



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2015년 2월  
석사학위논문

# 확산접합을 이용한 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

정 바 위

# 확산접합을 이용한 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작에 관한 연구

Fabrication of Micro PCD Drill Blank using  
Diffusion Bonding Process

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

정 바 위

# 확산접합을 이용한 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작에 관한 연구

지도교수 박 정 우

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2014년 10 월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

정 바 위

정바위의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 이 동 기 ㉠

위 원 조선대학교 교수 조 창 현 ㉠

위 원 조선대학교 교수 박 정 우 ㉠

2014년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
LIST OF PHOTOGRAPHS .....	IV
ABSTRACT .....	V
제 1 장 서 론 .....	1
1-1 연구배경 .....	1
1-2 연구목적 및 내용 .....	4
제 2 장 실험설계 및 방법 .....	7
2-1 확산접합 기초이론 .....	7
2-2 확산접합 인자 .....	18
2-3 확산접합 공정 설계 및 시스템 .....	22
2-4 실험 방법 .....	28
제 3 장 확산접합 공정 조건 변화에 따른 접합 특성 .....	30
3-1 접합 온도 조건의 영향 분석 .....	30
3-2 접합 시간 및 압력 조건의 영향 분석 .....	35

제 4 장	삽입 금속 조건 변화에 따른 접합 특성	40
4-1	삽입 금속 종류의 영향 분석	40
제 5 장	표면 상태 조건 변화에 따른 접합 특성	44
5-1	표면 거칠기 조건의 영향 분석	44
5-2	접합부 형상 조건의 영향 분석	49
제 6 장	결론	54

참 고 문 헌

## LIST OF TABLES

Table 1	Chemical compositions of the two cemented carbide for micro PCD drill blank fabrication .....	23
Table 2	Chemical compositions of the two filler metal types used in experiment .....	25
Table 3	Experimental conditions for diffusion bonding of bonding temperature .....	30
Table 4	Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to various bonding temperature conditions	34
Table 5	Conditions on pressure and boning time for diffusion bonding	35
Table 6	Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions .....	39
Table 7	Diffusion bonding conditions according to two filler metal types (sheet and paste-type) .....	40
Table 8	Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions .....	43
Table 9	Diffusion bonding conditions according to various surface roughness conditions .....	45
Table 10	Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions .....	48
Table 11	Diffusion bonding conditions and the copula surface areas .....	50
Table 12	Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions .....	53



## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Existing PCD drill fabrication processes .....	3
Fig. 2 Fabricated process of diffusion bonding for micro PCD drill blank	5
Fig. 3 Research procedure of diffusion bonding for conditions and analyses .....	6
Fig. 4 Division of joining processes, welding and bonding characteristics .....	10
Fig. 5 Summary of diffusion bonding processes .....	10
Fig. 6 Mechanism for the liquid phase diffusion bonding process with two base metals and filler metal .....	16
Fig. 7 Schematic illustration for liquid phase diffusion bonding process	17
Fig. 8 Factors and division that affect the diffusion bonding efficiency	18
Fig. 9 Design of micro PCD tip and cemented carbide shank .....	22
Fig. 10 Schematic diagram on graphite jig of the experimental set-up for diffusion bonding .....	27
Fig. 11 (A-D) Optical microscopy and (a-d) SEM (scanning electron microscopy) images of the bonded copula for various temperatures: (A-a)1173 K, (B-b)1223 K, (C-c)1260 K, (D-d)1373 K, (E-e)1773 K .....	33
Fig. 12 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through various bonding temperature conditions by UTM .....	34
Fig. 13 (A-C) Optical microscopy and (a-c) Micro X-ray CT images of the bonded copula for bonding pressure and time: (A-a) reference, (B-b) pressure, (C-c) time condition .....	38
Fig. 14 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through bonding pressure and time conditions by UTM .....	39
Fig. 15 (A-B) Optical microscopy and (a-b) Micro X-ray CT images of the bonded copula for two filler metal types: (A-a) sheet type, (B-b) paste type .....	42

Fig. 16 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through the two filler metal type conditions ..... 42

Fig. 17 (A-B) Optical microscopy images of the fracture surface for two filler metal types ..... 43

Fig. 18 (A-C) Surface roughness variation images for diffusion bonding ..... 45

Fig. 19 Measuring results of diffusion bonded copula through various surface roughness by Micro X-ray CT ..... 47

Fig. 20 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through a various surface roughness ..... 48

Fig. 21 Proportional specimen on the tungsten carbide in various copula shapes ..... 50

Fig. 22 Measuring results of diffusion bonded layer for the copula shape by optical microscope ..... 52

Fig. 23 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding according to various copula shapes ..... 53

## LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 1	Comparison of the welding and diffusion bonding results .....	7
Photo. 2	Fabricated micro PCD tip and cemented carbide shank .....	23
Photo. 3	Shape and type of the nickel alloy filler metal used in the experiment .....	25
Photo. 4	Assembly process and fabricated graphite jig .....	27
Photo. 5	Cemented carbide surface treatment through the polishing machine (KDPI-330) .....	28
Photo. 6	Equipment used to fabrication, vacuum hot press furnace (AVHF-101010-15H, ACE vacuum Co.,Ltd) .....	29

# ABSTRACT

## Fabrication of Micro PCD Drill Blank using Diffusion Bonding Process

Jeong, Ba-Wi

Advisor : Prof. Park, Jeong-Woo, Ph. D.

Dept. of advanced Part & Materials  
Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, a precision machining drill blank, consisting of a micro polycrystalline diamond-tungsten carbide (PCD-WC) composite tip and a cemented carbide (WC-Co alloy) shank, was fabricated via diffusion bonding. Two types of filler metal (sheet and paste-type) were used in the copula region. The two base metals of the WC-Co alloy, along with a nickel alloy filler metal at the interface, were pressed together at high temperature and pressure for a period of time sufficient for atomic diffusion. The copula (bonding layer) of the internal bond was examined using optical microscopy and scanning electron microscopy. The bond characteristics and bond interface composition for the diffusion bonded blank, not accessible by conventional nondestructive measurement techniques, were evaluated using micro X-ray computed tomography. A universal testing machine was used to determine the strength of the bonded proportional specimen on cemented carbide. This fabrication technique and the evaluation procedure for the bond interface provide the means to predict the effects of diffusion bonding for micro PCD drill blank fabrication.

# 제 1 장 서 론

## 1-1 연구배경

최근 첨단 기술 산업의 발달과 더불어 고부가가치 제품의 요구가 증대되고 있다. 그에 따라 전자 산업의 각종 부품 및 제품이 소형화 추세를 보이고 있으며, 항공우주산업, 자동차산업 분야에 널리 사용되는 탄소 섬유 강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 과 같이 요구되는 재료의 물성이 복합화 되고, 사용 환경이 점차 열악해 지고 있는 것이 사실이다.<sup>1-5)</sup> 소형화 (miniaturization) 된 부품을 보면 정밀하고 복잡한 형상을 가지는 것이 특징이다. 소형화, 정밀화 (precision) 그리고 난삭성 (difficult-to-cut)의 특성을 가지는 재료를 가공을 위한 연구를 뒷받침할 수 있는 적절한 절삭 공구가 필요하게 되었다.<sup>6-8)</sup>

절삭 공구의 기술개발은 고속도강 계열에서 초경합금 (cemented carbide) 제품으로 전환 및 원료의 고급화가 진행되었다. 초경합금 절삭공구의 개발을 시작으로 TiCN-Ni 계 서메트 (cermet) 공구, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 계 세라믹 공구, 코팅초경공구, 다결정 다이아몬드 (polycrystalline diamond, PCD), CBN (cubic boron nitride) 소결체 공구 등이 개발되어 각각의 절삭 공구는 뛰어난 성능을 발휘하여 공업 발전에 지대한 공헌을 해 왔다고 할 수 있다.<sup>9-10)</sup> 절삭 공구의 이상향은 고속, 고능률, 고정밀 및 난삭재의 가공비중 증대에 중점을 두고 있다. 특히 난삭재와 신소재 개발에 따른 공구 형상 가공 연구가 활발하며 비철금속 가공용 등 절삭 공구가 요구되는 시점이다.

산업에 사용되는 절삭 공구의 재료 구비 조건은 절삭 가공 시 국부적으로 높은 온도와 압력 그리고 마찰에 의한 열과 마멸에 견딜 수 있으며, 절삭 속도를 증가시켜 효율적인 생산을 위한 공구의 재질이 고려된다.<sup>11-13)</sup> 절삭 공구 소재로 가장 대표적인 초경합금은 분말야금법에 의해 제조되며, 그 특성은 실온 및 고온에서의 고경도와 내마모성과 압축강도가 높다는 것이다. 그리고 고온 강도 및 고온 내변형성이 우수하고 사용목적과 용도에 따라 재종 및 형상이 다양하다.<sup>14-15)</sup> 그리고 최근 부각되는 난삭성 소재인 CFRP 를 홀 (hole) 가공하기에 PCD 는 최적의 재료이다.<sup>16-18)</sup> PCD 는 다이아몬드 입자와 코발트 바인더를 소결하여 제작된다. 그 특성

은 다이아몬드와 비슷한 강도를 지니고 있어, 고속 절삭이 가능하며 열팽창 계수가 적고 열전도율이 크다. 비철금속의 정밀 완성 가공 및 경질삭의 초정밀 연속 절삭에 적합하기 때문에 유리 소재 등 기계 부품 가공 이외에도 다양한 분야에서 절삭 공구로 많이 이용된다. 그리고 전도성 성질을 지니고 있기 때문에 방전 가공을 통하여 원하는 공구 형상을 만드는데 용이하다.<sup>19-21)</sup>

이와 같은 특성을 가지는 재료인 초경합금과 PCD 를 이용하여 복합소재 공구로 가공된 것이 PCD 드릴이다. 내마모성이 우수하며 강도가 강한 특징으로 인해 소모성이라는 절삭 공구의 특성을 공구 수명과 제품의 생산성 향상에 의해 전체적으로 비용 효율화가 되도록 유도하였다. 초소형화된 PCD 드릴은 초경합금과 같은 고경도 비철금속이나 유리, 세라믹과 같은 취성재료에 미세가공이 가능하게 된다.<sup>20)</sup>

국내 절삭 공구 시장은 세계 시장에서 품질 대비 가격경쟁력 확보로 수요가 증가되는 추세에 있으며, 그 품질은 선진국과 동등한 품질을 가지고 있다. 그러나  $\varnothing 0.1 \sim 1.0$  mm 의 초소형 PCD 드릴은 국내에서 개발 및 생산이 되지 않아 선진국으로부터 고비용으로 수입되는 상황이다.<sup>9)</sup> 현재 일본의 Unoin Tool co. 에서는  $\varnothing 0.1$  의 초소형 PCD 드릴을 개발 및 판매 중인 실정이다.

따라서 경도와 강도가 우수하며 절삭공구로써 충분한 특성을 가지는 초소형 PCD 드릴의 국산화를 제작하기 위한 정밀 공정 분야의 개발이 필수적으로 연구되어야 할 부분이다. 기존의 PCD 드릴의 제작 방법은 Fig. 1(A) 와 같이 초경합금 블랭크 (blank) 에 PCD를 소결시켜 드릴로 방전 가공하는 방법으로 PCD 소결 공정에서 고압의 조건이 요구되므로 직경이 작은 초경합금 블랭크에 소결하는 것은 불가능하며 추후 초소형 PCD 드릴로 가공하는데 어려움이 있다. 그리고 Fig. 1(B) 와 같이 초경합금 디스크 (disk) 위에 PCD를 소결시킨 후 와이어방전가공 (wire electric discharge WEDM)<sup>22-24)</sup> 을 이용하여 PCD 팁 (tip) 으로 제작하고 개별 제작된 초경합금 샹크 (shank) 를 접합 공정 중 하나인 브레이징 (brazing)<sup>25-27)</sup> 공법을 이용하여 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작한 후 드릴날 가공을 진행하는 방법이다. 이 방법은 초소형 PCD 드릴을 제작하기에 적합하여 주로 사용되지만, 드릴 공구로써 작업 시 고온과 압력에 다소 취약하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 위에서 언급한 것과 같이 고부가가치의 초소형 PCD 드릴을 제작하기 위해 기존의 단점을 보완하고 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 (micro PCD drill blank) 의 제작 공정의 이론 및 기술 구축이 필요한 현실이다.

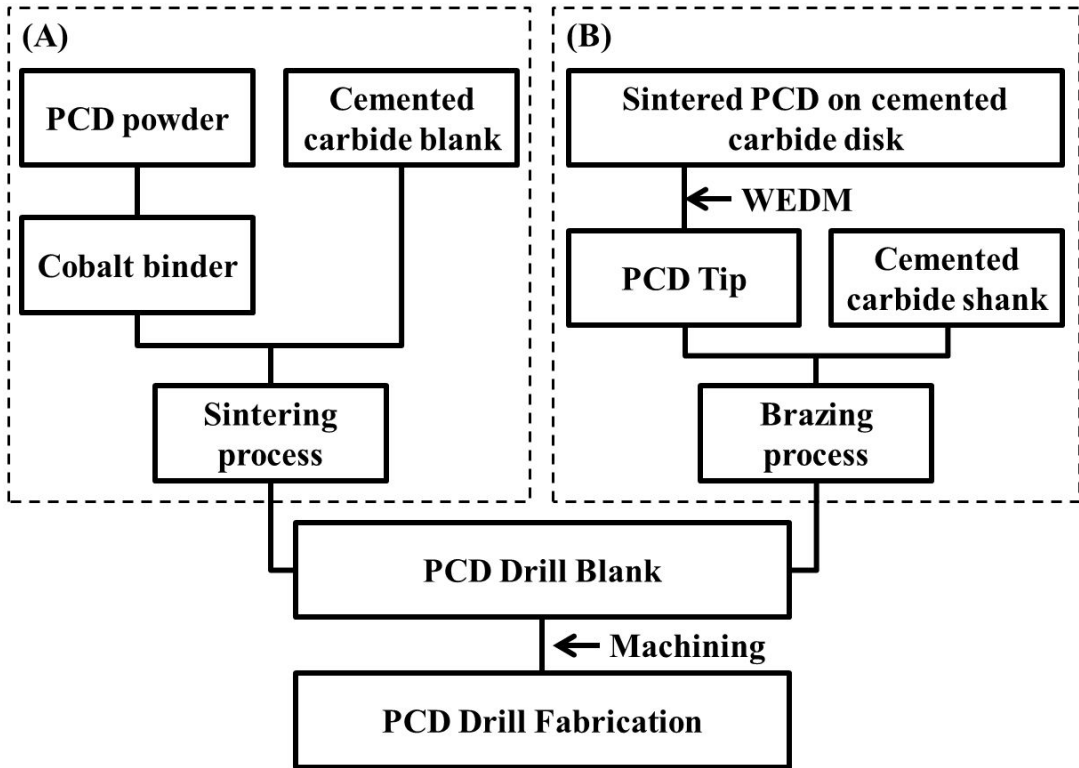


Fig. 1 Existing PCD drill fabrication processes

## 1-2 연구목적 및 내용

현재의 산업은 재료의 사용 분야에서 그 필요 특성을 유지하면서 경량화 및 소형화를 위한 개발 기술을 요구하고 있다. 그러나 새롭게 부각되어 개발된 재료들은 난삭재 및 비금속 재료로 고강도강, 세라믹과 복합재료 등 기존의 가공 공구로는 한계가 발생되었고 더불어 초정밀 가공 공정도 요구되고 있다. 가까운 예로 항공기 분야 및 지상의 운송수단의 외장재, 구조재로써 재료의 응용이 다양화 되면서 CFRP의 활용성이 높아지고 사용량이 증가되고 있다. 하지만 이러한 복합재료 구조물의 최대 단점은 복잡한 구조를 가진 부품 제작에 어려움이 있다. 이에 따른 홀(hole) 가공의 중요성은 CFRP 복합재료의 가공의 주된 부분이다.<sup>2-4,9)</sup>

이와 같이 난삭재인 CFRP와 세라믹 등 비금속과 고강도강의 홀 가공에 적합한 공구는 PCD 드릴 또는 다이아몬드 코팅 드릴이다. 또한 소형화된 부품을 가공하기 위해서는 초소형의 PCD 드릴의 가공 기술이 필요하게 되었다. 현재의 브레이징 공정을 활용한 PCD 드릴 제작법은 그 원리 특성상 접합부가 공구의 절삭 가공시 발생하는 고온의 열과 압력에 불리하다는 가공 한계의 단점이 있다.

