전기접점용 이종금속 WCu-Cu 접합재의 마찰압접 특성

論 文
49C - 4 -6

Properties of Friction Welding of Dissimilar Metals WCu-Cu Weld for Electrical Contact Device

安 勇 豪* · 尹 棋 甲** · 閔 宅 基*** · 韓 秉 誠§
(Y. H. An · G. G. Yoon · T. K. Min · B. S. Han)

Abstract - A copper-tungsten sintered alloy(WCu) has been friction-welded to a tough pitch copper (Cu) in order to investigate friction weldability. The maximum tensile strength of the WCu-Cu friction welded joints had up to 96% of those of the Cu base metal under the condition of friction time 0.6sec, friction pressure 45MPa, upset pressure 125MPa and upset time 5.0sec. And it is confirmed that the tensile strength of friction welded joints are influenced highly by upset pressure rather than friction time. And it is considered that mixed layer was formed in the Cu adjacent side to the weld interface, W particles included in mixed layer induced fracture in the Cu adjacent side to the weld interface and also, thickness of mixed layer was reduced as upset pressure increase.

Key Words : Friction Welding, Brazing, Dissimilar Metals, Tough Pitch Copper, WCu-Cu Electrical Contact Device

1. 서 론

현재, 고전압 접점재료로 사용되고 있는 동-텅스텐 소결합금(이후, WCu라 약칭)은 전기전도성이 양호한 동과 고융점 경질금속인 텅스텐을 소결한 금속으로, 우수한 전기전도성과 내아크성, 내용착성, 내산화성 및 내마모성이 우수한 성질을 갖고 있다.

그러나 이것이 매우 고가이기 때문에, 재료비의 절감을 위하여 필요한 부분만 WCu를 사용하고 그외의 부분은 Tough pitch 동(이후, Cu라 약칭)을 브레이징으로 접합하여 사용하고 있다. 그러나 브레이징 접합은 접합부의 강도가 낮고 장시간 가열과정에서 모재의 물리적, 기계적 성질을 크게 변화시키는 단점을 가지고 있다. 또한, 접합부 성능에 대한 신뢰성 이 매우 낮기 때문에, 이보다 접합부의 강도가 높고 접합성 능이 우수한 마찰압접에 의한 접합방법이 요구되고 있다.

마찰압접(friction welding)은 두 재료를 접합하기 위하여 마찰력을 이용하는 것으로서, 회전하거나 상대운동을 하는 두 물체를 접촉시켜 마찰열을 발생시키고, 접촉면이 일정온도에 도달했을 때 가압 접촉시켜 접합하는 일종의 기계적 에너지 를 열에너지로 변환시켜 접합하는 고상(solid state)접합법 이 다[1].

* 正 會 員 : 電力硏究院 先任硏究員
** 正 會 員 : 電力硏究院 先任硏究員
*** 正 會 員 : 忠南大 機械工學科 敎授
§ 正 會 員 : 全北大 電氣工學科 敎授
接受日字 : 1999年 12月 20日
最終完了 : 2000年 3月 9日

마찰압접은 단지 두 재료 상호간의 상대운동에 의한 마찰열로 접합시키므로 접촉면 이외의 부위는 온도상승에 의한 열 영향부가 매우 좁을 뿐만 아니라, 접촉면이 용융되기전 일정온도에 도달했을 때 가압 소성유동 되기 때문에 금속간 화합물이 생성되지 않는다. 또한 마찰압접은 회전운동을 이용하여 접합시키므로, 접촉면 부근에 개재된 불순물이 원심력에 의해 플래시(flash)로 배출되어 접합시 결함이 적으면서도 기계적 성질이 우수한 제품을 만들 수 있다[2].

본 연구에서는 WCu와 Cu의 접합에 대한 마찰압접의 적용가능성과, 접합부의 인장시험, 파단면 분석, 현미경조직 관찰 등을 통해 각 접합조건하에서의 접합특성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험장치

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 WCu와 Cu이며, WCu는 입자직경 약 3㎛의 W입자를 70wt% 함유한 것으로 W의 분말을 다공질재로 성형 소결하여 그것에 Cu를 용융 침투시킨 것이다. 두 재료 모두 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉형태의 것을 사용하였다. Cu는 대기와의 화학반응으로 산화를 일으킬 수 있는데, 이러한 표면조건은 접합성을 떨어뜨리는 원인이 되므로 접합 직전 재료의 양 끝을 선반으로 가공하였다[3]. WCu 및 Cu의 화학조성 및 기계적 성질을 표 1과 표 2에 각각 나타내었다.

