

내마모 철계 소결합금(Fe-5Cr-1Mo-2Cu-0.5P-3.0C)에서의 액상석출현상
(Liquid Precipitation in a Wear-Resistant Fe-base Alloy
(Fe-5Cr-1Mo-2Cu-0.5P-3.0C))

호서대학교 김정석*
한국과학기술원 신현상, 윤덕용

1. 서론

액상 소결체의 고상입자 내에서 고립 액상이 형성되는 것은 자주 관찰되어온 현상이다. 이제까지 액상석출물은 두가지 원인에 의해 나타나는 것으로 해석되어 왔다¹⁾. 80Fe-20wt%Cu 합금에서와 같이 성형체가 액상 소결온도로 가열되는 과정에서 성형체 내에서 입자 사이에 형성된 입계가 이동해 가면서 저용점분말입자가 고용점입자 내에 포집(trapped)이 되는 경우가 발생한다. 또한 성형체를 액상 소결온도로 가열하는 과정에서 입계의 이동에 의해 고상입자가 C와 같은 모양을 이루는 경우가 발생하며, 이후 액상상태에서 용해-재석출에 의해 액상이 고상내에 고립된다. 이 두 경우는 모두 소결온도로 가열하는 도중에 고상 상태에서 입계의 이동에 의해 나타나는 것이다. 본 연구에서는 내마모 철계 소결합금에서 위에서 언급된 것과는 다른 원인에 의해 고립액상(liquid pocket)가 발생할 수 있음을 보이고, 이때 액상포켓의 형성과 발달과정, 또 그 형상을 제어하는 원인을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

Höganäs사의 철계 소결 합금 분말(Fe-5Cr-1Mo-2Cu-0.5P, 이후 AE라 표기)을 약 3wt%의 흑연과 혼합하여 직경 10mmx높이 7mm의 실린더형으로 성형한 후 액상이 형성되는 온도인 1100~1160°C에서 소결하였다. 이때 소결온도로의 승온 속도는 약 200°C/min이다. 액상소결온도에서 5~20분간 소결한 후 수냉했다. 수냉한 시편을 절단하여 연마한 후 5% Nital 용액에서 부식 하였다. 조직은 광학현미경과 SEM으로 관찰하였다. 성분분석은 WDX로 하였다. 또 일부 시편은 순수한 AE분말로된 성형체와 (AE+3%C)혼합분말의 성형체를 금형 내에 함께 넣어 높은 압력으로 눌러 주어 접합시킨 후 소결온도로 가열하였다.

3. 결과 및 고찰

성형체를 서서히 액상 소결온도로 가열한 경우에는 탄소가 고용되면서 분말 입자 내의 Cr, Mo, P 등의 고용원소가 입계로 확산해 나와 입계에 액상막을 형성한다. 이러한 조건에서는 액상 석출 현상은 뚜렷이 나타나지 않는다. 그러나 빠르게 가열하는 경우에는 과포화된 고용원소가 입계로 확산되어 나오는 것이 억제되고, 대신 입자내에서 액상으로 석출한다. 빠르게 가열한 시편에서의 액상석출물의 발달과정을 SEM으로 관찰한 것을 요약하면 다음과 같다. 석출의 매우 초기에는 구형(0.1-0.3 μ m)을 유지하고, 석출물이 1-2 μ m로 성장하면서 9면 이상을 가진 천이형태의 다면체, 3-4 μ m에서는 정육면체를 기본으로 하는 쌍곡선다면체(hyperbolic polyhedra based on cube), 5 μ m 정도의 크기에서는 쌍곡선다면체의 형태를 한 정육면체와 볼록한 곡면으로 이뤄진 육면체(양의 곡면)가 조합된 형태가 관찰된다.

