

가스메탈아크용접에서 콘택트팁의 신뢰성

김희진 · 김남훈 · 유희수 · 고진현

Reliability of Contact Tip for Gas Metal Arc Welding

Hee-Jin Kim, Nam-Hoon, Kim Hoi-Soo Ryoo and Jin-Hyun Koh

1. 서 론

와이어를 용가재로 사용하는 가스메탈아크(gas metal arc, 이하 GMA이라고 함)용접에서는 용접와이어가 일정속도로 송급되어 와이어 선단에서 용융되어 용융풀로 이동한다. 와이어를 용융시키는 열은 용접전류에 의해 발생하는 용접아크의 열과 와이어 자체에서 발생하는 저항열로부터 제공된다. 이러한 GMA용접이 안정적으로 진행되기 위해서는 와이어 용융속도가 와이어 송급속도와 일치하여야 하며, 이러한 상황이 되도록 와이어에 용접전류가 적절히 공급되어야 한다. 이러한 용접전류는 용접전원으로부터 공급되어 용접토치의 최선단에 위치한 콘택트팁(contact tip)을 통하여 와이어에 전달된다. 따라서 콘택트팁은 '와이어를 용융풀로 유도하는 역할'과 '용접전류를 와이어에 전송하는 역할'을 담당하게 된다. 그런데 콘택트팁을 장시간 사용하게 되면 이러한 기능을 적절히 수행하지 못하게 되고 궁극적으로는 팁을 교환하게 되는데, 이러한 교환주기를 신뢰성공학에서는 수명(life time)이라고 한다.

신뢰성 공학에서 '신뢰성'이라 함은 '어떤 재료나 부품이 주어진 환경에서 고장 없이 일정기간 동안 요구되는 성능을 유지하는 특성'이라고 정의한다. 그리고 고장에 의해서 더 이상 사용하지 못하게 되는 시점을 수명(life time)이라고 정의한다. 본 기술보고에서는 이러한 신뢰성 개념에 의거하여 콘택트팁의 사용환경, 콘택트팁에서 발생하는 고장 유형, 그리고 콘택트팁의 수명 및 수명향상 방안에 대해 기술하고자 한다.

2. 콘택트팁에 사용되는 재료

앞에서 설명한 바와 같이 콘택트팁의 중요한 기능은 '용접전류를 와이어에 전송'하고 '와이어를 요구하는 위치로 유도'하는 것이다. 첫 번째 기능을 원활히 수행하기 위해서 콘택트팁에 사용되는 재료는 전기전도도

(electrical conductivity)가 높아야 한다. 그렇지 못하면 자체에서 저항열이 발생하고, 팁과 와이어 사이에서 미세 아크가 발생하여 와이어 송급성에 영향을 준다. 그리고 두 번째 기능을 적절히 수행하기 위해서는 콘택트팁의 구멍이 원형을 오래도록 유지하고 있어야 한다. 콘택트팁의 구멍이 마모되어 형상이 변하게 되면 와이어 선단의 위치가 용접선을 벗어나게 되고, 심한 경우에는 용접비드가 용접선을 따라가지 못하는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 예방하기 위해서 콘택트팁의 재질은 마모에 대한 저항성, 즉 내마모성이 우수하여야 한다.

일반적으로 콘택트팁에 사용되고 있는 재질은 구리(Cu)를 기본으로 하는 합금재료가 사용되고 있는데, 이는 Fig. 1에서 보듯이 순수금속인 경우 구리(Cu)의 전기전도도가 은(Ag) 다음으로 가장 우수하기 때문이다. 콘택트팁은 내마모성이 우수하여야 하기 때문에 순수구리 보다는 경도가 높은 구리합금이 주로 사용되고 있다.

Table 1은 구리합금 중에서 일부 규격화되어 있는 재료의 화학조성을 보여주고 있다. 이들 중에서 콘택트팁 재료로 사용되고 있는 재료는 전기동(C 11000), 고인탈산동(C 12200), 크롬동(C 18200), Cr-Zr동

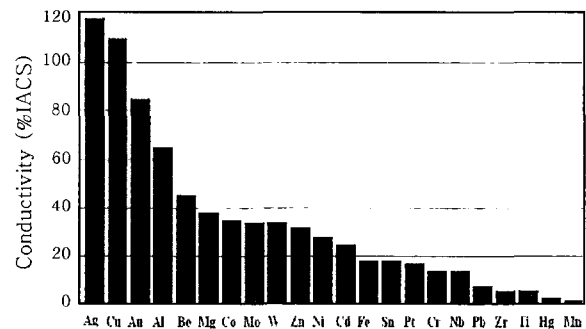


Fig. 1 Electrical conductivity of pure metal at room temperature.

Table 1 Chemical composition of various Cu alloys¹⁾.

규격	일반 명칭	Chemical Composition(wt%)					
		Cu	Cr	Be	P	Si (max)	others (max.)
C 11000	전기동	99.9min.	-	-	-	-	-
C 12000	저인탈산동	99.9min.	-	-	0.004-0.012	-	-
C 12200	고인탈산동	99.9min.	-	-	0.015-0.040	-	-
C 18100	Cr-Zr동	98.7min	0.4-1.0	-	-	-	0.08-0.2Zr
C 18200	크롬동	balance	0.6-1.2	-	-	0.1	-
C 18400	크롬동	balance	0.4-1.2	-	0.05max.	0.1	0.7 Zn 등
C 18500	크롬동	balance	0.4-1.0	-	0.04max.	-	0.08-0.12Ag
C 17000	베리륨동	balance	-	1.60-1.79	-	0.2	0.2 Al
C 17200	베리륨동	balance	-	1.80-2.00	-	0.2	0.2 Al
C 15000	지르코늄동	99.8min.	-	-	-	-	0.10-0.20Zr

(C 18100) 등이 있다. 크롬동의 경우는 크롬을 0.4%미만 함유한 재료에 대해서는 규격이 마련되어 있지 않지만, 국내에서는 0.25% 이상의 Cr을 함유한 크롬동을 '크롬동 텅'이라고 하여 사용하고 있다.

