

항자력과 자기포화도에 의한 WC-8%Co 초경합금의 기계적 성질 평가

The Evaluation of Mechanical Property of WC-8%Co Alloys by Coercive Force and Magnetic Saturation

안동길*
 Dong-Gil Ahn*

초 록 WC-Co 초경합금의 항자력과 자기포화도를 평가하여 합금조직과 이에 따른 기계적 성질의 예측에 관해 연구하였다. WC 입경이 다르고 탄소함량 및 소결온도가 다른 WC-8%Co 초경합금을 분말 야금법에 의해 제조하였다. 항자력과 자기포화도와 같은 WC-Co 합금의 자기적 특성은 합금조성 및 조직에 크게 의존하였다. 미소한 합금탄소량의 변화와 WC 입도의 차이에 의해서도 WC-Co 합금의 자기적 특성과 경도 및 항절력이 크게 변화하였다. WC 입도가 미세할수록 소결합금의 항자력과 경도는 증가하였고, 항자력은 경도의 증가와 비례하였다. WC-8%Co 합금의 화학양론적 조성 아래로 카본함량이 감소하면 자기포화도와 항절력이 떨어지고 η 상의 체적률도 꾸준히 증가하였다. WC-Co 합금에 있어서 자기포화도는 항자력과 반비례하였다.

주요 용어: WC-Co 초경합금, 항자력, 자기포화도, 미세조직, 기계적 성질

Abstract The prediction of mechanical properties for WC-Co alloys by evaluation of coercive force and magnetic saturation were studied in relation to their microstructure. The WC-8%Co alloys were prepared using different WC particle size, carbon content and various sintering temperature by PM process. The magnetic properties such as coercive force and magnetic saturation of sintered WC-Co alloys were critically dependent upon their final composition and microstructure. Slight changes of carbon contents and small variation of WC grain size result in marked changes of magnetic properties, hardness and transverse rupture strength of sintered WC-Co alloys. It was found that the coercive force and hardness were increased by fine WC grain size of sintered alloys, and the coercive force was proportional to hardness. With decreasing total carbon content below the stoichiometric value in WC-8%Co alloys the volume fraction of η phase increased steadily, while the magnetic saturation and transverse rupture strength decreased. The magnetic saturation was inversely proportional to the coercive force of WC-Co alloys.

Keywords: WC-Co alloys, coercive force, magnetic saturation, microstructure, mechanical property

1. 서론

WC-Co계 초경합금은 타 경질재료에 비해 경도와 인성을 균형적으로 잘 갖춘 경질특성이 뛰어난 재료이다. 따라서 초경합금은 내마모성이 우수할 뿐만 아니라 내충격성, 내열 및 내식성이 뛰어나 각종 절삭공구와 금형 및 내마모 재료로 널리 사용되며 최근에는 반도체 산업과

정밀공업 분야의 각종 소재로도 응용되어 산업전반에서 대표적인 경질재료로 폭넓게 사용되고 있다[1]. 초경합금은 경질 탄화물인 텅스텐 카바이드(WC)와 결합상인 코발트(Co)로 구성되어 있으며 사용 용도에 따라 각종 제2탄화물(TiC, TaC, Mo₂C 등)이 첨가되기도 한다. 일정한 조성을 갖는 초경합금의 기계적 성질은 기본적으로 합금조직에 의존하므로[2,3] 건전한 합금조직을 갖기 위해서

는 경질상인 WC 입도와 합금탄소량의 조절이 무엇보다도 중요하다. 초경합금에 있어서 합금탄소량이 WC의 이론적 결합탄소량에서 일정범위를 벗어나면 합금 조직 중에 유해상인 삼원계 복탄화물이나 유리탄소(free carbon)가 생성되어 기계적 성질을 저하시키는 원인이 되는데, 이러한 합금탄소량의 차이로 합금조직이 변화하면 합금 결합상인 Co의 자기포화도(magnetic saturation, $4\pi\sigma_s$)가 크게 변화하는 특성을 가진다[4]. 또한 초경합금의 WC 입도와 조직의 미세정도에 따라서 항자력(coercive force, Hc)이 변화하기 때문에 이러한 자기적 특성을 면밀히 검토함으로써 비파괴적 방법으로 초경합금의 내부 조직평가와 Co함량을 분석할 수 있고 이에 따라 합금의 기계적 성질을 예측할 수 있다. 따라서 현재 관련분야에서는 초경합금의 효율적 품질 관리방법으로 항자력과 자기포화도를 조사하여 합금조직의 건진성과 적합성을 평가하지만, 아직까지 초경합금의 자기적 특성에 의한 기계적 성질의 평가에 대한 연구보고는 미흡하다.

