

# GMA용접용 콘택트팁의 수명 예측

김 남 훈 · 김 희 진 · 유 회 수

## Life Time Prediction of Contact Tips for GMA Welding

Nam-hoon Kim, Hee-Jin Kim and Hoi-Soo Ryoo

### 1. 서 론

가스메탈아크용접(GMA용접)은 차폐가스를 사용하면서 소모전극인와이어를 모재 쪽으로 연속적으로 공급하여, 송급된 와이어의 선단과 모재 사이에서 아크가 발생되도록 하는 용접법이다. 와이어는 콘택트팁을 통하여 용융지로 유도되는데, 용융지로 유도된 와이어는 높은 아크열에 의해 용융되어 아크 기둥을 거쳐 용융지로 이행하게 되며, 용융부위는 가스노즐을 통하여 공급되는 차폐가스에 의해 주위의 대기로부터 보호된다. 용접이 진행되는 동안 아크를 안정적으로 유지하기 위해서는 용접 와이어가 송급되는 속도와 와이어의 용융 속도가 일치하여야 한다. 이를 위하여 와이어에는 제어된 전류가 공급되어야 하는데, 그러한 전류는 콘택트팁(contact-tip)을 통하여 용접 와이어로 전송되는 것이다<sup>1-5)</sup>.

그런데 용접을 장시간 수행하게 되면 콘택트팁이 손상되어 상기한 두 가지 역할((i)용접전류를 와이어에 전송, (ii)와이어를 용접하고자 하는 위치로 유도)을 온전히 수행할 수 없게 되고, 아크가 불안해 지게 되어, 결국에는 팁을 교환해 주어야 한다. 최근 용접산업계에서는 플렉스 코어드와이어 사용이 급격히 증가하였고, 생산성 향상을 위해 자동화용접 및 고전류용접 등이 보편화 되고 있다. 이러한 변화는 콘택트팁의 수명을 단축하여 팁을 보다 빈번히 교환하여 주어야 하는 문제를 야기하였다. 이는 결국 용접생산성을 저해하는 요인으로 작용하기 때문에 산업계에서는 팁의 수명향상을 절실히 요구하는 상황이 전개되고 있는 것이다.

GMA용접에서 콘택트팁의 수명을 결정하는 요인으로는 번백(burn back)과 '팁 구경 확장'이 있는데, 팁 구경이 확장되는 기구(mechanism)에 대해서는 전기적 에로존(electric erosion)과 와이어 송급에 따른 콘택트팁의 마찰마모가 복합되어 나타나는 것으로 이해되고 있다<sup>6-11)</sup>. 그러나 아직까지 이러한 기구들에 대해 이론적으로 접근한 연구는 보고되지 않았지만, 팁의 수명을

정량화 하여 비교평가 할 수 있는 시험방법은 세계 최초로 국내에서 제안되어 신뢰성규격(RS규격)으로 제정되어 있다<sup>12)</sup>. 그런데 이를 온전히 적용하기 위해서는 많은 노력과 시간을 필요로 하기 때문에 산업현장에서 바로 적용하기에는 어려움이 있는 것이 사실이다. 이에 본 보고에서는 기존에 연구한 결과를 토대로 하여 현장에서 보다 용이하게 적용할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 하였다.

### 2. 콘택트팁의 종류

현재 국내에는 여러 가지 종류의 콘택트팁이 사용되고 있다. 대부분 국내에서 생산되고 있는 제품이 사용되고 있지만 자동차산업과 같이 자동화가 성숙된 분야에서는 수입품의 비중이 높아지고 있는 것이 현실이다. 이들을 화학조성 측면에서 임의적으로 분류하여 보면, 콘택트팁과 관련된 규격이 존재하지 않기 때문에, 세 가지 조성으로 분류할 수 있다. 먼저 인탈산동을 소재로 한 인탈산동팁(이하 'Cu-P팁'이라고 함)이 있는데, 이는 국내 산업계에서 가장 광범위하게 적용되고 있는 국산 팁이다. 다음으로 크롬을 0.25-1.0% 함유한 크롬동을 소재로 한 크롬동팁(이하 'Cu-Cr팁'이라고 함)이 있다. 국내에서 생산되고 있는 Cu-Cr팁은 크롬함량이 0.25-0.6%으로 비교적 낮은데 반하여, 수입되어 사용되고 있는 Cu-Cr팁의 조성을 보면 대부분 0.6% 이상의 크롬을 함유하고 있다. 그밖에도 지르코늄팁이라고 불리는 팁이 있는데(이하 'Cu-Cr-Zr팁'이라고 함), 이는 크롬을 0.6% 이상 함유하고 있으면서 미량의 지르코늄(Zr)을 함유하고 있는 것이다. Cu-Cr-Zr팁은 아직 국산화되지 못하여 전량 수입되고 있는 제품이다.