2.1 가공경화형 재료

전기동은 99.9% 이상의 순도를 가지고 있는 순수 구리이다. 여기에 탈산(deoxidation)을 목적으로 인(P)을 첨가한 것이 인탈산동이다. 인(P)함량에 따라 인(P)이 0.012% 이하인 것을 저인(low-P)탈산동, 0.04%이하인 것을 고인(high-P)탈산동이라고 한다. 국내에서 유통되고 있는 콘택트텅에는 주로 고인탈산동이 사용되고 있다. Cu-P 상태도에서 보듯이²⁾ 구리 중에 인(P)의 최대 고용도는 714℃에서 1.7%이고, 300℃에서도 0.6%에 이르기 때문에 인탈산동에 첨가된 인(P)은 전량 구리 중에 고용(solid solution)되어 있는 상태이다. 따라서 전기동이나 인탈산동 재료는 열처리에 의해 경화될 수 있는 성분계가 아니기 때문에 제조 과정에서 특별한 열처리 공정을 거치지 않는다. 단지 성형과정에서 다단계의 인발공정을 거치게 되는데, 이러한 과정을 거치면서 가공경화(strain hardening)에 의해 경도가 상승하게 된다. 즉 이러한 재질로 생산된 콘택트텅은 심한 냉간가공을 거쳐 가공경화(strain hardening)된 상태에 있으며, 제품의 경도는 가공정도에 따라 결정되는 것이다. 이러한 재료는 고온에 노출되면 회복 및 재결정(recovery and recrystallization)에 의하여 강도가 저하할 위험성이 있다. 그리고 가공정도

가 심하면 심할수록 재결정 온도가 낮아져서 그러한 위험성은 커지게 된다. Fig. 2는 열처리 온도에 따른 경도변화를 보여 주고 있다. 전기동(E-Cu)의 경우 냉간 가공 상태의 초기경도는 90HB정도인데, 200℃ 이상으로 가열하게 되면 경도가 급격히 감소하기 시작하여 300℃ 이상에서는 어닐링 상태인 60HB 이하로 저하함을 보여주고 있다.

2.2 석출경화형 재료

Cr 및 Zr 등을 합금원소로 함유하고 있는 크롬동 및 Cr-Zr 동은 경도가 높고, 내마모성도 우수한 것으로 알려져 있다. Cr 및 Zr 합금원소는 Cu에 용해도가 낮아서 시효(aging)처리를 하면 Cu 기지 내에 미세한 석출물을 형성하기 때문에, 석출경화(precipitation hardening)에 의해 강도 및 전기전도도가 동시에 증가한다. 이러한 재료는 고온에 노출되어도 장시간 초기

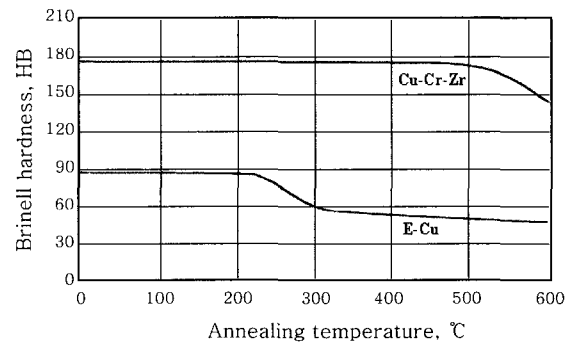


Fig. 2 Room temperature hardness of contact p after 30 min heating³⁾

경도를 유지할 수 있어서 내마모성이 우수할 것으로 예상되고 있다. 실제로, 앞서 Fig. 2에서 보여 주었듯이, Cr-Zr합금은 500°C의 고온에 노출되어도 초기 경도를 유지하고 있다. 이와 같이 석출경화형 재료는 시효처리에 의해 필요한 경도를 확보하였기 때문에 고온에 노출되어도 상온경도가 유지 될 수 있는 것이다.

크롬동은 콘택트팁 소재로 가장 많이 사용되고 있는 재료인데, Fig. 3의 Cu-Cr 상태도에서 보듯이 1070°C에서 크롬의 최대용도 0.65%이며, 상온에서는 고용도가 0%에 가깝기 때문에, 시효 열처리(aging heat treatment)를 적용하는 것이 가능하다.

Fig. 4는 용체화처리(solid solution treatment)된 상태에서 Cr함량에 따른 전기전도도 변화를 보여주는 시험결과이다. Cr함량이 0.33%이상 첨가되면 전기전도도가 40% IACS 수준 이하로 저하함을 보여 주고 있다. 그러나 시효처리를 행하면 Cr입자가 석출되어 Cu기지의 순도가 높아져서 전기전도도가 회복된다. Fig. 5는 시효처리 온도에 따른 전기전도도 변화를 보여 주고 있다. 이 시험결과에서 보듯이 0.33% 및 0.56% 크롬동의 경우는 500°C 시효처리에 의해 전기

전도도가 90% IACS 수준으로 회복됨을 보여 주고 있다. (주: IACS는 도전율을 표시하는 단위로써 International Annealed Copper Standard의 약자이다. 이것은 1913년 당시 시판되고 있는 양질의 구리가 가지는 전기전도도 평균치를 100%로 정하고 이것과 비교하여 백분율로 전도율을 나타내는 것이다. 현재 정련동의 제품은 소둔(annealed)상태에서 약 102%이다.) 시효처리를 행하면 석출경화 효과로 인하여 경도도 증가하는데, Fig. 6은 아닐링한 Cu-0.6%Cr합금을 시효처리한 후의 경도 변화를 보여 주는 결과이다. 이 그림에서 보듯이 773K(500°C)에서 1시간 정도 시효처리를 행하면 최고 경도인 150Hv에 도달하게 된다.

