

## 한공정에 의한 치밀한 WC-20 vol.%Co 초경합금 제조

박충도 · 손인진 · 김환철 · 이영국\*

전북대학교 공과대학 신소재공학부 신소재개발연구소

\*연세대학교 재료공학부 금속공학전공

## One Step Synthesis of Dense WC-20 vol.%Co Super Hard Material

C. D. Park, I. J. Shon, H. C. Kim and Y. K. Lee\*

Department of Materials Engineering, Research Institute of Advanced Materials Development,  
Chonbuk National University, Chonbuk, 561-756, Korea

\*Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

(Received 7 August 2001, Accepted form 20 September 2001)

**Abstract** We combined Field-Activated Combustion Synthesis(FACS) with mechanical pressure to produce dense WC-20 vol.%Co composite in one step. The hardness, the fracture toughness and the relative density of the dense WC-20 vol.%Co were investigated. Under the application of 60 MPa pressure and 3000A current on the reactants, the relative density of WC-20 vol.%Co composite was 99.4%. The fracture toughness and hardness were  $9.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  and  $1672 \text{ kg/mm}^2$  respectively. The fracture toughness and hardness of WC-20 vol.%Co composite produced by FAPACS were lower than that of nanostructured composite, but similar to commercial ones. Therefore we concluded that the FAPACS method which can produce WC-20 vol.%Co within several minutes in one step is superior to conventional ones.

**Keywords:** SHS, Super Hard Materials, WC-Co, Hardness, Fracture Toughness, Combustion synthesis

### 1. 서 론

초경합금은 높은 경도를 가지는 탄화물과 인성이 우수한 금속의 혼합물을 총칭하는 의미로 사용되며, 일반적으로 탄화텅스텐(WC)계 재료를 뜻한다.<sup>1)</sup> 초경합금을 구성하는 금속의 탄화물이나 산화물들은 일반적으로 경도는 우수하지만 인성이 낮으므로 취성이 높고, 순수한 탄화물은 소결이 어렵다는 문제점을 가지고 있다.<sup>2)</sup> 이러한 문제점을 개선하기 위해 금속 결합제를 첨가하여 낮은 인성과 소결성을 향상시키는 방법이 도입되었으며, 탄화물 입자가 금속결합제 중에 분산된 미세구조를 가지고 있다는 의미에서 cemented carbides라고 명칭한다. Co를 첨가한 WC는 실온 및 고온에서 우수한 경도와 파괴인성을 요구하는 절삭공구, 내마모·내충격용 공구, 고온·고압

용 부품 등에 널리 사용이 가능하며, Co함량이 증가할수록 경도는 감소하고 파괴인성은 증가한다.

기압통전활성연소법(Field-Activated Pressure-Assisted Combustion Synthesis)은 기존의 통전활성연소법과 고압기술(hot press, HIP)을 결합한 방식으로서 전기장에 의해 Joule열을 발생시켜서 원료분말을 접화시키면 이때 발생하는 화학적 생성열과 전기장에 의해 합성반응과 소결과정이 진행되는 동시에 기계적 압력에 의한 치밀화 과정이 진행되어 치밀한 생성물을 단일공정으로 짧은 시간에 제조할 수 있는 새로운 합성법이다.<sup>3,4)</sup>

WC는 생성열이 작아서 단열온도가 1164 K이므로 자기발열반응에 의한 합성이 가능한 경계조건( $T_{ad} \geq 1800 \text{ K}$ )보다 낮아서 기존의 연소합성법으로는 제조가 불가능하다.<sup>4)</sup> 그러나, 전기장을 가해줄 경우 화학적

생성열 뿐만 아니라 추가적으로 매우 높은 전기적 Joule 에너지가 발생하므로 연소합성이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 전기장과 기계적 압력을 동시에 적용한 가압통전활성연소법을 이용하여 수 분 이내의 짧은 시간에 단일공정으로 치밀한 WC-20 vol.%Co 초경합금을 제조함으로써 기존의 방법에 비하여 경제적이고 효율적인 제조법을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

순도 99.99%의 텅스텐 분말(<2 μm, 대한중석)과 순도 99% 활성탄소(Activated carbon, <20 μm, Kojundo Chemical Co.) 및 99.8%의 코발트 분말(<30 μm, Aldrich Chemical Co.)을 원료분말로 사용하였다. 원하는 조성의 최종생성물을 얻기 위하여 화학양론비에 맞게 시료의 중량을 결정하였다. W과 C분말은 밀도차이가 커서 균일한 혼합이 어렵고, 실험에 사용된 분말의 초기 입도차이가 크므로 분말의 균일한 혼합과 분쇄를 위하여 지르코니아(zirconia)볼과 분말을 3:1의 비율로 혼합하고 에탄올을 용매로 사용하여 24시간 동안 습식 볼밀링하였다. 볼밀링한 슬러리(slurry)는 60°C에서 8시간동안 진공건조 하였다.

