

WCu-Cu 전기접점의 마찰용접 특성 연구

안 용호*, 윤 기갑*, 민 택기**, 한 병성***
 한국전력공사 전력연구원* 충남대학교** 전북대학교***

A Study on Friction weldability of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Copper

Y.H.An*, G.G.Yoon*, T.K. Min**, B.S. Han***
 KEPRI*, Chung Nam Univ**, Chun Buk Univ***

Abstract - A copper-tungsten sintered alloy(Cu-W) has been friction-welded to a tough pitch copper (Cu) in order to investigate friction weldability. The tensile strength of the friction welded joint was increased up to 87% of the Cu base metal under the condition of friction time 1.0 sec, friction pressure 40MPa and upset pressure 100MPa, upset time 5.0 sec. And it is related to upset pressure rather than friction time. Mixed layer was formed in the Cu adjacent weld interface and W particles which were included in mixed layer could induce fracture in the Cu adjacent to the weld interface. Thickness of mixed layer was reduced as upset pressure increase.

1. 서 론

현재, 고전압 접점재료로 사용되고 있는 동-텅스텐 소결합금(이후, Cu-W라 약칭)은 전기전도성이 양호한 동과 고용점 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 Cu-W를 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 변화시키 단점을 가지고 있다. 또한, 접합부 성능에 대한 신뢰성이 매우 낮기 때문에, 이보다 접합부의 강도가 높고 용접품질이 우수한 마찰용접에 의한 접합방법이 요구되고 있다.

마찰용접(Friction welding)은 두 재료를 접합하기 위하여 마찰력을 이용하는 것으로서, 회전하거나 상대운동을 하는 두물체를 접촉시켜 마찰열을 발생시키고, 접촉면이 일정온도에 도달했을 때 가압 접촉시켜 접합하는 일종의 기계적 에너지를 열에너지로 변환시켜 용접하는 고상접합법이다¹⁾.

마찰용접은 단지 두 재료 상호간의 상대운동에 의한 마찰열로 접합시킴으로써 접촉면 이외의 부위는 온도상승에 의한 열영향부가 매우 좁을 뿐만 아니라, 접촉면이 용융되기전 일정온도에 도달했을 때 가압 소성유동 되기 때문에 금속결정의 조대화나 금속간 화합물이 생성되지 않는다. 또한 마찰용접은 회전운동을 이용하여 접합시킴으로, 접촉면 부근에 개재된 불순물이 원심력에 의해 플래시(flash)로 배출되어 용접결합이 적으면서도 기계적 성질이 우수한 제품을 만들 수 있다²⁾.

본 연구에서는 Cu-W와 Cu의 접합에 대한 마찰용접의 적용 가능성과, 접합부의 인장시험, 경도시험, 현미경 조직 관찰 등을 통해 각 용접조건하에서의 접합특성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험장치

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 Cu-W와 Cu이며, Cu-W는 입자직경 약 3 μ m의 W입자를 70wt% 함유한 것으로 W의 분말을 다공질재료로 성형 소결하여 그것에 Cu를 용융 침투시킨 것이다. 두 재료 모두 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉형태였다. Cu는 대기와의 화학반응으로 산화를 일으킬 수 있는데, 이런 표면조건은 용접성을 떨어뜨리는 원인이 되므로 용접 직전 재료의 양 끝을 선반으로 가공하였다³⁾. Cu-W 및 Cu의 화학조성 및 기계적 성질을 Table1과 Table2에 각각 나타내었다.

Table1 Chemical composition of materials

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

Table2 Mechanical properties of materials

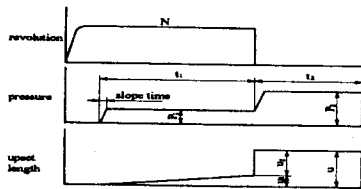
| Material | Mechanical properties | Tensile strength (MPa) | Vickers hardness (Hv) |
|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | Cu-W | | 449 |
| Cu | | 310 | 104 |

2.2 실험기기 및 실험방법

본 연구에서 사용한 마찰용접기는 브레이크 타입의 마찰용접기(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. Fig. 1은 마찰용접 사이클을 보여준다.

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

마찰용접부의 인장시험은 표준 규격 17호에 준하는 Fig. 2와 같은 시험편을 제작하여 만능 재료 시험기에서 시험하였다.



