

〈研究論文〉

전기화학적 방법을 이용한 AISI 304 스테인레스강 및  
 그 용접 열영향부의 예민화도 평가

김 봉 태 · 백 광 기

현대중공업 용접기술연구소

A Study on Evaluation of Degree of Sensitization in AISI 304  
 Stainless Steel and Its Welding Heat Affected Zone

by

An Electrochemical Method

B. T. Kim · K. K. Baek

*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.  
 Welding and Materials Research Institute*

The degree of sensitization (DOS) of AISI 304 stainless steel and its welding heat affected zone (HAZ) was evaluated using an electrochemical method known as electrochemical potentiokinetic reactivation (EPR). In addition, for the comparative purpose, three ASTM tests for determining the intergranular corrosion susceptibility of austenitic stainless steel were also performed. The results showed that EPR was very useful method for base metal or weld HAZ evaluation and could be preferable to the other time consuming and destructive ASTM tests. All the test results showed that the effect of heat input was found more important factor for controlling the sensitization of HAZ than the interpass temperature.

1. 서 론

AISI 304 스테인레스강은 일반적인 내식성을 요하는 장치재료로서 가장 널리 사용되고 있는 재료 중의 하나이다. 그러나, 이와 같은 오스테나이트 계열의 스테인레스강은 1050°C 이상의 온도에서 급냉하였을 경우에는 입계부식 및 응력부식균열에 대하여 비교적 좋은 내식성을 나타내지만, 400~850°C에서 가열되거나 서냉되었을 경우에는 입계부식에 대해 매우 취약해짐은 잘 알려져 있는 현상이다<sup>1)</sup>.

재료가 이처럼 입계부식 감수성을 지니게되는 것을 일컬어 예민화(sensitized) 되었다고 말한다. Bain 등은 예민화 현상을 설명하기 위해 다음과 같은 모델을 제시하였다<sup>2)</sup> 재료가 예민화 온도에 노출되면 입계를 중심으로 크롬 탄화물이 석출된다. 탄화물이 성장하면서 확산속도가 매우 빠른 탄소는 입계로 신속히 확산되어 탄화물 형성에 소요되는 탄소를 충분히 공급해 준다. 반면에 크롬은 탄소에 비하면 확산속도가 현저히 느리므로 크롬탄화물 석출물 주변에서는 크롬의 농도가 결정립내에서보다 현

저히 낮은, 소위 크롬결핍대(chromium depleted zone)를 형성하는 결과를 가져온다. 이와 같이 크롬결핍대가 형성된 재료는 재료 고유의 내식성을 상실하게 되는데 특히, 탄화물의 석출이 입계주변에서 우선적으로 일어나기 때문에 그러한 재료는 입계부식에 대하여 매우 취약해진다. 이미 여러연구에 의하여 이와같은 크롬의 결핍이 예민화의 주된 원인으로 밝혀진 바 있다.<sup>3,4,5)</sup> 그러나, 이와 같이 예민화의 기구가 잘 알려져있는 현재에 있어서도 생산 현장에서의 부각결함 열처리나 용접등의 제작 과정을 거치는 동안 강재에 예민화가 발생되어, 이로부터 야기되는 입계 부식 피해는 아직도 상당히 중요한 위치를 점하고 있다(Fig. 1). 용접은 철구조물이나 장치를 제작하기 위해서는 필요불가결한 방법이므로 재료가 예민화 온도에 노출되게 하는 가장 중요한 원인이기도 하다.<sup>6)</sup>



Fig. 1. An example of damaged AISI 304 stainless steel due to intergranular corrosion caused by weld decay.

스테인레스강의 입계부식은 화학장치 공업등에서 매우 증대한 문제이므로 적절한 재료의 선택을 위해서 뿐만 아니라 제작과정에서 변화된 재료의 성질을 평가할 필요성이 있고, 따라서 재료의 입계부식' 감수성을 평가할 시험방법이 필요하다. ASTM A262에는 오스테나이트계 스테인레스강의 입계부식감수성을 측정하기 위하여 고안된 여러가지 방법들이 규정되어있다. 그러나, 이 방법들은 대개 파괴적이고, 시험에 오랜시간이 요구되며, 대체로 그 결과를 정량화하여 나타내기가 어렵다는 등의 문제를 가지고 있고, 이러한 문제로 인해 이미 가동중에 있거나 또는 제작중인 구조물에서의 예민화도를 평가하는