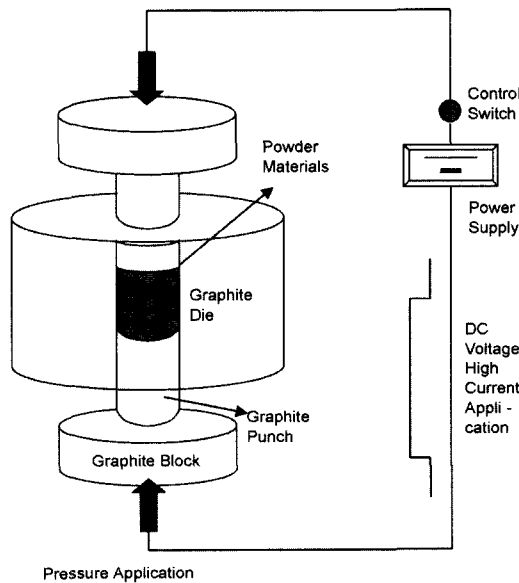


Fig. 1. Schematic diagram of field-activated and pressure-assisted combustion synthesis and densification.

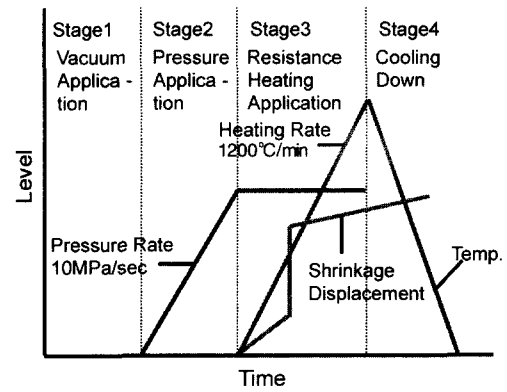


Fig. 2. Schematic representation of the temperature, pressure and shrinkage displacement profile during field-activated and pressure-assisted combustion synthesis and densification.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 가압통전활성연소장치의 개략도를 나타낸다. 치밀한 WC-20 vol.%Co를 제조하기 위한 주요 4단계 공정을 Fig. 2에 나타내었다. 균일하게 혼합된 분말 약 15 g을 흑연 다이(높이 40 mm, 외경 45 mm, 내경 20 mm)에 충전하여 가압통전활성연소장치의 실린더 내부에 장착하고 약 40 mtorr의 진공분위기로 만든다(1단계). 기공이 없는 치밀한 최종 생성물을 얻기 위하여 10 MPa/sec의 속도로 60 MPa의 압력을 가한다(2단계). 일정한 3000 A의 직류전류를 흑연 다이와 시편에 가하여 1200°C/min의 승온속도로 가열하면서 디지털 광온도계(pyrometer)로 흑연 다이의 표면온도를 측정한다. 이때 LVDT(linear variable differential transformer)의 수축길이 변화를 관찰하면서 치밀화가 이루어질 때 까지 전류를 가한다(3단계). 마지막 단계로 시편을 600°C/min의 냉각속도로 상온까지 냉각한다(4단계).

상술한 4단계의 공정으로 제조한 WC-20 vol.%Co 초경합금의 상대밀도는 아르키메데스법으로 측정하였으며, 생성물의 상분석을 위해 CuKα를 사용하여 X-선회절시험을 실시하였다. 생성물의 미세조직을 관찰하기 위하여 6 μm와 1 μm의 다이아몬드 페이스트로 시편을 연마한 후 Murakami 용액(distilled water : K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>8</sub> : KOH = 100 ml : 10 g : 10 g)으로 1~2분간 부식하여, EDS가 장착된 주사전자현미경으로 시편의 미세조직 관찰과 성분분석을 실시하였다. WC-20 vol.%Co 초경합금의 기계적 성질을 평가하기 위

해 비커스 경도계를 이용하여 30 kg의 하중으로 15 초간 유지하여 압흔을 형성하였고 다음 식에 의하여 경도와 파괴인성을 계산하였다.<sup>5-7)</sup>

$$H_v = \frac{2P \sin(\theta/2)}{2a^2} = 1.85437 \frac{P}{2a^2}$$

여기서,  $H_v$ 은 비커스 경도(kg/mm<sup>2</sup>),  $P$ 는 압침에 가한 하중(kg),  $\theta$ 는 압침의 반각(136°),  $2a$ 는 압흔의 대각선 길이( $\mu$ m)이다.

$$K_{IC} = 0.016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{P}{C^{3/2}} \right)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수(GPa),  $H$ 는 경도(GPa),  $c$ 는 반원형 크랙의 반경( $\mu$ m)이다.

