

하중이력이 터빈용 세라믹 복합재료의 크리프에 미치는 영향

박용환

호서대학교 안전공학부

1. 서론

최근 국내외적으로 터빈 블레이드 등 항공기 및 자동차의 엔진부품이나 발전설비 부품에 있어서 고온 발생 부위에는 기존의 금속제 부품 대신 내열성능이 뛰어난 세라믹스 부품이 그 대체 재료로서 큰 주목을 받고 있다. 특히 강도나 인성 등 monolith 세라믹스의 기계적 특성 부족을 보완하기 위하여 고강도 세라믹 휘스커나 장섬유를 이용하여 기계적 특성을 향상시킨 새로운 세라믹 복합재료의 개발에도 많은 노력을 기울이고 있다¹⁻²⁾. 그러나, 세라믹 부품도 고온에서는 크리프가 일어나서 치수 변화 및 강도 저하로 이어질 수 있으며, 심한 경우에는 파손에까지 이룸으로써, 작업중단 또는 대형사고로 이어져 막대한 인명 및 경제적인 손실을 초래할 수 있다. 따라서, 크리프 특성이 우수한 소재 개발을 위해서는 고온에서의 정확한 거시적 또는 미시적 거동 규명이 필수적이다.

본 연구에서는 최근 선진국에서 가스터빈 블레이드 소재로서 관심을 끌고 있는 $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$ 세라믹 복합재료의 고온 크리프 특성을 규명함에 있어, 실제 운전 중에 부품 특성에 따라 발생할 수 있는 여러 가지 형태의 하중이력 사이클에 대하여 크리프 특성이 어떻게 영향을 받을 것이며, 그 원인은 무엇인지를 조사하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 세라믹스의 크리프/회복 거동

세라믹스에 있어서의 고온 크리프 변형 단계는 일반 금속에서와 마찬가지로 대개 primary stage, steady-state stage, 그리고 tertiary stage의 3단계로 구분되며, 이 때 일정 온도 하에서 steady-state 구간에서의 크리프율($\dot{\epsilon}_s$)은 다음과 같이 작용 응력에 대한 power law로 표시된다³⁾.

$$\dot{\epsilon}_s = A \sigma^n \quad (1)$$

여기서 A 는 상수, σ 는 작용 응력을 나타낸다. 응력 지수 n 은 로그 스케일의 크리프-응력 선도에서 직선 기울기를 말하는 데, 해당 온도에서의 크리프 메커니즘을 나타내는 지표로 알려져 있다. 유사한 Si_3N_4 라 하더라도 재료 상태 및 제조 공법에 따라 n 은 1 ~ 5까지 다양한 값을 지니고 있는데, 본 연구에서 사용된 hot-press용 Si_3N_4 의 경우 $n \approx 2$ 로서 주로 입계면 간의 공동이나 크랙 형성에 의한 입계면 미끄럼(grain boundary sliding)에 의해 크리프가 진행되는 것으로 알려져 있다³⁾.

강화재료인 CVD SCS-6 SiC 모노필라멘트 섬유는 대부분의 세라믹스와는 달리 primary creep 거동 이후에도 steady-state creep의 뚜렷한 구별이 나타나지 않는 비선형 거동을 하고 있으며, 다음 식으로 표시될 수 있다고 하였다⁴⁾.

$$\dot{\epsilon}_t = B \sigma^n t^m \quad (-1 < m \leq 0) \quad (2)$$

여기서 B 는 상수, n 은 응력 지수를 나타낸다. m 은 시간지수로서 부호가 음이고 크기는 1보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다.

세라믹 복합재료는 각각의 크리프 특성이 다른 기지와 강화섬유의 조합으로 되어 있어, 전체적인 크리프 거동도 기지와 섬유 각각의 특성에 큰 영향을 받는다. 많은 실험 결과에 의하면 현상학적으로는 대부분이 monolith 세라믹에서와 같이 3단계의 크리프 거동을 하며, 이 때 steady-state 구간의 거동도 (1)식으로 나타낼 수 있는 것으로 되어 있다.

한편, 고온에서 크리프 거동을 하고 있는 시험편에 작용응력을 갑자기 제거하게 되면 즉각적으로 탄성 변형률만큼 감소한 후, 시간이 경과함에 따라 변형률은 서서히 회복하고 일정량만큼의 영구변형이 남게 되는 데 이것을 크리프 회복(creep recovery)이라고 하며, 이러한 현상은 금속이나 플라스틱 뿐 아니라 고온의 세라믹스에서도 유사하게 일어나는 것으로 알려져 있다.