표 1 금속의 화학적 조성
Table 1 Chemical composition of materials

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

표 2 금속의 기계적 성질
Table 2 Mechanical properties of materials

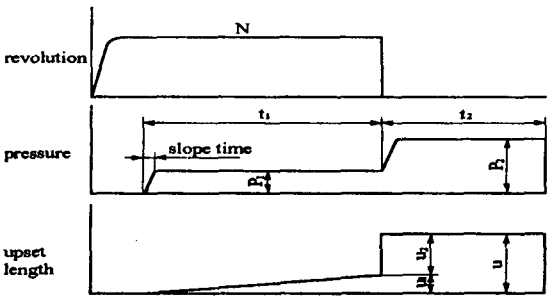
Mechanical properties / Material	Tensile strength (MPa)	Vickers hardness (Hv)
WCu	449	225
Cu	310	106

2.2 실험기기 및 실험방법

본 연구에서 사용한 마찰압접기는 브레이크 타입의 마찰압접기(NSF-30H, 남선기공)로서 회전수가 1000rpm과 2000rpm으로 고정되어 있다. 이것은 실험재료를 고정할 수 있는 회전부 유압척, 고정부 유압척, 회전을 급정지시킬 수 있는 브레이크 장치, 가압력을 얻기 위한 유압장치, 플래시 제거 장치 등으로 구성되어 있다.

마찰과정은 예비 마찰단계(preliminary friction stage)와 마찰단계(friction stage)로 나누며, 예비 마찰단계에서는 비교적 낮은 가압력하에 표면이 서로 접촉하게 되어 꺼칠한 표면은 제거되고 재료 표면의 온도가 상승하게 된다. 연속적으로 마찰압력 P_1을 마찰시간 t_1동안 가하여 재료가 용융점 근처까지 도달하면 마찰과정이 완료되며, 여기까지의 과정에서 발생한 재료의 축방향으로의 단축길이를 마찰과정에서의 업셋길이 u_1이라 한다. 그 후 회전을 급정지시키고 업셋 과정에서는 업셋압력 P_2를 가하여 마찰압접 과정을 완료하게 된다. 업셋과정이 진행되는 동안의 시간을 업셋시간 t_2라 하며, 이 때 소재의 단축된 길이를 u_2라 한다. 따라서 전체 접합시간 t는 $t_1 + t_2$가 되며, 전체 업셋길이 u는 $u_1 + u_2$가 된다. 그림 1은 마찰압접 싸이클을 보여준다.

본 연구에서는 예비실험을 통하여 적정 접합조건을 채택하였고, 양 유압척으로부터 돌출된 시험편의 길이를 35mm로 조절하였다. 사용된 접합조건을 표 3에 나타내었다.



t_1 : friction time t_2 : upset time
P_1 : friction pressure P_2 : upset pressure
u : upset length

그림 1 마찰압접 싸이클
Fig. 1 Friction welding cycle

표 3 마찰압접 조건
Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution n(rpm)	2000
Friction pressure P_1(MPa)	30 ~ 60
Friction time t_1(sec)	0.3 ~ 0.8
Upset pressure P_2(MPa)	30 ~ 150
Upset time t_2(sec)	5

마찰압접부의 인장시험은 표준규격 17호에 준하는 그림 2와 같은 시험편을 제작하여 만능 재료 시험기에서 시험하였다.

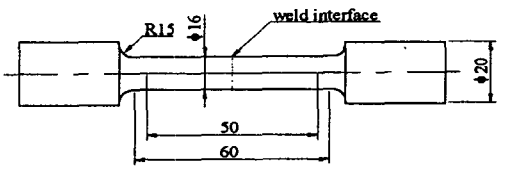


그림 2 인장시험 표본(단위 : mm)
Fig. 2 Tensile test specimen(unit : mm)

경도측정은 마이크로 비커어즈 경도 시험기를 사용하여 접합시험편의 중심선에서 원주방향으로 R/2만큼 떨어진 위치에서 접합계면에 수직인 방향으로 하였다. 사용된 하중은 WCu측과 Cu측 모두 200g이었다. 현미경조직을 관찰하기 위하여 광학 현미경과 SEM을 사용하였고, 시험편의 준비는 폴리코트로 시험편을 마운팅한 다음, 입도 #250, #600, #800, #1500 순으로 샌드페이퍼 연마하고, 이것을 그라인드 폴리셔로 증류

수와 입도 1㎛의 알루미늄 파우더를 혼합하여 폴리싱하였다. 부식액으로는 질산10㎖에 증류수 10㎖를 혼합한 용액을 사용하였고, 10초 동안 부식시켰다[4].