본 연구에서는 WC-8%Co 초경합금을 제조하여 항자력과 조직중 WC 결합입도 및 경도의 관계를 고찰하고, 자기포화도에 따른 합금탄소량 및 유해상의 생성 유무와, 이에 따른 초경합금 강도의 상관관계를 고찰하였다. 따라서 초경합금의 항자력과 자기포화도에 따른 합금조직의 차이를 정량적으로 검토하고, 이에 따른 기계적 성질의 변화를 고찰하여 초경합금의 자기적 특성에 의한 비파괴적 방법의 초경합금 품질평가 기준을 제시하였다.

2. 이 론

WC-Co계 초경합금의 자성은 합금조직중 결합상인 Co에 기인하며, Co는 Fe, Ni과 함께 대표적인 강자성체에 속한다. 따라서 초경합금은 항자력(보자력) 및 자기포화도(포화자화)와 같은 자기적 특성을 가지며, 이 값들은 합금의 조성 및 조직상태에 따라 달라진다[4]. 항자력은 자성체의 자화방향을 역전(자벽이동)시키는데 필요한 자장의 강도이므로, 초경합금에 있어서 항자력은 Co 결합상의 미세조직 상태에 크게 의존한다. 따라서 조직중 WC 경질상 입자를 결합하고 있는 Co 결합상은 그 두께가 얇고 WC 입자가 미세한 합금일수록 높은 항자력을 갖는다. Co 결합상의 두께는 합금조직중 결합상 평균자유행로(mean free path, λ)로 정의되고[5], $\lambda = (1-f)/N_L$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 f는 WC 입자의 체적률, N_L 은 조직중 입자의 직선과 교차되는 단위길이당 WC 입자수를 나타낸다. 결합상의 평균자유행로 λ 와 WC 입자의

평균입도 dm 가 작을수록 초경합금의 항자력과 경도는 증가한다. 또한 항자력은 Co의 결정구조에 따라서도 달라지는데, 가공에 의해 Co가 응력 유기변태 (γ (fcc) \rightarrow ϵ' (hcp))를 하거나 초경합금의 소결공정에서 급냉하여 미세조직이 얻어지는 경우에도 항자력이 증가하게 된다. 한편 Co는 고유한 자기포화도(210 Gauss)를 가지므로 초경합금은 전체조성중 Co결합상의 함량에 따라 합금의 자기포화도가 변화하게 된다. 또한 동일 Co결합상 함량에서는 탄소의 고용량이 클수록 초경합금의 자기포화도는 떨어지게 된다. WC-Co계 합금에서 Co에 고용되는 원소는 주로 W이며, 합금탄소량에 따라 고용량이 달라진다. WC의 이론적 결합탄소량은 6.12%이며, 이 값을 전후하여 초경합금은 건진조직인 WC 경질상과 Co결합상으로 구성된 2상 영역을 가진다[6]. 그러나 결합탄소량을 기준하여 고탄소 합금에서는 W이 Co에 고용되기 어려우며 이 경우에는 자기포화도가 증가한다. 또한 탄소량이 높을 경우 조직중에 유리탄소가 생성되기도 한다. 한편 저탄소 합금에서는 탄소의 결핍으로 인하여 W이 Co에 고용되기 시작하며 탄소의 결핍에 의해 η 상(M_6C 상; Co_3W_3C , Co_2W_4C)이라 불리는 삼원계 복탄화물 유해상이 조직중에 생성되기도 하는데 이때에는 합금의 자기포화도가 크게 떨어지게 된다. 여기서 합금탄소량이 적합하지 못할 경우에 생성되는 η 상이나 유리탄소는 초경합금의 기계적 성질에 영향을 미친다. 따라서 초경합금에서의 Co량과 탄소량 및 조직상태를 알기 위해서는 자기포화도의 파악이 효과적이라 할 수 있다. Co 결합상의 조성이 다를 경우의 자기포화도는 각 초경합금이 가지는 절대값이므로, 이를 각 합금의 Co 조성비로 나눈 비자기포화도(specific magnetic saturation; SMS)로 각 합금의 자기포화도를 비교할 수 있다.

