

# GMA용접에서 콘택트팁의 내마모성에 대한 예측

김남훈\* · 김희진\* · 유희수\* · 고진현\*\*

\*한국생산기술연구원

\*\*한국기술교육대학교

## Prediction on the Wear Resistance of Contact Tips for GMA Welding

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

\*Advanced Welding & Joining Technology Team, KITECH, ChonAnSi 330-820, Korea

\*\*Dept. of Advanced Material Engineer, Korea University Technology, ChonAnSi 330-708, Korea

### Abstract

Contact tips are required to have a higher resistance to wear and thus to have an extended life time under the advanced GMAW welding process. Several requirements have been specified and employed by domestic industries for selecting their tips for such a purpose. However no attempt has been made to justify their requirements based on the experimental data of wear resistance or life time of contact tips. In this study, five different contact tips with three different compositions were employed for actual GMA welding up to 4 hours and were evaluated their wear resistance by measuring in every one hour the area of enlarged hole at the exit side. Experimental results clearly showed that the Cr-containing tips strengthened by precipitation hardening have much better resistance to wear than those made by work hardening. It was further noticed that Cr is an excellent alloying element for improving the wear resistance of contact tips only when it is in an properly aged condition. Initial hardness may play some role in the early stage of wear but not in the later stage of welding because the microstructure of tip changes significantly by the prolonged exposure to welding arc heat. Based on these results, critical review has been made on the current requirements employed by domestic industries. Of importance is that a new guideline has been confirmed to be more reasonable.

\* Corresponding author : namshy@kitech.re.kr

(Received March 5, 2004)

Key Words : Cu alloy, Contact tip, Precipitation hardening, Work hardening, GMA welding

## 1. 서 론

가스메탈아크용접(gas metal arc welding, 이하 'GMA용접'이라고 함)은 용가제로서 소모전극 와이어를 일정한 속도로 용융지에 공급하면서 와이어 선단과 모재 사이에서 전기적 아크가 발생되도록 하는 용접법이다. 이러한 GMA용접이 안정적으로 진행되기 위해서는 와이어가 공급되는 속도와 와이어가 용융되는 속도가 동일하여야 한다. 이를 위하여 와이어에 적절한 전류를 공급하여 송급된 와이어가 동일한 속도로 용융되도록 하여야 한다. 용접전류는 용접전원에서 용접 토치 최선단에 위치한 콘택트팁을 통하여 와이어로 전송되기

때문에 콘택트팁의 재질은 전기전도도가 양호한 순수 구리(Cu) 또는 Cr, Zr 등이 함유된 구리 합금(Cu alloy)이 사용되고 있다. 이렇게 다양한 재질이 사용되고 있지만 콘택트팁의 주된 역할은 와이어에 용접전류를 전송하는 기능과 용융지로 와이어를 유도하는 기능이다<sup>1,2)</sup>. 만약 콘택트팁이 손상되어 이러한 기능들을 제대로 수행되지 못하게 되면 용접부 결함을 유발하게 되며, 결함제거 및 팁 교체 등으로 용접생산성을 저하시키는 원인이 된다.

현재까지 콘택트팁의 손상기구에 대해서는 크게 두 가지가 보고되고 있다. 첫 번째로는 전기적 에로존(electric erosion)에 의한 손상으로, 와이어와 콘택트팁이 접촉되는 팁 선단에서 미세한 아크가 발생하여

팁 표면의 일부가 용융되어 와이어 표면에 응착되는 현상이다. 그 메카니즘은 1966년에 Rudy 등<sup>3)</sup>에 의해 보고되었으며, 최근 GMA용접에서 와이어 송급속도가 순간적으로 변화하는 현상을 연구하는 과정 중에 Yamada 등<sup>4)</sup>에 의해서도 확인되어졌고, Degtyarev 등<sup>5)</sup>은 이러한 전기적 에로존이 콘택트팁의 주요 손상기구라고 하였다. 두 번째 손상기구에는 접촉된 두개의 면이 미끄러지면서 단단한 면상의 요철이나 경질입자의 절삭작용에 의해 일어나는 마찰마모현상이다. 콘택트팁은 아크열에 노출되어 가열되기 때문에 고온에서의 마찰마모(abrasive wear)라고 하는 것이 보다 합리적일 것이다. Villafuerte는<sup>6,7)</sup> 이러한 고온 환경에서의 마찰마모가 주요 손상기구 중에 하나라고 보고하였다.

콘택트팁을 장시간 사용하게 되면 이러한 손상기구에 의해 팁 중앙에 가공된 구멍이 확장되는데, 구멍이 확장되면 아크가 불안해 질뿐만 아니라 와이어 선단이 지향하는 위치가 용접선으로부터 벗어나기 때문에 팁을 교체해 주어야 하는 상황에 이르게 된다. Quinn 등<sup>8)</sup>은 와이어 송급길이에 따라 콘택트팁 구멍의 확장정도를 측정하였는데, 확장정도는 와이어 송급길이에 직선적으로 비례한다고 보고하였다. 그리고 일정 수준 이상으로 확장되면 아크 전압 변동폭이 급격히 증가하는 현상을 발견하고, 이러한 시점에서 콘택트팁의 수명이 다 된 것으로 간주하였다.

