

동-텅스텐 소결합금(Cu-W)과 동(Cu)의 마찰용접 특성에 미치는 업셋압력의 영향에 관한 연구

강성보* · 민택기**

Effects of Upset Pressure on Weldability in the Friction Welding of Cu to Cu-W Sintered Alloy

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

Key Words : Tough pitch copper(정련동), Charpy impact test(샤르피 충격시험), Thermocouple (열전대), Brake time(브레이크 타임), Softening point(연화온도), Dispersion(분산)

Abstract

A copper-tungsten sintered alloy(Cu-W) has been friction welded to a tough pitch copper in order to investigate the effect of upset pressure on friction weldability. Under the condition of friction time 0.8sec, upset pressure 150MPa, the tensile strength and Charpy impact value of the friction welded joint were 336MPa, 400KJ/m² respectively. And highest temperature of the weld measured was below 800°K which is very lower than melting point of Cu(1356°K). Under the same conditions, W grains picked up in Cu matrix from Cu-W profitably affected on these mechanical fracture, and were dispersed in Cu by plastic flow during brake time.

1. 서 론

동-텅스텐 소결합금(Cu-W)은 고압 차단기나 개폐기와 같은 고압 송배전 설비의 전기접점(electric contact)으로 사용되고 있다. 그러나 Cu-W는 매우 고가이기 때문에 Cu에 브레이징(brazing)으로 접합되어 왔으며, 국내외적으로 원가절감 및 접합성능 개선을 위해 이들의 접합방법이 마찰용접으로 대체되는 추세에 있다.

현재까지 Cu-W와 Cu의 마찰용접에 관한 몇몇 연구

들이 국내외적으로 수행되어 왔다. Aritoshi 등에 의하면, 인장시험의 경우 Cu-70wt%W와 무산소동 마찰용접부¹⁾는 용접계면으로부터 멀리 떨어진 무산소동의 열연화부에서 파단되나, Cu-50wt%W와 무산소동¹⁾, Cu-70wt%W와 정련동 마찰용접부²⁾는 용접계면 또는 이에 인접한 정련동의 열연화부에서 파단된다고 하였다. 또한, 순 텅스텐과 무산소동³⁾의 경우에도 접합이 어렵고, 인장강도나 충격강도에 있어 모재와 동등한 성능을 얻기 어려운 실정이다. 이러한 경우의 문제점은 마찰용접 과정 중 동-텅스텐 소결합금 및 텅

* 1999년 5월 20일 접수

* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

** 정회원, 충남대학교 기계공학과

민택기 : taegki@hanbat.chungnam.ac.kr

스텐으로부터 탈락된 W 입자가 강도 및 파단에 미치는 영향이 크다는 것을 의미하고 있다. 따라서 전기접점 용으로 가장 많이 쓰이고 있는 Cu-70wt%W와 정련동 사이의 신뢰성있는 접합이 요구된다.

본 연구에서는 Cu-70wt%W(이하, Cu-W로 약칭)와 정련동(이하, Cu로 약칭)의 접합에 마찰용접을 채택하고, 이 경우의 업셋압력이 접합강도와 파괴특성, 그리고 W립의 분포에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료중 Cu-W는 W 입자를 70wt% 함유하는 Cu-70wt%W이고, Cu는 정련동(ETPC)이었다. 두 재료의 기계적 성질과 화학 성분을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Charpy impact value (KJ/m ²)	Shear strength (MPa)	Vickers hardness (Hv)
Cu-W	449	1180	31	378	225
Cu	311	765	1025	196	106

Table 2 Chemical composition of materials(wt%)

Materials	W	Fe	O	S	Pb	Cu
Cu-W	70	-	-	-	-	30
Cu	-	0.0006	0.037	0.0005	0.0002	Bal.

모든 용접 시험편은 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉으로서, 마찰용접 직전에 시험편의 용접면을 선삭 가공한 다음 아세톤으로 세척하였다.

마찰용접부의 인장시험에는 만능 재료 시험기를 사용하였고, 인장시험편은 Fig. 1과 같이 접합면의 강도를 측정하기 위하여 계면부에 R노치를 가공하였다.

충격시험에는 Fig. 2와 같은 형상과 치수를 갖는 V노치 Charpy 충격시험편을 사용하였다.