3. 실험

초경합금의 제조에 있어서 사용한 원료분말은 시판의 순도 99.9%의 평균입경 $0.7\mu m$ 및 $1.4\mu m$ 의 2종 WC 분말과 평균입경 $1.3\mu m$ 의 Co 분말을 사용하여 2종의 WC-8%Co 합금을 제조하였다. 또한 합금탄소량의 영향을 고찰하기 위하여 텅스텐 분말과 카본분말을 첨가하여 전체 합금탄소량을 5.4~5.8%로 조절한 각각의 WC-8%Co 초경합금도 제조하였다. 합금조성에 따라 칭량된 각 원료분말을 초경 ball과 분말의 중량비를 6:1로 하여 초경합금제 용기에서 에틸알콜을 사용하여 72시간 습식 볼 밀링(ball milling)하여 분쇄, 혼합하였다. 건조

및 스크린 처리하여 제조된 합금분말을 이용하여 직경, 높이가 15×10mm인 성형체와 ASTM 규격의 항절력 (transverse rupture strength; TRS)시편의 성형체를 제조하여 진공로에서 1340℃~1460℃의 각 소결온도에서 60분간 소결하여 각 합금을 제조하였다. 제조한 합금의 소결밀도는 아르키메데스법을 이용하여 측정하였으며, 소결 조직중 생성된 η상(Co₃W₃C)은 연마하여 광학현미경으로 조사하고, η상이 생성된 합금조직에 대해서는 화상해석장치(ABIONIK사-EXCEL)을 이용하여 조직중 η상의 체적률을 조사하였고 각 합금조직중 WC 입자의 평균입경은 SEM 조직으로 부터 Fullman식[5]을 이용하여 구했다. 소결조직은 연마한 후 무라카미 시약으로 에칭처리 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 한편 소결합금의 항자력과 자기포화도는 LDJ Electronics사의 Model-SM8200, 8450을 이용하여 자기이력 곡선(hysteresis loop)로 부터 각각 측정하였다. 비자기포화도 SMS는 자기포화도 값으로 부터 $SMS\% = (\text{합금의 } 4\pi\sigma / (\text{Co의 } 4\pi\sigma \times \text{Co조성비})) \times 100$ 으로 구하였다. 합금의 탄소량 및 소결조건에 따른 탄소량은 Leco사의 분석기를 사용하였다. 또한 합금의 경도는 표면을 연마한 후 비커스 경도기를 이용하여 측정하였고, 항절력은 ASTM규격의 19.0×6.25×5.0mm 3점굽힘 시험편을 제조하여 측정하였다.

4. 결 과

4.1. 항자력의 특성

Fig. 1은 원료분말 WC의 평균입도가 다른 2종(0.7, 1.4μm)

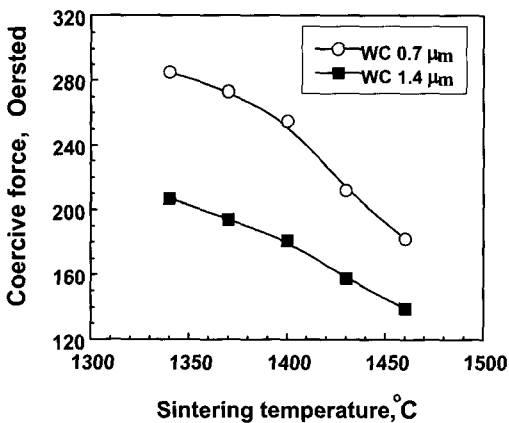


Fig. 1 Variation of coercive force with sintering temperature for WC-8%Co alloys

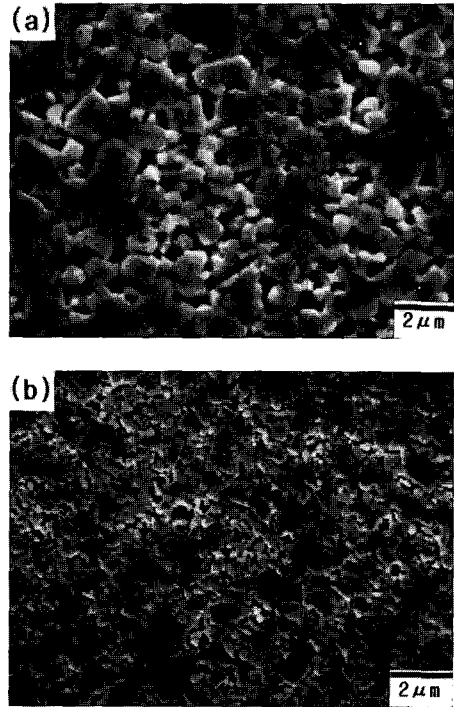


Fig. 2 SEM microstructures of sintered WC-8%Co alloys with initial WC particle size of (a) 1.4μm and (b) 0.7μm

