

**研究論文**

## 동 텅스텐 소결합금(Cu-W)과 동(Cu)의 마찰용접에서 마찰압력이 접합강도와 파단특성에 미치는 영향

강 성 보\* · 민 택 기\*\*

### Effects of Friction Pressure on Bonding Strength and a Characteristic of Fracture in Friction Welding of Cu to Cu-W Sintered Alloy

S. B. Kang\* and T. K. Min\*\*

**Key Words** : plastic zone (소성유동영역), friction pressure (마찰압력), friction time (마찰시간), upset speed (업셋속도), quasi-steady state (준정상상태), upset length (업셋길이)

#### Abstract

A copper-tungsten sintered alloy (Cu-W) has been friction welded to a tough pitch copper in order to investigate the effect of friction pressure on bonding strength and a characteristic of fracture. The tensile strength of the friction welded joint was increased up to 90% of the Cu base metal under the condition of friction time 1.2 sec, friction pressure 4.5kgf/mm<sup>2</sup> and upset pressure 10kgf/mm<sup>2</sup>. From the results of fracture surface analysis, the increase of friction pressure could remarkably decrease the force and the time to be normally acted on weld interface. The W particles which were included in the plastic zone of Cu side could induce fracture adjacent to the weld interface because their existance in Cu induces a decrease in available section area and an increase in notch effect. Therefore, the tensile strength was decreased at high friction pressure (6kgf/mm<sup>2</sup>) because the destruction of W was increased by an increase in mechanical force and crack was formed at weld interface.

\* 1996년 12월 20일 접수

\* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 충남대학교 기계공학과

## 1. 서 론

마찰용접법은 회전하거나 움직이는 공작물끼리의 가압접촉에 의해 생기는 마찰열에 의해 금속을 접합하는 방법이다. 국부적인 마찰열에 의해 접합부에서만 열이 발생하기 때문에 열영향부(HAZ)가 좁고, 소성유동(plastic flow)에 의한 금속원소의 확산과 이동으로 특히 이종금속(dissimilar material)의 접합에 효과적이다<sup>1)</sup>. 이종금속의 접합은 물리적 또는 기계적 성질에 있어서 변화가 필요한 공학분야에서 종종 필요하며, 두 재료 간에 강도와 조직화적인 측면에서 신뢰성 있는 접합이 요구된다.

전기 접점(electric contact)으로 사용되고 있는 동-텅스텐 소결 합금(Copper-Tungsten sintered alloy, 이하 Cu-W로 약칭)은 우수한 전기 전도성과 내아크성, 내용착성을 가지고 있으나 고가이기 때문에 전기접촉부의 부품으로 사용될 때 Cu에 납땜 혹은 브레이징(brazing)으로 접합을 하고 있다. 그러나 브레이징에 의한 방법은 접합의 특성상 재료의 물리적, 화학적 성질이 크게 변하기 쉽고 접합부의 성능 개선이 요구된다.

그러나 Cu-W와 Cu의 접합에 관련된 기존의 문헌들<sup>2-4)</sup>을 비롯해 이종금속의 접합에 관한 많은 자료들 중에서도 마찰압력을 주요 변수로 사용했을 때의 접합부 특성에 관한 연구는 적은 편이다.

본 연구에서는 Cu-W와 Cu의 마찰용접에 있어서 마찰압력이 변화할 때의 접합부 인장강도와 파단면 특성 그리고 SEM으로 접합면을 관찰하여 이들의 관계를 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 Cu-W와 Cu이며, Cu-W는 입자직경 약 3 $\mu$ m의 W입자를 70wt% 함유한 것으로 W의 분말을 다공질재료 성형 소결하여 그것에 Cu를 용융 침투시킨 것이며, Cu는 정련동(Electric Tough-Pitch Copper : ETPC)이다. 두 재료 모두 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉형태였다.

M. Futamata 등<sup>5)</sup>에 의하면 사용되는 두 재료 중 경한 재료(Cu-W)는 축방향의 변형이 거의 일어나지 않아 산화막 또는 오염물질 등이 그대로 잔류할 수 있고 동일조건에서도 접합의 강도를 크게 떨어뜨리는 요인이 된다고 하였다. 또한 R. A. Bell 등<sup>6)</sup>에 의하면 Cu의 표면에 산화막이 있거나 오일이 묻어있으면 역시 접합의 강도를 떨어뜨리는 요인이 된다고 하였다.

그러므로 마찰용접 직전 두 재료의 양 끝을 선반으로 가공하였다. Cu-W 및 Cu의 기계적 성질 및 화학조성을 각각 Table 1과 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of materials

Materials	Chemical composition (wt. %)				
	W		Cu		
Cu-W	70		30		
	Pb	Fe	S	O	Cu
Cu	0.0002	0.0006	0.0005	0.037	Bal.