최근 플렉스스코어드와이어 사용이 증가하고, 생산성 향상을 위해 자동화 또는 고전류 용접이 보편화되면서 팁의 수명은 단축되는 경향이 있어 팁의 장수명화가 요구되고 있다. 그런데 현재까지 보고된 문헌들에서는 팁의 장수명화에 필요한 자료가 빈약할 뿐만 아니라, 수명을 예측할 수 있는 가이드라인(guide line)도 제시되어 있지 않았다. 국내에서는 일부 중공업사들이 자체 규정에 의해 팁의 선별기준을 운용하고 있는 것으로 조사 되었으나, 이들 기준들이 어떠한 근거에 의해 제시되었는지 명확하지 않았다. 이러한 현실을 인식하고 저자들은 모의 열처리 시험을 통하여 새로운 가이드라인을 제시한 바 있다<sup>2)</sup>. 그런데 제안된 가이드라인은 콘택

트팁이 처한 온도 조건만을 고려하여 제시되었기 때문에 실제 사용환경, 즉 고온 마모환경에서도 합리적으로 적용될 수 있는지 확인해 볼 필요가 있었다.

이에 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 콘택트팁을 시중에서 구매하여 '실제 용접 상황에서 마모량을 측정하는 시험(실용접 마모시험)'을 수행하고, 시험결과를 의거하여 재질에 따른 수명의 차이를 규명하고, 이를 금속학적으로 해석하여 보고자 하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 팁의 수명을 미리 예측할 수 있는 가이드라인을 보다 명확히 제시하고자 하는 것이며, 이에 기초하여 콘택트팁의 규격을 재설정하고자 하는 것이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험 재료

본 시험에 사용된 콘택트팁의 종류 및 화학조성은 Table 1과 같다. 인(P)을 0.016% 함유한 '인탈산동팁(I)'은 시중에서 구매한 팁을 그대로 사용한 것인데, 최종 생산단계에서 냉간인발공정으로 가공하여 제조된 팁이다. 이를 Table 1 및 다음에 나오는 Fig. 4에서는 'Cu-P(I)'이라고 표기하였다. 인탈산동팁(I)을 450°C에서 1시간 열처리하게 되면 냉간가공된 조직이 재결정되어 가공경화 효과를 모두 잃게 된다는 사실을 모의 열처리 시험에서 확인한 바 있었다<sup>2)</sup>. 따라서 본 연구에서는 가공경화 효과가 마모량에 미치는 영향을 보기 위하여 인탈산동팁(I)을 450°C/1시간 열처리하여 비교재로 사용하였는데, 이렇게 열처리된 팁을 '인탈산동팁(II)'라고 칭하고, Table 1 및 다음에 나오는 Fig. 4에서는 'Cu-P(II)'라고 표기하였다. 한편 시중에서 구매한 팁 중에서 0.25%정도의 크롬(Cr)을 함유한 재질의 팁을 '0.25%크롬동팁(I)'이라고 칭하고, Table 1 및 다음에 나오는 Fig. 4에서는 'Cu-0.25%Cr(I)'이라고 표기하였다. 크롬(Cr)을 함유하고 있음으로 석출경화형으로 예측되었지만, 구매상태에서의 재질은 가공경화형

Table 1 Chemical composition and characteristics of contact tips used in this study

Identification	Chemical composition(wt.%)		Characteristics
	P	Cr	
Cu-P (I)	0.016	-	strain hardened
Cu-P (II)	0.016	-	annealed by 450°C/1hr
Cu-0.25%Cr (I)	-	0.20~0.35	overaged + strain hardened
Cu-0.25%Cr (II)	-	0.20~0.35	fully aged
Cu-1%Cr		0.8~1	aged + eutectic Cr ppt.

인 것으로 판명된 바 있다<sup>2)</sup>. 이는 과시효(overaging)에 의해 석출경화 효과가 상실된 상태에서 냉간인발공정이 적용되었기 때문으로 사료된다. 이러한 0.25%크롬동팁(I)에 용체화처리(solution heat treatment) 및 시효처리를 행하게 되면 석출경화형으로 바뀌게 되는데, 이렇게 변환된 0.25%크롬동팁을 '0.25%크롬동팁(II)'라 칭하고 Table 1 및 다음에 나오는 Fig. 4에서는 'Cu-0.25%Cr(II)'라고 표현하였다. 마지막으로 '1%크롬동팁'은 시중에서 구매한 상태 그대로 사용하였는데, 이를 Table 1 및 다음에 나오는 Fig. 4에서는 'Cu-1%Cr'이라고 표현하였다. 1%크롬동팁은 석출경화형으로 처리되어 있었을 뿐만 아니라 공정반응(eutectic reaction)으로 석출된 조대한 크롬(Cr)입자를 함유하고 있다. 그러므로 1%크롬동팁은 이러한 정출물이 팁의 마모량에 미치는 영향을 평가하는데 매우 중요한 재료라 하겠다.

