

## GMA용접용 콘택트팁의 신뢰성 평가 기준 제정

standard enactment of Reliability testing for contact tip during GMA welding

김남훈, 김희진, 유희수

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

Reliability Assessment Center for Metallic Materials, KITECH, ChonAnSi, Korea

E-mail: [namshy@kitech.re.kr](mailto:namshy@kitech.re.kr), [kimhj@kitech.re.kr](mailto:kimhj@kitech.re.kr), [hsryoo@kitech.re.kr](mailto:hsryoo@kitech.re.kr)

Tel: +82-41-589-8668, +82-41-589-8641, +82-41-589-8521

Fax: +82-41-589-8240

### Abstract

용접산업이 발전함에 따라 가스메탈아크 용접에서 고내마모성의 콘택트 팁이 요구되어지고 있다. 현재 국내외에서는 콘택트팁에 대한 수명평가 기준이 없으며, 일부 업계에서 자체 규격을 제정하여 운용하고 있지만 근거가 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 콘택트팁의 신뢰성 평가기준을 제정하고자 하였다. 팁의 주요 파손기구로는 고온 마찰마모, 전기적 에로존, 번백 등이 있다. 신뢰성 평가는 경도 시험, 열처리 후 경도, 용접 마모, 전기전도도를 시험으로 구성되었다. 팁의 수명은 마모가 45%에 도달했을 경우 송급된 와이어 총 길이로 하였으며, 4시간까지 마모시험 한 결과를 근거로 하여 한계수명을 추정하였다. 본 연구에서는 세 가지 조성의 다섯 가지의 콘택트팁에 대하여 4시간동안 내마모성 실험을 하였으며, 마모정도는 1시간 단위로 면적비를 백분율로 환산하여 측정하였다. 실험 결과 가공경화형팁은 1시간이내에 재결정 및 입자 성장에 의한 경도 저하로 가공경화가 팁 수명에 지속적 영향을 주지 못하였다. 반면, 석출경화형팁은 석출경화 효과가 지속되어 가공경화형팁보다 수명이 향상 되었다.

### 1. 서론

와이어를 용가재로 사용하는 가스메탈아크(gas metal arc, 이하 GMA이라고 함)용접에서 콘택트팁은 '용접전류를 와이어에 전송'하고 '와이어를 요구하는 위치로 유도'하는 역할을 담당한다. 이러한 기능을 원활히

수행하기 위해서 콘택트팁에 사용되는 재료는 전기전도도(electrical conductivity)가 높아야 한다. 그렇지 못하면 자체에서 저항열이 발생하고, 팁과 와이어 사이에서 미세아크가 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. 그러나 본 기준안이 제정되는 시점에서 콘택트팁에 대한 내마모성 및 수명 평가에 관한 규격이 마련되어 있지 않아서, 수요가는 콘택트 팁을 콘택트팁 선정함에 있어 어려움을 겪고 있었다. 더구나 국내에서는 콘택트 팁의 내마모성 또는 수명을 평가할 수 있는 시험장비가 구축되어 있지 않아서 국산 콘택트 팁에 대한 신뢰성 평가가 이루어지지 못하였다. 따라서 콘택트 팁에 대한 신뢰성평가 기준 제정 및 신뢰성 평가장비를 구축하였고, 이를 통하여 국산 콘택트 팁에 대한 신뢰성 확보 및 신뢰성향상 기회를 제공하고 국산품의 수입 대체와 세계시장 진출을 촉진하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 평가기준에 대한 배경과 파손구구에 대한 설명들을 제공함으로써 규격의 완성도를 높여 신뢰성평가기준을 세계적 수준으로 발전시키는데 그 목적이 있다<sup>1~6)</sup>.

## 2. 고장기구와 시험 종류

콘택트팁의 주요 고장기구는 표1에 보는바와 같이 마찰마모, 전기적 에로존과 번백이 있다. 용접와이어 송급으로 인하여 마찰마모가 발생함으로 팁의 경도, 표면조도가 좋아야 한다. 또한 콘택트팁에 고전류가 흐르므로 전기적 에로존에 의하여 팁구멍의 내면에 손상을 일으켜 마모를 가속화 시킨다. 그리고 스파터 발생으로 인하여 번백이 발생하여 용접이 중단된다<sup>5-7)</sup>. 표2는 고장기구에 따른 시험방법을 나타내었다.

