

## 알루미늄 용해 반사로용 gas 배출기의 bag cage에서 발생한 균열의 원인 분석

박지환\* · 박소연\* · 이종권\* · 송태환\* · 류근걸\* · 이윤배\*

### Analysis of Crack in Bag Cage Welds of Wire STS 304 Wire for Al Melting

Ji-hwan Park\*, So-yeon Park\*, Jong-kwon Lee\*,  
Tae-hwa Song\*, Kun-kul Ryoo\*, Yoon-bae Lee\*

**요약** 본 알루미늄 용해반사로 gas 배출기의 bag cage에서 사용 6개월 만에 균열이 발생하였다. 이러한 bag cage의 용접 부에서 발생한 균열의 원인조사를 위해 bag cage의 성분분석, 용접부에서의 파단면과 미세조직을 SEM과 금속현미경으로 관찰한 결과 bag cage의 균열의 원인이 배기가스중의 황화물과 대기중의 습기, 산소와 반응에 의해 형성된 polythionic acid이 생성되어 용접에 의해 예민화된 부위에 부식을 일으켰다는 것을 확인할 수 있었다.

**Abstract** After 6 month of using, cracking of gas exhaustion bag cage of Type 304 stainless steel wire for Al melting reverberatory furnace was founded in welds. Analysis of crack causes in the wire were tested by electrochemical method, SEM images of structure and analysis of composition. Resulted from the test, it could be observed that cracks in the welds were a accelerated by formed polythionic acid on surface of bag cage in sensitized region of HAZ, tensile stress and using environment.

**Key Words** : Weld, HAZ, crack

## 1. 서 론

알루미늄 용해반사로 gas 배출기의 bag cage에서 사용 6개월 만에 균열이 발생하였다. Bag cage는 직경이 4mm였으며, 6일 가동에 1일 휴식의 주기로 6개월간 사용되었다. 균열은 용접부에서 발생하였으며 bag cage의 외관은 검게 그을려져 있었다. Al 용해 반사로에서 바로 배출되는 gas온도는 250°C~300°C였으나, bag cage로 배출되는 gas의 온도는 대략 100°C내외였으며 배출되는 gas의 주성분은 황화물과 질화물이 대부분이었다.

균열의 대부분은 인장응력이 걸려있는 ring 접합부의 용접부에서 발생하였다. 이러한 bag cage의 용접부에서 발생한 균열의 원인조사를 위해 bag cage의 성분분석, 용접부에서의 파단면과 미세조직을 SEM과 금속현미경으로 관찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편의 성분분석

Table 1. Chemical composition of type 304 stainless steel used in bag cage(wt%)

	C	Cr	Ni	P	S	Mn	Si
ASTM A204	0.08	18.00~20.00	8.00~10.50	0.045	0.030	2.00	1.00
Measurement	0.109	18.10	8.22	0.053	0.015	1.259	0.753

\*순천향대학교 신소재화학 공학과  
E-mail : jude823@nate.com

### 2.2 Observation of microstructure

손상된 bag cage에서 균열된 부위의 시편을 채취하

Table 2. Chemical compositions of flow gas in furnace

dust	SOx	HCl	NOx
150~200mg/Sm <sup>3</sup>	30 ppm	2~4 ppm	30 ppm

여 미세조직을 관찰하였다. 이를 위해 oxalic acid etch test(ASTM A-262-86)[1]를 실시하였다. 파단면의 미세 조직을 scanning electron microscopy(SEM)를 이용하여 관찰하였다. 시편의 파단면을 관찰한 모습을 Fig. 3에 나타내었다.

### 2.3 DL-EPR(double loop-electrochemical potentiokinetic reactivation) test

예민화된 조직이 관찰됨에 따라 용접부의 예민화도를 정량적으로 측정하기 위해 double loop electrochemical potentiokinetic reactivation test(DL-EPR test)를 실시하였다. 본 연구에서는 예민화도를 forward scan loop에서의 최대전류값(Ia)와 reverse scan loop에서의 최대전류값(Ir)의 비로서, 다음과 같이 나타내었다.

$$\text{Reactivation ratio} = (I_r/I_a) \times 100\%$$

Ir : Maximum current of reactivation loop

Ia : Maximum current of anodic polarization loop

### 2.4 배기가스 분석

Table 2는 bag cage로 유입되는 gas의 성분을 나타내었다. 배출gas의 주성분은 황화물과 질화물이 대부분이었다.