경도시험에는 마이크로 비커어즈 경도시험기를 사용하였으며, Cu-W 측은 하중 200g으로, Cu 측은 하

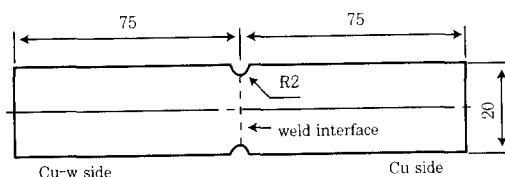


Fig. 1 Shape and dimension of tensile test specimen(unit : mm)

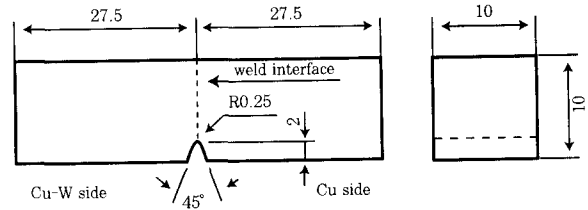


Fig. 2 Shape and dimension of impact test specimen(unit : mm)

중 100g으로 시험하였다.

마찰용접부의 온도측정을 위해 Fig. 3과 같이 Cu-W측의 마찰면으로부터 각각 1.5mm, 4.0mm, 15.0mm 떨어진 위치에 크로멜-알루멜 열전대(K 타입)를 10mm 깊이로 삽입하였다. 사용된 열전대(thermocouple)는 각 도선의 직경이 0.2mm이었고, 두께 0.2mm, 외경 1.6mm, 길이 100mm의 스테인리스 튜브로 둘러싸인 프로브(probe) 타입이었다. 온도 데이터는 PC에 장착된 데이터 보드를 통해 받아들여진 다음, 시간-온도 곡선으로 출력되었다. 단, 소프트웨어의 한계 상 샘플링은 1Hz로 제한되었다.

마찰용접기(남선기공 Model : NSF - 30H)는 브레이크 타입(brake type)이었다. 참고문헌⁴⁾을 통하여 적절한 압력과 시간 범위를 설정하였으며, 온도 측정의 경우를 제외하고는 회전부 유압척에 Cu-W를, 고정부 유압척에 Cu를 각각 물렸다. 또한, 브레이크 타임(t_b)의 시작과 함께 업셋압력이 작용되도록 하였다. 마찰용접 조건들을 Table 2에 나타내었다.

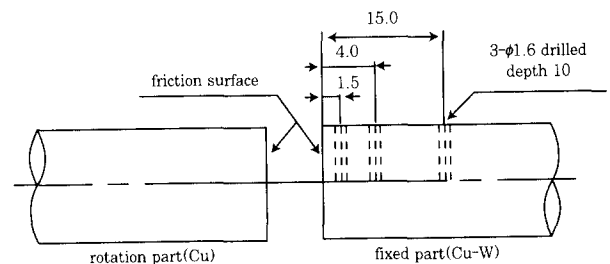


Fig. 3 Location of drill holes to insert themocouples

3. 실험결과 및 고찰

3.1 업셋길이

Fig. 4는 마찰시간 및 업셋압력이 총 업셋길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 마찰시간 및 업셋압력의 증가와 더불어 총 업셋길이는 비례적으로 증가하였다. 또한, 마찰시간이 길수록 업셋압력의 영향이 커짐을 알 수 있었다.

마찰시간이 2.4초일 때의 총 업셋길이는 업셋압력에

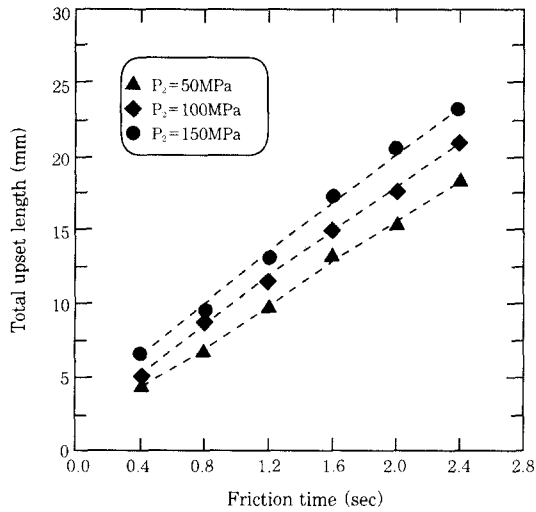


Fig. 4 Relation between upset pressure and total upset length

비례하여 매우 증가하였고, 업셋압력이 150MPa인 조건에서는 23.1mm에 달하였다.

3.2 인장시험

Fig. 5는 업셋압력과 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 업셋압력의 증가는 Cu-W/Cu 마찰용접부의 인장강도에 매우 큰 영향을 미쳤고, 업셋압력이 150MPa에 이르기까지는 지속적으로 인장강도가 증가하였다. 특히, 업셋압력이 150MPa 이상이고 마찰시간이 1.6초 이하인 조건에서는 용접재의 강도가 Cu모재의 인장강도와 동등하거나 그 이상이었다.

