

SiC/2124Al 금속복합재료의 상온 변형 및 고온 크리프 특성 (Tensile and Creep Deformation Behavior of SiC/2124Al Metal Matrix Composites)

류호진, 홍순형
한국과학기술원 재료공학과

1. 서론

SiC/2124Al 금속복합재료는 SiC 입자 혹은 휘스커 강화재를 사용함으로 Al계 부품의 사용온도 및 비강도를 높이거나 기존 철계 부품의 대체를 통한 경량화를 가능케 하는 소재로서 connecting rod, piston, cylinder block 등 자동차부품이나 turbo fan blade, ventral fin 등 항공기 부품 등 고온에서 응력을 받는 부품에 사용되고 있다. 따라서 SiC/2124Al 금속복합재료의 제조공정 및 미세조직 인자가 상온 및 고온 변형거동에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 금속복합재료의 제조공정시 mixing 방법과 압출비의 변화에 따른 상온변형 특성의 차이를 분석하였으며, 강화재 부피분율의 변화에 따른 크리프 특성의 분석을 통하여 크리프 변형 임계응력의 특성을 load transfer 이론을 도입하여 분석하였다.

2. 실험방법

금속복합재료 제조에 사용한 Al합금은 20 μ m 입도의 2124Al이고 강화재로는 8 μ m 입도의 α -SiC 입자와 직경 1.5 μ m, 길이 55 μ m의 β -SiC 휘스커를 사용하였다. 강화재와 기지합금 분말은 dry mixing의 경우 ball mill을 이용하여 50rpm의 milling speed로 24시간동안 mixing 되었으며 wet mixing의 경우 stirrer를 이용하여 초음파로 진동되는 에탄올 내에서 혼합된 후 oven에서 12시간 동안 건조되었다. 금속복합재료의 성형 시 vacuum hot press를 이용하여 570 $^{\circ}$ C에서 진공도를 10⁻⁵torr로 유지하고 90MPa로 10분간 가압하였다. 성형된 금속복합재료 billet을 500 $^{\circ}$ C에서 12:1, 25:1 및 70:1의 압출비로 고온압출하고 압출된 금속복합재료를 493 $^{\circ}$ C에서 3시간 동안 용체화처리하고 수냉한 후 190 $^{\circ}$ C에서 8시간동안 시효처리를 하였다. 금속복합재료의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다. SiC/2124Al 금속복합재료의 인장시험 및 크리프 시험은 gauge length 5.7mm, 직경 3mm의 봉상 크리프 시편을 제조하고 일정응력 크리프시험기를 이용하여 300-350 $^{\circ}$ C에서 응력범위 30-65MPa로 크리프 시험하여 최소 크리프 속도를 측정하고, 응력지수와 활성화에너지 및 임계응력을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 금속복합재료의 상온 기계적 성질 분석

2124기지, 20vol% SiCp/2124Al, 20vol% SiCw/2124Al 금속복합재료의 압출비에 따른 상온인장 시험 결과, 2124기지와 20vol% SiCp/2124Al은 압출비와 무관하게 일정한 인장강도를 나타내었으나 20vol% SiCw/2124Al은 압출비가 증가함에 따라 증가하는 인장강도의 관계를 나타내었다. 이는 압출비의 증가에 따라 휘스커 강화재의 경우 정렬도가 증가하는 반면, 입자강화재는 뚜렷한 정렬도의 증가를 기대할 수 없기 때문으로 판단된다[1]. 또한 mixing 방법에 따른 인장강도의 변화를 관찰한 결과 금속복합재료에서 wet mixing 시 dry mixing 시보다 인장강도의 증가를 관찰할

수 있었으며, whisker 강화재가 첨가되었을 경우 더 큰 증가를 나타내었다. 이는 미세조직의 관찰을 통해 wet mixing에 의해 강화재가 더욱 균일하게 분산되었기 때문인 것으로 분석되었다.

3-2. 불연속 강화재에 의한 응력전달 현상 분석

불연속 강화 금속복합재료에서 creep 변형시 load transfer 현상의 해석을 위해 Nardone과 Prewo[2]의 modified shear lag model에 강화재의 형상과 정렬도를 고려한 generalized shear lag model을 사용하였다[3].

$$\sigma = V_{SiC}(\sigma_{AI} + S_{eff}\tau_i) + V_{AI}\sigma_{AI} \quad (1)$$

위 식에서 S_{eff} 는 강화재의 유효 aspect ratio로서 식(2)와 같이 aspect ratio, S 와 misorientation angle, θ 의 함수로 계산된다.

$$S_{eff} = S \cos^2 \theta + \left(\frac{3\pi - 4}{3\pi} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{S} \right) \cdot \sin^2 \theta \quad (2)$$