따라서 이와 같은 한계를 극복하고자 Fig. 2 와 같이 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하기 위해 브레이징 (brazing) 접합 방법이 아닌 확산접합 (diffusion bonding) 공정을 이용하여 공구 특성에 접합하도록 효율적인 기술 개발을 목적으로 수행하였다. 더 나아가 본 연구에서는 초소형 PCD 드릴로써 그 효능을 충분히 활용하기 위해 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작의 확산접합 공정에 Fig. 3 의 다양한 공정 조건인 온도, 압력, 시간, 삽입금속, 접합 표면 거칠기 및 접합부 형상 등 접합 인자와 기타 조건으로 연구를 진행하였고, 확산접합된 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크와 특수 제작된 초경합금 비례시험편을 광학현미경 (optical microscope), 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM), Micro X-ray CT 그리고 만능시험기 (universal testing machine) 를 이용하여 접합 특성 결과를 분석하였다.



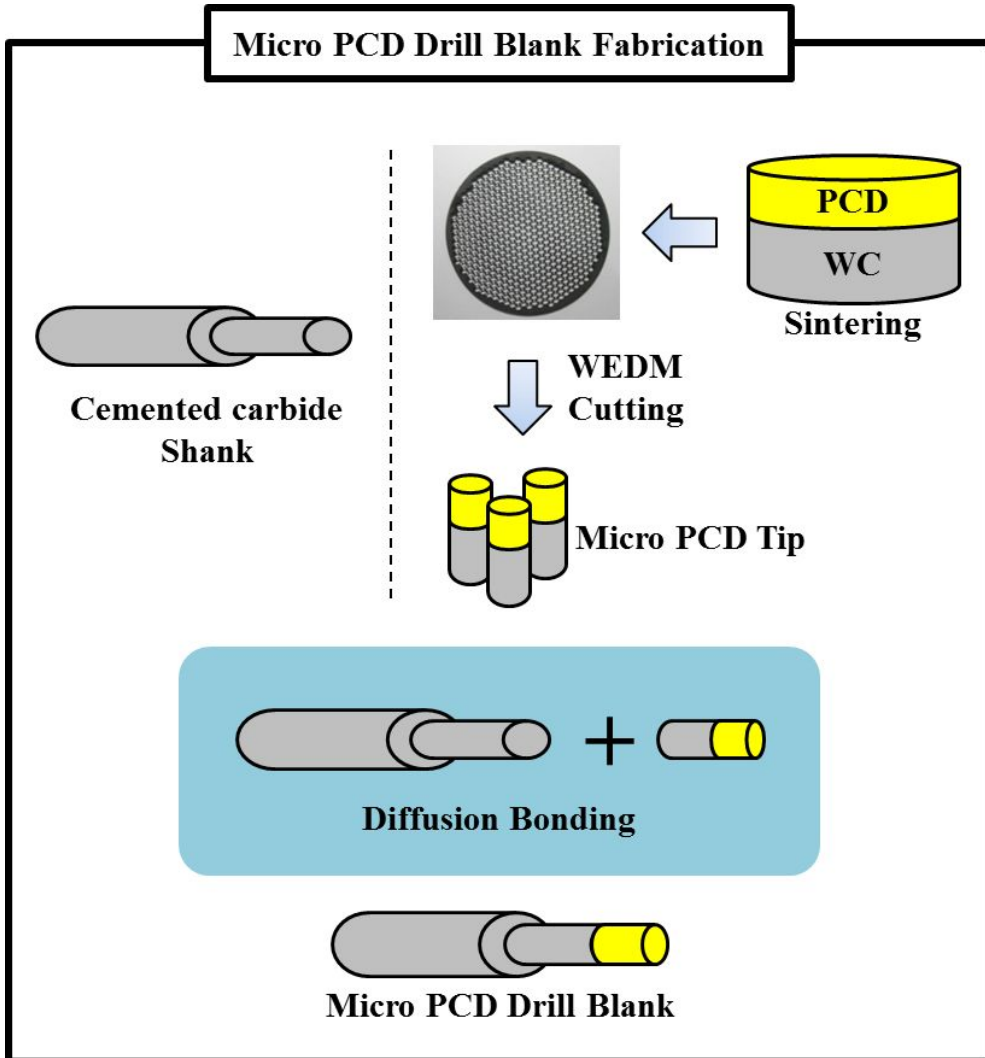


Fig. 2 Fabricated process of diffusion bonding for micro PCD drill blank

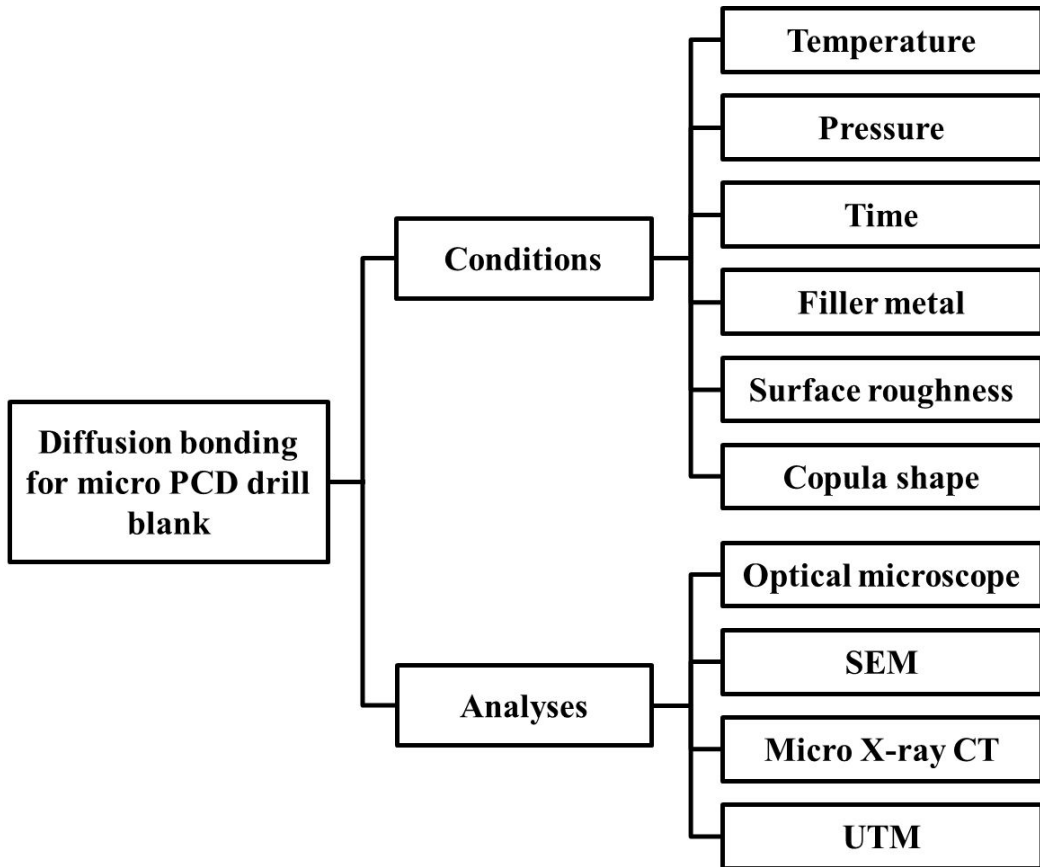


Fig. 3 Research procedure of diffusion bonding for conditions and analyses

## 제 2 장 실험설계 및 방법

### 2-1 확산접합 기초 이론

#### 2-1-1 확산접합 선정

본 연구에서 초경합금 생크와 초소형 PCD 팁의 두 모재를 이용하여 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하기 위한 목적이 있으므로, 이 두 모재가 접합 (joining) 된 후 강도 및 형태가 공구로써 효과가 있어야 하므로 그 접합 공정에 대해 확산접합으로 선정하였다. Photo. 1 을 보듯이 대표적인 접합 공정인 용접 (welding) 은 모재를 크게 용융시키기 때문에 적절하지 않다. 그러나 확산접합은 모재의 표면에 발생하는 용융을 통해 두 모재를 연결하는 공정이다. 따라서 확산접합은 모재의 형상에 거의 영향을 주지 않으며, 접합부에 기공과 같은 결함의 발생이 나타날 가능성이 적고 접합 강도가 우수한 특징이 있으므로 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하기에 적절한 접합 공정인 것을 알 수 있다.

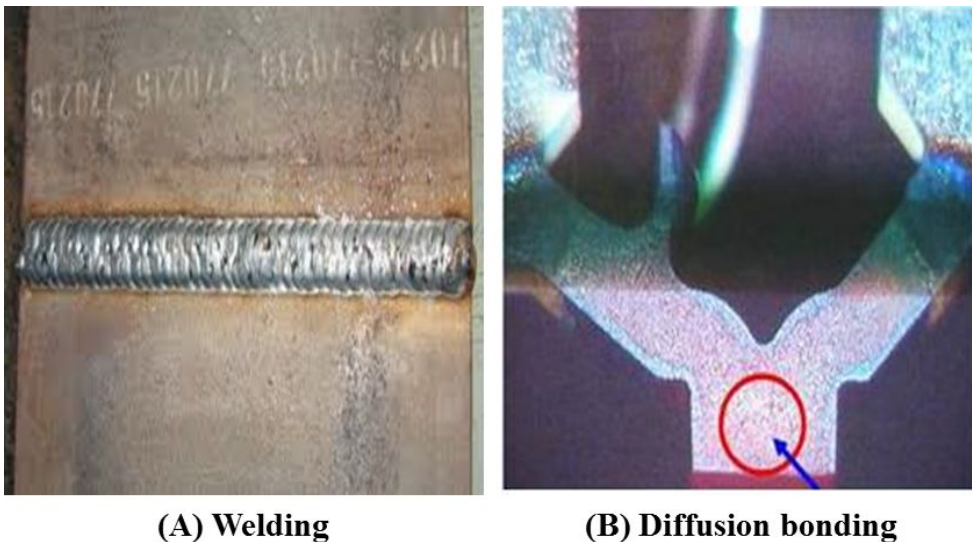


Photo. 1 Comparison of the welding and diffusion bonding results

## 2-1-2 접합 개요

접합 (joining) 이란 2개의 물체를 연결한다는 의미이다. Fig. 4 와 같이 용접 (welding) 과 접합 (bonding) 을 구분할 수 있다. 용접은 모재의 접합부를 크게 용융시켜 연결하는 의미로 선 (線) 의 개념에 가까우며, 주로 조선, 자동차와 같은 구조물을 제작하는데 많이 사용되고 있다. 접합은 모재의 표적 부위만을 용융시키거나 용융시키지 않고 연결하는 의미로 면 (面) 의 개념에 가까우며, 주로 소형 부품 및 전자 부품을 제작하는데 널리 사용되고 있다.<sup>28)</sup>

Fig. 5에서 보듯이 두 개의 물체를 접합하는 방법에는 브레이징 (brazing), 고상 확산접합법 (solid state diffusion bonding), 액상 확산접합법 (liquid phase diffusion bonding), 마찰교반용접법 (friction stir welding) 등이 있다.<sup>28-29)</sup> 브레이징은 삽입금속을 이용하여 접합하는 방법으로 모재가 용융되는 과정은 존재하지 않고 삽입금속의 용융 및 젖음성을 이용한 모세관현상으로 진행된다. 고상 확산접합법은 삽입금속을 사용하지 않는 직접 접합법과 삽입금속이 고상 상태로 삽입되거나 모재의 표면에 코팅을 한 후 접합시키는 방법으로 나눌 수 있다. 표면 코팅 방법은 도금, CVD 및 PVD 등으로 실행한다. 그리고 삽입금속을 사용하지 않는 고상 확산접합법의 경우, 높은 압력과 온도가 필요하게 되어 모재에 열적 영향을 미치는 단점이 있다. 주로 동종금속간의 접합에 이용된다. 삽입금속을 사용하는 고상 확산접합법의 경우에는 이종금속 및 금속과 세라믹의 접합에 이용되고 있다. 마찰교반용접법은 두 모재의 사이에 마찰력과 압력을 가해 용융을 유발하여 접합하는 방식이다. 액상 확산접합법은 모재보다 용융점이 낮은 삽입금속을 사용하거나 높은 삽입금속을 사용하여 공정반응을 유도하여 접합하는 방법으로 접합계면에 일시적으로 액상이 형성되기 때문에, 고상 확산접합법과 비교하여 비교적 쉽게 금속결합을 이룰 수 있을 뿐만 아니라, 정밀하게 표면을 가공할 필요가 없으며, 접합 압력이 거의 필요 없다는 것이 이점이다. 또한 접합 공정 중 접합온도에서 등온응고가 진행되는 등온응고과정을 거치기 때문에, 브레이징법과 비교하여 접합계면에 취약한 금속간 화합물 (metallic compound) 이 생성되지 않기 때문에 기계적 성질 및 내식성이 우수한 접합 특성을 얻을 수 있다. 그리고 이 접합법의 특성상 광범위한 분야로 적용이 가능하다.

◎확산접합의 공통적인 특징은 다음과 같다.

- 소재의 크기, 형상에 상관없이 접합 가능
- 동종 및 이종금속에도 접합이 가능
- 다른 접합 방식과 달리 재료의 형상에 거의 영향을 주지 않음
- 접합부에 기공과 같은 결함 발생이 적음
- 접합 후 강도는 다른 접합법보다 높은 강도 특성을 가짐

본 연구에서는 삽입금속을 이용하여 보다 낮은 온도에서 접합 공정이 진행되는 액상확산접합법을 사용하여 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작에 관한 연구를 진행하였다.

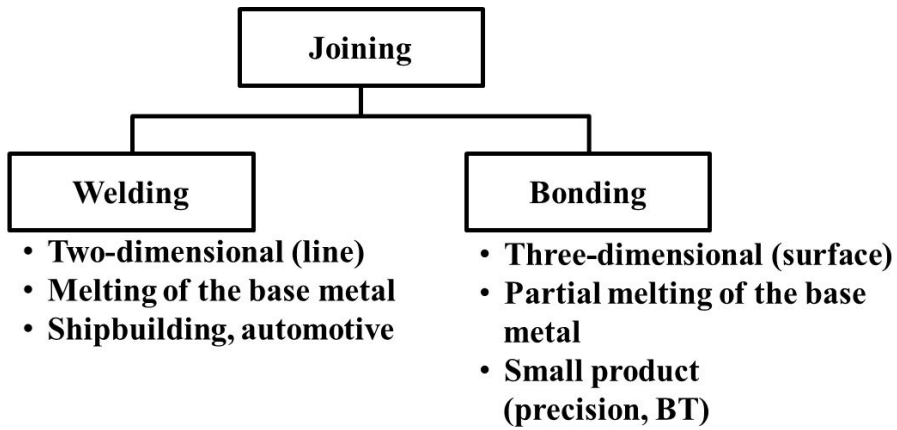


Fig. 4 Division of joining processes, welding and bonding characteristics

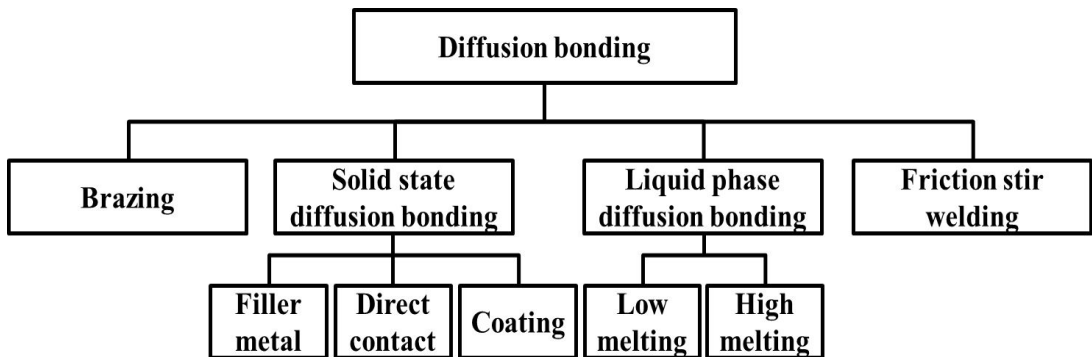


Fig. 5 Summary of diffusion bonding processes

## 2-1-3 액상확산접합 기본원리

모든 금속은 각각 특유의 결정구조에 따라서 규칙적으로 배열된 원자의 집단이다. 확산접합을 하기 위해서는 접합하려는 두 모재의 표면을 상호 원자면 간에 인력이 발생할 때까지 접근하는 것이 요구된다. 즉 두 개의 원자가 충분히 떨어져 있다면 인력은 거의 “0”에 가깝지만 접근함에 따라 그 크기는 커지게 된다. 확산접합 중의 원자의 확산은 거의 모든 격자 내에 열평형적 조건에서 인접원자와의 위치교환에 따라 원자가 이동하게 된다.

