

無酸素銅의 마찰 용접 특성에 관한 연구

정 호 신* ·篠田 剛**

(96년 11월 7일 접수)

Study on the Friction Welding Characteristics of Oxygen Free High Conductivity Copper

Ho-Shin Jeong* · Takeshi Shinoda**

Key Words : OFHC Copper(무산소동), Friction Welding(마찰용접), Friction Pressure(마찰 압력), Upsetting Pressure(업셋 압력), Friction Heat Input(마찰 용접 입열량)

Abstract

Copper and its alloy had been used widely because of its pronouncing characteristics on their high thermal and electrical conductivity. Various fusion welding methods, such as SMAW, SAW, GTAW, GMAW, Electroslag welding and so on are applied to weld copper and its alloy. But fusion welding of copper has so many welding problems. The most serious problems were poor penetration and high thermal contraction stress due to its high thermal conductivity and porosity could be formed by rapid cooling rate of fusion welding.

In order to avoid such fusion welding problems, preheating, peening and heat treatment must be applied to obtain sound weld joint of copper.

But preheating induce another welding problem such as grain coarsening of weld heat affected zone. This grain coarsening reduces ductility and strength of weld joint.

As described above, there are so many problems in fusion welding of copper.

In this view of point, friction welding of copper is tried to obtain sound weld joint of copper by reducing metallurgical problems.

This study introduced new concept of heat input for evaluating the friction weldability of copper.

As a result, weldability of copper could be evaluated by this new concept of heat input.

1. 서 론

동은 열전도도와 전기전도도가 매우 좋은 재료

일 뿐 아니라 해수나 기타의 각종 약품에 대한 내식성도 우수하기 때문에 이러한 특징을 이용하여 각종의 전기재료나 화학기기, 양조 설비, 해수

* 부경대학교 공과대학

** Nagoya 대학 공학부

용 기기, 박용부품 등에 적용되어 사용 분야가 매우 넓다¹⁾.

동과 동합금의 용융용접에는 다양한 방법이 적용되고 있으며 MIG, TIG, Gas 용접, SAW 및 Electroslag 용접이 사용되고 있다. 그러나 동의 열전도는 연강의 8배 이상, 알루미늄의 2배 정도이기 때문에 용융용접시에 충분한 용입이 얻어지기 위해서는 높은 온도로 예열할 필요가 있으며 이에 따라 열영향부가 매우 넓고, 이 부분의 결정립이 조립화되어 강도와 연성이 낮아진다^{2,3)}. 또한 열팽창계수가 연강보다 50% 정도 크기 때문에 용접과정중의 수축응력이 커질 우려가 있다.

따라서 용융용접하면 냉각에 의한 수축과 응력 집중에 의해 균열이 발생될 위험성이 크다. 특히 후판으로서 구속도가 클 경우나 동합금의 경우, 이러한 경향이 강하다. 또한 열 스트레인이 크기 때문에 적당한 크기의 gap을 가공할 필요가 있으며 용접시에 용입 부족, 슬래그 잔류 등의 결함이 생기기 쉽다⁴⁾. 또한 용융용접시에는 일반적으로 기공이 생기기 쉬우며 이것은 용융 동의 수소 용해도가 온도의 변화에 따라 급격하게 달라지기 때문이다. 순동의 경우에는 용접균열이 발생되기 어렵지만 동합금의 경우에는 고온 균열 감수성이 매우 높다. 이 때문에 균열을 방지하기 위하여 peening하여 결정립을 세립화하거나 입열량을 낮추어 과열을 방지하여야 하는 등 동과 동합금의 용융용접시에는 상기한 바와 같은 여러 사항을 고려하여야 한다.

한편 동과 동합금 또는 동과 이종재의 접합은 각종 stud bolt, 각종의 전기 회로용 부품,전극,원자력용의 가열 장치 및 가스 밸브 콘트롤러 등에 적용되고 있을 뿐 아니라 최근에는 우주 왕복선 냉각 장치의 냉각능을 높이기 위하여 열전도도가 좋은 동의 용접이 고려되고 있기 때문에 동의 마찰용접 적용 가능성이 점점 더 증가할 것으로 생각된다. 따라서 상기한 바와 같은 동 및 동합금의 용융 용접시에 발생하는 각종의 야금학적인 문제점을 해결하고, 동 및 동합금 용접시의 용접성 향상, 생산 원가의 절감 및 신뢰성 향상을 위하여 동의 용접에 마찰용접의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 동 및 동합금의 마찰 용접은 실시한

예가 드물 뿐만 아니라 거의 대부분의 경우, 동의 마찰용접 데이터는 know-how로 엄격하게 관리되고 있기 때문에 공표된 데이터⁵⁾가 매우 적은 편이다.