강화재의 형상 및 부피분율에 따른 기지 부분에 작용하는 유효응력의 계산을 위해 제안된 modified shear-lag모델을 이용하면, 기지 부분에 가해지는 응력의 분율은 다음과 같은 식으로 나타내어진다[4].

$$\frac{\sigma_{eff}}{\sigma} = 1 - \frac{V_f \left(\frac{S_{eff}}{2} + 1 \right)}{V_f \left(\frac{S_{eff}}{2} + 1 \right) + V_m} \quad (3)$$

3-3. 강화재 부피분율 변화에 따른 금속복합재료의 크리프 거동

Fig.2는 8 μ m SiC 입자 강화재의 부피분율을 10vol%, 20vol%, 30vol%로 변화시킨 후 300 $^{\circ}$ C에서 크리프 시험한 후의 log(크리프 속도)와 log(응력)과의 관계를 도시한 결과이다. 강화재의 부피분율이 증가함에 따라 크리프 속도가 낮아져 크리프 저항성이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 강화재 부피분율의 변화에 따른 응력지수는 약 10의 값을 가지고 있었으며, 강화재 부피분율에 따른 활성화 에너지를 살펴보면 224 kJ/mol을 나타내었다. 이 값은 Al 합금 기지의 크리프 변형이 전위 크리프 현상에 의해 일어날 때의 활성화에너지인 Al의 self-diffusion 활성화 에너지 142 kJ/mol에 비하여 큰 값이다.

Al 합금 기지가 받는 유효응력에 대해 정상상태 creep 속도를 도시하면 Fig.3에서와 같이 동일 유효응력에서 강화재 부피분율에 관계없이 금속복합재료는 비슷한 creep 속도를 나타낸다. 이로써 금속복합재료의 creep 변형은 금속 기지에 가해지는 유효응력에 지배받으며, creep 변형시 금속복합재료에서 강화재의 역할은 기지 합금에 걸리는 응력을 분담함으로써 금속 기지에 걸리는 유효응력을 낮추어 creep 변형률 속도를 낮추는 것으로 해석할 수 있었다.

또한 금속복합재료의 크리프 변형시 나타나는 높은 응력지수와 높은 활성화 에너지를 설명하기 위하여 Fig.4와 같이 임계응력을 구하였다. 이때 이론응력지수는 기지원자의 확산에 따른 전위의 상승이 크리프 변형을 제어할 때 측정되는 5로 계산하였다[5,6]. 측정결과 SiC/Al 금속복합재료의 임계응력은 SiC 강화재 입자의 부피분율의 변화와 무관하게 약 18MPa 정도의 값을 나타내었다. 이 결과는 SiC 강화재가 금속복합재료의 creep 임계응력의 직접적인 원인이 아니라는 증거가 될 수 있다고 판단된다[7]. 또한 유효응력에 대하여 임계응력을 구하여보면 Fig.5와 같이 금속복합재료의 임계응력은 12MPa 값을 나타내어 11.5MPa를 나타내고 있는 기지재료의 임계응력과 비슷한 값이 된다. 이로써 금속복합재료의 임계응력은 기지내에 존재하는 전위이동의 방해물에 기인하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6.은 금속복합재료의 creep 변형률 속도를 $\sigma_{eff} - \sigma_{th}$ 에 대하여 도시한 것으로 기지와 20% SiC 입자가 강화된 SiC/2124Al 금속복합재료가 동일한 선상에 존재하는 관계를 나타내준다. 이로

써 금속복합재료의 creep 변형을 일으키는 응력은 유효응력에서 임계응력을 뺀 값, $\sigma_{eff} - \sigma_{th}$ 임을 알 수 있다.

4. 결론

1. 휘스커 강화 복합재료의 경우 압축비가 증가함에 따라 상온 인장강도가 증가하는 반면, 입자강화 복합재료와 기지는 상온 인장강도의 변화가 없었으며 이는 휘스커의 정렬도의 증가에 의한 것으로 분석되었다.
2. Dry mixing 보다 wet mixing 에 의해 제조된 금속복합재료가 더 높은 상온 인장강도를 나타내었으며 휘스커 강화 복합재료의 경우 그 효과가 더 크게 나타났다.
3. SiC 입자 강화재의 부피분율이 증가할수록 크리프 저항성이 증가하였고 power-law 크리프 응력지수가 10정도로 높게 나타났고 활성화 에너지 또한 224 kJ/mol로 측정되었다.
4. SiC/2124Al 금속복합재료의 크리프 변형 시 임계응력을 측정된 결과 임계응력은 SiC 강화재의 부피분율과 무관한 값을 나타내었으며, load transfer 이론을 이용하여 기지에 분담되는 유효응력으로 계산한 결과 복합재료의 임계응력은 기지재료와 유사한 12MPa의 값을 나타내었다.

