한국부식학회지
J. Corros Sci. Soc. of Korea
Vol. 27 No. 3, June, 1998
〈특별주제〉

토양에 매설된 이중보온 온수배관의 부식특성 연구

강 모 창 · 김 정 구
성균관대학교 금속공학과

A Study on Corrosion Characteristics of Thermally Insulated Underground Pipeline

M. C. Kang and J. G. Kim
Department of Metallurgical Engineering, Sung Kyun Kwan University

Corrosion failure of thermally insulated metallic surfaces has been attributed to water migration through the shrink sleeves at the joint. Immersion and polarization tests in synthetic ground water were performed to evaluate the mechanism and penetration rates of corrosion. Although the chlorides in insulation were leached out, the corrosion rates under insulated condition were much lower than those under uninsulated condition. This is due to the formation of protective scales which provide corrosion resistance. These results also showed that corrosion under insulation underwent active corrosion. Corrosion rates increased with increasing temperature, indicating degradation of insulation with tempaerature. X-ray diffractometry(XRD) and electron probe micro-analysis(EPMA) revealed that protective calcareous deposit($CaCO_3$) was formed on the metal surface under insulation.

Keywords : insulation, underground, ground water, calcium-carbonate($CaCO_3$), low-carbon steel.

1. 서 론

이중보온 온수배관은 지하에 매설되어 온수를 수송하는 열배관으로 강관, 단열재인 폴리우레탄 폼과 폴리에틸렌 외관으로 구성되어, 방식 및 보온효과가 크다. 그러나, 폴리에틸렌 외관이 손상되거나, 시공 시에 슬리브 부분의 불완전한 방수처리로 인하여, 지하수나 빗물 등의 수분이 침투하여 강관의 부식을 유발한다.

강관의 부식은 다양한 지중에서 이루어지는 부식환경, 즉 pH, 이온의 농도, 온도, 함수량, 비저항, 용존산소 및 미생물 등에 의해 좌우된다. 그리고, 매설 강관의 부식형태도 부식 메카니즘에 따라 균일부식, 점부식, 틈부식, 갈바닉부식 등 매우 다양하다. 부식환경의 비저항은 이온의 농도, 온도, 함수율, pH 등에 영향을 받는다.[1-7]

일반적, 단열재 하에서의 부식환경은 초기에는 전혀 문제가 되지 않을 정도로 경미하다고 할 수 있지만 조건(수분의 존재와 적당한 온도, 공기)이 충족되면, 시간의 경과와 함께 부식성은 점차로 증가하여 결국 치명적인 피해를 일으키는 부식환경으로 변한다. 강관은 물과 산소와 접촉되었을 때 부식이 된다. 강관의 부식은 온도, 산소에 의해 좌우된다. 산소가 없는 경우에

강관의 부식은 경미하다. 열린 시스템에서는 부식속도가 온도증가에 따라 증가하다가 특정의 온도부터는 감소한다. 이 온도에서부터는 용존 산소량이 감소하기 때문에 부식속도가 감소하는 것이다. 한편, 닫혀진 시스템에서는 산소가 새어나갈 수 없기 때문에 부식속도는 온도가 증가함에 따라 지속적으로 증가한다. 이중보온관의 부식에서는 단열재 자체가 부식을 유발하는 것이 아니라, 수분이 고일 수 있는 공간을 형성하는 것이다. 또한, 단열재는 물 또는 증기가 새어나가는 것을 방해하기 때문에 부식을 촉진하는 것이다. 단열재의 모든 물성 중에 부식을 가속화하는 요인은 함유된 Cl^-량 및 흡수성이다. 즉, 단열재내의 염분이 외부에서의 수분침투로 용출되어 금속표면에서 수분의 증발에 의해 농축되면 부식을 가속화하는 것이다.[7-9]

사용환경의 부식인자를 정량화하고, 화학적, 전기화학적, 그리고 야금학적 방법으로 부식특성을 규명하여, 현재 사용 중인 열배관의 정확한 수명을 예측하고, 단열재의 절연저항, 함수율, 부식속도와의 관계를 정량화하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험방법

2.1 시 편

본 연구에 사용된 시편은 배관용 아크용접 탄소강 SPW400으로 직경 700mm, 두께 8.7mm이며, 화학조성 및 기계적 특성을 Table 1에 나타내었다.[10,11] 경질 우레탄 폼 보온재는 폴리이소시아네이트, 폴리올 및 발포제를 주제로 하여 발포성형한 보온재로 특성은 Table 2에 나타내었다 (KS M3809). 재료의 용접은 Table 3의 용접작업표준서에 의거한다.