고용체합금이나 순금속은 원자의 운동방향이 무질서하기 때문에 전체적으로 움직임이 서로 소멸되어 방사성동위원소를 이용하지 않는 한 원자의 이동은 외부에서 전혀 관측되지 않는다. 동종금속의 확산접합에서는 이러한 현상이 상당하다. 이와 같은 경우를 자기확산이라고 말한다. 또한 용융된 두 종류의 금속이 밀착된 경우에 서로 확산에 의해 혼합하여 하나의 합금이 되는데, 이때 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동하는 농도구배가 존재하는 것은 이 농도구배가 곧 원자 확산의 구동력이 된다.

‘나. 접합 개요’에서 살펴보았듯이 액상확산접합법은 두 모재 사이에 저융점 또는 모재와의 사이에 저온의 공정점과 용점강하원소 (melting point depressant)를 포함하는 삽입금속을 사용한다. 특히 액상확산접합법은 모재를 거의 용융시키지 않고 저온에서 접합이 이루어지는 공정으로 보통 천이액상확산접합 (transient liquid phase diffusion bonding) 이라고 불린다.

Fig. 6<sup>12-13)</sup>은 액상확산접합법의 접합 과정에 대한 메커니즘을 표시한 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 접합과정은 총 4단계를 거치게 된다. (a) 삽입금속의 삽입 및 용융과정, (b) 삽입금속에 의한 모재의 용융과정, (c) 액상의 소멸과정, (d) 성분원소 및 금속 조직의 균질화 과정으로 분류할 수 있다. Fig. 7은 확산접합법의 상태도에 대한 모식도를 표시한 것이다.

(a) 삽입금속의 삽입 및 용융과정 : 두 모재 사이에 삽입금속을 위치시킨 후 열처리로 (heat furnace)에 장입하여 모재의 용융온도 보다 낮은 접합온도  $T_B$ 로 가열하면, Fig. 6 (a)와 같이 삽입금속이 용융하여 액상층이 접합부를 메우는 과정으로, 보통 매우 짧은 시간 내에 일어나는 단계이다. 삽입금속이 용융되면 모세관 현상에 의해 결합부를 메우는데, 용융된 삽입금속이 평행한 접합부에 위치하며

삽입금속에 미치는 압력을 “0” 이라고 가정하면 정상류 (steady state flow) 에 있어서 운동량 평형식 (momentum balance) 과 Newton의 점성법칙을 이용하면 용융된 삽입금속이 결합부를 메우는데 소요되는 시간을 구할 수 있다.(Eq. 1)

$$t = \frac{3\mu L^2}{(2\gamma_L \cos\theta + \rho g L \delta)\delta} \quad (\text{Eq. 1})$$

(b) 삽입금속에 의한 모재의 용융과정 : 삽입금속의 용점강하원소 B, P, Si 등을 통해 본래의 용융점보다 낮은 접합온도에서 모재의 접합계면이 용융하고 접합부근방까지 액상층은 확대된다. 이와 같은 반응은 액상층의 농도가 저하할 때 까지 계속된다. 용점강하원소가 확산 이동하는 과정을 포함하는 (Eq. 2) 의 식으로 나타내는 Nernst-Brunner식을 이용하여 해석되고 있다.<sup>30)</sup>

$$n = n_s \left[ 1 - \exp - K \frac{A}{V} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

- n : t초 후의 용점강하원소의 농도
- n<sub>s</sub> : 용점강하원소의 포화농도
- K : 모재의 용융반응의 속도 정수
- A : 반응 면적
- V : 반응 액상의 체적
- t : 시간

(Eq. 2) 식을 기초로 하여 모재의 용융폭의 시간적 변화를 표시하는 식으로서 다음 식 (Eq. 3) 이 얻어 진다.

$$K \cdot t = h \left[ \ln \frac{X_s(X+p \cdot h)}{p \cdot h(X_s - X)} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

= P

- X : 모재의 용융폭
- X<sub>s</sub> : 모재의 평형 용융폭
- p : 액상과 고상의 밀도비
- 2h : 초기의 액상폭



P : 모재의 용융 파라미터 (parameter)

이 함수의 결과로 유지시간과 용융 파라미터의 관계는 거의 직선 관계가 있는 것을 알 수 있다.

(c) 액상의 소멸과정 : 지속적으로 접합온도를 유지하면 액상층이 고액계면 (solid-liquid interface) 으로부터 농도구배에 따라 고상인 모재층으로 확산유출됨과 동시에, 액상은 등온응고 (isothermal solidification) 하여 점차적으로 액상이 감소된다. 결국 액상의 농도가 전체적으로 균등에 가까워지게 되면 등온응고 과정은 완전히 끝나게 된다. 삽입금속을 2원계 합금으로 가정하고 Fick의 제2법칙 및 질량평형식 (mass balance) 을 이용하여 액상의 두께를 '2h' 로 하는 경우, 액상의 소멸에 필요로 하는 시간  $t_f$  는 다음과 같이 주어진다.(Eq. 4)

$$t_f = \frac{h^2}{4Db^2} \quad \text{단,} \quad b = -\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

고액계면에서 고상 중의 용점저하원소가 일정하다고 가정하면, 임의의 시각 t 에 있어서 액상폭은 다음과 같이 주어진다.(Eq. 5)

$$2x = 2h - \left( \frac{C_s}{\pi^{1/2} V_s} \right) \left( \frac{C_l}{V_l} - C_s V_s \right)^{-1} (Dt)^{1/2} \quad (\text{Eq. 5})$$

D : 고상 중의 용점저하원소의 확산계수

$V_l$  : 액상의 몰 체적 (molar volume)

$V_s$  : 고상의 몰 체적

2x : 임의의 시각에서 액상폭

2h : 액상의 초기폭

액상과 유지시간의 평방근 ( $t^{1/2}$ ) 사이에는 직선관계가 이루어지며 액상의 소멸 현상은 용점저하원소의 확산과정에서 진행되는 것을 알 수 있다.

(d) 성분원소 및 금속 조직의 균질화 과정 : 액상이 완전히 소멸한 후 고상 상

태에서 삽입금속의 성분들이 모재로 확산하여 모재와 접합부의 농도가 균일하게 분포하게 되고, 최종적으로 용융된 모재가 하나의 불균질 조직에서 균질 조직으로 변하게 된다. 따라서 접합계면의 이동으로 모재와 접합부가 구별할 수 없게 된다. 다원계합금의 경우는 용점저하원소 이외의 합금원소의 균일화가 이루어져야만 우수한 기계적 성질을 얻은 완전한 접합이 이루어진다. 열처리 과정에서 원소의 균일화는 고상 내의 확산에 의해서 진행된다. 확산계수  $D$  가 농도에 의존하지 않는다고 가정한 경우, Fick의 제2법칙은 다음 식으로서 표시 된다. (Eq. 6)

$$\frac{dC}{dt} = D \left( \frac{d^2 C}{dx^2} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

$-h \leq x \leq h; C = C_0, |x| > h; C = 0$  의 초기 조건하에서  $h^2$  이상의 고차항을 무시하고 (Eq. 6) 을 풀면 (Eq. 7) 이 얻어진다.

$$C = \frac{C_0 h}{(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

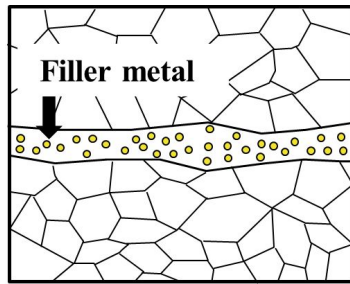
위 식에 있어서 접합층 중앙부 ( $x=0$ ) 에서의 원소 농도  $C_p$  라고 하면,  $D$  는 다음 식으로 표시할 수 가 있다. (Eq. 8)

$$D = \left( \frac{h^2}{\pi t} \right) \left( \frac{C_0}{C_p} \right)^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

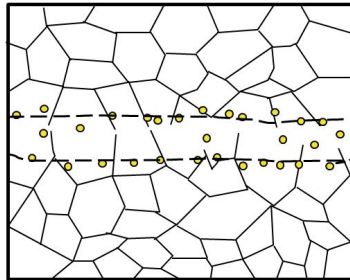
각 원소에 대하여 어떤 시각  $t$  에 있어서,  $x = 0$ 에서 농도  $C_p$ 의 실측치를 (Eq. 8) 에 대입하는 것에 의해 각각의 길보기 확산계수가 계산에 의해 구할 수 있을 것이다. 즉 다원계 합금의 확산계수가 계산에 의해 접합부의 균일화처리 과정에서의 시간에 따른 합금원소의 분포를 예견할 수 있다.

등온응고과정 (isothermal solidification process)이란 일반적인 응고가 온도 강하에 따라 일어나는데 반하여 일정한 온도로 유지하는 동안 삽입금속으로 인한 합금원소가 모재로 확산하는 것에 의해 접합부내의 조성이 균질화 되고 다시 접합부의 용점이 상승하기 때문에 액상에서 고상으로 천이되는 현상이다.

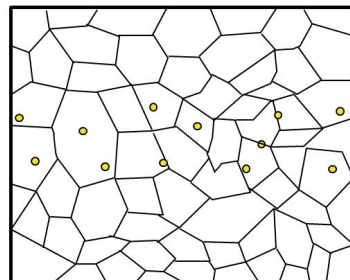
결과적으로 액상화산접합은 접합부에 생긴 액상을 등온응고 시키기 때문에 접합부를 접합온도로 재가열하여도 접합부는 재용융되지 않는 특징을 가진다. 이 때문에 브레이징과 같은 공정 방식을 따르지만 결과적으로는 고상화산접합법과 같은 접합부를 얻을 수 있다는 장점이 있다.



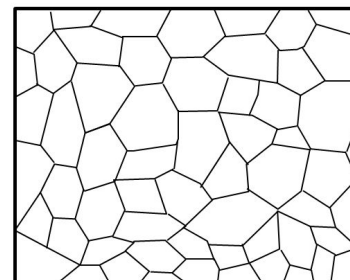
(a) Filler metal supplied between base metal. And that melting of filler metal



(b) Melting of base metal due to depression of melting point



(c) Disappearance of liquid solute and solidified heterogeneous bonding



(d) Homogeneous bond of metal structure

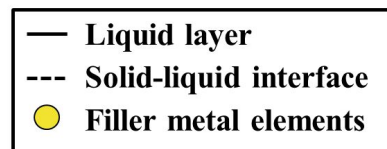


Fig. 6 Mechanism for the liquid phase diffusion bonding process with two base metals and filler metal

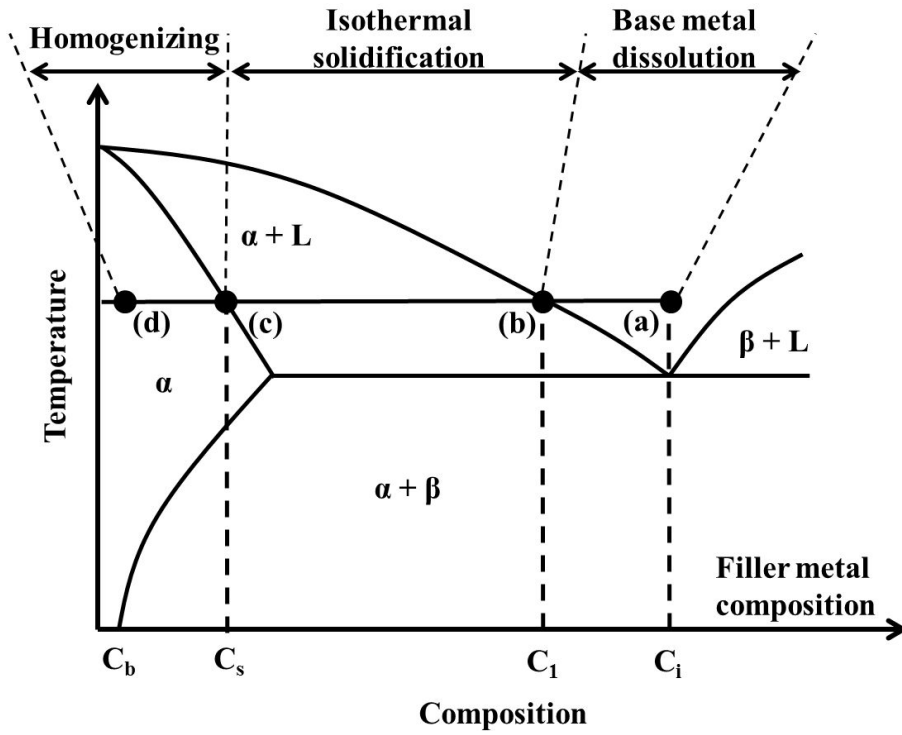


Fig. 7 Schematic illustration for liquid phase diffusion bonding process

## 2-2 확산접합 인자

확산 접합부의 기계적 성질에 직접적인 영향을 미치는 접합 인자를 Fig. 8 에 나타내었다. 주요 접합 인자는 접합 조건, 접합부의 표면 상태, 삽입금속, 접합 결함 등이 있다.

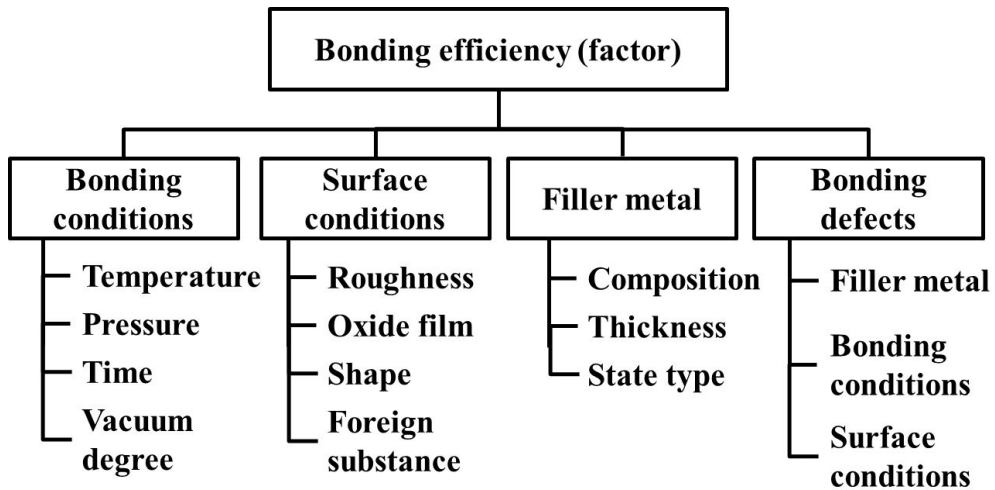


Fig. 8 Factors and division that affect the diffusion bonding efficiency

## 2-2-1 접합 온도 (Bonding temperature)

접합 온도는 열적 활성화 반응인 확산에 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 온도의 소폭 변화는 다른 인자에 비해 접합 속도 (kinetics) 에 큰 영향을 주며, 확산 접합의 메커니즘은 온도에 민감하게 의존하게 된다. 주로 접합 온도는 모재의 확산 계수, 소성변형, 표면피막이나 산화피막의 모상으로의 고용 및 공동 (void) 의 소실에 큰 영향을 주고, 또한 모재의 변태나 석출상태 및 재결정을 결정하는 중요한 인자이다. 확산접합은 비교적 변형이 미소한 압력과 실용적인 시간 범위 내에서 상호 관련하여, 대략 용점  $T_m$  의 0.3 ~ 0.7  $T_m$  이 되며, 이는 그 금속의 재결정 온도와 대체로 일치한다. 하지만 접합온도가 상승함에 따라 확산이 촉진되어 접합 계수가 증가하는 이면에는 모재의 열적 연화 및 취화 등의 재질을 열화시키는 경우가 있어 주의해야한다. 최적의 접합온도는 접합의 목적 및 접합 모재의 종류뿐만 아니라 삽입금속의 종류에 따라 유동적으로 설정해야 한다.