의 WC-8%Co 합금에 대하여 각 소결온도에 따른 합금의 항자력 변화를 나타내었다. 소결온도가 높아짐에 따라 합금의 항자력은 떨어지는데 특히 평균입도 0.7μm의 WC를 사용한 합금은 소결온도 1400℃ 이후에서는 그 경향이 크게 나타났다. 또한 WC 원료분말의 입도가 미세할수록 각 소결온도에서 높은 항자력을 나타내었다. 한편 각 합금의 소결밀도는 1350℃ 이후부터 치밀화가 크게 진행되어 1400℃에서 이론밀도에 도달하여 치밀화가 완료되었으며, 그 이상의 소결온도에서는 항자력이 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 1400℃×60min 소결한 2종 합금의 Co를 에칭처리한 조직을 Fig. 2에 나타내었다. 원료분말이 보다 미립인 0.7μm의 WC를 사용한 합금은 1.4μm의 WC를 사용한 합금에 비해 상대적으로 미세한 소결조직을 나타내고 있다. 또한 동일조성의 각 소결합금에서는 소결온도가 높아질수록 WC 입자가 성장하여 상대적으로 조립조직을 나타내는 것을 확인하였다.

Fig. 3는 합금의 항자력과 경도의 관계를 나타내었다. 동일조성의 초경합금에서 항자력과 경도는 서로 비례하는 특성을 가지는데, 본 결과에서도 거의 직선적으로 비례하는 경향을 뚜렷히 나타내었다. 따라서 초경합금의 경

우 항자력으로 합금경도를 예측할 수 있으며, 제조공정에 있어서 소결온도가 높을수록 항자력이 떨어지고 이에 따라 합금의 경도도 저하하는 것을 알 수 있다. 또한 0.7 μm 의 WC를 사용한 합금이 1.4 μm 의 WC를 사용한 합금에 비해 높은 경도값을 나타내었는데 항자력 250 Oersted 이상에서는 1700HV 이상의 높은 경도값을 나타내었다.

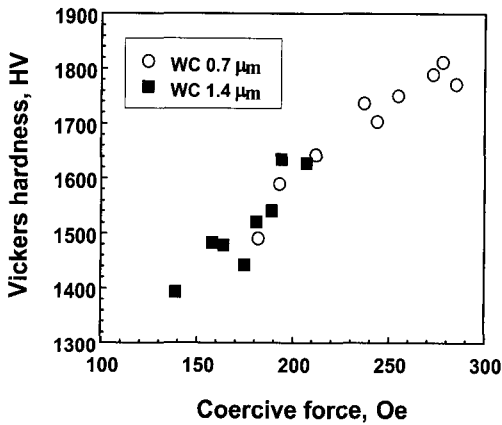


Fig. 3 Variation of vickers hardness with coercive force for Wc-8%Co alloys

4.2. 자기포화도의 특성

Fig. 4는 2종 합금의 전체 탄소함량(합금탄소량)을 달리하여 각 소결온도에서 소결한 합금의 자기포화도 변화를 나타내었다. 자기포화도는 합금의 탄소함량에 따라 크게 변화하였으며 원료분말 WC의 입도와 소결온도에 따라서도 상대적인 차이를 나타내었다. 합금탄소량이 5.49~5.65%의 범위에서는 합금탄소량이 높을수록 합금의 자기포화도는 크게 증가하였으나, 그 이상의 탄소량에서는 일정한 값을 가졌다. 또한 평균입도 1.4 μm 의 WC를 사용한 합금이 0.7 μm 의 WC를 사용한 합금 보다 높은 자기포화도를 나타내었으며, 2종 합금 모두 상대적으로 높은 소결온도(1460 $^{\circ}\text{C}$)에서 높은 자기포화도를 나타내는 것도 알 수 있었다.