수단으로 사용하는데는 한계성이 있다. 또한, 이 기존 방법들은 처음부터 가혹한 분위기에서의 내식성을 평가하도록 고안되어 있기 때문에 내식성의 중간상태 즉, 어느 정도 예민화가 진행되어있는 상태를 정량적으로 평가할 수 없으며 경우에 따라서는 실제 사용가능한 재료가 이용되지 못하도록 제한되는 경우도 발생할 수 있다.<sup>7)</sup> 이러한 제약으로 인하여 오랫동안 보다 손쉽고, 신속하며, 비파괴적으로, 그러면서도 정량적인 결과를 얻을 수 있는 시험방법이 요망되어 왔다. 근래에 이러한 요구에 부응하여 스테인레스강의 입계부식 감수성을 전기화학적 방법으로 평가하는 새로운 방법으로써 전기화학적 재활성화법(Electrochemical Potentiokinetic Re-activation, EPR)이 소개되었다.<sup>8)</sup> 이 방법은 기존 방법의 단점을 극복할 수 있다는 측면에서 많은 주목과 관심을 받고 있다.<sup>9)</sup> 그러나, EPR법은 실험실에서의 연구 목적에는 현재 활발히 이용되고 있으나 현장에서의 응용은 아직 미흡한 것으로 생각된다. 생산 현장에서 재료의 예민화도를 측정함에 있어 EPR을 사용하는 것은 여러가지 장점을 가지고 있다. 그중 가장 주목할 만한 것은 시험에 소요되는 시간이 짧아 빠른 시간내에 결과를 얻을 수 있으며 더우기 본질적으로 비파괴적인 방법으로 수행할 수 있다는 점이다. 이와 같은 장점으로 인하여 스테인레스강의 품질관리나 입고시험의 경우 또는, 생산과정에서의 용접이나 열처리등으로 인한 예민화도의 측정, 그리고 가동중인 구조물의 검사등에서 즉, 비파괴적인 시험방법이 요구되는 상황에서는 EPR이 매우 유용하게 사용될 수 있다고 하겠다. 그러나 이 방법을 작업 현장에서 사용하려면 용이하게 사용할 수 있는 시험조건의 정립과 간편한 field cell의 설계가 요구되며, 그 외에도 시험 결과의 평가 기준을 설정하는 것이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 단계적으로 예민화 처리한 재료에 대하여 EPR 및 다른 ASTM에 규정되어 있는 시험법들을 적용하여 그 결과를 상호비교 분석함으로써 기존 시험방법의 평가 기준과의 연관성을 찾고자 하였다. 또한, EPR법을 현장에서 용이하게 적용할 수 있도록 특별한 시편의 준비과정이 필요없는 EPR시험방법을 고안하였다. 이를 이용하여 본 연구에서는 용접

열영향부의 예민화에 미치는 증간온도 및 입열량의 영향을 살펴보고, 예민화 정도를 정량화 하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 예민화 열처리 및 용접

연구재료는 AISI 304에 해당하는 Table.1과 같은 화학조성을 가지는 두께 12mm의 스테인레스강을 사용하였다. 재료는 공급된 상태에서 더 이상 용체화 열처리를 수행하지 않았으며, 480°C에서부터 780°C까지 60°C 간격으로 각 온도에서 4 시간동안 열처리한 후 공냉하여 단계적으로 예민화된 시편을 준비하였다.

Table 1. Chemical composition of type-304 stainless steel testing material.

AISI 304							wt. %
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	
0.07	0.41	1.13	0.021	0.006	8.30	18.1	

용접은 SMAW (Shielded Metal Arc Welding) 으로 시행하였다. 이때, 입열을 15 kJ/cm 및 30 kJ/cm 로 사용하되 각 입열에서의 증간온도를 상온 및 100, 200, 300°C로 조절해서 용접하여 총 여섯 종의 용접 열영향부 시편을 준비하였다. 용접충수는 15 kJ/cm의 입열에서는 5층, 30 kJ/cm의 입열에서는 3층으로 용접이 완료되었다. 용접개선은 60°각도의 V-groove를 사용하였다.

### 2-2. 예민화 측정

EPR시험용액은 황산 및 potassium tiosulfate (KSCN)의 농도가 각각 1N과 0.01M이 되도록 제조하였다. 이 용액에서 동전위 음극 분극 곡선을 얻고 이로부터 황산화 전기량(activation charge,  $C_p$ )을 계산하였다. 재활성화 전기량(reactivation charge,  $C_a$ )은 시편을 포화감홍 전극(SCE)에 대해 200 mV의 전위에서 3분간 부동태화한 후 2mV/sec의 주사속도로 음극 방향으로 역주사하여 얻었다. 이때 주어진  $C_p$ 에 대한  $C_a$ 의 백분율인 재활성화 비율(reactivation ratio,  $C_a/C_p \times 100$ )을 예민화의 정량적 평

가 기준으로 삼았다(Fig.2). 전기량은 recorder에 기록된 peak를 적분하여 얻었다. 시험용액은 용존 산소의 영향을 제거하기 위해 질소를 불어넣어 탈기하여 사용하였고 용액의 온도는 30°C로 유지하였다. 시편은 1cm<sup>2</sup>만이 시험용액에 노출되도록 예폭시 수지를 이용하여 마운팅하였고 표면은 SiC 연마지로 600번까지 연마하였다. 실험장치의 구성은 대략 Fig.3과 같다. 또한, 이와 동일한 실험조건에서 Fig.4에 나타낸 field cell을 아크릴 수지로 제작하여 시편에 직접 부착하는 방법으로 시험을 하였다. 이때, 시편에는 가로 2mm 세로 50mm의 홈을 낸 셀

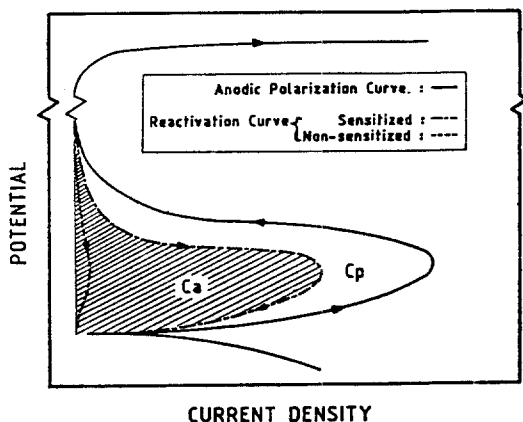


Fig. 2. Schematic Feature of the EPR curve.