3. 결과 및 고찰

3.1 업셋길이

그림 3은 마찰압력과 마찰시간을 변화시키면서 마찰압접했을 경우의 총 업셋길이와의 관계를 나타낸 도표이다. 이 때 사용된 업셋압력은 100MPa이다. 실험결과 WCu측은 변형이 거의 없었고, Cu는 소성변형으로 인한 상당량의 플래시를 생성하였다. 따라서 총 업셋길이는 Cu의 업셋길이에 해당된다. 그림 3에서 알 수 있는 바와같이 마찰압력이 높을수록 마찰시간이 길어질수록 총 업셋길이가 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 비교적 짧은 마찰시간인 0.3초를 예로 들면, 마찰압력이 30, 45, 60MPa로 증가함에 따라서 총 업셋길이가 각각 2.1, 5.1, 6.9mm로 되어 마찰압력이 총 업셋길이에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 마찰시간이 1.8초인 경우에는 총 업셋길이가 각각 16.8, 20.8, 24.2mm로 상대적으로 짧은 마찰시간을 준 경우에 비해 마찰압력이 총 업셋길이에 미치는 영향이 적었다.

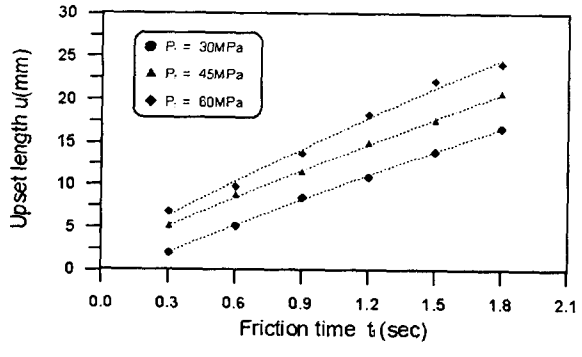


그림 3 마찰압력과 업셋길이와의 관계

Fig. 3 Relationship between friction pressure and upset length

그림 4는 업셋압력과 마찰시간을 변화시키면서 마찰압접했을 경우의 총 업셋길이를 나타낸다. 이 때 사용된 마찰압력은 45MPa이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 업셋압력이 높을수록 마찰시간이 길어질수록 총 업셋길이가 직선적으로 증가함을 알 수 있고, 마찰시간에 상관 없이 업셋압력의 영향이 거의 일정함을 알 수 있었다. 마찰시간이 1.8초일 때의 총 업셋길이는 업셋압력에 비례하여 매우 증가하였고, 업셋압력이 125MPa인 조건에서는 21.5mm에 달하였다.

3.2 접합면의 Macrostructure

사진 1은 WCu-Cu 마찰압접부의 단면매크로 사진으로 회전수 n=2000rpm, 업셋압력 P_2=100MPa, 마찰시간을 0.9초로 고정한다음 마찰압력을 30MPa ~ 60MPa까지 변화시켜 마찰압력의 영향을 보여준다. 이 사진에서 알 수 있듯이, WCu 측은 전혀 소성변형을 일으키지 않았고, Cu 측은 소성유동(plastic flow)에 의한 상당한 양의 플래시를 형성하였다. 이는 WCu가 Cu보다 경질재인 것으로부터 알 수 있다. 또한, 접합계면의 육안상으로 확인할 수 있는 결함은 나타나지 않았다