상기한 5가지 재료에 대해 용접마모시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 자체 제작한 것이다. 용접모재는 400(R)×1000(L)×15(mm(t)) 크기의 고강도 파이프를 사용하였으며, 파이프를 회전시키면서 파이프 표면에 비드-온-플레이트(bead-on-plate)용접을 장시간 실시할 수 있도록 하였다. 장시간 용접으로 인하여 파이프가 과열되는 것을 방지하기 위하여 파이프 내부 하단에는 항상 냉각수가 고여 있도록 하였으며, 파이프 회전속도(travel speed)는 50cm/min으로 일정하게 하였다. 사용된 용접전원은 정격전류 600A급의 인버터제어형이었으며, 용접조건은 Table 2와 같이 설정하여 모든 용접시험에서 동일하게 적용하였다. 용접재료는 직경 1.2mm의 CO<sub>2</sub>용접용 와이어(KS 및 JIS 규격: YGW11)를 사용하였는데, 용접와이어의 소모로 인해 용접이 중단되는 상황을 배제하기 위하여 300kg급의 패일팩(pail pack)을 사용하였다.



Fig. 1 Experimental setup of GMA welding for the wear resistance of contact tip

Table 2 Welding conditions applied in this study

Welding voltage	30 V
Welding current	250 A
Wire feeding rate	9 m/min
Contact tip-to-Work distance(CTWD)	20 mm
Travel speed	50 cm/min

보호가스로는 98%Ar+2%O<sub>2</sub> 혼합가스를 사용하였으며, 이는 용접시 스패터 발생을 최소화하여 노즐에 부착하는 스패터로 인한 용접 중단을 방지하고자 한 것이다.

### 2.2 마모량 측정 방법

용접이 진행되는 동안 용접와이어는 콘택트팁 내면과 접촉된 상태에서 송급되는데, 접촉되는 위치는 Fig. 2와 같이 출구측 최 선단이라고 알려져 있다<sup>8)</sup>. 결국 팁 선단에서 마모량이 최대가 된다고 할 수 있는데, 이를 근거로 팁 마모량은 팁 선단에서 구멍이 확장되는 정도를 측정하여 계량화 하고자 하였다. Fig. 3의 (a)는 용접 전의 구멍의 형상과 크기를 보여 주는 것이고, Fig. 3의 (b)는 일정시간 용접한 후의 구멍의 형상 및 크기를 보여 주는 예이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 출구측 구멍은 균일하게 마모되는 것이 아니고 특정 방향으로 편심되어 확장됨을 알 수 있다. 따라서 마모정

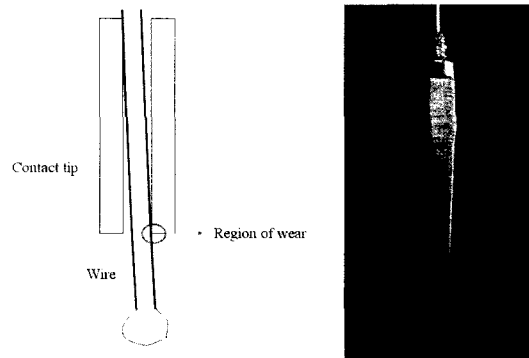


Fig. 2 Schematic illustration of contact point between the contact tip and wire, and their actual appearance



Fig. 3 Wear of contact tip: a) area of exit hole before welding, b) area of worn-out hole after 't' hour welding

도를 계량화함에 있어 직경 변화를 취하기에는 많은 문제점이 있을 것으로 판단되어, 본 연구에서는 마모량 (amount of wear, W)을 식 (1)과 같이 구멍의 초기 면적( $A_0$ ) 대비 용접 후 증가된 면적( $A_t - A_0$ )을 백분율로 표현하였다. 여기서  $A_0$ 는 용접 전의 구멍 면적이며,  $A_t$ 는 t 시간 용접한 후에 마모된 구멍의 면적이다. 이들 면적은 모두 공구 현미경을 사용하여 측정하였다.

$$W(\%) = \frac{A_t - A_0}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

### 3. 시험결과

#### 3.1 미세조직 및 경도

시험에 사용된 5가지 재질, 초기 미세조직과 경도는 Fig. 4와 Table 3과 같다. Fig. 4의 a)에서 보듯이 인탈산동팁(I)은 냉간가공에 의해 심하게 연신된 조직을 보여 주었는데, 가공경화 효과로 인하여 높은 경도 (136 Hv)를 보여 주고 있다. 이를 450°C/1시간 열처리하면 인탈산동팁(II)가 되는데, 이는 어닐링 상태의 경도(61Hv)를 보여 주었다. 이러한 변화는 Fig. 4 b)의 미세조직에서 보여 주듯이 회복 및 재결정(recovery and recrystallization)에 의해 가공경화 효과가 완전

