

Ag-Cu-Zn-Cd 계 용가재를 이용한 Bronze 소결체/ 강의 브레이징 접합부 특성 평가

이정훈* · 이창희**

Characteristics of Brazed Joint of Sintered Bronze/steel
Using Ag-Cu-Zn-Cd Type Filler Materials

Jeong Hoon Lee* and Chang Hee Lee**

Key Words : Brazed joint(브레이징 접합부), Filler material(용가재), High frequency induction brazing(고주파 유도 브레이징), Bending strength(굽힘강도), Reaction region(반응영역), Wettability(젖음성)

Abstract

The study was carried out to examine in more detail metallurgical and mechanical properties of brazed joints of diamond cutting wheel. In this work, shank(mild steel) and sintered bronze-base tips were brazed with three different filler materials(W-40, BAg1 and BAg3S). The machine used in this work was a high frequency induction brazing equipment. The joint thickness, porosities and microstructure of brazed joints with brazing variables(brazing temperature, holding time) were evaluated with OLM, SEM, EDS and XRD. Bending(torque) test was also performed to evaluate strength of brazed joints. Further wetting test was performed in a vacuum furnace in order to evaluate the wettability of filler metals on base metals(shank and tips). The brazing temperature had a strong influence on the joint strength and the optimum brazing temperature range was about 700~850°C for the bronze/steel combinations. The strength of the brazed joint was found to be influenced by the three factors: degree of reaction region, porosity content, joint thickness. The reaction region was formed in the bronze-base tip adjacent to the joint. The reaction region resulted in a bad influence on the strength due to the formation of $Cu_{5.6}Sn$, $CuZn_4$, $\beta(CuZn)$ and $CdAg$, etc. Porosities increased as brazing variables(brazing temperature, holding time) increased, and the brazed joints with porosities of less than about 3-5% had an optimum strength for the bronze-base tip.

* 1999년 1월 25일 접수

* 비회원, 한양대학교 금속공학과 철강공정 및 응용 연구소

** 정회원, 한양대학교 금속공학과 철강공정 및 응용 연구소

• 이창희 : chlee@email.hanyang.ac.kr

1. 서 론

구조재료로서 다이아몬드 커팅 휠(diamond-bearing cutting wheel)은 석재, 내화물, 콘크리트, 비금속 건축용 자재를 절단하는데 사용되고 있으며, 미국, 유럽 및 국내를 포함한 전세계에 관련산업이 널리 확산되고 있다.¹⁾

이러한 커팅 휠은 탄소강의 몸체(shank)에 다이아몬드 입자를 함유한 공구용 소결체 팁(tip or segment)을 접합시켜서 제조하고 있으며, 제조방법으로는 브레이징과 레이저 용접, 그리고 직접 소결과 접합을 동시에 이루어지는 공정 등이 널리 사용되고 있는 실정이다. 최근에는 레이저 용접에 의한 공정을 사용하는 업체들이 늘어나고 있는 실정이지만²⁾, 비록 접합강도는 매우 우수하게 나타나고 있는 반면, 고가의 레이저 장비를 사용하므로 드는 비용과 이종재료를 접합하므로 나타나는 용접성 저하(높은 기공율, 균열 발생) 등의 앞으로 당면하고 있는 문제들을 가지고 있다. 이에 반하여 브레이징에 의한 이종재료의 접합은 적절한 용가재(filler metal)를 선택함으로써²⁻⁴⁾ 적절한 강도를 가진 커팅 휠을 제조할 수 있으며, 레이저 용접에 의한 공정에 비하여 비용절감 및 자동화에 의한 대량생산에 유리하다고 할 수 있다.

최근에는 고주파 유도에 의한 브레이징 장치를 사용하여 자동화 시스템에 의한 커팅휠을 제조함으로써 더욱 생산성에 유리하다고 할 수 있다. 그러나 고주파 유도 브레이징을 포함한 몇몇 공정을 통하여 제조되고 있는 현재의 커팅 휠 제조 공정에서 당면하고 있는 문제점은 단순히 경험치에 의존하여 이루어지는 공정이 대부분을 차지한다는 점이다. 따라서 커팅휠의 접합부의 우수한 야금학적, 기계적 특성을 얻기 위해서는 좀 더 체계적이고 구체적인 접합 특성을 이해해야 할 필요성이 있다. 그러나 아직까지 관련재료 및 공정에 관

한 연구는 국내에서 거의 전무한 상태이므로, 본 연구는 이러한 현시점에서 기초적인 자료를 제시하는데 그 의미가 있다 하겠다.

그러므로 본 연구에서는 고기능의 고주파 유도 브레이징 장치를 이용하여 기계적, 야금학적 특성이 다른 두 재료, 상크(mild steel)와 소결체 팁(bronze-base)을 현재 생산에서 적용되고 있는 조성이 다른 Ag-Cu-Zn-Cd 계의 3가지 용가재(W-40, BAg1, BAg3S)를 경험에 근거하여 선택하고, 브레이징 공정 변수(브레이징 온도, 유지시간)를 변화시키면서 브레이징을 수행하고, 이렇게 제조된 시험편들 각각의 접합특성을 평가하기 위하여 야금학적 분석, 기계적 시험과 젖음성 시험을 함으로써 공정변수에 따른 접합능력 평가 및 경향을 도출하였다.

2. 실험방법

2.1. 재 료

본 연구에서 사용된 각각의 재료(상크, 팁, 용가재)의 화학성분 및 온도특성은 Table 1에서 나타내고 있다. 용가재는 Table 1과 같이 각각 성분비 및 용융점이 다른 3가지의 용가재를 가지고 브레이징 실험을 실시 하였다. Fig 1과 2는 각각의 모재, 상크, 팁과 용가재들의 형상 및 미세조직을 나타내고 있다. 용가재의 규격은 폭 3mm, 두께 0.25mm의 크기를 가지고 있으며 foil 형태를 나타내고 있다. Fig 2에서 (a)는 상크의 조직으로 0.35%의 C를 함유하고 α -ferrite (tempered martensite)로 구성되어 있다. (b), (c), (d) 각각은 용가재의 응고후의 공정조직을 나타내고 있는데, 3개의 용가재 모두 공통적으로 응고시 처음 생성되는 Cu-rich 상의 초정미가 검게 관찰되고 있으며 (a 영역), matrix는 Ag-rich에 Cd가 고용된 상과 CuZn 상의 전형적인 공정(eutectic)조직을 보여주고

Table 1. Chemical composition of test samples

구 성	재료(wt%)									
	화학 조성	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Fe
Shank		0.35	0.26	0.68	0.01	0.005	0.95	0.21	0.12	balanced
Tip	Bronze base	75% Cu, 13% Sn, 12% Co								
Filler metal	분류	화 학 조 성					온도범위(℃)			
	기호	Ag	Cu	Zn	Cd	첨가물	고상선		액상선	
	BAg1	45	15	16	24		605		620	
	W-40	40	19	21	20		595		630	
	BAg3S	48	15.5	16.5	14	2Ni, 4Mn	610		660	