따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 동의 마찰용접시의 기본적인 현상의 파악과 현업에서 사용할 수 있는 유용한 데이터를 제공하기 위하여 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 무산소동 봉재로서 직경 18mm이다. Table 1에 본 실험에 사용한 무산소동 봉재의 화학성분을 나타낸다. 이 봉재를 75mm의 길이로 절단한 후 선반으로 가공하여 이 상태에서 마찰 용접하였다.

Table 1 Chemical composition of oxygen free copper

Chemical composition, wt%	
Cu	Ca
99.9	0.1

2.2 마찰용접 조건 및 인장시험

마찰 용접시의 용접조건에 관한 인자로는 마찰 압력 (P_1), 업셋 압력 (P_2), 마찰 시간 (t_1), 업셋 시간 (t_2) 등이 있으며, 이들 인자의 상호 관계를 조사하여 용접성을 평가하여야 한다.

본 연구에서는 마찰 용접시의 상기의 네 가지 인자를 조정한 경우(시험조건 C1-C5)와 마찰용접시의 총변위를 제어한 경우(시험 조건 C6-C10) 등 크게 두 가지로 나누어 용접특성을 조사하였으며 인장시험에 의해 용접성을 평가하였다. 인장 시험편은 JIS 4호 시험편으로서 평행부의 직경 8mm, 평행부의 길이는 60mm이며 인장시험시의 표점 길이는 28mm이었다. 또한 마찰 용접과정을 video촬영하여 마찰 용접과정중의 열적, 기계적인 상황의 변화를 관찰하였으며, 이 과정을

video printer를 사용하여 컬러 프린팅하였다.

Table 2는 마찰 용접 조건을 나타낸 것으로 마찰압력 P_1 은 9.92~12.4kg/cm², 업셋 압력 P_2 는 12.4~18.6kg/cm², 마찰시간 t_1 은 3~5초, 업셋 시간 t_2 는 2초로 하였다.

Table 2 Friction welding conditions of oxygen free copper

Sample No.	Friction Press (MPa)	Upsetting Press (MPa)	Friction time (t ₁) (sec)	Upsetting time (t ₂) (sec)	rpm	Upset distance (mm)
C1	12.2	12.2	3	2	200	
C2	9.92	12.2	3	2	300	
C3	9.92	12.2	5	2	200	
C4	9.92	12.2	3	2	200	
C5	9.92	12.2	3	2	1300	
C6	9.92	12.2	3	2	1800	
C7	9.92	12.2	-	2	1800	2low speed
C8	9.92	12.2	-	2	1800	2low speed
C9	12.2	12.2	-	2	1800	1low speed
C10	12.2	12.2	-	2	1800	15low speed

2.3 마찰용접부 특성 평가를 위한 용접입열 개념의 도입

마찰용접 방식에는 플라이 휠 방식(flywheel type)과 연속구동 방식(continuous drive type)이 있다. 플라이 휠 방식의 경우에는 용접 인자가 비교적 단순하여 용접 입열에 관한 식이 있지만 연속구동 방식의 경우에는 많은 인자가 작용하기 때문에 용접 입열의 개념을 도입한 식이 매우 드물 뿐 아니라 이미 존재하는 식의 경우에도 식이 매우 복잡하여 실용성이 적은 경우가 많다^(6,7). 이러한 측면에서 본 연구에서는 연속구동 방식의 경우에 적용할 수 있는 용접입열에 관한 식을 제안하여 이의 적용을 검토하였다. 이론적으로 구한 입열량 J와 기계적 특성 사이의 상관관계를 조사하여 적정 입열 범위를 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 마찰용접조건을 정리한 것이다. 구리

합금의 마찰용접은 마찰용접 조건에 매우 민감하며 마찰용접조건이 미묘하게 변하더라도 플래쉬의 형상이나 용접성이 매우 달라짐을 알 수 있었다. 마찰 용접 조건 C2와 C3 및 C4를 비교해 보면 마찰발열 시간이 각각 3,4,5초로 달라질 뿐 다른 조건은 동일함에도 불구하고 마찰용접부의 플래쉬의 형상과 용접 상태에 현저한 차이가 존재한다.