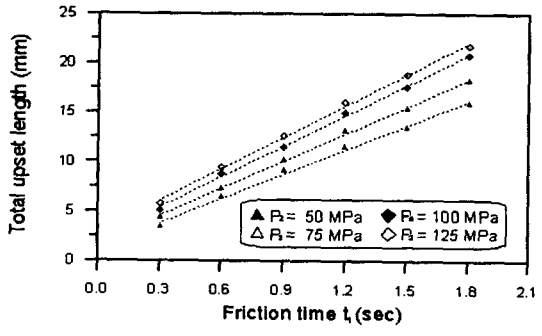


그림 4 업셋압력과 업셋길이와의 관계

Fig. 4 Relationship between upset pressure and upset length

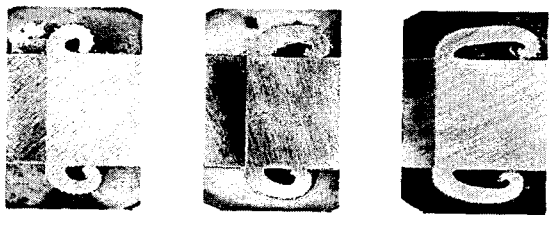


사진 1 마찰압접 구조(t_1=0.9Sec, P_2=100MPa)

Photo 1 Macrostructure of frriction welds(t_1=0.9Sec, P_2=100MPa)

사진 1에서 보여주는 것처럼 마찰압력이 높을수록 플래시의 배출방향이 Cu 모재쪽을 향하고 있는 반면, 플래시의 두께에 있어서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나 업셋압력을 가하지 않고 실험한 결과 마찰압력이 높을수록 강제 소성변화의 결과로 플래시의 끝 부분이 예리하고 플래시의 두께가 점차 감소되었다. 플래시의 두께가 마찰압력의 증가에 따라 감소하는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. "마찰압접시 접합부에서 발생된 열이 모재쪽으로 전도되며 동시에 접합부에서 용융점에 가까워진 금속은 소성유동 영역(plastic zone)을 형성하여 가압력에 의해 플래시로 배출된다. 따라서 열전도 속도와 업셋율이 같아져 소성유동 지역의 폭이 일정해지는 준정상상태(quasi-steady state)에 달한다. 그러나 마찰압력이 크면 비교적 낮은 온도에서도 접합부의 금속이 소성변형을 일으켜 업셋율이 커지게 되므로 소성유동 영역이

좁아진다. 따라서 좁아진 소성유동 영역이 플래시로 배출되어 얇은 플래시를 형성하게 된다."

T. Rich와 R. Roberts의 이론적 해석에 의하면, 접합면에 수직인 방향으로 x만큼 떨어진 곳에서 원주방향으로의 플래시의 배출속도는 다음과 같다.

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

식 (1)에서 v_u는 업셋속도 혹은 업셋율, h는 소성유동 영역의 폭, y는 재료의 축심으로부터의 거리, 단 소성유동 영역의 폭은 단면에서 일정하고 원주방향에 대한 속도는 모재쪽에서 접합부로 가면서 선형적으로 증가하며, x는 h일 때 0이라고 가정한다.

위 식에서 보면, y=r(재료의 반경), x=0에서 v_p max = $(rv_u)/h$로 최대속도가 얻어지며, x=h일 때 y값에 관계 없이 0이다. 따라서 마찰압력이 증가할수록 플래시가 모재쪽을 향하는 것은 y=r, x=h인 곳을 기점으로 말림현상이 일어나기 때문이며, 업셋길이가 증가하는 반면, 소성유동 영역이 좁아지고, 플래시 배출속도 v_p max가 크게 증가하기 때문이라고 생각된다. 업셋압력을 변화시키면서 마찰압접을 한 결과, 위와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

3.3 인장시험

그림 5는 마찰압력과 마찰시간을 변화시켜 마찰압접 했을 때, 접합부의 인장강도와의 관계를 나타낸 것으로, 이때의 업셋압력은 100MPa로 고정하여 시험하였다. 각 마찰압력 하에서 인장강도는 마찰시간의 증가와 더불어 증가하다 극대값을 나타낸 이후 감소하는 경향을 보였다. 또한 최고 인장강도가 얻어지는 마찰시간은 마찰압력이 증가할수록 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