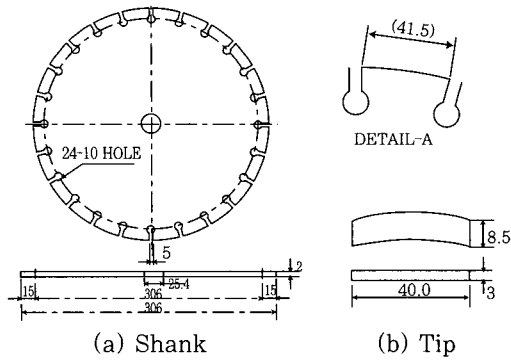


Fig. 1 Schematic of standard specimen size

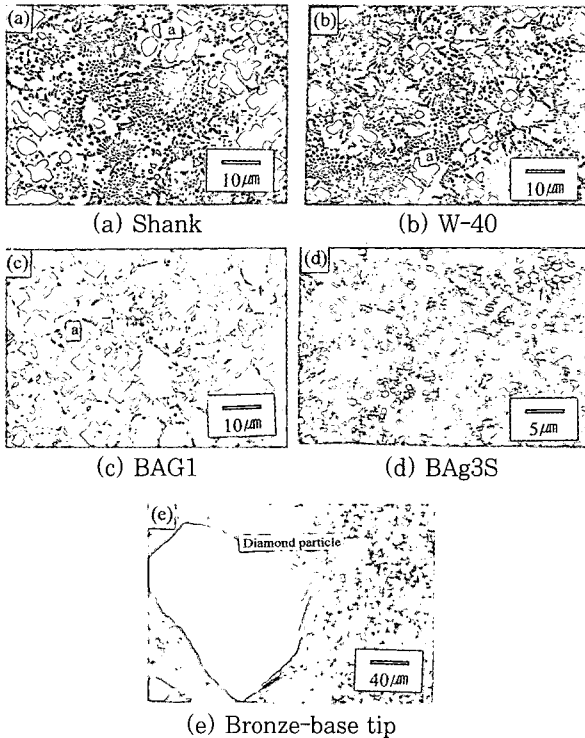


Fig. 2 Microstructure of base metal

있다. 초정영역의 성분은 다량의 Cu와 Zn으로 구성되어 있으며, 공정 matrix 영역에서는 Ag와 Cd으로 주로 구성되어 있다. 일반적으로 Zn, Cd은 Ag-Cu 계에서 젖음성 향상 및 용점저하 원소로 알려져 있다.^{2~4)} (e)는 브론즈 팁의 미세조직을 나타내며, 약 100-200 µm 크기의 다이아몬드 입자가 분산되어 있음을 볼 수 있는데 절삭성에 중요한 역할을 하게 되는 재료로 팁 전체에 대하여 약 8-10%를 차지하고 있다.

2.2 공정변수에 따른 브레이징 실험

본 연구에서는 최대출력 7kW급으로 고주파 발전에 의한 유도 브레이징 장치를 이용하였으며 현재 국내의 산업에서 구조물 절단에 사용되는 다이아몬드 커팅

휠 제작 전용으로 사용되고 있다. Fig3(a)에서 브레이징 접합부의 개략도가 나타나 있다. 이상과 같은 장비를 이용하여 Table 2에 나타나있는 브레이징 온도와 유지시간을 변화시키고 나머지 조건을 고정시킨후 브레이징 실험을 실시하였다.

Table 2. Brazing conditions

공정 변수	설정 값	
Brazing temperature(℃)	640~900	
Holding time(sec)	10~16	
Cooling time(sec)	5	
공통변수	냉각수	25 l /min
	수온	12~15℃
	압축공기	6-8 bar

2.3 기계적 특성 평가

굽힘시험은 엄밀히 말하면 토크시험이라 할 수 있으며, 이는 현재 산업용 커팅 휠 본체에 팁을 접합시킨후 접합부의 합격/불합격 판정을 하여 건전한 접합부를 평가, 수행하는 방법이다(Fig 3(b)). 이 시험방법은 torque wrench를 이용하고 있으며 기준값을 정해놓고 하중을 가하여 견디게 되면 합격, 파단이 일어나게 되면 불합격으로 판정하지만, 본 연구에서는 좀 더 정확한 값을 얻기 위하여 하중값을 미소변화 시키면서 파단되는 값의 바로 전 값을 그 강도값으로 규정하는 방법을 사용하였다. 이렇게 얻은 강도값을 토크로 나타내었으며 단위는 kgf.cm이다. 현재 국외 기준 강도값을 구하는 방법(DSA기준)으로 다음식을 이용하고 있으며, 본연구의 모재에 대한 기준값으로 계산결과 122kgf.cm를 나타내었다. 그러나 국내에서는 이 기준보다 보수적인(conservative) 값(170kgf.cm)을 이용하여 최적강도를 사용하고 있으므로 170kgf.cm를 적정조건으로 선정하였다.

$$\text{Torque} = \frac{L \times W^2 \times 450(\text{MPa})}{6}$$

여기서, L : 접합부의 길이(40mm)
W : 접합부의 폭(2mm)

이러한 방법을 가지고 공정변수에 따라서 강도가 어떤 경향으로 변하는지를 평가하였다. 이러한 강도변화와 미세조직과의 상관관계를 고려하였다.

2.4 미세조직관찰, 성분분석 및 상분석

먼저 접합부의 거시적인 형상을 분류하여 적정 브레

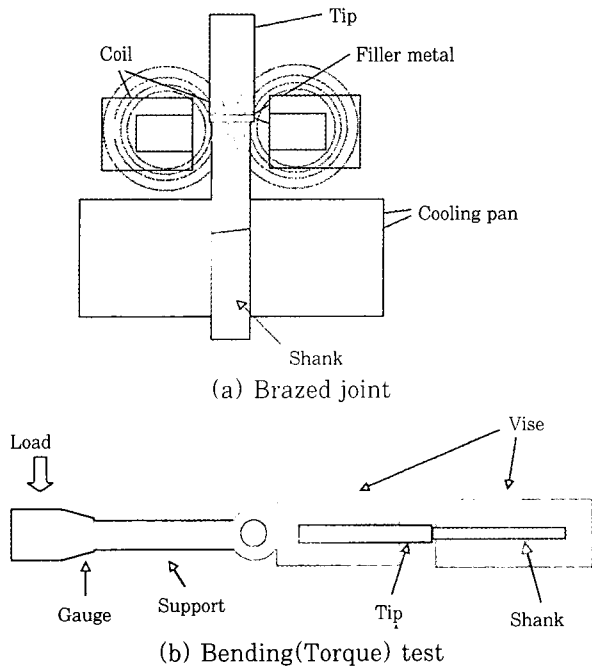


Fig. 3 Schematic

이징 조건을 예측하였으며, 광학현미경을 이용하여 관찰하기 위하여 전처리 과정(마운팅, 연마, 정마, 에칭)을 실시하였다. 에칭은 두단계로 나누어서 시행하였는데, 먼저 용가재를 관찰하기 위하여 25ml NH₄OH + 25ml 증류수 + 50ml H₂O₂의 에칭액을 제조하여 1차 에칭을 하고, 탄소강인 샹크를 5% nital 용액으로 2차 에칭을 하였다. 이러한 전처리 과정을 거쳐서 고배율의 접합부의 미세조직과 접합부내 결함을 관찰하였다. SEM과 EDS, XRD를 이용하여 접합부와 접합부 주위에서의 반응층의 형성 및 샹크와 팁에서 상의 거동과 성분 분포를 조사하였다. 또한 굽힘강도 시험후 파단면을 조사하였다.