Table 2. Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties	
	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Vickers hardness (Hv)
Cu-W	44.9	225
Cu	30.5	106

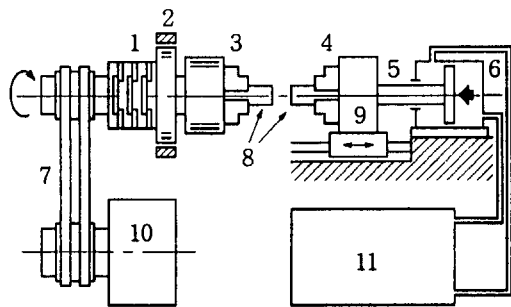
### 2.2 실험기기

본 연구에서 사용한 마찰용접기는 브레이크 타입(brake type)의 마찰용접기(남선기공 Model : NSF-30H)이다. 이것은 실험재료를 고정할 수 있는 고정축과 회전축(주축모터 용량 15kw), 회전을 급정지시킬 수 있는 습식 다관식 전자 브레이크(제동시간 0.2 sec), 압력을 가하기 위한 유압장치(최대추력 10 ton)와 플래시 제거 장치 등으로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 마찰용접기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

마찰용접부의 인장시험은 표준 규격 KS B 0801

14A호에 준하는 Fig. 2와 같은 시험편을 제작하여 만능 재료 시험기 (universal test machine : DAEYEONG model DYHU-50-AD)로 시험하였으며 최대용량은 50톤이다.

Cu-W와 Cu의 마찰용접부에 대한 현미경조직을 SEM (Scanning Electron Microscope : Jap. Akashi Co. model ISI-DS 130) 관찰하였다. 현미경조직을 관찰하기 위하여 부식액은 Cu-W와 Cu 모두 질산 10ml에 증류수 10ml를 혼합한 용액을 사용하여 약 10초 동안 부식하였다<sup>7)</sup>.



- 1. clutch    2. brake    3. rotation chuck
- 4. fixed chuck    5. piston
- 6. hydraulic cylinder    7. drive belt
- 8. specimen    9. reciprocal table
- 10. electric motor    11. hydraulic system

Fig 1. Schematic diagram of conventional brake type friction welding machine

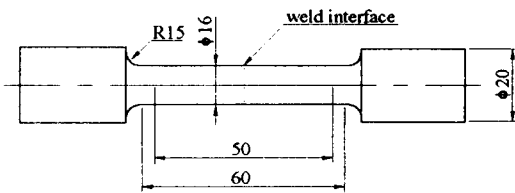


Fig 2. Specimen for tensile test of friction-welded interface

### 2.3 실험방법

본 연구에서 사용한 마찰용접기는 브레이크 타입으로서, 마찰과정과 업셋과정을 시간으로 각각

control할 수 있는 시간규제법으로 실험을 하였고, 예비실험과 참고문헌을 통하여 적절한 압력과 시간 범위를 설정하여 회전축에 Cu-W, 고정축에 Cu를 각각 고정하고 마찰용접하였다.

본 실험에서 선정된 마찰압력은 각각 3, 4.5, 6kgf/mm<sup>2</sup>이었다. 마찰압력 3kgf/mm<sup>2</sup>은 사용할 수 있는 최저 마찰압력이고, 6kgf/mm<sup>2</sup>은 Cu측의 업셋률과 굽힘 그리고 마찰토크의 견지에서 사용할 수 있는 개략적인 최대치이다. 그 이상의 마찰압력에서는 과도한 마찰토크로 인해 시험편을 고정하는 것이 불가능하였다. 이러한 조건에 사용한 업셋압력 P<sub>2</sub>의 설정은 마찰용접기에서 사용할 수 있는 최소 업셋압력 3kgf/mm<sup>2</sup>와 적정 최대 업셋압력 10kgf/mm<sup>2</sup> 두 가지로 설정하였으며, 이러한 용접조건들을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Friction welding conditions

Spindle revolution N (rpm)	1000
Friction pressure P <sub>1</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )	3, 4.5, 6
Friction time T <sub>1</sub> (sec)	0.4~2.4
Upset pressure P <sub>2</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )	3, 10
Upset time T <sub>2</sub> (sec)	10

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 마찰압력과 접합부 인장강도와의 관계

마찰면의 온도는 일정한 마찰압력하에서 시간이 경과함에 따라 급속하게 상승하며, 일정한 온도에 달한 재료는 소성변형 (plastic deformation) 되기 시작한다. I. F. Squires와 B. Met<sup>8)</sup>은 소성변형으로 인해 재료는 축방향의 업셋 (upset)을 시작하며, 업셋에 의한 플래시 (flash)의 배출은 비교적 차가운 모재의 금속을 노출시켜 접합부의 온도를 떨어뜨리고 열영향부의 확장을 감소시키는 주요인이 된다고 하였다.