3. 콘택트팁의 사용 환경

3.1 고온 환경

콘택트팁은 용접아크에 직접 노출되어 있어서, 용접이 시작되면 온도가 상승하기 시작하여 일정시간이 경

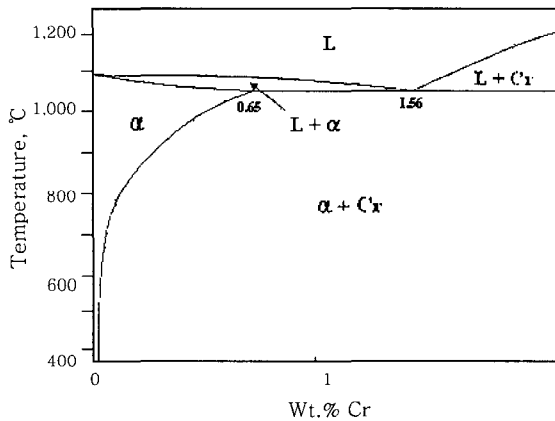


Fig. 3 Cu-Cr phase diagram

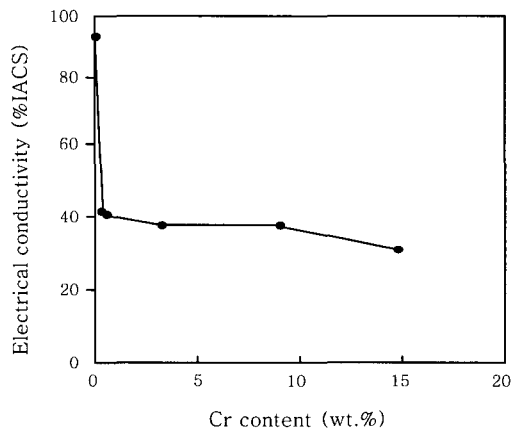


Fig. 4 Variation of electrical conductivity with Cr addition in annealed condition⁴⁾

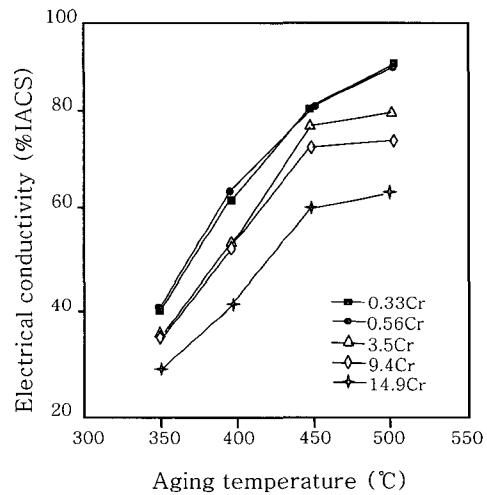


Fig. 5 Variation of electrical conductivity of Cu-Cr alloy with aging temperature⁴⁾

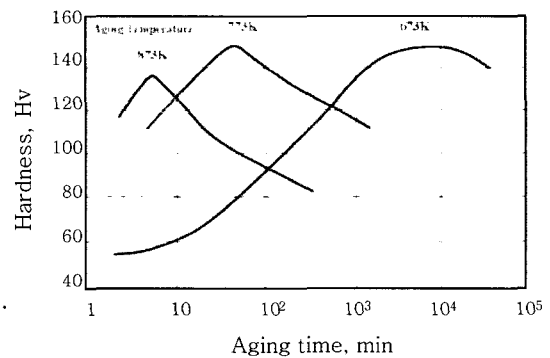


Fig. 6 Hardness change with aging time and temperature in Cu-0.6%Cr alloy⁵⁾

과하면 일정한 온도, 즉 평형상태의 온도를 유지하게 된다. 이러한 온도변화를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 이 결과에서 보듯이 용접이 개시되어 약 2분 정도가 경과하면 팁의 온도는 최고온도에 도달하여 평형상태를 유지하고 있다. 평형상태란 콘택트팁으로 유입되는 열(heat input)과 콘택트팁으로 부터 방출되는 열(heat output)이 동일한 상태이며, 이러한 상태는 콘택트팁의 온도가 최고온도에 도달한 상태이다. 일반적인 용접 조건에서 팁의 최고 가열온도는 약 300°C 정도이며, 경우에 따라서는 500°C 이상으로 가열된다고 보고되고 있다³⁾.

콘택트팁의 온도를 상승시키는 열원은 용접아크의 복사열(radiation heat), 그리고 팁과 와이어 사이에서 발생하는 저항열 등이다. 여기서 복사열은 용접입열(V×I)이 증가할수록 증가하는 열이며, 팁과 모재 사이의 길이(contact tip to workpiece distance, CTWD)가 길어질수록 감소하는 열원이다. 저자들은 용접전류를 변화시키면서 팁의 온도를 측정한 바 있는데, Fig. 8은 용접전류에 따라 팁이 가열되는 최고온도의 변화를 보여 주고 있다. 예상한 바와 같이 전류가 증가함에 따라 팁의 온도는 상승하는데, 전류가 200A 이상으로 증가하면 상승속도가 급속히 커짐을 보여 주고 있다. 공

