

초소형 초경 PCD Tool 제작을 위한 초경합금간 확산접합의 온도 의존성 연구

정바위^a, 박정우^{b*}

The Temperature Dependence of the Diffusion Bonding Between Tungsten Carbides for Micro WC-PCD Tool Fabrication

B. W. Jeong^a, J. W. Park^{b*}^a Department of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun University, Republic of Korea^b Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	25	May	2013
Revised	8	July	2013
Accepted	24	September	2013

Keywords:

Diffusion bonding
Bonding temperature
Tungsten carbide
Filler metal
Melting temperature

ABSTRACT

This study demonstrates the diffusion bonding process between a tungsten carbide shank (K30) and tungsten carbide (DX5) for micro WC-PCD tool fabrication. A type of nickel alloy was used as the filler metal to improve the bondability between K30 and DX5. The bonding pressure, time, and surrounding conditions were kept constant. In particular, the normal pressure was controlled precisely under buckling analysis. Diffusion bonding was performed at various operation temperatures (1170–1770 K) by using a specially designed jig. The microstructure on the localized bonded surface was analyzed using scanning electron microscopy and optical microscopy. In the case of diffusion bonding of WC at 1370–1770 K, the filler metal melted completely and diffused between the two base metals, and they were bonded more tightly on both sides than at temperatures below 1370 K. Our results demonstrated the importance of sensitive temperature dependence of diffusion bonding.

1. 서론

첨단 과학 기술이 발달함에 따라 여러 산업분야의 제품들이 소형화 추세를 보이고 있다. 소형화된 제품을 생산하기 위해서는 생산 제품의 부품 또한 소형화가 뒤따르게 된다. 따라서 복잡하고 정밀한 형태를 갖는 부품을 소형화시켜 가공하기 위해서는 이에 부합하는 적절한 공구가 필요하게 되었다. 이러한 정밀하고 복잡한 부품을 가공하기 위해서는 그에 적합한 공구를 사용해야 한다. 절삭 가공을 할 때, 국부적으로 높은 압력과 온도, 또한 마찰에 의한 열과 마멸에 견딜 수 있어야 하며, 효율적인 생산을 위해 가공 속도를

높일 수 있는 공구의 재질도 고려된다.

절삭공구를 제작하기 위한 재질은 다음과 같다. 초경합금(WC; tungsten carbide)은 텅스텐 분말에 결합제로 코발트(Co)를 사용하여 고온소결하여 제조한 금속이다. 초경합금은 경도 및 고온경도가 높고, 내열성과 내마멸성이 높은 금속으로 고온 고속절삭에서 우수한 성능을 가지고 있어 금형과 절삭 및 내마멸성 공구의 재료로 사용된다¹⁻³⁾. 그리고 초경합금보다 경도가 좋고 마찰계수가 적으며 피삭재의 정밀 가공이 가능한 PCD (Poly Crystal Diamond) 소재의 활용도가 점점 다양해지고 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7277

Fax: +82-62-230-7277

E-mail address: jwoopark@chosun.ac.kr (Jeong Woo Park).

본 실험에서는 초경합금 소재로 제작된 샹크(shank)와 초경합금 상단에 PCD가 소결 부착된 초소형 PCD-WC 복합체를 이용하여, 초정밀 PCD 공구를 제작하기 위해 두 소재를 접합(joining)하는 기초 공정이 필요하며 가공물의 형태가 공구로써 효과가 있어야 한다. 본 실험에서의 접합은 초소형 PCD-WC 복합체의 초경합금 부분과 샹크 형태의 초경합금을 대상으로 한다. 초소형 초경합금 PCD 공구를 제작하기 위해서는 모재의 접합 표면을 용융시켜 진행되기 때문에 공구 형상에 거의 영향을 주지 않으며 접합부에 기공 결합 발생 가능성이 적고 소재의 기존 강도 수준으로 향상 되어 가공물이 공구로써 효율적으로 사용될 수 있는 확산접합 공정을 이용하고자 한다^{4,5}.