확산접합 과정은 속도론 과정으로 취급되므로 접합온도가 높아지면 접합에 요구되는 시간이 단축된다. 이런 속도론 논리 (kinetics theory) 은 확산접합에 요구되는 온도에 대한 정량적으로 이해할 수 있는 수단이다. 즉, 확산 계수는 다음과 같은 함수 (Eq. 9) 로서 표현된다.

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{kT}} \quad (\text{Eq. 9})$$

D : 온도 T 에서의 확산계수

$D_0$  : 비례계수

Q : 확산의 활성화 에너지

T : 절대온도

K : 볼츠만 (boltzmann) 정수

따라서 확산접합 공정도 온도에 지수함수 적으로 변화하므로 비록 작은 온도변화라도 접합 속도에는 큰 영향을 미친다.

$$X = C(Dt)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 10})$$

X : 확산거리

t : 시간

C : 정수

이에 따른 액상의 확산 범위는 (Eq. 10) 의 함수와 같이 비례계수와 시간에 영향을 받는다.



## 2-2-2 접합 압력 (Bonding pressure)

액상확산접합에서는 접합 압력을 정량적 변수로 취급하기 어렵다. 확산접합시 최초로 생성되는 접합부의 상이 가해진 압력으로 변형량 때문에 가장 큰 영향을 받는다. 접합 압력의 역할은 접합면의 미세한 표면 돌기 부분 (凹凸) 을 소성변형시켜 평활한 면으로 만들며 접합표면의 공동을 소멸시키는 효과와 함께 모재의 금속 표면끼리 접촉이 가능하도록 산화피막을 파괴한다. 그리고 압력이 일정하게 증가할 시 재결정온도가 낮아져 결국 재결정 과정을 가속화시키기 때문에 우수한 접합부를 얻을 수 있다. 그러나 확산접합 공정시 두 금속의 경도가 크게 다를 경우 연한 모재가 소성변형을 일으킬 수 있으므로 적절한 압력을 가해야 한다.

대체로 확산접합에서 사용되는 압력은 0.04 MPa 에서부터 20 MPa 까지 가하는 것으로 알려져 있다.

## 2-2-3 접합 시간 (Bonding time)

접합시간은 보통 온도와 밀접한 관계가 있고 압력에 따라서 접합시간이 결정되지만 접합표면의 상태 및 삽입금속의 이용에 있어서도 영향을 받는다. 특히, 이종 금속간의 접합인 경우에는 Kirkendall effect 에 의한 공동 (void) 나 금속간화합물이 형성될 우려가 있으므로 필요이상의 접합시간은 피해야 한다. 실제로 확산접합 시간에는 수 초에서 수 시간까지 넓은 범위에서 활용되고 있다. 경제적인 효율을 고려하여 접합시간은 단축되는 것이 바람직하다.

## 2-2-4 접합 분위기 (Bonding vacuum degree)

확산접합은 대체로 진공 분위기에서 진행된다. 그 이유는 산소로 인한 산화피막 형성을 억제하여 접합 효율을 증대시키기 위함이고, 또는 아르곤 등의 불활성 가스부터 수소와 같은 환원성 분위기 가스를 사용하는 경우도 있다. 접합면의 주위를 밀폐시키고 대기 중에서 가열, 가압하여 확산접합 공정을 진행하여도 양호한 결과를 얻을 수 있다.

## 2-3 확산접합 공정 설계 및 시스템

### 2-3-1 실험 시편

본 실험은 PCD 팁과 초경합금 생크를 이용하여 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 (micro PCD drill blank) 를 제작하기 위한 확산접합 공정 실험으로써, 두 접합물 (모재) 을 Fig. 9 와 같이 설계하였고 Photo. 2 에 나타내었다. 초경합금 생크 (cemented carbide shank) 와 PCD 팁은  $\text{\O}1.3$  와  $\text{\O}2.0$  mm 의 지름으로 설계 및 제작되었다. 앞서 설명한 바와 같이 초소형 PCD 팁은  $\text{\O}52$  mm 의 원판의 형태에서 와이어 방전가공을 통해 원하는 크기로 가공하였다. Table 1 는 초경합금 생크와 PCD 팁의 화학적 조성비를 나타낸 것이다. 초경합금 생크는 WC-10wt% Co 의 K 계의 K30 재질이다. 이 재질은 주로 주철, 비철금속, 비금속 등 내열특성은 높지 않으나 내마모성이 아주 우수하다. 그리고 초소형 PCD 팁의 초경합금 디스크는 WC-16wt% Co 의 DX5 재질이다. PCD 의 입자는 FS 등급으로 Fine ( $2\sim 4\ \mu$ ) 이다.

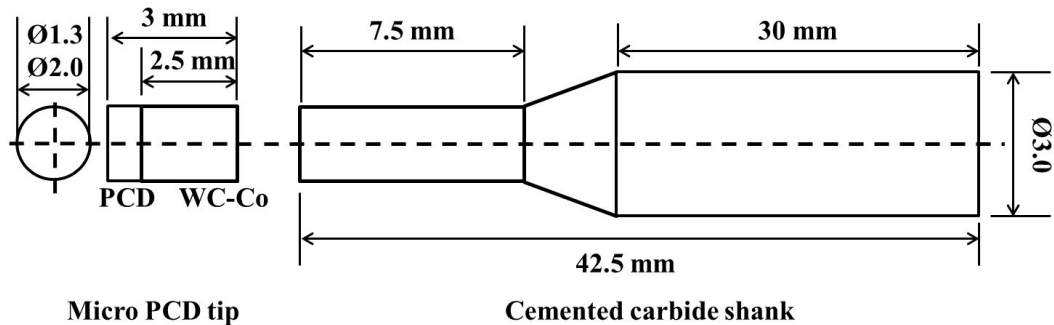


Fig. 9 Design of micro PCD tip and cemented carbide shank

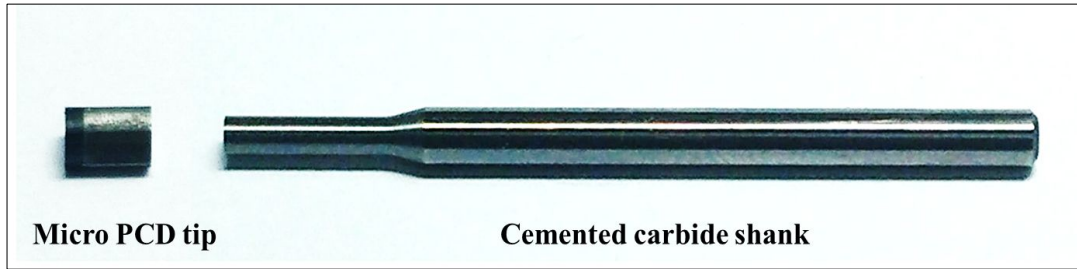


Photo. 2 Fabricated micro PCD tip and cemented carbide shank

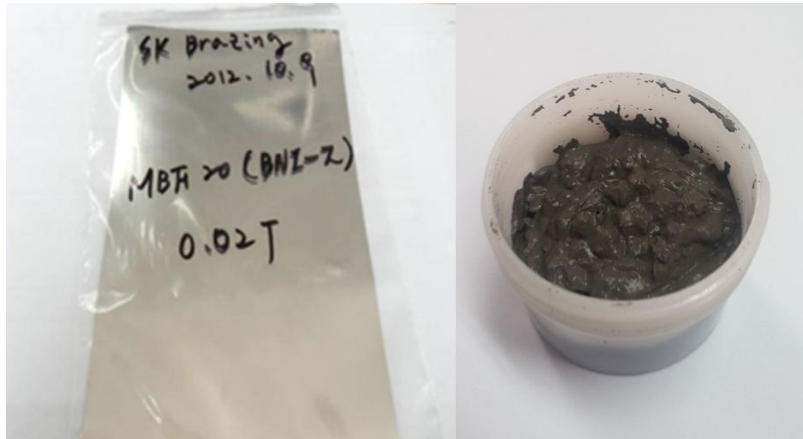
Table 1 Chemical compositions of the two cemented carbide for micro PCD drill blank fabrication

Materials	W	Co
Cemented carbide shank	90 wt%	10 wt%
Cemented carbide of PCD tip	84 wt%	16 wt%

## 2-3-2 삽입 금속 선정

확산접합에서 삽입금속의 역할은 매우 중요하다. 가장 큰 역할은 삽입금속의 용융을 통해 양 모재가 접합으로 연결되며, 삽입금속의 용점저하원소에 의해 모재의 용점이 낮아져 접합부에만 용융이 발생하게 만드는 것이다. 그로 인해 모재는 접합부 이외의 부분에서 용융이 발생하지 않는다. 즉, 접합부의 확산과 함께 밀착화를 촉진하며, 산화피막의 파괴 및 제거를 촉진하는 역할을 수행한다. 삽입금속의 선정 기준은 젖음성, 유동성, 증발하기 쉬운 성분의 함유량이 적을 것, 온도 범위 (모재보다 낮고, 응고온도 구간을 가질 것), 접합 용도, 가격 등의 조건을 파악한다.

본 연구에서 사용된 삽입금속은 접합계면에 부식을 억제하며 좁은 용융 구간과 높은 유동도를 지닌 범용적으로 사용되는 니켈 합금을 사용하여 진행하였다. 그리고 삽입금속은 시트형 (sheet-type) 과 페이스트형 (paste-type) 으로 사용하였다. Photo. 3 은 니켈 합금의 시트형 삽입금속과 페이스트형 삽입금속을 보여준다. Table 2 는 삽입금속의 화학적 조성비를 나타낸 것이다.



**Sheet-type**

**Paste-type**

Photo. 3 Shape and type of the nickel alloy filler metal used in the experiment

Table 2 Chemical compositions of the two filler metal types used in experiment

Materials	Ni	Cr	Si	B	Fe
Sheet-type	82 wt%	7.0 wt%	5.0 wt%	3.0 wt%	3.0 wt%
Paste-type	83 wt%	7.0 wt%	4.5 wt%	2.8 wt%	3.0 wt%

### 2-3-3 확산접합 지그 설계 및 제작

본 연구에서 초소형 PCD 드릴 공그 블랭크 제작을 위한 확산접합용 지그를 설계하였다. 먼저 지그 재료의 선정 기준은 확산접합 공정이 고온에서 진행되기 때문에 낮은 열팽창 계수를 가지며, 형태를 유지할 수 있는 최대 온도와 비용절감을 위한 가공의 우수성 그리고 높은 강도와 경도를 기준으로 하여 선정하였다. 접합용 지그로  $7.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 낮은 열팽창계수와  $3000^{\circ}\text{C}$ 의 형상 유지 최대 온도, 압축 강도 140 MPa, 경도 62HS 를 가지는 그라파이트 (graphite) 소재로 설계 및 제작하였다. Fig. 10 에 나타난 바와 같이 지르코니아 세라믹 Plate를 받침으로 하는 Base Plate, Guide Plate, Cover Plate 로 구성된 구조이다. Cover Plate 는 초소형 PCD 팁과 초경합금 생크의 접합부가 삽입금속과 함께 조립되는 파트이다. Photo. 4 는 설계에 따라 제작된 그라파이트 재질의 확산접합용 지그와 그의 조립 과정을 나타낸 것이다.

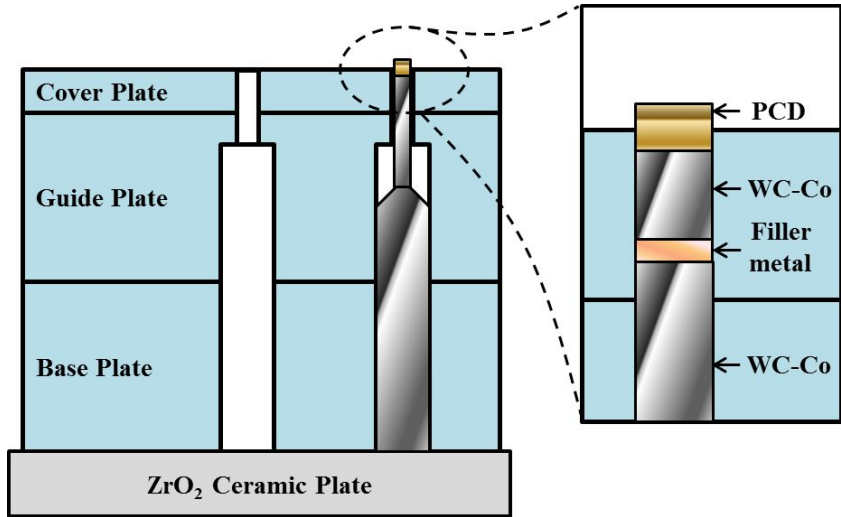


Fig. 10 Schematic diagram on graphite jig of the experimental set-up for diffusion bonding

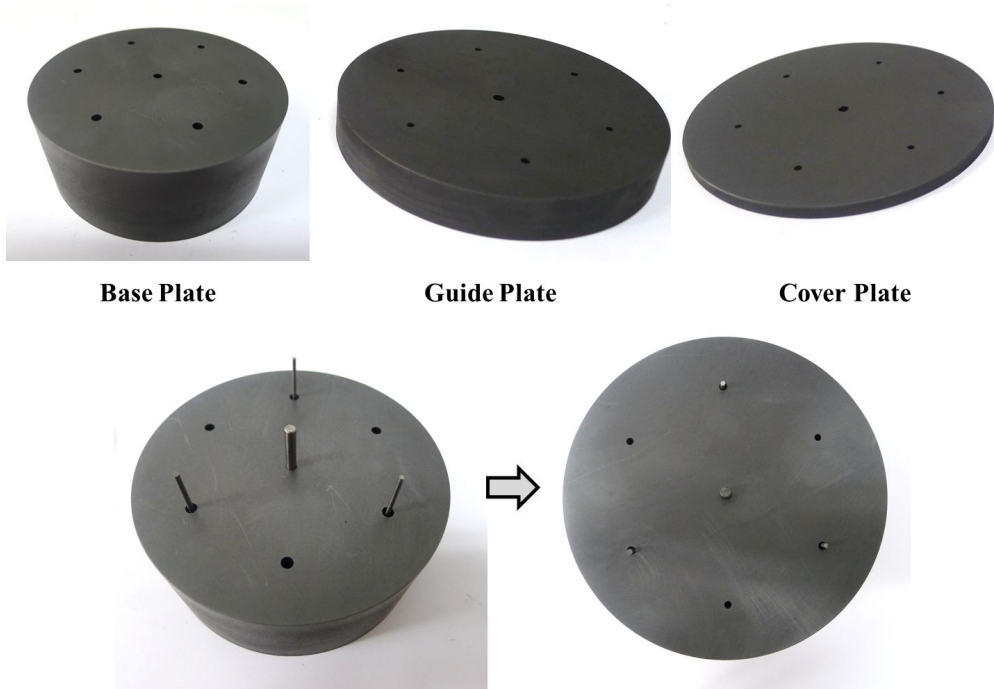


Photo. 4 Assembly process and fabricated graphite jig

## 2-4 실험 방법

### 2-4-1 표면처리

확산접합 공정의 영향 인자 중 표면 상태가 있다. 접합 효율을 위한 표면 상태에는 거칠기, 산화피막 등이 있으며, 이 중에서 산화피막이 가장 큰 문제가 되지만 확산접합 공정을 고진공 분위기에서 진행하여 산화피막의 형성을 억제한다. 그리고 표면의 형상에 따라 확산접합부의 접합성이 결정되기 때문에 면 대 면의 접합을 위해 표면 처리를 하였다. 초경합금을 연마하기 위한 다이아몬드 연마 패드를 폴리싱기에 장착하여, 두 모재의 접합계면을 연마하였다. 이 연마 작업을 통해서 기존에 초경합금 표면의 산화막과 코팅을 제거하는 효과를 얻을 수 있다. Photo. 5는 폴리싱기를 이용하여 초경합금 생크를 연마하는 것이다. 표면 처리에서 가공된 초경합금의 접합 표면 상태를 확인하고 확산접합 공정에 사용하기 위해 아세톤과 D.I.water 를 이용하여 초음파 세척을 하고, 진공 오븐에 장입하여 온도 40 ℃,  $5 \times 10^{-2}$  Torr 의 조건에서 60 min 동안 건조시킨다.