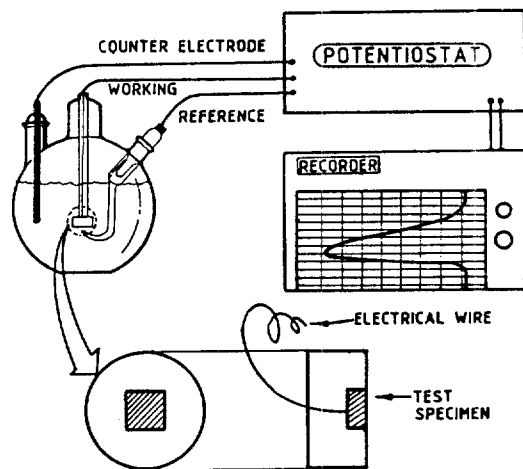


Fig. 3. Schematic representation of experimental components and epoxy mounted sample.

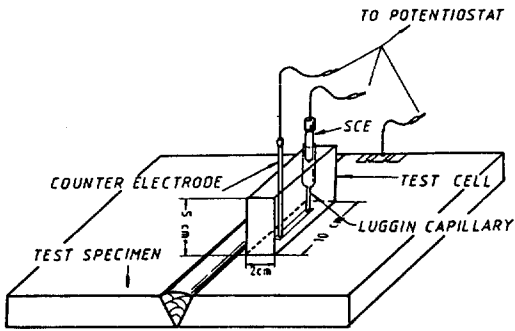


Fig. 4. Representation of the field cell which is attached to weld HAZ.

로판 테이프를 부착하여 1cm<sup>2</sup>의 면적만이 시험용액에 노출되도록 하였고, field cell은 고무찰흙을 이용하여 용액이 누출되지 않도록 시편위에 고정하였다. 시험용액에 노출되는 부분을 폭이 좁은 직사각형으로 하는 것은 용접 열영향부에 적용할 것을 염두에 두고 결정한 것이다.

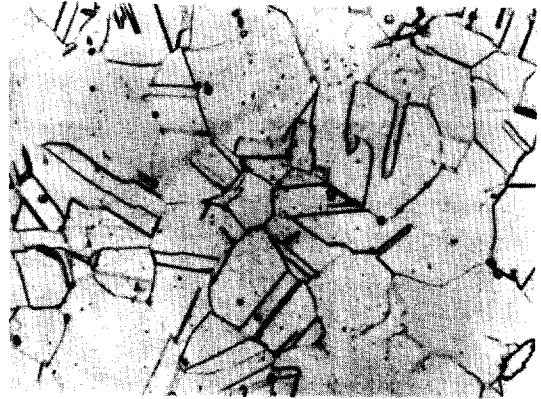
Oxalic acid etch test, Huey test 및 Strauss test는 각각 ASTM A262 Practice A, C 및 E에 준하여 실시하였다.<sup>10)</sup> 단, Strauss test에서 시편의 크기는 30×60mm로 가공하고 두께를 6mm가 되게 절삭하여 시험하였다. Potentiostat은 EG & G PAR의 Model 362를 사용하였으며, 마운팅된 시편에 대해서는 동사의 Model K47 corrosion cell을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

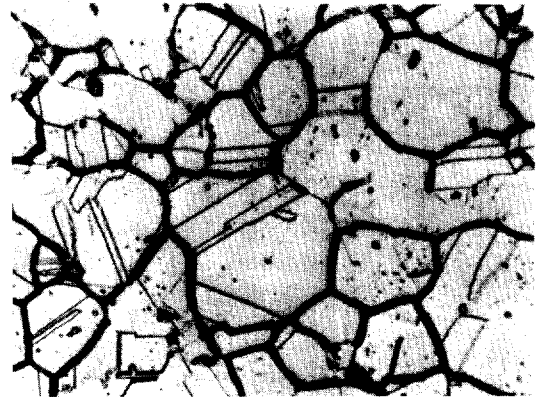
#### 3-1. ASTM test와 EPR과의 비교

EPR을 실용화하기 위해서 우선적으로 필요한 일은 시험 결과의 평가기준을 마련하는 것이다. 그러기 위해 가장 손쉬운 방법은 평가 기준이 이미 확립되어 있는 다른 시험법과 결과를 상호 비교하는 일이다. Oxalic acid etch test는 ASTM 방법 중 가장 간단히 수행할 수 있는 시험법으로 etch structure의 모양을 그 평가 기준으로 한다. Fig.5는 예민화 열처리한 시편들에 대해 oxalic acid etch test를 시행한 결과를 보여주고 있다. 540℃에서 열처리한 시편은 step structure를 나타내어 ASTM A262 규정에서 정한 합격선내에 포함되지만 600℃ 이상의 온

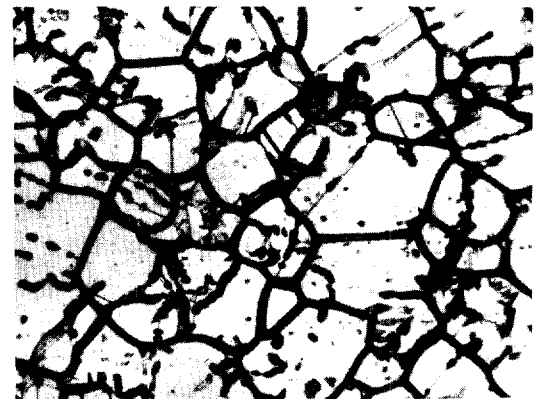
도로 열처리된 것들은 ditch structure를 나타내어 모두 불합격에 해당된다. Fig.6은 같은 열처리를 행한 시편에 대하여 Huey test를 실시한 결과를 도시한 것이며, Table.2에는 48시간 간격으로 측정한



A) 540°C



B) 600°C



C) 660°C



D) 720°C



E) 780°C

50 μm

Fig. 5. Microstructures revealed in heat treated type-304 stainless steel after oxalic acid etch test. (4 hours at each temperature.)