초경합금의 경도와 파괴인성에 영향을 주는 요소인 탄화물 입자의 크기와 평균자유행정(mean free path)은 미세조직 사진으로부터 선형분석법(linear intercept method)을 이용하여 다음 식에 의해 결정하였다.<sup>6-8)</sup>

$$d_{wc} = \frac{2V_{wc}}{2N_{wc/wc} + N_{wc/co}}$$

$$\lambda = \frac{2V_{co}}{N_{wc/co}}$$

여기서,  $d_{wc}$ 는 WC 입자의 평균 크기,  $\lambda$ 는 결합상의 평균자유행로,  $N_{wc/wc}$ 는 WC-WC 계면 수,  $N_{wc/co}$ 는 WC-Co 계면 수,  $V_{wc}$ 는 WC의 부피분률,  $V_{co}$ 는 Co 결합상의 부피분률을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 실험에 사용된 원료분말의 주사전자현미

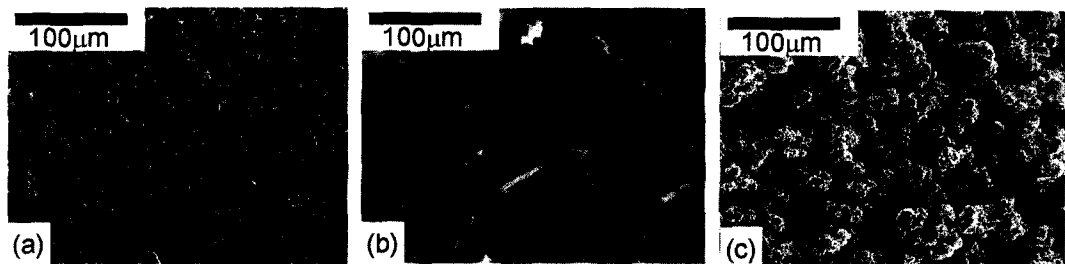


Fig. 3. Scanning electron microscope image of raw materials: (a) Tungsten powder, (b) Activated carbon powder, (c) Cobalt powder.

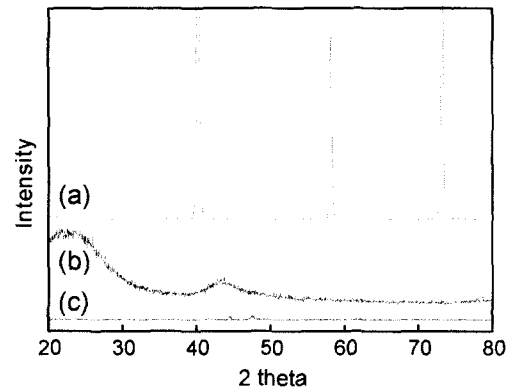


Fig. 4. XRD patterns of raw materials: (a) Tungsten powder, (b) Activated carbon powder, (c) Cobalt powder.

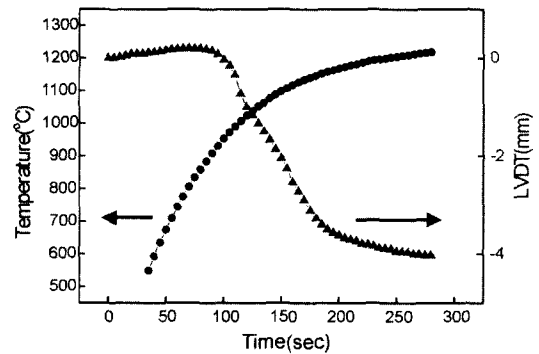


Fig. 5. Variations of temperature and LVDT with heating time during field-activated and pressure-assisted combustion synthesis and densification of WC-20 vol.%Co composite(3000A, 60 MPa).

경에 의한 2차 전자상 관찰결과이다. Fig. 4에 나타난 원료분말의 X선 회절결과로부터 알 수 있듯이 활성탄소는 비정질 상태였고, Co 분말은 저온 안정상인 HCP구조를 가지고 있었다.