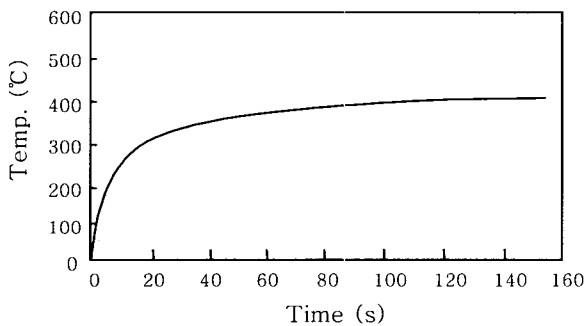


Fig. 7 A typical heating curve for a contact tip during welding⁶⁾

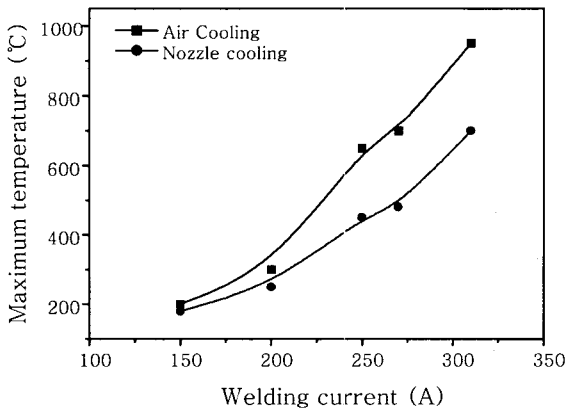


Fig. 8 Effect of welding current on the maximum temperature of contact tip

랭식 토치의 경우 200A의 용접조건에서는 온도가 약 300°C에 이르는데, 250A의 조건에서 약 700°C에 도달하며, 300A 이상으로 증가하면 팁이 900°C 이상으로 가열된다. 콘택트팁의 과열을 막기위하여 노즐에 수냉장치를 부착하면 팁의 온도는 약 200°C 정도 저하함을 확인할 수 있었다. 한편, 동일한 입열조건에서 CTWD가 증가하면 콘택트팁의 최고가열온도는 저하하게 되는데, Fig. 9는 CTWD가 증가함에 따라 최고가열온도가 직선적으로 저하한다는 사실을 보여 주는 실험결과이다⁶⁾.

아크열에 의해 콘택트팁으로 유입된 열은 대부분 전도(conduction)에 의해 용접 토치부로 전달되어 방출되고, 일부는 콘택트팁 주위에 흐르는 보호가스에 의해 방출된다. 이에 대해 Adams 등⁶⁾은 보호가스의 냉각효과는 전체의 약 10%정도 밖에 되지 않으며 나머지는 모두 열전도에 의해 이루어진다고 주장하였다. 결국 보호가스 유량은 콘택트팁 온도에 그다지 큰 영향을 주지 않는다는 것이다.

3.2 마모 환경

콘택트팁에는 와이어가 통과할 수 있도록 구멍이 가공되어 있는데, 구멍의 직경은 용접 와이어의 직경과 와이어의 강도에 따라 결정된다. 1.2mm 직경의 경한 와이어(탄소강, 내열강 또는 내부식용 와이어 등)를 사용하는 콘택트팁에는 1.35~1.40mm 직경의 구멍이 가공되어 있으며, 1.6mm 직경의 연한 와이어(알루미늄 와이어 등)를 사용하는 경우에는 2.1mm 정도의 직경을 가진 구멍이 가공되어 있다. 용접이 시작되면 와이어가 콘택트팁 구멍을 통하여 송급되기 시작하는데, 와이어가 송급되는 과정에서 와이어는 구멍 내면과 접촉되어 미끄러져 나가게 된다. 와이어와 콘택트팁의 접촉은 팁선단에서 이루어지기 때문에 팁 선단부 내면이 마모되기 시작하여 점차 구경(hole diameter)이 커지게 된다.

Fig. 10에서 보여주는 사진은 사용전·후의 콘택트

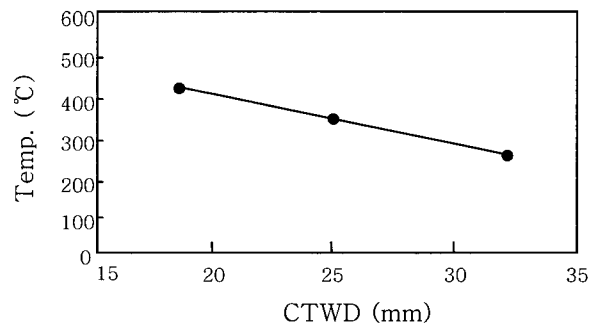


Fig. 9 Effect of CTWD on the equilibrium temperature of contact tip⁶⁾

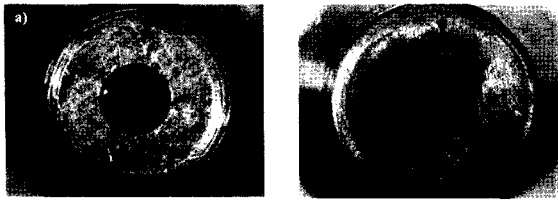


Fig. 10 Shape of contact tip outlet hole: (a) as-received condition, (b) wear-out condition after welding

팁 구멍의 크기 및 형상을 비교하여 보여 주는 사진이다. 이 사진에서 보는 바와 같이 콘택트팁의 구멍은 한쪽방향으로만 확장되는 것이 일반적이다. 콘택트팁의 구멍은 와이어 송급량에 비례하여 증가할 것으로 예상되는데, 증가정도는 용접조건에 따라 차이가 있을 수 있다. 송급량이 동일하다고 하더라도, 용접조건에 따라 팁의 온도가 변화함으로써, 용접조건에 따라 마모량이 차이가 있을 수 있다. 그런데 지금까지 발표된 문헌에서는 이들의 상관관계에 대해 실험한 결과는 거의 찾아볼 수 없었다. 단지 Villafuerte 등⁷⁾은 콘택트팁의 마모기구(wear mechanism)에 대해서 설명하면서, 고온에서의 마찰마모(abrasion)와 전기적 에로존(electrical erosion)이 주된 손상기구(failure mechanism)라고 제안한 바 있다. 이에 대해서는 다음 장에서 보다 자세히 기술하고자 한다.