Fig. 5는 합금의 자기포화도에 따른 강도(항절력)의 변화를 나타내었다. 2종 합금 모두 자기포화도와 항자력의 관계는 유사한 경향을 나타내며, 일정한 자기포화도(약 145 Gauss) 까지는 자기포화도가 클수록 항절력이 증가하였지만 그 이상에서는 항절력이 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 3의 결과에서도 알 수 있듯이 합금

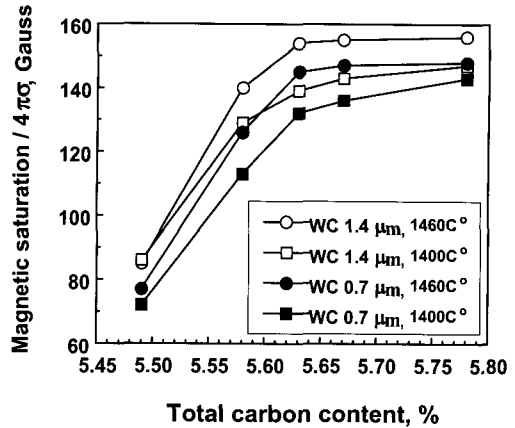


Fig. 4 Variation of magnetic saturation with total carbon content for WC-8%Co alloys

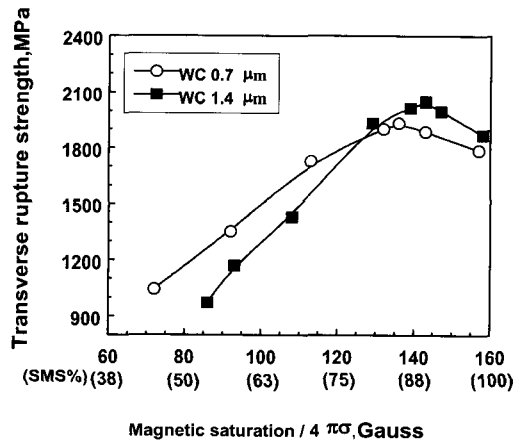


Fig. 5 variation of transverse rupture strenght with magnetic saturation for WC-8%Co alloys

탄소량에 따라 자기포화도가 변화하며 이에 따라 항자력도 유사한 경향으로 변화하는 것으로 나타났다. 보다 미립인 0.7 μm 의 WC를 사용한 합금이 낮은 자기포화도에서는 1.4 μm 의 WC를 사용한 합금보다 높은 항절력을 나타내었지만 최대항절력을 가지는 자기포화도 140 Gauss 부근에서는 오히려 낮은 항절력을 나타내었다. 본 결과에서 1.4 μm 의 WC를 사용한 합금은 자기포화도가 143 Gauss일때 최대항절력 2049MPa을 얻었으며 이때의 비자기포화도 SMS는 약 90%이었다.

Fig. 6는 합금의 항자력과 자기포화도의 관계를 나타낸 것이다. 초경합금의 항자력과 자기포화도는 반비례 관

계에 있으며, 서멧합금의 비례관계[7]와는 상반되는 특성을 갖는 것을 알 수 있었다. 특히 미립 WC 분말을 사용할수록 동일수준의 자기포화도에서도 상대적으로 높은 항자력을 나타내었다. 이러한 각 합금의 항자력과 자기포화도의 차이는 앞에서 보여주는 합금탄소량, 원료분말 평균입도, 소결온도등에 의존하고 있음을 알 수 있었다.

5. 고 찰

초경합금의 항자력은 합금조직에 크게 의존한다. 항자력은 자벽이동에 대한 저항을 나타내는 량이므로 동일 결합상 조성에서는 WC 입자가 미립이고, 결합상의 두께가 얇을수록 큰 항자력을 갖는다. 또한 Co 결합상량이 많고 고온에서 소결할수록 WC 입자 성장이 일어나 항자력이 떨어진다. 따라서 Fig. 1에서 소결온도가 높을수록 항자력이 떨어지며, 상대적으로 조대한 소결조직을 갖는 합금일수록 항자력이 떨어지는 것은 모두 소결조직에 기인한다는 것을 알 수 있다. 또한 미립 조직을 갖는 초경합금일수록 높은 항자력을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 3에서 합금의 항자력과 경도가 정비례 관계에 있는 것은 항자력이 높을수록 합금조직이 미세하고 이에 따라 높은 경도를 나타내는 것이다. 이것은 동일한 조성의 초경합금에 있어서 WC 결정립이 미세할수록 고경도를 나타내는 연구보고[8,9]에서 잘 알 수 있다. Fig. 7에 소결한 각 합금의 항자력에 따른 조직중 WC 입자의 평균입경을 나타내었다. 항자력과 WC의 평균입경은 거의 직선적으로 반비례하는 것을 알 수 있고 이것은 합금의 경도가 항자력