2.5 젖음성 시험

브레이징에서 가장 중요한 과정으로 용가재가 용융 시 모재와의 젖음성이 접합부의 강도 등에 가장 큰 영향을 미치기 때문에,^{5,6)} 사용할 용가재와 모재와의 젖음성 특성이 온도, 시간, 재료의 표면조건 등의 변화에 따라 어떻게 변하는지를 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서의 젖음성 시험은 엄밀히 말하면 용융 용가재의 퍼짐성(spreadibility)을 측정하였는데, 샹크와 팁 위에 초기단면적이 측정된 용가재를 미리 위치시켜놓고 시간과 표면조건은 동일하게 유지시키고 온도만을 변화하여 실험하였다. 젖음성 시험을 위한 로(furnace)는 최대 10⁻³ torr의 진공로를 사용하였으며, 실험조건은 시간을 10분으로 고정시키고, 온도를

650, 675, 700, 725, 750, 775, 800℃로 변화시키면서 열처리를 실시하였다. 이러한 방법으로 젖음성 시험을 시행한 후의 면적을 다시 측정하여 열처리 전과 후의 면적 변화율을 측정하여 온도별로 그래프로 나타내었다. 젖음성 실험에서 다음과 같은 식을 사용하여 면적 변화율을 측정하였다.

$$\text{면적 변화율} = \frac{A_f - A_0}{A_0}$$

A₀ : 초기 면적

A_f : 젖음성 시험 후 나중 면적

3. 실험결과 및 고찰

3.1 거시조직관찰

Fig 4는 브레이징 접합부 단면의 거시조직을 나타내고 있으며, 낮은 접합온도, 적정 접합온도, 과도한 접합온도에 따라 나타나는 접합부 형상을 나누어서 분류하였다.

그림에서와 같이 낮은 접합온도(Fig 4(a))에서는 용가재가 부분적으로 용융되지 않은 것을 볼 수 있으며, 적정 접합온도(Fig 4(b))에서는 용가재가 완전히 용융하고 밖으로 이동하여 샹크와 팁의 표면을 따라 충분한 용가재가 응고 후 형성된 것을 볼 수 있다. 그러나 과도한 접합온도가 가해진 경우(Fig 4(c))는 접합부 중심의 용가재가 외부로 심하게 유출되면서 접합부에 적은 양의 용가재만이 잔류하는 것을 볼 수 있다. 따라서 용융금속의 유동성과 이탈반응을 제어할 수 있는 공정조건을 설정하는 것이 중요하다. 거시적으로 나타나는 접합부 형상의 관점에서 볼 때 브레이징 조건에서 적정 접합온도는 약 700-850℃의 범위를 나타내었다. 과도한 접합온도의 조직사진에서 팁을 보면 용가재들이 팁의 표면을 따라 위치하면서 응고된 것을 볼 수 있는데, 이는 팁은 샹크와 달리 분말야금에 의한 소결체이므로, 표면에 많은 미세기공이 존재하는데 기인한다. 연구에 따르면,⁷⁾ 소결체는 분말에 의하여 제조되었기 때문에 제조방법에 따라 이론밀도에 근접할 수 있지만, 대부분 그 이하값을 나타내고 이들의 원인으로 표면 및 내부에 미세기공들의 존재를 들 수 있다. 특히 이러한 미세기공들이 터널의 형태로 이어져 있을 경우 이 경로는 용융상태의 금속이 모세관력에 의한 반응이 일어나 침투(penetration)가 용이하게 된다. 이러한 반응은 고온 분위기에서 더 극대화되므로, 용융 용가재는 샹크보다는 팁으로의 반응이 증가하게 되며, 따라서 내부로의 침투반응이 발생할 수 있는 조건을 더 만족시키게 될 것으로 사려된다.

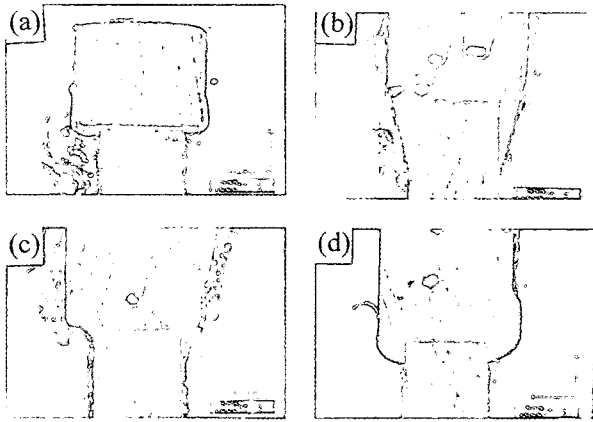


Fig. 4 Photographs of brazed joint shape

3.2 기계적 시험 결과

Fig 5은 브론즈 팁을 각각의 용가재를 사용한 경우의 공정변수에 따른 강도측정결과를 나타내고 있으며, 각각 (a)는 접합온도 변화, (b)는 접합시간 변화에 따른 결과를 나타내고 있다.

전체적으로 접합온도와 접합시간이 증가하면 강도가 급격히 증가한후 서서히 감소하거나 유지되는 경향을 보이고 있다.

본 연구에 사용된 용가재에 따른 기준 강도값

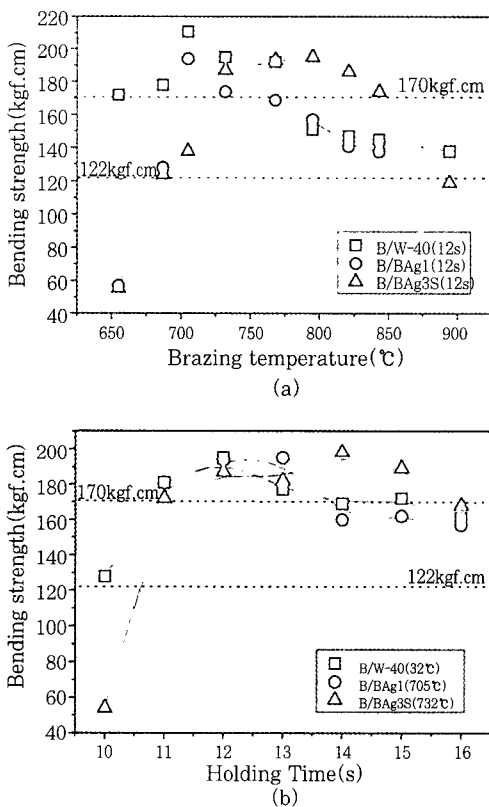


Fig. 5 Relationship between strength and brazing condition on bronze tip

(122kgf.cm 이상) 이상을 나타내는 범위는 접합시간을 12초로 고정시킨 경우 BAg1, W-40, BAg3S 세 개의 용가재들은 각각 약 680~900°C를 나타내는 비슷한 경향을 나타내었지만 고온으로 갈수록 용점이 높은 BAg3S가 높은 강도를 유지함을 볼 수 있다. 그러나 파단형태의 특성상 팁 파단이 형성되는 강도값은 170kgf.cm이며, 이 값의 기준으로 볼 때 BAg1과 W-40은 각각 680~770°C, 700~770°C의 범위에서, BAg3S는 720~850°C의 높은 온도범위에서 강도가 유지됨을 볼 수 있다. Fig 3(a)에서의 적정 접합 온도조건에서 접합시간을 변화한 경우에는 강도변화 양상이 덜 민감하게 나타나고 있으며(Fig 3(b)), 이는 접합온도의 변화보다 접합시간 변화에 대한 민감도가 낮은 것으로 사려된다.