Table 2. Weight loss results of Huey test for 4 hours sensitizing heat treated specimens.

HUEY TEST			WEIGHT LOSS (mg)						
TEMPERATURE (°C)	SPECIMEN AREA (cm <sup>2</sup> )	TIME (hr)	4.8	9.6	14.4	19.2	24.0	Avg.	
			MA	13.60	12.3	13.2	14.0	15.7	17.4
4.80	13.54	12.3	17.4	21.2	24.3	23.2	19.7		
54.0	12.81	20.9	44.1	48.8	45.3	44.2	40.7		
60.0	13.11	192.8	1301.5	1745.6	1901.1	1938.8	1416.0		
66.0	13.22	424.9	2306.0	2449.7	2179.0	2269.0	1925.7		
72.0	14.00	115.1	1466.0	2141.4	2204.3	2206.5	1626.7		

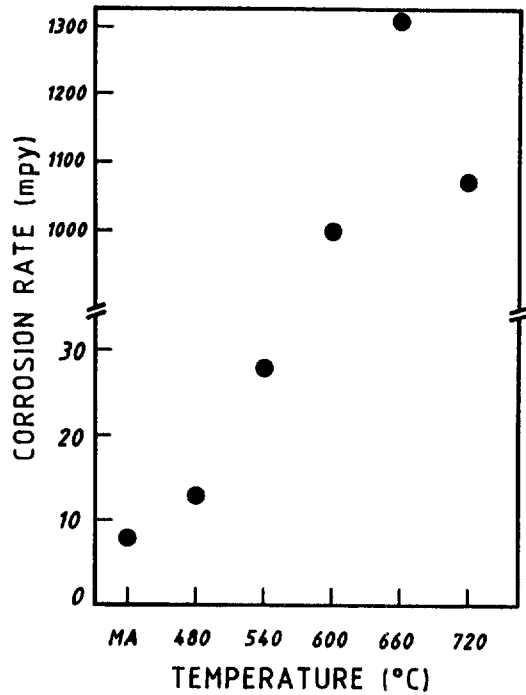


Fig. 6. Corrosion rates determined by the Huey test for the 4 hours heat treated type-304 stainless steel at different temperatures.

시편의 무게감량과 240 시간 동안의 평균값을 나타내었다. Huey test에서는 600°C에서부터 급격한 부식속도의 증가를 나타내며 660°C에서 가장 빠른 속도로 부식된다. 이와같이 급속한 무게 감량 증가가 나타나는 원인은 Fig.7에서 보듯이 600°C 이상에서 열처리한 시편에서는 입계 부식이 활발하여 결정립의 탈락 현상이 발생하기 때문이다. 540°C 이하의 경우에는 Huey test 특징적인 급속한 무게감량을 나타내는 원인이 되는 결정립의 탈락을 거의 볼 수 없다. 그러나, 304 스테인레스강에 대해서는 보통 10mpy 이하의 부식 속도를 요하므로 480°C 및 그 이하의 온도에서 열처리된 것까지만 합격선내에 포함된다고 하겠다. Fig.8에는 역시 동일한 시편에 대한 Strauss test 결과를 요약하였다. Strauss test에서는 Huey test에서와 마찬가지로 480°C에서 4 시간동안 열처리한 경우를 제외하고는 모두 불합격에 해당된다. 600°C와 660°C에서는 깊이 1mm 이상의 매우 심한 균열이 나타났으며, 균열의 심한 정도

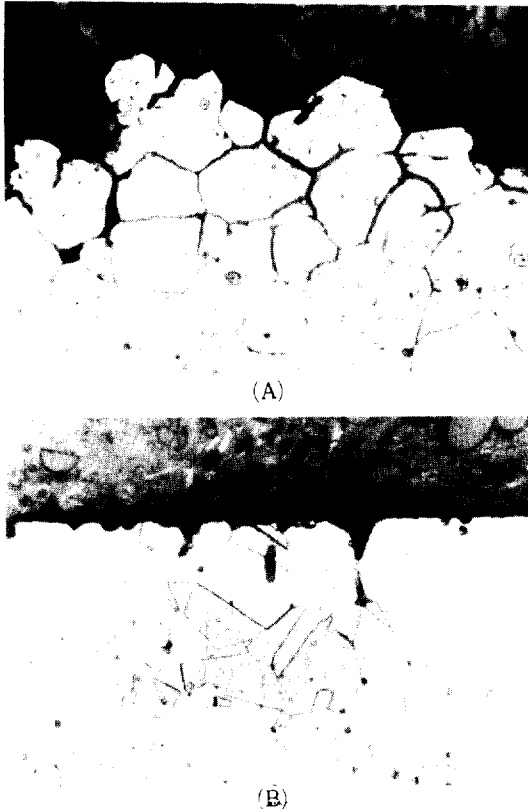


Fig. 7. Cross section of the specimens after Huey test.  
 A) heat treated for 4 hours at 600°C.  
 B) heat treated for 4 hours at 540°C.

는 660 > 600 > 720 > 780 > 540°C의 순서이다. Oxalic acid etch test 결과에서는 540°C에서 열처리된 시편에서 ditch가 전혀 발견되지 않아 예민화가 일어나지 않은 것으로 판정이 되지만 Strauss test에서는 동일한 시편에서 명백한 균열이 관찰 됨으로써 두 시험 방법 간에 판정 기준이 서로 일치되지 않고 있음을 알 수 있다. Huey test에서도 540°C의 온도로 처리된 시편에서 비록 결정립이 탈락되는 현상이 두드러지지는 않았지만 부식속도가 허용기준을 초과하여, 결과적으로는 Strauss test의 결과와 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서, ASTM에서 추천하는 부식 시험 방법을 상호 비교하여보면 304 stainless 강 of 부식 성향을 평가하는데 있어서 oxalic acid etch test가 가장 둔감한 반면 Huey test 및 Strauss test는 거의 유사한 정도의 민감성을 나타냄을 알 수 있다.