이와 같이 크리프와 크리프 회복 현상들은 실제 각종 기계 및 플랜트 설비의 가동 및 정지 과정에서 여러 형태로 조합 반복해서 나타나는 경우가 많으며⁵⁾, 이 때 가동 및 정지 등 하중이력 사이클 특성은 세라믹 복합재료의 경우에도 그 기계적 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3. 실험

3.1 시험편 및 시험 장치

본 연구에 사용된 시험편 재료는 핫-프레스로 성형된 일방향 $\text{SiC}_f/\text{Si}_3\text{N}_4$ 세라믹 복합재료로 부피비는 30vol%로 하였다. 시험온도는 최대 예상 사용온도인 1200°C로 하고,

시험편 가열은 표점거리 부분만 급속히 가열할 수 있도록 고안된 SiC 가열로를 직접 제작하여 사용하였다. 그립 부위는 최대한 가열이 되지 않도록 열 차단벽과 냉각 시스템을 장착하였으며, 로 내의 온도편차는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지하였다. 변형률의 측정은 두 개의 긴 세라믹 로드를 연결한 접촉식 익스텐소미터(extensometer)를 사용하여 표점거리에 대한 변형률을 직접 산출함으로써 최대한 정밀한 실험이 되도록 하였다.

3.2 시험 방법

하중이력 시험은 1200°C 공기 중에서 크리프 최대 응력 200MPa 에 대하여 실시하였다. 시험편에 가해지는 로딩/언로딩/loading/unloading) 과정에서의 크리프의 영향을 최소화하기 위하여 유압피로시험기의 로딩/언로딩을 약 100MPa/s 의 비교적 빠른 속도로 실시하였다. 하중이력 사이클은 1) 크리프 로딩 후 매 300sec 마다 신속한 언로딩/리로딩(unloading/reloading), 2) 300sec 로딩/ 300sec 언로딩의 단기 사이클과 3) 크리프 로딩 후 매 50hr 마다 신속한 언로딩/리로딩, 4) 50hr 로딩/ 50hr 언로딩의 장기 사이클의 4가지 경우를 설정하였다. 총 크리프 시간은 시험편이 파단되지 않는 경우 최고 200hr 까지로 하였다.

4. 실험 결과 및 해석

4.1 하중이력 시험

Fig. 1은 일방향 SiC_f/HPSN 시험편에 대하여 응력 200MPa 에서의 연속 크리프 곡선 대비 단기 사이클 하중이력 시험 결과 곡선을 서로 비교하여 나타낸 그림이다.

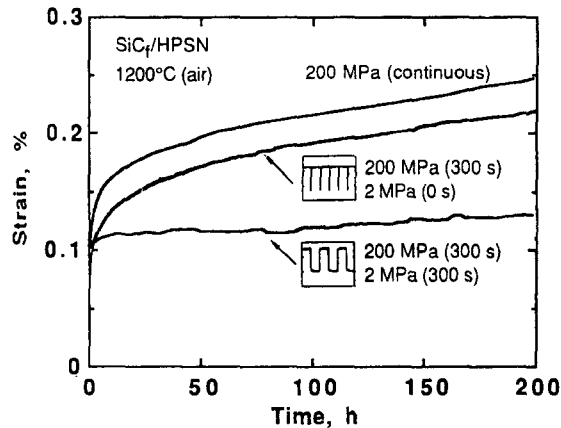


Fig. 1 The effect of short-term loading history

Fig. 1에서 단기 사이클 시에는 누적 크리프 양과 초기 크리프율 모두 연속 크리프 곡선에 비해 값이 훨씬 작게 나타나 크리프 거동이 단기하중이력에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 매 300sec 로딩/0sec 언로딩 곡선의 경우 연속 크리프 곡선에 비해 초기 크리프 거동이 억제되었으며, steady-state영역의 크리프율은 별다른 변화가 없었다. 이것은 본 재료에 있어서 primary 거동과 steady -state 거동이 거의 독립적인 메카니즘에 의해 지배되고 있으며, 순간 언로딩을 동반하는 단기 하중 이력도 primary 거동에 크게 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다. 즉, 매 300sec 마다 실시한 언로딩 시간이 2초 이내로 매우 짧은 시간임에도 불구하고 크리프 회복(creep recovery)이 시험편 내에서 조금씩 일어난 것으로 추정된다. 이는 복합재료의 primary 크리프 메카니즘이 섬유와 기지간의 크리프 속도 차이에 따른 응력 전이 및 응력 재분포에 크게 기인한다고 볼 때, 언로딩에 따른 크리프 회복이 강화섬유와 기지간의 내부 응력 재분포에 지속적으로 변화를 일으켰기 때문으로 분석된다.