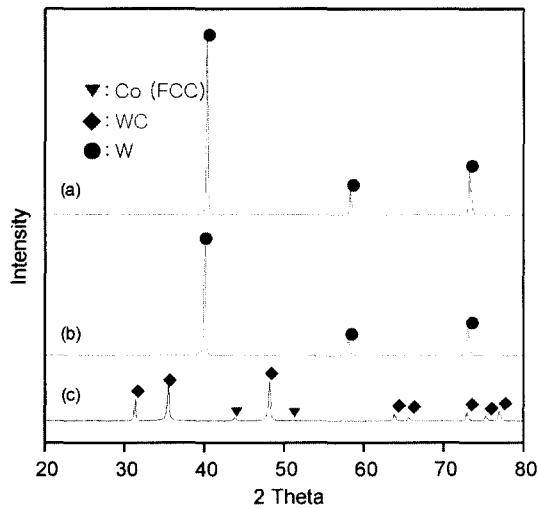


Fig. 6. XRD patterns of the W+C+20 vol.%Co system: (a) after milling, (b) before combustion synthesis, (c) after combustion synthesis.

Fig. 5는 3000 Å의 전류와 60 MPa의 가압상태에서 1200°C/min의 가열속도로 W + C + 20 vol.%Co 혼합분말을 가열하였을 때 시간에 따른 온도(광온도계를 사용하여 측정한 흑연다이의 표면온도)와 시편의 수축길이 변화를 나타낸다. 이때 흑연다이의 표면 온도는 550°C이상에서 측정 가능한 디지털 광온도계를 사용하여 측정하였다. 시료에 3000 Å의 전류가 가해지면서 계의 온도가 상승하게 되고 초기에 완만하게 열팽창 하다가 약 900°C에서 급격한 수축이 시작되어 1200°C에서는 완만하게 수축하였다. Fig. 6은 24시간 동안 습식 불밀링한 분말시료(a), 시편의 수축길이가 급격히 증가하기 직전의 온도인 850°C까지 가열한 시편(b)와 수축길이가 최대값을 나타낸 1200°C까지 가열한 시편(c)의 X선회절시험 결과이다. 불밀링한 분말시료(a)와 850°C까지 가열한 시편의 X선회절도형(b)에서는 비정질 탄소와 상대강도가 낮은 Co의 피크는 관찰되지 않았고 상대강도가 높은 W의 회절 피크만 관찰되었다. 급격한 수축길이 변화가 발생한 직후의 온도인 1200°C까지 가열한 시편의 X선회절도형(c)에서는 미반응물인 W, C의 피크는 관찰되지 않았고, 생성물인 WC와 고온에서 안정한 FCC Co( $a = 3.544$  nm)의 피크만 관찰되었다. 냉각과정 중 Co는 417°C에서 고온 안정상인 FCC Co로부터 저온 안정상인 HCP Co로 마르텐사이트 변태에

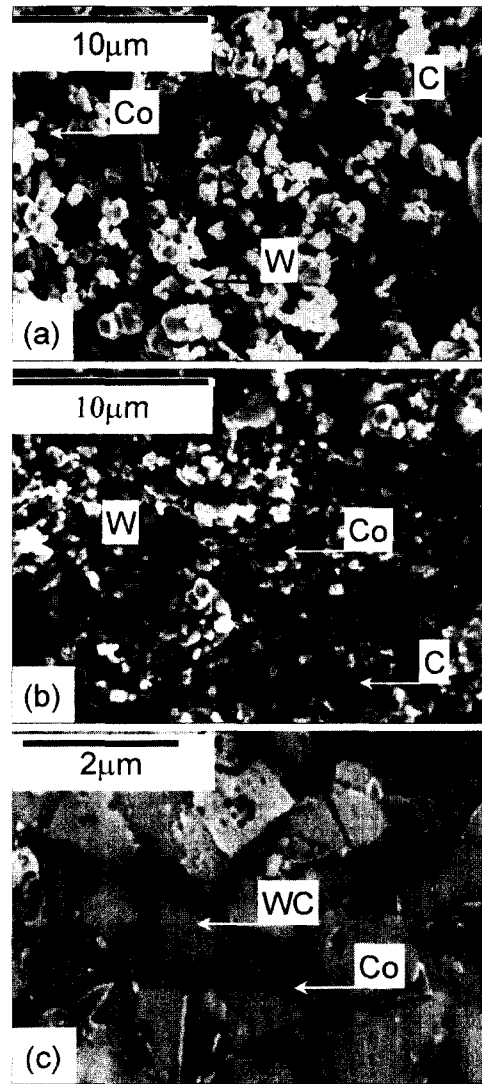


Fig. 7. Scanning electron microscope image of W+C+20 vol.%Co system: (a) after milling, (b) before combustion synthesis, (c) after combustion synthesis.