그러므로 소성변형 온도를 결정하는 요인은 마찰압력 혹은 그로 인한 업셋속도 (upset speed)라고 할 수 있다. 마찰면 온도의 저하는 소성변형에 대한 저항을 증가시키므로 고상용접 (solid state

welding)에서 기계적인 힘에 의한 접합 성능을 증대시킬 것으로 생각된다.

Fig. 3은 마찰압력이 각각 3, 4.5, 6kgf/mm<sup>2</sup>일 때 마찰시간과 인장강도의 관계를 나타낸 것으로, 이 때의 업셋압력은 10kgf/mm<sup>2</sup>이다. 이 그림에서 보면 각 마찰압력 하에서 인장강도는 마찰시간의 증가와 더불어 증가하다 극대값을 나타낸 이후 감소하는 경향을 보인다. 또한 최고 인장강도가 얻어지는 마찰시간은 마찰압력이 증가할수록 감소하고 있다. 이러한 원인은 마찰압력이 높을수록 급격한 물리적, 열적 상태변화를 겪으므로 마찰면의 온도, 마찰토크(friction torque), 업셋속도 등이 거의 일정해지는 준정상상태(quasi - steady state)<sup>9)</sup>에 도달하는 시간이 빠르기 때문일 것이다.

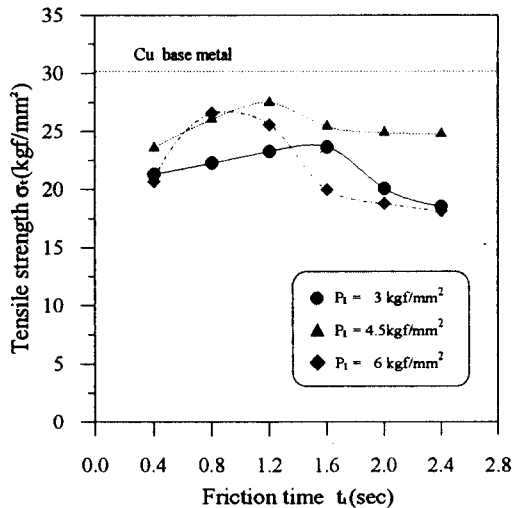


Fig. 3. Relationship between friction pressure and tensile strength at high upset pressure ( $P_2 = 10\text{kgf/mm}^2$ )

마찰압력이 4.5kgf/mm<sup>2</sup>일 때에는 인장강도가 23.3~27.3kgf/mm<sup>2</sup>으로서 선정된 조건중에서 가장 높은 편이었다. 그러나 마찰압력을 6kgf/mm<sup>2</sup>으로 설정한 경우에는 인장강도가 오히려 감소하고 있다. 업셋압력의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 업셋압력이 3kgf/mm<sup>2</sup>인 경우에도 마찰압력이 4.5kgf/mm<sup>2</sup>일 때 인장강도가 15.3kgf/mm<sup>2</sup>으로 가장 높았고, 6kgf/mm<sup>2</sup>의 마찰압력에서는 역시

강도가 저하되고 있다.

또한 마찰압력 6kgf/mm<sup>2</sup>, 업셋압력 10kgf/mm<sup>2</sup>의 조건에서 마찰시간이 0.8초인 경우는 다른 마찰압력을 사용한 경우보다 높은 강도를 나타내었는데, 수 차례의 시험을 통하여 마찰압력이 높은 경우 ( $P_1 = 6\text{kgf/mm}^2$ )와 마찰시간이 짧은 경우 ( $t_f = 0.8$ 초 이하)일수록 인장강도의 편차가 커지는 경향이 나타났다.

이와 같은 원인은 높은 마찰압력에서의 소성변형 증대에 의한 결합력의 강화와 마찰과정의 초기에 고정층에 물린 Cu가 높은 마찰 토크와 진동 등의 영향을 받아 업셋길이가 불균일해져 용접 재현성이 감소된 것의 복합적인 관계라고 생각된다.