매 300sec 로딩/300sec 언로딩의 경우에는 primary 거동이 거의 소멸하여 연속 크리프 곡선과는 완전히 상이한 모습을 나타내었으며, steady-state 구간의 크리프율도 약 70% 정도나 크게 감소한 것으로 나타났다. 이러한 원인도 앞의 매 300sec 로딩/0sec 언로딩 사이클의 primary 크리프 거동 감소 원인과 같은 맥락에서 찾아볼 수 있다. 즉, 크리프 초기에는 매 300sec의 언로딩 시간 동안에 발생하는 비교적 많은 양의 크리프 회복으로 시험편 내부의 섬유와 기지간의 거시적 응력 분포가 크게 영향을 받음으로써 복합재료 전체의 크리프 거동도 지대한 영향을 받은 것으로 추정된다. 더구나 크리프 거동과 크리프 회복 거동이 서로 상이할 때는 내부 응력분포가 더욱 복잡하게 되어 그 거동이 완전히 다른 모습으로 나타날 수가 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 장기 사이클 하중이력 시의 크리프 곡선을 나타내고 있는데, Fig. 3에서와 같이 언로딩 시간이 길 경우 복합재료에서도 크리프 회복이 뚜렷하게 일어나고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 2의 매 50hr 로딩/0hr 언로딩 곡선의 경우는 Fig. 1의 연속 크리프 곡선과 비교해 볼 때, 크리프율과 누적 크리프 양에서 거의 차이를 보이지 않음으로써 언로딩 효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

매 50hr 로딩/50hr 언로딩의 경우는 Fig. 4와 같이 크리프 회복 구간을 제외한 누적 크리프 곡선을 만들 경우 연속 크리프 곡선에 비해 약간의 크리프율 증가가 나타났는데, 이는 앞의 단기 사이클 경우에서와 같이 크리프와 크리프 회복 특성 차이에 따른 변화라기보다는 통상 시험편이나 시험기에서 발생할 수 있는 실험 데이터의 편차 정도로 해석되었다. 그 이유는 매 50h 로딩/50h 언로딩의 경우가 재료의 크리프와 변형을 회복 특성 차이에 따른 내부 응력 변화에 있다고 할 경우 앞의 단기 하중이력 실험 결

과에 따르면 누적 크리프율이 오히려 감소해야 하는 것으로 예측되기 때문이다.

