

초미세 결정립 제조에 의한 금속간 화합물의 파괴특성 Ductilization of Intermetallics by Nanostructure Processing

충남 대학교 정 병선*, 김 종민, 김 순길, 홍 순익

1. 서론

결정립이 100 nm 이하인 초미세 결정립 재료는 강도와 경도가 높을 뿐만 아니라 조대한 결정립 재료에 비해 보다 연성과 가공성이 향상되는 것으로 보고되고 있다. 이러한 특성들은 일부 초미세 세라믹재료에서는 많이 관찰되었지만, 금속간화합물에 대한 연구는 거의 행해지지 않았다. 본 연구에서는 결정립의 함수로서 재료의 파괴 거동에 대해 분석하였으며 아울러 초미세 구조재료의 변형속도민감도와 파괴인성이 조대한 결정립 재료에 비해 높다는 근거에 기초, 금속간화합물을 포함하여 재료에서 초미세 결정립이 연성을 향상시킬 수 있음을 증명하였다. 또한, 본 연구에서 얻어진 결과들을 바탕으로 많은 금속간화합물과 세라믹의 연성향상에 유용한 연구방향을 제시하였다.

2. 분석 및 고찰

일반적으로 재료의 항복강도 σ_y 는 온도가 증가함에 따라 열적활성화변형의 기여로 감소하는 반면에 파괴강도는 균열 전파와 관계된 소성변형에너지의 증가로 인하여 늘어난다. 두 곡선의 교점 DBTT(ductile-brittle transition temperature) 아래, 즉 저온에서는 $\sigma_y < \sigma_f$ 이므로 소성변형이 없이 취성파괴가 일어나고 DBTT 이상, 즉 고온에서는 연성파괴가 일어난다. 이 DBTT는 재료의 고유값이 아니라 결정립크기나 미세조직 특성, 중성자 효과 등에 의존하기 때문에 재료의 파괴와 항복거동은 이러한 변수들을 변화시킴으로써 달라질 수 있다. 따라서 항복강도 이상으로 합금의 파괴강도를 증가시킴으로써 재료의 연성을 향상시킬 수 있다. 초미세 결정립 재료에서 관찰되는 미세한 결정립크기와 높은 확산속도는 상온에서 상당한 연성이 일어날 수 있음을 제시하는데 크립속도에 관한 식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma \Omega}{d^2 kt} (B_1 D_v + \frac{B_2 \Delta D_b}{d}) \quad (1)$$

여기서 σ 는 유동응력, Ω 는 원자부피, d 는 결정립크기, k 는 Boltzmann 상수, B_1 과 B_2 는 상수, D_v 와 D_b 는 각각 부피와 결정립계 확산계수이며 Δ 는 결정립계 넓이다.

한편, 파괴강도는 재료의 결함크기를 감소시킴으로써 증가될 수가 있다. 재료의 파괴인성은 조대한 결정립에 비해 초미세 결정립에서 더 높는데, 이것은 파괴에 대한 임계균열크기(critical flaw size)가 실제의 균열크기 보다도 크다는 것을 나타낸다. 그러나 초미세 결정립 합금의 경우 항복강도가 급격히 증가하므로 연성파괴를 위하여 허용되는 결함의 크기는 점점 작아지게 되며, 이를 만족시키지 못하는 경우 초미세 결정립 재료는 brittle해진다.

초미세 결정립 재료에서 변형영역은 높은 변형속도민감도에 의한 균일한 변형으로 크고 많은 결정립을 포함한다. 초미세 결정립 재료에서 균일한 변형은 변형속도민감도의 증가로 기인되며, 따라서 균열생성과 증식에 대한 국부임계응력에 도달하기가 어려워진다. 반면에, 조대한 결정립 재료에서 변형영역은 좁고 상대적으로 변형영역에 포함되는 결정립의 수가 아주 작으므로 균열생성이나 증식에 대한 국부임계응력이 쉽게 도달하여 파괴가 균열의 tip으로부터 쉽게 전파한다.

재료의 유동응력은 결정립 크기, d 의 함수로서 Hall-Petch식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-n} \quad (2)$$

여기에서 σ_y 와 σ_0 는 각각 유동응력과 결정저항이며, k_y 는 Hall-Petch선의 기울기다. 파괴인성이 파손에 접근한다면, 취성파괴는 내재되어 있는 균열의 크기 c 가 임계크기보다 클

때 발생한다.

$$K = \sigma_f \sqrt{\pi c} \quad (3)$$

여기서 K 는 재료의 파괴인성이다. 취성재료에 대해 $\sigma_f = \sigma_s$ 라고 가정하면, 임계균열크기는 다음과 같이 나타내 진다.

$$c^* = 1/\pi \cdot \{K/(\sigma_o + k_s d^{-n})\}^2 \quad (4)$$

위의 식은 재료에 대한 임계결정립크기를 보여주는 것으로서 임계결정립의 크기는 인성 K 와 Hall-Petch기울기 k_s , 그리고 결정립크기지수 n 에 의해 결정된다. 균열크기 c 가 결정립크기 d 와 같다면, 연성파괴에 대한 한계조건은 $c^* > c = d$ 이다.