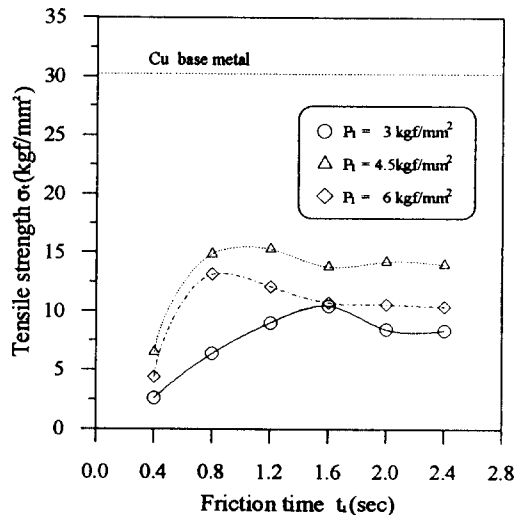


Fig. 4. Relationship between friction pressure and tensile strength at low upset pressure ( $P_2 = 3\text{kgf/mm}^2$ )

### 3.2 업셋길이와 인장강도와와의 관계

Cu-W와 Cu 사이에 마찰용접을 실시한 결과 Photo 1과 같이 Cu-W측은 소성변형의 흔적을 육안으로 관찰할 수 없었고, Cu측은 소성변형으로 인하여 상당한 양의 플래시가 생성되었다.

Fig. 5는 마찰압력을 3, 4.5, 6kgf/mm<sup>2</sup>으로 각각 변화시키면서 마찰시간과 업셋길이 u와의 관계를 나타낸 것으로 이 때의 업셋압력은 10kgf/mm<sup>2</sup>이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 마찰압력이

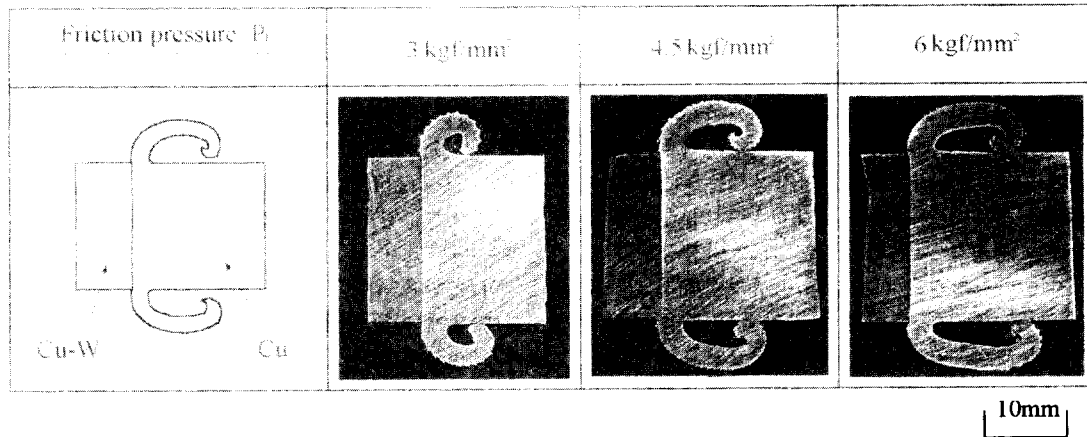


Photo 1. Effect of friction pressure on macrostructure of joint ( $t_f=1.2\text{sec}$ )

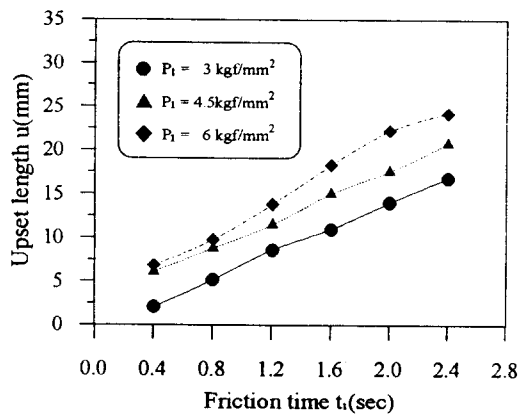


Fig 5. Relationship between friction pressure and upset length ( $P_2 = 10\text{kgf/mm}^2$ )

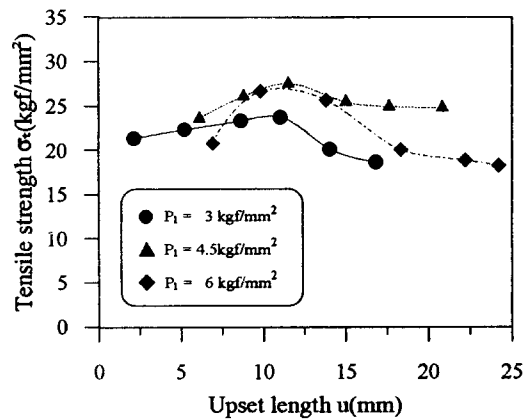


Fig 6. Relationship between tensile strength and upset length ( $P_2 = 10\text{kgf/mm}^2$ )

높을수록, 마찰시간이 길어질수록 업셋길이가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 인장강도와 업셋길이와의 관계를 나타낸 것이다. 마찰압력은 무관하게 업셋길이가 약 11mm일 때 인장강도가 가장 높았다. 이러한 경향은 업셋압력  $3\text{kgf/mm}^2$ 의 경우(업셋길이 5mm에서 각 마찰압력별로 최고의 인장강도를 나타냄)에도 마찬가지로 나타났다.

