2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

합금인자와 형상이 SA106 Gr.C강 용접재에서의 유체가속부식(FAC)에 미치는 영향

Effects of composition and geometry on the flow-accelerated corrosion in SA106 Gr.C Weldment

Zheng Yugui*, 김준환, 김인섭

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

중국과학원 금속연구소*

요 약

3.5% 염수와 모사된 발전소 급수조건에서 SA106 Gr.C 저합금강의 유체가속부식(FAC)에 대한 화학 조성적, 기하학적 영향을 rotating cylinder electrode를 이용하여 연구하였다. 무게감소 실험과 분극실험을 각각의 경우에 대하여 정지상태와 3.14m/s의 유속하에서 실험하였다. 본 연구에서는 화학 조성이 기하학적 영향보다 우세한 것으로 나타났고 용접부는 국부 양극으로 작용하여 우선 용해에 취약한 것으로 드러났으며 기하학적 영향이 결합된 시편에서 큰 무게감소를 보였다. 반면에 부식이 가속된 조건에서는 열영향부에서 심한 부식현상을 보였으며 금속조직학적 영향이 크게 지배하는 양상을 보였다.

Abstract

The chemical and geometric effects of weld on flow-accelerated corrosion (FAC) of SA106 Gr.C low alloy steel pipe in 3.5wt% NaCl and simulated feedwater of nuclear power plant have been investigated by using rotating cylinder electrode. Weight loss test and polarization test were conducted and compared at rotating speed of 2000rpm (3.14m/s). The results showed that the chemical effects were relatively larger than the geometric effects, and the welded parts were the local anode and preferentially corroded which could be explained by the differences between microstructural and compositional parameters. The protrusion weld specimens always had the largest weight loss rate. On the other hand, under active corrosion conditions, the heat affected zone were severely corroded and metallurgical effects became the important role in the whole process.

1. 서 론

1986년 가압경수로인 미국 Surry 발전소의 응축기 계통의 파단으로 수 명의 사상자가 난 사고 이후 탄소강 배관에 대한 유체가속부식(Flow-Accelerated Corrosion, 이하 FAC) 연구가 이루어지고 있다. FAC 현상은 유체에 노출된 탄소강과 저합금강에서 부식현상이 가속되는 현상을 통털어 일컬으며 이러한 FAC는 열유체적, 금속부식적 인자의 상호작용으로 일어나는 현상이므로 이에 영향을 미치는 인자는 유속, 온도, pH, 용존 산소, 금속의 화학 조성 등으로 다양하다[1].

현재 현장 발전소에서는 상용 FAC 예측코드와 예측코드에서 예측한 취약 부위를 중심으로 지속적인 초음파 검사를 통하여 배관두께의 관리를 수행하고 있다. 그러나 FAC 예측모델로 널리 쓰이고 있는 미국 전력연구원 (EPRI)의 CHECWORKS code는 예측범위가 실제치의 ±50% 정도의 오차 범위가 존재한다. 이는 code에 포함해야 할 인자가 다양하여 조합시 각 인자의 불확실성이 중첩되어 확산된 이유를 들 수 있으나 실제의 배관 환경은 서로 다른 재질의 배관이 용접으로 연결되어 있고 이러한 용접부 접합부위의 유동특성과 용접에 따른 부식현상의 특이성을 코드에 반영하지 않은 것도 한 이유로 들 수 있다.

본 연구의 목적은 실제 원자력발전소에서 쓰이는 저합금강 배관재인 SA106 Gr.C강의 용접부에 대한 FAC 영향을 관찰하고 미세구조와 합금원소의 차이에 따른 FAC 현상을 실험적으로 분석하는 데 있다.

2. 실험 절차

시편 준비

본 연구에서 사용된 SA106 Gr.C 강은 영광 3, 4호기의 주증기 배관재로 사용되고 있고 한국중공업에서 제작하였으며 외경 669mm와 두께 32mm를 갖는다. 용접은 Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)로 다층용접으로 수행하였으며 용접 후 610℃의 온도로 2시간동안 후열처리를 수행하였다. 모재와 용접재의 화학조성은 표 1과 같다. 합금원소와 돌출부위의 상호작용을 관찰하기 위해 시편은 모재, 모재+용접재, 모재+용접재(1mm 돌출), 모재+용접재(1mm 홈) 4가지로 가공하였다. (이하 NB, NW, PW, GW) 돌출부위와 홈은 용접부 전면에 가공하여 접합부식에 대한 유체교란의 효과를 극대화하려 했다. 그림 1에 각 시편의 채취 그림을 실었다. 미세구조의 관찰을 위하여 시편을 1㎛까지 연마하여 2% Nital 용액으로 etching한 후 광학 현미경으로 관찰하였다.