의해 발생한다.<sup>9)</sup> 그러나, 본 실험에서는 냉각 후에도 고온안정상인 FCC Co가 관찰되었으며, 이것은 Co내에 고용된 W 및 C가 Ms점을 낮춤으로써 냉각과정 중에 FCC Co에서 HCP Co로의 변태를 억제하기 때문인 것으로 보고되어있다.<sup>10)</sup>

Fig. 7은 불밀링한 분말시료(a), 850°C까지 가열한 시편(b) 및 1200°C까지 가열한 시편(c)의 주사전자현미경에 의한 2차 전자상 관찰결과이다. 불밀링 과정

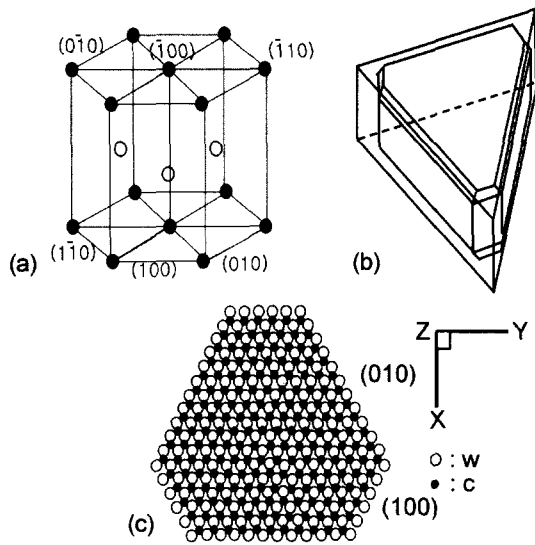


Fig. 8. (a) Three-dimensional atom array in the WC crystal, (b) shape of equilibrium crystal, (c) atom array in the [001] of WC crystal.

에서 텅스텐 분말은 1  $\mu\text{m}$  이하로 거의 균일하게 분쇄되었으나, 탄소 분말은 2  $\mu\text{m}$  이상의 조대한 상태로 존재하고 있었다. 850°C까지 가열한 시편(b)도 불밀링한 직후의 미세조직(a)을 그대로 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 1200°C까지 가열한 시편(c)에서는 WC입자의 평형상(equilibrium shape)으로 보고되어있는 삼각프리즘형상의 WC입자가<sup>11)</sup> 관찰되었으며, 선형분석법으로 측정된 WC 입자의 크기는 0.92  $\mu\text{m}$ 였다. Fig 8(a)에 나타난 바와 같이 WC는 단위격자 내에 두 개의 원자를 가지는 단순 육방정 격자구조이며,  $a = 0.2906 \text{ nm}$ ,  $c = 0.2837 \text{ nm}$  ( $c/a = 0.976$ )의 격자상수를 가지고 있다. Fig. 8(c)는 [001] 방향에서 바라본 WC 결정의 원자 배열이다. 일반적인 WC 입자 관찰 시 (010)면과 (100)면은 등가인 면으로 보이지만 원자배열은 서로 다르다. 즉, WC 결정은 (100)면과 (010)면의 W-W broken bond 수는 같지만, (100)면의 W-C broken bond 수는 (010)면에 비해서 2배 더 많은 W-C broken bond 수를 가지므로 (100)면의 계면에너지  $\gamma(100)$ 은 (010)면의 계면에너지  $\gamma(010)$ 보다 더 큰 값을 가진다. 이러한 계면에너지의 차이에 의해 결정구조 내 탄소원자의 위치가 {100}의 특정면으로 편중되어 위치함으로써 (100)면이 우선성장하여 WC입자는 삼각

