

## 섬유강화 복합재료 구조물 ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub>에 있어서 Creep과 Fatigue의 상호작용과 그의 Damage 발달에 대한 영향

### Interaction of Creep-Fatigue, and its Influence for the Damage Development in Composite Laminates ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub>

이 재 략\*

#### 서 론

근자에 이르러 carbon/epoxy 등을 중심으로 하는 고강도 복합재료가 항공기용 구조물, 각종 군용장비, 산업용 장비 및 우주산업 등에의 활용도가 나날이 증대되어 가고 있는 실정이다. 이러한 각종 구조물에서의 고강도 복합재료의 응용에 있어서 가장 중요한 문제로 손꼽히는 것은 여러가지 다양하고 반복적인 하중조건하에서 안전하게 사용이 가능한 수명의 예측과 damage의 축적문제(cumulative damage)라 하겠다. 따라서 이에대한 각종 연구가 지난 10여년 동안 활발히 추진되어 왔다. 그러나 기존의 금속재료에 비하여 고강도 복합재료는 최근에 이르러 항공구조물등에 이용되고 있으므로 이에대한 연구방법론으로 주로 금속재료에서 개발된 방법들이 흔히 원용되어 왔다. 이 과정에서 금속과 polymer matrix의 형태 및 damage development pattern의 상이점이 간파되는 수가 많았다. 고로 이러한 문제로 말미암아 특히 복잡한 loading system에 있어서의 damage problem의 해결에 있어서 많은 혼선을 빚어왔다.

그러므로 금속재료에서 관찰된 현상과 이를 토대로 이루어진 결과를 고분자 matrix를 가지는 고강도 복합재료에서 관찰되는 현상과 이를 토대로 이루어진 결과들을 대비함으로써 앞으로의 연구

방향 설정에 도움이 되고자 하는 것이 본 논문의 목적이다.

금속재료로 된 구조물에 있어서의 cumulative damage 문제에 대한 연구가 많이 이룩되어 왔다. 이러한 연구 방법론으로는 주로 아래의 두가지 접근방법이 유력하다.

- 1) Phenomenological approach
- 2) Crack propagation approach

금속재료의 damage 특성에 의하여 금속에서는 주로 2)의 접근방법이 유리하나 unnotched laminates에 있어서는 금속에서 처럼 하나의 가장 중요한 crack의 전파로 인하여 파괴가 일어난다기 보다는 쉽게 확인되기 힘든 많은 crack의 축적에 의한 파괴가 일어남으로 1)의 접근 방법이 더욱 유리하다<sup>1</sup>.

그러나 notched laminate의 경우는 금속에서 처럼 2)의 접근 방법이 더욱 적합하다 하겠다. 실제응용에 있어서 unnotched laminate와 notched laminate 두가지가 모두 사용됨으로 이 두가지 경우에 의한 각종 load하에서의 damage development를 총괄적으로 살펴보기로 한다.

실제로 응용되는 섬유강화 복합재료 구조물에 있어서의 두가지 기본 구조로는  $(0^\circ/90^\circ)$ <sub>2s</sub>와  $(\pm 45^\circ)$ <sub>2s</sub>를 들 수가 있다.

이중  $(0^\circ/90^\circ)$ <sub>2s</sub>는 fibre에 의한 영향이 매우 크

\* 한국화학연구소 재료시험실 (Jae-Rock Lee, KRICT, P. O. Box 9, DAEDEOG-DANJI, KOREA)

다. fibre는 creep이나 fatigue에 polymeric matrix에 비하여 둔감하므로 matrix의 특성이 행태에 많은 영향을 미치는  $(\pm 45^\circ)_{2s}$ 의 구조가 금속 재료와 대비하여 특징적인 면을 많이 보일 수 있으므로  $(\pm 45^\circ)_{2s}$ 의 구조를 택하였고, 최근 4~5년 사이에 활발히 연구주제가 되고 있는 fatigue와 creep이 동시에 작용하는 loading system 하에서의 행태 및 damage development를 중심으로 살펴보기로 하겠다. 실제 항공기가 운항할 때 발생하는 load를 간략하게 소개하면 다음의 Fig. 1과 같다.