2.2 부식환경의 정량화

열배관 매설지역 토양 및 침출수를 채취하여 화학성분 중에 부식인자, 즉 pH, 비저항, 용존산소, 함수량, 가용성 염의 농도 등을 여러가지 방법으로 분석하였다.[12-17] Table 4의 분석결과를 근거로 실험용 부식용액을 제조하였다. 인공 침출수의 화학조성은 Table 5에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition(wt.%) and properties fo SPW 400

Fe	C	P	S	tensile strengt h(N/mm^2)	yield strengh t(N/mm^2)	% elongation
bal.	≤0.25	≤0.040	≤0.040	≥400	≥225	≥18

Table 2. Properties of polyurethane rigid foam

density (kg/m^3)	thermal conductivity (kcal/m.h.℃)	bending strength (N/cm^2)	compressive strength (N/cm^2)	water absorption(g/cm^2)
≤25-45	≤0.021-0.022	≥15-35	≥10-30	≥3.0

Table 3. Welding procedure specification

welding process	GTAW+WMAW
joint design	single-V joint with a 60-deg included angle and a 1.6-mm root face
electrode	GTAW ER70S-G (6mm dia), SMAW E7016H (3.2mm dia.)
voltage	GTAW : 12-15V, SMAW : 20-27V
current	GTAW : 100-180A, SMAW : 140-250A
polarity	GTAW : DCSP, SMAW : AC
travel speed	GTAW : 20-30cm/min, SMAW : 20-40cm
welding atmosphere /min	argon, 15-25L/min

2.3 우레탄폼의 함수량 측정[18]

시간에 따른 우레탄 폼의 함수량을 측정하기 위해 우레탄 폼을 100×100×25(t) mm의 크기로 절단한 후에 표면은 SiC paper로 600grit까지 연마하였다. 한국공업규격(KS M3809)에 따라 80℃에서 30분간 오븐에서 건조 후 인공 침출수에 침지하여, 24시간마다 10일간 흡수량을 0.1mg까지 측정하였다. 흡수량은 다음 식을 이용하여,

Table 4. The analysis of soil and ground water

	W.S. CO_3^{-2}	W.S. HCO_3^-	Ca	Mg	Na	W.S. Cl^-	W.S. NO_3^-	W.S. SO_4^{-2}	pH	dissolved oxygen	resistivity
1	≤0.001	0.05	0.60-1.49	0.66	0.60	≤1.0	≤1.0	33.0	7.8	15.9	4.90
2	≤0.001	0.03	0.23	0.37	0.49	3.2	2.6	29.8	5.6	15.4	1.99
3	≤0.001	0.06	0.26	0.27	0.54	6.7	≤1.0	29.5	7	11.1	2.41
4	≤0.001	0.03	0.0048	0.0007	0.0032	44.1	17.4	43.6	6.9	4.5	2.16
5	≤0.001	0.02	0.0023	0.0005	0.0037	30.6	9.3	44.6	6.7	5.8	2.88
unit	wt%					mg/kg(ppm)				ppm	kΩcm
	WET	WET	ICP	ICP	AAS	I.C					

흡수량 (g/100cm^3) $\frac{B\text{-}C}{\text{표면적}} \times 100$

표면적 100cm^2 당 흡수하는 물의 질량(g)으로 표시하였으며, 여기서, B는 흡수후의 질량(g), C 는 기준질량(g) 이다. 단, 침지 중 우레탄에서의 손실은 없다고 가정했다.

2.4 비저항측정[19-21]

함수량에 따른 비저항 측정을 위해 시편을 예리한 칼로 50×20×10(t)mm으로 잘라낸 후 표면은 SiC paper로 600grit까지 연마하였다. 우레탄 폼을 80℃ 오븐에서 30분간 건조 후 인공침출수에 담그고 24시간 단위로 각각 다른 시편을 이용하여, 비저항을 측정하였다. 온도항의 보정을 위해 상온에서 측정된 비저항값을 Boltzman 이론을 바탕으로, 입자의 열동요라는 개념에서 절대온도에 따른 Arrhenius식에 의해 각 온도에서의 비저항값으로 환산하였다.