업셋과정에서 발생하는 업셋길이  $u_1$ 가 각각의 마찰압력에서 일정하다고 가정하면, 최고의 인장강도에 도달하는 데 필요한 마찰과정에서의 업셋

길이  $u_1$ 이 일정하다는 것을 의미한다. 따라서 최적의 마찰압력을 선정할 다음 마찰과정에서의 업셋길이를 조절하여 접합하는 것이 용접제품의 치수 정밀도 등을 고려할 때 효율적인 방법이라고 생각된다.

### 3.3 인장파단면의 분석

Photo 2는 마찰시간을 2.0초, 마찰압력을 각각 3, 4.5,  $6\text{kgf/mm}^2$ 으로 설정하고 마찰용접한 경우의 Cu-W측 인장 파단면의 형상을 나타낸 것이다.

파단면을 관찰해 보면 Cu-W측으로 떨어져 나온 Cu가 여러가지 형태로 존재하여 파단면이 변화하는 것을 볼 수 있으며, 그 형태를 대략 다음과 같은 3가지 종류로 구별하였다.

- A : 파단면의 중심부에서 나타나는 딴플(dimple)형의 연성파단
- B : 마찰압력 3kgf/mm<sup>2</sup>과 4.5kgf/mm<sup>2</sup>인 경우에 딴플 주변으로부터 원주부근에 걸쳐 존재하는 편평한 얇은 Cu층
- C : 마찰압력이 6kgf/mm<sup>2</sup>인 경우 파단면의 대부분을 차지하고 있는 얇은 Cu의 층

Cu 모재에서 떨어져 나온 딴플이나 얇은 층이 파단면 상에 존재하는 것은 높은 압력과 재료 중심부의 높은 압력에 의해 입자간의 혼합에 의한 강한 결합력을 나타내기 때문이라고 생각된다. 또한 마찰압력의 증가에 따라서 파단면에서 딴플의 면적분률이 점점 감소되는 것을 알 수 있다.

마찰압력이 3kgf/mm<sup>2</sup>인 경우에는 딴플의 두께가 얇고 층상에 가까우며, 딴플의 면적분률이 크게 나타나고 있다. 인장강도가 가장 높은 마찰압력 4.5kgf/mm<sup>2</sup>의 경우, 파단면의 중앙에 비교적 큰 딴플이 형성되어 있으며, 편평한 지역에서는 다른 조건에 비하여 Cu층(층두께 20~65μm)이 고르게 분포되어 있다.

그러나 마찰압력이 6kgf/mm<sup>2</sup>인 조건에서는 얇은 층을 이루었던 Cu의 입자가 희박하게 분포되어 파면 상에서 Cu-W 고유의 색상이 드러나고 있음을 관찰할 수 있다.

T. Rich와 R. Roberts<sup>10)</sup>의 이론적 해석에 의하면 소성유동 영역(plastic zone)내의 어느 한점에서 원주방향에 대한 속도  $v_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_p = \frac{y}{h} v_u \left(1 - \frac{x}{h}\right)$$

여기서  $v_u$ 는 압축속도,  $h$ 는 소성유동 영역의 폭,  $y$ 는 재료의 중심에서 원주방향으로의 거리(단  $y \leq r$ ),  $x$ 는 접합부에서 수직방향으로의 거리(단  $x \leq h$ )이다. 단 소성유동 영역의 폭은 단면에서 일정하고 원주방향에 대한 속도는 접합부로 가면서 선형적으로 증가하며,  $x$ 는  $h$ 일 때 0이라고 가정

한다.

위 식에서 보면 소성유동 영역내에서 원주방향에 대한 속도는 접합면에 가까울수록, 원주방향으로 갈수록 커진다. 또한 마찰압력이 증가함에 따라서  $h$ 가 감소되고,  $v_u$ 는 증가하게 되므로 접합면에 인접한 곳에서의  $v_p$ 는 대단히 크게 증가한다.