TEMP.	480	540	600	660	720	780
Appearance	No Crack	Many Small Cracks	Severe Cracks	Severe Cracks	Few Cracks	Few Cracks on Edge
RAIK	6	3	2	1	4	5
Photograph						

Fig. 8. Results of Strauss test for 4 hours sensitizing heat treated specimens.

Fig.9에는 EPR법에 의해 측정된 시편의 열처리 온도와 재활성화 비율과의 관계를 나타내었다. 여기에는 동일한 시료에 아크릴 수지로 제작한 field cell을 부착하고 시험을 실시한 결과를 함께 도시하였다. EPR이 작업 현장에서 사용되려면 우선 현장에서 측정된 값과 실험실에서 측정된 값 사이에 차이가 없어야 한다. 그러나 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두 시험 결과는 같은 경향 및 절대값에 있어서도 만족할만한 일치를 보여주므로 시편의 형상이나 시험용기에 관계없이 자체 제작한 field cell을 시험 대상에 직접 부착하는 방법으로 EPR의 적용이 가능함을 알 수 있다.

실험 결과는 Huey test 등 기존 방법의 극단적인 평가 기준에 비해 EPR은 중간 정도의 예민화도를 가지는 경우도 충분히 구별할 수 있는 정량적 결과를 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 즉, oxalic acid etch test에서는 etching 후 관찰된 조직이 ditch structure인가 아닌가에 의해 합격 또는 불합격의 두 가지로 판정하고 있으며, Huey test에서는 결정립의 탈락이 명백해지는 시점에서부터 부식 속도가 대단히 급격하게 증가하고 또, 그런 결정립의 탈락이 발생하지 않는 범위에 있는 시편에 대해서는 시험 결과가 재현성이 적으므로 판정은 역시 두 가지 밖에는 존재 할 수 없다. Strauss test에서도 균열의 깊이를 측정하는 등의 간접적으로 정량적인 결과를 표시하는 방법이 있기는 하나 재현성 및 실용성은 별로 없다고 하겠다. 그러나 EPR법은 Fig. 9가 나타내는 바와 같이 예민화된 정도에 따라 연

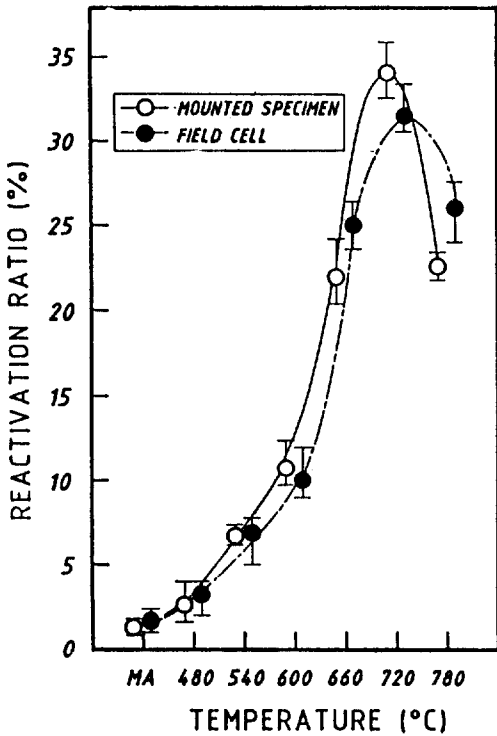


Fig. 9. Effect of temperature on sensitization as determined by EPR for epoxy mounted and field cell attached type-304 stainless steel. (Heat treated for 4 hours at each temperature.)

속적으로 변화하는 수치로 표현된 결과를 얻을 수 있기 때문에 EPR시험 결과를 이용하여 재료의 예민화 정도를 판정하는데 필요한 기준을 보다 세밀히 할 수 있다. 다시말해 기존 시험 방법에서 불합격 판정을 받은 재료라고 할지라도 EPR에서는 보다 세분된 정량적인 시험 결과를 얻을 수 있으므로 실제환경에서의 사용 경험 또는 plant test의 결과와 연관지어 해당되는 재료의 사용을 고려할 수 있는 기초 자료를 제공받을 수 있을 것이다.

잘 알려져 있는 바와 같이 예민화 온도에서 매우 장시간동안 재료를 노출시켰을 경우에는 초기 예민화에서 회복된다.<sup>11,12)</sup> 이는 충분한 시간이 주어지면 크롬 결핍대로 크롬이 서서히 확산됨으로써 입계 주변의 부동태를 회복하게 되고, 입계가 선택적으로 부식당하는 원인으로 부터 벗어나기 때문이다. 850°C 보다 고온으로 되었을 때는 크롬의 확산으로 인해

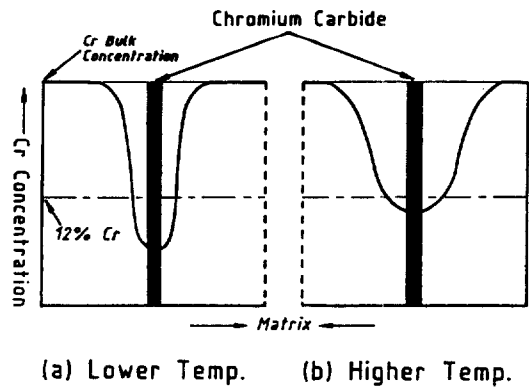


Fig. 10. Conceptual diagrams of the Cr concentration profile in the vicinity of grain boundary in stainless steel heated at two different temperatures.