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

Fig.1 Friction welding cycle

Table3 Friction welding conditions

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Spindle revolution n(rpm) | 1000 |
| Friction pressure P_1 (MPa) | 40 |
| Friction time t_1 (sec) | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 |
| Upset pressure P_2 (MPa) | 25, 50, 75, 100 |
| Upset time t_2 (sec) | 8 |

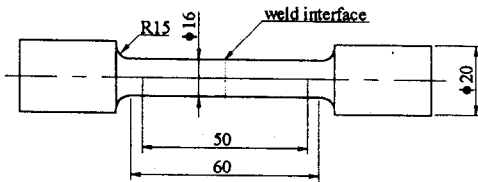


Fig.2 Tensile test specimen(unit : mm)

경도측정은 마이크로 비커이즈 경도 시험기를 사용하여 용접시험편의 중심선에서 원주방향으로 R/2만큼 떨어진 위치에서 용접계면에 수직인 방향으로 하였다. 사용된 하중은 Cu-W측과 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 증류수와 입도 1 μ m의 알루미나 파우더를 혼합하여 폴리싱하였다. 부식액으로는 질산10ml에 증류수 10ml를 혼합한 용액을 사용하였고, 10초 동안 부식시켰다⁴⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 업셋길이

Fig. 3은 업셋압력과 총 업셋길이와의 관계를 나타낸 도표이다. 업셋길이는 재료의 소성변형에 의한 축방향의 단축길이로서, 업셋개시 시간까지는 일정 시간이 소요되며, 마찰이 시작된 후 일정온도에 도달했을 때 변형을 시작하게 된다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와같이, 총 업셋길이는 업셋압력의 증가와 더불어 증가하였으며, 마찰 시간의 경과에 따라서도 증가하는 경향을 보였다.

업셋압력이 100MPa인 경우는, 마찰시간에 따라 7.7mm~26.2mm까지 상당한 업셋길이를 나타내었으며, 그 이상의 업셋압력에서는 유압적으로부터 돌출된 시험편의 길이제한 때문에 정확한 측정이 곤란하였다.

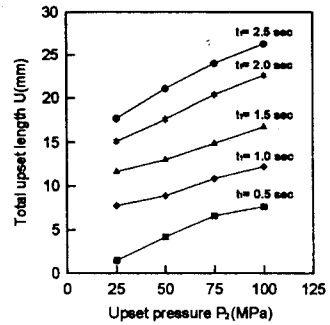


Fig. 3 Relationship between upset pressure and upset length

3.2 접합면의 Macrostructure

Photo 1은 Cu-W/Cu 마찰용접부의 단면 매크로 사진으로 마찰시간과 업셋압력의 영향을 보여준다. 이 사진에서 알 수 있듯이, Cu-W 측은 전혀 소성변형을 일으키지 않았고, Cu 측은 소성유동에 의한 상당한 양의 플래시를 형성하였다. 이는 Cu-W가 Cu보다 경질체인 것으로부터 알 수 있다. 또한, 육안상의 용접결합이 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다.

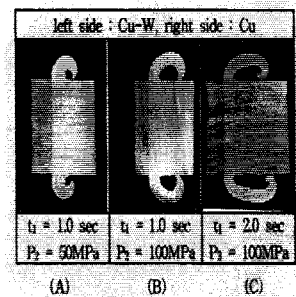


Photo 1 Macrostructure of Cu-W/Cu friction welds($\times 0.9$)

사용된 용접조건에 따라 플래시의 크기와 형상은 고유의 특징을 가지고 있다. Photo 1에서 (A)는 짧은 마찰시간($t_1=1.0$ 초)과 낮은 업셋압력($P_2=50$ MPa)을 적용한 경우로 적은 양의 플래시를 형성하였다. (B)는 짧은 마찰시간($t_1=1.0$ 초)과 높은 업셋압력($P_2=100$ MPa)을 적용한 경우로 마찰열에 의해 형성된 Cu의 소성변형 영역이 좁아져 결과적으로 플래시의 두께가 얇아졌다. (C)는 긴 마찰시간($t_1=2.0$ 초)과 높은 업셋압력($P_2=100$ MPa)을 적용한 경우로 플래시의 두께에 있어서 차이가 나지 않지만, 긴 마찰시간으로 인해 소성변형 영역이 플래시로 충분히 배출되면서 일정 두께를 유지하였고, 길이가 상당히 긴 것을 알 수 있다.

따라서 소성변형으로 인해 형성된 플래시의 두께와 길이는 마찰용접부의 용접품질을 판단할 수 있는 하나의 인자가 된다고 생각된다.