그러므로 Cu-W측의 소성유동이 전혀 없다고 가정하면, 마찰과정의 초기( $t_s = 0.8$ 초 이하)에는 마찰압력의 증가에 따라 고압력에 의한 결합력이 일시적으로 증가할 수 있지만 접합부에 인접한 소성유동 영역에서 원주방향의 유동속도가 크게 증가하므로 접합부에 수직으로 작용하는 성분 즉, 결합력이 감소하게 된다. 결합력이 충분하다 할지라도 Cu의 입자들이 원주방향으로 빠르게 이동함에 따라서 결합시간이 감소하므로 미접합에 가까운 지역을 형성한다고 생각된다. 따라서 딴플의 면적이 작아지는 현상도 이러한 원인에 의한 것이라고 생각된다.

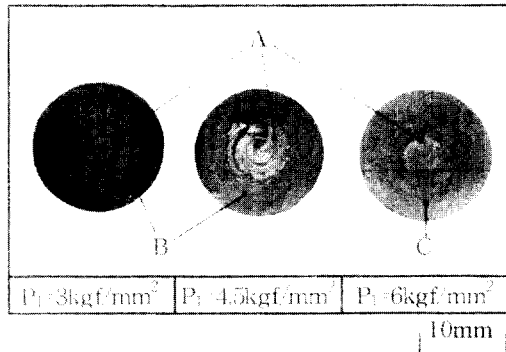


Photo 2. Fracture surface of Cu-W side after tensile test

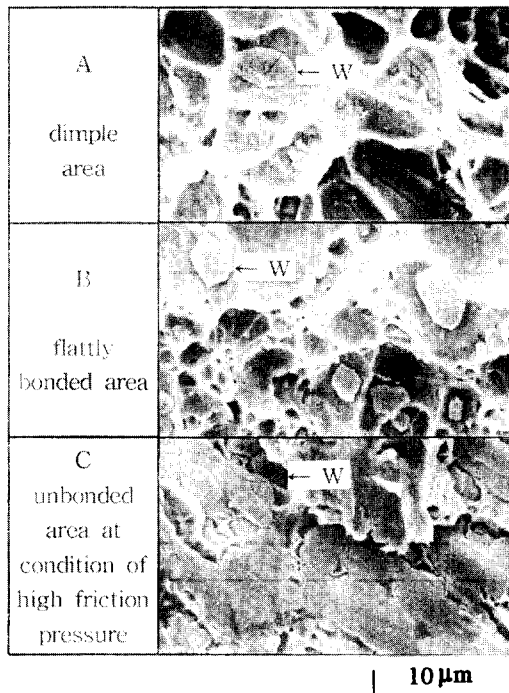
Photo 3은 인장 파단면에서 나타난 A, B, C 3가지의 파단형태를 SEM(scanning electron microscope)으로 촬영한 것이다.

이 사진에서 파단면 딴플의 기저에서 W립들(tungsten grains)이 발견되었으며, 모든 파단면에서 W립들이 발견되는 점으로 미루어 볼 때 Cu층에 포함된 W립의 존재는 접합부에 인접한 Cu에서 파단을 유발시킨다고 생각된다. 이러한 현상은 M. Aritoshi 등<sup>2,3)</sup>에 의해 보고된 적이 있으며, W의 입자가 Cu중에서 노치로서 작용하여 Cu의 유효

단면적을 감소시키기 때문으로 생각된다.

W립의 형태와 크기를 관찰해 보면 취성적인 특성 때문에 부분적으로 입자에 균열(crack)이 생겨 갈라져 있는 것이 있고 그 결과 입자의 크기가 작아지고 각진 형태를 가진 입자들이 존재하고 있다.

미접합에 가까운 과단면을 형성하였던 C type의 경우는 Cu-W와 Cu의 경계면에 가장 가까운 곳으로서 원주방향으로의 빠른 소성유동 속도 때문에 생긴 방향성이 나타나고 있다.



**Photo 3.** Fractograph of tensile fracture surface by SEM (Mag. 200)

### 3.4 접합부의 SEM 분석

Photo 4는 SEM으로 촬영한 접합부의 중앙부분이며 마찰압력과 업셋압력을 변화시켜 나타내었다. 모든 용접조건에서 미세한 W립이 접합부 근처의 Cu부분에 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Cu-W내의 W립들이 마찰과정에서의 기계적인 힘에 의해 탈락되어 회전의 소용돌이를 일으키는 소성유동 영역내에 포함된 것으로 생각된다.