이러한 실제의 loading system을 분석하기 위한 시험적 loading방법은 Fig. 2와 같다.

이외에도 많은 종류의 loading system이 존재할 수 있으나 편의상 그 종류를 위에 열거한 것들로 제한하기로 하겠다.

#### 관찰된 현상 및 토론

#### 대표적인 금속재료 stainless steel의 creep fatigue상태에서의 행태 및 damage mechanism

금속에서의 fatigue에 있어서의 energy dissipa-

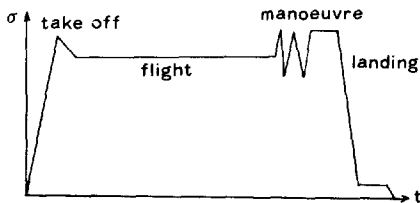


Fig. 1. Scheme of the flight loading system.

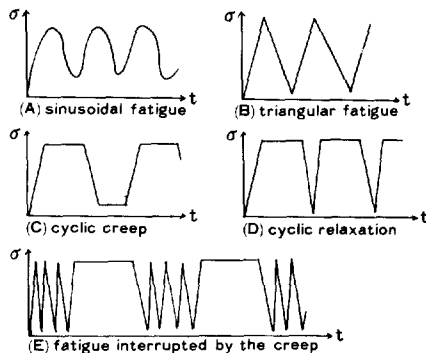


Fig. 2. Various loading histories for the simulation of the real loading systems.

tion은 주로 plastic deformation에 의한 것인데 이 에너지의 대부분은 열로 변화되어 strain energy로 재생되지 못하고 fatigue toughness는 주어진 물질에 대하여 피로수명 (no. of fatigue cycle to failure)이 길어질수록 증가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다<sup>2</sup>.

Hales<sup>3</sup>의 review에 의하면 stainless steel에 있어서 high strain fatigue는 대체로 crack propagation에 의해 주도되는 process로 알려져 있고 transgranular failure mode를 나타내고 creep의 경우에는 intergranular failure를 나타낸다. 정량적인 metallography 방법에 의하면 이러한 intergranular damage의 양은 축적된 relaxation strain에 비례하는 것으로 추정된다.

Fatigue와 creep의 interaction을 연구하기 위해서는 주로 높은 온도에서 low-cycle fatigue 실험을 함으로서 온도에 의한 creep 효과와 fatigue 효과를 동시에 유도하는데 한편으로는 elevated-temperature fatigue로 표현할 수도 있는 것 같다.

Naomi<sup>4</sup>에 의하면 push-pull test에 있어서의 strain hold time의 피로수명에 대한 영향은 torsional test에 있어서의 strain hold time의 피로수명에 대한 영향보다 크고 strain hold time이 증가할수록 점진적으로 피로수명이 감소하였는데 이의 영향은 intergranular damage에 대한 loading type의 영향으로 밝혀졌다<sup>5</sup>.

Plumbridge<sup>6</sup>의 결과에 의하면 tension-only dwell이 compression-only dwell보다 더욱 damage를 많이 초래하고 intermediate stress level이나 strain level에서의 hold period의 피로수명에 대한 영향은 peak value 있어서의 hold period의 피로수명에 대한 영향보다 적었다.

따라서 peak value 있어서의 영향이 낮은 수준에서의 것보다 더욱 영향을 미침을 알 수 있다.

결론적으로 말해서 stainless steel에 있어서의 damage mode는 granular type이므로 섬유강화복합재료에서 발생하는 damage mode와는 근본적인 차이가 있다고 하겠다.