이때 석출액상, 고상 기지상과 원료분말 입자의 조성을 WDX로 분석하면 표1과 같다. 이 표로부터 탄소가 고용되면서 원래 고상 입자 내에 과포화 되었던 고용체가 액상으로 석출하였

음을 알 수 있다. 김등²⁾은 고온에서 액상 소결한 Co-Cu합금을 저온에서 다시 열처리 하는 경우에 고상입자 내에 형성되는 액상 석출물의 모양 변화를 석출 액상과 접하고있는 고상 내의 계면에서 발생하는 정합변형에너지 측면에서 설명하였다. 액상 석출물과 접하고 있는 고상 내의 정합변형에너지 G_c 는 다음과 같다.

$$G_c = V_m Y(n) \delta^2$$

$Y(n)$ 은 방향의존 탄성계수, $\delta = n(C_s - C_o)$, $n = (1/a_o)(da/dc)$, C_s 는 정합변형층의 조성, C_o 는 기지상의 조성이다. Co-Cu합금에서 $Y(n)$ 이 최대인 방향은 <111> 최소방향은 <001>이다. 김등은 용질원소의 조성구배에 의해 발생하는 결정방향에 따른 정합변형에너지와 계면에너지를 고려하여 Wulff규칙을 적용하여 액상 석출상의 모양을 계산한바 있다. 석출 초기에는 계면에너지 효과에 의해 구형의 석출물이 안정하고, 점차 성장해 감에 따라 정합변형에너지가 주도적인 영향을 주어 정육면체에 기본을 한 형태로 변화함을 보여주었다. 액상석출물에는 초기단계가 지나면서 faceting 면이 나타난다. 이 합금에서 액상 소결된 평형고상입자의 모양이 구형이라는 것으로부터, faceting이 계면에너지의 이방성 때문에 형성된 것이 아니라는 것을 알 수 있다. r -Fe의 $Y(n)$ 값은 실험적으로 측정된 바는 없으나, Fe-Ni 단결정합금에서 측정된 값을 순수 r -Fe에 대해 외삽하여 계산하면 $Y(111) > Y(110) > Y(100)$ 의 순으로 나타난다. 정합변형이론에 의하면 정육면체를 기본으로 한 액상석출물에서 면은 (100), 꼭지점은 <111>인 것으로 해석된다. 석출물이 3~4 μ m에서 꼭지점이나 모서리가 불안정하게 성장하는 것은 입자 내에 용질원소가 과포화 되어 있어서 꼭지점이나 모서리에서 확산의 꼭지점(point effect of diffusion)효과에 의해 발생하는 것으로 보인다.

4. 결론

①혼합성형체를 소결온도로 빠르게 가열하면 입자 내에 액상석출이 발생한다. 정합변형이론에 의하면 관찰된 액상 석출물의 형태는 Fe-Ni단결정 합금이나 이론적인 계산치로부터 추론한 방향에 따른 $Y(n)$ 값들의 변화경향과 일치하였다.

②액상 석출물은 초기에는 계면에너지효과에 의해 구형을 유지하나, 점차 성장해감에 따라 정합변형에너지 효과에 의해 다면체로 된다. 본 연구에서는 초기의 구형석출물에서 정육면체에 바탕으로 둔 석출물로 성장해 가는 중간단계인 9면이상을 가진 다면체형태를 거침을 관찰하였다. 이러한 천이형태(1~2 μ m크기)가 나타나는 것은 정합변형에너지 뿐만 아니라 석출물의 크기, 용질의 포화도와도 관련이 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1.N.-M. Hwang, S.-J. L. Kang, D.N. Yoon, Metall. Trans. Vol. 17A, 1429(1986)
- 2.Y.J. Baik, J.K. Kim, D.N. Yoon, Acta metall. Vol.41,(8), 2385(1993)

Table 1. Chemical compositions of the as-received AE powder, liquid precipitate, and r -grain after the precipitation

	Si	P	Mo	Cr	Cu	Fe
as received	1.40	0.77	0.65	5.42	1.77	bal
precipitate	0.72	3.02	2.12	14.95	0.59	bal
r -grain	2.18	0.08	0.19	3.64	1.88	bal