

**가속전자빔 투사법에 의한 붕화물/Ti-6Al-4V 표면복합재료의 제조와
미세조직분석**
(Fabrication and Microstructural Analysis of Boride/Ti-6Al-4V Surface
Composites Using Accelerated Electron Beam Irradiation)

포항공과대학교 항공재료센터 어광준*, 이종민, 이성학

1. 서론

최근 재료의 표면물성을 향상시키는 기술로서, pulsed-레이저빔이나 전자빔 등의 에너지를 직접 투사하는 방법이 부각되고 있으며 이 중에서 고에너지빔을 이용한 표면복합재료(surface composite)나 표면합금화 재료(surface-alloyed material)의 제조는 표면층이 용융된 후 재응고하는 과정을 거치기 때문에 계면에서 접합성의 문제가 거의 없으며, 재응고시 빠른 냉각속도로 인한 평형고용한도의 극복을 통하여 우수한 물성의 준안정상을 얻을 수 있다. 금속 substrate의 표면에 세라믹 분말들을 균일하게 분포시키고 전자빔을 투사시키면, 세라믹 분말과 substrate가 용융되고 세라믹성분원소가 금속으로 확산, 침투되는 과정을 거치게 되고, 세라믹/금속 표면복합재료의 제조가 가능하게 된다. 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 substrate의 표면에 TiB₂, MoB과 같은 붕화물 분말을 분포시키고 고에너지 전자빔을 투사하여 붕화물/Ti-6Al-4V 표면복합재료를 제조하였다. TiB₂와 MoB 분말의 혼합조건을 변화시켜 3 종류의 표면복합화 시편을 제조하였으며, 미세조직, 세라믹성분, 경도의 변화를 조사하고 이들 사이의 상관관계로부터 표면물성 향상기구를 규명하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 substrate로 사용된 Ti 합금은 Ti-6Al-4V 합금(조성: Ti-6.19Al-4.05V-0.02C-0.19Fe-0.12O-0.01N-0.0035H)이며, 표면복합화를 위해 첨가된 세라믹 분말은 TiB₂와 MoB 분말로서, 용융온도와 경도가 높고 내열성, 내마모성이 우수한 분말재료이다. 이 분말들을 약 200 °C에서 1시간 건조시킨 후 용제인 CaF₂ 분말을 40 wt.% 건식혼합하여 TiB₂/용제(T), MoB/용제(M), TiB₂+MoB/용제(TM)의 3 종류의 붕화물/용제 혼합체를 제조하였다. 붕화물/용제 혼합체를 Ti-6Al-4V substrate 표면에 0.18 g/cm²의 밀도로 균일하게 분포시켰으며, 프레스를 이용하여 300 N으로 가압하여 substrate 위에 고정시킨 후 러시아 Budker 핵물리연구소의 고전압 전자가속기를 이용하여 가속전자빔을 투사하여 표면복합재료를 제조하였다. 표면복합재료를 전자빔 투사방향과 평행하게 절단하여 연마한 후 Kroll 용액으로 에칭하여 미세조직을 광학현미경과 SEM으로 관찰하였고, X-선 회절시험으로 표면복합층(surface composite layer) 내에 존재하는 상과 붕화물 입자들을 분석하였으며, 붕화물 입자의 분율과 크기를 영상분석기로 측정하였다. 전자빔 투사 후 표면복합재료의 표면으로부터의 미세경도 변화를 Vickers 미소경도기(하중; 500 g)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

붕화물 분말과 substrate 표면은 전자빔 투사로 인하여 용융된 후 응고되는데, 이 때 두께가 비교적 균일하고 기공이나 균열 등의 결함이 없는 표면복합층이 형성된다. 표면복합층의 두께는 표 1에 표시한 바와 같으며 T-시편과 TM-시편의 표면복합층에는 육각기둥 형태의 초정 TiB 입자와 침상의 공정 TiB 입자들이 함께 형성되며, M-시편에서는 공정 TiB 입자만 형성된다. 표면복합층의 상분석을 위하여 X-선 회절분석을 실시하였는데 T-시편 표면복합층의 기지(matrix)는 α -Ti로 이루어져 있으나, 전자빔 투사시 냉각속도가 빠르기 때문에 X-선 분석방법으로 α -Ti와 구별하기 힘든 마르텐사이트(α' -Ti)도 형성될 수 있을 것으로 예상된다. M-시편과 TM-시편의 기지는 대부분 β -Ti로 이루어져 있고, α -Ti(혹은 α' -Ti)가 소량 공존한다. 이는 M-시편과 TM-시편에 강력한 β -Ti 안정화원소인 Mo 성분이 존재하여 기지를

