

2003 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

전기적 처리에 의한 탄소강 용접부의 수소취화 저감기술에 관한 연구

## A Study on the Hydrogen Embrittlement Mitigation for Carbon Steel Welds By Using Electro-Transport Treatment

박진석, 김종성, 진태은  
한국전력기술(주)  
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

김정구  
성균관대학교 금속재료공학부  
경기도 수원시 장안구 천천동 300번지

### 요 약

전기적 처리를 이용한 탄소강 용접부의 수소취화 저감기술을 제안하였다. 전기전송이론을 응용한 본 방법은 강 용접부의 건전성 평가 및 수소취화 민감도 완화에 적용할 수 있다. 본 방법을 실험적으로 검증하기 위해 탄소강 모재 및 용접부에 대해 전기전송처리를 수행한 후 수소함량을 측정하였다. 400A에서 40분 동안 전기전송처리한 시편에서 수소함량이 50% 이상 제거되어 그 효용성을 확인할 수 있었으며 기존의 이론적인 연구결과와도 잘 일치하였다.

### Abstract

Hydrogen embrittlement(HE) mitigation on weld was developed by using electro-transport theory. This method can be applied to evaluate weld integrity and reduce HE susceptibility. To demonstrate the validation of the developed method, it applied to carbon steel weld. It shows that the results of electro-transport treatment were in good agreement with those of the previous theoretical study. Based on these results, the electro-transport treatment which can substitute for conventional post weld heat treatment was proposed as a potential method for mitigating the HE susceptibility.

## 1. 서론

원자력 발전소 설비의 건전성 유지는 곧 원전 전체의 안전성과 수명과 직결되기 때문에 원전에서는 설비의 건전성 유지를 확인하기 위해 매 1년 주기로 원자로를 정지시키고 발전 설비를 점검하는 계획예방정비를 수행하고 있다. 이러한 계획예방정비 기간 중 가동 중인 설비의 용접부에서 발생한 기공을 제거하는 등 보수용접을 할 경우에는 보수용접 후 결함 발생 여부를 확인하기 위해 비파괴검사를 수행하도록 되어있다. ASME B&PV 코드 Section XI에서는 원전 설비의 보수용접시 제한적인 여건으로 인해 후열처리를 할 수 없는 경우에는 용접 후 최소 48 시간 동안 대기한 후 비파괴검사를 수행하도록 규정하고 있다[1,2]. 그러나 이러한 비파괴검사 대기시간 요건으로 인해 전체적인 작업공기가 길어지게 되므로 발전소의 재가동이 지연되는 등 문제가 발생할 수 있다. 따라서 원전의 계획예방정비기간 중 후열처리를 할 수 없는 제한적인 상황에서도 대체 처리를 통해 후열처리에 준하는 수소제거 효과를 얻을 수 있다면 코드에서 요구하고 있는 비파괴검사 대기시간을 단축시키거나 면제시켜 궁극적으로는 발전소의 이용률 향상에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기존의 후열처리를 대신할 수 있으며 보다 간편하게 수소를 제거할 수 있는 새로운 개념의 완화방안을 제안하였다. 본 연구의 수소취화 저감기술은 금속 및 합금의 전기정련시 이용되는 전기전송(Electro-transport) 이론에 기초한 방법이다. 전기전송이론에 기초한 용접부의 확산성 수소 제거 기술은 아직까지는 개념적인 수준에 머물러 있으며 잠재적 효과에 대해서만 제시되어 있을 뿐 실질적인 적용 측면에서는 연구가 미흡한 실정이다[3,4]. 본 연구에서는 이러한 전기전송처리의 효용성을 평가하기 위해 탄소강 모재 및 용접부에 대해 전기전송처리를 수행하여 주요 매개변수에 따른 시편의 수소함량을 분석하였다. 이러한 분석결과를 토대로 현장성을 고려한 새로운 개념의 수소취화 민감도 저감 기법을 제안하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편제작

전기전송처리용 시편을 모재와 용접부로 구분하여 제작하였다. 모재는 SM45C 일반탄소강을 사용하였으며 그림 1과 같이 40mm×22mm×15mm의 크기로 절단한 후 중앙에 직류전원설비의 전극을 연결할 수 있도록 숫나사가 들어갈 5mm의 나사 홈을 제작하였다. 용접부는 SM45C 일반탄소강에 E6013 및 E7016 용접봉을 사용하여 SMAW 단일비드 수동 용접한 시편을 사용하였다. SM45C의 화학조성은 표 1에 나타내었다.