4. 마모 손상 기구

4.1 고온에서의 마찰마모

마찰마모는 요철이나 이물질에 의해서 표면의 일부가 긁혀서 제거되는 것이다. 따라서 콘택트팁의 마모는 상대체인 용접 와이어의 표면 요철상태가 주요한 인자가 되며, 동일한 와이어를 사용하는 경우에는 콘택트팁의 경도가 마모정도를 결정하는 인자가 된다. 와이어의 표면 상태는 와이어의 제조공정에 의해 결정되는 사항임으로 콘택트팁의 마모는 와이어의 종류에 따라서 커다란 차이를 보여 줄 수 있다. GMA용접에서 사용하는 와이어는 크게 솔리드와이어와 플렉스코어드와이어로 분류할 수 있다. 이들은 각각 세분되어, (i) 솔리드와이어는 와이어 표면에 구리가 도금된 솔리드와이어, 구리가 도금되지 않은 무도금 솔리드와이어로 구분되며, (ii) 플렉스코어드와이어는 베이킹(baking)처리를 한 베이킹형과 베이킹처리를 하지 않은 논베이킹(non-baking)형으로 구분된다. 이들은 모두 표면상태가 다르기 때문에 마모량에 있어서도 차이를 보여 줄 것이

다. 구리가 도금된 솔리드와이어는 표면이 가장 평활하기 때문에 팁 마모량이 가장 적을 것으로 예상되며, 그 밖의 와이어들은 표면상태에 따라 그리고 윤활재의 성능에 따라 커다란 차이를 보여 줄 것으로 예상된다. 이러한 예상에도 불구하고, 이들이 콘택트 팁 마모에 미치는 영향에 대해 보고한 실험결과는 찾아 볼 수 없었다.

한편 앞에서 언급하였듯이 콘택트팁은 용접 중에 가열되기 때문에 고온에서의 경도가 내마모성을 결정하는 주요한 척도가 된다. 그런데 현실적으로 고온경도를 측정하기 어렵기 때문에 Fig. 2와 같이 열처리 후에 상온에서 경도를 측정하게 된다. 그리고 이렇게 측정된 상온경도로부터 내마모성을 유추하게 된다. 여기에는 고온에서의 경도가 상온 경도와 비례관계를 가지고 있다는 가정을 하고 있는 것이다. 이러한 가정으로부터 콘택트팁의 마모정도를 예측할 수 있는데, 가공경화형 팁은 고온에서 장시간 노출되면 재결정이 일어나서 경도가 급격히 저하하기 때문에 장시간 연속용접을 하는 경우에 있어서는 석출경화형 팁보다 마모량이 클 것으로, 즉 수명이 짧을 것으로 예상된다.

4.2 전기적 에로존

전기적 에로존은 와이어와 콘택트팁이 접촉되는 팁선단에서 아크가 발생하여 팁 표면의 일부가 용융되어 와이어 표면에 용착되는 현상이다. 이러한 현상은 일찍이 1966년에 Rudy 등⁸⁾에 의해 보고된 바 있으며, 근래에는 Yamada 등⁹⁾에 의해서도 확인 되었다.

이러한 현상이 발생하면 팁과 와이어가 순간적으로 용접이 되는 상황이 되어서 와이어가 원활히 송급되지 못하여 결과적으로는 아크가 불안정하게 된다. Yamada 등⁹⁾은 GMA용접에서 와이어 송급속도가 순간적으로 변화하는 현상을 연구하는 과정에서 와이어와 팁이 용융접합되는 현상을 관찰하였으며, 이러한 현상이 나타나면 와이어 송급이 불안정하게 되고 결과적으로는 아크가 불안정하게 되는 원인중의 하나가 된다고 하였다. 이러한 현상은 저자들의 실험실에서도 확인할 수 있었는데 Fig. 11에서 보여 주는 사진은 용융접합된 팁과 와이어를 분리한 다음, 팁을 길이 방향으로 절단하여 용융접합된 부위가 일치하고 있음을 보여 주는 사진이다. 이 사진에서 보듯이 용융접합된 부위는 와이어 표면 뿐만 아니라 팁구멍 내면에도 많은 손상을 가져온다. 이러한 손상으로 말미암아 콘택트팁의 마모는 보다 가속화되는 것이다. Degtyarev 등¹⁰⁾은 이러한 전기적 에로존이 콘택트팁의 주요 손상기구라고 하였다.