본 연구에서 도입한 실험조건 중에서 가장 높은 인장강도는 업셋압력 150MPa, 마찰시간 0.8초인 경우로

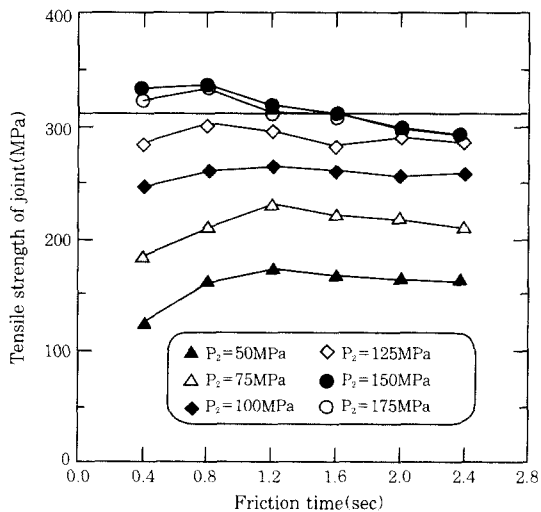


Fig. 5 Relation between upset pressure and tensile strength

서 이 때의 인장강도는 336MPa이었다. 이 값은 Cu 모재의 인장강도(311MPa)보다 훨씬 높고, 지금까지 보고된 Cu-W/Cu 접합부의 강도 중 가장 높다. 이러한 조건에서 마찰용접한 시험편을 표준 시험편으로 가공하여 별도의 인장시험을 한 결과, 용접계면으로부터 7~8mm 떨어진 Cu의 열연화부에서 파단이 일어났다.

한편, 각각의 업셋압력에 대해서 최고의 인장강도를 나타내는 마찰시간이 존재하였고, 업셋압력이 50~100MPa일 때에는 1.2초, 업셋압력이 125~175MPa일 때에는 0.8초이었다. 이는 업셋압력이 증가할수록 적은 마찰 가열시간만으로도 높은 인장강도를 얻을 수 있음을 의미한다.

3.3 충격시험

Fig. 6은 업셋압력과 충격 값과의 관계를 나타낸 것으로, 이 때의 마찰시간은 0.8초이었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Cu-W/Cu 마찰용접부의 충격 값에 미치는 업셋압력의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

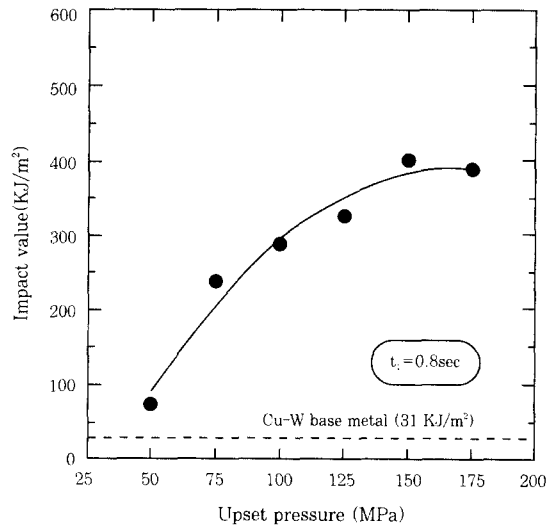


Fig. 6 Relation between upset pressure and charpy impact value

인장강도와 비교할 때, Cu-W/Cu 마찰용접부의 충격 값은 업셋압력의 증가와 더불어 더욱 큰 폭으로 증가하였고, 업셋압력 150MPa에서 400KJ/m²의 최대 값을 기록하였다.

이 값은 Cu 모재의 충격 값(1025KJ/m²)보다 크게 낮았으나 Cu-W 모재(31KJ/m²)의 13배 정도로 훨씬 높았다. 또한, 모든 시험편의 충격값은 업셋압력에 상관 없이 Cu-W 모재보다 훨씬 높은 값을 나타내었다.

Katoh 등⁴⁾의 연구에 의하면, Al기 Al₂O₃ 파우더 복합재료와 A5052의 마찰용접에서 용접부 충격 값의 최대치는 경한 재질인 복합재료 모재(119KJ/m²)의 70% 정도이다. 따라서 이종재 마찰용접부의 충격 값이 만족스러운가 여부는 경질재료 측 모재의 충격 값에 의해서도 크게 좌우된다고 할 수 있다.

결국, Cu-W/Cu 마찰용접부의 충격값은 경한 재질인 Cu-W 모재와 연한 재질인 Cu 모재 충격 값의 사이에 존재하며, 상당히 만족할 만한 값을 가진다고 할 수 있다.