## 3. 실험방법

콘택트팁의 시험평가 항목은 가공형상 평가, 기본물성 평가와 수명평가 항목으로 분류할 수 있다.

### 3.1 가공형상평가

콘택트팁의 외부 형상을 규정하는 것으로서, 실제 제시된 도면과 부합되는 정도를 평가하는 것이다. 형상 중에서 가장 중요한 사항이 콘택트팁 구멍의 가공 정도이다. 기준안에서 제시된 기준값들은 현재 국내에서 생산되고 있는 제품과 수입하여 사용하고 있는 제품을 평가하여 도출된 값들이다.

### 3.2 기초물성평가

기초물성으로는 화학조성, 초기 경도, 열처리 후 경도, 전기전도도 등을 통하여 확인하는데, 이러한 물성들은 콘택트팁의 수명에 직접적인 영향을 미치지 성질임으로 콘택트팁을 제조하는 소재가 기본적으로 만족해야 하는 성질이다. 화학조성을 제외한 기

타 물성은 사용 중에 지속적으로 변화하는 성질이다. 특히 주요한 성질은 고온에서의 경도 및 전기전도도 인데, 이러한 고온 성질을 측정이 어렵기 때문에 상온에서 측정하는 것이다. 기준안에서는 이러한 취약점을 보완하기 위하여 모의 열처리를 수행하고 경도변화를 측정하도록 하였다. 즉 일정시간 사용하여도 경도가 크게 변화하지 않음을 보증함으로써 고온에서의 경도도 일정수준을 일정시간 유지할 수 있도록 한 것이다.

### 3.3 용접 내마모 저항성 평가

가스메탈아크 용접에서 사용되는 콘택트팁의 수명은 용접에 의한 팁의 마모 저항성에 의해 결정된다. 그런데 팁의 재질 및 제조방법에 따라 내마모성은 크게 변화함으로 내마모 저항성을 평가하게 된다. 이를 평가하기 위한 시험방법으로써 가장 적합한 조건은 현장에서 가장 보편적으로 사용하는 용접조건에서 용접을 실시하여 용접시간 또는 송급와이어의 길이에 따른 팁 구멍의 마모정도를 평가하는 것이다. 본 기준안에서는 1.2mm 직경의 와이어를 사용하는 것으로 하였기 때문에 용접전류를 250A로 하였는데, 이는 송급속도가 9m/min인 조건이다. 그리고 용접전압은 V, 콘택트팁과 모재간 거리는 20mm로 설정하였다. 이러한 조건에서 일정시간 용접한 후에 출구측 구멍의 형상을 보면 그림 2와 같이 구멍이 확장된 것을 관찰 할 수 있다. 그림 2 (b)에서 마모된 부위는 점선으로 표시되어 있다. 기준안에서는 이렇게 마모된 부위의 면적을 측정하여, 이를 초기면적으로 나눈 값을 팁

표 1 Requirements and Failure Modes/Mechanisms Matrix

Failure Modes/ Mechanisms Requirements (Stresses and Performance)	Abrasive Wear	Electric Erosion	Burn Back	
High Temperature	×			
Wire Feeding	×			
Welding Current		×		
Electrical Conductivity		×		
Welding Spatter			×	

마모량( $W_t$ )이라고 정의하였다.