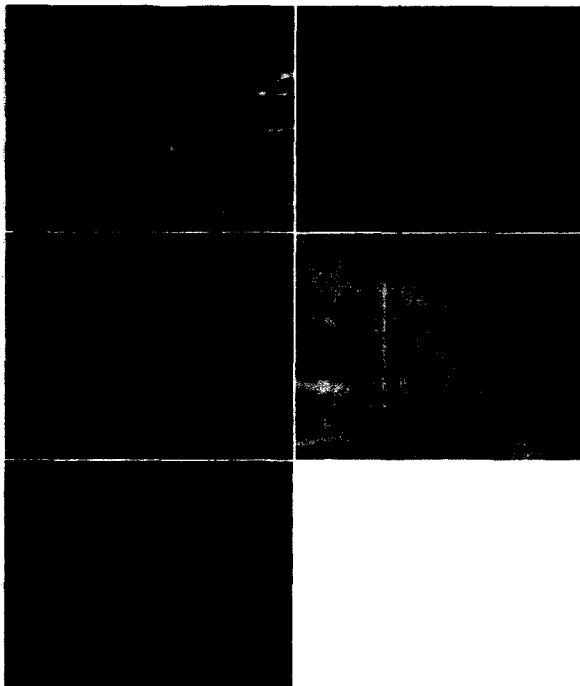


Fig. 4 Microstructure of contact tips used in this study: a) Cu-P(I), b) Cu-P(II), c) Cu-0.25%Cr(I), d) Cu-0.25%Cr(II), and e) Cu-1%Cr

Table 3 Initial hardness of contact tips used in this study

Identification	Hardness	
	HR <sub>B</sub>	Hv
Cu-P (I)	63	136
Cu-P (II)	-	61
Cu-0.25%Cr (I)	65	138
Cu-0.25%Cr (II)	67	145
Cu-1%Cr	78	151

히 소멸되었기 때문이다. Fig. 4의 c)는 0.25%크롬동팁(I)의 미세조직으로써 인탈산동팁(I)과 유사하게 냉간가공에 의해 연신된 조직을 보여 주고 있으며, 경도도 138Hv으로 유사하였다. 더구나 고온에서 인탈산동팁(I)과 유사한 조직 및 경도 변화를 보여 주었으므로 이를 가공경화형으로 분류하였던 것이다. 0.25%크롬동팁(I)을 석출경화형으로 만들기 위하여, 1030°C에서 30분간 용체화 열처리(solution heat treatment)를 실시한 후, 수냉(water quenching)을 하고, 이어서 500°C에서 시효열처리(aging heat treatment)를 실시하였다. 이렇게 재처리한 팁이 0.25%크롬동팁(II)인데, 이의 미세조직은 Fig. 4의 d)에서 보는 바와 같이 매우 조대한 조직을 보여 주지만 경도는 145Hv으로 상승하였다. Fig. 4의 e)는 1%크롬동팁의 미세조직을 보여주는 것인데, 냉간가공에 의해 연신된 조직과 기지 내에 석출된 입자상을 볼 수 있었다. 연신된 정도는 인탈산동팁(I)(Fig. 4의 a))보다 둔화되어 있는데, 이는 최종 시효처리 과정에서 냉간가공된 조직이 회복되면서 나타나 현상으로 추측된다. 광학 현미경상에서 관찰된 석출물들은 모두 공정반응에 의해 석출된 크롬석출물임을 이미 보고한바 있다<sup>2)</sup>. 그리고 1%크롬동의 시효처리 정도는 언더에이징 상태에 있는 것으로 확인 되었으며, 초기 경도는 151Hv로서 본 연구에 사용된 재료 중에서는 가장 높았다.

#### 3.2 인탈산동팁의 용접 마모량

Fig. 5는 인탈산동팁(I)과 인탈산동팁(II)의 용접마모량을 용접시간에 따라 측정한 결과이다. 이 결과에서 보듯이 인탈산동팁(I)은 용접 초기에 마모량이 급격히 증가하여 1시간이 경과하면 약 40%의 마모량을 보여 주었다. 1시간 이후에는 증가 속도가 다소 둔화되면서 2시간에 이르면서 약 45%의 마모량을 보여 주었다. 이와 같이 용접시간이 경과함에 따라 마모량 증가 속도가 저하되는 것은 다음과 같이 해석된다. 용접 초기에

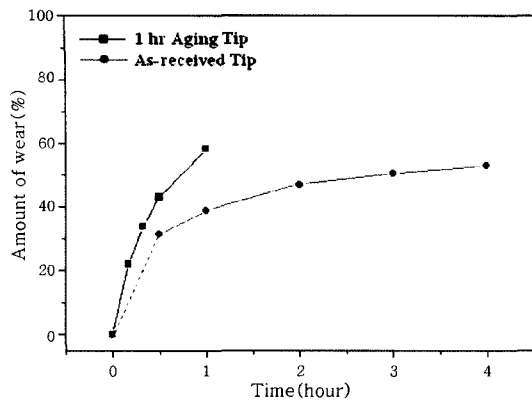


Fig. 5 Amount of wear vs. welding time curve for Cu-P(I) and Cu-P(II) contact tips

는 와이어/팁이 선접촉 상태에서 마모가 진행되다가 콘택트팁의 내면이 어느 정도 마모되면 면접촉 상태로 변환되어 마모가 진행되는데, 이러한 변화와 더불어 마모량이 증가할수록 접촉면이 넓어지기 때문이다. 선접촉 상태에서 면접촉 상태로 발전되면 접촉부위에 작용하는 면압(단위면적당의 하중)이 감소하게 되고, 접촉면의 넓이가 증가하면 증가할수록 작용면압은 더욱 감소하여 단위 시간당 마모량은 지속적으로 감소할 것으로 예상된다. 이러한 예상을 반영이라고 하듯이, 2시간 이후에는 증가속도가 더욱 둔화되면서 거의 직선적으로 증가하고 있는데, 이후부터는 용접아크가 다소 불안해지기 시작하였다. 4시간에 이르르면 마모량은 약 50%정도 도달하는데, 이러한 상태에서는 용접 아크가 매우 불안해지고 와이어가 좌우로 심하게 흔들리면서 사행비드(뺨이 기어가듯이 꾸불꾸불한 비드)가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 Quinn<sup>8)</sup> 등이 보고한 연구결과와 유사하였다. 결국 콘택트팁의 최대 수명은 마모량이 50%에 이르는 시간이라고 할 수 있으며, 이러한 기준에 의거하여 인탈산동팁(I)의 수명은 약 4시간 정도라고 할 수 있다.

