기 술 논 문

점용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 절연팁 개발에 관한 연구

서 승 일* · 장 상 길**

*한국철도기술연구원 고속철도사업단
**(주)로템 생산기술부

A Study on the Development of Insulated Electrode Tip for Spot Welding to Reduce Indentation

Seung Il Seo* and Sang Gil Jang**

*High Speed Rail Division, Korea Railroad Research Institute, Anyang 431-080, Korea
**Dept. of Production Technology, Rotem Company, Changwon 641-808, Korea

Abstract

Stainless rolling stocks are usually fabricated by spot welding process without painting. Indentation on the surface of the car body after spot welding injures the beauty of the stainless rolling stocks. In this study, insulated electrode tips to reduce the indentation are developed and applied to the actual spot welding works. The developed tips are composed of head, neck, hole for cooling water, body and resistance material. They provide large surface contact area with the base materials during spot welding and enhance the current density by necking. Experimental results using the developed tips show that small indentation and sufficient tensile shear strength is produced due to large contact area and enhanced current density.

(Received June 10, 2002)

Key Words : Spot welding, Indentation, Insulated cap tip, Stainless rolling stock

1. 서 론

점용접(spot welding)은 전극팁의 가압력과 통전 전류에 의한 저항 발열에 의해 모재 사이의 접촉면에서 용융 너깃(nugget)이 형성됨으로 접합이 이루어지게 하는 용접 방법으로서, 효율적인 접합과 용접 변형 감소에 유리하므로 박판 구조물의 조립 시에 광범위하게 적용되고 있다. 특히 객차와 전동차용으로 활용되는 스테인리스 철도차량은 언더프레임의 일부를 제외하고는 대부분 점용접을 적용하여 차체 구조가 조립된다. 그런데 스테인리스 철도차량에서는 스테인리스 판재 표면의 광택을 살리기 위해 도장 작업을 생략하고 있으므로, 점용접에 의해 발생한 외관의 압흔(indentation)은 차체 미려도에 악영향을 미치므로 최소화시키는 것이 필수적이다. 압흔 깊이의 감소를 위해 점용접 시의 전류를 감소시키거나 가압력 또는 통전 시간을 변경시키는 개선책도 시도될 수 있으나[1], 접촉부의 충분한 저항 발열을 통한 접합부의 인강전단강도를 확보하면서 압흔 깊이를 효과적으로 감소시킬 수 있는 개선책을 얻기는 힘들다. 본 연구에서는 인장전단강도를 만족시키면서 압흔 깊이를 획기적으로 감소시킬 수 있는 점용접용 전극팁을 개발하여 그 효과를 제시하고자 한다.

2. 점용접 방법의 종류

점용접 방법은 크게 직접 통전 방식, 시리즈 통전 방식, 간접 통전 방식으로 나누어 볼 수 있는데, 스테인리스 철도차량 차체의 제작 시에는 세가지 용접 방법이 모두 적용되고 있다. 직접 통전 방식의 용접은 가장 일반적인 점용접 방법으로서, Fig. 1, 2와 같이 상하 전극팁 사이에 모재를 놓고 가압을 한 후에 전류를 통전하여 모재 사이의 접촉면에서 저항 발열을 발생시키고 용융 시켜 모재를 서로 접합하는 방법이다. 직접 통전 방식의 점용접 시에는 보통 상부 전극팁을 회전이 자유롭고 판재와의 접촉 면적이 넓은 회전팁(Swivel Tip)

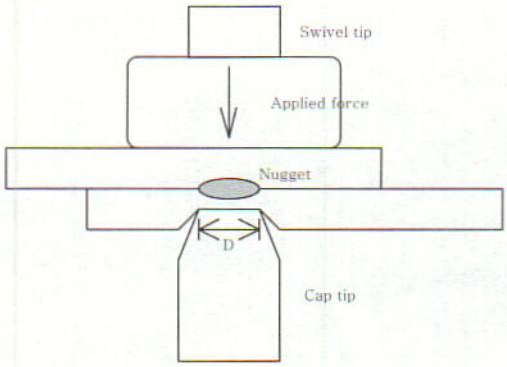

Fig. 1 Direct spot welding process

Fig. 2 Direct spot welding machine

을 사용하나 하부 전극팁은 통전 시의 전류 밀도를 높여 주기 위해 원형(round) 또는 원추형(cone) 전극팁을 사용한다. Fig. 3, 4의 시리즈 통전 방식은 용접 효율을 높이기 위해 두개 이상의 전극팁과 하부 동판 사이에 전류가 흐르게 하고, 전극팁 하부 모재들 사이의 접촉면에서 저항발열에 의한 너깃이 형성되어 용접이 이루어 지게 한다. 시리즈 점용접기는 보통 동판 위에서 수치제어 방식으로 자동용접을 수행할 수 있다. 간접 통전 방식은 모재 자체를 전류의 통로로 활용하여 가압 시 접촉점에서 용접이 이루어지게 하는 방법인데, 상하 전극팁의 가압 방향이 일치하지 않아도 되는 경우에 긴요하게 활용할 수 있다. Fig. 5, 6에서 볼 수 있는 바와 같이 상하 전극팁 사이에 모재를 놓고 가압을 한 후에 전류를 통전하여 모재 사이의 접촉면에서 저항

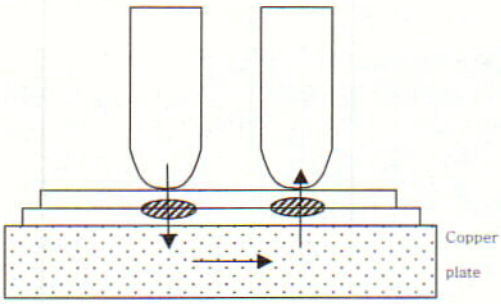

Fig. 3 Series spot welding process

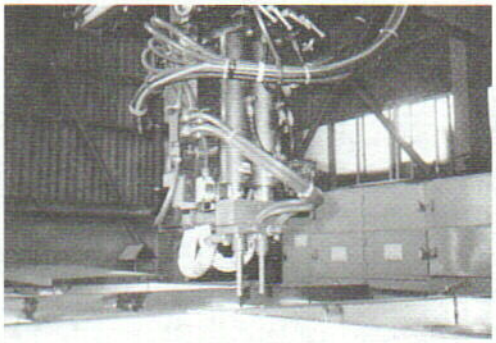

Fig. 4 Series spot welding machine

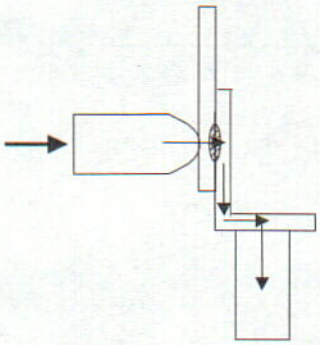

Fig. 5 Indirect spot welding process

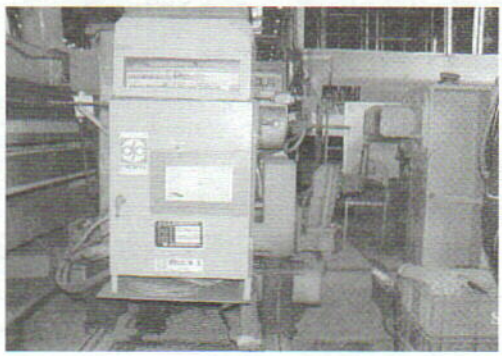

Fig. 6 Indirect spot welding machine

발열을 발생시키고 용융 시켜 모재를 서로 접합하는 방법이다.

점용접 시의 중요한 용접 조건으로는 통전전류, 통전시간, 가압력이라 할 수 있는데, 점용접 과정의 저항발열은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Q = I^2Rt \tag{1}$$

여기서, Q = 발열량

I = 통전전류

R = 저항

t = 통전시간

(1)식과 관련하여서 가압력이 저항과 관계가 있다. 점용접 시의 저항은 주로 재질의 비저항(specific resistance)과 접촉저항으로 이루어지는데 접촉 저항은 보통 가압력에 역비례하는 경향을 보인다. 가압력의 크기를 감소시키면 접촉저항이 증가하고 발열량이 증가하여 압흔깊이가 증가하는 결과가 초래되고, 접촉저항을 감소시키기 위해 가압력을 증가시키면 전극팁과의 접촉하는 부분의 압력을 증가시켜 표면응력 증가에 의한 압흔 깊이 증가 결과가 나타나게 된다[2]. 가압력에 따라 나타나는 상반된 효과를 제어하는 것은 현실적으로 상당한 어려움이 따르게 되고, 전류밀도를 증가시키기 위한 원형 또는 원추 형상의 전극팁은 과도한 압흔 깊이를 불가피하게 유발시키게 된다. 따라서 용전조건의 제어에 의한 압흔 깊이 감소 방안은 한계가 있으므로 좀 더 획기적인 압흔깊이 감소 방안이 필요하다. 본 연구에서는 점용접 시에 압흔깊이를 획기적으로 감소시키기 위해 새로운 전극팁을 개발하고자 하였다.

3. 일체형 절연팁의 원리

압흔깊이를 획기적으로 감소할 수 있는 새로운 전극팁을 본 연구에서는 절연팁(insulated cap tip)이라 이름을 붙였는데, 그 원리와 형상은 Fig. 7, 8과 같다.

절연팁은 본체와 목부분, 헤드, 절연재, 냉각수 통로로 구성되어 있다. 절연팁의 목부분은 본체를 통해 흐르는 전류의 밀도를 높여 주어 너깃에서 충분한 용융이 일어나도록 하는 역할을 한다. 헤드부분은 모재와 접촉면적을 넓혀 줌으로써 표면응력을 대폭적으로 감소시키는 역할을 하게 된다. 절연재는 목부분으로만 전류가 흐르도록 헤드와 본체와의 전류 흐름을 차단하고 집중시키는 역할을 하게 된다. 냉각수 통로는 헤드까지 냉각수가 흐르게 함으로써 전극팁의 마모를 방지하고 수명을 연장시키는 역할을 하게 된다.

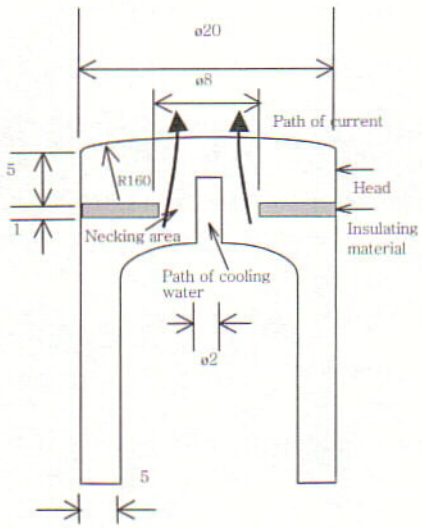

Fig. 7 Details of insulated cap tip

Fig. 8 Photo of insulated cap tip

4. 일체형 절연팁의 상세 사항

4.1 헤드부분의 평활도

헤드부분의 끝면은 편평하게 하는 것이 압흔 감소에 유리하나 약간의 곡률이 존재하는 곡면부에 편평한 팁을 사용하면 접촉부분이 편심이 되어 너깃이 불량으로 되는 경우가 많다. 이런 약점을 해소하기 위해 헤드의 끝면에 약간의 곡률을 주는 것이 필요하다. 실험 결과에 따르면 팁의 중앙에서 헤드의 높이가 주변의 높이보다 0.5mm 정도 높게 하는 것이 좋다.

4.2 헤드의 두께

헤드의 두께는 인장강도, 너깃의 직경 등과 같은 점용접 품질에 영향을 미치고, 반복가열에 따른 마모에 의해 팁의 수명과도 관계가 있다. 헤드의 두께가 두꺼우면 팁의 수명은 증가되지만 헤드의 끝부분에서는 전류 밀도가 감소되는 효과가 나타나고, 헤드의 두께가 너무 얇게 되면 너깃이 찌그러지는 현상도 나타나게 된다. 반복 실험을 통해 얻어진 적절한 헤드의 두께는 4~5mm 정도이다.

4.3 전류 통로인 목부분의 직경

목부분의 직경에 따라 전류 밀도가 달라지고, 이에 따라 너깃의 직경과 인장강도가 변화하게 된다. 목부분의 직경이 커지게 되면 냉각이 원활하게 되어 팁의 수명을 향상시킬 수 있는 이점이 있으나, 전류 밀도가 낮아져서 적절한 용접이 이루어지지 않는 경우가 발생하게 된다. 반대로 목부분의 직경이 감소하게 되면 전류 밀도가 상승되어 적은 전류로 용접을 할 수 있으나, 너깃 직경이 작아지고 냉각이 불충분하게 이루어지게 된

다. 또한 냉각수 통로를 두는데 제한이 있게 된다. 적절한 목부분의 직경은 표준 용접 조건에서 제시하는 전극팁의 선단경[3]으로 하는 것이 좋다.

4.4 헤드와 본체와의 간격

헤드와 본체와의 간격은 목부분의 길이라고도 할 수 있는데, 이 부분에 절연재가 삽입된다. 이 간격이 크게 되면 절연재 삽입에는 유리하지만 목부분의 강도가 취약해져서 목부분이 휘어져 버릴 우려가 있다. 간격이 너무 작게 되면 절연재 삽입이 곤란하고 가공이 어렵게 되는 문제가 있다. 가공성 및 강도 등을 고려하여 간격을 1mm로 하는 것이 가장 바람직하다.

4.5 냉각수 통로의 직경

목부분의 내부를 관통하는 냉각수 통로는 헤드에까지 냉각을 하여 줌으로써 헤드의 마모를 방지하여 팁의 수명을 향상시키는 역할을 한다. 전류는 목부분의 바깥 표면을 따라 대부분 흐르기 때문에 목부분 내부의 구멍은 전류의 흐름을 저해하지 않는다. 따라서 냉각수 통로를 크게 하는 것이 원활한 냉각을 위해서 좋지만 목부분의 강도를 생각하면 어느 정도는 제한되어야 한다. 실험을 통해 보면 직경 2mm의 냉각수 통로가 강도 및 냉각 관점에서 적절하다.

4.6 절연재

절연재는 목부분 이외의 전류 흐름을 차단하는 역할과 헤드와 본체 사이에서 헤드의 하중을 본체에 전달하는 역할도 한다. 따라서 어느 정도의 경도는 갖고 있으면서, 절연성과 내열성이 뛰어난 재질로 선택하여야 한다. 비닐 계통의 재료는 내열성 때문에 절연재로 적합하지 않고, 석면은 적절한 경도가 부족하고, 내열성도 다소 부족하므로 적절하지 않다. 전기 제품에서 사용되는 각종 절연재에 대해 실험을 수행한 결과, 운모로 만든 마이카판[4]이 가장 적절한 절연재임이 입증되었다. 마이카판은 두께 1mm 이상의 판으로 성형이 가능하고 적절한 강도와 경도를 지니고 있으며, 2,000℃이상의 고온에서도 견디고, 절연성도 우수하므로 일체형 절연팁의 절연재로 최적이라고 판단된다.

4.7 팁의 재질

스테인리스 차체 점용접을 위한 전극팁의 재질로는 보통 크롬동을 많이 사용한다. 그런데, 본 절연팁의 경우 헤드 부분에 통로가 연결되어 냉각수가 공급되지만 그 효과가 헤드 전체를 완전 냉각시킬 만큼 충분하지 않으므로 반복 사용에 따른 과열에 의해 마모가 심한 경향이 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 고강도 크롬동 전극팁[5]을 사용하는 것이 내구성 확보 차원에서 유리하다.

4.8 절연팁의 압흔 감소 효과

평판을 구체로 가압한 경우 접촉면의 변형은 다음 식[6]과 같이 주어진다.

$$d = 1.04\left(\frac{F^2\gamma^2}{2R}\right)^{1/3} \tag{2}$$

여기서, $\gamma = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$

d = 접촉면 변형

F = 가압력

R = 접촉 구체의 반경

E_1, E_2 = 재료의 탄성 계수

ν_1, ν_2 = 재료의 포아송 비

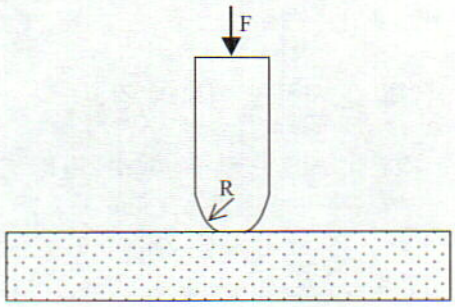

Fig. 9 Round tip contacting with base plate

곡률 반경이 다른 원형팁의 접촉변형을 비교해 보면 다음식과 같다.