과 직접적으로 관계된다는 것을 의미한다. 이상에서 알 수 있듯이 초경합금의 항자력으로 합금조직의 미세한 정도를 추측할 수 있고, 또한 항자력으로 합금의 경도를 예측할 수 있음을 시사한다. 따라서 초경합금의 경도는 비파괴적 방법인 항자력의 검토로 예측이 가능한 것을 알 수 있다.

초경합금의 자기포화도는 기본적으로 합금탄소량에 따라 크게 좌우된다[10]. Fig. 4에서 합금탄소량이 일정범위까지 증가할수록 자기포화도가 크게 증가하는 것은 WC의 이론 탄소량과 관계있다고 볼 수 있다. 즉 합금탄소량이 WC의 이론 탄소량보다 부족하면 W 은 Co 결합상에 고용되기 시작하며, 이 고용량이 클수록 합금의 자기포화도는 떨어지게 된다. WC의 이론적 결합탄소량은 6.12% 이며 본 합금조성을 감안한다면 본 합금의 이론적 합금탄소량은 5.63%이고 이 값을 전후한 탄소량에서 합금의 자기포화도 변화가 크게 나타난 것은 이러한 W의 고용 때문이라 볼 수 있다. 이와 함께 합금탄소량이 부족할 경우에는 η 상도 생성되는데 이 경우에도 합금조직에서 Co 결합상의 체적률이 상대적으로 줄어들기 때문에 자기포화도가 떨어질 수 있다. 한편 동일 입도의 WC 원료분말을 사용한 합금에서도 높은 소결온도(1460°C)에서 소결한 경우에 자기포화도가 높게 나타나는데, 이것은 소결온도가 높을수록 침탄반응이 많이 일어나기 때문으로 사료된다. 또한 같은 소결온도에서도 소결시간이 길수록 자기포화도가 높아지는 것도 같은 이유라고 할 수 있다.

Fig. 5에서 자기포화도가 높을수록 합금의 항절력 (TRS)이 높으며 특히 비자기포화도 SMS가 80~95%(자

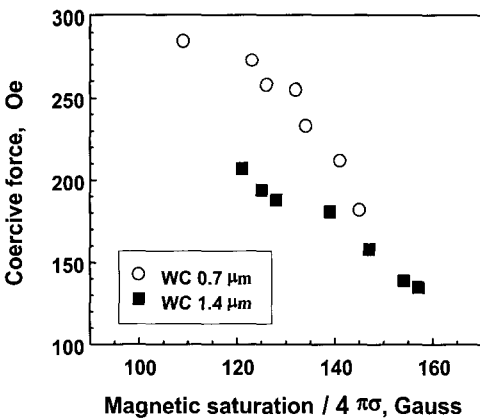


Fig. 6 Relation between magnetic saturation and coercive force for WC-8%Co alloys

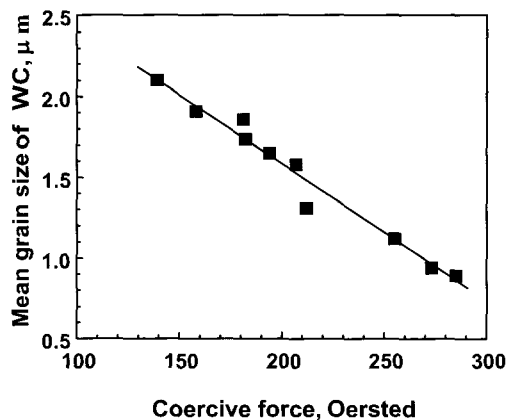


Fig. 7 Variation of mean grain size of WC with coercive force for WC-8%Co alloys

기포화도 128~152 Gauss)의 범위에서 가장 높은 항질력을 나타내는 것은 이 범위에서 건진조직인 WC-Co 의 2상 영역에 해당하기 때문이다. 반면에 SMS가 80%이하인 낮은 합금탄소량 (자기포화도 128 Gauss 이하)에서는