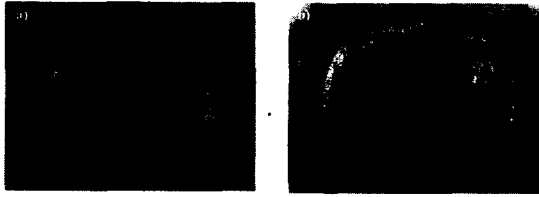


그림 2 콘택트팁 출구측 구멍의 형상:(a) 용접전 초기 상태, (b) 일정시간 용접한 후의 상태

#### 4. 기준제정 및 근거

##### 4.1 기초 물성시험 방법 및 기준의 근거

###### 4.1.1 기초물성시험

기초물성 시험 및 평가기준은 기준안을 제정하는 화학분석 시험, 열처리 전·후의 경도 시험, 열처리 전·후 전기전도도 시험 등이 포함된다. 콘택트팁은 화학조성에 의거하여 '가공경화형'과 '석출경화형'으로 구분할 수 있는데, 가공경화형은 내마모성이 극히 불량하여 본 기준안에서는 제외하였다. 이러한 가공경화형의 대표적인 재질이 인탈산동이다. 그밖에 크롬, 은, 지르코늄 등이 합금 원소로 첨가된 재질은 모두 '가공경화형'으로 분류되는 재질이다. 석출경화형 중에서도 시효 열처리를 행하지 않으면 내마모성이 확보되지 않기 때문에 이를 배제하기 위하여 열처리(450°C/1시간) 후 경도치를 규정하게 된 것이다. 화학분석 및 경도시험은 제품상태에서 측정이 가능하기 때문에 콘택트팁에서 직접 측정하는 것으로 하였다. 그러나 전기전도도 시험은 기계가공 직전의 봉상의 시편에서 측정하는 것으로 하였다.

이는 전기전도도 측정을 규정하고 있는 KS D 0240 규격에서 시편의 길이가 최소 300mm 이상이어야 한다는 규정이 있기 때문이다. 이러한 규정은 측정 오차를 최소화하기 위한 것이다. 전기전도도가 낮으면 번백이 자주 발생하고, 자체 저항 때문에 가열되어 스페터가 쉽게 부착된다. 따라서 전기전도도는 높을수록 좋은데, 그러려면 합금성분을 최소화하여야 한다. 그러나 합금성분이 낮으면 경도가 저하하여 내마모성이 저하한다. 따라서 전기전도도가 좋으면서, 경도도 높은 재질이 콘택트팁용으로 적합한 재질인 것이다.

###### 4.1.2 기준의 근거

크롬동 합금을 용체화처리(solid solution treatment)하면 Cr함량에 따른 전기전도도는 감소하는데, Cr함량이 0.33%이상 첨가되면 전기전도도가 40% IACS 수준 이하로 저하한다. 그러나 이를 시효처리하면 Cr입자가 Cu 기지 내에 석출하여, Cu기지의 순도가 높아져서 전기전도도가 회복된다. 그림 3은 시효처리 온도에 따른 전기전도도 변화를 보여 주고 있다. 이 시험결과에서 보듯이 0.33% 및 0.56% 크롬동의 경우에 있어서 450°C에서 1시간 시효처리를 행하면 전기전도도가 80% 수준으로 회복되고, 500°C에서 1시간 시효처리를 행하면 90% IACS 수준으로 회복됨을 보여 주고 있다. (주: IACS는 도전율을 표시하는 단위로서 International Annealed Copper Standard의 약자이다.) 그러나 크롬동에 Fe, Mn과 같은 불순물이 혼입되어 있으면 시효처리를 하더

표 2 Failure Modes/Mechanisms and Test Methods Matrix

Failure Modes/ Mechanisms	Test Methods			
	초기 경도시험	열처리 후 경도시험	용접 마모시험	전기전도도 시험
마찰 마모	◎	◎		
전기적 에로존			◎	◎
번백			◇	
* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통				
* Failure Mode/Mechanism은 해당 소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄				
* Test Methods는 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법을 나타냄				

라도 전기전도도가 회복되는 정도가 낮아진다. 따라서 이러한 불순물을 규제하는 방법의 일환으로 본 기준안에서는 75%IACS 이상의 전기전도도를 확보하는 것으로 하였다. 한편 시효처리를 행하면 석출경화 효과로 인하여 경도도 증가하는데, 그림 4는 어닐링한 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. 이를 근거로 하여, 그리고 0.25~0.65% 크롬을 함유한 저크롬동 합금 재질에서도 확보 가능한 60HR<sub>B</sub>(100Hv)를 기준으로 제시하였다. 그리고 사용 환경을 고려하여 450°C에서 1시간 열처리 한 후에도 기준 경도치를 만족해야만 하는 것으로 하였다.