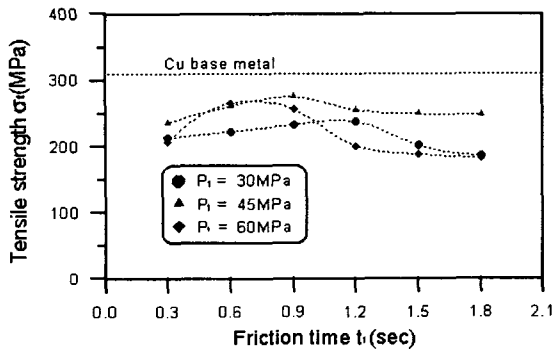


그림 5 마찰압력과 인장강도와의 관계(P_2=100MPa)

Fig. 5 Relationship between friction pressure and tensile strength(P_2=100MPa)

이러한 원인은 마찰압력이 높을수록 급격한 물리적, 열적 상태변화를 격으므로서 마찰면의 온도, 마찰토크, 업셋속도 등이 거의 일정해지는 준정상상태에 도달하는 시간이 빠르기 때문으로 볼 수 있다.

시험한 조건중에서 마찰압력이 45MPa일 때 가장 높은 인장강도를 나타냈다. 그러나 마찰압력을 60MPa로 설정한 경우에는 인장강도가 오히려 감소되었다.

그림 6은 업셋압력의 영향을 확인하기 위하여 25MPa의 업셋압력을 사용하여 시험한 경우에도 마찰압력이 45MPa일 때 인장강도가 가장 높았고, 60MPa의 마찰압력에서는 역시

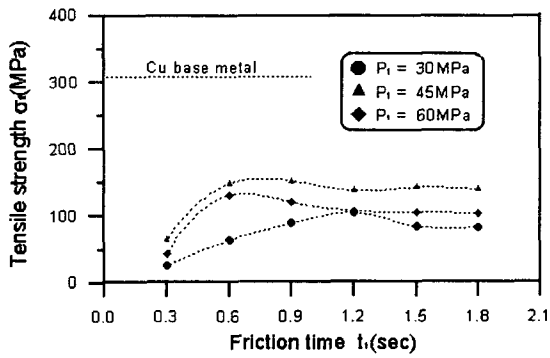


그림 6 마찰압력과 인장강도와의 관계(P_2=25MPa)

Fig. 6 Relationship between friction pressure and tensile strength(P_2=25MPa)

강도가 저하되고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7은 업셋압력을 변화시켜 마찰압접했을 때, 접합부의 마찰시간과 인장강도와의 관계를 보여준다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이, 마찰압접부의 인장강도는 업셋압력의 증가와 더불어 뚜렷하게 증가하였다.

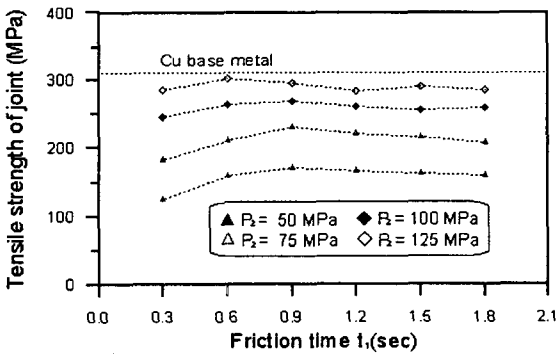


그림 7 업셋압력과 인장강도와의 관계(P_1=45MPa)

Fig. 7 Relationship between upset pressure and tensile strength(P_1=45MPa)

또한 최고 인장강도가 얻어지는 마찰시간은 업셋압력이 증가할수록 감소하고 있음을 알 수 있었다. 업셋압력이 100MPa 이하에서는 마찰시간이 0.9초일 때 가장 높은 인장강도를 나타낸 반면, 업셋압력이 125MPa에서는 마찰시간이 0.6초에서 가장 높은 인장강도를 나타냈다. 가장 높은 인장강도는 마찰시간 0.6초, 업셋압력 125MPa에서 얻어졌고, 298MPa를 기록하였다. 이 수치는 Cu 모재 인장강도(310Mpa)의 약 96%에 해당되는 것으로, 지금까지 알려진 기

존의 접합법에 비해 상당히 만족할만한 수준을 나타내었다.

업셋압력이 증가하면서 인장강도가 증가하는 것은 두 금속간의 기계적 결합을 강화하며, 접합면에 존재하는 이물질 등을 플래시로 배출시키기 때문이다.

