는 FRP의 피로수명 예측법을 제안하였다. 편심 반복하중을 받는 최대

Table 2 Composition of the specimen(data from ref.(18))

Matrix	Polyester resin(Polylite FG-284)
Reinforcement	Plain woven glass cloth(MG-252)
Volume fraction	35.7%(7 plies)
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardner	Cobalt naphthenate 6% solution

Table 3 Mechanical properties of the specimen(data from ref.(18))

Young's modulus	$E_{11} = 16.95 \text{ GPa}$
Shear modulus	$G_{12} = 3.515 \text{ GPa}$
Poisson's ratio	$\nu_{12} = 0.14$

Table 4 Ultimate strengths of the specimen under static loading(data from ref.(18))

Combined stress ratio, α	Tensile strength $\sigma_{1ult}(\text{MPa})$	Shear strength $\sigma_{12ult}(\text{MPa})$
1 / 0	224.3	-
7 / 1	208.0	29.71
3 / 1	174.5	58.17
1 / 1	83.5	83.53
0 / 1	-	73.19

응력상태에 도달할 때까지 부하경로의 틀림은 내부손상이나 강성의 변화에는 영향은 미치지만 잔류강도에는 그다지 영향을 주지않는 것이 확인되었다. 그래서 본 연구에서 표시한 예측법은 최대응력 상태와 반복횟수를 변수로 손상변수의 변화를 예측하였다. 특히 최대응력상태에 도달할 때까지의 부하경로는 강성저하율에 영향을 미치지 때문에 부하경로의 틀림도 고려한 강성저하율의 예측법 및 피로수명 예측법의 확립이 필요하므로 손상역학적 방법인 최대주손상을 사용하여 복합응력상태에서 예측한 피로수명과 경계요소법에 의한 수치해석 결과를 비교할 때 좋은 일치를 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) Miner, M. A., 1945, "Cumulative damage in fatigue," *J. Appl. Mech.*, 12, pp. 159~164.
- (2) Downing, S. D., and Socie, D. F., 1982, "Simple rainflow counting algorithms," *Int. J. Fatigue*, Vol. 4, pp. 31~40.
- (3) Reifsnider, K. L., and Jamison, R., 1982, "Fracture of fatigue-loaded composite laminates," *Int. J. Fatigue*, Oct., pp. 187~197.
- (4) Caprion, G., Halpin, J. C., and Nicolais, L., 1979, "Fracture mechanics in composite materials," *Composite*, Oct., pp. 223~227.
- (5) Murakami, S., 1982, "Damage Mechanics- Continuum Mechanics Approach to Damage and Fracture of Materials-," *materials*, Vol. 31, No. 340, pp. 1~13.
- (6) Zako, M., Tsujikami, T., and Yoshizawa, H., 1990, "A Method of Fatigue Life Prediction for Composite Materials-In Case of Prediction based on the Extension Mode-," *Materials*, Vol. 39, No. 441, pp. 701~705.
- (7) Krempf, E., and Miu, T.-M., 1982, "Graphite/ Epoxy [45]_s Tubes. Their Static Axial and Shear Properties and Their Fatigue Behavior under Completely Reversed Load Controlled Loading," *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 172~ 187.
- (8) Iwasaki, C., Ikai, Y., and Matsuda, M., 1986, "Estimation of fatigue Damage by Means of Internal Stress and Effective Stress," *Materials*, Vol. 36, No. 409, pp. 1046~1052.
- (9) Charzewicz, A., and Daniel, I. M., 1986, "Damage Mechanisms and Accumulation in Graphite/Epoxy Laminates," *Composite Material: Fatigue and Fracture, ASTM STP 907*, pp. 204~297.
- (10) Poursartip, A., and Beaumont, P. W. R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fibre Composite Laminate: I -Measurements Damage and Strength," *Composite Science and Technology*, Vol. 25, pp. 193~218.
- (11) Poursartip, A., and Beaumont, P. W. R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fibre Composite Laminate: II -Life Prediction," *Composite Science and Technology*, Vol. 25, pp. 283~299.
- (12) Smiley, A. J., and Pipes, R. B., 1986, "Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 670~687.
- (13) Hwang, W., and Han, K. S., 1986, "Fatigue of

- Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *J. Composite Materials*, Vol. 20, pp. 154~165.
- (14) Charewicz, A., and Daniel, I. M., 1986, "Damage Mechanisms and Accumulation in Graphite/ Epoxy Laminates," *ASTM 907*, pp. 274~297.
- (15) Krajcinovic, L., 1987, "Continuum Damage Mechanics Theory and Applications," *Courses and Lectures*, No. 295.
- (16) Jessen, S. M., and Plumtree, A., 1991, "Continuum damage mechanics applied to cyclic behavior of a glass fibre composite pultrusion," *Composite*, Vol. 22, No. 3, pp. 181~190.
- (17) Hashin, Z., 1981, "Fatigue failure criteria for combined cyclic stress," *Int. J. Fracture*, Vol. 17, pp. 101~109.
- (18) Morita, Y., Lin, F., and Fujii, T., 1995, "Fatigue Damage Evaluation of Plain Woven GFRP under Tension/Torsion Biaxial Loading," *JSME(A)*, Vol. 61, No. 583, pp. 493~500.
- (19) Srawley, J. E., 1976, "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens," *Int. J. Frac. Mech.*, Vol. 12, pp. 475~476.
- (20) Flasket, J., and Pehan, S., 1993, "Crack Propagation in Tooth Root with Variable Loading," *Comm.in Numer. Meth. in Eng.*, Vol. 9, pp. 103~110.
- (21) Murakami, S., 1988, "Mechanical Modeling of Material Damage," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 55, No. 2, pp. 22~28.
- (22) Ye, L., 1989, "On Fatigue Damage Accumulation and Material Degradation in Composite Materials," *Composite Science and Technology*, Vol. 39, pp. 339~350.
- (23) Sturgeon, J. B., 1997, "Fatigue of multi-directional carbon fibre-reinforced plastics," *Composite*, Oct., pp. 221~225.
- (24) Harris, B., 1997, "Fatigue and accumulation of damage in reinforced plastics," *Composites*, pp. 214~220.
- (25) Park, S. O., 2001, "Analysis of Spiral Bevel Gear by Inverse Problem," *Transaction of KSMTE*, Vol. 10, No. 5, pp. 85~95.
- (26) Park, S. O., 2003, "Analysis of Torque on Spur Gear by Inverse Problem," *Transaction of KSMTE*, Vol. 12, No. 5, pp. 24~33.