한편 콘택트팁을 제조 공정에 따라 분류하여 보면 가공경화형(strain-hardened type)과 석출경화형(precipitation-hardened type)으로 분류할 수 있다. 가공경화형은 냉간가공에 의해 경도를 향상시킨 것이고, 석출경화형

은 시효경화 열처리에 의해 경도를 확보한 것이다. 인 탈산동은 시효경화 효과가 나타나지 않기 때문에 가공 경화형 만이 존재한다. 반면에 크롬동이나 지르코늄동 은 시효경화(age-hardened)효과가 있기 때문에 석출 경화형으로 제조되는 것이 바람직한데, 국내에서 생산 되는 저크롬 Cu-Cr팁은 가공경화형이 일반적이다. 즉, 국산 Cu-Cr팁은 크롬을 함유하고는 있지만 시효처리를 하지 않고 생산되고 있는 것이다.

콘택트팁을 분류함에 있어, 화학조성 및 제조공정 이외에도, 형상에 따라 분류할 수 있다. GMA용접용으로 사용하는 콘택트팁의 일반적인 형상은 내경이 일정한 원통형인데, 최근 외국에서 소개되고 있는 콘택트팁의 형상은 보면 내부에 판상의 스프링을 장착하고 있는 팁(이를 '알파팁'이라고 함) 또는 헬릭스 형상의 홈을 가공한 팁(이를 '헬릭스팁'이라고 함), 팁을 길이방향으로 절단한 팁(이를 '자기제어팁'이라고 함) 등이 있다<sup>13-15)</sup>. Fig. 1은 일반적인 형상의 팁과 알파팁의 형상을 도식적으로 보여주는 것이다. 알파팁은 내부에 장착된 스프링이 와이어를 밀어서 팁 선단과 와이어의 접촉상태를 항상 유지하고자 한 것이다. 이렇게 함으로써 전기적 에 로존에 의한 팁마모를 최소화하고자 한 것이다.

상기한 바와 같이 GMA용접이나 FCA용접에 사용되는 콘택트팁에는 다양한 종류가 있는데, 본 기술보고에서 인용한 결과는 저자의 연구실에서 그동안 비교평가 시험을 수행하면 사용한 7가지 팁에 대한 것이다. 이들 중에서 다섯 가지는 시판되고 있는 것을 국내외에서 구매하여 사용한 것이며, 한 가지는 시험실에서 제작한 것이며, 다른 하나는 최근 국내 업체에 의해 개발된 것

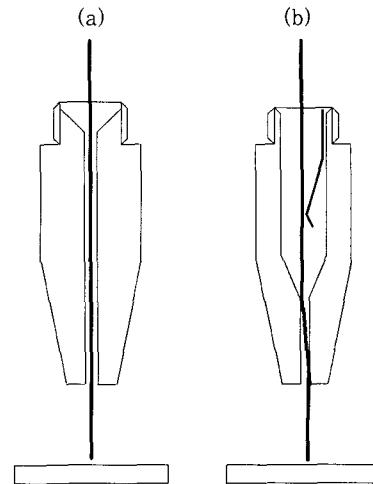


Fig. 1 Schematic drawing of contact tip:  
a)conventional tip, b) $\alpha$ -tip

이다. 이들을 화학조성, 제조방법 및 형상에 따라 분류하여 Table 1에서 보여 주고 있다.