시편의 성분분석결과 탄소의 함량을 제외한 나머지 성분에서는 ASTM A204에서 규정하는 범위의 성분함량을 나타냈다. 그러나 측정된 탄소의 함량은 0.1wt%로 기준치보다 0.02wt%높게 측정되어 304 규격을 벗어난 것으로 분석되었다.

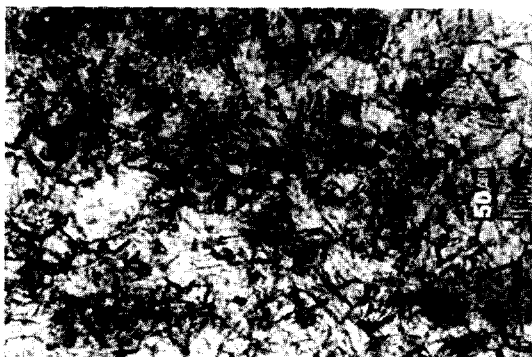
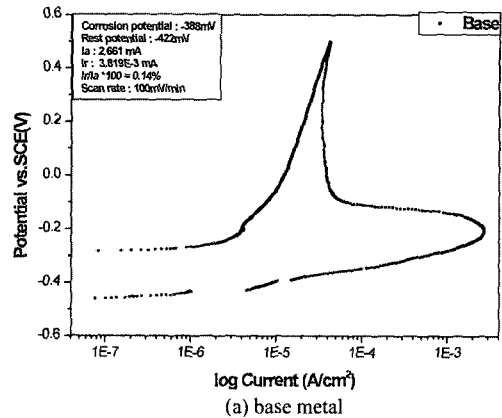
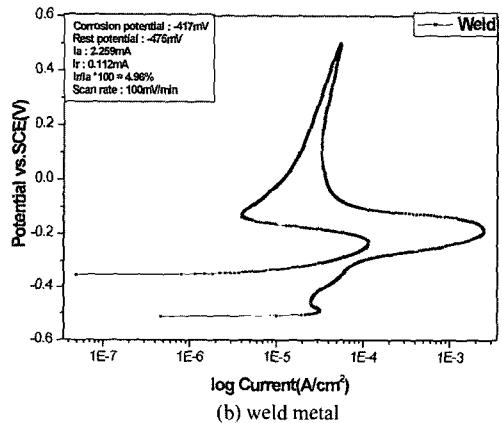


Fig. 1. Microstructure of type 304 stainless steel in weldment.



log Current (A/cm<sup>2</sup>)

(a) base metal



log Current(A/cm<sup>2</sup>)

(b) weld metal

Fig. 2. Results of DL-EPR test.

## 3.결과 및 고찰

관찰된 미세조직은 ditch와 step이 동시에 나타나는 dual조직은 Fig. 1에 나타났다. 이러한 dual조직은 용접 입열량에 의해 스테인리스강이 예민화되었을 때 나타나는 조직이다.

이러한 예민화를 정량적으로 나타내기위한 DL-EPR



(a) Intergranular stress corrosion cracking in fracture surface

(b) Secondary crack

Fig. 3. Scanning electron micrographs of fracture surface of bag cage.

Table 3. Chemical composition of EDS in line scanning

Element	O	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni
Weight%	52.25	0.57	0.95	12.14	1.01	29.47	3.01
Atomic%	78.54	0.49	0.72	5.89	0.44	12.69	1.23

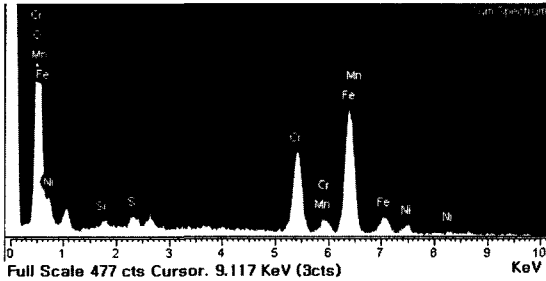


Fig. 4. EDS spectrum of corrosion product.

test결과를 Fig. 2에서 나타내었다. DL-EPR test의 결과, 모재부에서의 재활성화 비율은 0.14%, 용접부에서의 재활성화 비율은 4.96%로 나타나 용접부에서 예민화가 일어났다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3(a)는 파단면을 SEM으로 관찰한 모습이다. 균열이 입계를 따라 발생하였고 측면에는 2차균열을 관찰할 수 있는데 이러한 모습은 전형적인 입계부식의 모습을 나타낸다. 앞에서 언급된 재료의 화학성분에서 탄소가 규격보다 0.02% 높은 것으로 분석된 것도 입계부식의 발생을 촉진시킨 것으로 생각된다.