2.5 침지시험[22-24]

용접부가 중심에 위치한 50×20×5(t)mm크기의 시편을 600-grit까지 연마한 후 볼트 및 너트를 사용하여 260g$_f$·cm의 일정한 힘으로 우레탄 폼을 물리적으로 결합하였다.(Fig. 1) 인공침출수에 25, 50, 65, 80, 95℃에서 200시간동안 침지시켰다. 시편의 전처리로는 초음파 세척기에서 5분간 메탄올을 이용하여 세척한 다음, 열풍 건조 후 80℃ 오븐에서 30분간 건조하였고,

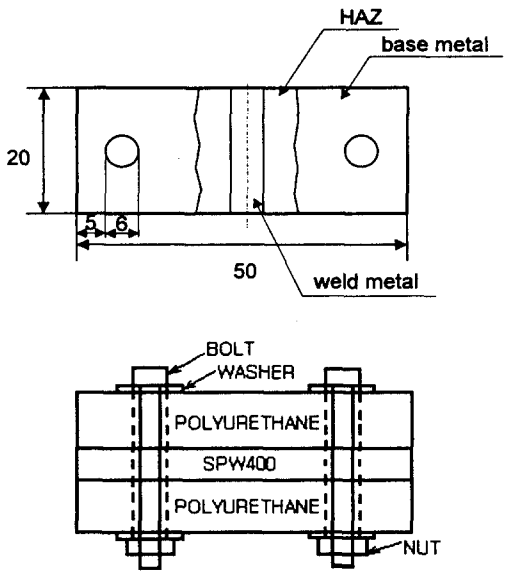

Fig. 1. Schematic diagram of specimen.

시편 후처리로는 산화부착물 제거를 위해 세정액(500mL HCl+3.5g hexamethylene-tetramine에 증류수로 1000mL를 만든다)에 1분간 처리한 다음, 5분간 초음파세척하고, 열풍건조 후 80℃ 오븐에서 30분간 건조하였다. 질량손실은 precision balance를 이용하여 0.1mg까지 측정하였다.

2.6 우레탄 폼의 열화 및 용출시험

시편을 20×20×50(t)mm 크기로 절단한 후에 인공 제조된 용액에 220시간동안 25, 50, 65, 80, 95℃로 침지하였다. 시험 후에 80℃ 오

본에서 30분간 건조하여 0.1mg 까지 무게를 측정하였다. 또한, 우레탄 폼으로부터 용출되는 염소이온의 용출량을 측정하기 위해 시편을 30×30×140mm의 크기로 자른 후 50×20×5(t)mm로 준비된 SPW400 base metal을 부착시킨 후 80℃, 1ℓ의 초순수 및 인공 침출수에서 10일 동안 침지시켜 Cl^- 이온의 농도와 pH의 변화를 관찰하였다.[9]

2.7 분극시험[7,25,26]

50×20×5(t)mm (dia. 700mm, t. 8.7mm 관채취)로 준비된 시편을 dia. 2.4mm로 전극을 연결할 수 있는 구멍을 내고, 우레탄 폼과 물리적 결합을 위해 dia. 6mm로 구멍을 내어 600-grit SiC paper로 연마한 후, 용접부를 남겨둔 채, 페인팅 한 후 24시간 상온에서 건조하였다. 이후 건조된 시편에 50×20×10(t)mm으로 준비한 우레탄 폼에 5mm로 구멍을 낸 후 볼트와 너트를 이용하여, 260g_f·cm의 힘으로 우레탄 폼을 물리적으로 접합하여 시편을 준비하였다. 포화감홍 참고전극(SCE reference electrode)은 염다리를 이용하여 우레탄 폼에 약 8mm 깊이로 장착하였으며, 일정 온도를 유지한 채, 용액의 변화를 막기 위해 cell상부에 reflux condenser를 장착하여 냉각수를 흘려 보냈다. 용액은 실험실에서 조제한 인공 침출수를 이용하였다.

2.8 미세조직관찰 및 표면분석

시편을 절단하여 0.01㎛까지 Al_2O_3 powder로 연마한 다음 Nital(15mL HCl, 5mL HNO_3, 100mL H_2O)로 에칭하여 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

시편 (11년간 사용된 dia 600mm, t 6.4mm 강관)에 대해, 메탄올과 cotton ball을 통해 세척 후, 표면 및 단면을 SEM과 EPMA를 이용하여 표면층의 형상 및 화학조성을 관찰하였다. 시편의 표면에 생성된 표면층의 화학조성을 XRD로 분석하였다.