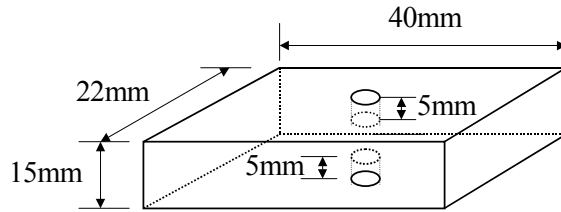


그림 1 시편의 형상

표 1 SM45C 시편의 화학조성

재료	화학조성 (wt%)								
	C	Mn	P	S	Si	Mo	Ni	Cr	V
SM45C	0.45	0.75	0.04	0.05	0.22	-	-	-	-

## 2.2 수소주입

시편에 수소를 주입하기 위해 그림 2에 나타난 바와 같이 전기화학적 방법을 이용하였다. 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에 시편을 장입한 후 음극에는 시편을, 양극에는 백금판을 연결한 후 직류전원을 인가하여 음극의 시편 표면에서 수소가 발생하도록 하였다. 이때 수소의 분자화를 억제할 수 있도록 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에 As<sub>2</sub>O<sub>4</sub>를 첨가하여 수소가 시편에 용이하게 주입되도록 하였다. 시편의 전류밀도는 3mA/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하였다.

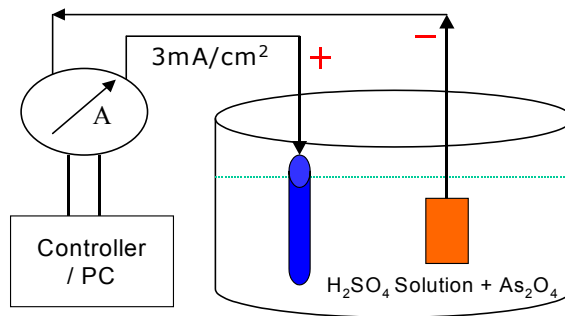


그림 2 음극 수소주입 장치

## 2.3 전기전송처리

전기전송처리(Electro-transport treatment)란 고체에 용해되어 있는 용질 원자를 전기장을 인가하여 이동시키는 처리이다. 고체내의 용질원자는 아래의 속도방정식에 제시한 바와 같이 화학적 포텐셜구배, 온도구배, 전기적 포텐셜구배 등의 구동력에 의해 확산이동할 수 있다[5].

$$J = -cM \left( \frac{\delta\mu}{\delta x} + \frac{\delta T}{\delta c} + \frac{\delta V}{\delta x} \right) \quad (1)$$

전기전송처리는 세 번째항,  $\delta V/\delta x$ 에 의한 확산이동 현상을 이용한 처리로서 전기장의 영향하에 있는 금속 내부의 용질원자는 전기장의 힘에 의해 양극이온은 음극으로, 음극이온은 양극으로 향하게 한다. 본 연구의 전기전송처리 설비는 그림 3에 보인 바와 같이 시편에 직류전원이 흐를 수 있도록 직류전원공급설비(DC Power Supply)의 전극을 연결하는 간단한 설비로 구성되어 있다. 직류전류를 공급하는 직류전원공급설비의 제원은 표 2에 나타내었다. 수소농도 분포를 예측하여 최대의 수소농도 부위에는 음극을, 반대쪽에는 양극을 연결한 후 전원공급 장치에서 직류 전류를 공급하면 수소는 음극방향으로 이동하게 되므로 국부적으로 농축된 부위의 수소를 감소시킬 수 있고 이로 인해 수소취화 민감도 완화 효과를 기대할 수 있다.