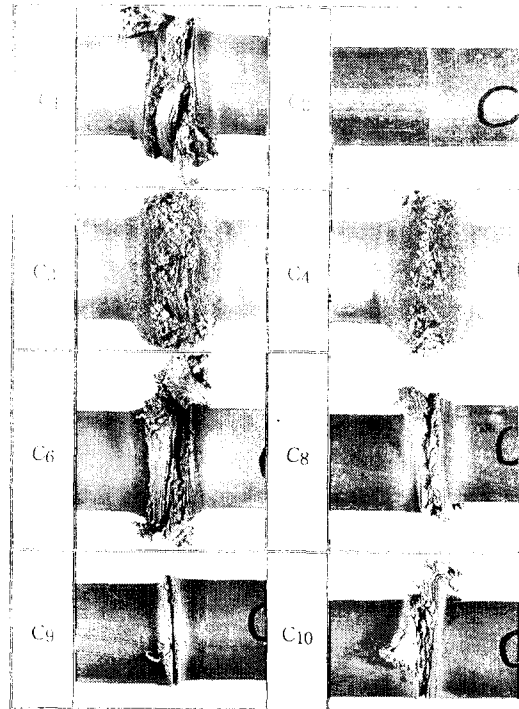


Fig. 1 Shape of flash after friction welding

Table 2의 조건으로 마찰용접하였을 때의 용접부의 외관을 Fig. 1에 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 C1의 조건은 발열 과다의 상태로 판단되어 순차적으로 C2, C3, C4와 같이 마찰용접 조건, 즉 마찰압력 P_1 , 업셋압력 P_2 및 마찰시간 t_1 을 변화시킨 결과, C2의 경우는 발열 과소이나 C3, C4의 경우에는 발열 과다로 인하여 용접부와 열영향부의 폭이 매우 넓어짐을 알 수 있다. 이 경우의 용접중의 상황을 비디오로 촬영

하여 분석한 결과, 용접 입열이 과다할 경우에는 동의 고온강도가 낮기 때문에 마찰 발열 초기단계에서 고온으로 가열된 선단 부분이 좌굴변형하여 건전한 용접부를 얻기가 어렵다는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 마찰용접중의 발열 상황의 변화를 Fig. 2에 나타낸다.

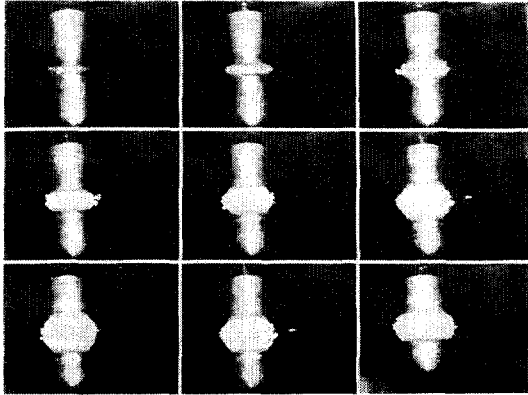


Fig. 2 Sequential change on friction heating for specimen C2

상기한 바와 같은 결과를 바탕으로 건전한 용접부를 얻기 위하여 마찰용접부의 변위량을 제어하므로써 마찰용접하여 이 두 가지 경우에 대한 비교 검토를 하였다. Table 2중의 용접조건 C6-C10은 변위량을 제어한 것으로 C1-C5에 비해 가열 범위가 좁고 플래시도 작아짐을 알 수 있다. 또한 마찰용접조건 C8, C9, C10의 경우에는 마찰용접 종료후에 플래시가 거의 산화되지 않아 입열조건이 적정함을 알 수 있었다. 따라서 동의 마찰용접시 변위 제어가 유용함을 알 수 있었으며 후술하는 바와 같이 인장 시험 결과도 이와 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 인장시험후의 시험편의 파단 상황을 나타낸 것으로 용접조건 C1, C8, C9, C10은 전형적인 연성파단 양상을 나타내고 있으나 C2, C6의 경우에는 거의 파단부가 평탄한 형상을 보이고 있다. 이와 같이 용접조건에 따라 용접부의 성능

이 현저하게 달라짐을 알 수 있다.