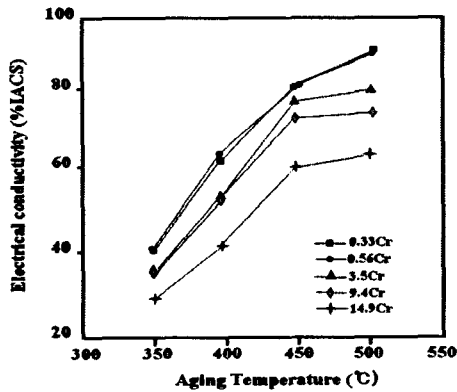


그림 3. 시효처리 온도에 따른 크롬동 합금의 전기전도도 변화

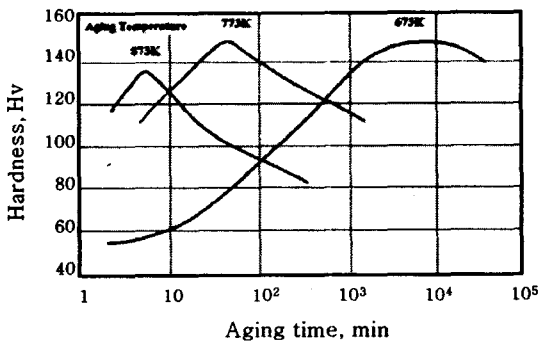


그림 4. Cu-0.6%Cr 합금에서 열처리 온도와 시간에 따른 경도변화

#### 4.2 수명평가 시험 방법 및 기준의 근거

##### 4.2.1 용접 내마모 시험

본 기준을 제정하는 시점에서 콘택트팁의 용접마모 시험과 관련하여 규격화되어 있는 시험방법은 없었으며, 장시간 용접을 위해 파이프 연속용접을 실시하는 것으로 하였다. 용접을 하는 동안에 콘택트팁 선단에 스파터가 부착하여 용접이 중단되는 상황을 최소화하기 위하여 스파터 발생이 가장 작은 용접기법 및 용접조건을 선택하였다. 용접방법으로써는 아르곤+산소(2%)를 보호가스로 하는 가스메탈 아크 용접법을 선택하였으며, 용접전류는 스프레이 이행 조건을 선택하여 스파터 발생을 최소화 하였다. 그리고 솔리드와이어와 플럭스코어드와이어 중에서 품질의 균질성 측면에서 보다 우수한 솔리드와이어를 사용하는 것으로 하였다. 와이어의 직경은 가장 보편적으로 사용하는 1.2mm로 하였다. 용접은 1시간씩 연속용접을 실시하는 것으로 하였다. 현장에서는 한번의 용접이 1분 이내에 끝나는 경우도 있지만, 이러한 상황을 재연하기에는 장시간이 소요되어 연속용접을 하게 된 것이다. 그리고 용접조건은 1.2mm 직경의 와이어로써 가장 보편적으로 사용하는 조건을 선택하였다.

##### 4.2.2 예비시험결과

기준안 제정을 위하여 시중에서 구매한 국산 및 외산 콘택트팁에 대해서 수명 시험을 수행하였다. 이들은 가공경화형 인탈산동, 가공경화형 저크롬동, 석출경화형 고크롬동이다. 그리고 비교시험을 위하여 가공경화형 인탈산동팁은 1000°C에서 30분 동안 어닐링처리 하여 어닐링 상태의 인탈산동 팁을 만들었으며, 가공경화형 저크롬동은 어닐링 처리 및 시효처리를 행하여 석출경화형 저크롬동을 제조하였다. 이들 5가지 콘택트팁에 대해 용접 내마모 시험을 각각 수행하고, 45% 마모량(W<sub>t</sub>)에 도달하는 용접 와이어 송급길이를 도출하고자 하였다<sup>8)</sup>. 기준안에서는 마모량(W<sub>t</sub>)이 45%에 이르는 시점에서의 와이어 송급길이를 '한계수명'이라

고 칭하였다. 그림 6은 와이어 송급길이(용접시간)에 따른 마모량을 측정한 결과이고, 그림 7은 수명한계에 이르는 송급길이를 추정하기 위하여 x-축을 로그 좌표로 변환하여 나타낸 것이다. 모두 직선적인 관계를 보여 주고 있으며, 석출경화형에 대해서는 직선을 연장하여 45% 마모량에 이르는 시점을 한계수명으로 추정하였다.