3.3 인장시험

Fig. 4는 업셋압력과 인장강도와의 관계를 나타낸 도표이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 접합부의 인장강도는

마찰시간과는 큰 관련이 없는 것으로 나타났다. 그러나
 압셋압력이 75MPa까지는 인장강도가 뚜렷하게 증가되
 었고, 그 이상의 압셋압력에서는 증가 폭이 크게 둔화되
 었다.

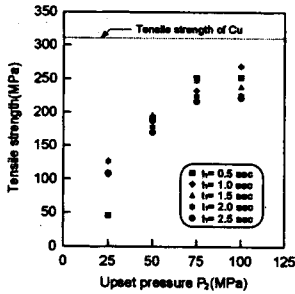


Fig. 4 Relationship between upset pressure and tensile strength

한편, 100MPa보다 높은 압셋압력을 적용하는 것은 불
 가능하였는데, 이것은 압셋압력이 증가함에 따라서 압셋
 길이가 매우 크게 증가하고, 양 유압척으로부터 돌출된
 시험편의 길이가 제약 받기 때문이다.

최고의 인장강도는 마찰시간 1.0초, 압셋압력 100MPa에
 서 269MPa를 기록하였다. 이 수치는 동 모재 인장강도
 (310MPa)의 약 87%에 해당되는 것으로 지금까지 알려
 진 기존의 접합법에 비해 만족할만한 수준을 나타낸다.

Photo 2는 마찰시간 1.0초, 압셋압력 100MPa의 조건
 에서 마찰용접된 시험편의 Cu-W측 인장파면의 SEM
 사진을 보여준다. 이것은 앞서 최고의 인장강도를 나타
 났던 용접시험편이다.

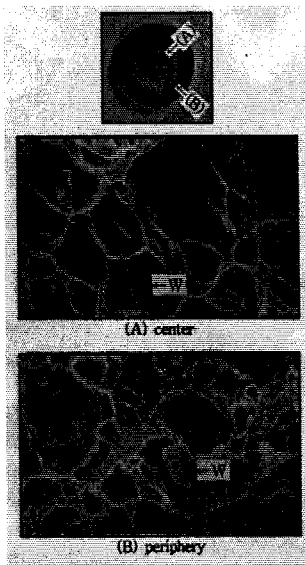


Photo 2 Tensile fracture surface(t1=1.0sec, P2=100MPa, ×2000)

인장시험 결과, 이러한 조건에서 Cu-W와 Cu의 마찰
 용접부는 용접계면에 인접한 Cu의 내부에서 파단이 일
 어났다. 파단 위치는 파면의 중심부인 경우, 용접계면으
 로부터 Cu 쪽으로 최고 1mm까지였고, 파면의 원주부인
 경우, 용접계면으로부터 Cu 쪽으로 수십μm 내외였다.

Photo 1의 (A)는 파면의 중심부로 연성파면임을 알
 수 있다. 파면에서는 W 입자들을 관찰할 수 있는데, 입
 자에 균열이 생긴 점으로 미루어 볼 때, 마찰과정의 기
 계적 힘에 의한 소성유동에 의해 Cu-W로부터 떨어져
 나온 것으로 사료된다. Photo 1의 (B)는 파면의 원주부
 로 역시 연성파면임을 알 수 있다. 육안상으로 이 영역
 은 평활하게 나타나는데, 보다 많은 W 입자들이 관찰되
 며, 각진 형태와 함께 크기가 작아진 것을 알 수 있다.
 이것은 T. Rich와 R. Roberts에 의해 보고된 바와같이
 원주부에서의 소성유동이 중심부보다 격심하기 때문으로
 사료된다.

3.4 현미경조직

Photo 3은 Cu-W/Cu 마찰용접부의 현미경조직을 보
 여주고 있다.

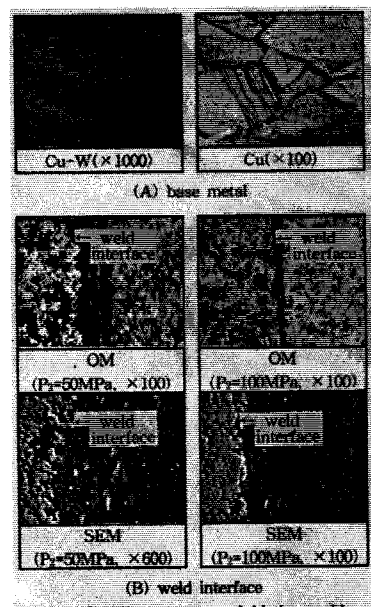


Photo 3 Microstructure of friction welds
 (left side : Cu-W, right side : Cu)

Photo 3의 (A)는 Cu-W 및 Cu의 모재조직으로,
 Cu-W에서 등갈고 회색으로 나타나는 것은 W 입자이고,
 어둡게 보이는 나머지는 Cu이다. 또한, Cu의 모재는 정
 련동(Electric Tough Pitch Copper)의 조직을 나타낸다.