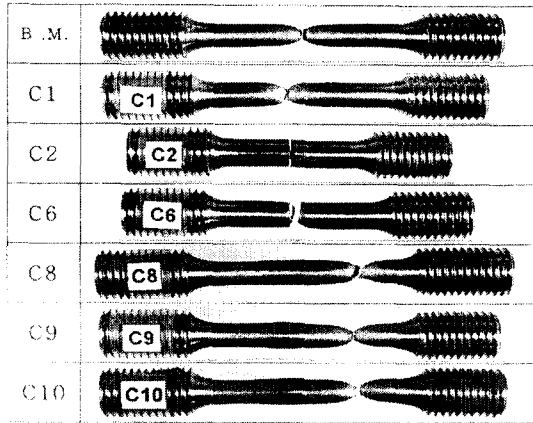


Fig. 3 Appearance of friction welded joints after tensile test

인장시험 결과 및 인장강도와 입열량 J와의 관계를 각각 Table 3과 Table 4에 요약하여 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 용접조건 C8, C9, C10의 경우 이음 효율이 약 98% 정도로서 거의 100%에 접근하며, 연성도 우수함을 알 수 있었다.

Table 3 Tensile testing results of friction welded joints

Specimen No.	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Remark	Joint efficiency (%)
C1	227	42.3	70.3	cup & cone	92.7
C2	57	1.8	0.4	flat	23.3
C6	178	20.3	30.4	flat	72.7
C8	240	43.5	80.9	cup & cone	98.0
C9	241	48.0	84.4	cup & cone	98.4
C10	241	49.5	84.4	cup & cone	98.4
base metal	245	59.3	83.5	cup & cone	

이와 같이 동의 마찰용접에는 마찰용접조건이 매우 중요한 인자가 되며 그 중에서도 특히 변위량 제어가 유효하며, 이 조건으로 용접하면 열영향부의 폭이 상당히 좁고 건전한 용접부가 얻어짐을 알 수 있었다.

Table 4 The relation between calculated heat input and tensile strength

Specimen No.	Area (cm ²)	δ (cm)	P=P ₁ +P ₂ (MPa)	$\frac{2P_1P_2}{P}$ (MPa)	P-2 $\frac{P_1P_2}{P}$ (MPa)	J (N·cm)	σ _u (MPa)
C1	254	0.21	3.038	1.458	1.588	84.68	227
C2	254	0.05	2.187	1.080	1.107	14.06	57
C6	254	0.26	2.187	1.080	1.107	73.14	178
C8	254	0.19	2.187	1.080	1.107	53.44	240
C9	254	0.122	2.430	1.215	1.215	37.66	241
C10	254	0.155	2.430	1.215	1.215	47.83	241

재료의 마찰용접성의 평가는 재료에 부여된 열량이 중요한 영향을 미치지만 현재까지 마찰용접 입열량에 관한 개념이 정립되어 있지 않다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 입열량을 간편하게 계산할 수 있는 식을 도입하여 입열량과 마찰용접성과의 상관관계를 정립하고자 하였다.

연속구동 방식인 경우의 용접 입열을 J(N·cm), 용접 대상재의 단면적을 A(cm²), 용접후의 길이 변화량을 δ(cm)라고 하면

$$J = P_1 A \delta_1 + P_2 A \delta_2$$

$$= A(P_1 \delta_1 + P_2 \delta_2)$$

여기서 P₁, P₂는 각각 마찰압력과 업셋 압력이다. 또한 각종의 연구결과^(8,9,10)에 의하면 마찰용접시 같은 길이 변화량 δ와 비례관계에 있기 때문에 t₁, t₂는 δ에 포함되는 인자라고 할 수 있다.

또 P = P₁+P₂라 두고 마찰 발열 단계와 업셋 단계에서의 길이 변화량은 각각 압력 분률에 비례한다고 가정하면

$$\delta_1 = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \delta, \quad \delta_2 = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \delta \text{ 이고 이}$$

식을 위 식에 대입하면

$$J = A \delta \left(P_1 \frac{P_1}{P_1 + P_2} + P_2 \frac{P_2}{P_1 + P_2} \right)$$

$$= A \delta \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_1 + P_2}$$

$$= A \delta \frac{P^2 - 2P_1 P_2}{P}$$

$$= A \delta \left(P - 2 \frac{P_1 P_2}{P} \right) \text{로 되어 마찰용접시의}$$

압접조건 P₁, P₂ 및 길이 변화량 만으로서 입열량을 계산할 수 있다.

Fig. 4는 입열량 J와 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입열량이 매우 적을 경우에는 인장강도가 매우 낮고 입열량이 증가하면 인장강도가 증가되는 경향을 나타낸다. 그러나 입열량이 매우 높은(즉 입열과다가 되면) 마찰용접 조건 C1과 C6의 경우, 인장강도가 낮아짐을 알 수 있다.