인탈산동팁(II)는 마모 속도가 매우 빨라서, 용접 시작 후 30분 만에 마모량이 45%에 이르렀으며 1시간 후에는 60%의 마모량을 보여 주었다. 위에서 적용한 수명기준을 그대로 적용하면 인탈산동팁(II)의 수명은 약 30분을 조금 초과하는 정도라고 하겠다. 이렇게 인탈산동팁(II)의 수명이 인탈산동팁(I)에 비해 급격히 저하 된 것은 초기 경도가 낮기 때문이라고 하겠다. 용접 초기에는 와이어와 콘택트팁이 선접촉 상태에 있기 때문에 접촉부에는 상대적으로 높은 면압이 작용하게 된다. 이러한 상황에서 재료의 경도가 상대적으로 낮은 인탈산동팁(II)에서 초기 마모가 급속히 진행된 것으로 판단된다. 결국 마모량 곡선의 초기 기울기는 콘택트팁

의 초기 경도에 의해 크게 영향을 받는다고 하는 것인데, 이러한 측면에서 콘택트팁의 초기 경도는 주요한 평가 요소라고 할 수 있다. 그리고 대부분의 마모는 용접 초기에 발생하고 있기 때문에, 콘택트팁의 초기 경도가 높을수록 내마모성 및 수명은 증가할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.3 0.25%크롬동팁의 마모량

0.25%크롬동팁도 두 가지 경우에 대해서 용접 마모량 실험을 수행하였다. 하나는 구매(as-received)한 상태에서 아무런 처리도 하지 않은 0.25%크롬동팁(I)으로써 초기 경도가 138Hv이다. 다른 하나는 이를 실험실에서 열처리(annealing and aging)하여 석출경화형 팁으로 제조한 것이다. 열처리 과정을 보면, 1030°C에서 30분간 용체화 열처리(solution heat treatment)를 실시한 후 수냉(water quenching)을 하고, 실제 용접 상황에서 가열되는 온도(450°C) 보다 다소 높은 500°C에서 시효 열처리(aging heat treatment)를 실시하였다. Fig. 6은 시효시간에 따른 경도변화를 보여 주는 결과인데, 시효열처리 시간이 30분에 이르면 최고 경도(145Hv)가 되는 것을 알 수 있었다. 다음에는 이렇게 향상된 경도가 용접 중에 유지될 수 있는지를 확인하기 위하여 모의 열처리 시험을 수행하였다. 500°C에서 시효처리를 20분 및 30분 동안 실시한 각각의 시편에 대해 용접 중 가열 온도인 450°C에서 최대 8시간 동안 모의 열처리 시험을 실시하고, 열처리시간에 따른 경도변화를 측정하였다. 측정 결과를 Fig. 7에서 보여 주고 있는데, 시효열처리 시간이 20분인 시편은 언더에이징(underaging) 상태에 있었기 때문에 시간이 경과함에 따라 경도가 약간 상승하는 경향을 보였고, 30분 동안 시효처리하여 최대 경