Cu-P팁은 국산으로써 국내 용접산업계에서 가장 많이 사용하고 있는 팁이다. 이는 인(P)을 0.016%정도 함유하고 있는데, 생산과정에서 냉간 인발을 심하게 하여 가공경화형으로 제조된 것이다. 팁의 경도는 가공 정도에 따라 결정되는 것인데, 본 보고에서 취한 Cu-P팁의 초기(as-received)경도는 63HR<sub>B</sub> (136HV) 수준이었다. Cu-Cr(SH)팁은 국내에서 생산·시판되고 있는 것으로 국내 중공업계에서는 이를 '크롬동팁'이라고 부르고 있다. 이들은 크롬을 0.3% 수준 함유하고 있었지만, 생산공정은 Cu-P팁과 동일하다. 즉, 냉간가공에 의해 경도를 향상시킨 것이기 때문에 초기경도는

Table 1 Characteristics of contact tips used in this study

Identification of Contact Tip	Source	Composition(wt.%)			Hardness (HRB/HV)	Hardening Mechanism
		Cr	Zr	P		
Cu-P	domestic commercial	-	-	0.015~0.017	63/136	Strain-Hardened
Cu-0.3Cr(SH)	domestic commercial	0.20~0.35	-	-	65/138	
Cu-0.3Cr(PH)	experimentally manufactured	0.20~0.35	-	-	68/140	Precipitation-Hardened
Cu-0.8Cr	imported commercial	0.8~1.0	-	-	78/151	
Cu-0.8Cr(a)	imported commercial	0.7~0.8	-	-	79/163	
Cu-Cr-Zr	imported commercial	0.8~0.9	0.05~0.06	-	87/185	
Cu-0.6Cr	domestic recently developed	0.5~0.6	-	-	85/186	

Cu-P팁과 동일한 수준을 보여 줄 수밖에 없는 것이다. Cu-Cr(SH)팁을 실험실에서 석출경화형으로 새로이 제작한 것이 Cu-Cr(PH)팁이다. Cu-Cr(SH)팁을 아르곤 분위기에서 어닐링 열처리를 수행한 다음, 시효경화처리(aging treatment)를 하여 최고 경도에 도달하도록 제작한 것이다. 초기경도는 Cu-Cr(SH)팁보다 다소 높게 나타나고 있다. Cu-0.8Cr팁은 수입품으로써 국산에 비해 수명이 길다고 알려져 있는 제품이다. 0.8%의 크롬을 함유하고 있었으며 석출경화 열처리에 의해 강도를 확보한 것이다. 초기경도는 78HR<sub>B</sub>(151Hv)으로 측정되었다. Cu-0.8Cr(a)팁은 최근 일본에서 개발되어 소개된 것으로서 Cu-0.8Cr팁과 화학조성 및 제조공정이 유사하여 초기경도는 동일하지만, 특별한 형상을 가지고 있는 것이다. Fig. 1에서 보여 주었듯이 다른 것들은 모두 일반적인 형상을 하고 있지만 Cu-0.8Cr(a)팁만은 내부에 판상의 스프링을 장착하고 있는 것이다. 따라서 Cu-0.8Cr팁과 Cu-0.8Cr(a)팁을 비교하면 스프링의 역할을 확인할 수 있는 것이다. Cu-Cr-Zr팁은 통상적으로 지르코늄팁이라고 불리는 팁으로써 0.8% 크롬에 지르코늄을 추가하여 석출경화 효과를 보다 강화시킨 것이다. 이러한 합금조성으로 말미암아 초기경도가 87HR<sub>B</sub>(185Hv)로 상승하였다. 이러한 결과는 지르코늄팁의 우수성을 보여 주는 결과인데, 구매한 팁 중에서는 가장 비싼 것이었다. 한편, Cu-0.6Cr은 최근 국내에서 개발된 것으로서 지르코늄을 함유하지 않은 Cu-Cr계 팁이다. 지르코늄을 함유하지 않은 상태에서 시효처리 공정만을 개선하여 Cu-Cr-Zr팁과 유사한 초기경도치, 85HR<sub>B</sub>(186Hv)를 확보하는데 성공한 제품이다.