확산접합(diffusion bonding)은 금속재료를 밀착시켜 소재를 가열하면서 소성변형을 일으키지 않을 정도로 압력을 가해, 접합면 사이에서 발생하는 원자의 확산을 이용하여 접합하는 방법으로 접합 후의 열 응력이나 변형이 적고, 조직 변화에 의한 재료의 열화가 적다는 것이 특징이다⁵. 확산접합은 고상 확산 접합과 액상 확산 접합으로 구분이 되는데, 고상 확산 접합은 삽입금속(filler metal)의 삽입 없이 진행되는 접합으로 접합 가공 시 높은 압력과 온도가

필요하게 되며, 모재에 열적 영향을 미치는 단점이 있다. 이와 다르게 액상확산접합은 두 모재 사이에 삽입금속을 삽입하고, 이 삽입금속의 용융을 통해 모재 용융점의 강하를 유도하여 모재의 접합 표면만을 용융시켜 접합하는 방식이다. 고상확산접합에 비해 낮은 온도와 압력이 거의 필요 없다는 장점이 있다^{7,8}.

본 실험에서는 초소형 PCD 공구를 제작하기 위하여 초경합금 샹크와 초소형 PCD-WC 복합체를 접합하는 공정으로 액상확산접합을 선정하였다. 액상확산접합의 원리는 Fig. 1과 같다. Fig. 1과 같이 두 모재의 접합 표면 사이에 삽입 금속을 위치시킨 후, 구성 요소 조립체를 열처리로써 장입하여 좌굴하중 이하의 임의의 압축 압력으로 고정한다. 압력은 확산 접합 공정이 진행되는 동안 유지한다. Fig. 1(a)은 가열을 통해 용점저하원소가 포함된 삽입금속이 용융이 되는 단계이다. Fig. 1(b)은 접합온도를 유지하는 과정에서 두 모재가용융점 이하의 온도임에도 불구하고 용융된 삽입금속의 용융점저하원소 성분에 의해 접합부의 표면에서 용융이 진행되어 액상층이 확대되는 과정이다. 모재의 용융 반응이 완료된 경우 다음 과정인 Fig. 1(c)로 진행된다. 등온응고 과정을 거치며, 접합의 액상의 농도가 균일하게 유지되며 소멸되기 시작한다. 모재의 액상이 소멸과 함께, 용합된 금속 조직이 불균일하게 조직화된다. 최종적으로 Fig. 1(d)와 같이 접합부의액상이 완벽하게 소멸되면서 불균일했던 조직이 균일된 조직으로 생성된다. 즉, 확산접합은 액상을 등온응고(isothermal solidification)시켜 접합하는 방법이다. 등온응고 과정을 통해 접합부내의 합금원소가 모재로 확산하게 된다. 그로 인해 조성이 균질화 되고 접합부의 용융점이 상승하게 되어 다시 접합온도로 가열하여도 용융되지 않는 특징을 갖는다⁸⁻¹⁰. 이러한 확산접합 공정을 진행 할 때 중요한 공정 변수로는 접합 온도, 압력, 시간 및 기타 변수가 있으나, 본 실험에서는 초소형 초경합금 PCD 공구제작하기 위해 압력 및 시간의 변수를 기초 실험 및 해석을 통하여 일정하게 고정시킨 후, 접합 온도에 변화를 주어 확산접합 시 온도에 대한 의존성에 대해 알아보하고자 한다.