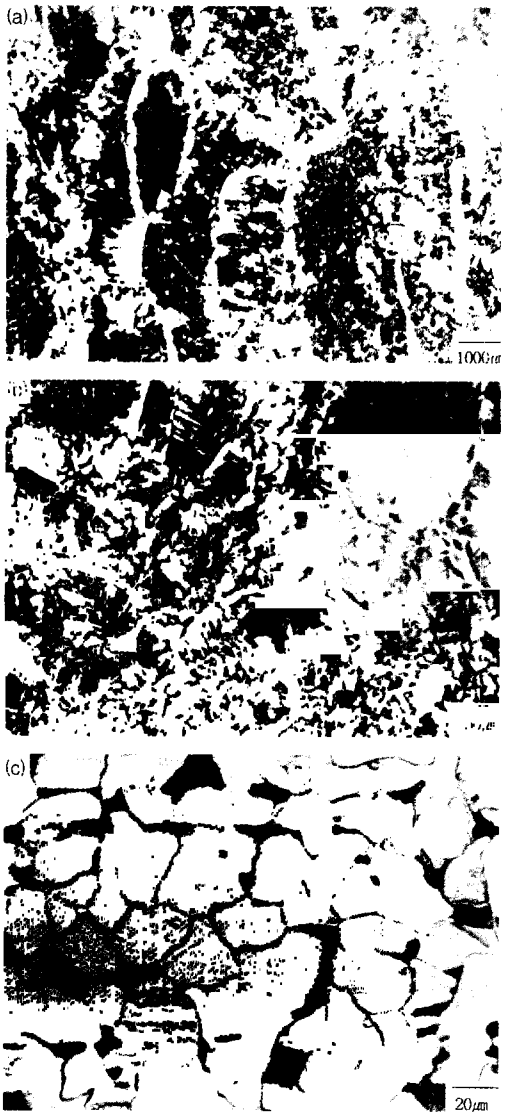

Fig. 2. Microstructures of welded SPW400 (a) fusion zone (b) HAZ (c) base metal.

3. 결과 및 고찰

미세조직의 관찰에서 모재부는 페라이트 조직(흰부분)과 펄라이트 조직(검은부분)으로 구성되어 있다(Fig. 2). 용착부는 오스테나이트 입계에 초석 페라이트가 석출한 조직이다. 용융선과

Fig. 3. SEM micrograph of surface exposed for 11 years.

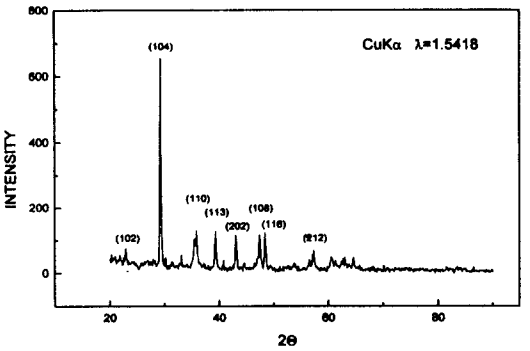

Fig. 4. XRD spectra of a surface exposed for 11 years.

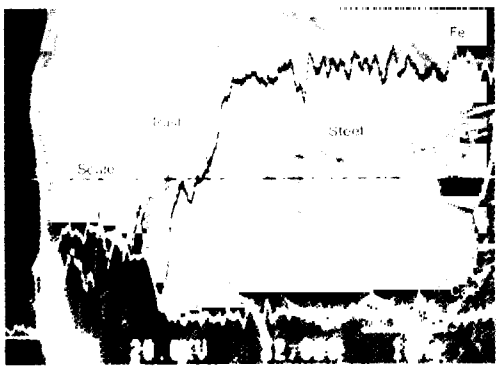

Fig. 5. EPMA image of surface layer exposed for 11 years.

인접한 열영향부에서는 베이나이트, 미세 펄라이트, 그리고 페라이트 조직이 나타나고 있다. 전체적으로 용접결함이 관찰되지 않은 양호한 용접조직을 갖고 있다.

Fig. 3은 11년간 매설되었던 이중 보온관의 SEM image이다. 표면박리가 없는 조밀하고, 용착된 입자들로 구성된 부식생성물이 관찰되었다. Fig. 4에는 표면에 생성된 부식층을 XRD로 분석한 결과로 $CaCO_3$임이 확인되었다. Fig. 5는 단면의 EPMA image로 Ca와 Fe의 line-profile 결과이다. 두 층으로 구성되어 있는데, 외층은 탄산칼슘층이고 내층은 녹층이다. 탄산칼슘의 석출경향을 saturation index(SI)로 나타낸다.[4,27]

$$SI = pH-\{[-\log_{10}(H^+)(CO_3^{2-})/(HCO_3^-)]+[\log_{10}(Ca^{2+})(CO_3^{2-})]$$

$$-[\log_{10}(Ca^{2+})-[\log_{10}(2(CO_3^{-2})+(HCO_3^-)+(OH^-)]]\}$$

saturation index(SI)는 다음과 같이 나눌 수 있다.