### 3. 고온 열처리 후의 경도 변화

GMA용접을 수행하게 되면 콘택트팁은 고온의 아크 열에 장시간 노출되기 때문에 경도가 저하하게 된다. 이러한 경도 저하를 모사하기 위하여 450℃에서 열처리를 수행하고 팁의 경도를 측정하게 된다. Fig. 2는 열처리 시간에 따른 경도 변화를 보여 주는 결과인데, 제조공정에 따라 커다란 차이를 보여 준다. Cu-P팁 및 Cu-Cr(SH)팁과 같이 가공경화형 팁의 경우에는 대략 60min 정도가 경과하면서 경도값은 급격히 저하하여 초기경도의 1/2정도로 연화되었다. 이러한 변화는 가공경화 된 재료가 450℃에서 회복 및 재결정(recovery and recrystallization)되면서 나타나는 현상임을 미세조직 관찰을 통하여 규명한 바 있다<sup>16)</sup>.

한편 석출경화형팁은 450℃ 열처리조건에서 상당기간 초기경도를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. Cu-

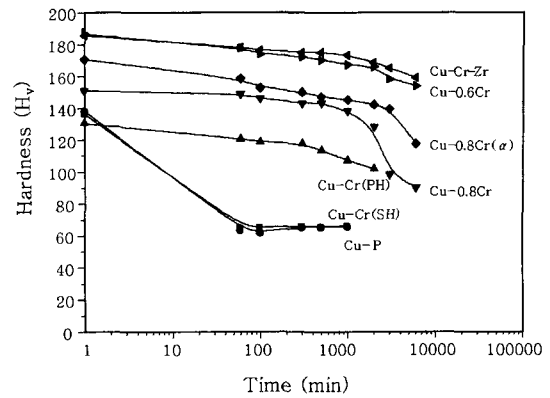


Fig. 2 Variation of hardness with heat treatment time at 450℃

0.3Cr(PH) 팁의 경우에는 초기경도가 약 130Hv이었는데, 300min까지는 초기경도를 유지하고 있다가, 그 이상으로 열처리 시간이 증가함에 따라 서서히 저하하여 2,000min에서 110Hv에 이르고 있다. 석출경화형으로 0.8%크롬을 함유한 Cu-0.8Cr팁 및 Cu-0.8Cr(a)팁의 경우에는 1,000min까지도 145Hv 이상의 경도치를 유지하고 있다가 그 이상에서는 다소 급격한 경도 저하를 보여 주고 있다. 즉 열처리 시간이 1,000min 또는 3,000min이상으로 증가하면 Cu-0.8Cr팁 및 Cu-0.8Cr(a)팁에서는 과시효(overaging)효과가 나타나고 있는 것이다. 그러나 Cu-Cr-Zr팁 및 Cu-0.6Cr팁에서는 6,000min까지도 급격한 경도 저하 현상을 보여 주지 않았을 뿐만 아니라, 그때까지도 150Hv 이상의 경도치를 유지하고 있었다. 이러한 현상은 이들 재료에 있어서 과시효 효과가 상당히 억제되고 있음을 보여 주는 것이다.

Table 2는 열처리 시간에 따른 경도변화를 보다 명확히 하기 위하여 초기경도와 열처리 후의 경도를 비교한 것이다. 열처리후의 경도는 열처리시간이 60min와 300min인 경우를 대표적으로 보여 주었다.

Table 2 Effect of heat treatment on hardness

Identification of contact tip	Hardness(HV)		
	As-received	450℃/60min	450℃/300min
Cu-P	136.3	65.0	65.8
Cu-0.3Cr(SH)	138.0	63.5	65.2
Cu-0.3Cr(PH)	130.5	120.9	117.8
Cu-0.8Cr	151.0	149.0	143.0
Cu-0.8Cr(a)	170.6	158.6	150.0
Cu-Cr-Zr	185.5	178.1	175.0
Cu-0.6Cr	186.5	177.7	172.3