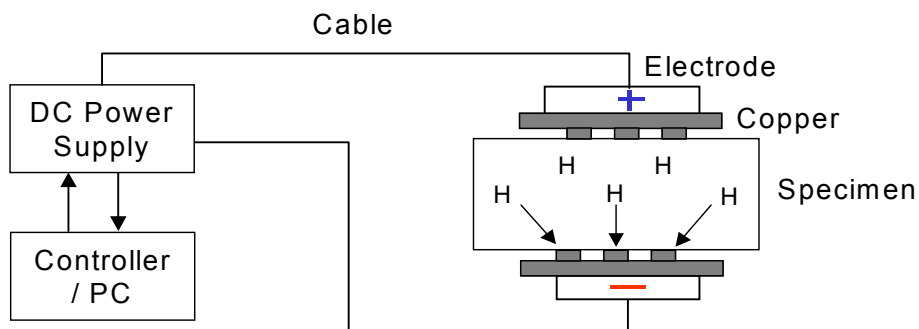


그림 3 전기전송처리의 개략도

표 2 직류전원공급설비의 제원

항목	제원
AC 입력 전압	3Φ 380V
AC 입력 주파수	60Hz
AC 입력 전류	7A 이하
DC 출력 전압	최대 5V
DC 출력 전류	최대 500A
OVP	6V
OCP	550A

#### 2.4 수소함량 측정

수소함량을 분석하는 방법에는 크게 글리세린 방법, 수은 방법, 및 가스크로마토그래피 방법이 있다. 글리세린 방법은 정확성은 다소 떨어지나 간단하게 수소함량을 측정할 수 있어 현장성이 좋으며 수은 방법은 비교적 정확성은 있으나 인체에 유해한 영향을 줄 수 있다. 가스 크로마토그래피 방법은 정확성은 가장 우수한 반면 장비가 고가이고 현장성이 다소 떨어지는 특징을 각각 갖고 있다. 본 연구에서는 탄소강 모재에 대해서는 JIS Z3118-92/KS D0064-90 규격에 따라 가스크로마토그래피 분석기를 이용하여 시편의 수소함량을 분석하였으며 용접부에 대해서는 글리세린 방법을 이용하여 수소함량을 측정

하였다. 가스 크로마토그래피를 이용한 분석에서는 시편을 격리된 챔버에 넣고 48℃에서 72시간 보관한 후 시편의 중량을 측정하여 수소 함량을 분석하였다. 글리세린 방법을 이용한 분석에서는 시편을 용착한 후 글리세린 중에 72시간 동안 보존한 후 수소 포집기에 가스가 충전되도록 하여 방출되는 수소함량을 측정하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 전기전송처리에 따른 모재의 수소함량 측정결과

전기전송처리의 효율성을 확인하기 위해 우선 탄소강 모재에 대해 전기전송처리 조건에 따른 시편의 수소함량을 분석해 보았다. 표 3은 탄소강 모재에 대해서 수행한 전기전송처리 조건을 보여주고 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 인가전류는 150~450A로, 인가시간은 20~60분으로 변화시키면서 전기전송처리를 수행하였다.

표 3 수소주입 시편에 대한 전기전송처리 수행조건

No.	전기전송처리 조건		비고
	인가전류(A)	인가시간(min)	
#1	No		기준 시편
#2	150	40	
#3	300	20	
#4	300	40	
#5	300	60	
#6	450	40	

전기전송처리 수행 후 가스 크로마토그래프를 이용하여 각 시편의 수소함량을 측정하였으며 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 인가전류에 따른 수소함량 분석결과, 450A에서 수소함량이 가장 낮게 측정되었다. 인가시간에 따른 수소함량 분석결과, 150A, 300A, 450A에서 처리한 시편 모두 인가시간이 증가할수록 수소함량이 감소하였다. 450A에서 40분간 처리한 시편#6이 가장 낮은 수소함량을 나타내어 전기전송처리를 하지 않은 기준 시편과 비교하면 약 90%의 수소가 제거되었음을 알 수 있었다. 그림 4의 점선은 이러한 경향을 감안하여 인가시간을 60분까지 외삽한 결과로서 450A로 60분 동안 처리할 경우를 가정하면 모든 수소가 제거될 수 것으로 예측된다.

전기전송처리 중 시편의 표면온도를 측정하였다. 수소는 열에 의한 확산을 통해서도 제거될 수도 있으므로 확산에 의한 영향과 전기전송처리에 의한 영향을 독립적으로 분석할 필요가 있기 때문이다. 또한 전기전송처리 시 시편과 전극의 체결상태가 양호하지 못하면 접촉 저항열이 발생하여 시편의 온도가 상승하게 되므로 시편의 온도측정을 통해 전기전송처리의 적절성도 함께 평가할 수 있게 된다. 전기전송처리 중 온도센서를 이용하여 시편의 표면온도를 측정한 결과, 그림 5에서 보는바와 같이 최대 40℃를 초과하지 않았다.