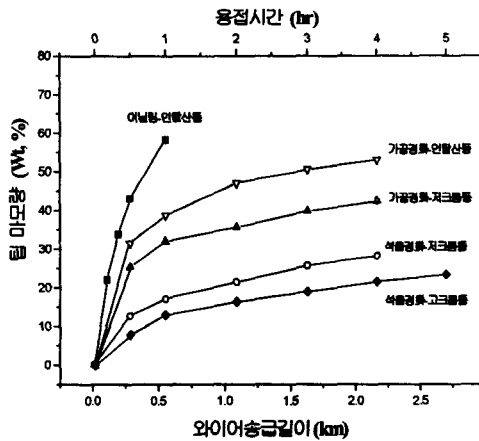


그림 6. 용접와이어 송급 길이 및 용접시간에 따른 콘택트팁 마모량 증가 추세

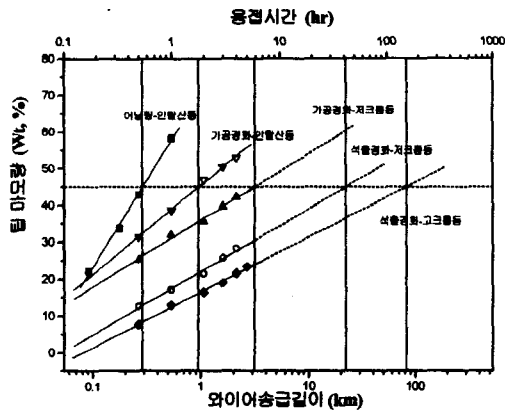


그림 7. 용접와이어 송급 길이 및 용접시간의 로그값과 콘택트팁의 마모량과의 상관 관계

#### 4.3 수명 등급의 분류

상기한 시험결과 및 수명 추정방법에 의거하여 예측된 수명은 석출경화형 저크롬동의 경우는 22km 이었으며, 석출경화형 고크롬동은 80km 이었다. 동일한 석출경화형이라고 하더라도 수명에 있어서는 커다란 차이를 보여 주고 있는 것이다. 따라서 기준안

에서는 이러한 차이를 구분하여 인증을 부여하고자 하였다. 즉 40km 이상의 B<sub>5</sub>수명을 보증할 수 있는 콘택트팁을 A등급으로 하고, 20km 이상의 B<sub>5</sub>수명을 보증할 수 있는 콘택트팁을 B등급으로, 10km 이상의 B<sub>5</sub>수명을 보증할 수 있는 콘택트팁을 C등급으로 한 것이다. 이러한 등급은 예비시험결과를 토대로 임의적으로 설정한 것이기 때문에 추후 보다 세분화할 필요성이 있다.

#### 4.4 형태모수 추정

용접마모에 의한 콘택트팁의 고장밀도함수가 와이블분포를 따른다고 가정하고 형태모수( $\beta$ ) 값을 추정하기 위하여 가공경화형 인탈산동을 사용하여 용접 내마모 저항성 시험을 수행 하였다. 모두 9개의 시편에 대해 기준안에 제시된 조건에서 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 9개 시편의 수명은 1.566~1.906km의 범위에 있었으며, 평균은 1.778km이고 표준편차는 0.114km이었다. 이들의 결과를 와이블분포지에 나타내었으며 이를 그림8에 나타내었다. 그림8의 직선의 기울기로부터 형태모수( $\beta$ )값은 14.이었다.

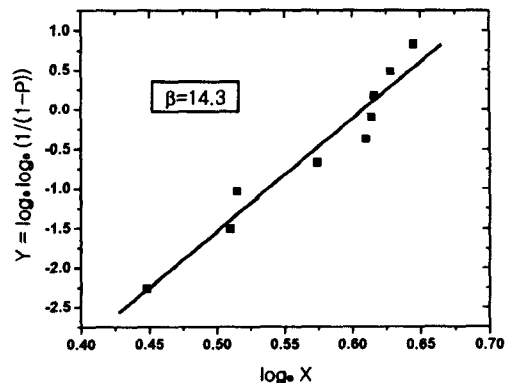


그림 8. 와이블 확률지를 이용한 형태모수 값 추정

#### 4.5 신뢰도 및 시험편 수

앞에서 언급하였듯이 신뢰성이 양호한 콘택트팁은 2.16km(4시간)의 와이어를 용접하여도 한계수명인 45% 마모량에 미치지 못한다. 신뢰성이 우수하여 한계수명이 10km