Fig 6은 팁에서 적정강도값을 가지는 조건에서의 파단면들을 SEM으로 관찰한 결과와 EDX 결과를 나타내고 있다. 파단특성은 크게 접합부 파단과 접합부 인접 팁 영역의 파단으로 분류되며, 강도값 약 170kgf.cm 이상에서 접합부 인접 팁 영역(반응영역)에서 파단의 주로 발생하였으며 반응영역에 관하여 향후 자세히 언급하도록 하겠다. 따라서 접합부 인접 영역의 파면을 관찰하면 표면이 매우 손상되어 이탈된 양상을 보이고 있으며, 거시적으로 성분 분석을 해보면 EDX의 결과와 같이 팁과 용가재의 성분들이 복합적으로 나타나고 있었다. 파단면에서 형성된 상들의 대부분은 Cu-rich 상으로 추정되며, XRD 결과를 통하여 Cu_{5.6}Sn과 CuZn₄, β(CuZn) 상들이 나타남을 볼 수 있다(Fig 7). 접합부에 인접한 반응 지역에서의 미세조직은 팁과 용가재의 계면에서의 팁성분들의 부분용해 및 용가재의 침투에 의하여 Cu-rich 상들이

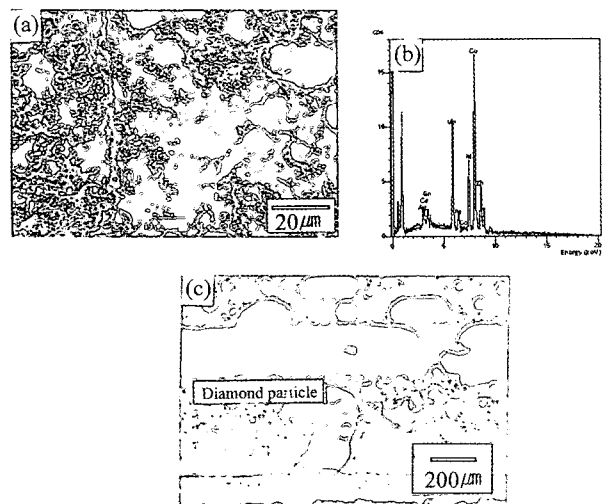


Fig. 6 Fracture surface and EDX result of bronze tip

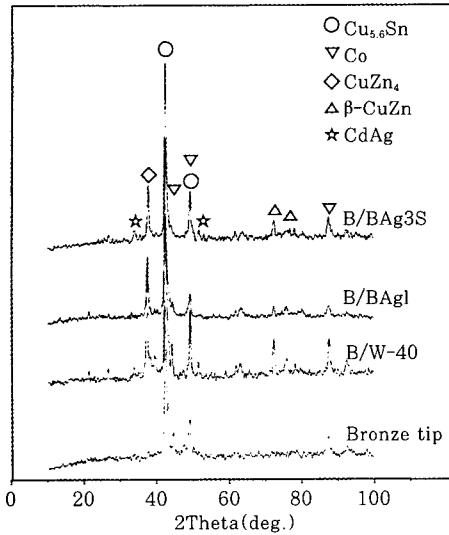


Fig. 7 XRD result from the fractured surface on bronze tip

현저히 나타나는 것을 고려할 때 파단시에 이 상들의 존재를 증명하고 있다.

3.3 접합부의 미세조직 관찰

먼저 브론즈 팁을 W-40으로 브레이징 하였을때 접합부 미세조직과 면분석(elemental mapping) 결과를 Fig 8에서 나타내고 있으며, 접합부와 반응 영역에서는 회색의 Cu-rich 상이 전술한 모재조직보다 더 많이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 용융금속의 침투반응은 금속간 화합물이 형성되지 않거나 제한된 용해도를 가지는 계 등을 가지는 특정한 합금상태와 관련하여 생각되어 왔지만,¹⁰⁾ 이것은 열역학적으로 평형반응을 고려할때를 의미하며, 실제 용융금속의 소결체로의 침투는 매우 빠르게 일어나므로 비평형 반응이라 할 수 있다. 즉 열역학적으로 고려하기 위해서는 장시간의 반응 후의 상변태를 평형 상태도를 이용하여야 할 것이다.⁷⁾ 이 결과에서는 접합부에서 용가재가 차지하는 영역이 좁아지면서 동시에 반응영역이 상대적으로 불규칙하게 형성되는 것을 볼 수 있다. 브론즈 팁의 조합에서 발생하는 반응영역은 이종재료 브레이징중 발생하는 4가지 계면구조의 관점에서 설명하면,⁴⁾ 팁과 용가재의 상들이 혼합된 반응형에 주로 가까운 형태를 나타내고 있다고 할 수 있다. 확산형의 경우 브레이징 온도와 유지시간에 따라 접합계면에서 농도 기울기를 가지면서 접합계면을 형성하기 때문에 본 연구의 공정에서는 불규칙한 반응층의 형성을 볼 때 미소한 기구로 작용할 것으로 사려된다. 또한 반응영역에서의 기공(검은 지역)들이 형성되는 것을 볼 수 있으며, 이것