1. SI>0, oversaturated with respective to $CaCO_3$, protective film of $CaCO_3$ forms.
2. SI=0, in equilibrium
3. SI<0, undersaturation with respective to $CaCO_3$, corrosive

물속의 이산화탄소는 탄산을 만들고, 수소이온과 탄산수소이온으로 분리된다($CO_2+H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$). 칼슘이온과 탄산수소이온이 반응하여 불용성 탄산칼슘을 표면에 형성한다($Ca^{2+}+2HCO_3^- \rightarrow Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3+CO_2+H_2O$). 이 피막은 용존산소의 환원반응을 방해하여 부식을 억제하는 역할을 할 수 있다. 각 온도별로 인공 침출수를 이용하여, 24시간 방치 후 SI를 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. SI는 온도가 증가함에 따라 증가하여 95℃에서는 SI=+2가 되어 scale성이 강함을 나타낸다.

Fig. 7에는 25, 50, 65, 80, 95℃에서 우레탄폼을 부착한 경우와 부착하지 않은 침지시험 결과를 나타내었다. 부식속도는 온도증가에 따라

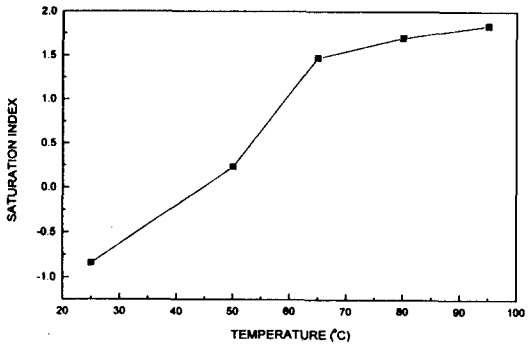

Fig. 6. Effect of temperature on saturation index.

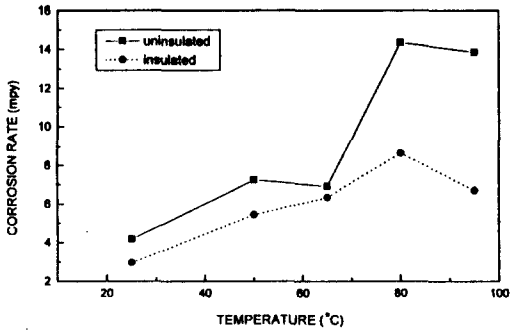

Fig. 7. Effect of temperature on corrosion rates under uninsulated and insulated SPW400.

증가하다가 85℃를 넘으면서 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 온도가 증가함에 따라 용존 산소량이 감소하고 앞서 밝힌 바와 같이 SI값이 커지기 때문이다.(Fig. 8) 일반적인 경우에는 강관과 단열재 사이의 틈내부와 외부간의 금속이온 및 산소농도차에 의해 틈부식이 발생한다. 즉, 틈내부의 산소가 환원반응($O_2+2H_2O+4e\rightarrow 4OH^-$)으로 소모되면 금속의 산화반응($Fe\rightarrow Fe^{2+}+2e$)만이 틈내부에서 진행되어 금속양이온 농도가 증가한다. 따라서, 전기적인 균형을 유지하기 위해 틈외부의 염소이온이 틈내로 이동하여 전기적으로 중성이 된다. 이것이 수화하여 불용성 수산화물과 산을 발생시킨다($Fe^{2+}+2Cl^-+2H_2O\rightarrow Fe(OH)_2+2H^++2Cl^-$). 이러한 수소이온과 염소이온은 금속부식을 가속화한다.[28] 그러나, 우레탄 폼을 부착한 시편의 부식속도가 부

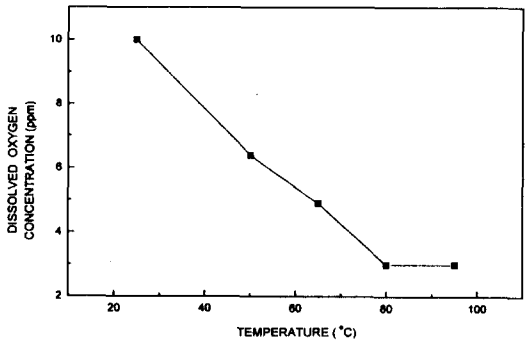

Fig. 8. Effect of temperature on dissolved oxygen concentration.

착하지 않은 경우보다 부식속도가 더 낮게 나타났다. 이것은 틈부식의 원인인 틈내부와 외부의 산소농도차가 크지 않아 농도차전지를 형성하기 어렵기 때문으로 사료된다. 그리고 Fig. 1의 우레탄 폼을 부착한 침지시편을 보면 틈내부와 틈외부의 면적비가 커서 즉, 양극면적이 음극면적보다 크기 때문에 갈바닉 효과가 낮기 때문이라고 사료된다. 또한, 틈내부에 존재하는 정체된 용액의 농도가 시간이 경과 함에 따라 높아져서 SI값이 증가하게 되어 scale성이 되기 때문이라고 사료된다.