5. 참고문헌

1. S.H. Hong, K.H. Chung, C.H. Lee, *Mater. Sci. Eng.* 206 (1996) 225.
2. V.C. Nardone and K.M. Prewo, *Scripta Metall. Mater.*, 20 (1986) 43.
3. S.H. Hong and K.H. Chung, *Key Eng. Mater.*, 104-107 (1995) 757.
4. V.C. Nardone and J.R. Strife, *Metall. Trans. A*, 18A (1987) 109.
5. J. Cadek, S.J. Zhu and K. Milicka, *Mater. Sci. Eng. A*, 252 (1998) 65.
6. Y. Li and T.G. Langdon, *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999) 315.
7. K.T. Park, E.J. Lavernia and F.A. Mohamed, *Acta Metall.*, 38 (1990) 2149.

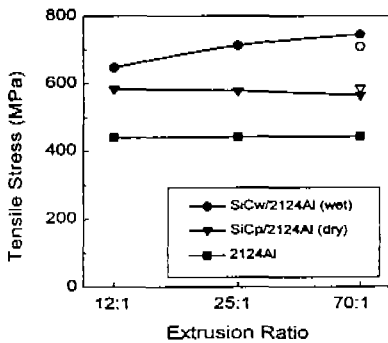


Fig. 1. The variation of tensile strength of 2124Al, SiCp/2124Al and SiCw/2124Al with different extrusion ratios and mixing methods.

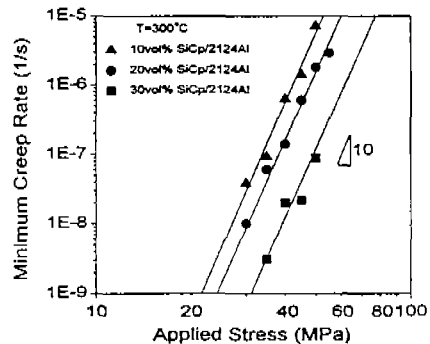


Fig. 2. The variation of minimum creep rates of 10~30vol% SiCp/2124Al MMC with varying applied stress at 300°C.

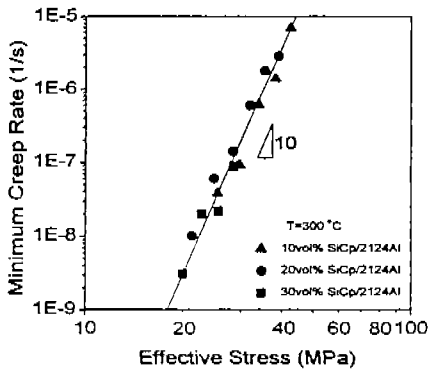


Fig. 3. The variation of minimum creep rate in 10-30vol% SiCp/2124Al MMC with varying effective stress at 300°C.

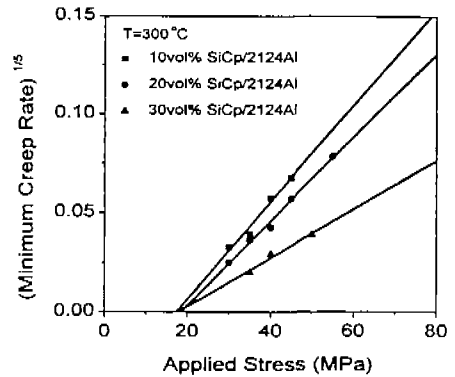


Fig. 4. The estimation of threshold stress of SiCp/2124Al MMC with different volume fraction of SiC under applied stress at 300°C.

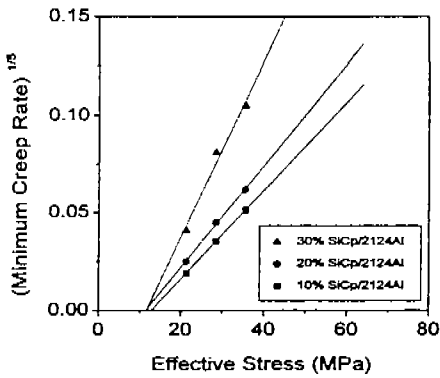


Fig. 5. The estimation of threshold stress of SiCp/2124Al MMC with different volume fraction of SiC under effective stress at 300°C.

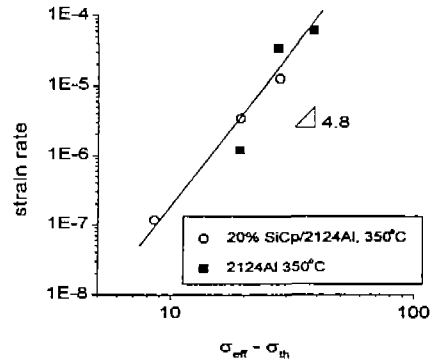


Fig. 6. The strain rate vs. (effective stress - threshold stress) curve of 2124Al and 20vol% SiCp/2124Al at 300°C.