#### 4. 콘택트팁의 내마모성

콘택트팁의 내마모성을 정량적으로 평가하는 시험방법에 대해서는 기 보고한 바와 같다<sup>17)</sup>. Fig. 3은 Table 1의 모든 콘택트팁에 대하여 용접 내마모시험을 수행하고 용접마모량을 와이어 송급길이에 따라 측정한 결과이다. 이 결과에서 보듯이 Cu-P팁은 용접 초기에 마모량이 급격히 증가하여, 와이어가 0.5km 송급된 시점에서 약 40%의 마모량을 보여 주었다. 이후에는 증가 속도가 다소 둔화되어 1km에 이르면서 약 45%의 마모량을 보여 주었다. 가공경화형인 Cu-0.3Cr(SH)팁은 Cu-P팁과 같이 초기에 급속한 마모가 진행되어 초기 0.5km 동안에 약 35%의 마모량을 보여 주었으며, 이후 직선적으로 증가하여 약 2km이상 용접 후에는 약 45% 정도에 이르고 있다. 그러나 실험실에서 석출경화형으로 제조한 Cu-0.3Cr(PH)팁은 초기 마모량이 급격히 둔화되면서 약 2km의 와이어를 용접한 후에도 마모량이 30%에 미치지 못하였다. 결국 Cu-0.3Cr(SH)팁과 Cu-0.3Cr(PH)팁은 동일한 크롬함량 및 화학조성을 가지고 있지만 내마모성에 있어서는 커다란 차이를 보여주게 된다. Cu-0.3Cr(SH)팁은 가공경화형이기 때문에 사용 중에 경도가 급격히 저하하여 내마모성에 기여하지 못한 반면, Cu-0.3Cr(PH)팁은 석출경화형이기 때문에 초기 경도를 장시간 유지할 수 있어서 내마모성이 향상 될 수 있었던 것이다. 이러한 결과는 석출경화형의 용접내마모성이 가공경화형 보다 매우 우수하다는 것을 보여 주는 것이다.

그리고 석출경화형인 Cu-0.8Cr팁은 전체적으로 낮은 마모량과 완만한 그래프 양상을 보여 주었는데, 2.2km의 와이어가 소모된 후의 마모량이 약 20%정도인 것을 알 수 있었다. 내부에 스프링이 내장된 크롬팁(Cu-0.8Cr(a))팁도 낮은 마모량을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 2.2km이상 연속용접 후의 마모량이 20%

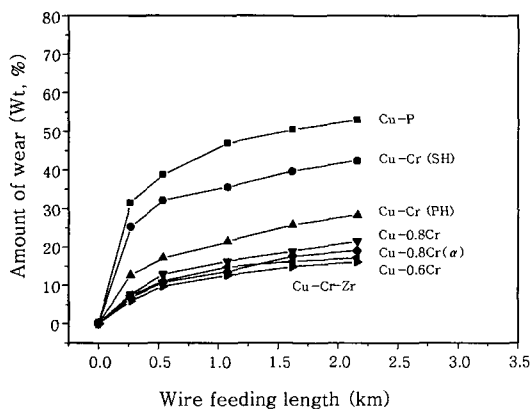


Fig. 3 Variation of wear amount with wire feeding length

보다 적었다. 초기경도가 약 185HV으로 매우 높았던 Cu-Cr-Zr팁과 Cu-0.6Cr은 마모량이 가장 완만하였으며, 2.2km이상 연속용접후에도 마모량은 15%정도 밖에 되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 Cu-0.6Cr팁이 크롬동임에도 불구하고 지르코륨동과 유사한 마모량을 나타낸 것은 크롬동팁 소재라 하더라도 적절한 시효처리 과정을 거치면 지르코륨팁과 동등한 내마모성을 가질 수 있는 것을 보여 주었다.

#### 5. 한계수명 측정

저자들은 Fig. 3과 같은 결과로부터 한계수명(critical life time)을 측정하는 방법을 제안한 바 있다<sup>12)</sup>. 제안된 방법에 의해 Fig. 3의 결과를 Fig. 4와 같이 가공하여 45% 마모량에 이르는 와이어 송급길이(km)를 한계수명이라고 정의하였다. Cu-P팁과 Cu-Cr(SH)팁은 한계수명이 각각 1km, 3km로써 아주 짧았지만 석출경화형 팁들은 최소 20km, 최대 900km에 이르렀다. 이러한 한계수명을 각각의 팁에 대해 산출하여 도표화한 것이 Table 3이다.