Fig. 9에 인공 침출수에서 온도에 따른 우레탄 폼의 열화정도를 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 질량손실이 증가한다. 우레탄 폼은 열경화성 수지이기 때문에 열화에 의해 다리결합이 파손되어 open-pore porosity를 증가시켜 수분흡수가 잘 되게 한다. 단열재내의 수분은 열전도를 쉽게 하여 열효율을 저하시키며, 금속과 단열재 사이에 정체된 수분으로 인해 틈부식을 발생시킬 수 있다.

우레탄 폼은 그 자체의 가수분해에 의해 사용중에 Cl^-을 생성하고 증류수에서는 pH를 저하시켜서 환경을 부식성으로 변화시킨다. 여기서 Cl^- 및 H^+의 생성원으로서는 우레탄을 난연화하기 위해 첨가한 TCEP[Tris 2-Chloro Ethyl Phophate, $(Cl\ CH_2CH_2\cdot O)_3P=O$]의 가수분해에 의한 것이 가장 유력하다. 또한, 그 반응은 철이

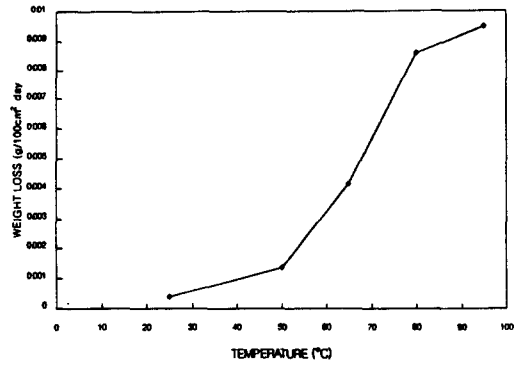

Fig. 9. Effect of temperature on PUR degradation.

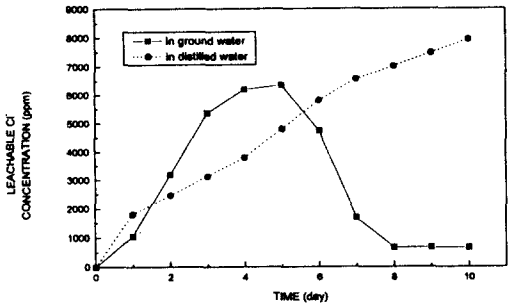

Fig. 10. Variation of soluble chloride containment in insulation with times.

온이 용매로서 작용하기 때문에 부식의 진행에 따라 Cl^-의 생성이 가속되는 경향이 있다. 우레탄 폼에 함유된 Cl^- 이온의 용출량을 측정하는 실험에서는 大久保勝夫의 경우[9]에서와 같이 증류수에서는 Cl^- 양의 증가를 볼 수 있으나, 인공침출수의 경우 증가하다 감소하는 모습을 보이며, pH의 경우에 있어서도 증류수에서는 조금 증가한 후 계속 감소하나, 인공침출수의 경우 계속 증가함을 볼 수 있다.(Fig. 10, 11) 이러한 현상은 인공 침출수의 경우, 반응 촉진을 위해 접합시킨 금속재 표면에 scale의 형성으로 부식반응이 억제되어 Cl^-의 생성이 저지되는 것으로 사료된다. Table 5에서 증류수에서의 SPW400의 질량감소가 인공 침출수에서 보다 큰 것을 알수 있다.

Fig. 12, 13은 80℃와 95℃에서 함수율에 따

Table 5. The analysis of synthetic ground water

$CaCl_2$	133.2mg/l
$MgSO_4\ 7H_2O$	59mg/l
$NaHCO_3$	208mg/l
H_2SO_4	85mg/l
HNO_3	22.2mg/l
pH	6.76
resistivity	1.736kΩcm

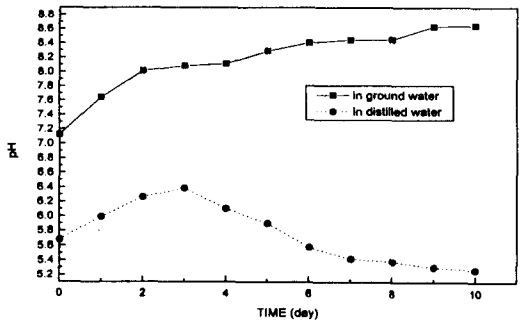

Fig. 11. Variation of pH as a function of time.