프리즘형태를 가지는 것으로 보고되어 있다.<sup>11)</sup>

Fig. 6과 7에 나타난 수축길이변화 직전의 X선회절시험 결과(Fig. 6(b))와 주사전자현미경 관찰결과(Fig. 7(b))를 수축길이 변화 직후의 결과(Fig. 6(c), Fig. 7(c))와 비교하여 보면 급격한 수축길이 변화 과정에서 연소합성과정의 진행되었음을 관찰할 수 있으며, 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 60 MPa의 가압 상태에서 3000 A의 전류를 시료에 가하면 Joule열의 발생에 의해 계는 점화온도에 도달하게 된다. 이때 W와 C분말의 반응에 의해 화학적 생성열이 발생하면서 계의 온도는 급격히 상승되어 연소파가 전파한다. 연소파가 전파된 구역은 이론밀도가 낮은 반응물(12.16  $\text{g/cm}^3$ )의 구조가 붕괴되고 이론밀도가 높은 생성물(14.33  $\text{g/cm}^3$ )의 새로운 구조로 전환된다. Co를 결합제로 사용한 WC-20 vol.%Co 초경합금의 경우는 WC-Co의 공정온도인 약 1350°C 이상의 온도에서 Co 액상이 출현한다.<sup>12)</sup> Co 액상은 W와 C분말 사이에 침투하여 고상 입자사이에 막을 형성하므로 Co 액상의 점성유동과 모세관력에 의해 고상입자의 재배열이 일어나게 된다. 이 때 액상 내에 고용된 크고 작은 고상입자 간의 용해도 차이에 의해 작은 입자는 용해되어 큰 입자쪽으로 재석출되는 용해-재석출(solution and reprecipitation)과정이 진행되면서 입자의 형태가 충전이 쉬운 완만한 형태로 변화하게 되어 치밀화가 일어난다.<sup>12)</sup> 이와 같이 원료분말의 화학적 에너지와 전기적 에너지에 의해 계의 온도가 고온으로 상승하므로 연소파가 전파하면서 이론밀도가 낮은 반응물의 상 구조가 붕괴되고 이론밀도가 높은 새로운 구조의 화합물 상이 형성되는 연소합성과정과 동시에 60 MPa의 기계적 압력에 의한 고압상태에서 용해-재석출에 의한 액상소결의 치밀화과정이 진행되기 때문에 수축길이는 급격히 감

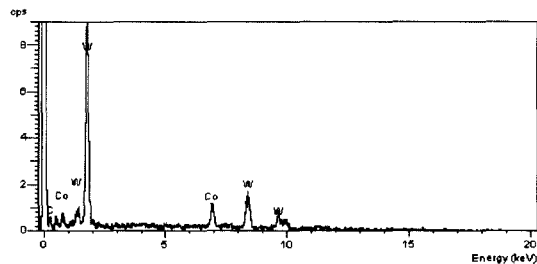


Fig. 9. EDS spectra for WC-20 vol.%Co composite.

**Table 1. Density, volume, and volume change during field-activated and pressure-assisted combustion synthesis of WC-20 vol.% Co composite.**

	Initial sample	Before ignition	Reactant(theo.)	Product	
				Expt.	Theo.
Density (g/cm <sup>3</sup> )	7.13	6.92	12.16	14.25	14.33
Sample volume (cm <sup>3</sup> )	2.10	2.17	1.23	1.05	1.05
Pore volume (cm <sup>3</sup> )	0.87	0.93	0.00	0.01	0.00
Volume change (%)	0.00	2.99	41.38	49.98	50.26
Incremental vol. change (%)	0.00	2.99	38.39	8.60	0.28

**Table 2. Nominal composition and structural characteristics of WC-Co composites produced by FAPACS and conventional methods.**

sample	Co contents		dwc ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Fracture toughness (MPa · m <sup>1/2</sup> )
	wt.%	vol.%				
FC6	6	10.1	1.0	0.39	1710	9.0
RTW6	6	10.1	1.2	0.43	1680	10.0
RTW10	10	16	2.5	1.0	1280	16.4
NA13	13	20.8	0.07	0.04	2050	8.3
FAPACS	12.5	20	0.92	0.56	1672	9.4

소하여 이론밀도에 가까운 치밀한 생성물을 얻을 수 있었던 것으로 생각된다.

Fig. 9에 나타낸 EDS(Energy Dispersive x-ray Spectrometer)가 장착된 주사전자현미경에 의한 X-ray spectrum 면분석 결과에서는 W, C, Co의 spectrum을 모두 확인할 수 있었다.

Table 1에 WC-20 vol.%Co 초경합금 제조과정의 초기시료, 연소합성 직전의 시편 및 반응생성물의 밀도, 부피, 기공의 부피 및 부피변화율을 나타내었다. 60 MPa의 가압상태에서 초기 시편의 두께는 6.7 mm였으며, 밀도는 7.13 g/cm<sup>3</sup>로 이론밀도(12.16 g/cm<sup>3</sup>)에 비하여 다공질의 상태임을 알 수 있다. 연소합성 직전의 온도(850°C)에서 시편의 두께는 6.9 mm였으며, 밀도는 6.92 g/cm<sup>3</sup>, 부피는 2.17 cm<sup>3</sup>으로 초기상태와 비교하여 2.99% 열팽창 하였다. 연소합성 직전(before ignition)과 연소합성 직후(product)의 구간에서는 49.98%의 부피변화에 의한 급격한 길이 수축현상이 발생하였다. 최종 생성물의 밀도는 14.25g/cm<sup>3</sup>로서 상대밀도가 99.4%인 치밀한 생성물을 얻을 수 있었다.