부식실험장치의 구성

용접재의 유속에 따른 부식현상을 측정하기 위하여 Rotating Cylinder Electrode를 사용하여 부식실험과 무게감소 실험을 수행하였다. 그림 2에 RCE의 개략도를 실었다. 기준전극(reference electrode)과 대전극(auxiliary electrode)은 각각 포화 카로멜 전극(Saturated Caromel Electrode, 이하 SCE)과 탄소 전극을 사용하였다. 일전극은 냉각재가 흐르는 방향과 동일한 방향성으로 채취하였으며 지름은 30mm로서 2000rpm과 3000rpm일때 각각 3.14m/sec와 4.71m/sec의 선속도를 가진다. 실험에 사용된 수용액은 PWR 1차측 수용액[2]과 3.5% 염수를 사용하였다. 부식실험 전 시편을 600 grit까지 연마한 후, 증류수에 세척과 아세톤으로 탈지한 후 용액에 담궜다. 무게감소 실험에는 실험 전 무게측정시 시편을 데시케이터에 보관하였고 실험 후 시편은 수돗물에 세척 후 천으로 닦고 아세톤에 30분간 초음파 세척을 하여 시편 표면에 부착된 부식생성물을 제거한 후 무게를 측정하였다. 실험 후 주사 전자현미경(SEM)을 이용하여 부식으로 인한 손상면을 관찰하였다. 부식전위는 분극곡선에서 산화전류밀도(i_a)와 환원전류밀도(i_c)의 절대값이 같아지는 지점에서의 전위를 측정하였고 부식전류는 부식전위 근처에서 전극표면의 활성화 반응에 의한 지배방정식인 Tafel 방정식에 따라서 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

미세구조 관찰과 분극실험 결과

그림 3은 모재와 용접재의 미세조직 사진이다. 용접재와 모재는 각각 전형적인 페라이트 구조와 페라이트-펄라이트 층상 구조를 지니고 있다.

그림 4는 3.5% 염수 분위기에서 회전속도에 따른 각 조직의 분극곡선을 나타내고 있다. 회전속도가 높아질수록 부식전위의 상승이 관찰되었는데 이는 cathodic 반응인 산소의 환원반응이 회전속도가 높아질수록 전극 표면으로의 확산이 원활해진 결과로 판단된다[3].

표 2는 3.5% 염수 분위기와 중성용액에서의 회전속도에 따른 각 조성별 전기화학적 부식전류를 나타낸 표이다. 여기서 3.5% 염수 분위기인 경우 정지상태에서의 각 조성별 부식속도의 차이는 보이지 않았으나 2000rpm인 경우 각 조성별로 속도의 영향이 보였으며 특히 NB와 NW의 차이가 두드러졌다. 이는 정지상태보다 유동이 존재하는 경우 용접재와 모재 사이의 전자교환이 용이해져서 결국 국부전지의 역할이 가속되는 것으로 보고있다. 여기서 기하학적 요인이 결합된 PW에서 부식속도가 최대로 관찰되었는데 이는 용접재 바로 앞의 돌출부위에서의 국부 난류현상이 앞서 언급한 국부전지의 역할을 가속시키기 때문이다. 중성용액인 경우 염수의 경우만큼 큰 영향을 관찰하기 어려웠으나 역시 속도에 따른 PW의 효과가 두드러짐을 관찰하였다.

여기서 특이할 만한 것이 GW는 모든 조건에 대하여 낮은 부식속도를 보였으며 이러한 경향은 2000rpm에서도 변하지 않았다. 이는 GW의 기하학적 특성상 일전극과 기준전극간의 거리가 늘어남으로서 그에 따른 전기화학적 저항이 높아져서 그에 수반하는 전류값이 떨어진 것으로 보고 있다[4].