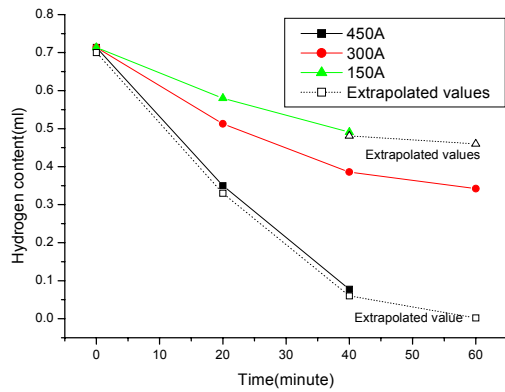


그림 4 전기전송처리 조건에 따른 탄소강 모재의 수소함량 측정결과

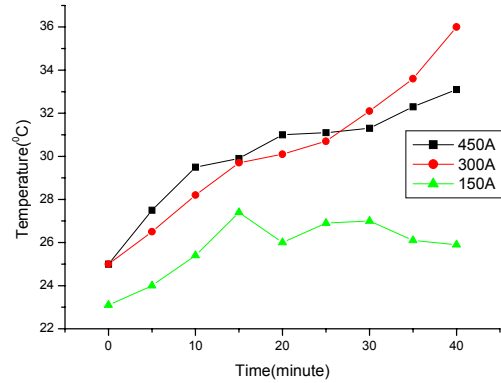


그림 5 전기전송처리시 시편의 표면온도 측정결과

따라서 시편내의 수소는 전기전송처리와 확산에 의해 동시에 제거되었음을 알 수 있었으며 전기전송처리의 수행조건은 양호하였음을 알 수 있다.

### 3.2 전기전송처리에 따른 용접부의 수소함량 측정결과

탄소강 모재에 고수소계 및 저수소계 용접봉을 사용하여 SMAW 단일비드 수동용접한 용접부에 대해 전기전송처리를 수행하였다. 전기전송처리시 인가전류는 300A~400A, 인가시간은 20분~40분으로 변화시키면서 수소함량을 측정하였다. 용접부에 대해서는 가스크로마토그래피 방법보다 보다 간편하게 수소함량을 측정할 수 있는 글리세린 방법을 이용하였으며 수소함량 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는바와 같이 전기전송처리를 수행한 시편이 전기전송처리를 수행하지 않은 시편과 비교했을 때 최대 1.3ml의 함량 차이가 나타났다. 또한 45°C의 료에서 40분 방치 시킨 시편의 수소함량은 1.84ml로 측정되어 전기전송처리 및 확산에 의한 영향을 구분할 수 있었다.

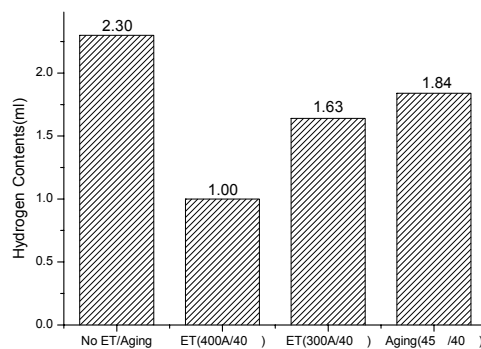


그림 6 용접부의 수소함량 측정결과

그림 7에서 보는바와 같이 용접부에 대해서도 인가전류가 높을수록 그리고 인가시간이 길어질수록 수소함량이 낮게 측정되었다. 용접부의 전기전송처리 중 온도센서를 이용하여 시편의 표면온도를 측정된 결과, 그림 8에서 보는바와 같이 최대 45℃를 초과하지 않았다. 따라서 시편내의 수소는 전기전송처리와 확산에 의해 동시에 제거되었음을 알 수 있으며 전기전송처리의 수행조건도 양호하였음을 알 수 있다.