아래 그림 1은 인성이 3 혹은 5 MPa·m^{1/2}와 10 MPa·m^{1/2}인 재료의 항복응력과 임계 균열크기(c^*)의 변화를 보여주고 있으며 여기에서 점선은 결정립크기 d 와 같다고 가정하는 실제 균열크기를 나타낸다. 만일 초미세 결정립 금속간 화합물의 파괴인성이 10 MPa·m^{1/2}이상으로 증가한다면, 그림 1(a)에서처럼 임계균열크기(c^*)는 실제 균열크기 c (결정립 크기 d)보다 크다. 다른 한편으로 결정립크기지수가 0.8이라면, 항복응력의 결정립크기 의존성은 증가하고 임계균열크기는 보다 빠르게 감소한다. 그림 1(b)에서 보는바와 같이 10 MPa·m^{1/2}의 인성을 가진 재료에 대해 임계균열크기와 실제 균열크기(점선) 사이의 차는 미세한 결정립에서는 좁아지고 결정립이 10 nm이하일 때는 실제 균열크기보다 작아진다. 결정립크기가 50 nm보다 작을 때 변형속도민감도는 급격히 증가하기 때문에, 금속간화합물과 세라믹에서 파괴인성은 높아질 수 있다. 따라서, 전형적인 조대한 결정립을 갖는 금속간 화합물의 파괴인성(3에서 5 MPa·m^{1/2})에서 결정립의 크기가 작아지는 경우, 큰 변형속도 민감도에 의하여 파괴인성(10 MPa·m^{1/2}이상)이 증가할 수 있으므로 초미세 결정립 구역에서는 파괴인성을 10 MPa·m^{1/2}로 예측된 결함의 크기와 실제크기를 비교하여야 한다. 따라서, 결정립이 작아지는 경우, 제조중에 결함이 도입되지 않는다면 금속간화합물의 연성 증가효과를 얻을 수 있다.

3. 결론

재료의 파괴거동은 결정립크기의 함수로서 분석되었다. 50 nm이하의 결정립크기를 갖는 초미세 결정립 재료는 조대한 결정립 재료에 비해 높은 변형속도민감도와 파괴인성을 나타내기 때문에 향상된 연성을 보일 것으로 예측되며 또한, 금속간 화합물의 연성은 결정립미세화로 향상될 수 있다.

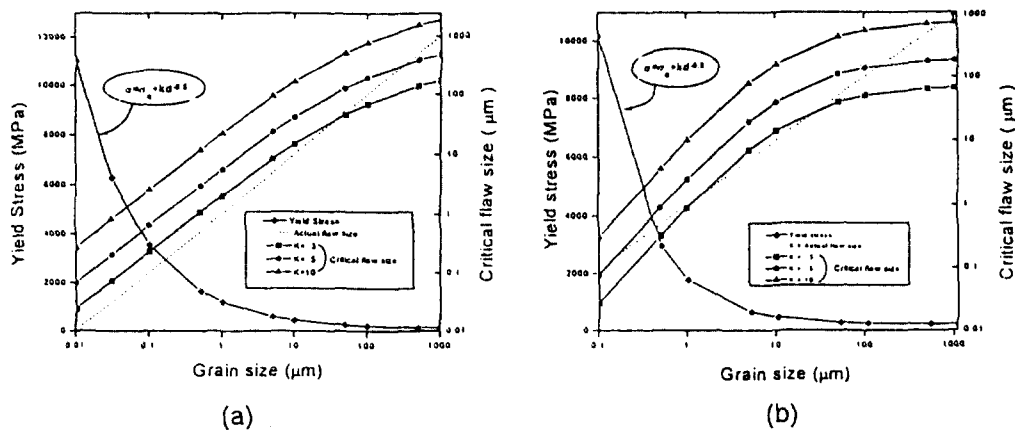


Fig. 1. Variation of yield strength and critical flaw size with grain size deduced from the Hall-Petch variation of yield stress with grain size and different fracture toughness values. (a) a normal grain size exponent (0.5) is considered as in most materials including intermetallics; (b) a larger grain size exponent (0.8) is considered as in some intermetallics.