η 상이 생성되며, 취약한 유해상인 η 상의 생성은 합금의 강도를 크게 저하시킨다[11,12]. 또한 본 결과에서 이론 탄소량을 넘는 고탄소 조성(5.78%)에서는 유리탄소(free carbon)가 생성되어 합금의 강도를 저하시켰지만 η 상의 생성만큼 큰폭의 강도감소는 일어나지 않았다. Fig. 8에 2종 합금에서 저탄소 조성의 합금에서 조직중 생성된 η 상을 나타내었다. 합금조직중에 생성된 η 상은 Co 결합상 량을 낮출 뿐만 아니라 합금의 기계적성질을 크게 저하시키는 유해상이므로 건진한 2상(WC-Co) 합금조직을 얻기 위해서는 적절한 합금탄소량의 제어가 필수적이다. Fig. 9에는 2종 합금의 자기포화도와 합금조직중 η 상의 체적률과의 관계를 나타내었다. 이 결과로부터 낮은 자기포화도일수록 합금의 항질력이 크게 떨어지는 것이 η 상의 생성과 그 체적률에 관계되는 것을 명확히 알 수 있다. 동일수준의 자기포화도에서는 0.7 μ m의 WC를 사용한 합금이 상대적으로 높은 η 상의 체적률을 나타내었다. 특히 자기포화도 65 Gauss(비자기포화도 SMS 40%) 이하에서는 η 상의 체적률이 약10% 이상을 나타냄으로 강도가 크게 떨어지게 된다. 이와 같은 결과로부터 일정한 Co 결합상을 갖는 초경합금의 강도는 조직중 WC 입자의 평균입경과 함께 특히 합금탄소량에 의한 조직변화에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 이러한 합금탄소량에 의한 조직변화는 초경합금의 자기포화도로 예측이 가능하다고 할 수 있다. 따라서 초경합금의 강도는 자기포화도와 항자력의 검토로도 평가할 수 있음을 의미한다.

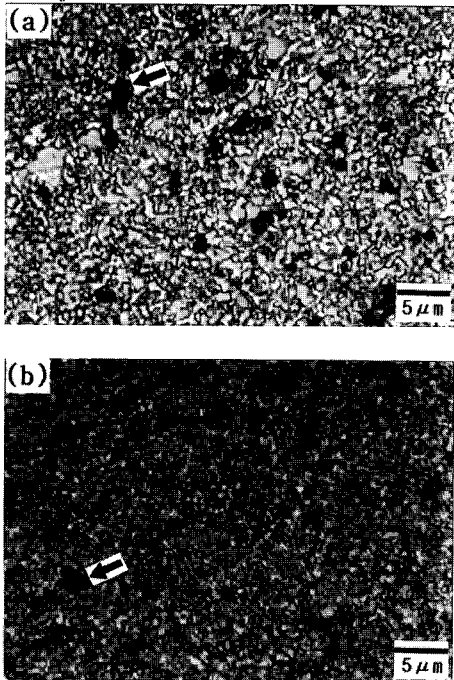


Fig. 8 Optical micrographs showing η phase in WC-8%Co alloys with initial WC particle size of (a) 1.4 μ m and (b) 0.7 μ m

초경합금의 기계적성질은 크게 WC와 결합상의 조성비, WC의 평균입도, 합금탄소량 및 제조조건에 의해 좌우되는데, 이와 같이 합금의 기계적 성질에 영향을 주는 것은 결국 합금조직과 조성이 변화하기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구결과로부터 알 수 있듯이 초경합금의 항자력과 자기포화도의 검토는 이와 같은 초경합금 조직의 변화와 기계적 성질을 예측하는 효과적인 비파괴적 평가방법이며, 초경합금의 사용분야 뿐만 아니라 제조공정에 있어서도 품질을 판가름하고 제어할 수 있는 기준이 될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 WC 평균입도, 합금탄소량 및 소결조건이 다른 WC-8%Co 초경합금을 제조하여 각각의 항자력과 자기포화도의 차이를 조사하고, 이에 따른 합금조직과 기계적 성질의 변화를 고찰하여 초경합금의 항자력 및