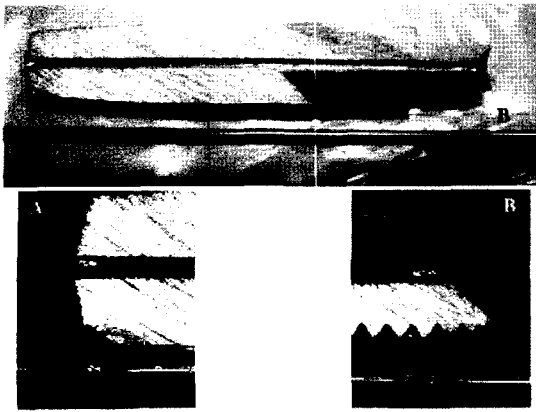


Fig. 11 Electrical arcing between wire and inner surface of contact tip

5. 콘택트팁의 수명

콘택트팁을 교환하게 되는 주된 요인은 크게 두 가지로 대별되는데, 첫째는 번백(burn back)이며 두 번째는 팁의 과도한 마모이다. 번백은 콘택트팁 선단에서 용접와이어와 콘택트팁이 용융 용접되는 현상이다. 이러한 현상은 와이어 송급이 방해 받는 상황에서 발생하게 된다. 대립의 스패터가 팁의 출구 측에 용착된다던가, 와이어 송급성이 불량한 경우, 아크 스타트성이 불량한 경우 등에 자주 발생한다. 이러한 번백이 발생하면 와이어 송급이 완전히 중단되고, 용접아크가 소멸되기 때문에 용접작업을 중단하고 팁을 새것으로 교체해 주어야 한다. 이러한 번백현상은 와이어 송급 및 용접스패터와 직접적인 관계가 있기 때문에 용접전원의 특성, 와이어의 품질, 와이어 피더의 성능, 용접 스패터 발생량 등에 의해 크게 영향을 받는다. 최근 용접전원의 성능이 향상되면서 이러한 문제들이 많이 해소되었는데, 특히 과형제어형 인버터 용접전원이 상용화되면서 아크스타트성은 크게 향상되고 용접스패터 발생량이 크게 저하되어 번백현상을 억제하는데 기여하였다. 그런데 번백현상에 미치는 콘택트팁의 영향에 대해서는 아직까지 알려진 바 없다. 단지 와이어가 콘택트팁을 통과하면서 발생하는 미세아크에 의해(Fig. 11) 팁과 와이어가 용융접합되는 현상이 발생하고⁹⁾, 이러한 접합부의 접합강도가 피더(feeder)의 송급강도 보다 크게 되면 번백이 발생할 수 있다는 가정은 할 수 있다. 그런데 그러한 용융접합 문제가 와이어 품질의 문제인지 아니면 콘택트팁의 문제인지 확실치 않는 것이다. 지금까지는 이러한 문제가 용접 현장에서 발생하게 되면 이를 와이어 송급성 불량이라고 취급하고 있다. 그러나 오래 사용한 콘택트팁에서 번백현상이 자주 발생하는

것을 보면 번백현상과 콘택트팁의 마모 사이에는 상관관계가 있는 것 같다. 향후 번백현상 발생 기구에 대한 연구, 이에 미치는 제반 인자의 규명 등에 대해서는 체계적인 연구가 필요하다고 생각한다.

두 번째 요인은 팁 마모에 의하여 팁의 구멍이 확장되는 것이다. 이렇게 되면 앞에서도 언급한 바와 같이 와이어 선단이 지향하는 위치가 처음에 의도한 위치로부터 벗어 날 뿐만 아니라 아크가 불안정하게 되어 용접을 중단할 수밖에 없는 상황이 된다. 최근 용접자동화가 확산되고, 고전류 용접이 보편화 되면서 와이어 송급속도가 빨라지고, 플럭코어드와이어 및 무도금 와이어 등이 사용되면서 팁 마모 문제가 현실적인 문제로 대두되었다. 이러한 문제를 정량적으로 평가하기 위해서는 마모 정도의 정량화, 팁 마모에 따른 용접품질의 변화, 팁의 한계수명에 대한 정의, 한계수명에서의 팁 마모량, 콘택트팁의 재질 또는 형상에 따른 팁 수명의 변화 등을 평가할 필요가 있다.

Quinn 등¹¹⁾은 와이어 송급길이를 변수로 하여 콘택트팁 구멍의 확장정도를 측정하고자 하였는데, 이를 위해서 콘택트팁 마모량을 정량화 할 필요가 있었다. Fig. 12의 시험결과는 와이어 송급길이에 따른 출구측 구멍 크기의 변화를 보여 주고 있는데, 여기서 구멍 크기의 변화는 초기 구멍의 면적 대비 사용 후 확장된 면적의 비(Area/Area₀)로써 표현하였다. 이 실험결과에서 보듯이 와이어 송급길이와 면적비 사이에는 직선적인 관계가 있음을 보여 주고 있다. 그리고 면적비가 1.5에 이르면 마모지수(wear parameter, W)가 급격히 증가함을 보여 주고 있는데, 여기서 마모지수는 용

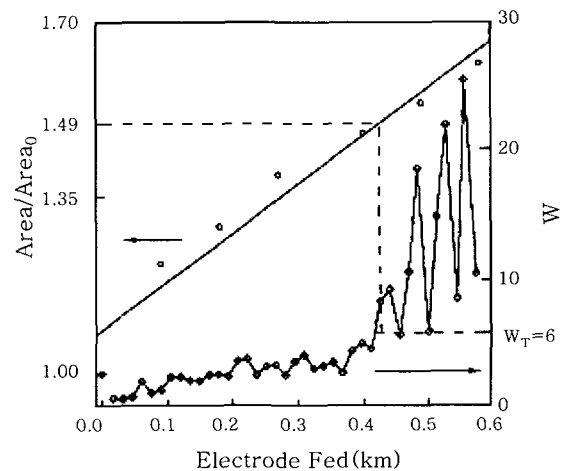


Fig. 12 Changes in the wear parameter and the area of exit bore of contact tube with the length of welding wire fed¹¹⁾

접전압의 변동폭으로부터 유도된 수치이다. 즉 면적비가 1.5에 이르면 (콘택트팁의 구멍 면적이 초기 면적 대비 50% 이상 증가하면) 용접전압의 변동폭이 급격히 증가함을 의미하는 것이고, 이러한 상태는 용접아크가 매우 불안정하여 진다는 것을 의미한다. 그러므로 면적비가 1.5에 이르면 콘택트팁은 사용수명이 한계에 이른 것이라고 할 수 있다. 그리고 이 상태에 이를 때까지 송급된 와이어의 총길이는 0.4km 정도였음을 알 수 있다. 즉 이들은 콘택트팁의 수명을 정의함에 있어 마모지수(W)가 1.5에 이르기 까지 송급된 와이어의 총길이를 표현한 것이다.

한편 DeNale 등은¹²⁾ Ti 용접에서의 콘택트 팁 수명을 용접시간으로 표현하였는데, 탄소강 용접에서는 수명이 약 120분 정도이며, Ti 용접의 경우에는 약 2분 정도라고 하였다. 그리고 Ti 합금의 GMA용접에서는 Ti와 Cu가 금속간 화합물을 형성하기 때문에 팁의 마모가 급속히 진행되어 수명이 매우 짧은 것이라고 하였다.