3.4 인장파면

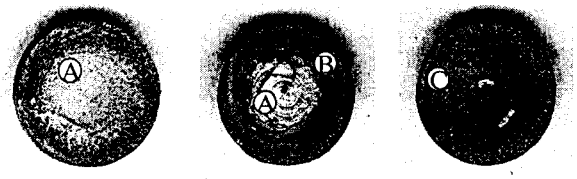
사진 2는 마찰압력을 각각 30, 45, 60MPa로 설정하고 마찰압접한 경우, WCu측 인장 파단면을 나타낸 것이다. 파단면을 관찰해 보면 WCu측으로 떨어져 나온 Cu가 여러 가지 형태로 존재하여 파단면이 변화하는 것을 볼 수 있으며, 그 형태를 대략 다음과 같은 3가지 종류로 구별하였다.

A : 파단면의 중심부에서 나타나는 딤플(dimple)의 연성파단

B : 마찰압력 30MPa와 45MPa인 경우에 딤플 주변으로부터 원주부근에 걸쳐 존재하는 평평한 얇은 Cu층

C : 마찰압력이 60MPa인 경우 파단면의 대부분을 차지하고 있는 얇은 Cu의 층

Cu 모재에서 떨어져 나온 딤플이나 얇은 층이 파단면 상에 존재하는 것은 높은 업셋압력과 재료 중심부의 높은 압력에 의해 입자간의 혼합에 의한 강한 결합력을 나타내기 때문으로 볼 수 있다. 또한 마찰압력의 증가에 따라서 파단면에서 딤플의 분률이 점점 감소되는 것을 알 수 있다.



P_1 = 30MPa P_1 = 45MPa P_1 = 60MPa

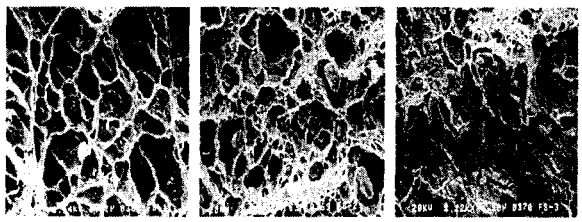
사진 2 인장파단면

Photo 2 Tensile Fracture Surfaces

마찰압력이 30MPa인 경우에는 딤플의 두께가 얇고 층상에 가까우며, 딤플의 면적분률이 크게 나타나고 있다. 인장강도가 가장 높은 마찰압력 45MPa의 경우, 파단면의 중앙에 비교적 큰 딤플이 형성되어 있으며, 평평한 지역에서는 다른 조건에 비하여 Cu층(층두께 20~65㎛)이 고르게 분포되어 있다. 그러나 마찰압력이 60MPa인 조건에서는 얇은 층을 이루었던 Cu의 입자가 희박하게 분포되어 파면상에서 WCu 고유의 색상이 드러나고 있음을 관찰할 수 있다.

마찰압력의 증가에 따라 고압력에 의한 결합력이 일시적으로 증가할 수 있지만 앞서 언급한 것처럼, 접합부에 인접한 소성유동 영역에서 원주방향의 유동속도가 크게 증가하므로 접합부에 수직으로 작용하는 성분 즉, 결합력이 감소하게 된다. 즉, 결합력이 충분하다할지라도 Cu의 입자들이 원주방향으로 빠르게 이동함에 따라서 결합시간이 감소하므로 미접합에 가까운 지역을 형성한다고 볼 수 있다. 따라서 딤플의 면적이 작아지는 현상도 이러한 원인에 의한 것이라고 볼 수 있다.

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



(A) (B) (C)

사진 3 SEM으로 촬영한 인장파단면 (A, B, C 사진, 배율2000)

Photo 3 SEM image of tensile fracture surface(A, B, C of photo 3, Mag. 2000)

이 사진에서 파단면 딤플의 기저에서 W립들(tungsten grains)이 발견되었으며, 모든 파단면에서 W립들이 발견되는 점으로 미루어 볼 때, Cu중에 포함된 W립의 존재는 접합부에 인접한 Cu에서 파단을 유발시킨다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 M. Aritoshi 등에 의해 보고된 적이 있으며, W의 입자가 Cu중에서 노치로서 작용하여 Cu의 유효단면적을 감소시키기 때문으로 볼 수 있다.

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 있음을 알 수 있다.