은 소결팁내에 이미 존재하는 기공의 영향과 용융금속의 반응후 응고시 발생하는 기공이 복합적으로 형성된 것으로 사려된다. 이때 공정특성상 보호가스없이 대기중에서 작업하였기 때문에 기공의 제어는 쉽지 않았다. 전체적으로 탄소강의 상크와 용가재 사이에서의 거시적인 반응 및 상의 이동은 나타나지 않았으며, 단지 용가재에 접해있는 상크의 좁은 영역에 걸쳐서 결정립 미세화를 관찰할 수 있었다. 주로 반응 및 상변화는 용가재와 팁 사이에서 일어나고 있음을 볼 수 있다. 공정변수(접합온도, 접합시간)의 증가에 따라 반응영역이 증가하고 매우 불규칙하게 형성되는데, 브론즈 팁에서 $Cu_{5.6}Sn$ 가 용가재로 용해가 접합부로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 접합부에 접하고 있는 팁 표면에 존재하는 상들이 부분적으로 용융이 발생하면서 접합부로 빠르게 유입된 것으로 생각된다. 그와는 반면 팁에서 공존하고 있는 Co는 접합부로의 유입은 나타나지 않고 매우 밀집된 형태를 나타낸 것을 볼 수 있다. 반응영역과 접합부의 경계는 매우 불규칙적으로 나타나고 있으며, 회색의 Cu-rich 상들이 매우 밀집되어 나타나고 있다. 이는 Cu/Cu와 Cu/Ag의 두 계면에서의 상호용해도를 가지고 단적으로 고려할 때 Cu/Cu의 반응이 당연히 유리하기 때문이다. 접합부와 상크와의 계면에서의 젖음성은 실제 용융상태에서 Ag의 표면에너지는 약 $1.12 J/m^2$ 로 Cu($1.72 J/m^2$)의 경우보다 낮기 때문에^{4, 11)} 젖음성에 유리할 것으로 생각되지만, 실제 Fe/Ag와 Fe/Cu의 계면에너지는 후자의 경우가 작게 나타나기 때문에, 상크와 용가재와의 계면에서 젖음에 의한 접합에 기여도는 Cu가 더 유리할 것으로 사려된다¹⁰⁾. 대부분의 경우 전술한 바와 같이 각각의 용가재에 따른 미세조직은 약간 다르더라도 공통적으로 저용점의 성분들의 이동현상이 두드러지게 나타나고 있으며, BAg3S 용가재로 브레이징한 경우에는 Ni과 Mn을 함유한 용가재이므로 접합부에서 고르게 고용되어 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이 두 원소들은 용가재의 상온강도 뿐 아니라 약 $200^{\circ}C$ 의 온도까지 강도를 유지하는 원소로 알려져 있으며,¹²⁾ 본 연구에서는 두 원소의 강도향상에 대한 정확한 기구는 증명하지 못했지만, 강도를 어느정도 향상시키는 역할을 한 것으로 사려된다. 본 연구에서 브레이징을 할 때 두드러진 특징은 앞서 언급한 바와 같이 반응영역이 형성된다는 것인데, 반응영역을 좀 더 고배율에서 미세조직을 관찰한 결과는 Fig 9에서 나타내고 있으며, 점분석을 통하여 얻은 각 상의 성분의 정량적 분석을 Table 3에서 나타내고 있다. 반응영역은 브레이징 온도 및 시간 범위에서 불규칙적으로

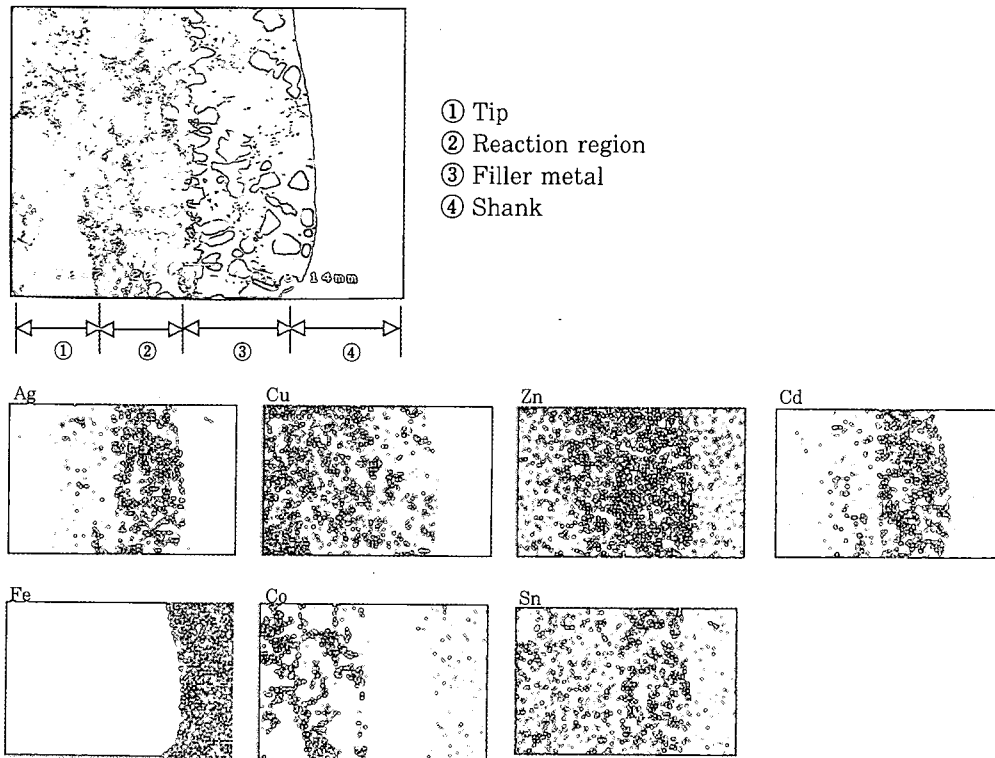


Fig. 8 SEM micrograph and elemental mapping images of brazed joint(Bronze/W-40)

형성되므로 상들의 정량적 예측이 불가능하지만, 이 영역에서 주로 발생하는 상들은 Sn 혹은 Zn이 고용된 Cu-rich 상이 주를 이루고 있고(Fig 9(a) b 영역, (b)(c) b, c 영역), Ag-rich 상들이 적은 영역을 차지함을 볼 수 있다(Fig 9(a),(b),(c) a 영역). 또한 작은 입자의 Co는 텅 모재에서와 달리 반응층에서 심하게 편석되는 것을 볼 수 있으며(Fig 9(a) c 영역, (b),(c) d 영역), 주위에 작은 기공을 발생시키고 접합부로의 유입은 발생하지 않았다. 전술한 바와 같이

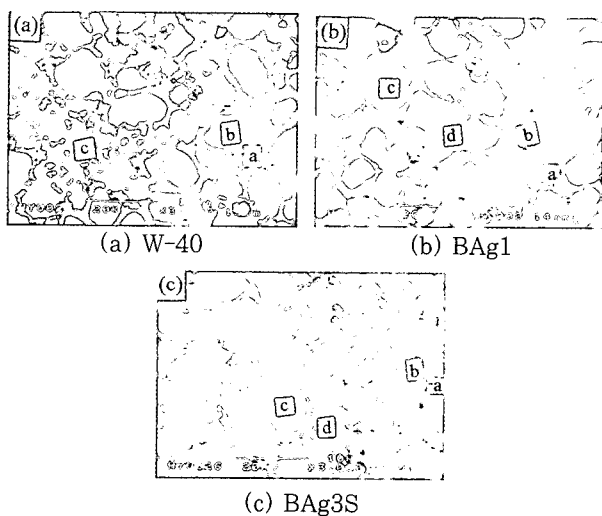


Fig. 9 SEM micrograph of reaction regions in bronze tip

파단면의 XRD결과(Fig 7)를 보면 브론즈 텅 모재에서는 $Cu_{5.6}Sn$ 상이 주로 나타나는 것을 볼 수 있으며, Fig 10의 상태도에서 A로 표시된 조성을 나타내고 있다. 상태도에서 보면 브론즈 텅의 모재상은 대략 750℃의 용점을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 브레이징 실험을 통하여 적정범위가 약 680~900℃(Fig 10, B영역)를 나타내는 것을 고려해볼 때 국부적으로 입열량을 많이 받게 되는 텅의 단면에서 미소적으로 접합부로 용해가 발생되고 이때 접합부에 미리 위치된 용가재가 용융되면서 텅과 반응이 발생한다. 그러나 접합 온도범위에서 짧은 시간(10~16초) 유지된