무게감소 실험 결과

그림 5(a)는 정상상태 (o.c.p)에서 3.5% 염수에서의 각 조성별 무게감소를 나타낸 그래프이다. 이종 조성의 접합에 따른 부식증가 현상이 기하학적 영향보다 우세한 경향을 보였으며 이는 앞서 구한 전기화학적 부식전류값과 일치하는 거동이다. 그림 5(b)은 정상상태에서의 NW 시편의 모재와 용접재 부분의 부식 표면의 전자현미경 사진이다. 여기서 용접부분은 부식으로 인한 손상이 관찰된 반면 모재는 부식현상이 관찰되지 않았다. 이는 용접재와 모재간의 조성차이로 인하여 용접재가 희생양극(sacrificial anode)의 역할을 담당하는 것으로 보인다.

가속화한 분위기에서의 조성별 부식거동을 관찰하기 위해 분극곡선의 양극용해 영역인 -350mV(SCE)로 전위를 올린 상태에서의 무게감소를 측정하였다. 그 결과를 그림 6(a)에 실었다, 위의 결과에서 부식으로 인한 무게감소가 정상상태보다 가속되는 것을 관찰할 수 있었다. 여기서 중성조건에서 염수조건, 그리고 양극용해 영역인 염수조건으로 부식환경이 심각해질수록 조성과 아울러 기하학적 불균일성이 결합된 PW 조건에서 높은 부식민감도를 보였다. 전기화학적 결과와 마찬가지로 GW는 PW, 심지어 NW보다 낮은 부식속도를 보였는데 이러한 결과에 대하여서는 향후 고찰이 필요할 것으로 보인다.

부식현상에 대한 화학조성과 미세구조의 영향

Voruganti[5]는 모재와 용접재간의 미량의 합금원소의 차이와 미세구조의 차이에 대한 부식민감도를 주사 기준전극법으로 측정하여 각각 RI와 ChE라는 지수를 고안하였다.

$$RI = (H_M - H_{BP})/(H_M - H_{HAZ})$$

$$ChE = -(3.2\Delta Cu + 1.5\Delta Ni - 4.0\Delta Si + 1.5)$$

H_M : 주어진 탄소함량에서의 마텐사이트의 최대 경도값

H_{BP} : 모재의 경도값

H_{HAZ} : 용융선 근처에서의 열영향부의 평균 경도값

Δ(element) : (모재의 해당 합금원소) - (용접재의 해당 합금원소)

RI는 각 미세경도값의 상대적 차이로 부식에 대한 조직별 불균일성에 대응하는 지수이며 ChE는 각 조성의 상대적 차이로 인한 화학조성별 불균일성에 따른 부식 취약성에 대응하는

지수이다. 본 연구에 사용된 재료는 ChE가 -1.76으로 이는 모재가 안정한 것으로 앞 절에 서술한 결과와 일치한다. 그림 7는 RI와 ChE간의 관계를 도시한 그래프이다. 여기서 조건별로 편차가 있으나 일반적으로 ChE의 값이 커질수록 RI의 값이 커지는 경향을 보인다. 이는 용접재 부식에 관여하는 인자인 미세조직의 차이에 의한 부식 구동력과 합금원소의 차이에 의한 부식 구동력이 서로 정(正)의 상관관계가 있음을 의미한다. 현재 본 연구에 사용된 재료는 용접재가 부식에 취약하고 모재 및 열영향부는 상대적으로 부식에 안정한 양상을 띠며 이는 정상상태 (o.c.p)에서의 손상면을 전자현미경으로 관찰한 결과와 일치한다. 본 연구에 사용된 용접재가 anode로 작용하는 원인이 모재와 용접재 간의 Cu와 Ni 함량 차이 외에 Mn양이 모재보다 높은 것도 한 요인이 될 수 있는데 Mn은 페라이트 상 격자 내의 급랭 탄소를 증가시켜서 부식을 증가시킨다는 보고[6]와 Mn이 전기화학적으로 철보다 양극에 위치하기 때문에 페라이트 입계 주위에서 우선 산화되어 선택 용해경향을 높인다는 보고[7]가 있다.

그림 6(b)는 양극용해가 가속화된 지점에서의 NW 시편의 모재와 용접재 부분의 부식 표면의 전자현미경 사진이다. 여기서 모재의 표면은 전형적인 FAC로 인한 손상인 horseshoes pits를 보인 반면 용접재의 표면은 부식으로 인한 손상이 전범위적으로 일어나서 표면이 둥글둥글한 양상을 보였다. 아울러 부식환경이 가속될수록 모재와 용접재 계면에서의 선택적 부식현상이 관찰되었다.