탄화물 석출에 따른 크롬의 소모가 상쇄되기 때문에 크롬 결핍대는 발생하지 않으며 따라서, 재료의 예민화는 일어나지 않는다. Chung<sup>13)</sup> 등은 스테인레스강을 600°C에서 서로 다른 시간동안 노출했을 때 입계 주위에서의 크롬 농도 분포의 모양(Fig. 10)을 제안하였다. 크롬의 확산속도는 고온으로 갈수록 증가하므로 이와 같은 제안을 같은 시간동안 두 다른 온도에서 열처리했을 경우에 대해서도 마찬가지로 적용할 수 있다. 즉, 낮은 온도에서는 탄화물이 성장함에 따라 입계주변에 존재하던 크롬이 소모되어 크롬 결핍대를 생성하게 되고 이때, matrix내의 크롬은 거의 확산되어 오지 못하기 때문에 폭이 좁고 농도 구배가 심한 모양으로 결핍대가 생성되는 반면에 고온에서는 비교적 빠른 속도로 크롬의 확산이 이루어지므로 상대적으로 폭이 넓고 농도 구배는 완만한 모양의 크롬 결핍대가 생성된다. 이와 같은 사실은 Huey 또는 Strauss test 결과와 EPR test 결과에서 볼 수 있는 최대 예민화 온도의 차이를 설명하는데 이용될 수 있다. EPR test는 일정한 속도로 전위를 활성화 방향으로 주사할 때 일어나는 크롬 결핍 상태에 있는 입계에서의 금속 용해에 의하여 흐르는 전류를 측정하는 방법이다(Fig. 1) 반면에 Strauss test 및 Huey test는 용액에 의해 정해진 일정한 전위에서 부식매질이 입계를 공격한 결과를 이용하는 것이다. Fig. 11은 Fe-10Ni 합금에서 크롬 함량에 따른 음극 분극곡선의 모양을 도시

한 것으로 Mignone<sup>9</sup> 등은 이로부터 부식전위의 위치로 보아 Strauss test에서는 입계의 크롬의 농도가 12%이하일 경우에만 공격을 받는다고 하였다. 또한, 많은 시험결과에서 예민화가 심화됨에 따라 과부동태(transpassive) 전위가 저하되며 결과적으로 부동태 영역의 폭이 좁아진다는 사실이 알려져 있다.<sup>10</sup> 즉, 부식전위가 활성태-부동태(active-passive) 영역에 존재하는 Strauss test나 부동태-과부동태(active-transpassive) 영역에 존재하는 Huey test의 경우에는 모두 크롬 농도가 어느 일정한 농도 이하로 되어야만 공격을 받는다는 것을 의미한다.

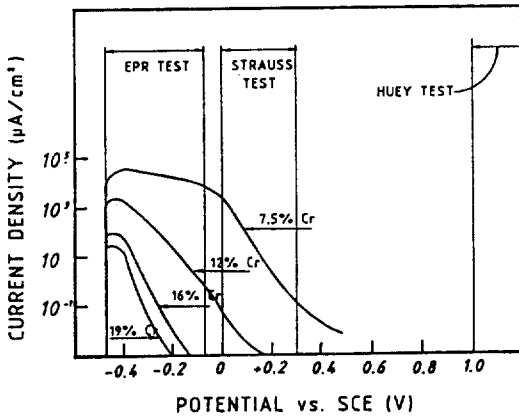


Fig. 11. Schematic presentation of the anodic polarization curves of an Fe-10 Ni-Balance Cr system, showing the range of corrosion potentials expected from EPR, Strauss and Huey test.

그러므로 Fig. 10의 (a)와 같은 상태에서는 Strauss test 또는 Huey test에서는 매우 심한 공격을 받지만, (b)의 경우에는 이보다 비교적 약한 공격을 받을 것으로 예상된다. 그러나, EPR은 크롬의 농도가 비교적 높은 영역(예를들어 12%이상)에서도 전기화학적 용해가 발생하여 전류를 흘려주게 되므로 상대적으로 높은 재활성화 비율을 나타내게 된다. 즉, Fig. 10의 (a)같은 상황에서 보다 (b)와 같은 상황에서 더 높은 예민화도를 가지는 것처럼 나타난다. 따라서, EPR에서 얻어지는 최대 예민화 온도가 Strauss test Huey test에서 보다 좀 더 높은 온도 쪽에서 나타나는 현상이 설명된다. Strauss

test의 경우에는 720°C 이상에서 급격히 예민화로부터 회복되는 것처럼 보이는데 이는 Huey test보다도 Strauss test에서 보다 이러한 영향을 크게 받기 때문인 것으로 생각된다.

이제까지의 시험 결과를 종합해보면 Huey 또는 Strauss test를 기준으로 할 때 합격되는 선은 480°C에서 열처리된 것까지라고 하면 EPR에서는 재활성화 비율 약 5%내외가 이 기준과 합치된다. 그러므로 304 스테인레스강에 대해서는 이 값을 기준으로 하여 EPR법을 Huey 또는 Strauss test 대신 사용함으로써 시험절차의 단순화에 기여할 수 있을 것이다. 그러나, EPR시험의 결과는 온도의 영향을 비교적 많이 받으므로 시험 온도의 조절이 곤란한 작업 현장에서는 어려움이 따른다. 이와 같은 일은 Fig. 12<sup>15)</sup>에 나타난 것과 같이 표준 시편에 대해 온도 보정 곡선을 마련하여 활용하면 비교적 쉽게 해결될 수 있으므로 실용화하는데 큰 문제가 되지는 않는다.