섬유강화 고강도 복합재료에 있어서의 각종 현

상 및 damage mechanism ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub>의 구조에 있어서는 polymer matrix의 viscoelastic property가 행태에 많은 영향을 미치므로 creep에 대하여 매우 민감하다. 따라서 monotonic tensile test에 있어서도 strain rate<sup>7</sup>와 stress rate<sup>8</sup>가 그 행태 및 인장강도에 영향을 미친다. 또한 온도에 의해서 일어나는 creep이 매우 크고 non-linear하게 증가함이 알려져 있다<sup>9,10</sup>.

그러므로 ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub> laminates들의 fatigue에 있어서의 행태는 그 온도와 frequency에 따라 영향을 받게 된다. Sun<sup>11</sup>에 의하면 시편의 가운데 구멍을 뚫어서 온도를 측정한 결과 frequency와 load level이 높아지면서 더욱 증가하였고 total failure 근처에서 급격히 증가하였다.

또한 load level이 다른 경우에는 frequency가 증가함에 따라 피로 수명이 증가하였는데 load level이 높은 경우에는 반대의 현상이 일어났다.

이것은 load level의 피로수명에 대한 영향을 나타내고 있다.

이 경우에 있어서 frequency가 3Hz이하인 경우에는 온도증가가 미미하였으나 10Hz에 있어서는 초기에 약 6°C 정도 온도가 증가하고 최종 파괴에 가까운 점에서는 약 17°C의 온도 증가를 보였다. 그 이상의 frequency에서는 더욱 격렬한 온도 증가 형태를 보였는데 이는 damage region에 있어서의 internal friction이 frequency가 높아질수록 증가되는 것을 나타낸다.

10Hz의 경우는 intermediate load level에 있어서 cyclic load의 peak value에서 creep에 의한 interrupt가 일어나도록 하였을 때, creep time이 증가할수록 피로수명(no. of cycles to failure)이 증가하였다<sup>12</sup>. 이러한 현상은 creep load에 있어서 matrix의 creep에 의해서 crack tip에 permanent strain을 발생시켜 그 부분의 stress intensity를 감소시켜서 crack의 성장을 저하시키는데 이러한 permanent strain은 creep time에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 fatigue retardation현상은 static creep load 하에서의 permanent strain의 발생과 cyclic

loading에 따른 온도증가에 의한 matrix ductility의 증가 두가지의 상호작용에 의한 것으로 추론된다.

Rotem<sup>13</sup>에 의해서 strain controlled fatigue에 있어서 unnotched laminates에 대한 온도 영향이 조사되었다. 모든 laminates가 약간의 relaxation period를 보인후에 파괴되었는데 이때의 strain level은 unidirectional lamina(45°)의 strain level 보다 낮았다. 이것은 ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub>의 구조에 있어서의 damping이 maximum shear coupling과 깊은 관련이 있음을 나타낸다 하겠다.

Fatigue하에서 frequency의 영향은 time-under-load에 따른 차이라고도 할 수 있는데 Reifsnider<sup>14</sup>에 의하면 load control에 의해서 발생한 damage(modulus의 감소로 표시)는 frequency가 낮을수록 더욱 심하였고 low-frequency cycling은 더 높은 frequency의 경우보다 더욱 집중된 damaged zone을 보여준다. 이는 creep의 영향이라 할 수 있다.

Yoon<sup>15</sup>에 의하면 2Hz에서 보다 0.1Hz에서의 피로수명과 minimum deformation이 적고 maximum deformation이 큰 것은 0.1Hz의 경우에 있어 작용하는 creep의 영향을 나타낸다.

이러한 creep의 영향으로 0.1Hz에 있어서의 free edge에 있어서의 피로 수명의 함수로 표시된 crack density가 2Hz의 경우보다 큼을 알 수 있다. 순수한 creep에 있어서의 crack density의 변화는 logarithmic function과 유사한 non-linear form을 보이는데<sup>15</sup>, 이의 결과로 Poisson's ratio가 계속 변화하는데 이는 점진적인 crack의 발생과 내부로의 전파에 기인하고 matrix의 ductility가 증가할수록 crack density가 증가하는 경향이 있다<sup>16</sup>.