이렇게 하여 W립이 떨어져 나간 거리는 사진에서 알 수 있는 바와 같이 마찰압력  $6\text{kgf/mm}^2$ , 업셋압력  $10\text{kgf/mm}^2$ 에서 약  $20\mu\text{m}$  정도로 가장 짧고, 마찰압력  $3\text{kgf/mm}^2$ , 업셋압력  $3\text{kgf/mm}^2$ 에서는  $520\mu\text{m}$  정도 멀리 떨어져 나간 것도 관찰되었다.

이와 같이 W립이 떨어져 나간 거리는 마찰압력이 증가함에 따라서 감소하고 있으며, 또한 업셋압력의 증가에 의해서도 감소하고 있는 것을 볼 수 있다.

M. Aritoshi 등<sup>2,3)</sup>에 의하면 업셋압력이 높을 경우, W립이 Cu중에 혼입되는 거리가 감소하는 것은 마찰과정에서 혼합된 W립이 업셋과정에서 플래시와 함께 배출되기 때문이며, 그 결과 플래시 부분에서도 상당한 양의 W립이 존재한다고 한다. 이러한 결과로 볼 때 마찰압력의 증가에 의해서도 W립이 분포되어 있는 거리가 감소하는 것은 역시 높은 업셋속도에 기인하는 것이라고 생각된다.

업셋압력이 높을 경우, 인장강도가 증가하는 것으로 볼 때 W립의 분포거리 감소는 강도에 좋은 영향을 줄 것이라고 생각되지만, 높은 마찰압력을 가한 경우, W립의 분포거리가 감소하더라도 인장강도가 낮게 나타나고 있다.

접합부에 인접한 Cu중의 W립을 관찰해 보면 기계적인 힘에 의해 파괴되어 모재조직에 비해 입경이 작아진 것들이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 원래의 직경에 비하여 수십분의 1의 크기로 작아진 것도 발견되었다.

그러므로 마찰압력이 증가함에 따라서 W입자가 잘게 분쇄되어 Cu의 조직내에 혼입되고 아주 빠른 속도로 원주방향으로 이동할 것이다. 이러한 과정에서 W의 입자들은 Cu의 조직내에서 상당한 면적을 차지하며 각각의 입자들이 노치가 되어 균열균을 형성하여 마찰압력  $6\text{kgf/mm}^2$ , 업셋압력  $3\text{kgf/mm}^2$ 의 경우에 나타나 있는 것처럼 원주방향으로의 방향성 균열을 형성하는 것으로 생각된다. 마찰시간의 경과나 업셋과정 중에 이러한 균열들은 원주방향으로 전파되고 마찰용접 과정이 동적이기 때문에 균열이 생성, 지속 또는 소멸될 것이다.

결론적으로 접합부의 신뢰성을 높이기 위해서는 결합력의 증대와 함께 W 입자의 파괴가 적으면서

도 Cu의 조직으로 혼입되는 거리를 감소시키는 용접조건을 선정할 필요가 있다.