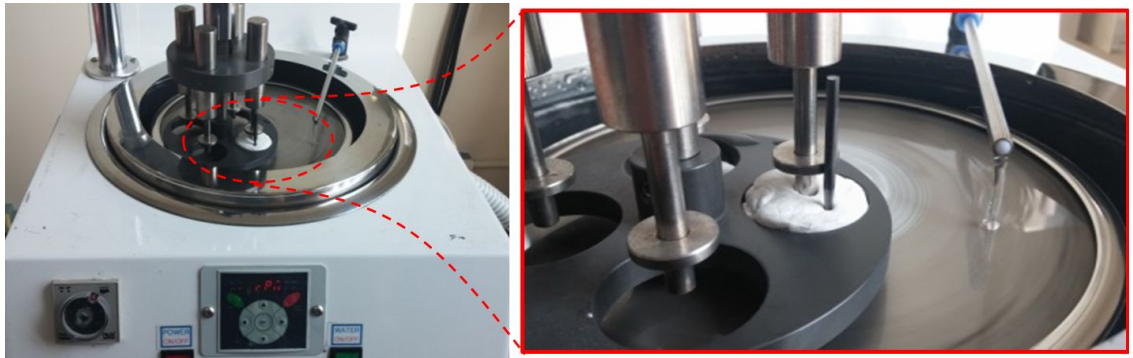


Photo. 5 Cemented carbide surface treatment through the polishing machine (KDPI-330)



## 2-4-2 확산 접합 공정 진행 및 분석

표면 처리된 초경합금 시편과 삽입금속을 특수 제작된 흑연 지그에 조립하여, Photo. 6 과 같이 진공 분위기 상태에서 가열 및 가압이 가능한 진공열처리로에 장입한다. 그 후 공정 조건에 맞춰 진행한다. 확산접합된 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크와 초경합금 비례시험편을 광학현미경 (Olympus SZ61)과 마이크로 X-ray CT (micro X-ray computed tomography: TVX-IMT225CT Dual type) 를 사용하여 외부와 내부의 결합을 분석하였고, 만능시험기 (universal testing machine, UTM: Shimadzu AG-IS, 50kN)를 통해 응력을 측정 및 분석하였다.

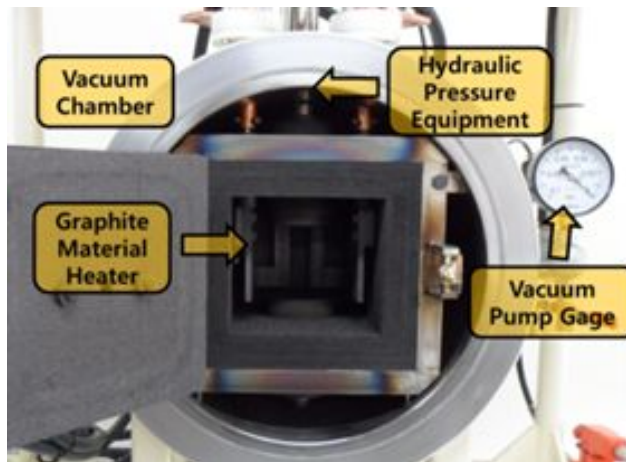


Photo. 6 Equipment used to fabrication, vacuum hot press furnace (AVHF-101010-15H, ACE vacuum Co.,Ltd)

## 제 3 장 확산접합 공정 조건 변화에 따른 접합 특성

### 3-1 접합 온도 조건의 영향 분석

#### 3-1-1 접합 온도 조건

확산접합 공정을 진행할 때, 가장 영향력이 큰 변수는 접합 온도이다. 본 실험에서는 압력 및 시간의 조건을 기초 실험 및 해석을 통하여 일정하게 고정시킨 후, 접합 온도에 변화를 주어 확산접합 시 온도에 대한 의존성에 대해 알아보고자 하였다. Table 3 은 접합 온도 조건에 따른 접합 실험에 대한 온도 조건에 관한 것이다.

Table 3 Experimental conditions for diffusion bonding of bonding temperature

Temperature	1173 K	1223 K	1260 K	1373 K	1773 K
Heat treatment	1120 K	1120 K	1120 K	1220 K	1320 K
Pressure	Bonding time		H. T. time		Vacuum degree
2.2 MPa	2 hr		4 hr		$5 \times 10^{-5}$ Torr

### 3-1-2 접합 온도 조건에 따른 접합 특성

Fig. 11 은 초경합금 생크와 초소형 PCD 팁을 니켈합금 재질의 삽입금속을 이용하여 액상확산접합을 수행한 후, 접합 온도 조건에 따른 표면 형상을 광학현미경과 SEM 으로 측정 한 것이다.

(A-a) 는 1173 K, (B-b) 는 1223 K, (C-c) 는 1260 K, (D-d) 는 1373 K, (E-e) 는 1773 의 접합온도를 나타낸다. 본 실험에 사용된 시편들은 전체적으로 초경합금 생크와 초소형 PCD 팁이 확산접합 되어 초소형 PCD 드릴로 사용될 하나의 블랭크로 제작된 형상을 보였다. Fig. 11 (A-a) 는 접합온도 1173 K 의 실험조건에 대한 결과로서, 삽입금속이 용융되지 않고 상당부분 기존의 형상을 유지한 것으로 보인다. 광학현미경 A 의 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 팁이 하나의 블랭크 형상을 유지하는 것을 보아 삽입금속과 초경합금 접합표면에서 미세한 접합 반응이 일어난 것으로 추측할 수 있다. Fig. 11 (B-b) 는 접합온도가 1223 K 의 조건에서 접합 결과이다. 앞의 A-a 의 1173 K 의 접합 결과와 비슷한 형상을 보인다. Fig. 11 (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 1223 K 의 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 팁의 초경합금 부와 삽입금속 사이에 공극(void) 이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 삽입금속이 완전히 용융되지 않았으며, 해당온도에서 적용된 2.2 MPa 의 압력이 낮아 모재가 확산융합이 되지 않았다는 것을 알 수 있다. Fig. 11 (C-c) 는 1260 K 의 접합 조건의 결과이다. 앞의 1173 K 와 1223 K 의 조건과 확연히 다른 형상을 보이고 있는데, 삽입금속 층이 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 삽입금속이 완전히 용융되어 양 모재의 표면으로 젖어 들어가 확산 접합이 이루어진 결과로 판단된다. Fig. 11 (c) 의 SEM 이미지를 보면 두 초경합금 사이의 접합 경계층만 남아있고, 두 모재 사이에 미세한 공극의 형상을 확인할 수 있다. 그리고

삽입금속이 완전하게 흡수되지 않았으므로, 사용된 삽입금속이 모재로 쉽게 젖어 들어가지 못했거나, 삽입금속의 양이 지나치게 많았다는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 11 (D-d) 는 1373 K 의 접합온도 조건의 접합 결과이다. 광학현미경의 이미지인 (D) 에 의하면 삽입금속이 소멸했으며, 동시에 접합 경계에서도 반응이 이루어진 것을 확인 할 수 있다. 이로써 해당 온도는 삽입금속이 가장 활발하게 용융이 시작되는 온도 구간으로 판단할 수 있다. Fig. 11 (E-e) 는 1773 K 의 접합 온도 조건의 접합 결과이다. 비교적 높은 온도의 조건이지만, 매우 높은 온도 조건에서 접합부의 형상의 결과를 알아보기 위해 진행하였다. 접합부의 경계층이 용융된 것으로 나타났다. 이것은 접합이 다소 어려운 외곽의 경계부에도 확산접합이 활발하게 일어날 수 있는 조건이라는 것이 증명되었다. 그러나 지나친 고온의 조건으로 인해 초경합금의 표면이 열화 손상이 나타났고, 동시에 초소형 PCD 팁의 PCD가 탈락되는 현상이 나타났다.

Fig. 12 와 Table 4 는 각 접합 온도별 인장응력을 측정한 결과이다. A와 B 조건은 삽입금속이 불완전한 용융이 진행되었기 때문에 측정하지 않았다. 용융된 삽입금속이 모두 활용되지 못한 조건 C에서 가장 낮은 인장 응력이 도출되었다. 그리고 가장 높은 접합 온도 조건이었던 E가 보다 낮은 조건 D 보다 낮은 응력이 도출된 것을 확인할 수 있었다. 이는 지나친 고온으로 인해 접합부에서 확산과 동시에 공동이 발생되었거나, 열화로 인해 강도가 저하된 것으로 추측된다. 따라서 온도 조건이 삽입금속의 용융에 밀접한 관계가 있으며, 동시에 지나친 고온은 부정적인 효과를 유발할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

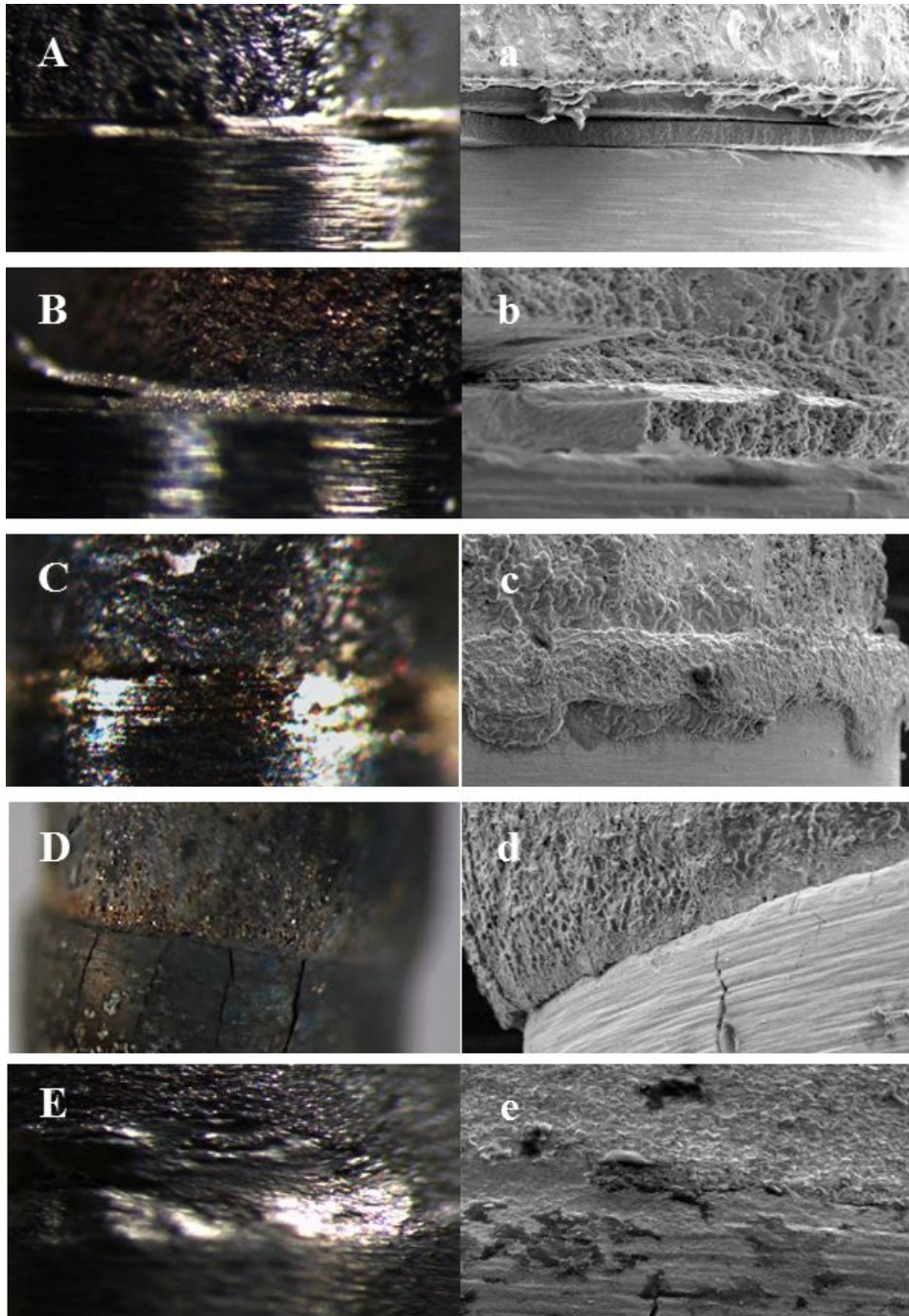


Fig. 11 (A–D) Optical microscopy and (a–d) SEM (scanning electron microscopy) images of the bonded copula for various temperatures: (A–a)1173 K, (B–b)1223 K, (C–c)1260 K, (D–d)1373 K, (E–e)1773 K

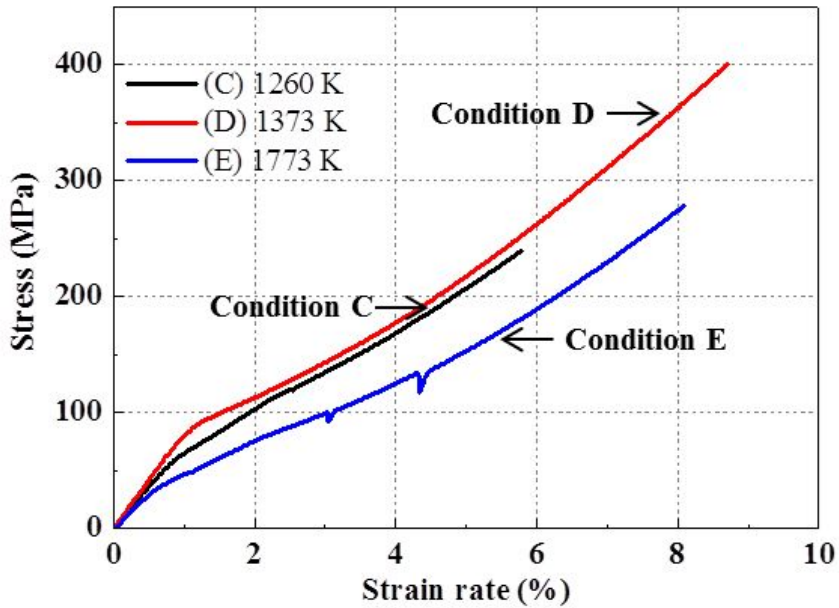


Fig. 12 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through various bonding temperature conditions by UTM

Table 4 Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to various bonding temperature conditions

Conditions	Stress	Strain rate
(C) 1260 K	239 MPa	6.0 %
(D) 1373 K	400 MPa	9.0 %
(E) 1773 K	283 MPa	8.0 %

## 3-2 접합 시간 및 압력 조건의 영향 분석

### 3-2-1 접합 시간 및 압력 조건

본 실험은 접합 온도를 1223 K를 기준으로 기존의 접합시간 2 hr 과 압력 2.2 MPa 에 변화를 주어 접합부의 변화를 관찰하고자하는 연구이다. 따라서 압력은 24 MPa, 접합 시간은 8 hr 로 각각 진행하였다. 진공도는  $5 \times 10^{-5}$  Torr를 유지하는 조건으로 확산접합 공정을 진행하였다. Table 5 는 변화된 접합 시간 및 압력 조건을 나타낸 것이다.