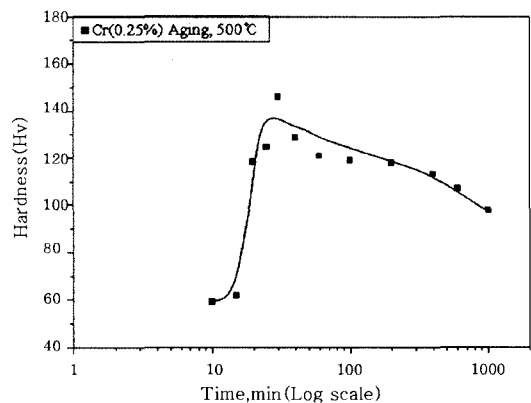


Fig. 6 Hardness variation of 0.25%Cr tip with aging time at 500°C

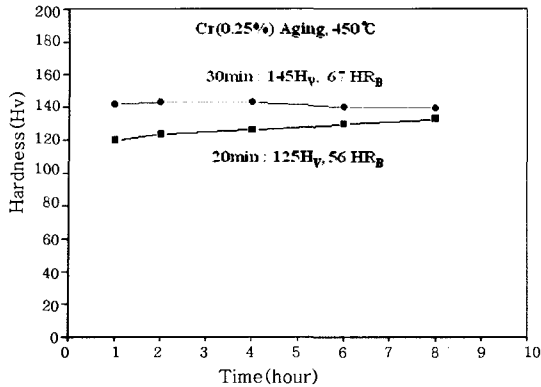


Fig. 7 Hardness variation of 0.25%Cr tip with holding time at 450°C

도에 도달한 팁은 약간 감소하는 경향을 보여 주었다. 이러한 결과로부터 석출경화형 팁을 제조함에 있어 언더에이징 상태로 제조되면 용접 중에 경도가 다소 증가하지만, 최적 상태로 시효처리(full aging)된 팁은 용접 중에 오버에이징(overaging)되면서 경도가 서서히 저하됨을 알 수 있다. 그러나 이들의 변화를 가공경화형과 비교하여 보면 무시할 수 있을 정도로 적은 수치이다. 이들 중에서 실제 용접마모시험에 사용된 팁, 즉 0.25%크롬동팁(II)는 30분 동안 시효처리한 것으로써 초기 경도를 최대로 한 것을 선택하였다. 따라서 0.25%크롬동팁(I)은 가공경화형 팁이며, 0.25%크롬동팁(II)은 시효처리에 의해 최고 경도가 부여된 석출경화형 팁인 것이다.

Fig. 8은 이들 두 가지 팁에 대해 용접 마모시험을 수행한 결과인데, 여기서 보듯이 두 가지 재료 사이에는 마모량에 있어서 커다란 차이가 있음을 보여 주고 있다. 0.25%크롬동팁(I)은 인탈산동팁과 같이 초기에 급속한 마모가 진행되어 초기 1시간 동안에 약 35%의 마모량을 보여 주었으며, 이후 직선적으로 증가하여 4

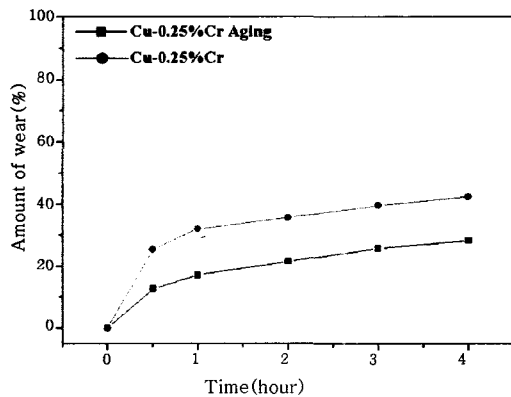


Fig. 8 Amount of wear vs. welding time curves for 0.25%Cr(I) and 0.25%Cr(II) contact tips

시간 용접 후에는 약45% 정도에 이르고 있다. 그러나 0.25%크롬동팁(II)는 초기 마모량이 급격히 둔화되면서 4시간 동안 용접을 실시한 후에도 마모량이 약 30%에 미치지 못하였다. 결국 0.25%크롬동팁(I)은 석출경화형 팁임에도 불구하고 가공경화형이기 때문에 용접 시작 후 1시간 이내에 경도가 급격히 저하하여 내마모성 향상에 기여하지 못한 반면 재 시효처리 팁은 초기 경도가 높을 뿐만 아니라, 이러한 정도 수준을 계속 유지할 수 있어서 내마모성이 지속 될 수 있었던 것이다.

### 3.4 1%크롬동팁에 대한 마모

Fig. 9는 1%크롬동팁에 대해 용접 마모량을 측정된 결과이다. 전체적으로 낮은 마모량과 완만한 그래프의 모양을 볼 수가 있는데, 4시간 연속용접 후의 마모량이 약 20%이내인 것을 알 수 있었다. 동일한 석출경화형 팁에도 불구하고 0.25%크롬동팁(II) 보다도 마모량이 현저히 작은 것은 아마도 크롬 함량의 차이가 크기 때문일 것이다. Cu-Cr 상태도에서<sup>9)</sup> 크롬의 최대 고용한도(maximum solubility)는 0.65%임을 찾아 볼 수 있다. 따라서 1%Cr을 함유한 1%크롬동팁에서는 상당량의 크롬이 공정반응에 의해 정출물로서 존재하게 된다. 이러한 석출물들이 광학현미경상에서 관찰된 입자들이다. 이들 공정석출물은 크롬의 함량이 높기 때문에 매우 경한 입자이다. 따라서 이들이 시효경화된 구리 기지 내에 존재하여 내마모성, 특히 고온 내마모성에 지대한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 그밖에도 1%크롬동팁은 언더에이징(underaging) 상태에 있었기 때문에 용접이 진행됨에 따라 석출경화 효과가 추가적으로 나타나는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성 또한 고온에서의 경도를 향상시켜 내마모성이 높아 졌을 것으로 생각된다.