3.4 파면분석

Photo 1은 업셋압력의 변화에 따른 Cu-W측 인장 파면과 SEM 사진이다.

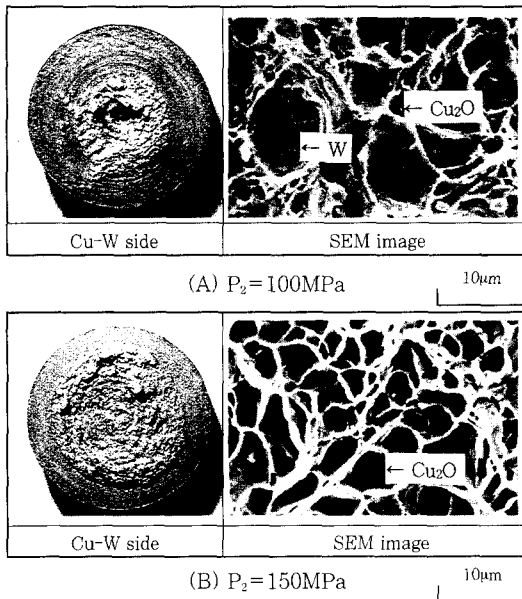


Photo. 1 Tensile fracture surfaces($t_1 = 0.8\text{sec}$)

파면의 중앙에는 덩플이 형성되었으며, 파면에서 덩플의 면적분율은 업셋압력이 100MPa인 조건에서 약 30%, 업셋압력이 150MPa인 조건에서는 약 70%로 업셋압력이 높을수록 덩플파면이 많아지는 경향이 있었다. 또한, 업셋압력이 150MPa인 경우에는 덩플외벽의 두께가 두껍고 비교적 균일하게 나타났다. 파면상에서 덩플을 제외한 평평한 부분은 용접계면에서 수십 µm 이내의 Cu에서 파단된 부분으로, 이러한 파면에서는 다수의 W 입자가 발견되었고, 이들이 용접계면에 인접한 Cu부의 파단을 유발한다고 보고되어 왔다^{2,5)}. 그러므로 업셋압력의 증가는 Cu-W/Cu 마찰용접부의 강도에 긍정적인 영향을 미친다고 할 수 있다.

Photo 1의 SEM 사진은 파면의 덩플 원주부분에 해

당하는 것으로, 두 파면 모두 연성파단임을 알 수 있다. 업셋압력이 100MPa인 조건에서는 (A)에 나타내듯이 파면의 덩플 하단부에서 동산화물(Cu₂O)⁶⁾과 함께 간헐적으로 W립이 발견되는 반면, 업셋압력이 150MPa인 조건에서는 (B)에 나타내듯이 동산화물만이 존재하는 경향이 있었다.

따라서 업셋압력이 150MPa인 조건에서는 파면의 원주부를 제외하고는 W립이 파면에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다.

Photo 2는 업셋압력 100MPa 및 150MPa인 경우의 Cu-W 측 충격파면과 SEM 사진이다.

충격시험편의 파단면과 측면사진으로부터 알 수 있듯이, 업셋압력이 100MPa인 조건에서는 파면 상에 상당량의 덩플이 형성되었고, 업셋압력이 150MPa인

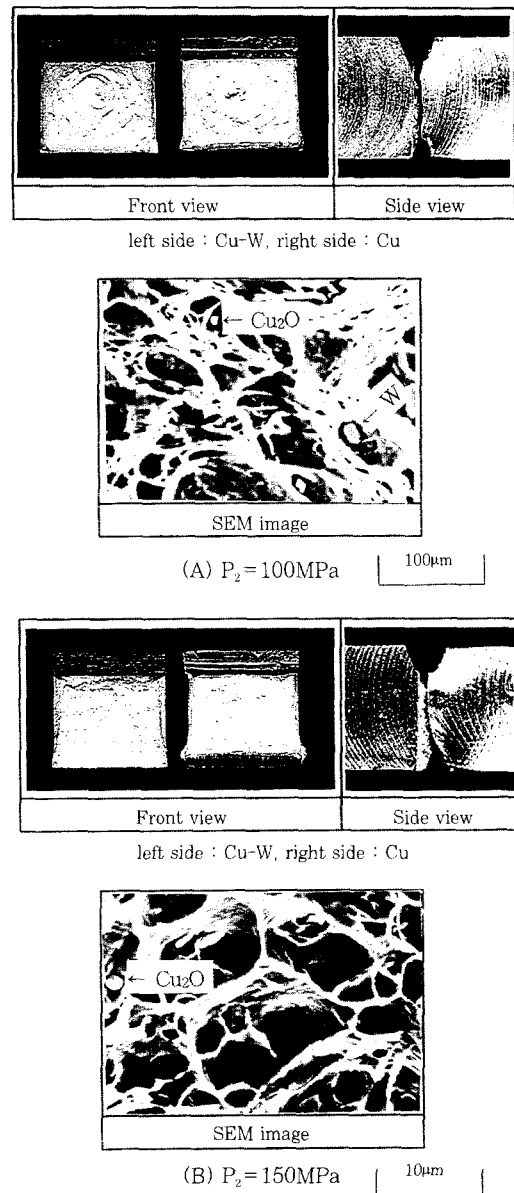


Photo. 2 Impact fracture surfaces($t_1 = 0.8\text{sec}$)