Sturgeon<sup>17</sup>의 repeated creep test의 결과에 의하면 permanent deformation은 꾸준히 증가해 가는 반면 creep recovery strain의 양은 어느 정도 증가하다가 다시 감소함을 보여준다. 따라서 permanent deformation은 damage의 발전을 직접적으로 표현하는 parameter로 간주될 수 있

고 matrix의 viscoelasticity는 damage에 의한 복잡한 영향을 받음을 알 수 있다.

Cyclic creep에 있어서는 creep time이 짧을수록 total deformation 및 total acoustic emission count가 증가하였다. 이러한 것은 cyclic relaxation에서도 마찬가지였으나 cyclic creep이 cyclic relaxation에서 보다 더욱 많은 acoustic emission을 발생시켰다. 이 경우에 resin ductility가 행태에 영향을 주었는데 T 300/5208의 경우에는 creep time이 적절히 짧은 경우에는 오히려 damage를 감소시키는 것이 발견 되었으나 T300/914는 위에 서술한 결과와 정확히 일치하였다. T300/914에 있어서의 crack accumulation은 분산되어 있었으나 T 300/5208에 있어서는 국부화되어 있었다<sup>18</sup>.

Favre<sup>19</sup>에 의한 tension-compression fatigue test의 결과에 의하면 T 300/5208의 경우에 있어서는 total loading time과 no. of cycles만으로는 fatigue에 있어서의 행태를 정확하게 서술하는데는 부족하다는 것이 밝혀졌다.

이는 matrix의 viscoelastic property와 plastic deformation에 대한 좀더 포괄적인 연구가 필요함을 의미한다. 따라서 저자는<sup>6</sup> load level을 변화시켜 가면서 2 Hz 정도의 medium frequency cyclic test에서 fatigue cycle의 최대 load level에서 creep에 의한 fatigue의 interruption을 유도하였다. 이 경우에 creep time을 150초 정도로 유지하여 Goyau<sup>18</sup>의 결과를 바탕으로 새로운 현상을 추구하였다.

Load level에 따라 fatigue cycle의 수를 적절히 조절하여 bloc을 형성하여 적절한 creep-fatigue interaction을 유도하였다. 이 경우의 total deformation 항상 fatigue 보다 크고 creep time에 불구하고 T 300/5208에 있어서 피로 수명은 거의 감소가 없었고 T 300/914의 경우는 피로 수명이 수배로 증가되었다.

따라서 creep-fatigue interaction에 있어서 resin의 ductility가 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있고 T300/5208에 있어서도 load level이 낮은 경

우에는 뚜렷한 creep에 의한 damage retardation 현상이 관찰되었다. 이 경우에 X-ray에 의한 관찰결과는 fatigue test에 있어서와 마찬가지로 몇개의 중요한 crack들이 시편 가운데로 전파되어 최종적인 파괴를 유도하나 그외에 미세한 crack들이 시편전체에 더욱 많이 발생하는 것이 하나의 원인으로 추론된다.

T 300/914의 경우 fatigue-creep의 경우에 있어서의 acoustic emission은 fatigue의 경우보다 현저히 감소한다. 이는 creep에 의해서 stress 재분배가 일어나서 stress concentration을 방지해 주기 때문이라고 볼 수 있다.

따라서 low-cycle fatigue, cyclic creep, fatigue interrupted by creep 등에서 고려되어야 할 creep-fatigue interaction의 damage의 축적 양상은 matrix의 viscoelastic property에 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

## 결론

항공기 및 각종 초경량, 고강도 구조물로 쓰이는 섬유강화 복합재료의 기초구조인( $\pm 45^\circ$ )<sub>2s</sub>에 있어서 matrix의 viscoelastic property가 행태 및 damage 축적 양상에 많은 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 더욱 심화되어야겠다.