스테인리스강에서 탄소함량이 증가함에 따라 부식속도가 증가 할 뿐만 아니라 예민화되는데 필요한 시간이 감소하는 것으로 보고되고 있으며 이에 따라 이 재료는 보다 입계부식이 쉽게 일어날 것으로 생각된다[7]. 이상의 결과로 균열의 원인은 용접에 의하여 예민화된 조직이 구조물에 가해진 인장응력에 의하여 입계 응력 부식 균열(IGSCC)을 일으킨 것으로 생각된다. Table 2에 나타난 바와같이 배기가스의 성분중에 황의 함량이 매우 높은 30ppm으로 나타났다. 배기가스 중의 황화물이 bag cage의 표면에 흡착되어 알루미늄 용해로의 가동 중단시 (6일 가동, 1일 휴식) 대기중의 습기, 산소와 반응하여 polythionic acid를 형성하여 예민화된 부위에서 입계부식을 일으킨 것으로 판단된다. 즉, Fig. 3(a)의 모습은 IGSCC(intergranular stress corrosion cracking)가 파단면에 화학적으로 증착된 황이나 황화물의 존재에 의해 생성된 polythionic acid가 grain boundary를 따라 크롬이 고갈된 영역의 양극 용해로 인해 발생된 것을 보여준다.

파단면의 부식생성물 EDS(Table 3, Fig. 4)의 분석결과에서는 산소의 함량은 52.25wt%로 측정되었으며, S의 양이 0.95wt%로 검출되어 시편자체가 포함하고 있

는 0.015wt%와 비교하였을 때 약 60배정도가 증가된 다량의 황이 존재하는 것을 확인하였다. 이는 bag cage의 균열의 원인이 배기가스중의 황화물과 대기중의 습기, 산소와 반응에 의해 형성된 polythionic acid가 생성되어 용접에 의해 예민화된 부위에 부식을 일으켰다는 것을 확인할 수 있었다. 물론 본 시설에 사용된 STS 304의 화학성분에서 탄소함량이 규격보다 많았던 것이 용접에 의한 용체화를 촉진한 것으로 생각된다.

### 3. 결 론

알루미늄 용해 반사로용 gas 배출기의 bag cage에서 균열의 발생원인은 bag cage로 배출되는 gas중의 황성분과 Al 용해반사로의 사용주기(6일 가동, 1일 휴식)로 인해 형성된 polythionic acid가 STS 304의 예민화부위에서 입계에서 부식을 발생시켰으며, bag cage에 인가된 응력에 의해 균열이 발생된 것으로 판단된다. 또한, 이러한 STS 304의 용접부에서 polythionic acid에 의해 발생하는 입계응력부식균열을 방지하기 위해서는 아래의 방법을 적용하였을 때 제품의 수명연장과 부식의 방지에 효과가 클 것으로 판단된다.

탄소의 함량이 적은 STS 304L, 혹은 안정화제(Ti, Nb)가 첨가되어있는 321, 347 stainless steel을 사용하거나 제품을 용접 후 1050°C로 가열급냉시키는 용체화 처리를 함으로써 균열을 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] Denny A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Macmillan publishing company, 1992.
- [2] Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering", third edition, McGraw-Hill international editions, 1987.
- [3] J. B. Lee, G. T. Kim and J. W. Kim, "Met. and Mater", J. Kor. Inst., Vol. 36. No.12, 1998.
- [4] Vivekanand Kain, Yutaka Watanabe, Journal of Nuclear Materials, 302, 2002.
- [5] Y. S. Lim, H. P. Kim, J. S. Kim, and H. S. Kwon, "Metals and Materials international", Vol. 7, No. 1, 2001.
- [6] A. John Sedriks, "Corrosion of Stainless Steels", John Wiley and Sons, new york, 1979.
- [7] R. C. Newman, K. Sieradzki, and H. S. Isaacs, "Amer-

- ican Society for Metals and The Metallurgical”, Vol.13A, November, p. 2015, 1982.
- [8] J. K Lee, B. S, M. S., “Stress Corrosion Cracking and Pitting of Sensitized Type 304 Stainless Steel in Chloride Solutions Containing Sulfur Species at Temperatures from 50 to 200°C”, The Ohio State University, p.29-31, 1986.
- [9] H. P. Kim, S. S. Hwang, C. K. Rhee, K. M. Kim, J. S. Kim, J. Corros. Sci. Soc. of Korea Vol. 27, No. 1, 1998.
- [10] M. C. Cha, and S. E. Chang, J. of the Korea Inst. of Met. and Mater, Vol. 32, No. 7, 1994.