조건에서는 파면의 대부분이 딴플로 이루어져 있다. 또한, 압력 150MPa인 조건에서는 100MPa인 조건보다 횡방향 수축량(lateral expansion)이 컸고, plastic hinge 부분이 두드러지게 나타났다. 두 조건 모두 균열은 노치 하단부에서 시작되어 Cu의 열연화부로 이어졌고, 압력 150MPa인 조건에서는 열연화부 깊숙히 균열이 전파되었다. 따라서 이러한 조건에서는 충격 흡수 에너지가 크다고 할 수 있다. 참고로 Cu-W 모재는 노치 하단부에서 수직으로 균열이 전파되었고, W립과 W립 사이로 균열이 진전된 벽개 취성파면이었다.

Photo 2의 SEM 사진은 노치 바로 아래의 딴플영역으로, 두 조건 모두 연성파면임을 알 수 있다. 인장파면에서의 경우와 마찬가지로, 압력 100MPa인 조건에서는 파면의 딴플 하단부에서 동산화물과 함께 간헐적으로 W립이 발견되었으며, 압력 150MPa인 조건에서는 동산화물만이 존재하였다.

따라서 가압력의 영향을 크게 받는다고 생각되는 파면의 중앙부와 압력이 높은 조건에서 생성된 파면 중앙부의 큰 딴플 사이에는 상관관계가 있으며, 이러한 영역에서는 W립이 파괴의 기점으로 작용하지 않는다고 생각된다.

3.5 마찰용접부의 온도분포

Fig. 7은 Cu-W/Cu의 마찰용접 과정 중에 열전대를 사용하여 측정된 Cu-W 측 온도분포 측정 결과이다. 이 때의 마찰시간은 0.8초이었으며, 측정된 브레이크

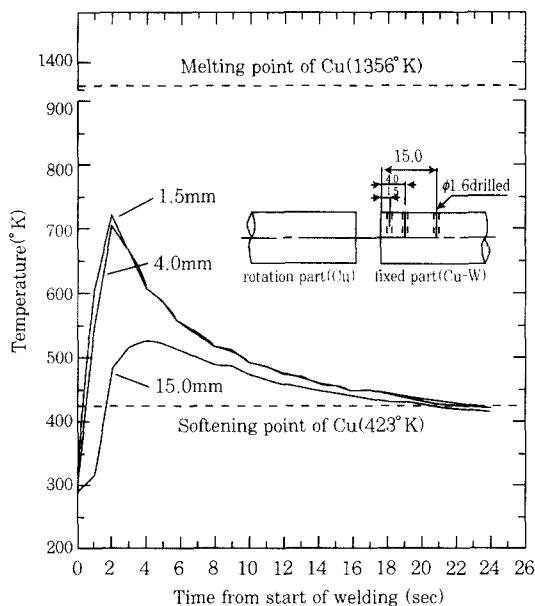


Fig. 7 Temperature-time histories ($t_1=0.8\text{sec}$, $t_b=0.8\text{sec}$, $P_2=150\text{MPa}$)

이크 타임(t_b)은 0.8초, 압력 150MPa로 인장 강도 및 충격 값이 가장 높았던 조건이다.

용접계면으로부터 가장 가까운 1.5mm 떨어진 위치에서의 온도는 마찰의 시작과 함께 급격히 상승되었고, 2초 후 최고 723°K에 도달했다. 용접계면으로부터 4.0mm 떨어진 위치에서는 온도 상승률과 최고 온도에 있어서 1.5mm 떨어진 곳에 비해 약간 낮았으며, 2초 후 최고 707°K에 도달했다. 그리고 용접계면으로부터 15.0mm 떨어진 위치에서는 온도 상승률이 이보다는 완만하였고, 4초 후 최고 522°K에 도달하였다.