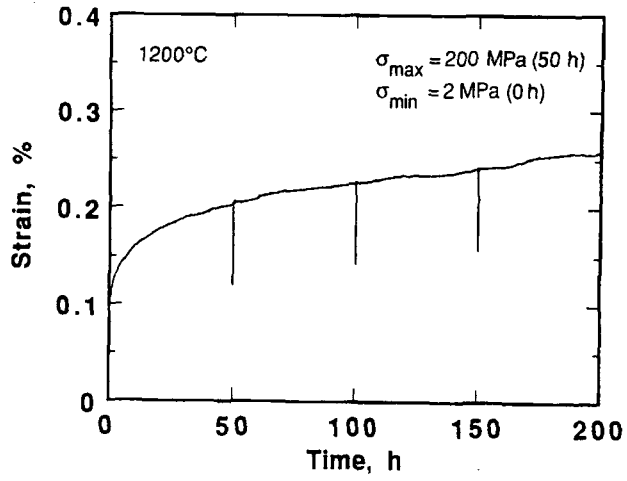


Fig. 2 50hr loading/0hr unloading cycle

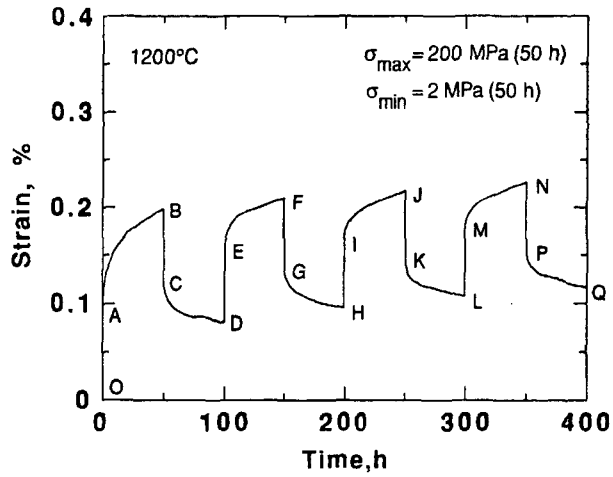


Fig. 3 50hr loading/50hr unloading cycle

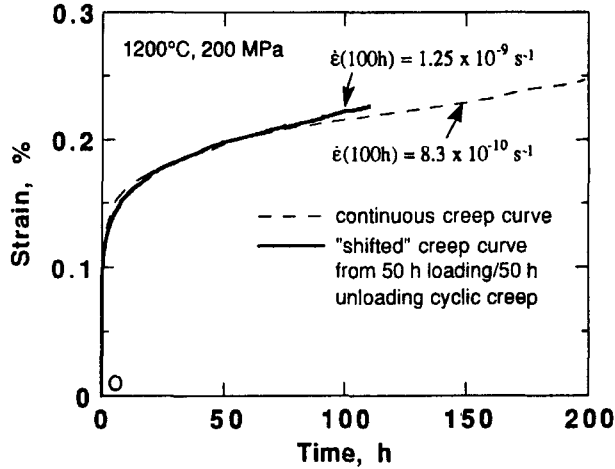


Fig. 4 A cumulative curve for 50hr loading/50hr unloading cycle

Fig. 3에서 로딩/언로딩 시의 시험편의 탄성 변형량이 동일하다고 가정할 때 각 하중 이력 구간별 크리프 대비 변형을 회복 양의 비는 50hr 경에는 0.38(CD/AB)로 매우 작았으나, 100hr 경과 이후에는 0.78(GH/EF), 0.8(KL/IJ), 0.8(PQ/MN)로 크게 증가하고 나중에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 변형을 회복 양은 매 사이클 별로 크게 변화가 없는 반면 크리프 양은 초기에 크게 증가하였다가 점차 증가율이 둔화되었기 때문이다. 두 번째 사이클부터는 첫 사이클에서처럼 리로딩에 따른 급격한 primary 거동이 나타나지 않고 크리프 증가율이 거의 일정하게 나타남으로서 이미 시험편 내에 primary 크리프 성장이 거의 완료되었으며, 이 후는 크리프 거동이 변형을 회복에 의해서 별로 영향을 받지 않음을 보여준다.

4. 결론

이상의 실험 결과로 미루어 볼 때 고온 인장 크리프 응력을 받는 세라믹 복합재료 부품에 있어서는 가동 중에 크리프 발생을 인지하여 작동을 정지하더라도 이미 primary 크리프가 진행된 이후라면 크리프 회복으로 인한 수명 증대를 꾀할 수가 없으며, 재 가동 후 계속 크리프가 진행될 수 있음을 말해 준다. 만약 primary 크리프가 진행 중일 경우에는 가동과 정지를 여러 차례 반복하는 것이 크리프 진행을 억제함으로써 수명을 연장할 수 있는 효과적인 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 섬유강화 세라믹 복합재료의 인장 크리프 거동은 하중이력 사이클의 지속 시간에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

2) 특히 로딩/언로딩 지속시간이 각각 300sec 정도로 짧은 경우에는 primary 크리프율 및 steady-state 크리프율 모두 크게 영향을 받았으며, 약 70% 정도나 크게 감소하는 것으로 나타났다.

3) 언로딩 시간이 매우 짧은 경우에도 primary 영역 내에서는 순간 언로딩 자체만으로도 크리프 거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났고, steady-state 구간에서는 순간 언로딩의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

4) 로딩/언로딩 지속시간이 각각 50hr 정도로 긴 경우에는 크리프 거동에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

5) 이러한 원인으로는 세라믹 복합재료에 있어서의 크리프 진행은 섬유/기지간 응력 재분배에 크게 좌우되며, 이러한 응력 재분배는 primary 구간에서 더욱 활발한데, 이때 언로딩에 의한 크리프 회복 효과로 섬유/기지간 응력 전이에 많은 영향을 주기 때문으로 보여진다.

참고문헌

1. L. J. Schioler, J. J. Stiglich, Jr., "Ceramic Matrix Composites ; A literature Review," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 65, No. 2, pp. 289~292, 1986.
2. K. M. Prewo, "Fiber-Reinforced Ceramics ; New Opportunities for Composite Materials," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 68, No. 2, pp. 395~400, 1989.
3. T. Fett, G. Himsolt, D. Munz, "Cyclic Fatigue of Hot-Pressed Si_3N_4 at High Temperatures," *Advanced Ceramic Materials*, Vol. 1, No. 2, pp. 179~84, 1986.
4. J. A. Dicarolo, "Creep of Chemically Deposited SiC Fibers," *J. of Mater. Sci.*, Vol. 21, pp. 217~224, 1986.
5. A.A. Wereszczak, M.K. Ferber, and T.P Kirkland, "Effect of Cyclic Loading on the Creep Performance of Silicon Nitride," *J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*, Vol. 118, No. 2, pp. 251~56, 1996.