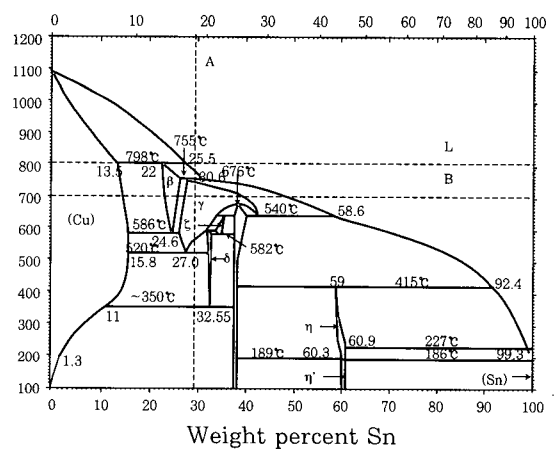


Fig. 10 Cu-Sn alloy phase diagram¹³⁾

Table 3. Chemical composition of all phases in reaction region

Filler metal	Region	Chemical composition(%)							
		Ag	Cu	Cd	Zn	Mn	Ni	Sn	Co
W-40	a	55.1	3.9	35.9	3.0	-	-	2	
	b	1.7	75.0	0.5	14.1	-	-	6.0	2.7
	c		1.4	0.1	0.4	-	-	0.5	97.6
BAg1	a	43.1	20.7	24.7	2.9	-	-	8.1	0.5
	b	1.5	60.1	1.3	6.4	-	-	26.8	4.0
	c	2.6	74.0	0.9	12.7	-	-	7.6	2.2
	d	5.7	26.7	3.4	2.7	-	-	9.7	51.9
BAg3S	a	65.6	5.5	21.7	4.3	0.3		2.3	0.3
	b	19.2	43.7	6.3	11.4	0.5	0.1	18.2	0.6
	c	3.2	61.1	0.2	20.3	2.4	6.1	3.1	3.6
	d	0.4	1.7	0.1	0.1	0.2		0.4	97.3

후 바로 응고하게 되기 때문에 텅 영역에서의 반응은 상호용해에 의한 반응층으로 사려된다. 이는 브레이징 후 접합부 파단면에서의 XRD 결과에서 나타나는 상들이 모재에서 상을 크게 벗어나지 않음을 볼 수 있기 때문이다. 또한 Co의 경우 이원계 상태도를 고려해볼 때¹³⁾ Sn, Zn과 고용체 및 다양한 금속간 화합물을 형성할 수 있음에도 불구하고, XRD 결과와 반응영역에서의 EDS 결과에서 새로운 화합물이 형성되지 않았다. XRD 결과를 통하여(Fig 7) 브레이징후 침투영역과 침투영역에 인접한 접합부에서 주로 차지하는 상들은 텅의 모재상인 $Cu_{5.6}Sn$ 과, $CuZn$ 상들($CuZn$, β - $CuZn$)이며, $CdAg$ 상도 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig 8의 미세조직에서도 보면 각각의 상들이 혼합되어 매우 복잡하게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 접합층과 텅과의 계면에서 매우 불규칙적인 반응영역을 발생시키게 된다. 이것은 용융상태의 용가재가 텅으로 젖어들어가는 현상으로 인하여 과도하게 외부로 유출되는 현상을 어느정도 제어하면서 접합부에서의 반응을 발생시키게 되어 치밀한 접합부를 형성할 수 있는 원인으로 나타날 수 있지만, 본 연구에서는 기공의 형성과 매우 취약한 층을 형성시키면서 강도저하의 영역으로 형성된 것으로 생각된다.

3.4 강도에 영향을 주는 원인에 대한 고찰

본 연구에서 강도에 영향을 주는 원인에 대하여 고찰하면, 크게 접합부의 형상적인 측면과 야금학적 현상에 관한 측면 두가지로 나누어 설명할 수 있다. 형상적인 측면은 전술한 바와 같이 접합부가 적절한 용가재가 차지하여 Fig 4(b)에서처럼 건전한 접합부 형상을

나타낼 때 적절한 강도값을 나타내지만, 접합부의 용가재가 심하게 유출될 경우(Fig 4(c)) 상대적으로 낮은 강도값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

야금학적인 면을 고려하면, 첫째로 젖음성을 들 수 있으며 접합이 이루어지는 초기에 상당한 중요한 변수로 작용하게 된다. Fig 11(a)는 온도와 젖음성과의 관계를 그래프로 나타내었다. 전체적으로 온도증가에 따라 젖음면적이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 결과를 통하여 온도증가를 통하여 용융금속의 젖음성을 향상시키고 있음을 단적으로 나타내고 있다. 브론즈 텅에서 온도별 용가재의 젖음 특성을 보면 650℃에서 3개의 용가재 모두 거의 용융되지 않았는데, 이는 텅의 높은 열전도도와 연관이 있으며 (Bronze: 약 $120 Wm^{-1}K^{-1}$)²⁰), 분위기 온도가 용융점 이상이라 하더라도 텅과 용가재의 계면에서의 반응온도가 더 낮은 것으로 사려된다. BAg1(620℃), W-40(630℃)의 두 용가재는 675℃에서 어느정도 용융이 일어나기 시작하였으며, BAg3S는 700℃에서 용융에 의한 퍼짐이 시작하고 있다. 이러한 온도변화에 따른 용융금속의 젖음성 특징은 전체적으로 젖음면적 변화율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 텅에서의 실험에서는 BAg1>W-40>BAg3S의 순으로 젖음성이 좋게 나타나고 있다. 이러한 용융 용가재의 젖음 특성에서 고상선과 액상선의 차이 또한 영향을 주고 있는데, BAg1은 15℃(605-620℃)의 차이를 가지는 반면, W-40(595-630℃)는 35℃의 차이를, BAg3S(610-660℃)는 50℃의 차이를 나타내고 있으며 이런 차이는 용융후 응고시 고상선과 액상선 사이에서 고상과 액상의 공존하는 영역을 통과할때 액상의 유동을 고상이 억제하는 역할을 하게 된다. 따라서 이

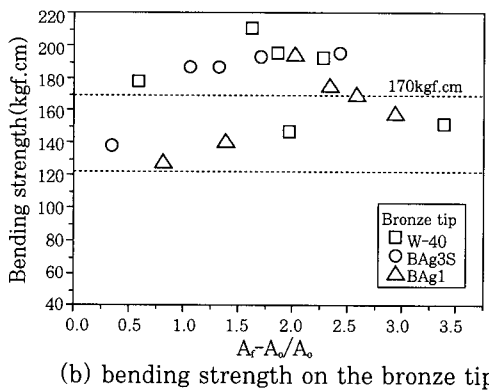
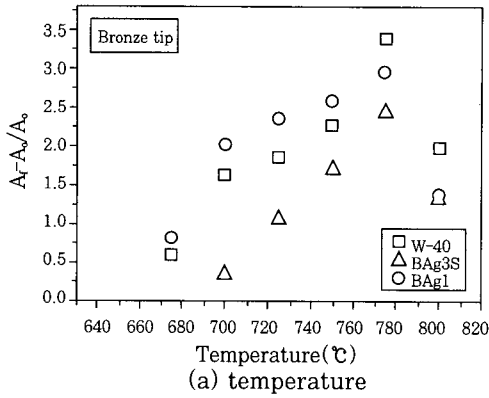


Fig.11 Relationship between wettability result

범위가 넓을수록 유동성이 저하되므로, 이러한 조성의 용가재는 급한 가열 및 급냉에 의한 공정으로 이것을 개선시킬 수 있다.²⁻⁴⁾ Fig 11(b)은 젖음면적 변화율과 굽힘강도 변화의 관계를 나타내고 있다. Fig 11(b)에서 W-40은 약 0.5~2.3, BAg1은 2.1~2.5, BAg3S는 1.1~2.4의 젖음면적 변화율 범위에서 170kgf.cm 이상 유지됨을 볼 수 있다. 젖음성 시험 결과에서 BAg1의 적정 강도 유지를 위한 면적 변화율 범위가 가장 적게 나타남을 볼 수 있다.