4. 결　론

SA106 Gr. C강의 모재와 용접재의 3.5% 염수 분위기에서 속도에 따른 분극곡선 결과는 정지상태에서의 각 조성별 부식속도의 차이는 보이지 않았으나 2000rpm인 경우 각 조성별로 속도의 영향이 보였으며 특히 용접재와 모재가 혼재된 경우 부식속도의 증가현상이 두드러졌다. 아울러 발전소 급수조건에서 염수조건, 그리고 양극용해 영역인 염수조건으로 부식환경이 심각해질수록 조성과 아울러 기하학적 불균일성이 결합된 조건에서 높은 부식속도 증가를 보였다.

무게감소 실험 결과는 전기화학적 결과와 마찬가지로 정상상태에서는 모재가 안정하고 용접재의 부식속도가 높은 양상을 보였으며 부식환경이 가속될수록 모재와 용접재 계면에서의 열영향부의 조직차이에 의한 선택적 부식현상이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21과 한국전력공사의 지원을 받아 기초전력공학공동연구소에서 시행하는 2000년도 전력기술 기초연구과제에서 부분 지원했음.

REFERENCES

[1] B. Chexal, et. al., *EPRI TR-106611* (1996)

[2] J. H. Kim and I. S. Kim, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **38**, 9, 1269 (2000)

[3] H. H. Huang and T. H. Chuang, *Materials Sciences and Engineering*, **A292**, 90 (2000)

[4] Y. G. Zheng and I. S. Kim, *private communication*

[5] V. S. Voruganti, H. B. Luft, D. DeGeer and S. A. Bradford, *Corrosion*, **47**, 5, 343 (1991)

[6] G. C. Saava, G. C. Weatherly and K. T. Aust, *Corrosion*, **45**, 3, 243 (1989)

[7] W. Wei and H. J. Graebke, *Corrosion Science*, **26**, 223 (1986)

Table 1. Chemical composition of the base metal and the weld metal of SA106 Gr.C steel pipe

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Base	0.19	1.22	0.009	0.007	0.27	0.11	0.05	0.03	0.004	0.029	0.13
Weld	0.073	1.44	0.015	0.017	0.83	0.007	0.02	0.03	0.007	-	0.28

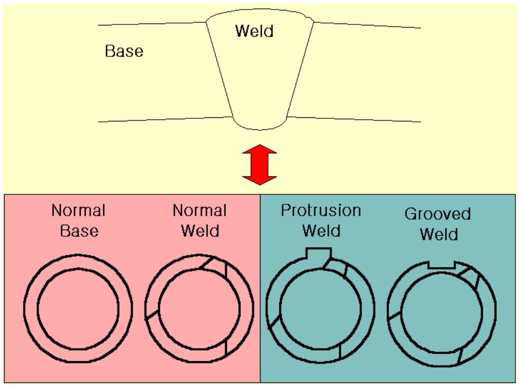


Fig. 1 Preparation of four kinds of the specimen

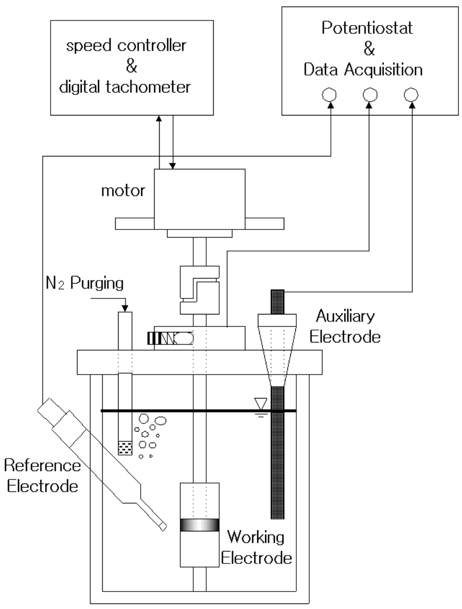
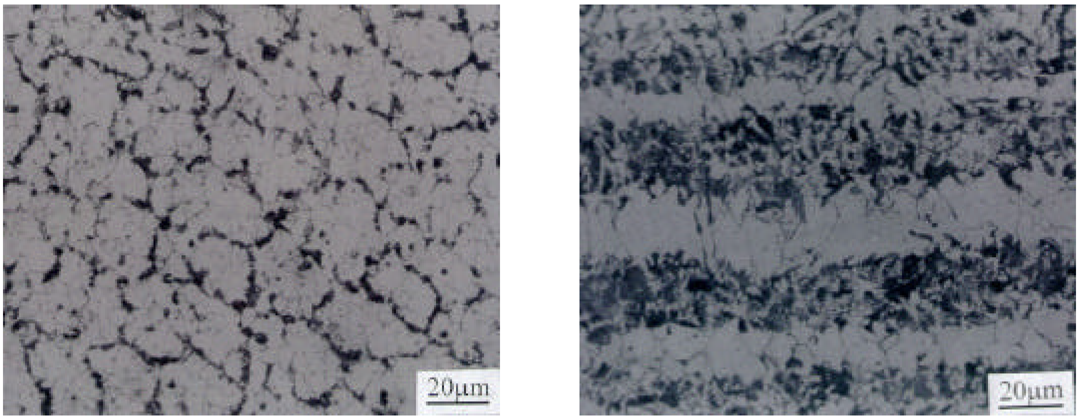