Table 5 Conditions on pressure and boning time for diffusion bonding

	Temperature	Vacuum	Pressure	Time
(a)Reference	1223 K	$5 \times 10^{-5}$ Torr	2.2 MPa	2 hr
(b)Pressure	1223 K	$5 \times 10^{-5}$ Torr	24 MPa	2 hr
(c)Time	1223 K	$5 \times 10^{-5}$ Torr	2.2 MPa	8 hr

### 3-2-2 접합 시간 및 압력 조건에 따른 접합 특성

Fig. 13 는 동일한 온도 조건에서 각각의 접합 시간과 압력에 따른 확산 접합 공정이 진행된 후 광학현미경과 마이크로 X-ray CT를 이용하여 접합부의 표면과 내부를 측정 한 결과이다.

Fig. 13 (A-a) 는 접합온도 1223 K, 압력 2.2 MPa, 그리고 접합시간 2 hr 의 접합 조건에서 확산접합이 진행된 결과이다. 40  $\mu\text{m}$  의 삽입금속이 중앙부분으로부터 용융이 진행되어 하나로 융합되는 형상을 보이고 있으나 완전한 용융이 일어나지 않은 형상을 보이고 있다. 그리고 삽입금속이 제대로 된 용융을 이루어지지 않아서 마이크로 X-ray CT를 이용한 내부 측정 촬영에서도 초경합금 재의 두 모재사이에는 물론, 삽입금속과 초경합금 표면과의 공간(void)가 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 1223 K의 온도와 2 hr 의 접합시간 그리고 2.2 MPa 의 압력 조건에서는 두 초경합금이 하나의 블랭크 형상을 보이지만 삽입금속의 불완전한 용융을 볼 수 있다. 결과물 Fig. 13 (B-b)는 (A-a)와 동일한 접합 온도인 1223 K 와 2 hr 의 접합 시간 조건이나, 접합 압력을 2.2 MPa 에서 24 MPa 으로 증가시킨 결과이다. 조건 (A-a)와 큰 차이점은 동일한 접합 온도와 시간 그리고 같은 양의 삽입금속이 사용되었으나 조건 (B-b)의 확산접합 결과는 두 초경합금 모재 사이의 삽입금속의 소멸이다. 그로 인해서 (A-a)의 조건과 달리 두 모재 사이의 공간이 거의 사라지고 하나의 블랭크가 제작된 것을 볼 수 있다. 하지만 접합부의 주변이 매우 거친 형상을 보이는 것을 보아 압력으로 인한 초기 상에 변형이 일어난 것으로 추측할 수 있다. 결과물 Fig. 13 (C-c)는 공동 접합 온도(1223 K)와 압력(2.2 MPa)에서 접합시간을 2 hr에서 8 hr 로 시간을 증가한 결과이다. 조건 (B-b)의 조건과 같이 접합부에서 삽입금속의 소멸을 볼 수 있다. 그리고 접합부의 경계가 (B-b)의 결과보다 매끄러운 형상을 보이고 있다. 하지만 초경합금 두 모재 사이에 압력이 증가된 조건의 결과보다 미세한 공간이 많은 것을 볼 수 있다. 이것은 용점저하원소의 확산을 위한 시간이 더 필요한 것으로 보인다.

Fig. 14 와 Table 6 은 기준 조건과 압력과 시간에 변화를 준 조건에 대해 인장응력을 측정 한 결과이다. 삽입금속의 용융이 발생되지 않은 조건 (A-a)는 매우 낮은 응력이 도출되었다. 시간의 조건의 경우 다소 낮은 응력이 나타났다. 이것은 삽입금속의 용융이 진행되었으나, 비교적 모재의 원자가 접합부에서 확산을 하기에



압력과 같은 다른 인자의 영향이 부족하여 나타난 것으로 보인다. 접합부 내부 측 정시 공동이 발생되지 않은 조건 (C-c)는 매우 높은 인장강도 결과가 도출되었다. 기존의 삽입금속이 용융되지 않았던 조건이었으나, 압력 증가로 인해 용융이 진행 되고 동시에 충분한 압력을 바탕으로 원자의 확산이 활발하게 일어난게 원인으로 추측된다.

따라서 확산접합 공정이 진행되기 어려운 조건에서도 시간과 압력 인자에 변화를 주어 원활한 접합 조건이 되도록 유도할 수 있다는 점과 낮은 온도의 접합 공정 조건을 추측하여 추후에 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하는데, 열화 손상을 저하시킬 수 있는 방법을 알 수 있었다.

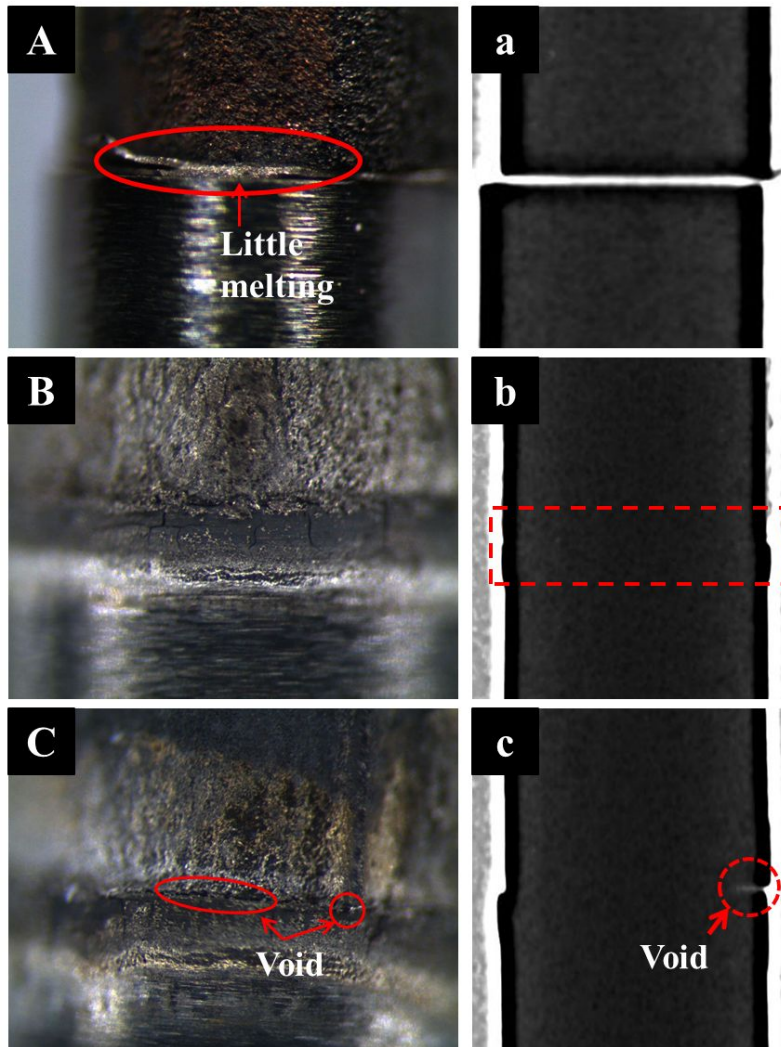


Fig. 13 (A-C) Optical microscopy and (a-c) Micro X-ray CT images of the bonded copula for bonding pressure and time: (A-a) reference, (B-b) pressure, (C-c) time condition

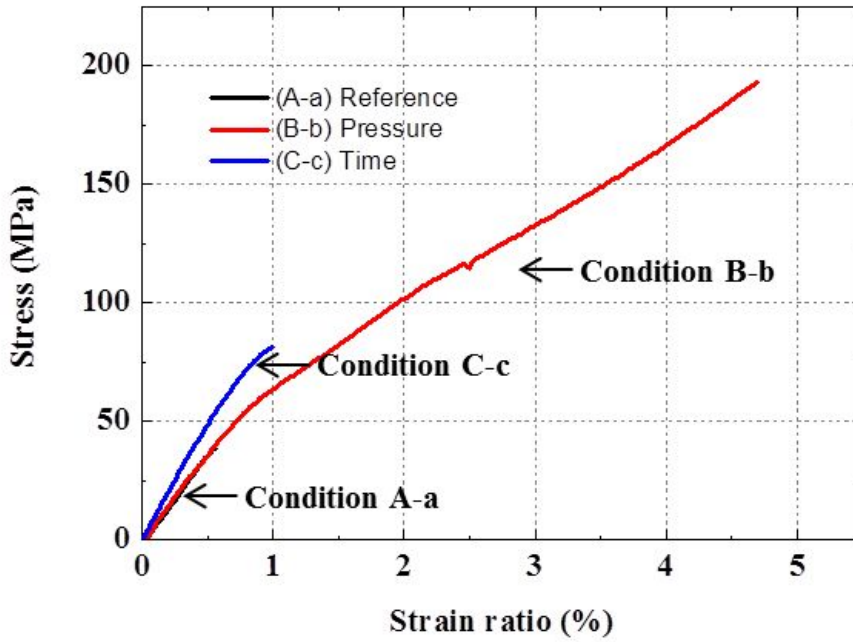


Fig. 14 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through bonding pressure and time conditions by UTM

Table 6 Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions

Conditions	Stress	Strain rate
(C) 1260 K	38 MPa	0.5 %
(D) 1373 K	193 MPa	4.7 %
(E) 1773 K	81 MPa	1.0 %

## 제 4 장 삽입 금속 조건 변화에 따른 접합 특성

### 4-1 삽입 금속 종류의 영향 분석

#### 4-1-1 삽입금속 종류

본 실험은 앞에서 설명된 삽입 금속의 종류에 따라 그 접합 특성에 대해 진행하였다. 사용된 니켈합금의 삽입금속은 시트형과 페이스트형으로 구분된다. Table 7 은 두 삽입금속 종류에 따른 확산접합 공정의 조건이다. 접합 조건은 두 삽입금속의 적용 범위이며, 그 결과를 광학현미경으로 접합부를 측정하고 마이크로 X-ray CT 를 이용하여 내부의 결함 또는 공동에 대해 측정하였다. 그리고 특수 제작된 초경합금 비례시험편을 이용하여 UTM과 함께 인장시험을 진행하여 강도 특성에 대해 고찰하였다.

Table 7 Diffusion bonding conditions according to two filler metal types  
(sheet and paste-type)

Temperature	Pressure	Time	Vacuum
1373 K	2.2 MPa	4 hr	$5 \times 10^{-5}$ Torr

## 4-1-2 삽입금속 종류에 따른 접합 특성

Fig. 15 은 접합 공정 조건에 따라 확산접합된 초경합금의 접합부를 광학현미경과 마이크로 X-ray CT를 이용하여 측정된 결과이다. Fig. 15 (A)는 시트형 삽입금속을 사용한 결과이다. 접합층이 확연하게 보이며, 접합부 주변에 형상 변화는 나타나지 않았다. 반대로 Fig. 15 (B)는 페이스트형 삽입금속을 사용한 결과로 A의 결과보다 접합부가 메워진 형상이 발생한 것으로 바탕으로 접합강도가 우수할 것으로 예상된다. 그리고 접합부 주변에 용융 반응이 나타났다. 이는 페이스트형 삽입금속이 압력에 의해 퍼짐 현상이 나타나 모재의 측면에 반응이 나타나는 것으로 보인다. 접합부의 내부 접합성을 분석하기 마이크로 X-ray CT를 이용하여 측정된 결과는 Fig. 15 (a-b)에 나타내었다. 마이크로 X-ray CT를 통해 내부 측정 결과, 시트형과 페이스트형 삽입금속을 사용한 모든 조건에서 접합부내에 공동(void)가 발생되지 않은 점을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 해당조건에서 두 형상의 삽입금속이 활발하게 확산접합 공정이 진행된 것을 나타낸다. 따라서 확산접합은 모든 접합 표면적에 대해 좋은 결과를 얻었다고 할 수 있다. 접합 내부의 결함이 발생되지 않았으므로 만능시험기를 통해 접합부 인장 강도 시험을 진행하였다.

Fig. 16 과 Table 8 은 두 조건의 인장응력 및 변형률을 나타낸 그래프이다. 인장 강도 시험 결과로 조건 A(시트형)는 403 MPa의 인장 응력이 도출되었다. 이 결과는 기존의 1373 K, 2.2 MPa, 2 hr의 확산접합 실험 결과보다 약 두 배 가량 높은 결과이다. 조건 B(페이스트형)는 350 MPa의 인장응력이 도출되었다. 두 조건 모두 공통적으로 매우 낮은 변형률을 가지는 것을 알 수 있었다. 낮은 변형률의 결과는 접합공정 시간이 길어질수록 변형률에 영향을 준다는 기존의 연구 결과와 일치하는 부분이다. 결과적으로 만능시험기를 이용한 삽입금속의 형상에 따른 특성은 시트형 삽입금속이 페이스트형 삽입금속 보다 1.15배 우수하였다. Fig. 17은 삽입금속 종류에 따른 인장시험편의 파단면을 광학현미경으로 측정된 것이다. 시트형은 매우 매끄러운 파단면을 나타내지만, 페이스트형은 매우 거친 표면을 나타내었다. 이 결과로 페이스트형이 상대적으로 젖음성이 우수하다는 것을 판단할 수 있다, 따라서 시트형 삽입금속이 페이스트형 보다 우수한 접합 특성을 나타냈지만, 복잡한 형상이나, 초소형 접합부에도 적용이 가능하므로 차별화가 가능할 것으로 보인다.

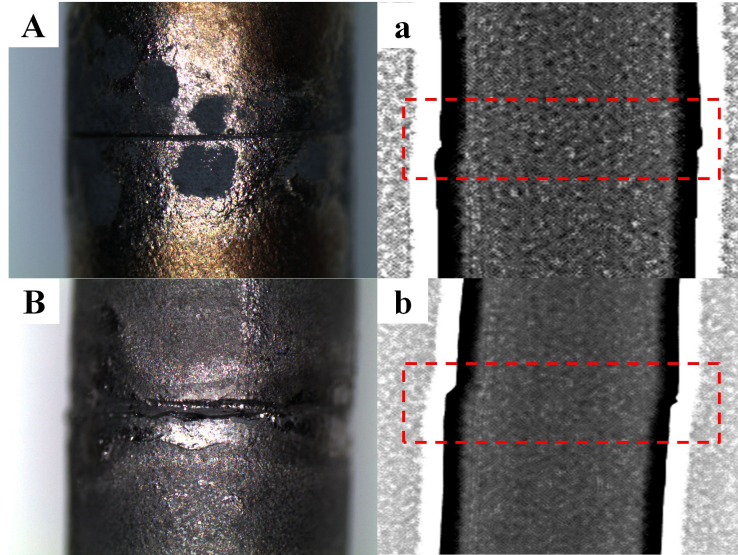


Fig. 15 (A-B) Optical microscopy and (a-b) Micro X-ray CT images of the bonded copula for two filler metal types: (A-a) sheet type, (B-b) paste type

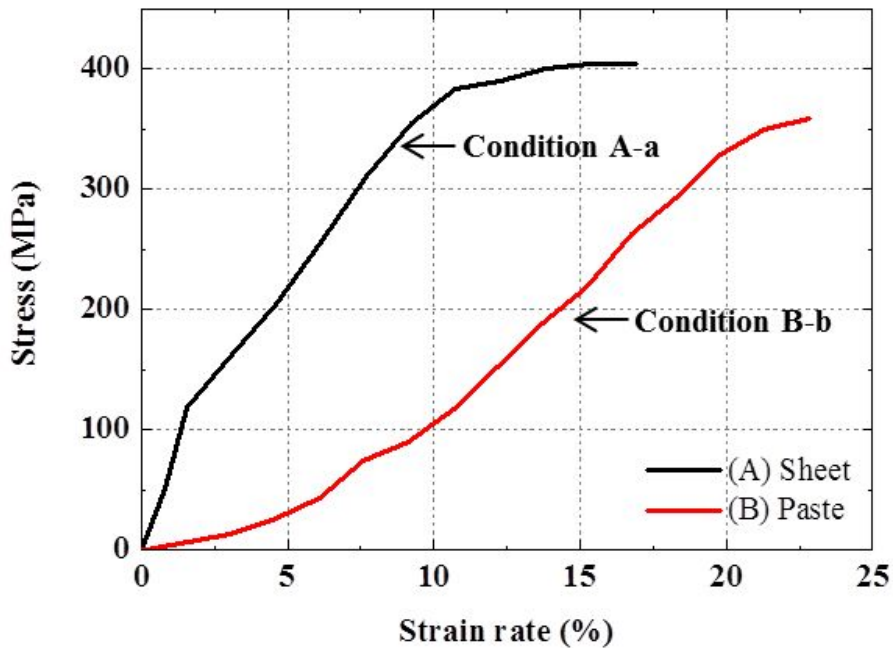


Fig. 16 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through the two filler metal type conditions