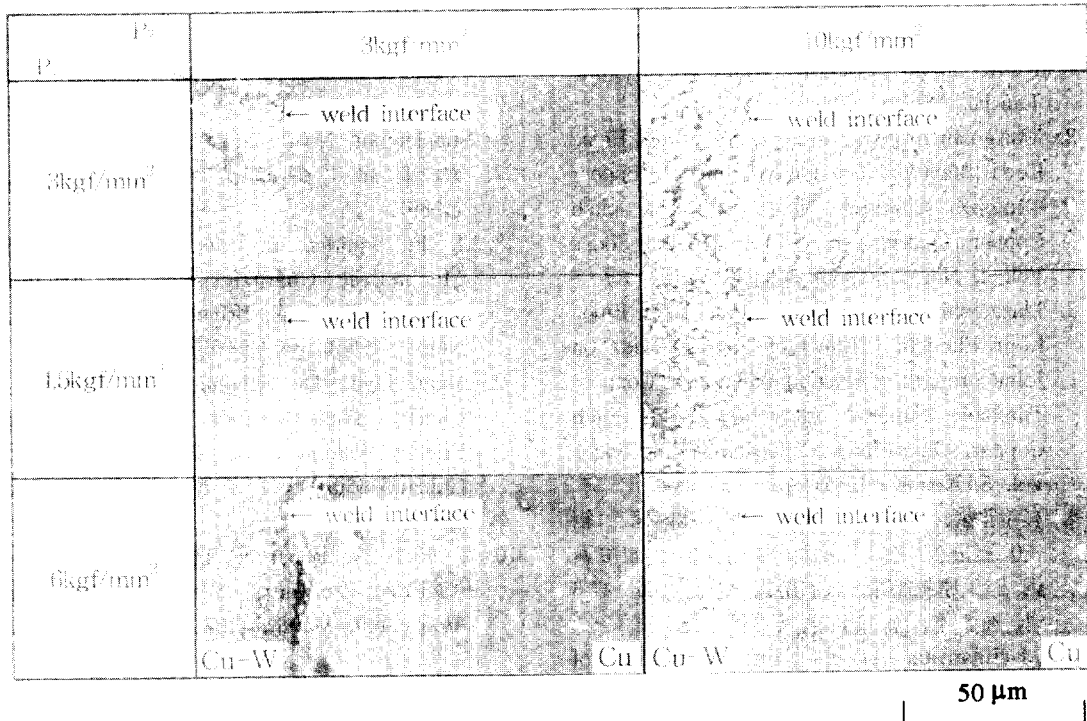


Photo 4. Microstructure of weld interface ( $t_1 = 1.2\text{sec}$ , Mag. 500)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 동-텅스텐 소결합금(Cu-W)과 동(Cu)의 마찰용접에서 마찰압력을 주요변수로서 사용하였으며, 접합부의 인장강도와 파단특성을 고찰하였다. 주요 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 인장강도는 마찰압력이 높을수록 최고 인장강도가 얻어지는 마찰시간이 짧고, 마찰압력  $4.5\text{kgf/mm}^2$ , 마찰시간 1.2초, 업셋압력  $10\text{kgf/mm}^2$ 의 조건에서 접합부의 인장강도는 Cu 모재 인장강도의 약 90%에 도달하였다.
- 2) 최고의 인장강도가 얻어지는 업셋길이  $u_s$ 는 마찰압력에 관계없이 일정하였으며, 업셋길이를 조절하여 접합하는 방법이 치수의 안

정성 측면에서 효율적이라고 판단된다.

- 3) 마찰압력이  $6\text{kgf/mm}^2$ 의 경우, Cu-W측 파단면에 부착된 Cu층이 적어지는 이유는 접합부에 인접한 소성유동 영역에서 원주방향의 유동속도  $v_p$ 가 크게 증가하므로 접합부에 수직요소인 결합력이 감소하고 결합시간이 감소하므로서 미접합에 가까운 영역을 형성하기 때문이며, 이러한 현상은 덤플의 면적 분율을 감소시키는 결과를 가져왔다.
- 4) 파단면의 덤플 기저에서 W의 입자들이 다량 발견되었으며, 입자에 균열이 생겨 입경이 아주 작아진 것도 확인되었다. 이들의 양이 많아질수록 Cu의 유효 단면적을 감소시키고 노치효과를 증대시켜 접합부에 인접한 Cu에서 파단을 일으키며, 소성유동에 의해 원주방향으로 이동하면서 균열이 형성될 수 있다.



## 참 고 문 헌

1. D. E. Spindler : What Industry Needs to Know about Friction Welding, *Welding Journal*, March, (1994), pp. 37-42.
2. Masatoshi Aritoshi, Kozo Okita, Toshi Enjo, Kenji Ekeuchi : Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Tough pitch Copper, *Quarterly J. of Japan Welding Soc.*, Vol. 4, No. 2, (1986), pp. 46-53.
3. Masatoshi Aritoshi, Kozo Okita, Toshi Enjo, Kenji Ekeuchi : Effect of Copper Oxide on Joint Strength of Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Tough Pitch Copper, *Quarterly J. of Japan Welding Soc.*, Vol. 5, No. 3, (1987), pp. 323-329.
4. 有年雅敏, 沖田耕三, 圓城敏男, 池内建二: 銅-50 質量% タングステン焼結合金と 無酸素銅との 摩擦壓接, *日本熔接學會論文集*, 제 6 권, 제 1 호, pp. 16-22, (1988).
5. M Futamata, A Fuji : Friction Welding of Titanium and SUS 304L Austenitic Stainless Steel, *Welding International*, Vol. 4, No. 10, (1990), pp. 768-774.
6. R. A. Bell, J. C. Lippold, D. R. Adolphson : An Evaluation of Copper-Stainless Steel Inertia Friction Welds, *Welding Research Supplement*, Nov., (1984), pp. 325s-332s.
7. 文仁桐 譯 : 金屬組織 예 칭技術, *清文閣*, (1989).
8. I. F. Squires, B. Met. : Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel, *British Welding Journal*, Nov., (1966), pp. 654-657.
9. Duan Liyu, Du Suigeng, Shi Weiqing : Energy Transformation Analysis during Friction Welding of Superalloy Inconel 718, *China Welding*, Vol. 3, No. 1, (1994), pp. 29-34.
10. T. Rich, R. Roberts : The Forge Phase of Friction Welding, *Welding Research Supplement*, March, (1971), pp. 137s-145s.