#### 6. 콘택트팁의 수명 예측

7가지 콘택트팁에 대해 계산된 한계수명(Table 3)과 450°C에서 1시간 열처리 후의 경도(Table 2)를 대응

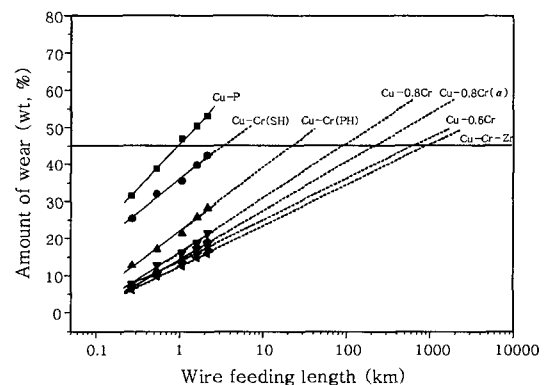


Fig. 4 Estimation of critical life time

Table 3 Critical life time of contact tips

Identification of contact tip	Critical life time (km)
Cu-P	1
Cu-0.3Cr(SH)	3
Cu-0.3Cr(PH)	20
Cu-0.8Cr	80
Cu-0.8Cr(a)	200
Cu-Cr-Zr	900
Cu-0.6Cr	600

시켜 최소자승법(linear regression method)에 의해 프롯(plot)한 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 보듯이 이들 사이에는 직선적인 관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 즉 열처리 후의 경도가 높으면 높을수록 내마모성이 증가하여 한계수명이 증가한다는 것이다. 이러한 직선적인 관계를 실험식으로 나타내어 보면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log Y(\text{km}) = 0.023(Hv) - 1.34 \quad (1)$$

이러한 직선적인 관계가 성립함에 따라 간단한 열처리 시험과 경도측정만으로 콘택트팁의 수명을 예측할 수 있게 되었다. 실제로 용접내마모시험을 수행하여 Fig. 3과 같은 데이터를 얻고자 하면 4시간 이상의 용접을 실시하여야 하며, 용접을 실시하는 동안 주기적으로 칩 내경의 마모정도를 측정하여야 하기 때문에 많은 노력과 시간이 소요되는 것이다. 그러나 상기한 관계식이 성립함에 따라 이러한 노력을 하지 않고서도 콘택트팁의 내마모성을 비교 평가할 수 있게 되었으며, 한계수명을 예측할 수 있게 된 것이다.

이상의 시험결과를 종합하면, '450°C에서 1시간 열처리 후의 경도'는 석출경화형 팁과 가공경화형 팁을 구분하는 기준으로서 합당할 뿐만 아니라 콘택트팁의 내마모성 나아가 팁의 수명을 정량적으로 평가할 수 있는 기준으로도 유효하다는 것이다. 그리고 현재 국내에서 사용하고 있는 여러 가지 팁은 용접내마모성에 있어서 커다란 차이가 있음을 확인시켜 주었다. 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 인탈산동팁의 수명이 가장 짧았으며, 수입되어 사용되고 있는 지르코늄팁의 수명이 가장 길다는 것을 확인 할 수 있었다. 한편 Table 3과 Fig. 5에서 확인 할 수 있듯이, Cu-0.8Cr(a)의 수명은 Cu-0.8Cr보다 2배 이상 길게 나타나고 있다. 이러한

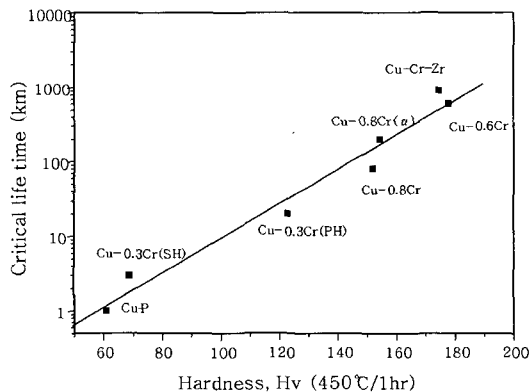


Fig. 5 Relation between critical life time and the hardness measured after heat treatment at 450°C/1hr

결과는 내부 스프링에 의한 영향이라고 할 수 있는데, 이에 대한 평가를 보다 면밀히 수행할 필요가 있다고 본다.