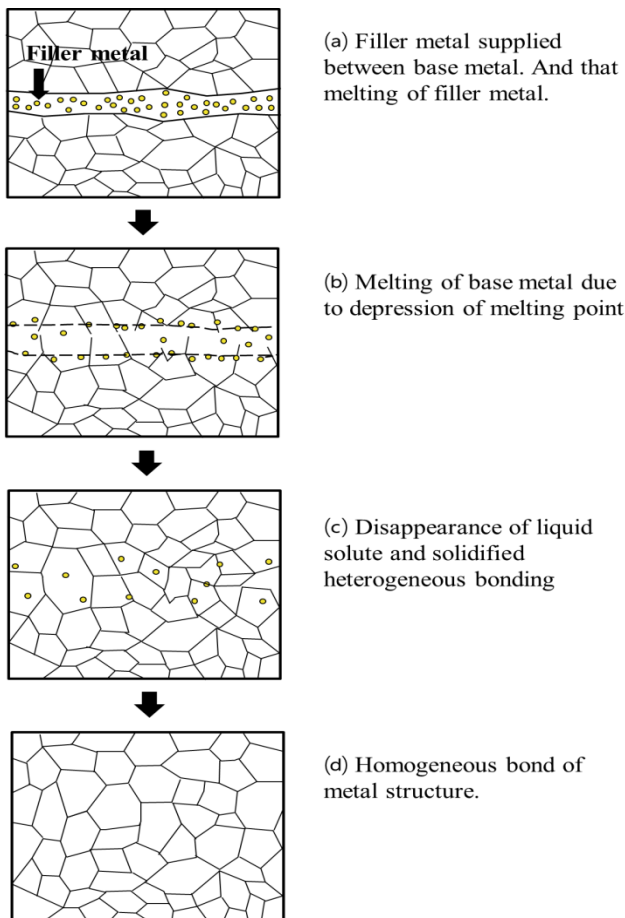


Fig. 1 Mechanism of transient liquid diffusion bonding

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 재료의 형상은 Fig. 2와 같고, 절삭공구로서 안정된 물리적 성질을 가지는 초경합금을 사용하였다. 초소형 초경합금 PCD 공구를 제작하기 위한 초경합금 샹크와 초소형 PCD-WC 복합체의 초경합금 부는 코발트를 결합제로 한 초경합금이다. 초경합금 샹크는 K30 재를 사용하여 제작되었고, 초소형 PCD-WC 복합체의 초경합금 부는 DX5 재로 제작되었다. 그리고 확산접합 시 접합부의 밀착화를 촉진시키는 중요한 재료인 삽입금속으로는 니켈 합금의 MBF20을 선정하였다. 삽입금속의 용도 특

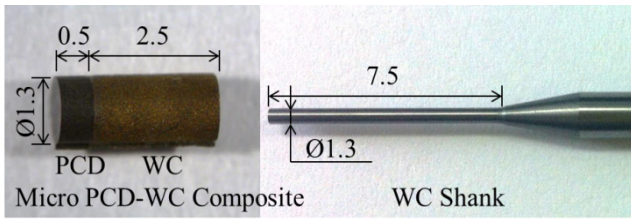


Fig. 2 Diffusion bonding workpiece: micro PCD-WC (left) composite and WC shank (right)

Table 1 Chemical compositions of material and workpiece

Materials (wt%)		Ni	Cr	Si	B	Fe	W	Co
Filler metal	MBF20	82	7	5	3	3	-	-
Base metal	DX5	-	-	-	-	-	84	16
	K30	-	-	-	-	-	90	10

성상 모재의 용융점보다 낮은 온도 범위를 가지며 높은 확산과 흡수율을 통해 두 접합면에서 본래의 용융점을 낮추는 용점저하원소 성분이 포함된 범용적으로 니켈 합금(nickel alloy)을 사용하여 확산 접합을 실시하였다. 확산접합에 사용된 니켈합금은 용융점을 낮추기 위한 붕산(B)과 규소(Si) 그리고 기계적 성질을 향상시키기 위한 크롬(Cr)이 첨가되어 있다. 확산접합에 사용된 공작물 및 재료의 화학조성은 Table 1과 같다.

2.2 실험조건

확산접합 공정의 중요 변수로 접합온도, 접합압력, 접합시간 등이 있다. 본 실험에서는 주어진 환경에서 접합 온도의 의존성에 대한 특성을 분석하기 위하여 다른 중요 변수들은 동일하게 유지하였다. 본 실험에서 진행된 액상확산접합의 실험 조건은 Table 2와 같다.