6. 콘택트팁의 수명 향상 방안

콘택트팁의 수명을 향상시키고자 하는 것은 콘택트팁 교환에 따른 인건비 손실이 직접적인 이유이다. 실제로 Shah¹³⁾는 팁 교환에 소요되는 시간과 인건비를 정량화 하면서 팁 수명의 중요성을 강조한 바 있다. 그러나 이 보다 더욱 중요한 것은 팁의 수명이 다하여 용접아크가 불안하여 지면 용접 품질을 저하시키고, 경우에 따라서는 보수 용접을 실시하여야 하기 때문이다. 결국 용접생산성 향상 및 고품질의 용접부를 확보하기 위해서 용접팁의 수명 향상은 필요한 것이다. 콘택트팁 수명 향상을 위하여 가장 용이한 방법은 팁 재질을 검토하여 내마모성이 우수한 재질을 선정하는 것이다. 앞에서 기술하였듯이 콘택트팁의 재질은 구리를 기본으로 하고 일정량의 합금원소를 함유하고 있는데, 이러한 합금조성의 차이에 따라 적용되는 강화기구(strengthening mechanism)가 상이 할 뿐만 아니라 고온에서의 경도 유지 여부가 달라진다. 결국 콘택트팁의 재질 및 강화기구는 팁 마모량을 결정하는 매우 주요한 인자라고 할 수 있는데, 기존에 발표된 논문에서는 이들의 상관관계에 대해서 언급한 내용을 찾아 볼 수 없었다. 단지 Quinn 등이¹¹⁾ 두 가지 콘택트팁에 대해서 마모량의 차이를 보고하였는데, 그들의 실험결과로부터 화학조성이 마모량을 결정하는 매우 주요한 인자임을 유추할 수 있게 되었다. 그들은 화학조성을 밝히지 않은, 조성1서로 다른 두 가지(조성1, 조성2) 콘택트팁에 대해 마모량을 비교 평가하였다고 하였다. 그리고 마모량을 표

Table 2 Amount of tip wear with two different compositions¹¹⁾

Welding Current	Composition 1	Composition 2
231A	1.2±0.7mm ² /km	0.69±0.09mm ² /km
256A	2±1mm ² /km	0.8±0.3mm ² /km

현함에 있어 단위길이의 와이어 송급량에 대한 구멍면적 증가량(mm²/km)을 사용하여, Table 2에서 보여주는 바와 같은 실험 결과를 보고하였다. 조성1의 콘택트팁은 231A의 용접전류에서 1.2±0.7mm²/km의 마모정도를 보여 주고 있는데, 동일 조건에서 조성2의 콘택트팁은 0.69±0.09mm²/km을 보여 주고 있으며, 용접전류(와이어 송급속도)가 증가함에 따라 마모량은 증가한다. 특히 용접전류가 증가하게 되면 두 팁간의 마모량 차이는 더욱 확대되어 256A 조건에서는 2배 이상의 차이를 보여 주고 있다. 이들의 시험결과는 콘택트팁의 화학조성이 마모량을 결정하는, 즉 수명을 결정하는 주요한 인자임을 증거하고 있는 것이다. 특히 그들이 콘택트팁의 화학조성을 구체적으로 밝히지 않았다는 사실로부터 콘택트팁의 수명향상에 있어서 화학조성은 결정적인 역할을 하고 있음을 유추하게 하여 준다. 이러한 중요성에도 불구하고 아직까지 콘택트팁의 화학 조성 및 재질과 관련하여 어느 국가도, 어느 단체도 규격(specification)을 제시한 바 없으며, 그러한 움직임조차 감지되지 않고 있다. 이러한 상황에서 국내에서는 1년에 약 100만개 이상의 콘택트팁이 소비되고 있는데, 이러한 양의 콘택트팁이 아무런 제한 없이 제조사의 의지대로 생산되어 시중에 유통되고 있는 것이다.

어떠한 재질의 콘택트팁을 사용하더라도 콘택트팁의 온도가 상승하면 강도 저하에 의한 마모량 증가, 고온에서의 전기전도도 저하, 그리고 아크 안정성 저하 등으로 콘택트팁의 성능은 저하할 수 밖에 없는 것은 사실이다. 따라서 콘택트팁의 수명을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법은 용접 중에 콘택트팁의 온도가 상승하지 않도록 억제하는 것이다. 이를 위해서는 여러 가지 방법이 있을 수 있는데, 우선적으로 수냉 토치를 사용하는 것이 가장 효과적이라고 하겠다. 그런데 수냉토치는 별도로 수냉장치를 구매하여야 하고 토치를 수냉토치로 바꾸어야 하기 때문에 경제적으로 부담이 된다. 무엇보다 수냉토치는 무겁기 때문에 용접작업자에게 부담을 줌으로 반자동용접에는 적합하지 못하고 전용장비나 로봇장비와 같이 용접작업이 기계화되어 있는 환경에서만 가능하다. 따라서 수냉토치는 자동화장비에서, 그것도 고전류용접을 실시하는 경우에 한정하여 적용하

고 있는 실정이다. 자동화 장비라 하더라도 저전류용접을 실시하는 상황에서는 팁의 수명을 향상시키기 위하여 자동차 부품을 생산하는 대부분의 박판용접에서 그러하듯이, 팁의 내마모성을 향상시키려는 목적만으로 경제적인 부담을 무릅쓰고 공냉토치를 수냉토치로 전환하지는 않을 것이다. 따라서 사용하는 토치가 공냉토치로 결정되어 있는 상황에서는 팁의 재질을 내마모성이 우수한 재질로 바꾸던가, 형상을 달리하여 냉각이 잘 되도록 하는 방법 등이 제안될 수 있다. 앞서서도 언급하였듯이 콘택트팁의 재질은 수명을 결정하는 주요한 인자이나 아직 규격화 되어 있지 않은 관계로 현재로서는 자의적인 판단이 필요하다. 한편 형상 측면에서는 콘택트팁의 체결방법을 변경하여 냉각효율을 높이는 방법이 이미 개발되어 실용화 되었다고 보고되고 있다¹⁴⁾. Villafuerte^{15,16)} 그밖에도 여러 가지 방법을 조사하여 보고한바 있는데, 여기에는 팁 선단의 외경(outer diameter)을 크게 하여 heat sink 효과를 크게 하는 방법, 열차단코팅을 이용하는 방법, 콘택트팁의 재질을 MMC(metal matrix composite)로 하는 방법, 세라믹 분말을 이용한 분산강화 기법 등이 있다. 그러나 이들은 모두 가격적인 측면에서 경쟁력을 가질 수 있는지 현재로서는 의문이다.