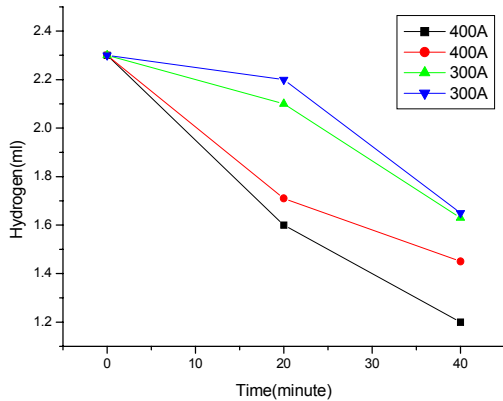


그림 7 전기전송처리 조건에 따른 용접부의 수소함량 측정결과

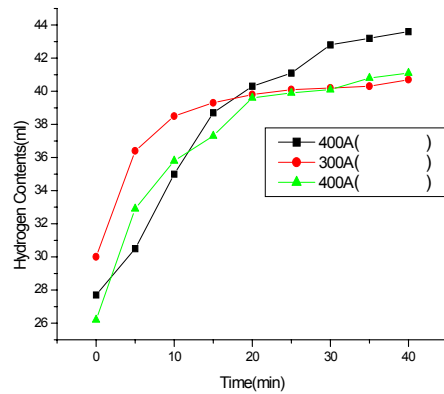


그림 8 용접부의 전기전송처리시 표면온도 측정결과

용접부에 대한 전기전송처리의 효율을 계산하였다. 전기전송처리시 400A의 전류를 20분 및 40분 동안 인가한 후 각각의 수소제거 효율을 계산하였을 경우 표 4에 나타낸 바와 같이 27% 및 56%로 나타났다. 전기전송처리의 효율은 전극과 시편의 접촉면에서 전류밀도가 중요하며 인가전류 500A에서 1시간 동안 처리했을 경우를 가정하면 시편내의 모든 수소가 제거될 것으로 예측된다.

표 4 전기전송처리의 효율

시간(분)	초기 수소함량	측정 수소함량	제거된 수소함량			수소제거 효율(%)
			확산	E/T	Total	
20분	2.30	1.65	0.21	0.39	0.60	27
40분	2.30	1.05	0.42	0.83	1.25	56

[주] 단위 : ml

#### 4. 결론

본 고에서는 전기적 방법을 이용한 강 용접부의 수소취화 저감기술을 제안하였다. 기존의 후열처리를 대신할 수 있을 뿐만 아니라 비파괴검사 대기 요구조건을 면제시킬 수 있

는 수소취화 민감도 저감방안으로 전자기수송처리를 효용성을 실험실 수준에서 확인하였다. 탄소강 모재와 용접부에 대해 전기전송처리를 수행한 결과, 400A, 40분의 처리조건에서 50% 이상의 수소가 제거되었다. 탄소강 용접부보다 모재에서 더 높은 전기전송처리 효율을 나타낸 것은 시편에 인가된 전류밀도의 차이로 인한 것으로 판단된다. 향후 전기전송처리시 전류밀도를 높이는 방안을 개발하여 현장성을 극대화함으로서 대형 구조물에도 실질적인 적용이 가능토록 할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] ASME Code Section XI, Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, IWA-5200, 2001
- [2] Richard Pargeter, "Evaluation of Necessary Delay Before Inspection for Hydrogen Cracks", Welding Journal, October 2001.
- [3] D.H. Bhadeshia, "Metallurgical Modeling of Welding", The Institute of Materials, 1997.
- [4] Alan Turnbull, "Hydrogen Transport & Cracking in Metals", Proceedings of a Conference Held at The National Physical Laboratory UK, 13-14 April, 1994, Page 62~64
- [5] B. Mishra & S.A. David, "Postweld Electrotransport Treatment", Journal of Material Engineering and Performance, Vol.3(5), 1994, Page 614.
- [5] Th. Boellinghaus & H. Hoffmeister, "Numerical Model for Hydrogen-Assisted Cracking", Corrosion, Vol. 56, No. 6, 2000, Page 611~612
- [6] S.D Smith, "An Application of a Simple Numerical Model for Hydrogen Diffusion in Multypass SAW welds in C-Mn Steels", TWI Report No. 473-1993. Page 7.
- [7] J.Y. Lee, "A study on the delayed fracture characteristics of high strength steels by hydrogen thermal desorption analysis," Presentation Material, 2002.