둘째로 접합부의 기공율과 접합두께의 변화를 고려할 수 있으며 공정변수에 따른 기공율, 접합두께의 변화 그리고 접합강도와와의 상관관계를 Fig 12와 13에서 나타내고 있다. 접합부에서 기공의 형성은 입열시 너무 과다하게 되면 가스의 용해도가 증가하고 빠른 냉각으로 인하여 미처 빠져나가지 못하여 형성하게 된다. 본 연구에서의 기공측정 결과와 공정변수와의 관계를 설명하면, 전술한 바와 같이 공정특성상 보호가스없이 대기중에서 작업을 하였기 때문에 기공의 제어는 쉽지않았다. 그러나 실험결과에서 측정된 기공율은 접합온도에 따라서 계속 증가하는 경향을 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 브레이징 접합부의 강도는 완전한 용융이 이루어지는 초기에 우수한 강도를 나타내고

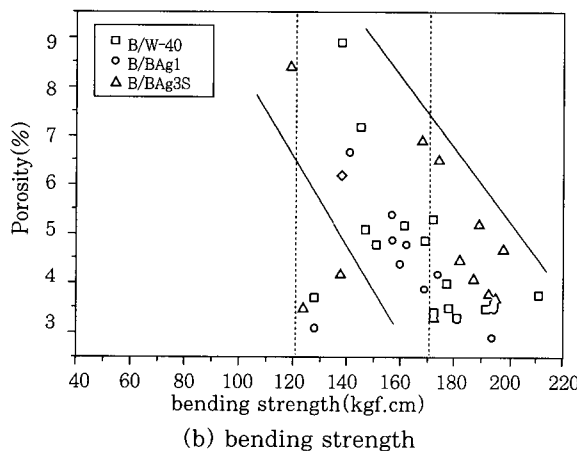
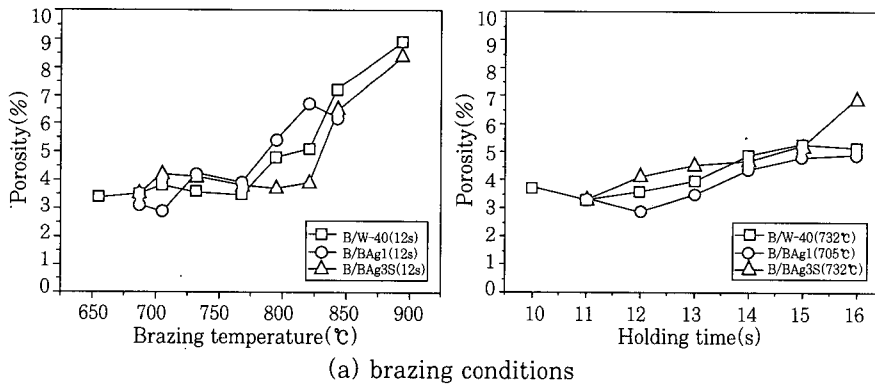


Fig.12 Relationship between porosity

이 조건까지는 기공율은 약 4% 전후에서 유지되다가, 브레이징 온도가 더욱 증가하면 기공율은 6% 이상으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 접합시간을 증가하는 경우에는 기공율의 감소정도와 강도의 변화는 덜 민감하게 나타나고 있다. 각각의 용가재에 따른 기공분율을 고려하면, W-40과 BAg1이 BAg3S에 비하여 좀 더 기공분율의 변화가 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 각각의 용융온도로 간접적으로 고려할 수 있는데, 비록 브레이징 온도의 변화에 따라 BAg3S(용융온도: 660℃)가 W-40(630℃)과 BAg1(620℃)에 비해 약간 높은 브레이징 온도에서 적정 브레이징 조건이 설정되었으며, 따라서 높은 브레이징 온도로 변할수록 기공율의 증가도 상대적으로 적게 나타났는데, 이는 고온에서의 액상의 존재하는 시간이 커서 가스의 용해도가 증가하기 때문으로 사려된다. 브론즈 텃을 브레이징한 경우 접합부 중심에서의 기공은 미세조직 관찰에서 침투에 의한 반응층이 형성되며, 이 영역에 미세기공을 발생시키게 된다. 낮은 공정변수에 의한 저입열 조건에서 나타나는 기공은 용가재의 불완전 용융으로 인한 유동성 저하로 발생하는 것과 미처 모재표면에 젖지 못한 미접합된 부분으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 연구에 따르면 브레이징 중에 용가재가 용융하여 응고될때 액상선과 고상선사

이를 통과하면서(이 영역을 mushy state라 한다.) 기공 발생이 유리하며, 특히 세라믹-용가재 계면과 접합부 중심에서 화학조성 차이가 발생하게 되면 기공이 쉽게 발생된다고 보고되고 있다.⁸⁾

접합부 두께는 브레이징 온도와 유지시간의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내었으며(Fig 13(a), (b)), 브레이징 온도에 더욱 민감한 변화를 나타내었다. Fig 13(c)은 접합강도와 접합두께와의 상관관계를 보여주고 있다. 본 연구의 텃과단이 일어나는 강도 값(170kgf.cm) 이상을 나타내는 접합두께 범위는 용가재에 따라 약간 차이는 나타내고 있으나, 대략적으로 30~75μm를 나타내고 있다.

세번째로 텃 내부에 존재하는 약 100μm 크기의 diamond 입자, 특히 접합표면에 존재하는 이 입자들을 고려할 수 있는데(Fig 6(c)), 텃의 단면에 존재하는 다이아몬드 입자는 전혀 용가재에 의한 접합이 일어나지 않은 것을 볼 수 있다. 즉 접합표면에 이 입자들이 존재하는 양이 많을수록 강도에는 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 따라서 최근에는 레이저 용접으로 접합된 다이아몬드 커팅 휠에서는 용접성을 향상시키기 위해 텃제조시 이 입자들이 존재하지 않는 층을 만들어서 사용하고 있는 실정이다.¹⁾

네번째로 소결체인 텃자체의 특성을 고려할 수 있다.