3.5 현미경조직

사진 4는 WCu와 Cu를 마찰압접한 경계면의 현미경조직을 보여주고 있다. 마찰압력 45Mpa, 마찰시간 0.6초, 업셋압력 125MPa의 조건에서 최고의 인장강도를 나타냈던 시험편의 접합계면을 전자현미경(SEM)으로 촬영한 것으로 왼편은 WCu 소결합금, 오른편은 Cu를 나타낸 것이다. WCu에서 둥글고 회색으로 나타나는 것은 W입자이고, 어둡게 보이는 나머지는 Cu이다.

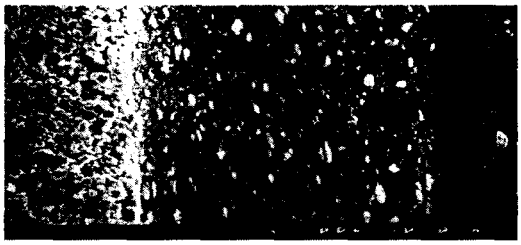


사진 4 마찰압접 경계면의 조직사진(왼쪽 : WCu, 오른쪽 : Cu, 배율 1000)

Photo 4 Microstructure of friction welds(left side : WCu, right side : Cu, Mag. 1000)

관찰한 결과, 접합계면 근처의 Cu 조직이 모재조직에 비하여 결정립이 훨씬 더 미세하게 나타났다. 또한, 접합계면에 인접한 Cu측에서는 이종금속의 마찰압접에서 전형적으로 나타나는 혼합층(mixed layer)이 형성되었다[5]. 이러한 혼합층에서는 결정립이 아주 미세하게 나타났으며, 혼합층은 마찰과정에서 WCu와 Cu의 혼합에 의해 형성된 것을 확인할 수 있었다.

이러한 사실로 미루어 볼 때, 수분의 1~수㎛의 크기로 혼합층 내에 존재하는 W입자는 접합계면 근처에서 파단을 일으키는 가장 중요한 원인 중의 하나이며, 접합강도를 좌우한다고 볼 수 있다.

접합계면에 인접한 Cu의 경도는 접합조건에 관계없이 모재경도(Hv105)보다 훨씬 높은 값을 나타내었다. 이 지역은 혼합층에 해당하는 부분으로 WCu로부터 탈락된 W가 경도상승에 영향을 미친 것으로 사료된다.

Cu의 열영향부(HAZ : heat affected zone)에서는 경도저하 현상이 나타났고, 이것은 마찰과정의 온도상승으로 인한 열연화로 사료된다. 연화된 영역의 폭은 접합조건에 따라서 차이가 있는데, 짧은 마찰시간과 높은 업셋압력일수록 그 폭이 감소되었다. 동일한 마찰시간을 적용한 경우에도 높은 업셋압력에서 연화된 영역의 폭이 감소된 것은 이 영역이 플래시로 배출되기 때문이다.

한편, WCu측의 경도측정 결과, 뚜렷한 경도의 변화를 발견할 수 없었다.

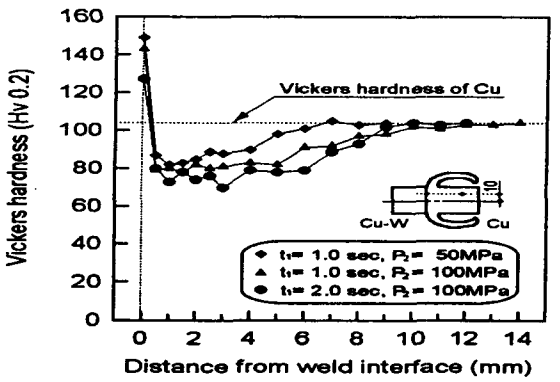


그림 8 마찰압접시 경도분포

Fig. 8 Hardness distribution in the friction weld

3.6 전기저항 특성 시험

브레이징에 의한 WCu-Cu 접점과 마찰압접에 의한 WCu-Cu 접점의 전기적 특성을 시험, 확인하기 위하여 25.8kV 가스절연 부하개폐기에 이들 접점을 취부하여 주회로에 대한 전기적 특성시험을 하였다. 브레이징에 의한 WCu-Cu 접점은 A상에 취부하였고, 마찰압접에 의한 WCu-Cu 접점은 B상과 C상에 각각 취부하여, 25.8kV 전압과 800A의 전류를 인가하여 대전력 개폐시험 전·후의 전기저항 값을 DC 100A를 흘려 전압강하법으로 측정하여 비교한 결과 그림 9와 같은 특성을 얻었다. 이 시험에서 얻은 결과는 마찰압접에 의한 WCu-Cu 접점의 전기저항 값이 기존의 접합방법인 브레이징에 의한 WCu-Cu 접점에 비해 3.3%의 전기저항 값이 개선되었음을 확인할 수 있었다