Fig. 2 Schematic illustration of RCE setup



(a) (b)

Fig. 3 Microstructure of SA106 Gr.C carbon (a) weld metal, (b) base metal

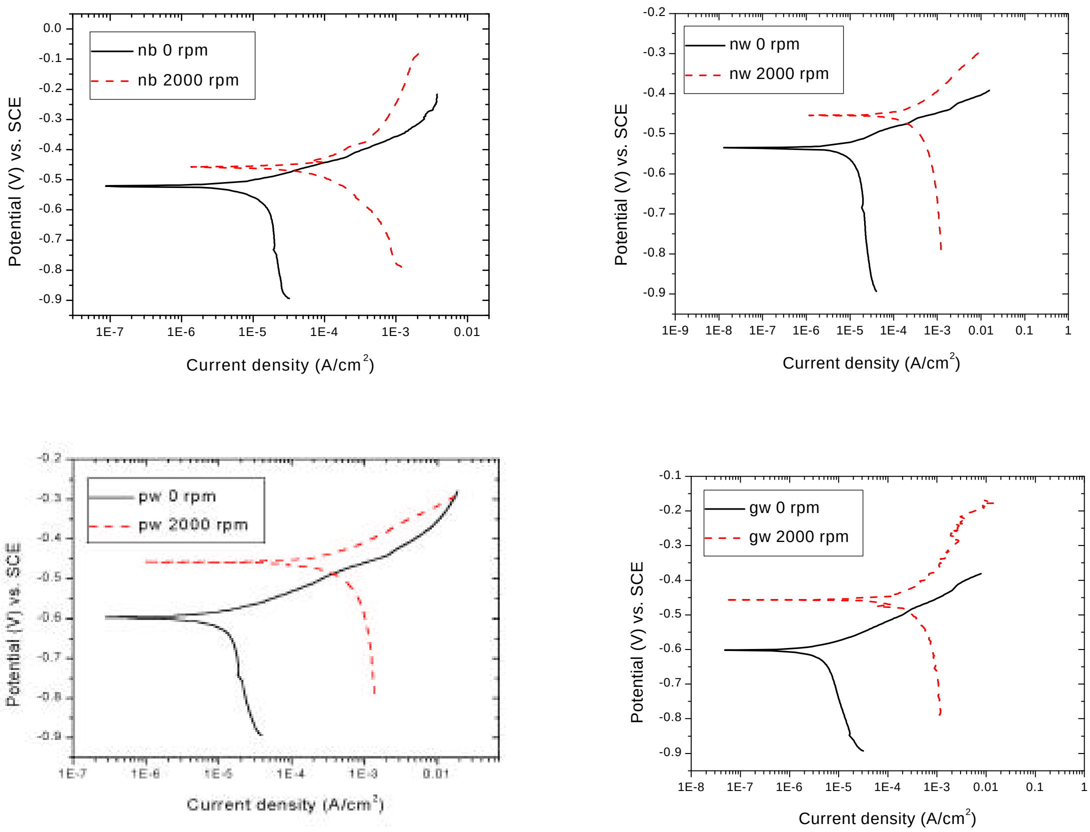
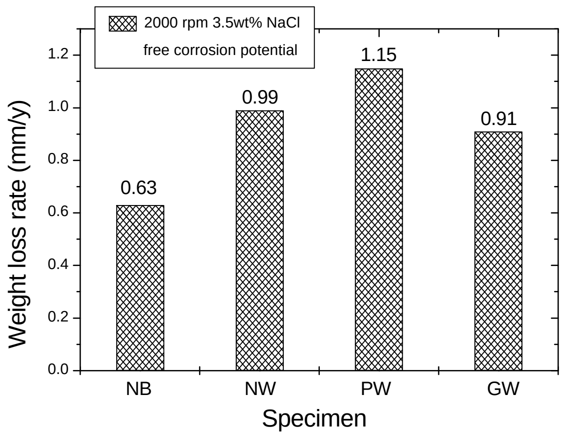