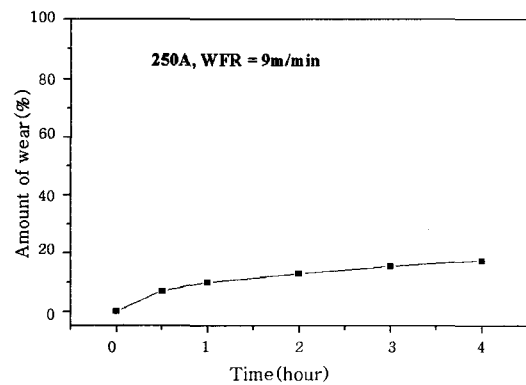


Fig. 9 Amount of wear vs. welding time curve for 1%Cr contact tip

### 4. 고 찰

지금까지 3가지 조성을 가진 다섯 가지 콘택트팁에 대해 용접마모 시험을 실시한 결과를 보여 주었다. 초기 상태가 어닐링 상태인 인탈산동팁(II)을 제외하면 나머지 4가지 팁은 가공경화형과 석출경화형으로 분류할 수 있다. 가공경화형으로 분류된 인탈산동팁(I)과 0.25% 크롬동팁(I)은 초기에 급격한 마모를 보여 주는데, 특히 인탈산동팁(I)은 1시간 이내에 약 40%정도의 마모량을 보여 주었다. 이것은 용접 후 1시간 이내에 연신된 미세조직이 회복 및 재결정(recovery and recrystallization) 과정을 거치면서 경도가 최저치로 저하하고, 그에 따른 내마모성 저하 때문이라고 하겠다. 0.25%크롬동팁(I)은 미세조직 및 경도 변화 측면에서 인탈산동팁(I)과 유사한 경향을 보여 주었으나 내마모성에 있어서는 다소 향상된 경향을 보여 주었다. 이러한 사실로부터 과시효에 의해 석출된 크롬 입자가 내마모성 향상에 어느 정도 기여하고 있음을 유추할 수 있다.

한편, 0.25%크롬동팁(II)의 마모량은 0.25%크롬동팁(I)과 비교해 보면 시효처리에 의해 내마모성이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이것은 시효처리에 의해 석출된 크롬입자가 고온에서 장시간 동안 내마모성을 유지시켜 주었음을 의미하는 것이다. 특히 1%크롬동팁에서는 공정반응에서 생성된 정출물과 용접 중 진행된 추가 시효에 의해 고온에서의 내마모성 크게 향상되었기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과로부터 현재 국내 일부 중공업사에서 적용하고 있는 팁 관련 기준, 즉 크롬함량 및 초기 경도에 대한 당위성을 평가하여 보면 다음과 같다. 첫 번째로 '일정 수준 이상의 크롬 함량'을 요구하는 기준에 대한 평가이다. 본 연구의 결과에서 보여 주었듯이, 0.25%크롬동팁(I)과 0.25%크롬동팁(II)은 동일한 조성을 가지고 있지만 내마모성 측면에서는 커다란 차이를 보여 주고 있기 때문에 상기한 기준은 합리적일 수 없다. 단지 석출경화형일 경우, 0.25%크롬동팁(II)과 1%크롬동팁의 시험결과를 비교하여 보면, Cr함량이 증가 할수록 내마모성 및 수명이 증가할 수 있다는 추론은 가능하다. 그럼으로 상기한 규정은 '석출경화형으로서 크롬함량이 어느 수준 이상이어야 할 것'으로 수정하는 것이 보다 합리적일 것이다. 다음으로는 초기 경도가 일정 수준 이상'이 되어야 한다는 규정에 대한 평가이다. 이에 대한 당위성을 보기 위하여 본 연구에서 시험한 5가지 팁에 대하여 내마모성과 초기 경도 사이의 상관성을 검토하여 보았다. Fig. 10은 Table 1에서 보여준 5가지 팁에 대해 초기 경도와 1시간 용접 후 측정된 마모량의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서

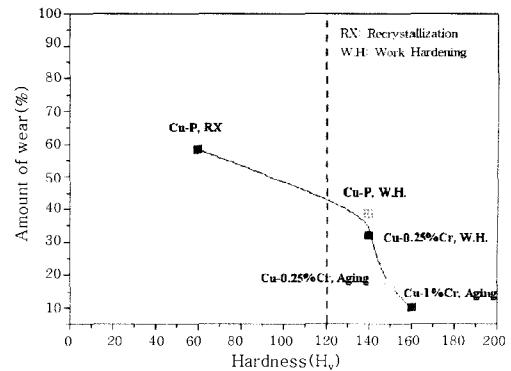


Fig. 10 Relation between initial hardness and amount of wear measured at 1 hour welding

적용기준을 '상온 경도 120Hv(또는 130Hv) 이상'으로 하였다 가정하면, 인탈산동팁(II)를 제외하고는 모두가 기준을 만족하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 기준을 만족한 4가지 팁들은 마모량에 있어서는 커다란 차이를 보여 주고 있다. 굳이 초기 경도를 이용하여 내마모성이 양호한 팁(1%크롬팁 과 0.25%크롬팁(II))과 불량한 팁(인탈산동팁(I)과 0.25%크롬팁(I))을 구분하고자 한다면, 기준치를 138~145Hv 사이의 수치로 하여야 하는데, 이러한 범위는 미세경도 측정오차에 비해 너무도 좁은 범위이다. 결국 콘택트팁의 내마모성을 평가함에 있어 초기 경도를 평가기준으로 활용한다는 것은 적절치 않다는 것이다.