접합 압력은 액상확산접합에서 온도에 비해 큰 비중을 차지하는 변수가 아니므로 두 모재의 접합부 사이 공간을 최소화 시킬 정도의 압력이 필요하다. Fig. 3은 확산접합 실험에 사용되는 초경합금 생크의 적정 수직 압력을 산출하기 위해서 생크의 지름 및 길이에 대해 허용 압력을 나타낸 결과이다. 확산접합에 필요한 접합압력은 최소 0.04 MPa 이상이므로, 과도한 힘과 고온의 환경으로 인한 시편의 좌굴 현상을 방지하기 위해 본 실험에서는 좌굴 하중보다 현저히 낮은 2.2 MPa의 접합 압력을 가하였다. 그리고 접합 시간은 목표온도에 도달한 후 7,200초 동안 유지를 하였고, 접합 분위기는 주위 환경으로부터 받는 영향을 최소화하기 위해 510-5 Torr의 진공 분위기에서 진행하였다. 주요 변수인 접합온도는 1,170 K, 1,220 K, 1,370 K, 1,770 K의 온도에서 각각 확산접합 실험이 진행되었다. 각각의 접합 온도 조건에 따라 가열을 통해 접합온도에 도달하면 접합 유지 시간을 거친 후, 다음으로 열처리를 위한

Table 2 Experimental conditions for diffusion bonding

Pressure (MPa)	Time (s)	H. T. time (s)		Atmosphere (Torr)
2.2	7,200	18,000		510 ⁻⁵
Temp. (K)	1,170	1,220	1,370	1,770
H. T. temp. (K)	1,120	1,120	1,220	1,320

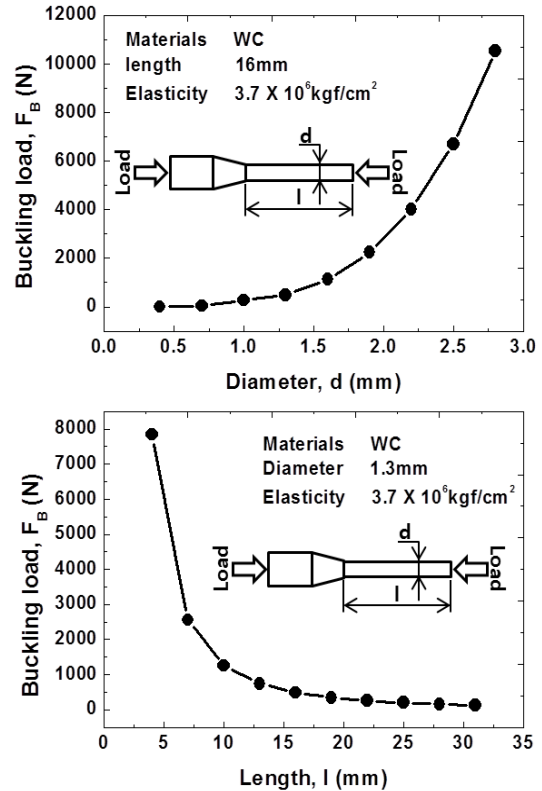


Fig. 3 Allowable pressure on tungsten carbide shank according to diameter and length dimensions

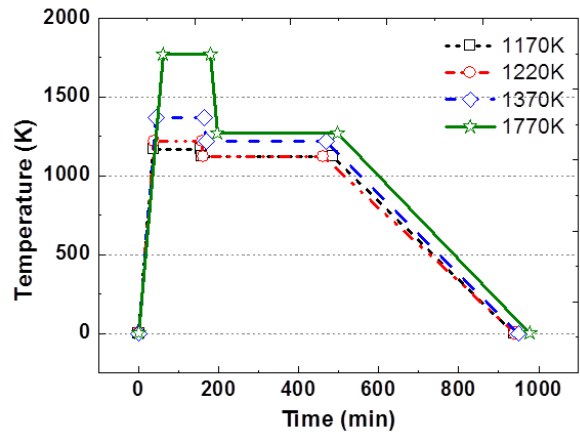


Fig. 4 Temperature variation during diffusion bonding progress

온도(heat treatment temperature) 로 낮추어 18,000 s의 시간 동안 유지하고 서서히 상온으로 공랭을 실시하였다. 본 실험에서의 공정 진행에 따른 온도 변화는 Fig. 4와 같다.

2.3 실험방법

초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체를 확산접합을 하기 위해서 접합 표면을 폴리싱 기를 이용하여 연마한다. 그리고 두 시편과 삽입금속을 함께 초음파 세정 후 건조하였다. Fig. 5는 확산접합 실험을 위한 지그(jig)의 개략도이다. 그라파이트 소재로 제작된 지그에 가이드 홀(guide hole)을 기준으로 하여 두 장(40 μm)의 삽입금속을 사이에 두고 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체를 조립한다. 그리고 Fig. 6과 같은 진공 열처리로에 장입하여 압력을 가한 후, 초소형 초경합금 PCD 공구 제작을 위한 확산접합 실험을 진행하였다. 확산접합 공정 후 접합부를 SEM (Scanning Electron Microscope)과 광학현미경(optical microscopy)으로 비교 분석하였다.