## 7. 맺음말

현재 국내 업계에서 자체 운용되고 있는 팁 선별기준은 초기 입고 상태에서의 경도 또는 크롬함량 등을 고려하고 있는데, 콘택트팁이 사용되는 환경이 고온이라는 것을 고려한다면 초기 경도는 의미가 없다고 하겠다. 이는 앞에서 보여 주었듯이 크롬을 함유하고 있지만 가공경화형인 Cu-0.3Cr(SH)팁의 경우, 고온에서의 거동이 Cu-P팁과 동일하였을 뿐만 아니라 한계수명에 있어서도 크게 다르지 않았기 때문이다. 따라서 '450°C에서 1시간 열처리 후의 경도치'가 보다 합리적인 대안이 될 수 있다. 이는 가공경화형 팁과 석출경화형 팁으로 구분하는 척도가 될 수 있을 뿐만 아니라, 팁의 내마모성 및 한계수명을 예측할 수 있는 인자로서 충분히 활용될 수 있기 때문이다. 무엇보다도 산업현장에서 간단한 실험만으로 적용할 수 있는 기준인 것이다. 향후 이러한 기준이 사용자에게는 팁을 선정하는 기준으로써, 그리고 생산자에게는 새로운 팁을 개발함에 있어 유용하게 사용될 수 있기를 기대한다.

## 참고 문헌

1. J. F. Rudy, D. C. Brown and W. G. Groth: Study of current contact tubes for gas metal arc welding. *Welding Journal*, 8(1996), 374-378
2. T. Yamada and O Tanaka: Fluctuation of the Wire Feeding Rate in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 9(1987), 35-42
3. V. G. Degtyarev, M. P. Novikov and N. M. Voropal: Improving the working condition of the electrode wire-contact tip pair. *Paton Welding Journal*, 1991, 3(4), 290-294
4. J. Villafuerte, J. 1999. Understanding contact tip longevity for gas metal arc welding: *Welding Journal* 78(12), 29-35
5. Villafuerte, J. 1997. Contact tip failure mechanisms, R&D Doc# 2001-01, Tregaskiss Ltd., Oldcastle, Ont., Canada
6. T. P. Quinn, Madigan, R. B., Mornis, M. A., and Siewert, T. A. 1995. Contact tube wear detection in gas metal arc welding. *Welding Journal* 74(4), 115-s to 121-s
7. The contact-tube distance in a gas-shielded metal-arc welding-How does it work?, *Welding and Cutting*, 2(2002), 80
8. G. Adam, T. A. Siewert, T. P. Quinn and D. P. Vigiotti: Contact tube temperature during GMAW,

- Welding Journal, **80**(2001), 37
9. R. DeNale and W. E. Lukens: Increasing contact tube life during titanium gas metal arc welding, Welding Journal, **65**(1986), 28
  10. J. Villafuerte: Improving contact-tube performance through cryogenics, Welding Journal, **79**(2000), 45
  11. J. Villafuerte: Stronger copper for longer lasting contact tips and electrodes, Welding Journal, **82**, 11(2003), 50
  12. RS D 0031: Contact Tip for Gas Metal Arc Welding, 2004(in Korean)
  13. Welding technology 12(2003), 55. (in korean)
  14. Private communication
  15. Korean patent: 10-2004-0085595
  16. 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).
  17. Nam-hoon Kim, Hee Jin Kim, Hoi-Soo Ryoo, and Jin-Hyun Koh: Prediction on the Wear Resistance of Contact Tips for GMA Welding, Journal of KWS, **22-4**(2004), 35-42 (in Korean)



- 김남훈(金男勳)
- 1975년생
- 코웰테크
- 용접전원개발, 용접기자재신뢰성평가
- e-mail : namshy@paran.com



- 김희진(金喜珍)
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 유희수(柳會洙)
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr