

# 스테인레스 철도차량

## 차체 제작 과정에 관한 고찰



서 승 일  
한국철도기술연구원  
책임연구원, 정회원

### 1. 서론

스테인레스강(stainless steel)은 내부식성이 강하고, 강도 및 가공성, 용접성이 우수하여 국내외에서 철도차량 차체 재질로 널리 사용되고 있다. 스테인레스강 차체는 박판 구조물로서 성형된 판재를 주로 점용접 방법으로 조립하여 완성한다. 국내에서 독자 기술로 스테인레스 차체를 제작한 지는 이미 10년 이상 경과한 상황이므로 상당한 수준의 설계 및 생산기술이 축적된 상태이다. 그러나 차체 제작 시에는 항상 문제가 발생하고 이를 해결하기 위한 기술적인 노력은 지속되고 있다. 본 강좌에서는 스테인레스 철도차량 차체 제작 과정을 설명함으로써 독자들의 이해를 돕고, 차체 제작 시에 주로 발생하는 문제점을 검토하고 대책을 고찰함으로써 향후 연구 방향 설정과 스테인레스강 차체의 품질을 향상시키기 위한 기초로 삼고자 한다.

### 2. 스테인레스강 차체의 제작 과정

Fig. 1에서 보는 바와 같이 스테인레스강 철도차량 차체는 성형된 판재로 구성되며, 판재의 재질은 STS304 및 STS301L이 주로 많이 사용되고 있다[1]. STS304는 일반적으로 많이 사용되는 오스테나이트계 스테인레스강이고, STS301L은 탄소함유량은 낮추고 냉간 가공 정도에 따라 강도를 향상시킨 재질이다.

스테인레스강 차체의 제작 과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 제철

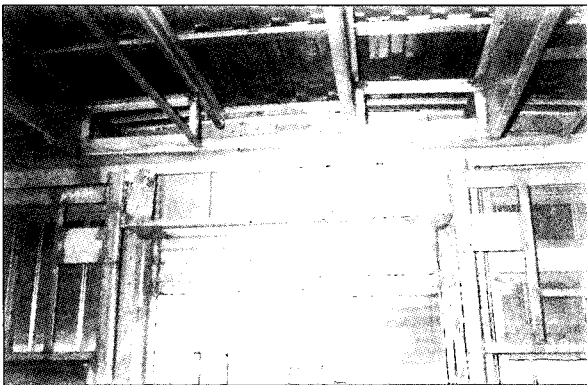


Fig. 1 스테인레스 차체 내부

소로부터 구매된 강판은 절단과 가공, 소조립, 대조립 과정을 거친 후, 차체로 완성된다. 국부적인 보강재나 브라켓(bracket) 등은 금형을 이용한 프레스로 굽힘 가공하고, 바닥구조의 키스톤 플레이트(key stone plate), 지붕구조, 단부구조의 외판, 캔트레일(cant rail) 등 단면이 곡면인 연속 부재는 롤포밍(roll forming)을 이용하여 성형한다. 카라인(car line)과 같은 곡선 부재는 스트레치 포밍(stretch forming) 공정을 거쳐 가공한다. 스테인레스 차체의 주요 접합 방법은 점용접이고, 하부구조(underframe)를 조립할 시에는 후판 구조물의 접합을 위해 아크용접(arc welding)을 이용한다. 차체 조립 과정에 적용하는 점용접 방법은 수동(manual) 또는 로봇, 자동(NC series), 간접(indirect) 등의 방법이 있다. 지붕구조와 캔트레일의 연결을 위해서는, 점용접과 같은 저항 용접이지만 접합부가 연속적인 시임용접이 적용된다. Fig. 3는 차체 하부 구조 제작 과정을 보여 준다. 차체 조립장에서는 대조립된 하부구조(underframe), 측구조(side structure), 지붕구조(roof structure), 단부구조(end structure)를 조립하여 차체로 완성하게 된다. 특히 하부구조와 측구조의 결합을 위해서는 간접 점용접(indirect spot welding) 방법이 적용된다. 점용접 후 차체의 표면에는 용접열에 의해 표면에서 산화가 일어나서 그 을린 흔적이 남게 되는데 이는 전해 연마를 통해 제거하게 된다. 스테인레스 차체는 무도장 표면을 그대로 활용하므로 도장이 불필요하며, 테이프에 의한 부분적인 코팅(coating)이 이루어진다.

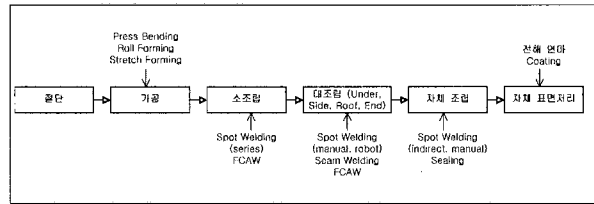


Fig. 2 스테인레스 차체 제작 과정

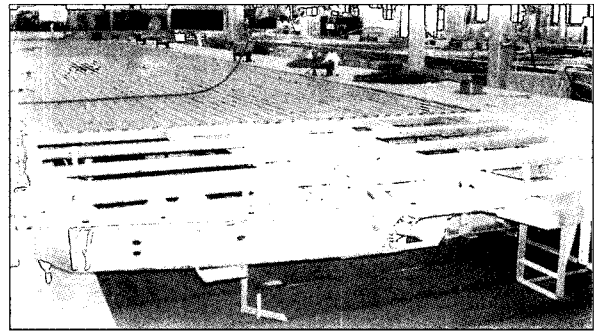


Fig. 3 차체 하부 구조 제작 공정

### 3. 스테인레스 차체의 주요 가공 방법

Fig. 2와 같은 차체 제작 과정 중에서 중요한 가공 방법에 대해 상세히 언급하고 문제점을 고찰해 본다.

#### 3.1 프레스 굽힘

프레스 굽힘은 Fig. 4와 같이 성형을 위한 금형 위에 판재를 놓고, 프레스 가압력에 의해 소성 변형을 유발하여 설계된 형상을 가공하는 방법으로서 국부적인 보강재(stiffener), 브라켓(bracket) 등을 성형하는 데에 주로 사용된다.

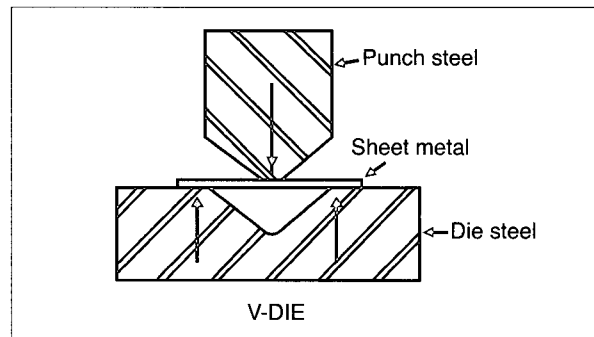


Fig. 4 프레스 굽힘 가공 원리

### 3.2 롤포밍

롤포밍(roll forming)은 Fig. 5와 같이 코일 강판을 일련의 롤(roll)에 의한 굽힘 과정을 거쳐 복잡한 형상을 정밀하게 성형할 수 있는 가공 방법으로서, 길이 제한에 구애 받지 않는 경제적인 방법이나, 생산 장비 및 공정을 구축하기 위해 초기 투자비가 많고, 성형 과정에서 판재의 뒤틀림이 발생할 수 있으며, 형상 설계가 적절하지 못한 경우 국부적인 좌굴이 발생할 수 있고, 절단 위치에서 평편하게 되거나 스프링백(spring back)이 발생하는 문제점이 있다. 차체의 지붕 및 바닥, 단부, 측면의 주요 연속 부재는 롤포밍에 의해 성형된다.

롤포밍 기술의 발달로 두께가 5mm 이상이 되는 판재의 성형도 가능하게 되었고, 차체의 주요 구조 부재인 사이드 실(side sill)도 롤포밍에 의해 제작되고 있다. 그러나 후판으로 갈수록 성형 상의 문제가 발생할 수 있다. 특히 STS301L-MT나 HT와 같은 고장력 재질은 강도가 증가되는 반면에 신율이 감소되어 롤포밍 과정에서 Fig. 6와

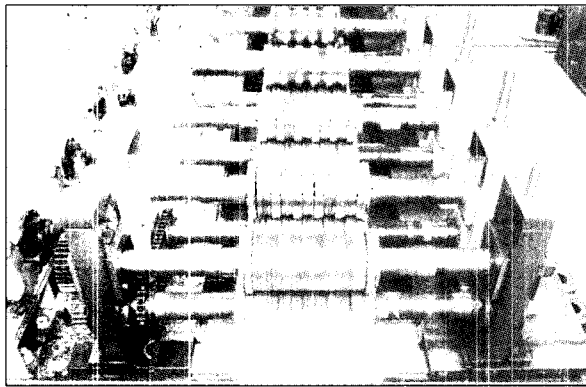


Fig. 5 Roll forming machine

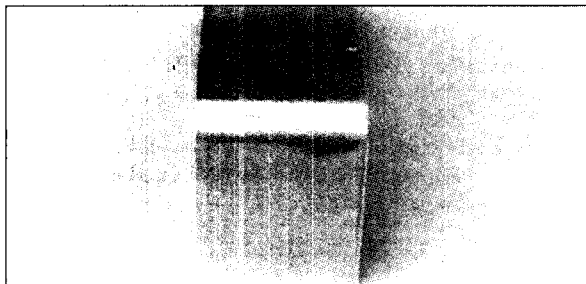


Fig. 6 Crack on bent surface

같이 표면에서 균열이 발생할 수 있다. 연강(mild)이나 STS304의 경우 최소 굽힘 반경이 판두께 정도이지만 STS301L MT나 HT의 경우에는 반경이 2배 이상 증가되어야 한다.

### 3.3 스트레치 포밍

스트레치 포밍은 카라인(car line)과 같이 1차로 성형된 부재를 곡선으로 다시 성형하기 위해 주로 사용하는 가공 방법이다. 단순히 굽힘 가공에 의해 곡선을 성형할 경우 압축응력을 받는 부분에서 국부적인 좌굴이 발생할 수 있으므로 Fig. 7와 같이 부재 전체가 인장응력 상태에 놓이도록 인장력을 가하면서 금형 위에서 곡선이 성형될 수 있도록 가공하는 방법이다. Fig. 8은 스트레치 포밍에 의해 성형된 카라인을 보여준다.

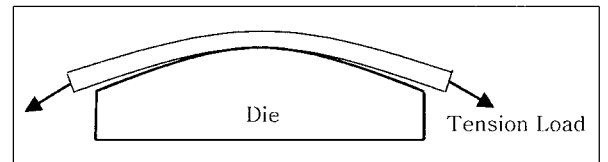


Fig. 7 Stretch forming process

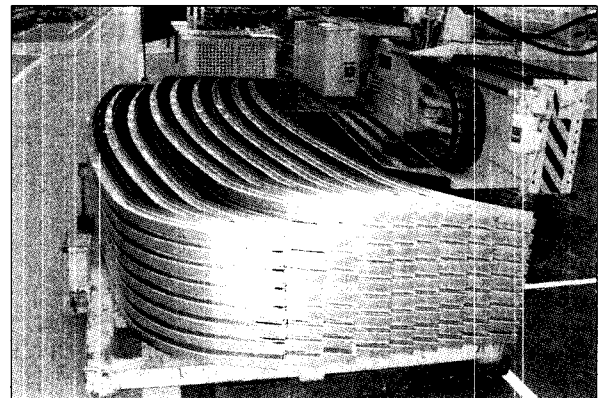


Fig. 8 Carlines produced by stretch forming process

## 4. 스테인레스 차체의 용접 방법

스테인레스 차체는 박판 구조물이므로 접합을 위해서 점용접이 주로 사용되며, 수밀(watertight)이 요구되는 지

봉과 같은 곳에는 연속 저항용접인 시임용접(seam welding)이 이용되고, 언더프레임과 같은 후판(thick plate) 구조에는 점용접과 함께 탄산가스를 사용하는 플럭스 코어드 아크(Flux Cored Arc Welding)가 사용된다. 차체 조립을 위한 점용접 방법으로는 수동 점용접, 시리즈 점용접(series spot welding), 간접 점용접, 로봇 점용접(robot spot welding) 등이 있다.

#### 4.1 수동 점용접

점용접은 Fig. 9와 같이 접합하고자 하는 판재를 전극팁으로 가압하고 통전하여 판재 접촉면 사이에서 저항발열에 의한 용융을 유발하여 접합하는 저항 용접 방법이다. 수동 점용접은 소조립된 측구조(side structure)의 대조립이나, 대조립된 구조의 차체 조립 시에 주로 사용한다. 점

용접에서 주요 조건은 전류 및 통전 시간, 가압력이라고 할 수 있는데, 발생 열량이 전류의 제곱에 비례하므로 전류에 의한 영향이 가장 크다. Fig. 10과 같이 수동 점용접에서 압흔을 감소시키고, 곡면에서도 용접이 가능하도록 외판 쪽에는 회전팁(swivel tip)을 사용한다.

#### 4.2 시리즈 점용접

시리즈 점용접은 접합 효율과 표면의 미려도를 높이기 위해서 Fig. 11과 같이 동판 위에서 동판을 전류 통로로 활용하면서 두 개의 용접팁에서 모두 너겟(nugget)이 형성되도록 하는 점용접 방법이다. Fig. 12와 같이 NC(Numerical Control)에 의한 시리즈 용접은 프로그래밍된 경로를 따라 자동 용접이 가능하므로 효율이 좋고, 동판 위에서 가압이 이루어지므로 국부적인 압흔이 감소되는 장점이 있으나,

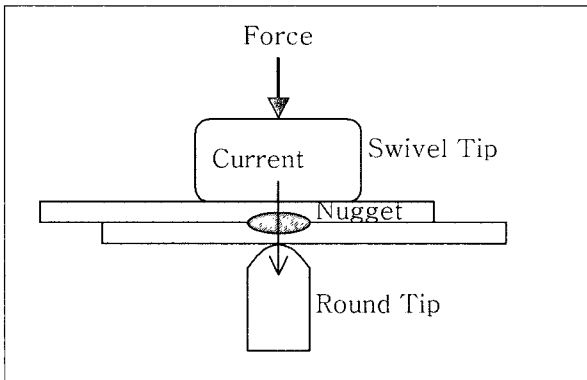


Fig. 9 수동 점용접의 원리

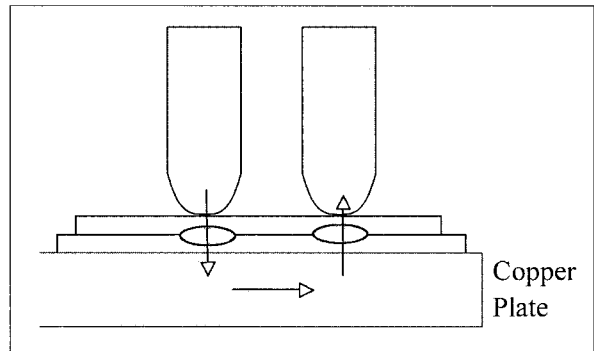


Fig. 11 Series spot welding process

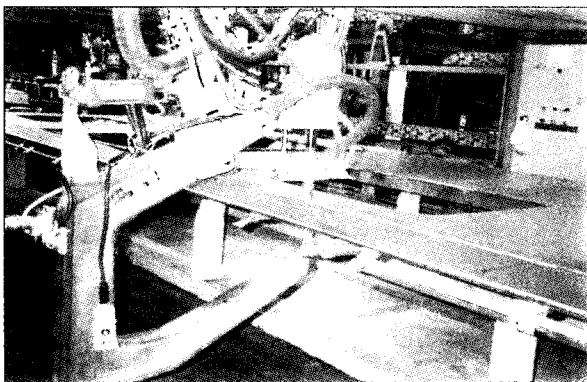


Fig. 10 수동 점용접에 의한 측구조의 조립

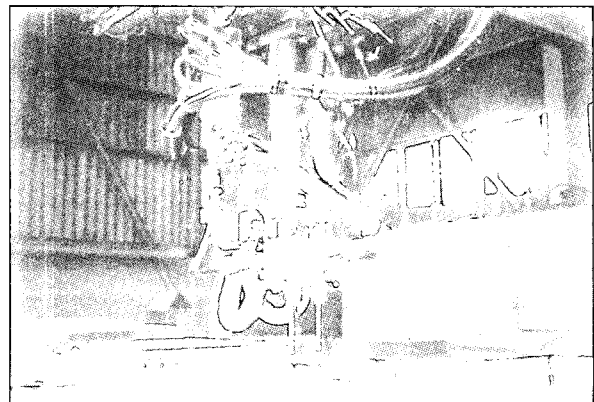


Fig. 12 Series spot welding machine

용접 경로가 잘못 설정되거나, 제작 오차로 인해 설정된 경로가 접합 범위를 벗어나는 경우에는 용접 불량 발생 할 수 있으므로 유의해야 한다.

### 4.3 로봇 용접

지붕구조에서 지붕 외판과 카리인을 접합하는 경우와 같이 곡면에서 외판 평활도가 중요하지 않은 곳에는 Fig. 13와 같이 로봇에 의한 점용접을 실시한다. 로봇용접은 품질적인 측면보다는 고효율과 생산시수(production manhour) 절감 차원에서 이점이 있다.

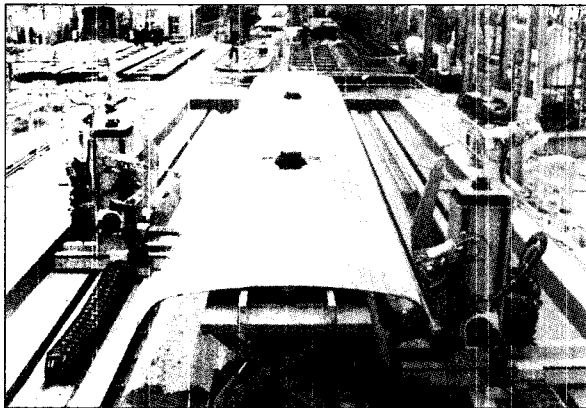


Fig. 13 로봇용접에 의한 지붕구조의 조립

### 4.4 간접 점용접

간접 점용접(indirect spot welding)은 Fig. 14와 같이 모재를 전류의 통로로 이용하여 가압에 의한 접촉면에서 너겟이 이루어지게 하는 접합 방법이다. 간접 점용접 방법은 측구조와 하부구조의 접합과 같이 전극팁을 일직선상에 위치시키기가 곤란한 곳에서 주로 적용된다. 간접 점용접 시에는 후판의 다중 접합이 이루어지므로 전류와 가압력이 높고, 전류 통로상에서 접촉하고 있는 면에서는 어느 곳이나 너겟이 생성될 가능성이 있으므로 유의해야 한다. 또한 차체 표면에 전극팁에 의해 큰 가압력이 작용하므로 표면에는 깊은 압흔(indentation)이 형성된다.

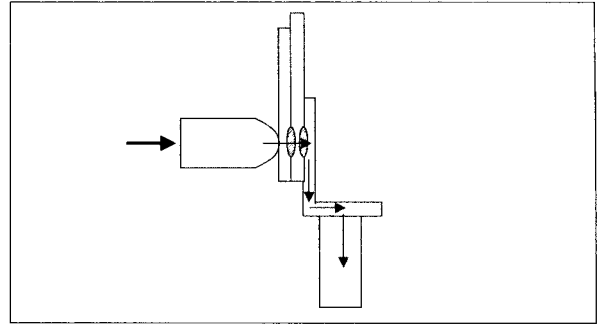


Fig. 14 Indirect spot welding의 원리

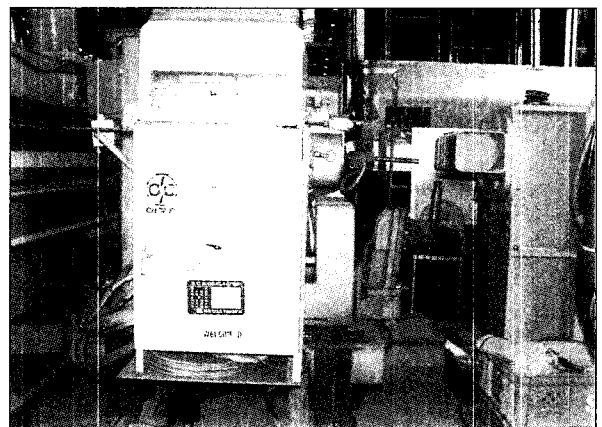


Fig. 15 Indirect spot welding machine

### 4.5 시임용접

시임용접은 점용접과 원리적으로는 동일한 저항용접이나, 전극팁 대신에 Fig. 16과 같이 전극 롤러(roller)에 의

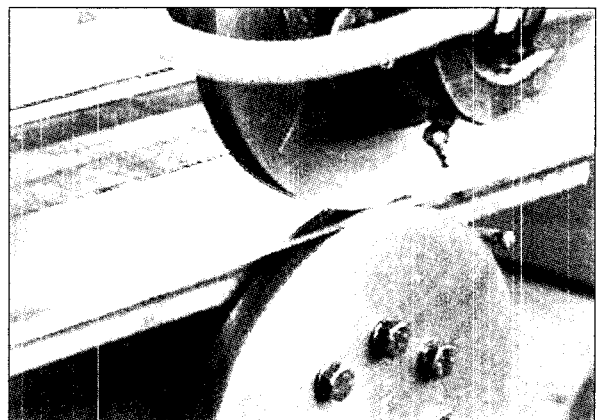


Fig. 16 Seam welding process

해 연속적으로 너겟이 형성되어 접합이 이루어지는 점에서 차이가 있다. 지붕구조의 외판 연속 접합이나 키스톤 플레이트의 연속 접합 등에 적용된다.

#### 4.6 아크용접

아크용접(arc welding)은 용접 와이어와 모재 사이에 전 기적 방전에 의하여 발생하는 고온의 아크를 이용하여 모 재를 접합하는 방법으로서 차체 중에서 후판이라고 할 수 있는 하부구조의 접합 시에 주로 사용된다. 스테인레스강의 아크 용접은 활성이 강한 스테인레스강을 대기로부터 차단하기 위해서 가스메탈 아크용접(Gas Metal Arc Welding)이나 가스텅스텐 아크용접(Gas Tungsten Arc Welding) 등을 사용하였으나, 용융부를 대기로부터 차단 하는 아르곤이나 헬륨과 같은 불활성 차폐가스가 고가이 므로, 현재는 저가의 탄산가스를 차폐가스로 사용하는 플 렉스코어드 아크용접(Flux Cored Arc Welding)을 흔히 사용한다. Fig. 17은 플렉스코어드 아크용접의 원리를 보 여준다. FCAW의 와이어 심재에는 플렉스가 삽입되어 있 어 슬래그로서 용착금속을 보호하는 역할을 한다. FCAW 에서 용접부의 결함을 방지하고, 부식의 원인이 되는 예민

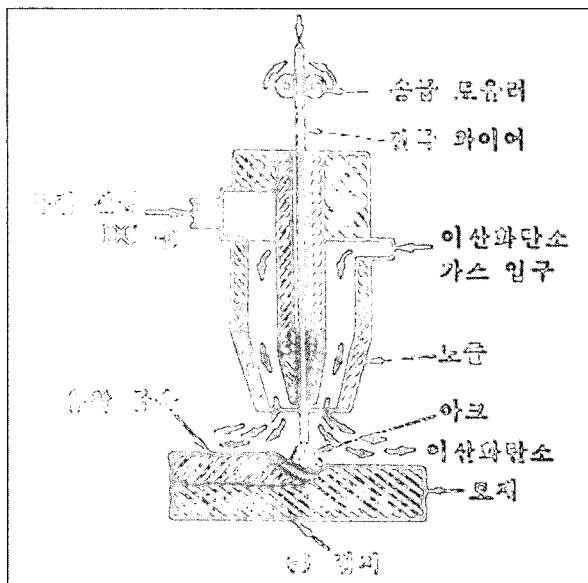


Fig. 17 FCAW의 원리

화 현상을 방지하기 위해서 용접 와이어의 선정이 중요한 데, 철도차량 차체에 사용되는 STS304와 STS301L의 용 접을 위해서는 Y308L 코어드(cored) 와이어를 사용하는 것이 좋다.

### 5. 차체의 표면처리

스테인레스 강판은 표면처리 방법에 따라 다양한 효과를 낼 수 있으나, 표면에 긁힌 흔적(scratch)이 쉽게 발생할 수 있어 주의가 요구되고, 점용접 후에는 표면에 그을린 흔적 이 발생하므로 차체 제작 후의 표면처리도 필요하다.

#### 5.1 표면처리

통상 철도차량 차체 표면은 광택이 없는 No. 2D Dull Finish나 광택이 있는 No. 3~4 표면처리 강판을 사용한다. 보통 차체 외판에는 Dull Finish 강판과 유광 처리된 강판을 함께 사용하기도 한다.

#### 5.2 전해 연마

용접부 표면에는 고온에서 산화가 발생하여 Fig. 18과 같 은 그을린 얼룩이 남게 된다. 차체 외판의 얼룩은 전해 연마 (electro-polishing)를 이용해 제거한다. 전해연마는 스테 인레스 강판 표면을 양극으로, 불용성의 금속전극을 음극

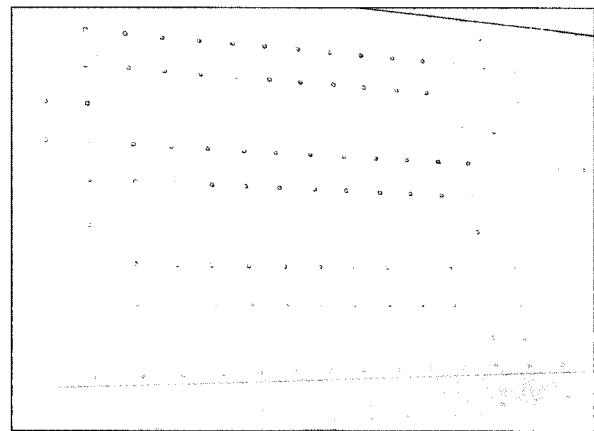


Fig. 18 점용접 후의 차체 표면 얼룩

으로 하여 강산의 전해액 중에서 전기 분해시키면서 표면을 용해 연마하는 방법이다. 전해 연마후에는 표면에 양극산화피막이 형성되어 내부식성이 향상되는 이점도 있다.

## 6. 스테인레스 차체 점용접부의 문제

### 6.1 차체 표면의 압흔

스테인레스 차체는 표면 처리된 판재를 도장(painting) 작업 없이 사용하므로 외판의 평활도와 미려도가 중요한 고려 대상이다. 외판의 평활도 향상을 위해서는 단품 단위에서 평면을 유지하기 위해 철저한 공차 관리가 필수적이고, 점용접 방법의 개선이 필요하다. Fig. 19는 스테인레스 전동차 차체 외판의 모습을 보여주고 있는데, 점용접에 의

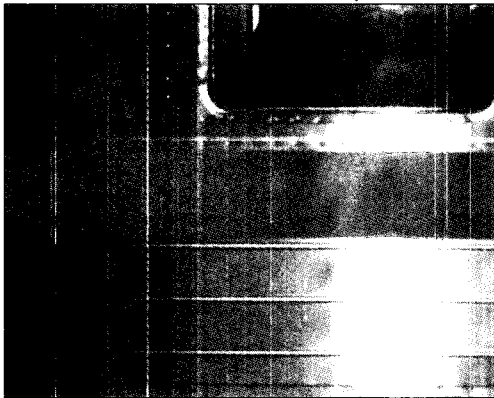


Fig. 19 스테인레스 차체 외판의 표면 요철

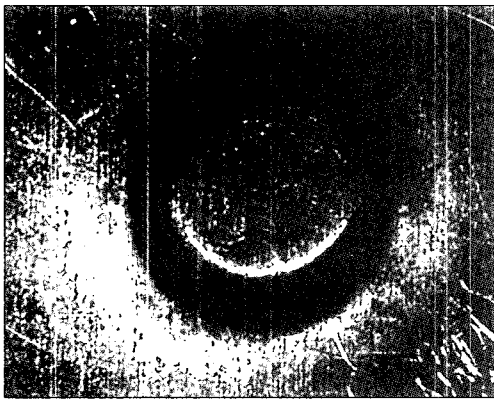


Fig. 20 간접 점용접 표면 확대 사진

한 압흔과 표면 요철이 두드러져서 차체 미려도가 저하된 경우이고, Fig. 20은 간접 점용접(indirect spot welding)에 의한 접합부의 표면을 확대한 사진이다.

표면의 평활도 향상을 위해서는 Fig. 11과 같은 시리즈용접(series welding)을 실시하고, 동판과 외판과는 밀착되어 간격이 없는 상태에서 용접을 실시하는 것이 중요하다. 또한 용접 시에 접합면에서 용융 금속의 용출(expulsion)이 발생하지 않도록 용접조건 선정 및 접촉면의 관리가 필요하다.

압흔은 적절한 점용접 조건의 선정을 통해서도 개선될 수 있다. 점용접의 주요 조건은 전류 및 통전 시간, 가압력이라고 할 수 있는데, 전류가 높을수록 발열량이 커지므로 압흔 깊이는 증가하게 된다. 통전시간도 발열량을 증가시키므로 압흔 깊이를 증가시키지만 전류가 미치는 영향보다는 작다. 전극팁 접촉면의 직경은 가압 시에 모재에 유발되는 응력과 관계가 있으므로, 증가할수록 모재 내부 응력이 감소되어 압흔 깊이는 감소하게 된다. 압흔 깊이에 미치는 영향이 상반된 것은 가압력이라 할 수 있다. 가압력이 증가하면 모재 내부의 응력을 증가시켜 소성 변형을 크게 하는 효과가 있으나, 접촉저항을 감소시키므로, 발열량이 줄어들어 압흔 깊이를 감소시키는 효과를 유발한다. 따라서 가압력에 따라 압흔 깊이는 감소 또는 증가의 변화 양상을 보이고 압흔 깊이가 최소가 되는 적정 가압력이 존재하고 있음을 추측할 수 있다. 압흔 깊이의 감소를 위해서는 전극팁의 접촉면적을 높이면서 전류 및 통전시간을 최소화하고, 가압력을 적절한 크기로 조절하는 것이 효과적임을 알 수 있다[2].

압흔을 효과적으로 감소시키기 위해서는 Fig. 21과 같은 절연팁(insulated cap tip)을 사용하는 것이 효과적이다[3]. 절연팁은 기존의 원형팁과는 달리 모재와의 접촉 부분을 평편하게 함으로써 모재 표면과의 접촉 면적을 최대한 증가시켜서 가압력에 의한 모재 내부 응력을 감소시키고, 절연재를 삽입하여 전류 통로를 가운데로 집중시킴으로써 접합부의 용융이 적절하게 발생할 수 있도록 한다. 절연팁을 이용하여 용접을 실시한 접합부의 단면 확대 사

진은 Fig. 22와 같은데, 압흔은 거의 발생하지 않았으나 충분한 용융 접합이 이루어 졌음을 확인할 수 있다.

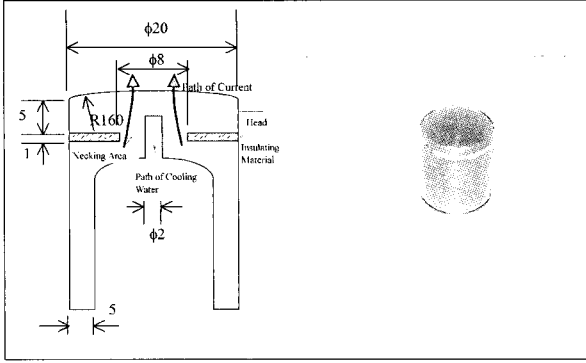


Fig. 21 Details of insulated cap tip

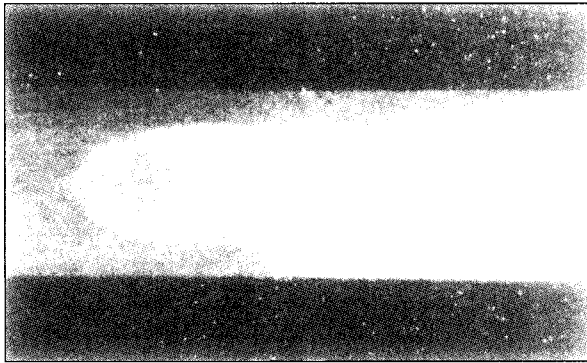


Fig. 22 Macro section of spot welded joint by insulated tip

## 6.2 스테인레스강 용접부의 부식

스테인레스강은 내식성이 강한 장점이 있어 무도장 상태로 완성된 차체의 운영이 가능하지만, 부식이 문제가 될

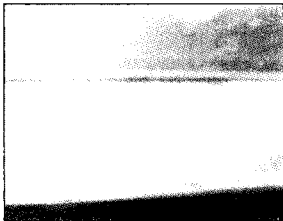


Fig. 23 Corrosion of carbony surface

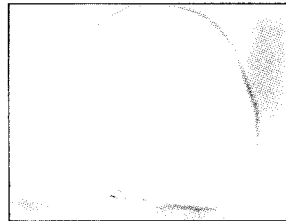


Fig. 24 Corrosion crack on surface

수 있다. 특히 Fig. 23와 같이 용접부 주위에 발생하는 부식은 균열로 이어져서 심할 경우 구멍이 생길 수도 있다. Fig. 24는 부식에 의해 구멍이 생긴 예를 보여 준다.

오스테나이트계 스테인레스강에서 나타나는 부식은 재료, 환경, 응력이 상호 작용하여 나타나는 현상이라고 할 수 있다<sup>4)</sup>. 재료적인 측면에서 부식은 열영향부에서 입계 (grain boundary)에 석출되는 크롬탄화물(Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)이 원인이 되어 발생한다. 용접 열사이클을 받는 열영향부에서는 크롬탄화물이 석출되는 예민화 현상이 급속하게 진행된다<sup>6)</sup>. Fig. 25에서 보는 바와 같이 피크 온도가 550℃ ~ 850℃가 되는 영역에서는 크롬탄화물이 석출하게 된다.

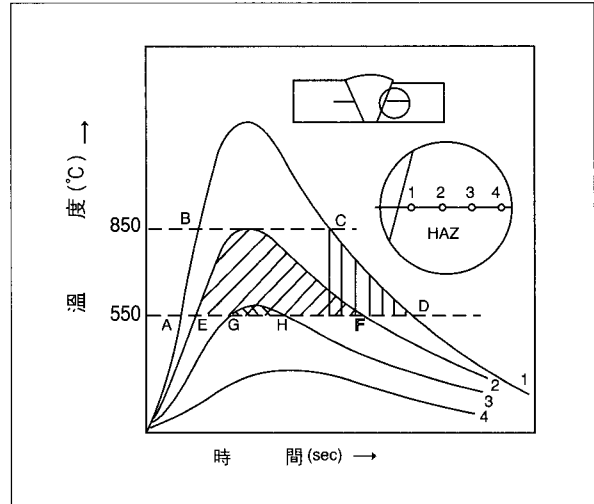


Fig. 25 크롬탄화물의 입계 석출을 일으키는 냉각조건

부식을 일으키는 또하나의 요인은 응력이라고 할 수 있는데, 인장 응력하에서 부식은 가속화된다. 이는 응력이 크롬탄화물의 형성을 촉진시키기 때문으로 추정되며 용접부에 존재하는 인장 잔류응력은 부식을 심각하게 가속화한다. 점용접부 너겟 주위의 부식과 이로 인한 균열은 인장 잔류응력의 영향이 크게 작용한 것으로 추정된다.

부식을 일으키는 환경적인 요인으로는 스테인레스강과 주위 환경과의 전기화학적 반응이라고 할 수 있다. 해수나 기타 염화물 환경하에서 전기화학적 반응에 의해 부식



이 가속화된다.

재료적인 측면에서 부식을 방지할 수 있는 방법은 크롬 탄화물의 석출을 감소시키기 위해 탄소함유량을 낮춘 STS301L과 같은 재질을 사용하는 것이다. 탄소함유량을 적게 함으로써 크롬탄화물의 석출을 원천적으로 감소시킬 수 있다. 응력 측면에서는 잔류응력을 감소시킴으로 부식을 방지할 수 있는데, 응력 제거를 위한 열처리가 효과적이나 실제 차체에 대해서는 열처리가 곤란하므로 실용적이지 못하다. 환경적인 측면에서 전기화학적 부식이 발생할 수 있는 염분이나 산성 환경을 피하는 것이 중요하다. 염분이나 산성 환경에서 시작된 부식의 핵이 지속적으로 성장하지 않도록 표면의 세척이 필요하다.

## 7. 맺 음

본 강좌에서는 독자들에게 스테인레스 철도차량에 대한 이해를 돕고자 스테인레스 철도차량 차체의 제작 과정을 설명하고, 각 과정상의 주요 가공 방법에 대해 고찰하여 보았다. 스테인레스 차체 제작 과정은 크게, 부재의 성형 과정, 성형된 부재의 접합과 조립 및 완성 차체의 표면처리 과정으로 나누어 볼 수 있다. 각 과정별로 기본적인 원리 및 방법과 적용 예를 설명하였고, 문제점도 함께 제시하여 개선을 위한 연구의 필요성을 제기하였다. 스테인레

스 차체 품질 향상을 위해 기술적 보완이 필요한 문제로는 고장력강의 롤포밍 시의 균열, 점용접 시의 표면 압흔 감소, 용접 열영향부의 부식 등을 열거할 수 있다. 본 강좌에서는 상기 문제에 대한 기본적인 대책을 제시하였으나, 근본적인 해결 대책을 위해서는 지속적인 연구와 적용이 필요하다고 하겠다. 국내 철도차량 제작업체는 스테인레스 차체 제작 분야에서 10여년간의 기술을 축적하여 국제 경쟁력을 보유한 실정이지만, 품질 개선을 통한 좀더 강력한 경쟁력 확보를 위해 문제점에 대한 지속적인 연구와 대책의 모색이 필수적이라 하겠다.

## 참고 문헌

1. Japanese Industrial Standards (1990년), "Welded Joints of Stainless Steel for Railway Rolling Stock - Design Methods", JIS E4049.
2. 서승일, 이재근, 장상길, 차병우 (1996년), "점용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 최적 용접 조건 선정에 관한 연구", 대한용접학회지, 제14권제2호, pp. 57-64.
3. 서승일, 장상길 (2003년), "점용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 절연팁 개발에 관한 연구", 대한용접학회지, 제21권제1호, pp. 42-47.
4. 向井喜彦 (1986년), "스테인레스강 용접부의 응력 부식 균열 특성", 대한용접학회지, 제4권제1호, 1986, pp. 16-31.
5. 대한용접학회(1998년), "용접 및 접합 편람", pp. 143-187.