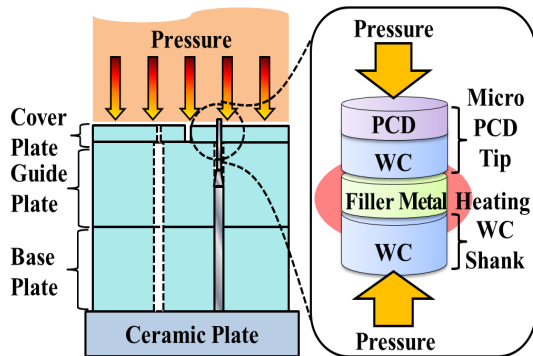


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental set-up for diffusion bonding

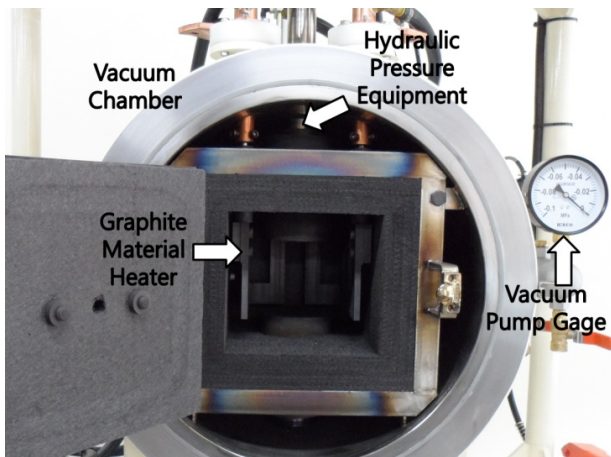


Fig. 6 The vacuum hot press for micro WC-PCD tool diffusion bonding

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 7은 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체를 니켈합금 재질의 삽입금속을 이용하여 액상확산접합을 수행한 후, 접합 온도에 따른 표면 형상을 광학현미경과 SEM으로 측정된 것이다. A-a는 1,120 K, B-b는 1,220 K, C-c는 1,370 K, D-d는 1,770 K의 접합온도를 나타낸다. 본 실험에 사용된 시편들은 전체적으로 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체가 확산접합 되어 초소형 초경합금 PCD 공구로 사용될 하나의 블랭크(blank)로 제작된 형상을 보였다.