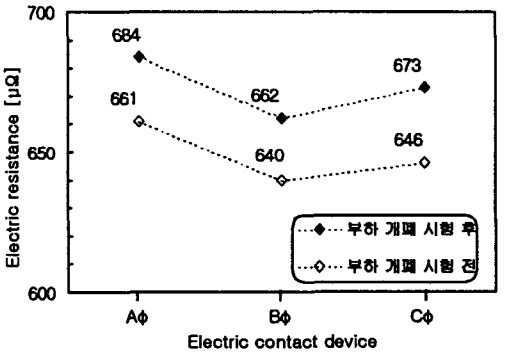


그림 9 전기저항 특성

Fig. 9 Properties of electric resitance

4. 결 론

고전압 접점재료로 사용되고 있는 동-텅스텐(WCu) 소결합금과 동(Cu)의 이종 금속간 접합에 마찰압접 기술을 적용하였고, 각 접합조건 하에서의 접합특성에 대하여 고찰하였다. 얻은 결론은 다음과 같다.

1. WCu-Cu 접합 시험편의 인장시험 결과 업셋압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 마찰시간과는 큰 관계가 없는 것으로 나타났다.
2. 인장파면을 관찰한 결과, 모든 파면은 연성파괴를 일으켰고, 육안상으로 파면의 중심부에서 딤플이 확인되는 반면, 파면의 원주부에서는 딤플이 확인되지 않았다.
3. 접합계면에 인접한 Cu측에서는 WCu와 Cu의 혼합에 의한 혼합층이 형성되었다. 또한, 혼합층 내부에서는 WCu로부터 탈락된 W 입자가 발견되었고, W입자는 접합계면에 인접한 Cu에서 파괴를 일으키는 주요인이 된다.
4. 마찰압접에 의한 WCu-Cu 접점의 전기저항 값이 기존의 접합방법인 브레이징에 의해 접합된 WCu-Cu 접점에 비해 3.3%의 전기저항 값이 개선되었음을 확인할 수 있었다
5. WCu-Cu 마찰압접부의 최고 인장강도는 회전속도 2000rpm, 마찰시간 0.6초, 업셋시간 5초, 마찰압력 45MPa, 업셋압력 125MPa인 조건에서 얻어졌고, Cu 모재 인장강도(310MPa)의 96%에 해당하는 298MPa로, 실용화 할 만한 강도를 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] D. E. Spindler, "What Indurstry Needs to Know about Friction Welding", *Welding Journal*, March, pp. 37-42, 1994.

[2] Haskell D. Weiss, Thomas H. Hazlett, "The Role of Material Properties and Interface Temperatures in Friction Welding Dissimilar Metals", *Metals Engineering Conference,* April, pp. 1-11, 1966.

[3] 摩擦壓接協會, "摩擦壓接", コロナ社, 第1章, 節 1-2, pp.1-16, 1979.

[4] 韓相旭 編著, "金屬熱處理組織解說", 골-드 技術社, 1988.

[5] M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi, F. Matsuda, "Friction Welding of Oxygen Free Copper to Pure Aluminium", Welding International, Vol. 6, No. 11, pp. 853-859, 1992.

저 자 소 개

안 용 호 (安 勇 豪)

1961년 7월 10일생. 1984년 인천대학교 전기공학과 졸업, 2000년 전북대학교 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

윤 기 갑 (尹 棋 甲)

1961년 1월 15일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 전력연구원 선임연구원

민 택 기 (閔 宅 基)

1950년 7월 18일생. 1974년 충남대학교 공업교육학과 졸업, 1980년 동 대학원 정밀기계학과 졸업(석사), 1993년 동아대학교 대학원 기계공학과 졸업(공박). 현재 충남대학교 기계공학과 교수

한 병 성 (韓 秉 誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이 파스퇴르대학 박사학위취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스국립과학연구소)연구원. 현재 전북대 전자정보공학부 교수