Fig. 4 Polarization curve of SA106 Gr.C steel in 3.5% NaCl solution

Table 2. corrosion current of SA106 Gr.C steel in 3.5% NaCl and PWR feedwater solution (A/cm^2)

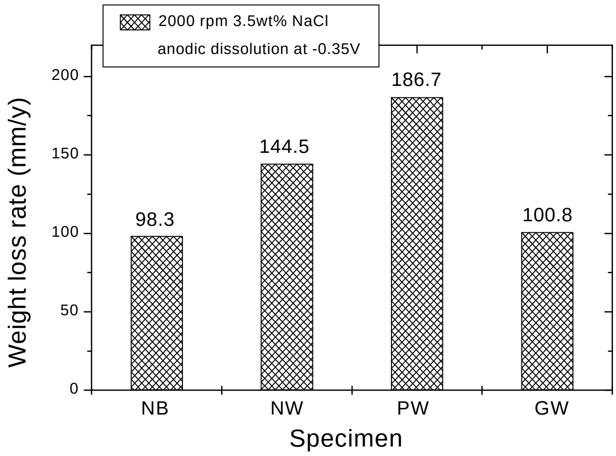
3.5% NaCl	NB	NW	PW	GW
0 rpm	4.93×10^{-6}	3.39×10^{-6}	4.95×10^{-6}	2.16×10^{-6}
2000 rpm	5.83×10^{-5}	1.16×10^{-4}	1.99×10^{-4}	6.03×10^{-5}

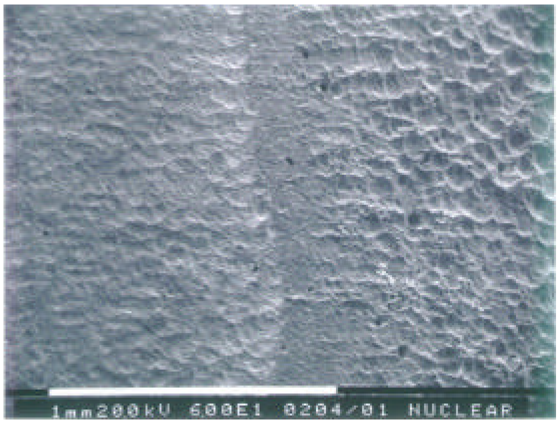
PWR	NB	NW	PW	GW
0 rpm	2.62×10^{-6}	4.20×10^{-6}	2.73×10^{-6}	1.74×10^{-6}
2000 rpm	2.77×10^{-6}	4.43×10^{-6}	4.09×10^{-6}	2.58×10^{-6}



(a) (b)

Fig. 5 (a) weight loss rate at free corrosion potential in 3.5% NaCl, (b) surface profile of corroded part of NW specimen after weight loss test of free corrosion condition (left : base metal, right : weld metal)





(a) (b)

Fig. 6 (a) weight loss rate at anodic dissolution results at -0.35V(SCE) in 3.5% NaCl (b) surface profile of corroded part of NW specimen after weight loss test at -0.35V (left : weld metal, right : base metal)

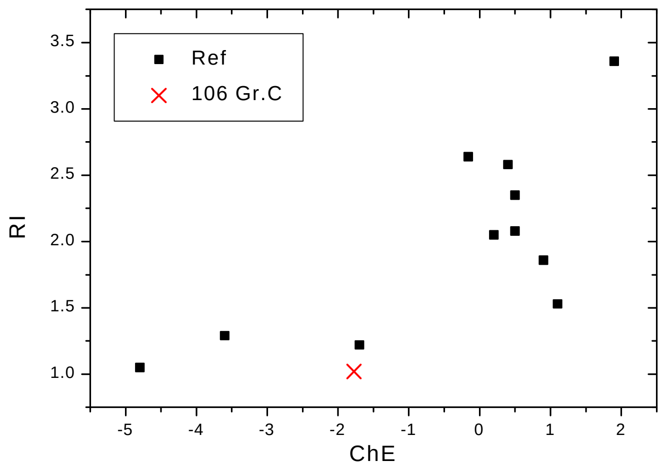


Fig. 7 Relationships between RI and ChE value