$$\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{1/3} \tag{3}$$

철도차량 제작 시에 흔히 사용되는 직경 20mm 캡(Cap)팁의 경우, 원형 팁(R20)으로 가압할 때에 비해 절연팁(R160)으로 가압하면 50% 이상의 접촉면 변형 감소를 (3)식으로부터 확인할 수 있다. 실제 시편에 대해 절연팁을 사용하여 점용접을 한 경우와 원형 캡팁을 사용하여 용접을 한 경우를 비교해 본 사진은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 두 사진을 비교해 보면 팁이 접촉

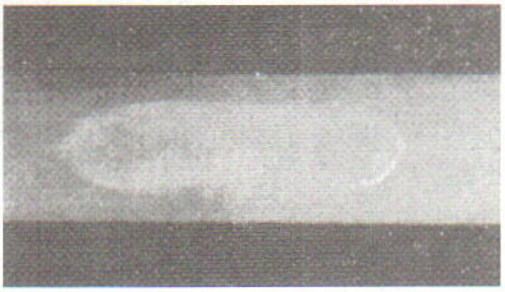

Fig. 10 Macro-section of spot welded joint with insulated cap tip

Fig. 11 Macro-section of spot welded joint with round cap tip

한 부분의 압흔 깊이에서 상당한 차이를 보이고 있다. 절연팁을 사용하는 경우 압흔 깊이는 절반 이하로 감소되는 효과를 확인할 수 있다.

4.9 절연팁을 사용한 경우의 강도

일체형 절연팁으로 시편에 대해 점용접을 실시하고 인장강도 시험을 수행한 결과는 Table 1과 같다. 절연팁을 사용하여 용접을 수행한 경우의 인장전단강도는 원형 전극팁을 사용한 경우와 같은 정도이며 기준치 이상이었다.

5. 링형 절연팁

Fig. 5 와 같은 간접통전 방식의 점용접 시에는 모재를 통과해서 전류가 흘러 하부의 전극팁으로 연결되므로, 일체형 절연팁을 사용하면 절연팁 헤드의 가장자리를 통해 전류가 흐르게 되어 적절한 너깃이 형성되지 않는다. 이런 문제를 보완하기 위해 Fig. 12 및 Fig. 13과 같은 링(ring)형 절연팁을 개발하였다.

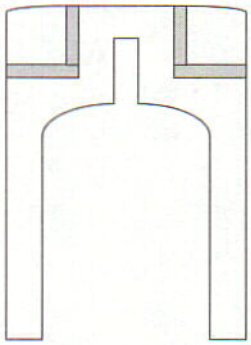

Fig. 12 Details of ring type cap tip

Fig. 13 Photo of ring type cap tip

링형 절연팁은 헤드의 중앙부분으로만 전류가 흐르고 가장자리로 전류가 흐르는 것을 막기 위해 링과 본체뿐만 아니라 링과 헤드사이에도 절연을 하였다. 링은 모재와의 접촉면적을 넓게 하여 표면 압력을 감소시키는 역할을 하고 절연에 의해 전류는 흐르지 않으므로 전류를 헤드 중앙으로 집중시키는 역할도 한다. 링형 절연팁을 이용하여 스테인리스 전동차 차체의 하부 언더프레임 부분을 간접 통전 방식을 이용하여 점용접한 표면 사진은 Fig. 14와 같다. 기존의 원형팁을 이용하여 점용접한 Fig. 15에 비해 상당한 압흔 감소 효과를 눈으로 확인할 수 있다.