주어진 마찰시간과 브레이크 타임(감속과정)을 고려해 볼 때, 측정된 최고 온도인 723°K는 스피들의 회전이 완전히 멈추고 0.4초가 경과한 후의 냉각과정 중의 온도이다. 또한, 마찰의 시작 후 1~2초 사이에서도 급격하게 온도가 상승된 점으로 미루어 볼 때, 브레이크 타임 중에도 지속적으로 온도가 상승되었다고 생각된다. 이러한 원인은 마찰시간이 짧아 온도 상승이 적었고, 스피들의 감속과정인 브레이크 타임이 온도 상승 요인으로 작용하였기 때문이다. 만일, 긴 마찰시간을 적용하여 용접부의 온도가 정상상태에 도달했다면, 마찰시간의 종료와 함께 최고온도가 얻어졌을 것으로 생각된다. 예비실험 결과, 정상상태의 온도는 마찰시간이 4~5초 경과 후 Cu의 용융점(1356°K)에 가까운 1260°K까지 도달했다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, Cu-W의 열전도 특성 상 용접계면으로부터 1.5mm와 4.0mm 떨어진 곳에서의 온도차가 크지 않았다. 따라서 용접계면으로부터의 온도구배는 가파르지 않다고 생각되며, 이들의 냉각곡선을 고려해 볼 때, 용접계면에서의 최고 온도는 800°K를 넘지 않을 것으로 생각된다.

결과적으로, 0.8초의 짧은 마찰시간을 적용한 경우 Cu-W/Cu 마찰용접부의 최고온도는 Cu의 용융점(1356°K)과는 상당한 차이가 있으며, Cu의 연화온도(423°K)보다는 훨씬 높다.

3.6 경도시험

Fig. 8은 압력변화에 따른 Cu-W/Cu 마찰용접부의 경도시험을 나타낸 것으로, 이 때의 마찰시간은 0.8초이었다.

이 그림에서 알 수 있는 것처럼, Cu 측 열영향부는 열연화부를 형성하고 있으며, 그 쪽에 있어서는 압력에 따라 큰 차이가 없었다. 열연화부의 폭은 압력에 상관 없이 용접부의 중심부보다 원주부에서 1.0~1.5mm 더 넓었다. 그러나 열연화부에서의 경도는 압력과 측정 위치에 따라 다르게 나타나는데,

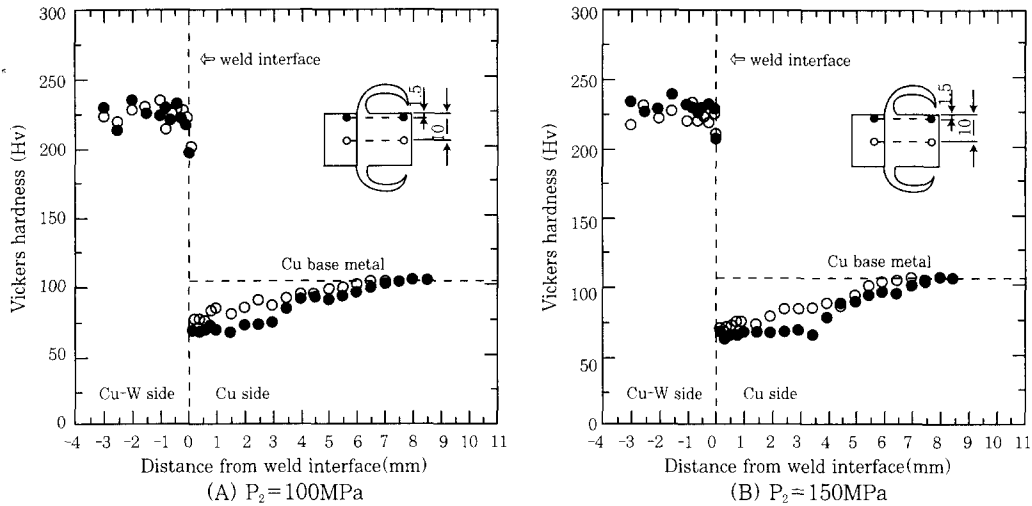


Fig. 8 Hardness distributions of friction welds($t_1 = 0.8\text{sec}$)

업셋압력이 100MPa일 때보다는 150MPa로 높을 때, 그리고 용접부의 중심부보다는 원주부에서 경도가 전체적으로 낮았다. 특히, 원주부에서는 경도가 크게 낮아지는 영역이 존재하였고, 이 영역의 폭은 업셋압력이 100MPa일 경우 3.0mm, 업셋압력이 150MPa일 경우에는 3.5mm였다.