Photo 3의 (B)는 Cu-W/Cu 용접계면을 보여주는데,
 광학현미경(OM)으로 관찰한 결과, 용접계면 근처의 Cu
 조직이 모재조직에 비하여 결정립이 훨씬 더 미세하게
 나타났다. 또한, 용접계면에 인접한 Cu측에서는 이중금
 속의 마찰용접에서 전형적으로 나타나는 혼합층(mixed
 layer)⁵⁾이 형성되었다. 이러한 혼합층에서는 결정립이 아
 주 미세하게 나타났으며, 압셋압력이 50MPa인 조건보다
 는 압셋압력이 100MPa인 조건에서 혼합층의 두께가 크
 게 감소되었다. 혼합층은 마찰과정에서 Cu-W와 Cu의
 혼합에 의해 형성된 것으로, 100MPa의 압셋압력에서 그
 두께가 감소된 것은 높은 압셋압력일수록 플래시로 배출
 되는 양이 많아지기 때문이다. 용접계면을 SEM으로 관
 찰한 결과, 혼합층의 내부에서는 Cu-W로부터 탈락된
 W 입자가 관찰되었고, 혼합층이 두껍게 형성되는 조건
 일수록 W 입자가 떨어져 나간 거리가 증가하며, 그 수

가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 사실로 미루어 볼 때, 수분의 1~수 μ m의 크기로 혼합층 내에 존재하는 W 입자는 용접계면 근처에서 파단을 일으키는 가장 중요한 원인 중의 하나이며, 용접 강도를 좌우한다고 생각된다.

3.5 경도시험

Fig. 5는 Cu-W/Cu 마찰용접부에서 Cu측의 비커어즈 경도(Hv) 측정결과이다.

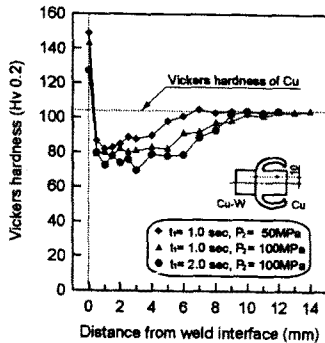


Fig 5 Hardness distribution in the friction weld

용접계면에 인접한 Cu의 경도는 용접조건에 관계 없이 모재경도 (Hv105)보다 훨씬 높은 값을 나타내었다. 이 지역은 혼합층에 해당하는 부분으로 Cu-W로부터 탈락된 W가 경도상승에 영향을 미친 것으로 사료된다.

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

한편, Cu-W측의 경도측정 결과, 뚜렷한 경도의 변화를 발견할 수 없었다.

4. 결론

고전압 점접재료로 사용되고 있는 동-텅스텐(Cu-W) 소결합금과 동(Cu)의 이종 금속간 접합에 마찰용접을 적용하였고, 각 용접조건 하에서의 접합특성에 대하여 고찰하였다. 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Cu-W/Cu 용접 시험편의 인장시험 결과 압셋압력이 증가함에 따라 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 마찰시간과는 큰 관계가 없는 것으로 나타났다.
2. 인장파면을 관찰한 결과, 모든 파면은 연성파괴를 일으켰고, 육안상으로 파면의 중심부에서 덩풀이 확인되는 반면, 파면의 원주부에서는 덩풀이 확인되지 않았다.
3. 용접계면에 인접한 Cu측에서는 Cu-W와 Cu의 혼합에 의한 혼합층이 형성되었고, 혼합층의 두께는 높은 압력일수록 감소되었다. 또한, 혼합층 내부에서는 Cu-W로부터 탈락된 W 입자가 발견되었고, W입자는 용접계면에 인접한 Cu에서 파괴를 일으키는 주요인이 된다.
4. Cu-W/Cu 마찰용접부의 최고 인장강도는 회전속도

2000rpm, 마찰시간 1.0초, 압셋시간 5초, 마찰압력 40MPa, 압셋압력 100MPa인 조건에서 얻어졌고, Cu 모재 인장강도(310MPa)의 87%에 해당하는 269MPa로, 실용화할만한 강도를 나타낸다.

참고 문헌

1. D. E. Spindler, "What Industry 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.