Table 8 Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions

Conditions	Stress	Strain rate
(A) Sheet	404 MPa	16 %
(B) Paste	359 MPa	22 %

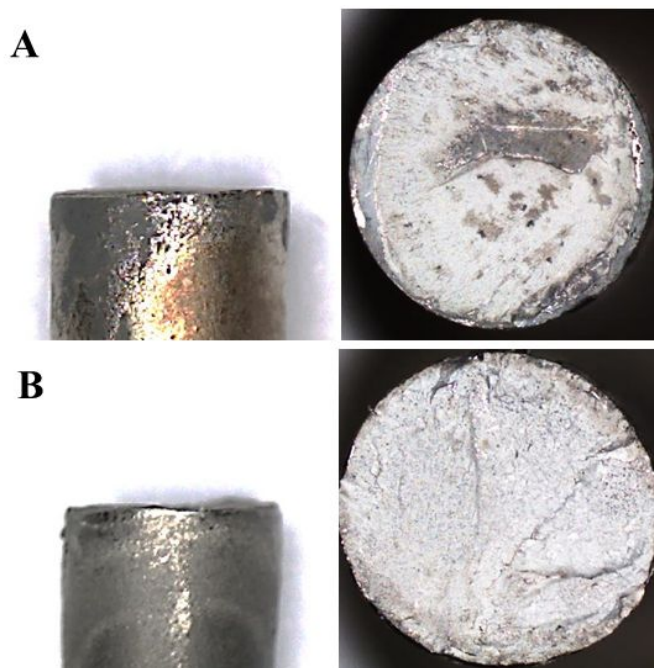


Fig. 17 (A–B) Optical microscopy images of the fracture surface for two filler metal types

## 제 5 장 표면 상태 조건 변화에 따른 접합 특성

### 5-1 표면 거칠기 조건의 영향 분석

#### 5-1-1 표면 거칠기 조건

확산접합 공정의 영향 인자 중 표면상태가 있다. 접합 효율을 위한 표면 상태에는 거칠기, 산화피막 등이 있으며, 이 중에서 산화피막이 가장 큰 문제가 되지만 고진공 분위기에서 진행하여 산화피막의 형성을 억제한다. 따라서 본 실험에서는 표면 거칠기에 따른 확산접합 특성에 대해 고찰하였다. Fig. 18 과 같이 실험에서 사용된 표면 거칠기의 조건 A: 96 nm Ra (Min -700 nm, Max 240 nm), B: 68 nm Ra (Min -324 nm, Max 202 nm), C: 29 nm Ra (Min -160 nm, Max 46 nm) 이다. 확산접합 공정 조건은 접합온도 1100 °C, 접합압력 2.2 MPa, 시간 8 hr, 진공도  $5 \times 10^{-5}$  Torr 이다. 확산 접합 공정은 Table 9에 도시된 바와 같다.



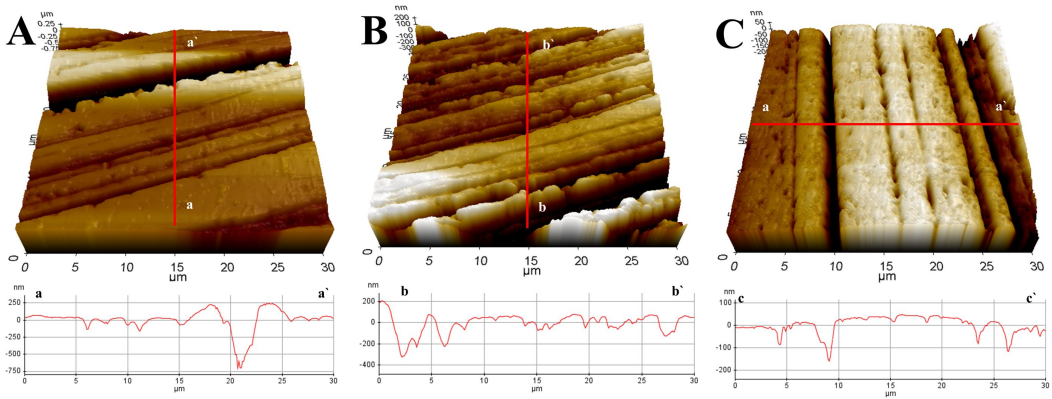


Fig. 18 (A–C) Surface roughness variation images for diffusion bonding

Table 9 Diffusion bonding conditions according to various surface roughness conditions

Temperature	Pressure	Time	Vacuum
1373 K	2.2 MPa	8 hr	$5 \times 10^{-5}$ Torr

## 5-1-1 표면 거칠기 조건에 따른 접합 특성

Fig. 19 은 조건에 따라 확산접합된 비례시험편을 Micro X-ray CT 장비를 이용하여 비례시험편의 중앙 부분을 측정된 결과이다. 모든 조건에서 접합 내부의 형상에 공간(void)이 발생되지 않은 것을 확인할 수 있다. 이것은 삽입금속이 용융되기에 적합한 1373 K의 온도 조건과 원자의 확산이 진행되기에 충분한 시간과 압력 조건으로 공정이 진행되었기 때문이다. 공간의 발생은 확산접합에서 접합 품질에 지대한 영향을 주기 때문에 A, B 그리고 C의 조건 모두 초경합금 원자의 확산이 접합면에 대해 접합부의 표면 거칠기에 상관없이 확산접합이 이루어진 것으로 추측된다. 그러나 전체적으로 보면 표면 거칠기가 거친 A 조건 (96 nm Ra, Min -700 nm, Max 240 nm)이 그렇지 않은 C 조건 (29 nm Ra, Min -160 nm, Max 46 nm)에 비해 접합 경계가 비교적 뚜렷하게 보이는 것이 측정되었다. 이것은 표면 거칠기가 상대적으로 거친 접합표면은 삽입금속이 완벽하게 용융되어도 초경합금 원자의 확산이 어렵고 그로 인해 확산접합성이 다소 떨어지는 것으로 추측할 수 있다. 또는 표면 거칠기의 부분적인 요(凹)부의 영향으로 Rmax 와 Rmin의 차이가 커질수록 용융된 삽입금속이 제공된 온도와 시간 조건에서 충분히 확산되지 못해 초경합금 원자의 확산이 어려워 나타난 것으로 추측된다.

Fig. 20 과 Table 10 은 초경합금 비례시험편의 접합부에서 각기 다른 표면 거칠기의 조건으로 확산접합된 시험편의 만능시험기를 통한 인장강도 시험 결과이다. 조건 A의 인장강도는 92 MPa 이고, 조건 B는 144 MPa 이고 마지막으로 조건 C는 274 MPa의 결과를 얻었다. 표면 거칠기가 거친 조건 A에서 가장 낮은 인장강도 결과가 나타났는데, 이 결과는 접합부의 경계가 비교적 뚜렷한 마이크로 X-ray CT의 결과와 마찬가지로 거친 표면 상태로 인해 확산접합이 잘 이루어지지 않아 매우 낮은 접합 강도를 가지게 된 것으로 보인다. 본 실험에서 중간 정도의 표면 거칠기를 가지는 조건 B의 경우 조건 A와 비교하면 뚜렷하지 않은 경계면과 상대적으로 낮은 표면 거칠기 또는 표면 상태를 통해 인장강도 결과가 160% 가량 상승한 것을 볼 수 있다. 가장 우수한 표면 거칠기를 가진 조건 C는 요철(凹凸)부가 적고 표면 상태가 우수하여 용융된 삽입금속이 활발하게 확산되어 초경합금 원자의 확산이 충분히 발생된 것으로 예상되며, 그 때문에 접합부의 경계가 가장 희미하고 인장강도가 조건 A보다 300% 가량 상승한 매우 높은 결과가 나타났

다. 결과적으로 표면상태가 우수한 접합부일수록 확산 접합이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 20 의 Minimum Time 은 온도 1373 K, 압력 2.2 MPa, 접합시간 4 hr, 표면 거칠기 35 nm Ra 의 조건에서 확산접합 공정이 진행된 초경합금 비례시험편의 인장강도 시험 결과이다. 인장강도는 239 MPa 로 측정되었다. 시간이 단축된 조건으로써 다른 조건과 달리 연신율이 높게 나타났다. 이 결과로 접합시간의 증가는 접합강도를 향상시키지만 연신율이 줄어드는 결과를 얻게 되었다.

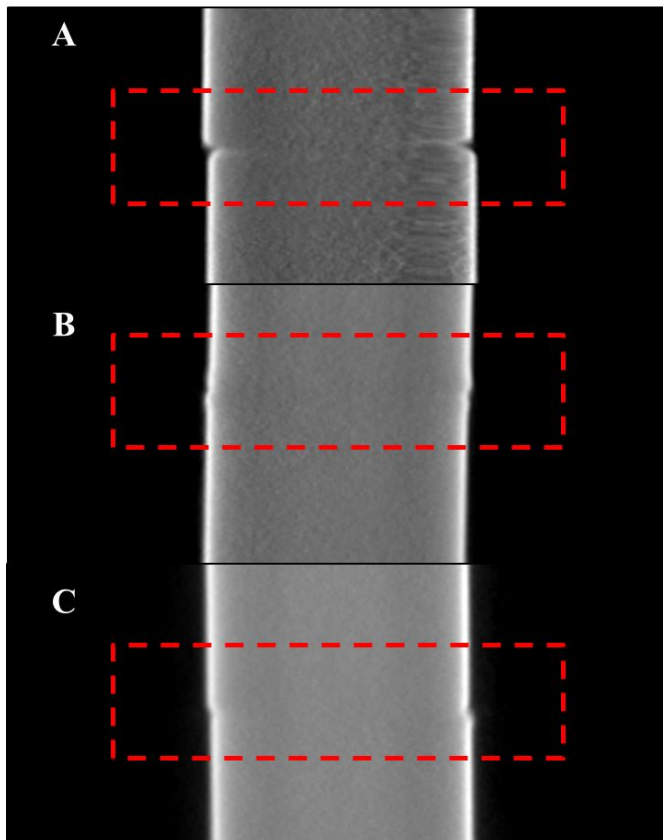


Fig. 19 Measuring results of diffusion bonded copula through various surface roughness by Micro X-ray CT

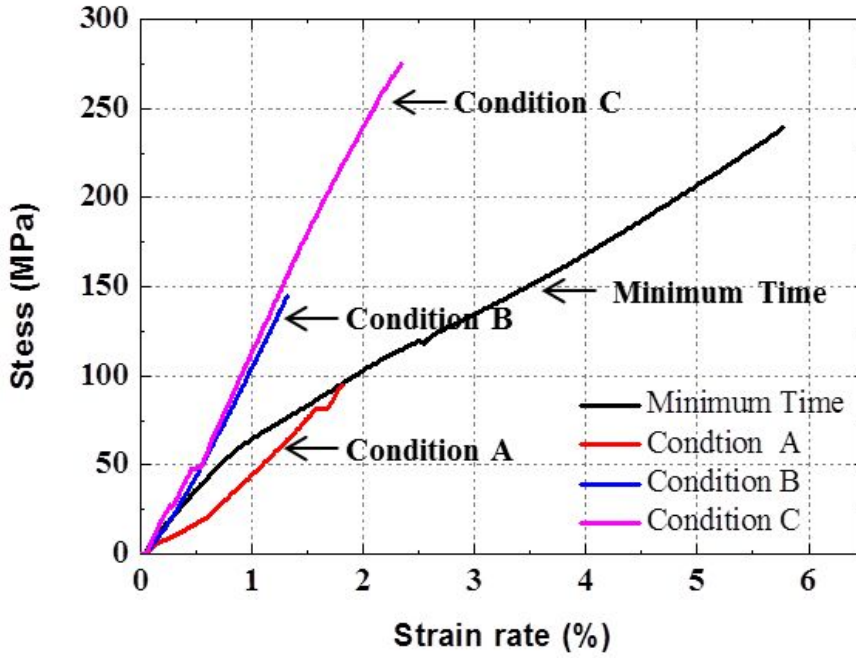


Fig. 20 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding through a various surface roughness

Table 10 Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions

Conditions	Stress	Strain rate
Minimum time	239 MPa	5.7 %
(A) 96 nm Ra	94 MPa	1.8 %
(B) 68 nm Ra	145 MPa	1.3 %
(C) 29 nm Ra	275 MPa	2.3 %

## 5-2 접합부 형상 조건의 영향 분석

### 5-2-1 접합부 형상 조건

본 실험에서는 PCD-WC 블랭크의 접합부 형상에 따라 공구의 성능을 분석하고자 초경합금 비례시험편을 제작 및 확산접합하여 고찰하였다. Fig. 21 과 같이 제작된 비례시험편의 접합부 형상은 중심각  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  의 쐐기(wedge) 형과 1mm 톱니 (saw tooth) 형을 사용하였다. 삽입금속은 페이스트(paste) 형을 사용하였다. 그 이유는 시트(sheet) 형의 경우 접합부의 면적에 따라 타원의 형태로 가공이 다소 어렵기 때문이다. 그리고 쐐기 형의 모든 접합면에서 고른 압력 전달이 어려울 것으로 판단하여 비교적 균일한 확산접합 반응이 일어나는 페이스트(paste) 형으로 선정하였다. Table 11 은 쐐기형의 접합 표면적과 확산접합 공정의 조건을 나타내었다.