위의 두 조건 모두 마찰시간이 0.8초로 동일하지만, 스피들의 감속과정인 0.8초의 브레이크 타임 중에 적용되는 압력이 서로 다르기 때문에 입열량의 차이가 존재한다. 그러므로 업셋압력이 150MPa인 조건에서는 입열량이 보다 많았고, 또한 플래시 배출에 의한 방열량도 많았다고 생각된다. 따라서 입열량의 증가에 의한 열연화부 폭의 증가는 플래시의 배출에 의해 제한된다. 또한, 업셋압력이 증가할수록 커지는 고온의 플래시는 자체의 잠열과 전도열로 용접계면에 인접한 Cu의 냉각을 제한시켜 열연화를 촉진하였다. 그러므로 업셋압력 150MPa의 조건에서는 전체적으로 경도가 낮아졌으며, 특히 플래시와 연결되어 있는 원주부의 열연화를 촉진한다고 생각된다.

한편, Cu-W 층의 경도는 모재의 특성 상 편차가 컸고, 경도분포에 있어 특이한 변화를 발견할 수 없었다. 또한, 용접계면에 가장 가까운 Cu에서는 경도가 매우 큰 폭으로 상승하였는데, 이것은 Cu-W로부터 떨어져 Cu에 혼입된 W들이 영향을 미친 것으로 생각된다.

3.7 현미경 조직

Photo 3은 Cu-W/Cu 마찰용접 계면에서 용접 시험편의 중심부로부터 원주방향으로 약 2mm 떨어진 부분의 500배 SEM 사진이다.

업셋압력이 100MPa와 150MPa인 조건 모두 Cu-

W로부터 탈락된 W립이 용접계면으로부터 100 μm 정도 걸쳐 Cu 내에 혼입된 것을 알 수 있다. 업셋압력의 증가가 이러한 W립들을 플래시로 배출시켜 Cu 내로의 혼입거리를 감소시키고, 이것이 Cu-W/Cu 마찰용접부의 인장강도에 긍정적 영향을 미친다는 것은 지금까지의 문헌에서 보고되어 왔다^{2,5)}.

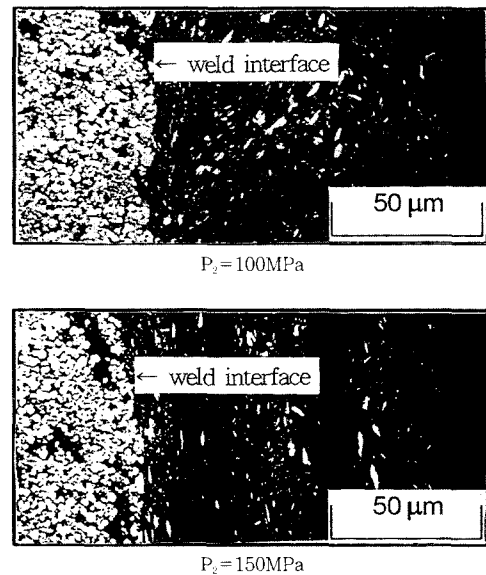


Photo 3 SEM image of weld interface($t_1 = 0.8\text{sec}$)

그러나 본 연구의 범위 내에서 업셋압력 100MPa까지는 W립의 혼입거리가 감소하였으나, 그 이상의 압력에서는 용접부의 원주로부터 중심부에 이르기까지 큰 차이를 발견할 수 없었다. W립이 최대 거리로 혼입된 곳은 업셋압력에 관계없이 용접 시험편의 중심부로부터 양 원주방향으로 2~4mm 떨어진 영역 내에 존재하였으며, 최대 혼입거리는 업셋압력이 50MPa인

조건에서 약 200 μ m이었고, 이들의 분포는 용접계면으로부터 50 μ m 이내의 영역에 집중되었다. 또한, 압력 100MPa인 조건에서는 최대 혼입거리가 약 140 μ m, 150MPa인 조건에서 약 130 μ m 정도로 Cu 내에서 비교적 균일하게 분포되었다.

Photo 3에서 알 수 있는 것처럼, 압력 100MPa인 조건에서는 Cu-W로부터 탈락된 W립이 Cu 내에서 소용돌이치는 모습이다. 압력 150MPa인 조건에서는 더욱 커진 Cu의 소성유동과 플래시 배출로 인해 이들이 원주방향으로의 층상구조를 가진다.

압력 100MPa 이상인 조건에서는 브레이크 타임(감속과정) 중에 더욱 커진 소성유동에 의해 Cu 내에 혼입되어 있는 W립들과 특히, Cu-W로부터 탈락되는 W립들이 Cu 내에서 균일하게 분산(dispersion)되면서 용접이 완료되었다고 생각된다. 그러므로 압력 100MPa인 조건에서 나타난 W립의 소용돌이치는 분산과정의 일부이고, 압력 150MPa인 조건에서 나타난 W립의 층상구조는 분산과정의 완료단계로 높은 가압력과 함께 새로운 Cu-W의 구조를 형성하여 강화된다고 할 수 있다. 반면, 압력 50MPa인 조건에서는 압력길이가 작기 때문에 W립이 Cu 내에 혼입된 거리가 용접계면으로부터 상당한 거리까지 존재하지만, 브레이크 타임 중의 소성유동이 적기 때문에 용접계면 근처에 밀집되어 나타난다고 생각된다.