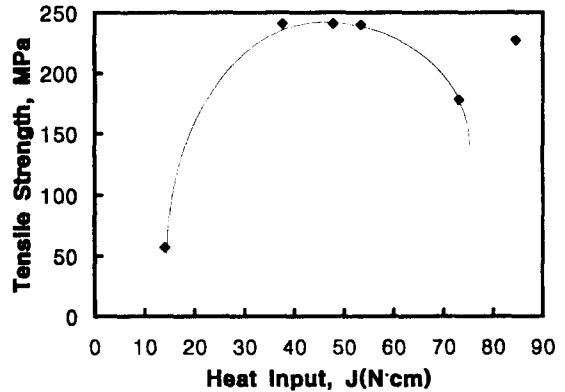


Fig. 4 The effect of welding heat input on tensile Strength of OFHC copper

이와 같이 시험편 C1과 C6와 같이 입열 과다인 경우에는 용접부에 국부적으로 주상정이 생성되거나 결정립이 조립화할 가능성이 크기 때문에 기계적인 특성이 저하되는 것으로 사료된다.

동의 경우 열전도도가 매우 높기 때문에 마찰 발열후 급속히 발열 범위가 확대되며 짧은 시간에 업셋 가능한 상태로 된다. 그러나 이와 같이 짧은 시간에 발열 범위가 넓어진다는 것은 그만큼 용접조건의 조절이 어려워진다는 의미이기도 하다. 특히 마찰압력과 업셋압력을 가할 경우에는 용접부의 범위가 넓어지고 이에 따른 급속조직적인 문제 즉 결정립이 조립화될 가능성이 커지게 된다. 이에 반하여 변위량을 제어한 경우에는 용접부의 범위가 비교적 좁고 용접부의 이음 효율이 높아짐을 알 수 있었다. 이와 같이 입열량에 관한 인자인 J를 사용하면 적정 입열 범위 및 최

적의 용접이음 효율이 얻어지는 용접조건을 선정할 수 있을 것이다.

4. 결론

동의 마찰용접에 관한 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

동은 열전도도가 높기 때문에 용융용접하기 위해서는 예열하거나 용접입열량을 엄밀하게 제어하여야 하는 등 여러 가지 사항을 고려하여야 하지만 마찰용접하면 동의 열전도도가 높다는 점 자체를 유효하게 이용할 수 있기 때문에 단시간에 경제적이고 효율적이고 건전한 용접부를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 동의 마찰용접시, 변위 제어법은 실제적이고 효율적인 방법이 될 수 있으며 용접부의 이음 효율이 모재와 동등한 건전한 용접부가 얻어지는 방법임을 확인할 수 있었다.

또한 연속구동식 마찰용접의 경우에는 용접성에 미치는 인자가 매우 많고 복잡하지만 본 연구에서 도입한 입열량 계산식 J를 사용하면 마찰용접시의 적정용접 범위를 간편, 신속하게 선정할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) West E.G., "Copper and its alloy", Ellis Horwood Limited, pp. 13-21, 1982
- 2) 鈴木春義, 溶接ハンドブック, "銅とその合金の溶接", 山海堂, pp. 667-692, 1978
- 3) 宮尾信昭, "銅及び銅合金の溶接", 日本溶接學會 東海支部資料, 1986.2
- 4) AWS, Welding Handbook, vol. 4, 7th ed., "Copper alloys", pp. 270-297, 1982
- 5) 摩擦壓接協會, 摩擦壓接 データシート集, p.2, 1992.3
- 6) 篠田剛, 星野克英, 山下昇一, "摩擦壓接を利用した鑄鐵ブロックの補修溶接, 摩擦壓接, vol.2.2, pp. 63~69, 1995.9
- 7) 篠田剛, 星野克英, 山下昇一, "鑄鐵同種材の摩擦壓接", 摩擦壓接, vol. 2.1, pp. 23~29, 1995.6
- 8) 朝比奈敏勝, 加藤數良, 時末光, "AZ31Mg合金の摩擦壓接", 輕金屬, vol.41-10, pp. 674~676, 1991
- 9) 加藤數良, 小野田健 등, "Al-Si系急冷凝固粉末冶金合金の固相溶接", 輕金屬, vol.41-10, pp. 693~698, 1991
- 10) 加藤數良, 時末光, "アルミニウム合金異形材の摩擦壓接", 輕金屬, vol.41-12, pp. 808~814, 1991