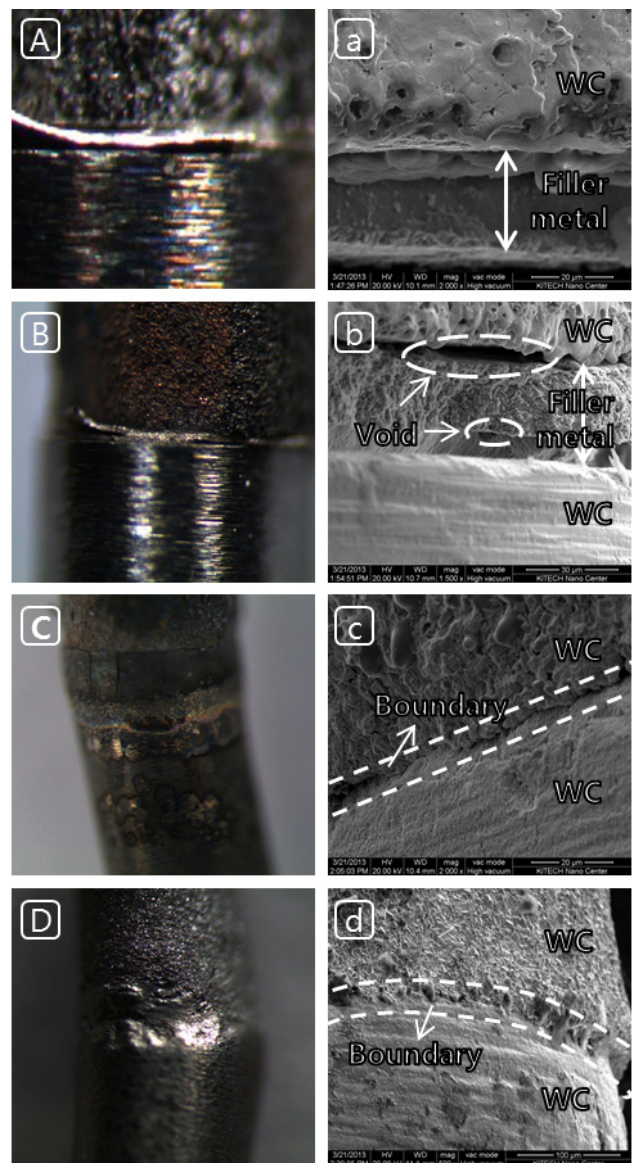


Fig. 7 (A-D) SEM (scanning electron microscopy) and (a-d) optical microscopy images of the bonded joint for various bonding temperatures: (A, a) 1,170 K, (B, b) 1,220 K, (C, c) 1,370 K, and (D, d) 1,770 K

Fig. 7(A-a)는 접합온도 1,170 K의 실험조건에 대한 결과로서, 삽입금속이 용융되지 않고 상당부분 기존의 형상을 유지한 것으로 보인다. 광학현미경 A의 이미지를 보면 삽입금속이 접합면의 둘레를 벗어나 돌출된 것을 볼 수 있다. 이것은 기존의 삽입금속이 접합부 둘레를 벗어나는 크기가 아니었으나 가열 가압으로 인해 용융이 진행되어 접합면의 둘레 밖으로 튀어나온 것으로 볼 수 있다. 삽입금속이 완전히 용융되지 않은 형상에서 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체가 하나의 블랭크 형상을 유지하는 것을 보아 삽입금속과 초경합금 접합표면에서 미세한 접합 반응이 일어난 것으로 추측할 수 있다. Fig. 7(B-b)는 접합온도가 1,220 K의 조건에서 접합 결과이다. 앞의 A-a의 1,170 K의 접합 결과와 비슷한 형상을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 7(B)에서 (A)와 마찬가지로 밖으로 돌출 되어 있는 것을 볼 수 있지만, 중앙 부분에서 두 장의 삽입금속이 하나로 융합된 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 삽입금속이 1,220 K의 온도에서 용융이 뚜렷하게 진행되는 것을 볼 수 있으며, 가공 시간의 증가 시 완전한 용융이 될 것으로 추측할 수 있었다. (b)의 SEM 이미지에 의하면 초소형 PCD-WC 복합체의 초경합금 부와 삽입금속 사이에 공극(Void)이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 삽입금속이 완전히 용융되지 않았으며, 해당 온도에서 적용된 2.2 MPa의 압력이 낮아 모재가 확산융합이 되지 않았다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(C-c)는 1,370 K의 접합 조건의 결과이다. 앞의 1,170 K와 1,220 K의 조건과 확연히 다른 형상을 보이고 있는데, 삽입금속 층이 완전히 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 삽입금속이 완전히 용융되어 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체의 양 모재의 표면으로 젖어 들어가 확산 접합이 이루어진 결과로 판단된다. Fig. 7(c)의 SEM 이미지를 보면 두 초경합금 사이의 접합 경계층만 남아있고, 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체의 두 모재 사이에 미세한 공극의 형상을 확인할 수 있다. Fig. 7(D-d)는 1,770 K의 접합온도 조건의 접합 결과이다. 광학현미경의 이미지인(D)에 의하면 앞의 1,370 K의 조건과 마찬가지로 삽입금속 층이 완전히 사라진 것을 볼 수 있으며, 초경합금 부분이 매우 크게 용융되었던 흔적이 보인다. 이것은 용융된 삽입금속이 주변으로 흘러내리는 슬립 현상으로 인해 삽입금속의 용점저하원소로 인해 측면에서의 반응과 과도한 고온 환경으로 인하여 접합면 주위의 초경합금 모재 부분이 일부 용융 접합된 것으로 추측된다. SEM 이미지의 (d)의 경계층을 보면 삽입금속과 모재의 용융으로 인해 확산접합과 용융접합이 동시에 일어난 것으로 판단되며, 경계층에서 삽입금속의 잔재는 확인되지 않았다. 즉 (b)와 (c) 조건 사이에서 해당 시간 동안 충분히 확산접합이 시작되며, (d) 조건의 고온 환경에서는 모재의 접합면 이외의 부분에서 일부 용융 접합의 발생을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 초경합금 생크와 초소형 PCD-WC 복합체를 니켈합금의 삽입금속(MBF 20)을 이용하여 정밀 부품 제작용 초소형 초경합금 PCD 공구를 제작하기 위한 확산접합 공정을 개발하기 위하여 수행하였다. 확산접합의 중요한 변수들 중 하나인 접합온도의 의존성에 대해 분석한 결과이다. 기본적으로 모재인 초경합금보다 낮은 용융점에서 실험이 진행되었고, 전체적으로 두 모재의 접합이 이루어진 결과를 보였다. 대체로 낮은 접합온도 조건인 1,170 K, 1,220 K의 접합 결과에서는, 니켈합금의 삽입금속이 완전히 용융되지 않아, 결과적으로 두 모재가 완전한 확산접합을 형성하지는 않았다. 반대로 1,370 K의 온도 조건부터 삽입금속의 용융이 활발하게 이루어져 두 모재의 접합표면으로 삽입금속의 성분이 확산되었고 그로 인해 본래의 용점 이하의 온도에서 용융되어 두 초경합금이 서로 융합되는 형상을 볼 수 있었다. 가장 높은 접합온도 조건이었던 1770 K의 조건에서는 삽입금속에 의한 초경합금의 용융반응이 과도하게 발생한 결과를 확인할 수 있었다. 결론적으로 접합온도의 상승은 삽입금속의 용융에 직접적인 영향을 주어, 삽입금속에 의한 두 초경합금의 접합면에서 접합성의 향상에 밀접한 관계가 있으며, 차후 초소형 PCD 공구를 제작하기 위한 블랭크의 중요 제조 파라미터임을 확인하였다.