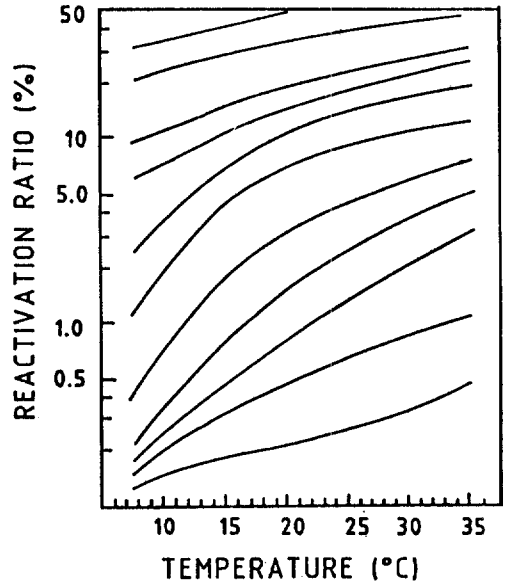


Fig. 12. Calibration curves for the relationship between temperature and reactivation ratio of AISI 304 stainless steel.

### 3-2. 용접 열 영향부에서의 적용

일반적으로 오오스테나이트계 스테인레스강을 용접할 때는 가능하면 열사이클을 최소로 받도록 하



여야 한다. 이는 탄화물 석출이나  $\sigma$ 상 형성에 따른 내식성과 인성의 저하 및 고온균열의 위험이 열사이클의 길이와 밀접한 관련이 있기 때문이다. 이런 이유로 생산현장에서는 층간온도가 보통 177°C를 넘지 못하도록 규제하고 있다.<sup>16)</sup> Ginn<sup>17)</sup> 등의 연구에 의하면 층간온도의 증가는 용착금속내의 ferrite 함량 및 용착금속과 열영향부의 기계적성질에는 별다른 악영향을 미치지 않는 것으로 보고한 바 있다. 그러나, 층간온도가 입계부식에 미치는 영향에 대해서는 결론이 내려지지 못하고 있다.

종래 시험방법으로 용접열영향부에서의 예민화도를 정량적으로 평가하는 일은 예민화된 구조물의 열영향부의 위치에서 시편을 채취하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에 대단히 곤란한 문제이지만 EPR법은 비파괴적이므로 그 적용이 가능하다. 그러나, EPR을 용접부에 적용하기 위해서는 열영향부만이 시험 대상면적에 포함되도록 시험 cell의 모양을 정하여야 한다. 따라서, 본 실험에서는 가능한 한 넓은 면적의 열영향부를 시험대상으로 하기위해 2×50mm의 영역에 대해 EPR을 적용하도록 구상하였다.

열영향부의 넓이는 입열과 층간온도의 증가에 따라 증가한다. 그 대략의 크기는 Table.3과 같다. 예민화된 열영향부의 범위는 용접선으로부터 모재방향으로 시험 cell의 위치를 이동하면서 측정하여 비교적 용이하게 얻을 수 있었다(Fig. 13). 입열이 커지고 층간온도가 높을수록 용접선 가까이에서 시작되었으며, 30 kJ/cm 입열에 층간온도 200°C 부터는 거의 용접선에서부터 예민화 되었다. 층간온도 및 입열에 따른 최고 예민화도는 Fig. 14에 나타내었다. 30 kJ/cm의 입열에서는 15 kJ/cm의 경우에 비하여 대단히 높은 예민화도를 나타낸다. 15 kJ/cm의 낮은 입열의 경우는 층간온도가 높아짐에 따라 완만한 예민화도의 증가를 보이며 층간온도가 300°C인 경우 최고 5% 정도의 재활성화 비율을 나타내었다. 반면에 고입열(30 kJ/cm)에서는 최저 30%에서부터 층간온도가 증가함에 따라 큰 폭의 증가를 나타내었다. 열영향부에 대한 Strauss test 결과는 Fig. 15에 보여주고 있는데 15 kJ/cm의 입열에서는 층간온도에 무관하게 Strauss test에 합격되었지만 30 kJ/cm의 입열에서는 층간온도에 관계없이 모두 불합

Table 3. Approximate widths of sensitized HAZ of SMAW welds. (unit : mm)

INTERPASS TEMP. °C	ROOM TEMP.	100	200	300
15	1.5	1.5	1.5 - 2.0	2.5 - 3.5
30	4.0 - 4.5	5.5 - 6.0	8	OVER 10

격 되고있다. 따라서, 앞에서 얻은 결과와 종합하여 보면 대략 재활성화 비율이 5%이하일 경우에는 용접 열 영향부에 대해 oxalic acid etch test, Strauss test 및 Huey test와 같은 기존 시험법을 적용해도 합격된다고 생각할 수 있다. 15kJ/cm의 입열에서는 층간온도 100°C부터 온도 증가에 따라 열영향부의 폭은 다소 증가하지만 재활성화 비율은 크게 증가하지 않았다. 그러나, 300°C의 층간 온도에서는 최대 재활성화 비율이 입계점인 5%정도에 있으므로 15kJ/cm의 입열에서 층간온도를 300°C이상으로 올리는 것은 위험하다고 하겠다.