Table 1 Tensile shear strength of spot welded joint with insulated cap tip

Material	Dimension of specimen (mm)	Thickness (mm)	Applied force(kgf)	Current(A)	Welding time (cycle)	Tensile shear strength (kgf)	JIS strength criteria (kgf)[7]
SUS304	150×40	2+3	700	9000	34	2113	530
SUS304	150×40	2+3	700	10000	8	1295	530
SUS304	150×40	2+3	700	10000	15	1790	530
SUS304	150×40	2+3	700	10000	10	2476	530

6. 절연팁의 적용

개발된 절연팁은 Fig. 16과 같은 실제 스테인리스 전동차에 적용하여 상당한 압흔 깊이 감소 효과와 외판 미려도 향상 효과를 보았다. 절연팁을 Fig. 4와 같은 NC시리즈 용접기에 적용하여 스테인리스 전동차 차체의 블록을 점용접하여 본 결과, 한 블록의 용접이 종료될 때까지 300타점 정도를 연속으로 용접하여도 팁의 내구성에 문제가 없었다. 실제 차체에 적용한 결과를 토대로, 최대 5개 블록을 점용접한 후에 팁을 교체하는 것이 적정 용접 품질을 유지할 수 있는 기준이라 사료된다.

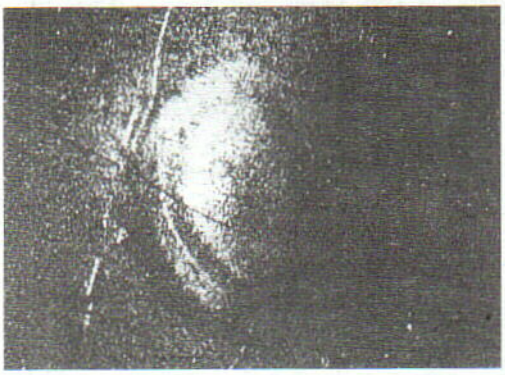

Fig. 14 Surface appearance of indirect-spot welded specimen by ring-type insulated tip

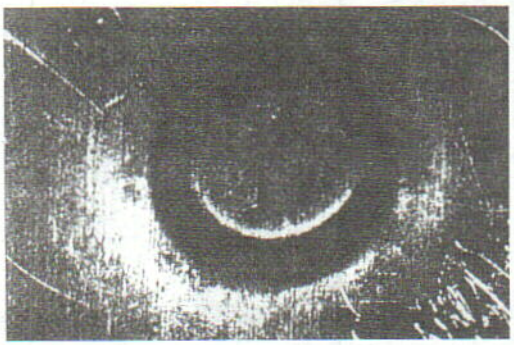

Fig. 15 Surface appearance of indirect-spot welded specimen by round tip

Fig. 16 Stainless electric urban transit

7. 결 론

무도장의 스테인리스 철도차량 외판은 미려도가 중요한데, 점용접에 의한 압흔은 미려도에 악영향을 미친다. 본 연구에서는 스테인리스 철도차량의 외판 미려도 향상을 위해 압흔 깊이 감소를 위한 전극팁을 개발하였다. 압흔 감소용 절연팁은 형상 변경과 절연재의 사용으로 인해 모재 표면 압력의 감소와 전류의 밀도 증가를 도모한 전극팁이라 할 수 있다. 표면 압력의 감소로 인해 고온 상태의 용접부 주위에서 소성변형도의 감소로 인한 압흔 깊이 감소 결과가 얻어지게 되고 전류 밀도 증가로 인해 적정한 강도를 가진 건전한 용접부가 얻어지게 된다. 개발된 전극팁은 압흔 감소가 필요한 다양한 구조물의 점용접 시에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. S.I. Seo, J.K. Lee, S.K. Jang and B.W. Cha : A Atudy on the Optimum Welding Conditions for Reducing the Depth of Indentation of Surface in Spot Welding, Journal of KWS, **14-2** (1996) (in Korean)
2. K. Nakane and Y. Torii : Study on Determination of Optimum Welding Condition in Resistance Spot Welding, Journal of Japanese Welding Society, **42-3** (1973) (in Japanese)
3. American Welding Society : Resistance Welding Manual, 2nd edition, 1950
4. 성원전기공업㈜ : 마이카판 Catalog 1995 (in Korean)
5. 영일특수금속(주) : YK45전극팁 Catalog, 1994 (in Korean)
6. Walter D. Pilkey : Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices, Wiley Interscience, 1994 427-428
7. Japanese Industrial Standards : Welded Joints of Stainless Steel for Railway Rolling Stock - Design Methods, JIS E 4049, 1990