결론적으로, 짧은 마찰시간(0.8초)과 브레이크 타임(감속과정)의 시작과 함께 적용된 높은 압력(150MPa)의 조건에서 얻은 Cu-W/Cu 마찰용접부의 인장, 충격에 대한 성능은 우수하였다. 그리고 위와 같은 사항은 Al기 복합재료와 Al 합금, 초경합금과 강 등의 접합에 고려될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기접점으로 사용되고 있는 동-텅스텐 소결합금(Cu-W)과 동(Cu)의 마찰용접에 미치는 압력영향에 대해서 조사하였고, 이것이 접합강도, 파괴 특성, 그리고 용접계면에서 W립의 분포에 미치는 영향을 다루었다. 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 인장강도는 압력 증가와 더불어 지속적으로 증가하였고, 마찰시간 0.8초, 압력 150MPa인 조건에서 최고치인 336MPa를 나타내었다.
- 2) 충격 값은 압력 증가와 더불어 더욱 큰 폭으로 증가하였고, 위와 동일한 조건에서 400KJ/m²의 최대 값을 기록하였다. 이 수치는 Cu 모재의 충격 값

(1025KJ/m²)보다 크게 낮았으나 취성적인 Cu-W 모재(31KJ/m²)의 경우에 비해 13배 정도로 훨씬 높았다.

3) 압력 150MPa인 경우에는 100MPa인 경우보다 인장, 충격파면의 중앙에서 훨씬 더 큰 덩플이 형성되었다. 압력 100MPa인 조건에서는 파면의 덩플에서 동산화물과 함께 W립이 발견되는 반면, 150MPa인 조건에서는 동산화물만이 존재하므로 파면의 원주부를 제외하고는 W립이 인장, 충격파면에 미치는 영향이 적었다.

4) 마찰시간 0.8초, 압력 150MPa인 조건일 때, 용접계면으로부터 Cu-W 쪽으로 각각 다른 거리에서 열전대로 측정된 최고온도는 용접계면으로부터 가장 가까운 1.5mm 떨어진 곳에서 723°K이었다. 이는 용접계면으로부터의 온도구배와 냉각곡선을 고려해도 Cu의 용융점(1356°K)과는 상당한 차이가 있다. 또한 0.8초 정도의 짧은 마찰시간에서는 브레이크 타임(감속과정)이 용접부의 온도 상승 요인으로 작용하였다.

5) 압력 증가할수록 커진 플래시는 자체의 잠열로 용접계면 근처와 원주부에서의 열연화를 촉진하였다. 또한, Cu 내에 혼입된 W입자는 용접계면에 인접한 Cu의 경도를 크게 상승시켰다.

6) 50MPa 정도의 낮은 압력에서 W입자가 Cu 내에 혼입된 거리는 약 200 μ m이었고, 그 분포 상태는 용접계면으로부터 50 μ m 거리 이내에 집중되었다. 그러나 압력 150MPa인 경우의 브레이크 타임 중의 소성유동은 W입자를 용접계면으로부터 약 130 μ m 떨어진 Cu 내에 균일하게 분산시켜 높은 가압력과 함께 새로운 Cu-W의 구조로 강화시켰다.

참 고 문 헌

1. 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, 第 6 卷, 第 1 號(1988), pp. 16-22
2. M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ekeuchi, "Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Tough Pitch Copper", Quarterly J. of Japan Welding Soc., Vol. 4(1986), No. 2, pp. 46-53
3. M. Aritoshi, K. Okita, K. Ikeuchi, M. Ushio, "Friction Welding of Pure Tungsten to Oxygen Free Copper with an Intermediate Layer", Welding International, Vol. 11, No. 5(1997), pp.

- 353-360
4. K. Kato, H. Tokisue, "Friction Welding of $Al_2O_3/6061$ Aluminium Alloy Composite to 5052 Aluminium Alloy", *Welding International*, Vol. 11, No. 7(1997), pp. 509-514
 5. 강성보, 민택기, "동-텅스텐 소결합금(Cu-W)과 동(Cu)의 마찰용접에서 마찰압력이 접합강도와 파단특성에 미치는 영향", *대한용접학회지*, 15-4(1997), pp. 90-98, 8월.
 6. M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. 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