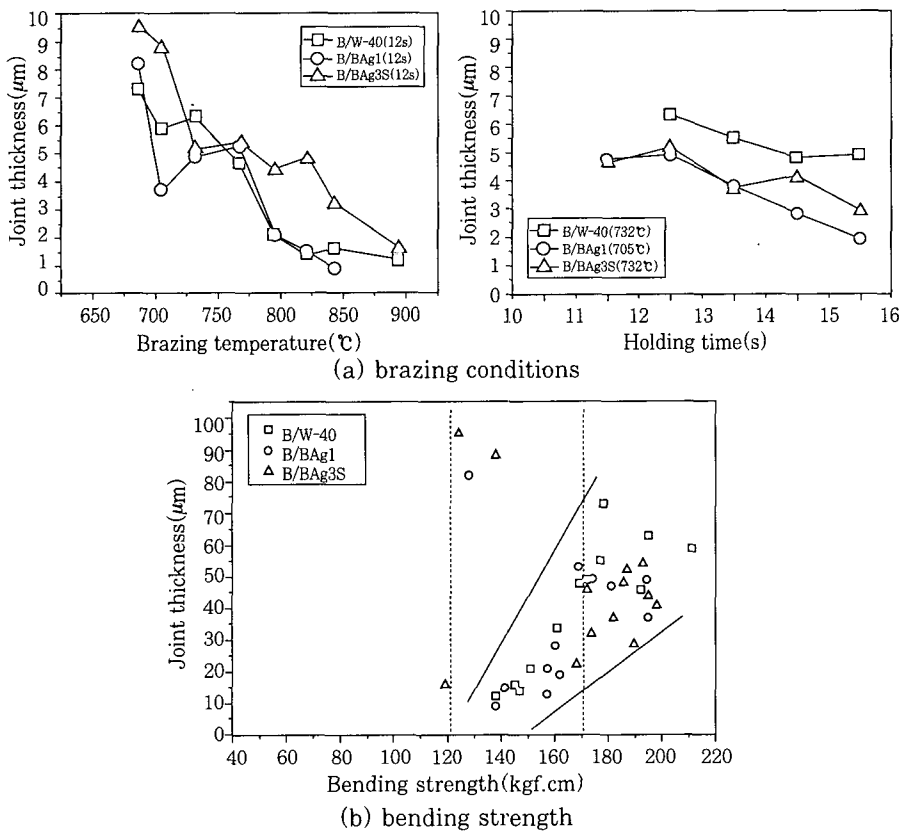


Fig. 13 Relationship between joint thickness

전술한 바와 같이 소결체 특성상 표면에 존재하는 미세기공은 모세관 반응이 일어나는 영역이 된다. 브레이징 공정에서 표면의 불순물이나 산화막을 제거하는 처리를 하고 또한 플럭스 첨가로 활성표면의 상태로 유지한다 하더라도, 기공내부의 표면까지 청결상태를 유지한다는 것은 쉽지 않다. 따라서 용융금속이 모세관 반응으로 소결체의 미세기공으로 침투하게 되면 이 용융금속은 기공표면에는 거의 젖지 못한 채 독립된 상태로 존재하여 접합이 이루어지지 않게 된다.⁷⁾ 따라서 이러한 현상 또한 접합부에서 강도를 저하시키는 야금학적 요인중 하나로 작용한 것으로 사려된다. 마지막으로 접합부의 설계측면에서 열팽창 계수의 차이를 들 수 있다. 비록 이종재료의 열팽창 계수의 차이로 인한 응력 발생을 완충시켜주기 위해 연성을 가진 용가재 (Ag합금의 경우 $2.0 \times 10^{-6} K^{-1}$)를 사용한다 하더라도 잔류응력은 존재하기 때문에 접합강도에 좋지 않은 영향을 끼치는 것으로 생각된다(Bronze: 약 $1.8 \times 10^{-6} K^{-1}$, Steel: 약 $1.3 \sim 1.4 \times 10^{-6} K^{-1}$).^{2-4, 9)}

4. 결 론

이상과 같이 다이아몬드 커팅 휠에 사용되는 이종재료(브론즈 소결체/steel)의 Ag-Cu계 용가재에 의한 브레이징 접합부 특성 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 젖음성 시험에서 온도의 증가는 용융용가재의 퍼짐면적은 0.5-3% 정도 증가하는 경향을 보였으며, 브론즈 팁은 약 800℃에서 용가재와의 계면에서 심한 침식에 의하여 1-2%정도 젖음면적이 감소하였다.
- (2) 접합부의 거시조직을 통하여 건전성 여부를 판단가능 하였으며, 적정조건에서 충분한 용가재가 상크를 따라 넓은 영역을 차지하는 조건이 우수한 접합강도를 나타내었다.
- (3) 굽힘(토크)시험을 통하여 적정강도값 122kgf.cm 이상을 얻는 조건은 약 680~900℃의 온도범위를 나타내었지만 170kgf.cm(팁파단 기준강도)이상의 적정강도를 얻기 위한 조건으로 700~850℃의 범위를 나타내고 있으며, BAg1<W-40(BAg3S의 순서로 강도 유지에 유리하게 나타났다.
- (4) 170kgf.cm 이상에서 접합부 인접 브론즈 팁의 반응층에서 파단이 발생하였으며, 파단부의 XRD 결과를 통하여 팁의 모재상인 Cu₅.6Sn과 Co, CuZn₄, β (CuZn), CdAg 상이 검출되었으며, 이러한 상들은 반응층에서 낮은 강도 특성을 가지면서 혼합된 형태로 나타내고 있었다.

(5) 강도에 영향을 주는 요인으로 기공율, 접합부 두께 등을 들 수 있다. 접합부에 발생하는 기공은 약 8% 미만의 범위에서 접합부 두께는 10~75μm에서 기준강도값(122kgf.cm) 이상을 나타내었으며, 170kgf.cm 이상의 범위는 3~5%의 기공율과 30~75μm의 접합부 두께를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. V.V Borisova, S.M. Kutev and S.F. Moryashev, "Laser welding diamond bearing segments to steel holders" Paton Welding Journal 1993 5(1) 56-58
2. Welding Handbook, Vol.2, 8th Ed. Welding process : AWS, 1991
3. Metals Handbook, Vol.6, 9th Ed. Metals Park, Ohio : ASM, 1983
4. "철강기술 VII : 용접부문", 산업과학기술연구소, 1992, 417~429
5. D. L. Keller, M. M. Mcdonald, C. R. Heiple, W. L. Johns and W. E. Hofmann, "Wettability of brazing filler metals" Welding journal 1990(11) 31~34
6. Santella, "Fundamental metallurgical considerations in brazing and soldering", The metal Science of Joining, TMS, 1992
7. 안중호, "모세관 상승에 의한 다양한 금속계의 용침연구", 제2회 분말야금 심포지엄, 1990
8. Ali Mohammad Hadian and Robin A. L. Drew, "Strength and Microstructure of Silicon Nitride Ceramics Brazed with Nickel-Chromium-Silicon Alloys" J. Am. Ceramic Soc. 79(5) 659~665, 1996
9. E. A. Brandes, G.B. Brook, "Smithells Metals Reference Book" 7th edit
10. R. M. German, Horizon of Powder Metall. II, Proceedings of P/M '86, Verlagschmid (1986)
11. R. A. Swalin "Thermodynamics of solids" 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1991
12. A. Severin, "Brazing of carbon steel", Advanced materials & processes, 12/97
13. ASM Handbook Vol.3 Alloy Phase Diagrams