7. 결 론

최근 용접작업이 자동화되면서 용접선 추적장치를 부착하는 경우가 있지만, 전용장비에 있어서는 이를 부착하지 않고 미리 입력된 궤적을 반복하여 따라가면서 용접을 실시하도록 되어 있다. 이러한 경우에 콘택트팁이 마모되면 용접선을 벗어나게 되어 용접불량을 야기 시키게 된다. 따라서 전용장비나 용접로봇이 적용되는 경우에 있어서는 내마모성이 우수한, 신뢰성이 양호한 팁을 사용하여야 한다. 반자동용접을 하는 경우에 있어서는 플럭스스코드 와이어 사용량이 지속적으로 증가하고 있고, 최근에는 고전류용접이 확산되는 추세에 있기 때문에 팁이 처한 환경은 보다 열악하여 지고 있다. 즉 용접자동화 및 고전류용접이 확산될수록 콘택트팁의 내마모성에 대한 관심이 요구되고 있는 것이다. 그러나 국내뿐만 아니라 국제적으로도 콘택트팁의 중요성에 대한 인식이 부족하여, 이에 대한 규격화 작업이 진행되고 있지 않다. 국내에서는 일부 대기업에서 콘택트팁에 대한 규격을 자체적으로 제정하여 활용하고 있지만, 이들 기준이 수명에 근거하여 제정되지 않았기 때문에 설득력이 결여된 상태이다. 이에 본 저자들은 최근의 GMA용접 및 FCA용접 관련 기술이 콘택트팁을 규격화해야 하는 상황으로 바뀌고 있음을 인식해 주었으면

한다. 그리고 이러한 인식을 공유하는 연구자들이 모여 팁수명을 측정하는 방법을 표준화하고, 수명에 근거한 콘택트팁 재질 및 형상을 규격화 하며, 최종적으로 합의된 규격을 산업계가 검증하는 3단계 작업을 추진하였으면 한다. 이러한 규격화 작업이 수행되면 아마도 세계에서 최초로 수행하는 작업이 될 것이며, 규격이 완성되면 이 또한 세계 최초의 규격이 될 것이다.

참 고 문 헌

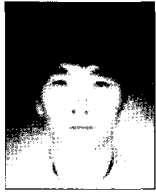
1. Standard designations for copper and copper alloys: Copper Development Association Inc., Greenwich Office Park 2, Box 1840, Greenwich, CT 06836-1840
2. Binary alloy phase diagrams: Vol. 1, ed. T. B. Massalski, pub. ASM, (1986), 945
3. The contact-tube distance in a gas-shielded metal-arc welding - How does it work?, *Welding and Cutting*, 2(2002), 80
4. Ki-Tae Kim, Woon-Jae Jung, Han-Chul Syn and Chong-Sool Choi: Effects of Cr content and thermomechanical treatment on tensile strength and electrical conductivity of Cu-Cr alloy, *J. of Korean Soc. for Heat Treatment*, 14(2001), 17(in Korean)
5. Nonferrous Material: Japanese Society of Metals, vol.5, (1987), 79(in Japanese)
6. G. Adam, T. A. Siewert, T. P. Quinn and D. P. Vigliotti: Contact tube temperature during GMAW, *Welding Journal*, 80(2001), 37
7. J. Villafuerte: Understanding contact tip longevity for gas metal arc welding, *Welding Journal*, 78, 12(1999), 29
8. J. F. rudy, D. C. Brown, W. G. Groth: Study of current contact tubes for gas metal-arc welding, *Welding Journal*, 45(1966), 375s
9. T. Yamada and O Tanaka: Fluctuation of the wire feeding rate in gas metal arc welding, *Welding Journal*, 66(1987), 35
10. V. G. Degtyarev, M. P. Novikov and N. M. Voropai: *Paton Welding Journal*, 3(1991), 290
11. T. P. Quinn, R. B. Madigan, M. A. Mornis and T. A. Siewert: Contact tube wear detection in gas metal arc welding, *Welding Journal*, 74(1995), 115-s
12. R. DeNale and W. E. Lukens: Increasing contact tube life during titanium gas metal arc welding, *Welding Journal*, 65(1986), 28
13. H. Shah: Calculating the total cost of GMAW gun ownership, *welding Journal*, 79, 10(2000), 49
14. B. Lajoie: Taper lock contact tip and head assembly for welding device, U.S. Patent #5,726,420
15. J. Villafuerte: Improving contact-tube performance through cryogenics, *Welding Journal*, 79(2000), 45
16. J. Villafuerte: Stronger copper for longer lasting contact tipss and electrodes, *Welding Journal*, 82, 11(2003), 50



- 김희진(張 熙 進)
- 1953년생
- 한국생산기술연구원
- 용접전원개발, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 김남훈(金男勳)
- 1975년생
- 한국생산기술연구원, 한국기술교육대학교
- 용접전원개발, 용접기자재신뢰성평가
- e-mail : namshy@kitech.re.kr



- 유회수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원
- 용접전원개발, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr



- 고진현(高震炫)
- 1952년생
- 한국기술교육대학교 신소재공학과
- 용접야금, 원자력재료용접
- e-mail : jhkoh@kut.ac.kr