이러면 18.5시간의 용접이 요구되며, 한계수명이 40km이라면 73.6시간이 소요된다. 이들을 한계수명까지 용접하려면 많은 양의 용접재료 및 용접모재가 소요될 뿐만 아니라 사용량이 과다 할 뿐만 아니라 장시간의 용접으로 인중에 소요되는 시간이 크게 증가한다. 콘택트팁에 대한 마모 시험은 최대 4시간으로 하고, 4시간 동안 축적된 마모량 데이터를 그림 7과 같이 연장하여 한계수명을 도출하였다. 4시간 용접에서 한계수명에 도달하지 않은 경우에는 용접시간(송급 와이어 길이)에 따른 마모량이 직선적으로 증가하는 것으로 가정한 것이다. 이에 대해서는 향후 시험적인 검증할 필요가 있다. 그리고 수명분포는 그림 8의 시험결과로부터 형태모수  $\beta = 14.0$ 인 와이블 분포를 따른다고 가정하였다.

이러한 와이블분포의 누적분포함수는 식(1)과 같이 표현된다.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

여기서  $\eta$  는 척도모수이며,  $\beta$  는 형상모수이다.

(1)식의 누적분포함수에서  $B_x$ 수명 ( $x\% = 100x$ ) 및 신뢰수준( $100(1-\alpha)\%$ )과 이를 보증하기 위한 필요 시료수( $n$ )는 다음과 같은 관계식(2)으로 표현된다.

$$n \geq \frac{\chi_\alpha^2(2r+2)}{2} \times \frac{1}{\ln(1-x)^{-1}} \times \left(\frac{t^*}{t_0}\right)^\beta \quad (2)$$

여기서  $t^*$  : 목표 시험수명,  $t_0$  : 시험시간,  $r$  : 허용 고장수.  $n$  : 시료수 이다. 본 기준안에서는  $B_5$ 수명 10km, 20km 또는 40km를 보증하기 위한 시험시간( $t_0$ )을 용접 와이어 송급길이로 도출하였다. 그리고 수명평가시험에는 3개의 시편을 사용하는 것으로 하였다. 이들 수치를 식(2)에 대입하면 무고장( $n=0$ )조건에서 필요한 시험시간은  $t_0 = t^* \div 0.8096$  이다.

따라서  $t^* = 10\text{km}$ 이면  $t_0 = 12.35 \text{ km}$  이 되고,

$$t^* = 20\text{km} \text{이면 } t_0 = 24.70 \text{ km}$$

이 되고,

$$t^* = 40\text{km} \text{이면 } t_0 = 49.40 \text{ km}$$

이 도출된다.

따라서 3개의 시편 모두에서 45%마모량에 이르는 시간이 12.5km 이상이면  $B_5$ 수명 10km를 95% 신뢰수준으로 보증할 수 있으며, 45%마모량에 이르는 시간이 25km 이상이면  $B_5$ 수명 20km를, 45%마모량에 이르는 시간이 50km 이상이면  $B_5$ 수명 40km를 95% 신뢰수준으로 보증할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 용접용 콘택트팁의 파손기구와 해석 그리고 시험 평가 항목에 대한 기준안과 근거에 대해 실험해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 기준안에서 경도는 열처리전·후 모두 60HR<sub>B</sub>(100HV)이상이어야 한다.
- 2) 기초물성평가 항목인 전기전도도는 75%IACS 이상을 확보하여야 한다.
- 3) 3개의 시편에 대해 용접 내마모시험을 수행하여 45%마모량에 이르는 용접와이어 송급길이가 모두 12.5km 이상이면  $B_5$ 수명 10km를 95% 신뢰수준으로 보증한다. 마찬가지로 25km 이상이면  $B_5$ 수명 20km를, 50km 이상이면  $B_5$ 수명 40km를 동일한 신뢰수준으로 보증한다.

## 참고문헌

- [1] Hee Jin Kim Nam-hoon Kim, Hoi-Soo Kim, 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 Kim, and Jin-Hyun Koh: Variation of Microstructure and Hardness of Contact Tips during GMA Welding,

Journal of KWS, 21-7(2003) 9-17 (in Korean).

[4] 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). p374-378

[5] T. Yamada and O Tanaka: Fluctuation of the Wire Feeding Rate in Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, 9(1987), 35-42

[6]. 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). p290-294

[7] J. Villafuerte, J. 1999. Understanding contact tip longevity for gas metal arc welding: Welding Journal 78(12): 29-35

[8] 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