후기

이 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업인 “마이크로 방전 기반 하이브리드다축 가공 시스템 기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Heo, S. J., 2013, Wear Mechanism and Machinability of PCD Tool in Turning Tungsten Carbides, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 22:1 85-91.
- [2] Kim G. H. 2002, Analysis of Characteristic Evaluation of Microdrilling for the Cemented Carbides Materials. Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers. 11:6 52-59.
- [3] Cho. S. H., Hwang. S. K., Park. W. K., Lee. O. S. 1994, Sintering Characteristics of WC-SiC-10Ni Hard Materials with TiC Addition. Journal of the Korean Inst. Of Met. & Mater. 32:7 786-791.

- [4] Kang. C. Y. 1998, On the Transient Liquid Phase Diffusion Bonding. *Journal of the Korean Welding Society*. 7:6 12-24.
- [5] Byng. I. K., Jung. H. S. 2000, The Study on Diffusion Bonding of Hard Metal to High Speed Steel. *The Korean Welding and Joining Society*. 317-319.
- [6] Kwon. B. D., Lee. W. B., Kim. B. S., Hong. T. W., Shur. C. C., Jung. S. B. 2000, Joinability of Tool Steels by TLP Bonding. *The Korean Welding and Joining Society*. 12:4 439-444.
- [7] Ravisanker. B., Krishnamoorthi. J., Ramakrishnan. S. S., Angelo. P. C. 2009, Diffusion bonding of SU 263. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 2135-2144.
- [8] Bhanumathy K, Schmid-Fetzer R. 1996, Solid-state reaction bonding of silicon carbide(HIPSiC) below 100 0°C. *Mater Sci Eng*. 220 35-40.
- [9] ASSADI. H., SHIRZADI. A. A., WALLACH. E. R. 2001, Transient liquid phase diffusion bonding under a temperature gradient: Modelling of the interface morphology. *Acta mater*, 49 31-39.
- [10] Rusnaldy. 2001, Diffusion Bonding: An Advanced of Material Process. *ROTASI*. 3:1 23-27.