본 실험에서 사용한 압침방법(indentation method)에 의한 파괴인성의 측정은 실험이 간단하고 작은 시편의 경우에도 적용할 수 있다는 장점이 있지만, 신

뢰도가 비교적 낮다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 서로 교차하는 반원형태의 radial crack이 발생하는 경우, 미세구조의 크기가 1  $\mu\text{m}$ 정도라면 압침에 의해 생긴 균열의 크기  $c$ 는 약 100  $\mu\text{m}$ 정도로 미세구조보다 충분히 커야 한다. 또한 균열의 크기는  $c > 2a$  이어야 하며, 두 개의 서로 가로지르는 반원형 주 균열 외에 다른 균열이 생기지 않아야 하는 등의 조건을 만족하여야 한다.<sup>7)</sup>

본 실험에서 FAPACS법으로 제조한 WC-20 vol.%Co 초경합금의  $c/a$ 비는 2.4로서 위의 조건을 만족하는 유효한 파괴인성값을 얻을 수 있었다. Fig. 10은 WC-20 vol.%Co 초경합금의 표면에 생성된 압흔과 균열전파양상을 주사전자현미경으로 관찰한 미세조직 사진이다. 균열이 WC입자와 직각으로 만나는 경우에는 입내파괴가 진행되었고, 비스듬하게 만나는 경우에는 입계파괴가 진행되는 것을 관찰할 수 있다. Table 2에 FAPACS법으로 제조한 WC-20 vol.%Co 초경합금의 WC입도, 평균자유행로, 경도 및 파괴인성을 기존의 공정에 의해 제조한 일반 초경합금(FC, RTW company) 및 나노(nano)입자 초경합금<sup>6)</sup>과 비교하여 나타냈다. 초경합금의 물성 중에서 경도와 파괴인성은 기계적 성질을 평가하는 중요한 요소이다. 초경합금의 경도와 파괴인성은 탄화

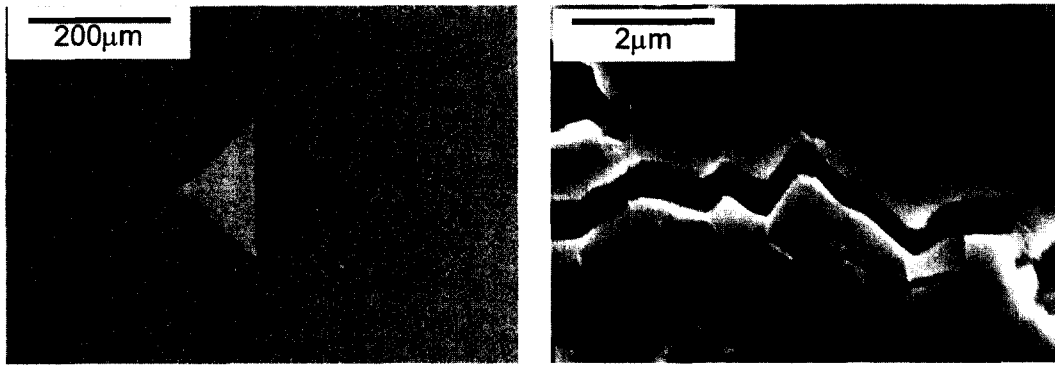


Fig. 10. Vickers hardness indentation and crack propagation of WC-20 vol.%Co composite.

물 입자크기와 분포, Co 함량뿐만 아니라 평균자유행로(mean free path; WC 입자사이에 존재하는 Co 상의 두께)에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있으며,<sup>1,2,6)</sup> 평균자유행로는 WC 입자크기와 Co 량에 의존한다. Co 함량이 증가할수록 평균자유행로는 증가하고, Co 함량이 동일한 경우에는 WC의 입도가 감소할수록 평균자유행로가 감소한다. 평균자유행로가 감소함에 따라 경도는 증가하고 파괴인성은 감소하는 것으로 보고되어있다.<sup>1,2,6)</sup>

FAPACS법에 의해 제조한 WC-20 vol.%Co 초경합금의 경도와 파괴인성은 일반적인 제조방법에 의해 제조한 10 vol.%Co를 함유한 초경합금(FC, RTW company)과 비슷한 값을 나타냈다. 하지만 20.8 vol.%Co를 함유한 나노입자의 초경합금에 비해 경도는 낮지만 파괴인성은 높았다.