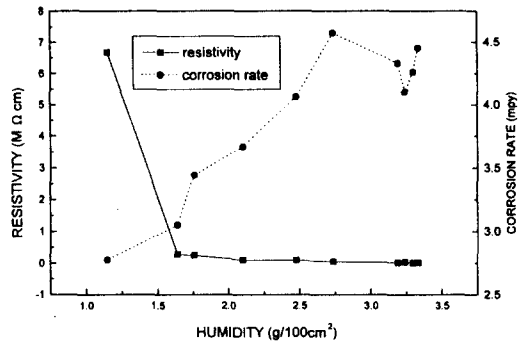

Fig. 12. Correlation of corrosion rates with humidity and resistivity at 80℃.

른 비저항 및 부식속도를 나타내었다. 포화함수량은 온도가 80℃에서 95℃로 증가함에 따라 약 3.3g/100cm²에서 11g/100cm²으로 높아진다. 비저항은 함수율이 증가함에 따라 감소하는 양상을 볼 수 있다. 80℃에서는 함수율이 증가함에 따라 부식속도는 증가하여 최고 4.5mpy까지 올라간다. 95℃에서는 함수량에 따라 부식속도는 변화를 보인다.

Fig. 14와 15는 25, 50, 65, 80, 95℃에서의

Table 6. Weight loss of insulated SPW400 in distilled water and ground water

	surface area (cm^2)	initial weight (g)	final weight (g)	weight loss (g/cm^2)
distilled water	188.03	55.9470	55.8352	5.9459×10^{-4}
ground water	192.69	56.3778	56.3054	3.7573×10^{-4}

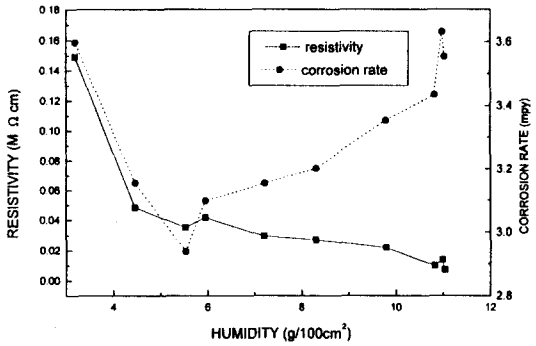

Fig. 13. Correlation of corrosion rates with humidity and resistivity at 95℃.

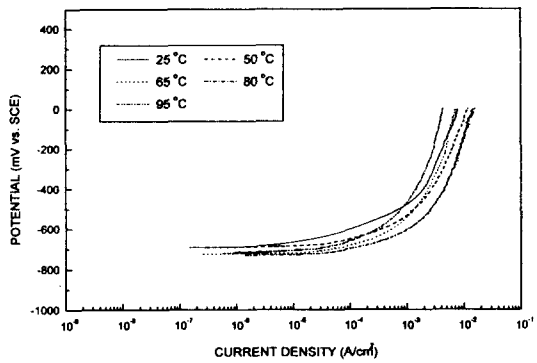

Fig. 14. Anodic polarization curves of uninsulated SPW400 after 10-day exposure.

10일간 침지 후에 우레탄 폼을 부착하지 않은 시편과 부착한 시편의 분극곡선을 보여 준다. 모두 전위가 증가함에 따라 부식이 가속화되는 활성화 부식거동을 나타낸다. Tafel 외삽법으로 측정한 부식속도 및 부식전위와의 관계를 Fig. 16에 나타내었다. 우레탄 폼을 부착한 시편의 부식속도는 1-3mpy이며 우레탄 폼을 부착하지 않은 시편의 부식속도는 6-19mpy이다. 또한, 우레탄 폼을 부착하지 않은 시편의 부식속도는 온도의 영향을 많이 받는다. 부식전위는 우레탄 폼을 부착한 경우에는 50℃까지는 감소하다가 급격히 증가하며, 우레탄 폼을 부착하지 않은 시편의 부식전위는 65℃까지 감소하다가 약간의 증가 경향이 나타난다.

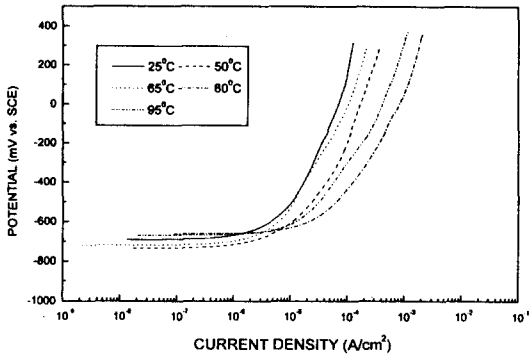

Fig. 15. Anodic polarization curves of insulated SPW400 after 10-day exposure.