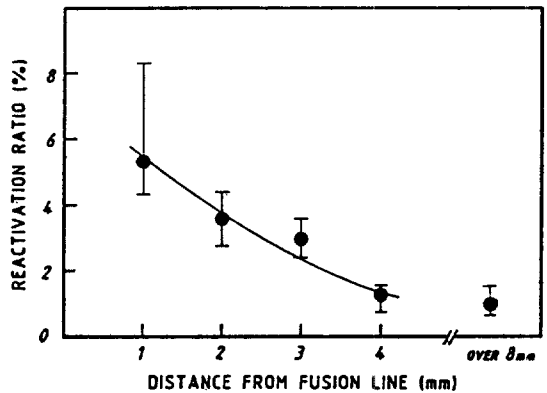


Fig. 13. Determination of the degree of sensitization by EPR for a sample welded by 15 kJ/cm and 300°C interpass temperature from fusion line to base metal.

### 4. 결론

이상과 같은 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. EPR법은 모재 및 용접부의 예민화도를 측정하는데 있어서 다른 방법에 비해 정량적인 평가가

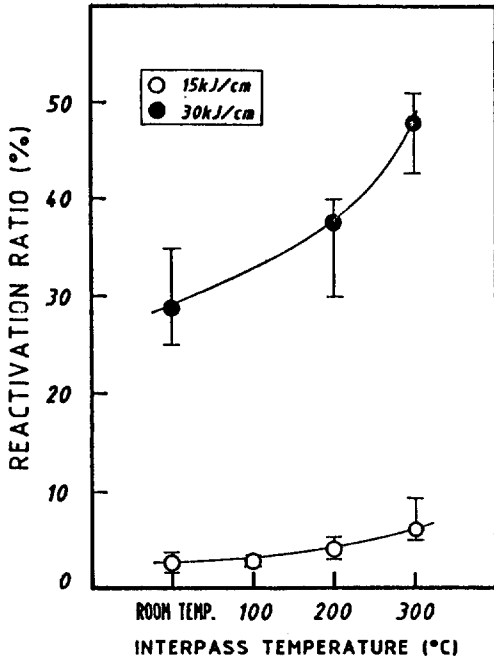


Fig. 14. Effect of interpass temperature on maximum degree of sensitization of the specimens welded with two different heat inputs.

	15 kJ/cm <sup>2</sup>		30 kJ/cm <sup>2</sup>	
	ROOM TEMP.	300 °C	ROOM TEMP.	300 °C
Appearance	No Crack	No Crack	Severe Cracks	Severe Cracks
Photograph				

Fig. 15. Results of Strauss test for SMAW welds.

가능하며, field cell을 이용함으로써 모재와 특히 용접부에 대한 예민화도를 특별한 시편의 채취과정 없이 비파괴적으로 평가할 수 있다.

2. 재활성화 비율 5%내외에서는 타 방법의 test 결과의 합격선에 포함된다. 따라서, 이 기준을 적용하면 AISI 304의 경우 Huey 또는 Strauss test와 같은 복잡하고 장시간이 소요되는 test를 EPR로 대신할 수 있다.

3. 용접부의 예민화도는 층간온도 보다는 용접 입열에 의해 더 큰 영향을 받는다. SMAW에서 통상적으로 사용되고 있는 15kJ/cm의 입열에서는 층간온도에 의해 중대한 영향을 받지는 않으나 300°C 이상 층간온도를 허용하는 것은 위험하다. 그러나, 층간온도의 제한 폭은 주어진 입열에 의해 변경될 수 있으며, 낮은 입열에서의 층간 온도 규제는 완화되어도 좋다.

### 5. 참고 문헌

1. M. G. Fontana and N. D. Green, "Corrosion Engineering," 2nd ed., McGraw-Hill, New York, U. S. A., (1978).
2. E. C. Bain, R. H. Abora, and J. T. B. Rutherford, *Trans. Amer. Steel Treating Society*, 21, 481, (1933).
3. C. Strawstorm and M. Hillert, *J. Iron Steel Inst.*, 207, 77, (1969).
4. T. M. Devine, *J. Electrochem. Soc.*, 126, 374, (1979).
5. C. S. Tedman, Jr., D. A. Vermilyea, and J. H. Rosolowski, *J. Electrochem. Soc.*, 118, 192, (1971).
6. S. C. Tjong, J. Kepner, and Z. Eliezer, *Weld. J.*, 62, 19-s, (1983).
7. W. L. Clarke, R. L. Cowan, and W. L. Walker, "Intergranular Corrosion of Stainless Alloys," ASTM STP656, p99, R. F. Steigerward, Philadelphia, U. S. A., (1978).
8. W. L. Clarke, W. M. Rowers, and J. C. Danco, General Electric Report GEAP-21382, US Nuclear Regulatory Commission NUREG-0251-1,

- (1976).
9. A. Mignone, A. Borello, and A. La Barbera, *Corrosion*, **38**, 344, (1982).
  10. "Annual Book of ASTM Standards," vol. 03.02, A262, (1985).
  11. H. H. Uhlig, "Corrosion and Corrosion Control," 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, U. S. A., (1971).
  12. C. L. Briant, R. A. Mulford, and E. L. Hall, *Corrosion*, **38**, 468, (1982).
  13. P. Chung and S. S. Similowska, *Corrosion*, **37**, 39, (1981).
  14. 최한철 · 김관휴 · 대한 금속 학회지, **24**, 1190, (1986).
  15. Fumio Umemura, *J. Tap. Weld. Soc.*, **56**, 411, (1987).
  16. Hyudai Welding and Materials Reseach Institute, Private Communication.
  17. B. J. Ginn, T. G. Gooch, and T. G. Darvey, *Met. Const.*, **15**, 745, (1983).