기존의 WC-Co 초경합금 제조법은 W와 C의 혼합분말을 1500~2000°C의 고온으로 장시간 가열하여 WC분말을 제조한 후, Co분말을 결합제로 첨가하여 1400°C이상의 고온에서 장시간 소결하고, 치밀화하기 위하여 후열간정수압처리(post-hot isostatic pressing) 하는 복잡한 다단계의 공정을 가지고 있다.<sup>1,2)</sup> 이에 비해 가압통전활성연소법은 W, C, Co분말을 동시에 혼합하여 전기적 Joule열에 의해 고상분말간의 연소합성반응을 유도하고, 이때 발생하는 화학적 생성열을 적극적으로 이용한 제조법으로서 수분 이내의 짧은 시간에 단일공정으로 WC-Co 초경합금을 제조할 수 있다.

또한, 경도와 파괴인성도 기존의 WC-Co 초경합금의 제조법과 비교하여 유사한 값을 나타낸 것으로 볼

때 가압통전활성연소에 의한 WC-Co 초경합금의 제조법이 기존의 방법보다 경제적이고 효율적인 제조법인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

WC-Co 초경합금은 W와 C을 출발물질로 사용하여 WC분말을 제조한 후 Co를 첨가하여 고온에서 장시간 소결하는 복잡한 다단계의 공정에 의해 제조된다. 따라서, 본 연구는 W, C, Co를 출발물질로 사용하여 단일공정으로 짧은 시간 내에 치밀한 WC-20 vol.%Co 초경합금을 제조하기 위해 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. W, C, Co 분말을 출발물질로 사용하여 60 MPa의 압력과 3000 A의 전류를 통전 시킴으로서 상대밀도가 99.4%인 치밀한 WC-20 vol.%Co 복합재료를 수분 이내의 짧은 시간에 단일공정으로 제조하였다.
2. WC-20 vol.%Co 초경합금 제조과정에서 시편의 수축길이가 급격하게 증가한 이유는 이론밀도가 낮은 분말상태의 반응물로부터 이론밀도가 높은 생성물이 형성됨과 동시에 연소합성과정에서 발생하는 생성열과 전기적 Joule열에 의해 결합제로 첨가한 Co가 용융하여 고상입자의 재배열을 유도하고, 용해-재석출 기구에 의한 액상소결과정에서 치밀화가 진행되었기 때문인 것으로 분석된다.
3. FAPACS법으로 제조한 WC-20 vol.%Co 초경합금의 경도와 파괴인성은 각각 1672 kg/mm<sup>2</sup>, 9.4 MPa · m<sup>1/2</sup> 이었다. 이들 값은 나노입자의 초경합금에 비해서는 경도는 낮았고 파괴인성은 높은 값

을 나타내었지만, 기존의 방법으로 제조한 일반 초경 합금에 비해 유사한 값을 나타내었다. 따라서, 단일 공정으로 수분이내의 짧은 시간에 치밀한 WC-Co 초경합금을 제조할 수 있는 가압통전활성연소법이 기존의 제조법에 비해 경제적이고 효율적인 제조법인 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 전북대학교 신소재개발연구소 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김병기, J. Korean Powder Metall. Inst., **6** (1999) 1
2. 광용, 박종구, 요업재료의 과학과 기술, **8** (1993) 131
3. I. J. Shon, Z. A. Munir and K. Yamazaki, J. Am. Ceram. Soc., **79** (1996) 1875
4. Z. A. Munir, I. J. Shon and K. Yamazaki, US patent, no. 5,794,113 (1988)
5. R. K. Wade, J. J. Petrovic, J. Am Ceram. Soc., **75** (1992) 1682
6. K. Jia, T. E. Fisher and B. Gallois, Nanostructured Materials, **10** (1998) 875
7. 이준근 : 세라믹스의 기계적 특성, 반도출판사 서울 (1994) 51
8. G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn and D. B. Marshall, J. Am. Ceram. Soc., **64** (1981) 533
9. A. F. Giamei, J. Burma and E. J. Freise, Cobalt, **39** (1968) 88
10. H. Dawihl and B. Fresce Cobalt, **22** (1964)
11. 한석희, 박종구, 허무영, J. Korean Powder Metall. Inst., **6** (1999) 307
12. K. Jia, T. E. Fischer and B. Gallois, Nanostructured Materials, **10** (1998) 875