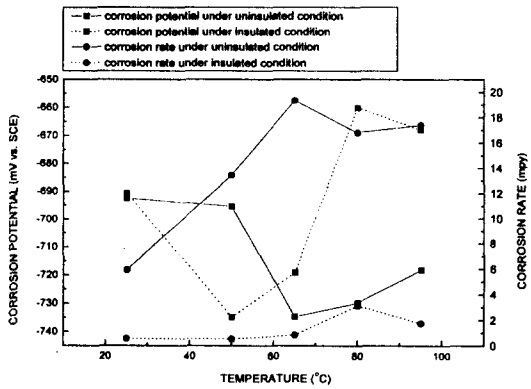

Fig. 16. Correlation between corrosion potential and corrosion rate under insulated and uninsulated conditions.

4. 결 론

1) 11년된 강관의 경우 부식성 분위기에서 사용되었으나, 표면에 보호성있는 $CaCO_3$층이 형성되어 부식상태가 양호하였다.

2) 침지시험에서는 온도가 올라갈수록 부식이 촉진됨을 보였으며, 80℃를 넘으면서, 용존 산소량이 줄어들어 부식속도가 감소함을 알 수 있다.

3) 침지시험 결과, 우레탄폼을 부착한 시편의 부식속도는 3-7mpy이고, 우레탄폼을 부착하지 않은 시편의 부식속도는 4-14mpy이었다. 분극시험 결과에서는 우레탄 폼을 부착한 시편의 부식속도는 1-3mpy이며, 우레탄 폼을 부착하지 않은 시편의 부식속도는 6-19mpy이었다.

4) 우레탄 폼을 부착한 시편의 부식속도가 부착하지 않은 경우보다 부식속도가 더 낮게 나타났다. 이것은 틈부식의 구동력인 틈내부와 외부의 산소농도차가 크지 않아서 농도차전지를 형성하기 어렵기 때문으로 사료된다.

5) 화학적 침지시험, 전기화학적 분극시험 결과로는 강관의 부식 형태는 균일부식 형태이다.

6) 우레탄폼은 온도가 증가함에 따라 열화정도도 증가한다.

7) 함수량과 비저항 및 부식속도 관계에서는, 함수량의 증가에 따라 금속의 부식속도는 증가하며, 비저항은 감소함을 알 수 있다.

References

1. M. Romanoff, Underground Corrosion, p. 149, NACE, Houston (1989).
2. G. Elsner, Corrosion Handbook, Vol. 2, p. 238, DECHEMA, Frankfurt (1988).
3. H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, p. 90, John Wiley & Sons, New York (1971).
4. D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, p. 360, Prentice Hall, New Jersey (1992).
5. D. H. Chun, Modern Corrosion Protection Engineering and Practice, p. 91, Dongwha Tech. (1995).
6. R. A. Gummow, Materials Performance, **32**, 21 (1993).
7. S. P. Pednekar, Innovative Ideas for Controlling the Decaying Infrastructure, p. 215, NACE, Houston (1995).
8. M. Okubo, Corrosion Protection Technology, **30**, 705 (1981).
9. M. Okubo, Corrosion Protection Treatment, **83**, 100 (1983).
10. KS D3583-1992, Korean Standards, Korean Society for Testing and Materials.
11. KS D3562-1989, Korean Standards, Korean Society for Testing and Materials.
12. J. R. Scully, K. J. Bundy, Materials Performance, **23**, 1084.
13. B. Bazzoni, L. Lazzari, Corrosion 96, Paper No. 202 (1996).
14. Annual Book of ASTM Standard, G51, Vol. 03. 02, PA (1992).
15. Annual Book of ASTM Standard, G57, Vol. 03. 02, PA (1992).
16. Annual Book of ASTM Standard, D2216, Vol. 03. 02, PA (1992).
17. Annual Book of ASTM Standard, D512, Vol. 03. 02, PA (1992).
18. Process Testing, Dept. of Environment, p. 403, Dongwha Tech. (1997).
19. W. H. Hayt, Engineering Electromagnetics, p. 114, McGraw-Hill, New York (1989).
20. Annual Book of ASTM Standard, D618, Vol. 03. 02, PA (1992).
21. Annual Book of ASTM Standard, D257, Vol. 03. 02, PA (1992).
22. Annual Book of ASTM Standard, G1, Vol. 03. 02, PA (1992).
23. Annual Book of ASTM Standard, G31, Vol. 03. 02, PA (1992).
24. Annual Book of ASTM Standard, G78, Vol. 03. 02, PA (1992).
25. Annual Book of ASTM Standard, G5, Vol. 03. 02, PA (1992).
26. Annual Book of ASTM Standard, G102, Vol. 03. 02, PA (1992).
27. R.S. Treseder, C. G. Munger, NACE Corrosion Engineer's Reference Book, p. 96, NACE, Houston (1991)
28. M. G. Fontana, Corrosion Engineering, p. 51, McGraw-Hill, New York (1978).