이러한 연구의 경우에 금속에서 얻어진 결과들을 직접 대입하려는 시도는 지양되어야 하겠고 polymer matrix 특유의 물성 및 fracture mechanism에 대한 이해가 수반되어야 하겠다.

## 참고문헌

1. Z. Hashin, "Cumulative Damage Theory for composite materials: residual life and residual strength methods," Composite science and technology 23 1 (1985).
2. B.I. Sandor, "Fundamentals of cyclic stress and strain," The Univ. of Wisconsin Press. 1977 pp. 55-84.
3. R. Hales, "A Method of creep damage summation based on accumulated strain for the

- assessment of creep-fatigue endurance," Fatigue of engineering materials and structures vol. 6 No. 2 pp. 121-135 1983.
4. N. Hamada, M. Sakane, and M. Ohami, "Creep-fatigue studies under a biaxial stress state at elevated temperature," Fatigue engng. Mater. Struct. Vol. No. 1, pp. 85-96, 1984.
  5. C. Levaillant and A. Pineau, "Assessment of high-temperature low cycle fatigue life of austenitic stainless steels by using intergranular damage as a correlating parameter," ASTM STP 770, 1982 pp. 169-193.
  6. W.J. Plumbridge, M.S. Dean and D.A. Miller, "The importance of failure mode in fatigue-creep interactions" Fatigue of engineering materials and structures vol 5. No 1 pp. 101-114, 1982.
  7. J.M. Lifshitz, "Strain rate, temperature, and humidity influences on strength and moduli of a graphite/epoxy composite" Composite technology review vol. 4, No. 1, spring 1982 pp. 14-19.
  8. J.R. Lee, "Etude et modelisation de l'endommagement des stratifiés Carbone-Epoxy ( $\pm 45^\circ$ )<sub>2S</sub> et (0°/90°)<sub>2S</sub>", Thesis for docteur ingénieur. U.T.C. Nov. 1985.
  9. D.J. Chwirut, "Tensile creep of angle-ply boron/epoxy laminates," J. of testing and evaluation, JTEVA, vol. 3, No. 6, pp. 442-448.
  10. F.Y. Soliman, "Creep and rupture of graphite-epoxy composites," ASTM STP 460, 1969. pp. 254-270.
  11. C.T. Sun and W.S. Chan, "Frequency effect on the fatigue life of a laminated composite," ASTM STP 674, 1979, pp. 418-430.
  12. C.T. Sun and E.S. Chim, "Fatigue retardation due to creep in a fibrous composites" ASTM STP 723, 1981, pp. 233-242.
  13. A. Rotem, "Fatigue mechanism of multi directional laminate under ambient and elevated temperature" ICCM 3, Paris, 1980, pp. 146-161.
  14. K.L. Reifsnider, W.W. Stinchcomb, and T.K.O. Brien, ASTM STP 636, 171 (1977).
  15. B.I. Yoon "Croissance de l'endommagement et évolution du comportement des stratifiés carbone-epoxy en fonction des sollicitations: Cas du fluage et de la fatigue," Thesis for docteur ingénieur U.T.C. Dec. 1984.
  16. P. Sigety and J.P. Favre, "Interaction fatigue-fluage dans les composites Carbone-Resine," ONERA 37/7086M dec. 1982.
  17. J.B. Sturgeon, "Creep, repeated loading, fatigue and crack growth in  $\pm 45^\circ$  Oriented carbon fibre reinforced plastics" J. Mater. Sci., 13 1490 (1978).
  18. G. Goyau and C. Cazeneuve, "Fatigue-fluage de materiau composites, avec suivi des Endommagements par emission acoustique et controles ultrasonores," ETCA. No 83-R-011 Nov. 1982.
  19. J.P. Favre, P. Sigety and C. Marais, "Interaction fatigue-fluage dans les composites carbone-resine  $\pm 45^\circ$ ," ONERA 40/7086 M. March 1984.
  20. H. Kraus, "Creep analysis," John wiley and sons, New York, 1981, pp. 218-247.