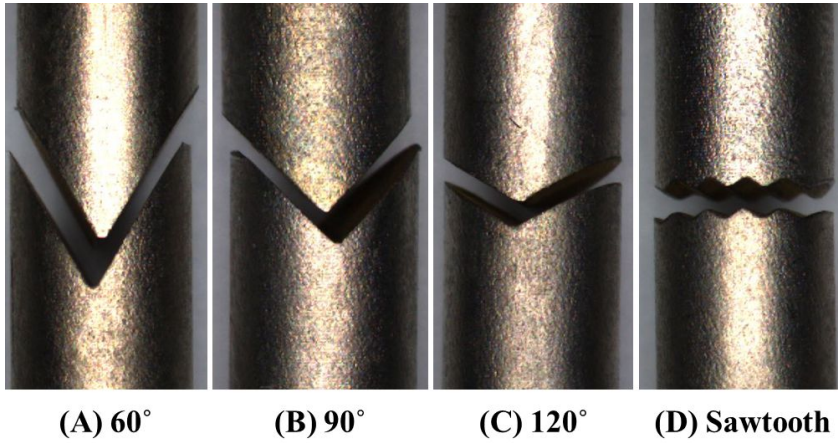


Fig. 21 Proportional specimen on the tungsten carbide in various copula shapes

Table 11 Diffusion bonding conditions and the copula surface areas

Temperature	Pressure	Time	Vacuum
1100 °C	2.2 MPa	4 hr	$4 \times 10^{-5}$ Torr
(A) 60 °	(B) 90 °	(C) 120 °	(D) Saw tooth
39.3 mm <sup>2</sup>	27.5 mm <sup>2</sup>	22.8 mm <sup>2</sup>	32.9 mm <sup>2</sup>

## 5-2-2 접합부 형상 조건에 따른 접합 특성

Fig. 22 은 확산접합 공정 조건에 따라 진행된 비례시험편을 실체 현미경을 이용하여 접합부를 측정된 결과이다. 접합부 측정 결과에서 공통적으로 모든 형상 조건에 접합부 주변이 삽입금속에 의한 반응이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이것은 페이스트형 삽입금속의 특성상 낮은 압력에도 퍼짐 현상 (Spread phenomenon) 이 원인이다. 조건 (A) 60° 의 결과에서 접합 경계면은 뚜렷하게 확인된다. 그리고 접합부의 꼭짓점 부근에 미세한 균열이 확인되며 본 소재의 뾰족한 형상이 유지되었다. 이것은 측면부에서 압력이 집중되어 모든 접합부에서 압력이 균일하게 가해진 것이 아니므로 확산접합이 불완전하게 진행된 것으로 추측된다. 조건 (B) 90° 의 결과에서는 모든 경계면에서 원활한 접합 반응이 나타난 것으로 보인다. 그러나 접합부 꼭짓점 부근에 조건 (A) 보다 큰 균열이 보인다. 이것은 중앙부로 힘이 집중된 것을 나타낸다. 조건 (C) 120° 의 결과에서는 조건 (B) 의 결과와 비교적 같은 정도의 경계면이 나타났고 접합부 꼭짓점 부근에 균열이 나타나지 않았다. 그러나 중앙으로부터 약 좌우로 2.5 mm 의 위치에서 큰 균열이 발생하였다. 이것은 다른 췌기형 조건과 달리 접합면에 고르게 접합압력이 가해진 것으로 보인다. 조건 (D) 톱니형의 결과에서는 고르게 확산접합이 진행된 것으로 판단된다. 그리고 접합부에서 균열이 나타나지 않았다. 이것은 톱니형의 췌기의 깊이가 크지 않기 때문에 균열이 발생하지 않을 것으로 추측된다. 광학현미경을 이용한 측정 결과에서 췌기 형 (A-C) 의 접합부가 다소 압력이 집중되는 경향이 심해서 톱니형 (D) 에 비해 균열의 발생에 취약하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 23 과 Table 12 는 접합부 형상에 따른 초경합금 비례시험편을 만능시험기를 이용하여 인장강도 시험을 진행한 결과를 나타내었다. 인장강도 시험 결과로 조건 (A) 는 338 MPa, 조건 (B) 는 354 MPa, 조건 (C) 는 399 MPa, 조건 S(D) 는 332 MPa 이 나타났다. 이 결과는 췌기형 접합부 형상에서 접합 면적이 넓은 조건 (A) 이 가장 인장응력이 높을 것이라는 예상과 달리 가장 단면적이 작은 조건 (C) 에서 가장 높은 인장 응력이 나타났다. 이는 크지 않은 접합부 면적 차이에서 모든 접합면에 조건 (C) 와 같이 고른 압력이 가해진 것이 확산접합에 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 그리고 동시에 표면에 나타난 균열의 크기는 인장강도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것으로 확인되었다. 톱니형의 경우는 실체현미

경 측정 결과에서 원활한 확산접합 결과가 나타났으나 인장응력은 다소 낮게 나타났다. 이것은 1mm의 톱니 형상의 썰기 부분을 위주로 압력이 집중된 것으로 판단되며 비교적 홈의 깊이가 작기 때문에 확산접합이 진행되어 이러한 결과가 나타난 것으로 추측된다. 모든 조건에서는 접합이라는 특수한 상황이므로 연신율은 4 ~ 7 % 라는 수치로 낮게 측정되었다.

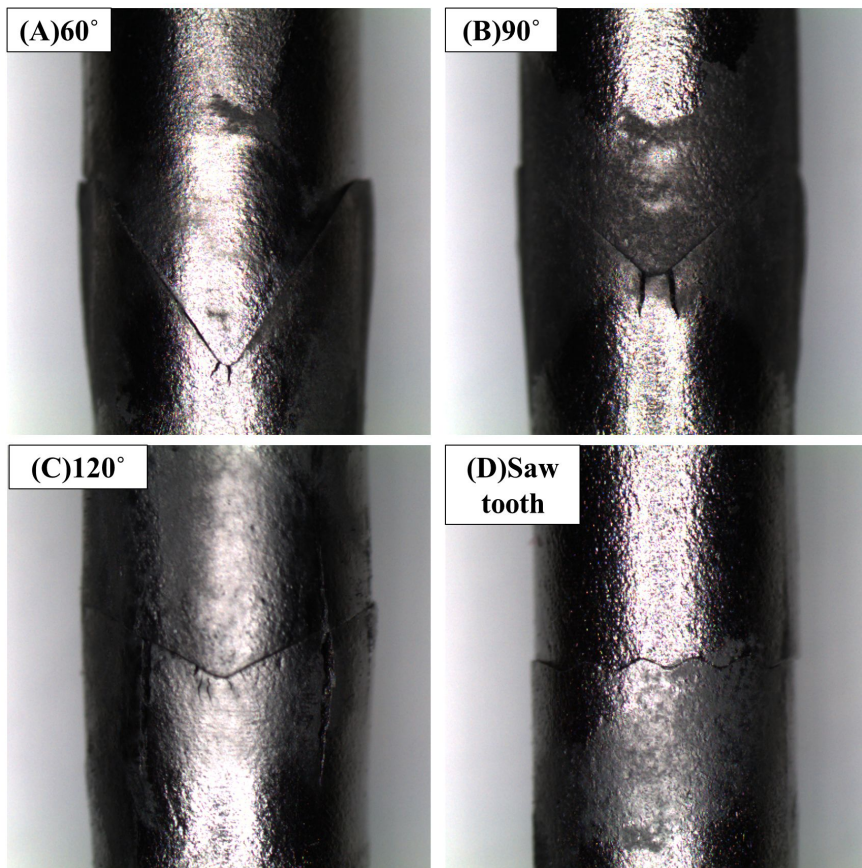


Fig. 22 Measuring results of diffusion bonded layer for the copula shape by optical microscope



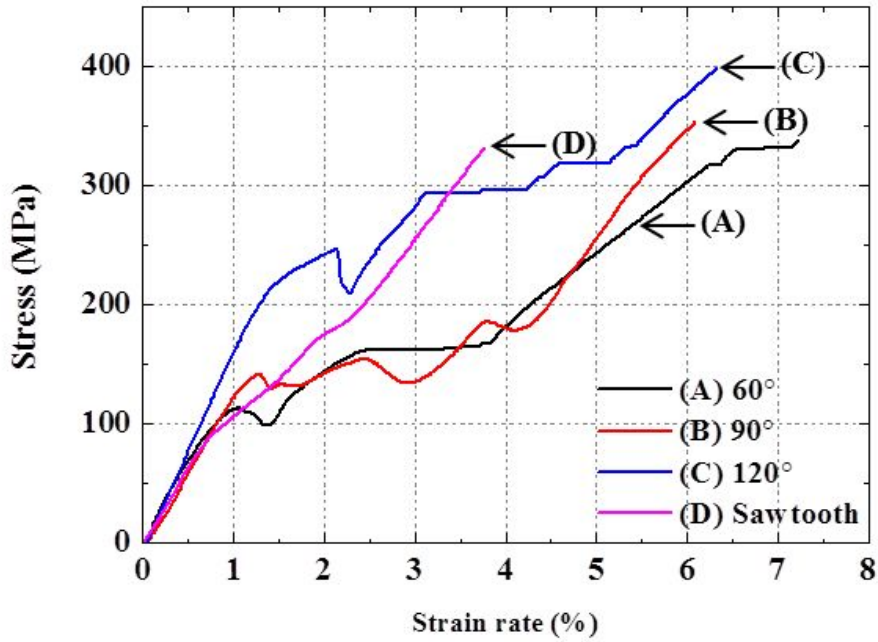


Fig. 23 Stress-strain diagram of tensile strength for diffusion bonding according to various copula shapes

Table 12 Results of tensile strength test about bonded proportional specimen according to pressure and time conditions

Shapes	Stress	Strain
(A) 60 °	337.9 N/mm <sup>2</sup>	7.0 %
(B) 90 °	354.3 N/mm <sup>2</sup>	6.0 %
(C) 120 °	399.0 N/mm <sup>2</sup>	6.0 %
(D) Saw tooth	331.5 N/mm <sup>2</sup>	4.0 %

## 제 6 장 결 론

본 연구는 확산접합을 기반으로 하여 초소형 PCD 팁 (PCD-Cemented carbide composite tip) 과 초경합금 생크 (cemented shank)를 초소형 PCD 드릴로 제작하기 위한 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크 제작 공정에 대한 연구이다. 본 연구를 통해서 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하기 위한 확산접합 공정에 대한 시스템 구축과 함께 공정 조건에 대한 데이터를 정량화 시켰으며, 다양한 접합 인자에 따른 실험 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 확산접합 의 중요한 변수들 중 하나인 접합온도의 의존성에 대해 분석한 결과에서 대체로 낮은 접합온도 조건의 접합 결과에서는 니켈합금의 삽입금속이 완전히 용융되지 않아, 결과적으로 두 모재가 완전한 확산접합을 형성하지는 않았다. 반대로 1370 K 의 온도 조건부터 삽입금속의 용융이 활발하게 이루어져 두 모재의 접합표면으로 삽입 금속의 성분이 확산되었고 그로 인해 본래의 용점 이하의 온도에서 용융되어 두 초경합금이 서로 융합되는 형상을 볼 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.

2. 접합 시간 및 압력 조건에 대한 분석 결과에서 낮은 접합 온도 조건에서는 접합 시간과 압력이 증가할 경우 삽입 금속의 용융을 유발하여 확산접합이 진행되는 것을 알 수 있었다. 그러나 시간의 증가는 생산 공정에 비효율적이고 지나친 압력은 제품의 초기 형상에 영향을 주기 때문에, 접합 공정에서는 접합 시간을 짧게 갖으며, 적절한 압력을 가해 우수한 접합부를 갖는 것이 중요하다.

3. 삽입금속 조건에 대한 분석 결과에서 삽입금속을 사용하지 않는 고상확산접합은 PCD부의 탈락 및 붕괴를 유발하기 쉬운 것으로 나타났다. 그래서 삽입금속을 사용하는 액상확산접합이 초소형 PCD 드릴 공구 블랭크를 제작하는데 더욱 접합하다는 것을 알 수 있다.

4. 삽입금속의 종류에 따른 분석 결과에서 두 종류의 삽입금속 모두 확산접합에 적용이 가능하며, 페이스트형 삽입금속의 경우, 전처리 및 접합 공정이 향상되면 접합 특성이 시트형 삽입금속보다 우수할 것으로 예상된다.

5. 표면 거칠기에 따른 분석 결과에서 거시적인 관점에서 표면 거칠기의 미세한 차이가 확산 접합부의 접합 성능을 결정 짓는 매우 중요한 역할이라 할 수 있으며, 접합 압력의 증가로 접합성 향상을 예상할 수 있다.

6. 썰기형의 접합부가 톱니형의 접합부 보다 우수한 접합 강도를 나타냈으며, 미소한 접합 면적의 차이에서 접합 압력이 표적 접합부에 일정한 압력이 가해질수록 높은 강도 특성을 가질 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Muhammad Aziz, Osamu Ohnishi and Hiromichi Onikura, "Novel micro deep drilling using micro long flat drill with ultrasonic vibration," Precision Engineering, Vol. 36, pp. 168–174, 2012
2. J. Paulo Davim and A. Monteiro Baptista, "Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp. 417–423, 2000
3. R. T. Coelho, S. Yamada. D. K. Aspinwall and M. L. H. Wise, "The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC." International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 35, pp. 761–774, 1995
4. Durao L. M. P., Goncalve D. J. S., and Tavares J. M. R. S., Albuquerque V. H. C., Vieira A. A. and Marques A. T., "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates," Composite Structures, Vol. 92, pp. 1545–1550, 2010
5. Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M. E., and Girot F., "Modeling and tool wear in drilling of CFRP," Composite Structures, Vol. 29, pp. 669–682, 2001
6. R. Edwards, "Cutting Tools," The Institute of Materials, London, 1993
7. E. M. Trent, "Metal Cutting," Butterworths, Boston, 2nd Ed., 1984
8. K. Narasimhan, S. P. Boppana and D. G. Bhat, "Development of a graded TiCN coating for cemented carbide cutting tools—a design approach," Wear, Vol. 188, pp. 123–129, 1995
9. 이건우, “절삭공구의 현황과 제조기술 및 발전동향,” Materials Research, Yeungnam University, Vol. 1, pp. 87–97, 2000
10. 김선창, 박근석, 이석우, 박경희, “친환경 난삭재 가공기술 개발 동향,” Keit PD ISSUE REPORT, Vol. 12, pp. 14–38
11. Cho S. H., Hwang. S. K., Park W. K. and Lee O. S., "Sintering

- Characteristics of WC-SiC-10Ni Hard Materials with TiC Addition," Korean Journal of Metals and Materials, Vol. 32, pp. 786-791, 1994
12. Jeong B. W. and Park J. W., "Transient liquid phase diffusion bonding for micro PCD tool fabrication," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 27, pp. 3005-3010, 2013
  13. Jeong B. W. and Park. J. W., "The Temperature Dependence of the Diffusion Bonding Between Tungsten Carbides for Micro WC-PCD Tool Fabrication" Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 22, pp. 812-817, 2013
  14. Kim G. H., "Analysis of Characteristic Evaluation of Microdrilling for the Cemented Carbides Materials," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, pp. 52-59, 2002
  15. Heo S. J., "Wear Mechanism and Machinability of PCD Tool in Turning Tungsten Carbides," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 11, pp. 85-91, 2013
  16. Qin F., Chou Y. K., Nolen D., Thompson R. G. and Hocheng H., "Coating thickness effects on diamond coated cutting tools," Vol. 204, pp. 1056-1060, 2009
  17. Endo H. and Marui E., "Small-hole drilling in engineering plastics sheet and its accuracy estimation," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 575-579, 2006
  18. Kwon D. J., Wang Z. J., Gu G. Y. and Park J. M., "Comparison of Optimum Drilling Conditions of Aircraft CFRP Composites using CVD Diamond and PCD Drills," Composites Research, Vol. 24, pp. 23-28, 2011
  19. Morgan C. J., Vallence, R. R. and Marsh E. R., "Micro Machining Glass with Polycrystalline Diamond Tools Shaped by Micro Electro Discharge Machining," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 1687-1692, 2004
  20. Moon I. Y. and Kim B. H., "Micro Machining of Titanium Alloy Using Polycrystalline Diamond Tools," Journal of Korean Society of Precision

- Engineering, Vol. 30, pp. 284–291, 2013
21. Xiang C., Zhigang W. Kazuo N. and Kazuo Y., "Design and development of PCD micro straight edge end mills for micro/nano machining of hard and brittle materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, pp. 2261–2268, 2010
  22. Peter F., Kazutoshi K. Yutaka K. and Kazuo Y., "WEDM condition parameter optimization for PCD micro tool geometry fabrication process and quality improvement," *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, Vol. 63, pp. 1011–1019, 2012
  23. C. J. Morgan, R. R. Vallance, Eric. R. Marsh, "Micro Machining glass with polycrystalline diamond tools shaped by micro electro discharge machining," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 1687–1692, 2004
  24. C. Gao, Z. Zhan, S. Wang, N. He and L. Li, "Research on WEDM process optimization for PCD micro milling tool," *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 209–214, 2013
  25. M. Yang, P. He and T. Lin, "Effect of Brazing Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Alloy Joints Reinforced by TiB Whiskers," *Journal of materials Science & Technology*, Vol. 29, pp. 961–970, 2013
  26. T. Zaharinie, R. Moshwan, F. Yusof, M. Hamdi and T. Ariga, "Vacuum brazing of sapphire with Inconel 600 using Cu/Ni porous composite interlayer for gas pressure sensor application," *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 375–381, 2014
  27. R. Johari Miab and A. M. Hadian, "Effect of brazing time on microstructure and mechanical properties of cubic boron nitride/steel joints," *Ceramics International*, Vol. 40, pp. 8519–8524, 2014
  28. Kang C. Y., "On The Transient Liquid Phase Diffusion Bonding," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 7, pp. 12–24, 1989
  29. Kwon B. D., Lee W. B., Kim B. S., Hong T. W., Shur C. C. and Jung S. B., "Joinability of Tool Steels by TLP Bonding," *Journal of the*

Korean welding Society, Vol. 21, pp. 439–444, 2003

30. E. A. Moelwyn, "The Kinetics of Reaction in Solution," Clarendon Press Oxford, pp. 374, 1974