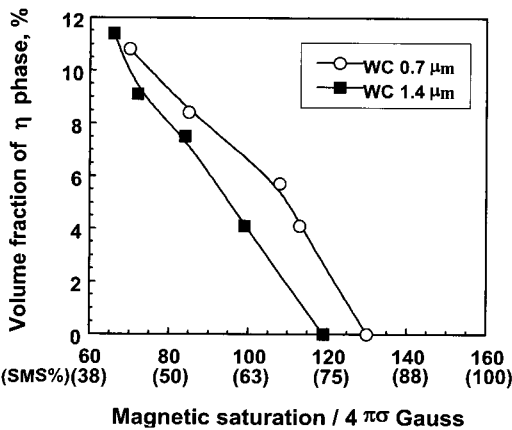


Fig. 9 Variation of volume fraction of η phase with magnetic saturation for WC-8%Co alloys

자기포화도와 기계적 성질의 상관성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 항자력은 합금조각중 WC 입도가 작고 조직이 미세할수록 높은 값을 나타내었으며, 항자력이 클수록 경도는 정비례하여 높은 값을 나타내었다. 소결온도의 상승에 따라서 WC 입자의 성장으로 항자력과 경도는 저하하였다.

(2) 자기포화도는 합금탄소량에 크게 의존하였으며, 본 합금의 이론적 합금탄소량인 5.63% 부근에서는 합금탄소량이 많고 소결온도가 높을수록 자기포화도는 크게 상승하였다. 항자력과 자기포화도는 서로 반비례하는 경향을 나타내었다.

(3) 합금의 강도는 자기포화도에 따라 큰 차이를 보였는데, 비자기포화도(SMS) 80~95%(자기포화도 128~152 Gauss)의 범위에서 가장 높은 강도를 나타내었다. 특히 SMS가 70% 이하에서 부터는 유해상인 η 상의 생성되기 시작하였으며, SMS 40% 이하에서는 생성된 η 상의 체적률이 10%를 넘어 합금강도가 크게 떨어졌다.

(4) 초경합금에서 항자력 및 자기포화도와 기계적 성질은 일정한 상관관계를 가짐으로 비파괴적인 방법으로 기계적 성질의 평가 기준을 제시하였다.

참고문헌

- [1] European Powder Metallurgy Association, "Powdermetallurgy of hardmetals-lecture series," pp. 131-164, (1995)
- [2] H. E. Exner and J. Gurland, "A review of parameters influencing some mechanical properties of tungsten carbide-cobalt alloys," Powder Met., Vol. 13, pp. 13-31 (1970)
- [3] J. L. Chermant and F. Osterstock, "Elastic and plastic characteristics of WC-Co composite materials," Powder Met. Inter., Vol. 11, pp. 106-109, (1979)
- [4]鈴木 壽, "超硬合金と焼結硬質材料-基礎と應用-", 丸善, pp. 62-63, (1986)
- [5] R. L. Fullman, "Measurement of particle size in opaque bodies," Trans. AIME, Vol. 197, pp. 447-453, (1953)
- [6] J. Gurland, "A study of the effect of carbon content on the structure and properties of sintered WC-Co alloys," Trans. AIME, Vol. 198, pp. 285-290, (1954)
- [7] 안동길, 이정희, "질삭공구용 서멧의 자기적 특성과 기계적 성질의 관계," 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 3, pp. 231-237, (2000)
- [8] J. Gurland and P. Bardzil, "Relation of strength, composition, and grain size of sintered WC-Co alloys," Trans. TMS-AIME, Vol. 203, pp. 311-315, (1955)
- [9] G. Grath and R. Warren, "The effect of cobalt content on the microstructure of liquid-phase sintering TaC-Co alloys," Mater. Sci. Eng., Vol. 14, pp. 55-65, (1974)
- [10]鈴木 壽, 山本 孝春, "WC-10%Co-Ni 超硬合金の機械的性質と炭素量との關係," 粉體および粉末冶金, Vol. 15, No. 2, pp. 20-23, (1968)
- [11] D. N. French and D. A. Thomas, "The nature and effect of excess carbon defects in tungsten carbide-cobalt alloys on Mechanical properties," Int. J. of Powder Metallurgy, Vol. 3, pp. 7-14, (1967)
- [12] G. S. Kreimer and M. R. Vakhovskaya, "The effect of carbon content on the mechanical properties of tungsten carbide-cobalt hard alloys," Fiz. Met. Metalloved., Vol. 15, pp. 454-459, (1964)