이러한 문제점 때문에 저자들은 전보에서 새로운 기준을 제시한 바 있는데, 이는 가공경화형 팁과 석출경화형팁으로 구분하고자 하는 것이다. 이를 구분하는 방법으로써 450°C에서 1시간 열처리를 수행 한 후에 경도가 120Hv보다 높으면 석출경화형으로 분류하고 이보다 낮으면 가공경화형으로 분류한다는 것이다. 이렇게 분류하고자 하는 이유는 석출경화형 팁의 내마모성이 가공경화형에 비해 매우 우수할 것으로 예측되었기 때문이다. 이러한 예측을 확인하기 위하여 본 실험에서 얻은 마모량 시험결과를 450°C/1시간 열처리 후의 경도와 대응시켜 보았다. Fig. 11은 대응시킨 결과를 보여 주는 것인데, 여기서 확실히 알 수 있듯이 450°C/1시간 열처리 후의 경도는 내마모성이 우수한 팁과 내마모성이 불량한 팁을 확실히 구분하여 주고 있다. 열처리 후의 경도가 70Hv 이하인 가공경화형은 내마모성이 불량하였으며, 열처리 후의 경도가 140Hv 이상인 석출경화형 팁은 우수한 내마모성을 보여 주었다. 따라서 '450°C에서 1시간 열처리 후의 경도'는 석출경화형 팁과 가공경화형 팁을 구분하는 기준으로서 합당할 뿐만 아니라 콘택트팁의 내마모성을 평가할 수 있는 기준으로도 유용하게 활용할 수 있음을 입증하여 주었다.

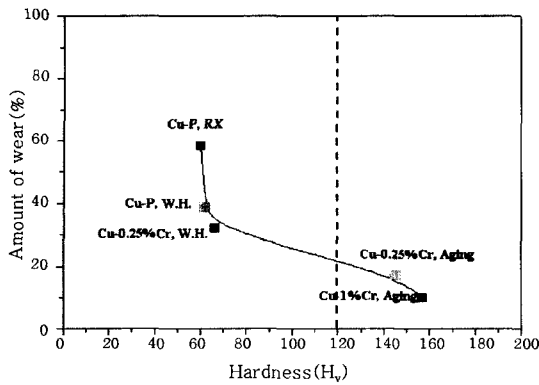


Fig. 11 Relation between the hardness of heat treatment at 450°C/1hr and the amount of wear measured at 1 hour welding

## 5. 결 론

GMA용접에서 콘택트팁의 마모정도를 용접시간에 따라 측정하고 측정된 결과를 팁의 재질에 따라 분류하고 금속학적 관점에서 고찰하여 보았다. 이에 다음과 같은 결론을 제시할 수 있었다.

- 1) 일반 시중에서 구매된 인탈산동팁은 가공경화형으로서 내마모성이 우수하지 못하였다.
- 2) 크롬동계 팁은 적절한 시효처리 여부에 따라 가공경화형 또는 석출경화형으로 구분되는데, 이들은 450°C/1시간 열처리한 후에 경도를 측정하면 구별할 수 있었다.
- 3) 가공경화형 팁은 극한 냉간압출로 상온 경도를 향상시켜도 실제용접 시 1시간 후가 되면 가공경화의 효과가 소멸되어 내마모성이 저하하였다.
- 4) 석출경화형 팁은 고온에서 장시간 초기경도를 유지할 수 있어서 가공경화형팁 보다 내마모성이 우수한 것으로 확인되었다.
- 5) '450°C/1시간 열처리 후의 경도'가 팁 선별기준으로서 보다 타당함을 실용접 마모시험 결과로부터 입증할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 신뢰성기반구축사업의 일환으로 수행되었기에 산업자원부 및 기술표준원 관계자들에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Hee Jin Kim Nam-hoon Kim, Hoi-Soo Ryoo and Jin-Hyun Koh: Reliability of Contact Tip for Gas Metal Arc Welding, Journal of KWS, 21-7(2003) 9-17 (in Korean)
2. Nam-hoon Kim, Hee Jin Kim, Hoi-Soo Ryoo and Jin-Hyun Koh: Variation of Microstructure and Hardness of Contact Tips during GMA Welding, Journal of KWS, 22-1 (2004) 43-49 (in Korean)
3. J. F. Rudy, D. C. Brown and W. G. Groth: Study of Current Contact Tubes for Gas Metal Arc Welding, Welding Research Supplement, 8 (1996) 374-378
4. T. Yamada and O Tanaka: Fluctuation of the Wire Feeding Rate in Gas Metal Arc Welding, Welding Journal, 9 (1987) 35-42
5. V. G. Degtyarev, M. P. Novikov and N. M. Voropal: Improving the Working Condition of the Electrode Wire-contact Tip Pair, Paton Welding Journal, 3-4 (1991) 290-294
6. J. Villafuerte.: Understanding Contact Tip Longevity for Gas Metal Arc Welding, Welding Journal 78-12 (1999) 29-35
7. J. Villafuerte: Contact Tip Failure Mechanisms, R&D Doc# 2001-01, Tregaskiss Ltd., Oldcastle, Ont., Canada, 1997
8. T. P. Quinn, R. B. Madigan, M. A. Mornis, and T. P. Siewert: Contact Tube Wear Detection in Gas Metal Arc Welding, Welding Journal 74-4 (1995) 115s~121s
9. Binary alloy phase diagrams: Vol. 1, ed. T. B. Massalski, pub. ASM, (1986) 819