대부분 β -Ti로 변태시켰기 때문이다. 표면복합층의 미세조직을 SEM으로 자세히 관찰하여 보면 T-시편 표면복합층에는 육각기둥 형태의 초정 TiB 입자와 침상의 공정 TiB 입자가 분포되어 있고, 기지는 주로 마르텐사이트로 이루어져 있다. M-시편에서는 침상의 공정 TiB 입자만 관찰되며, TM-시편에서는 T-시편에서와 같이 초정 및 공정 TiB 입자가 관찰되지만, 기지가 β -Ti로 다르고 초정 TiB 입자의 크기와 부피분율이 작다. T-시편과 TM-시편의 표면복합층에 형성된 초정 TiB 입자의 부피분율과 크기를 구하여 표 1에 나타내었다. TM-시편의 초정 TiB 입자의 분율(9.9 %)과 크기(5.0 μm)는 T-시편(분율: 21.2 %, 크기: 9.3 μm)보다 작다. 또한 전자빔 투사전후의 질량의 변화를 측정하여 표면복합층에 존재하는 B의 농도를 근사적으로 구하여 표 1에 보였다. T-시편의 B 농도는 4.7 wt.%로 측정되었으며, TM-시편, M-시편의 순서로 감소된다. 표면복합층에서는 B의 함량에 따라 초정 TiB와 공정 TiB 입자가 형성되며, Ti-B 상태에서 1540 ± 10 °C의 온도와 1.7 wt.%의 B 농도에서 공정반응이 일어나는데 T-시편과 TM-시편에서는 공정조성을 초과하기 때문에, 초정 TiB가 형성된 후 공정반응이 일어나 공정 TiB가 형성된다. 그러나 M-시편의 경우는 B의 농도가 1 wt.%이므로 초정 TiB가 형성되지 않고 공정 TiB만 형성된다.

Table 3. Average thicknesses of the surface composite layers, volume fractions and sizes of primary TiB particles in those layers, and approximate concentrations of B present in those layers.

Specimen	Thickness of Surface Composite Layer (mm)	Primary TiB		Concentration of B in Surface Composite Layer (wt.%)
		Volume Fraction (%)	Size (μm)	
T(TiB ₂)	1.25 ± 0.08	21.2	9.3	4.7
M(MoB)	1.46 ± 0.08	-	-	1.0
TM(TiB ₂ +MoB)	1.14 ± 0.04	9.9	5.0	3.0

표면으로부터의 거리에 따라 미세경도를 측정했는데 T-시편 표면합금층의 경도값은 최대 760 VHN이며, 이는 substrate의 경도값(300 VHN)에 비해 2배 이상 증가된 것이다. 표면합금층에서의 경도값은 700 VHN 정도를 유지하며, 계면에서 경도가 급격히 감소한 후 열영향부에서는 약 370 VHN의 경도를 나타낸다. 열영향부는 마르텐사이트로 이루어져 있어 substrate보다는 약간 높은 경도값을 가진다. M-, TM-시편의 경우도 T-시편과 같은 경향을 나타내나, 표면합금층의 평균경도값은 M-시편에서 약 570 VHN, TM-시편에서 약 610 VHN 정도로 감소된다.

4. 결론

TiB₂와 MoB 분말과 40 wt.%의 용제(CaF₂ 분말) 혼합체를 Ti-6Al-4V 합금 substrate의 표면에 도포시킨 후 고에너지 전자빔을 투사하여 비교적 균일하고 결합이 없는 1.1~1.5 mm 두께의 표면복합층을 형성시켰다. 표면복합재료의 미세조직은 표면복합층, 계면부, 열영향부, substrate로 구성되었으며, 표면합금층에는 α -Ti, α' -Ti, 또는 β -Ti로 이루어진 기지내에 육각기둥 형태의 초정 TiB 입자와 침상의 공정 TiB 입자가 형성되었으며 경도는 substrate보다 2배 이상 증가되었는데 이는 주로 표면복합층의 형성된 TiB 입자에 기인하며 마르텐사이트나 β -Ti로 변태된 기지도 경도향상에 기여하였다.