

이중보온관 부식감지선의 응력부식파괴에 관한 연구

최윤제·김정구[†]

성균관대학교 공과대학 금속재료공학부

A study on Stress Corrosion Cracking of Sensor Wire in Thermally Insulated Underground Pipeline

Yoon-Je Choi and Jung-Gu Kim[†]

Department of Advanced Materials Engineering, SungKyunKwan University, 300
Chunchun-Dong, Jangan-Gu, Suwon 440-746

(2001년 8월 8일 받음, 2002년 1월 16일 최종수정본 받음)

Abstract The thermally insulated underground pipelines have been used for district heating system. The sensor wire embedded in the insulation was used for monitoring the insulating resistance between the sensor wire and the pipe. The resistance measurement system detects corrosion of steel pipe under insulation. The corrosion and stress corrosion cracking(SCC) characteristics of sensor wire in synthetic ground water were investigated using the electrochemical methods and constant load SCC tests. The polarization tests were used to study the electrochemical behavior of sensor wire. The sensor wire was passivated at temperatures ranging from 25 to 95°C. However, the applied sensing current larger than passive current resulted in breakdown of passive film. The constant load SCC tests were performed to investigate the effects of applied current and load on the fracture behavior. Stress-corrosion cracks initiated at pits that were produced by sensing current. The growth of the pit involves a tunnelling mechanism, which leads to ductile fracture.

Key words : Sensor wire, Thermally insulated pipeline, Insulation, Stress corrosion cracking

1. 서 론

최근 들어 신도시나 대형 아파트 단지의 난방 시스템이 지역난방으로 설치 혹은 교체되고 있다. 지역난방은 80~120°C의 물을 토양에 매설된 이중보온관을 통하여 아파트 단지 내에 공급하여 난방을 하는 방식으로써 이중보온관은 온수 이송체로써의 강관, 단열을 목적으로 한 폴리우레탄 폼과 단열재를 보호하기 위한 폴리에틸렌 외관으로 구성되어 있어, 방식 및 보온 효과가 크다. 그러나 폴리에틸렌 외관이 손상되거나, 시공시 슬리브 부분의 불완전한 방수처리에 의해 지하수나 빗물 등의 수분이 침투하여 강관의 부식을 유발한다.

이와 같이 지하에 매설된 이중보온관의 상시점검이 용이하지 않기 때문에 열배관 시스템에서 배관 손상으로 인한 에너지 손실을 방지하고 내부 온수의 유출 및 외부수의 유입에 의한 강관부식을 조기에 발견하여 열 배관의 수명연장을 위해 열배관 감지 시스템을 설치한다. 단열재 내에 감지선을 설치하여 단열재의 함수율에 따른 절연저항 값을 측정함으로써 열배관의 부식상태 및 손상지점을 감지하고 있다. 감지선은 단열재 내의 수분에 의해 부식환경에 노출되어 있고 온도변화에 의한 열응력 및 시공시 잔류하는 응력을 받

는다. 또한 절연저항을 측정하기 위한 감지전류에 의해 감지선은 강관에 대하여 양극으로 작용하여 부식이 가속화될 가능성이 크다.

감지선은 내식성이 좋은 재료로써 부동태 피막을 형성하는 재료이다. 그러나 공식이 발생하면 항시 응력을 받고 있는 감지선은 응력부식균열에 의해 수명이 급격히 감소할 수 있다. 응력부식균열은 전기화학적 부식, 기계적 또는 열적 응력, 그리고 금속 재료의 민감성이 상호 작용하여 상승효과로 인한 균열성장으로 재료의 수명을 단축시키는 현상이다.¹⁾ 응력부식균열은 특정 부식환경에서 금속의 연성 감소와 관련이 있기 때문에 일반적으로 연성과파괴를 나타내는 금속일지라도 부식 분위기하에서는 취성과파괴를 나타내어 예기치 않은 사고를 일으킨다.²⁾ 응력에 의한 부동태 피막의 기계적인 파괴나 공식(pitting corrosion)으로 인한 전기화학적인 파괴는 급속한 양극용해를 유발한다. 양극용해로 인한 작은 부식터널이 슬립단에 미세하게 배열되면 응력이 집중하여 부식터널의 직경 및 길이가 성장하게 된다.³⁾ 부식터널의 성장은 연성변형 및 파괴를 일으키며, 균열이 부식터널의 성장과 연성과파괴의 반복적인 과정에 의해 진행된다. 공식은 이러한 부식터널의 역할을 한다. 뿐만 아니라 공식이 존재함으로써 균열이 생성, 전파하는데 필요한 임계응력

[†] E-mail: kimjg@yurim.skku.ac.kr

Table 1. The analyses 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	KΩ cm
	WET	WET	ICP	ICP	AAS	IC					

이 감소되어진다. 이것은 공식의 기저부분에 응력의 집중이 일어나기 때문이다.⁴⁾ 균열의 성장은 균열 내부와 외부의 이온농도차로 인한 자기촉매 (autocatalytic) 작용 및 갈바닉 부식으로 가속화된다.^{5,6)} 공식의 생성 및 성장 시에 전위의 변화를 관찰함으로써 공식의 진행정도를 예측할 수 있다. 공식이 생성될 때, 전위는 급격하게 감소하고 감소된 전위가 유지되고 있는 경우 공식은 성장한다. 재부동태가 진행되면 전위는 다시 상승한다.⁷⁾

최근 감지선의 단선으로 인하여 감지시스템의 작동을 방해하는 사례가 늘고 있다. 따라서 환경요인, 즉 응력, 감지전류 등에 따른 부식특성을 평가하여 단선 방지대책을 제시한다.

2. 실험 방법

2.1. 부식환경 정량화

열배관 매설지역 토양 및 침출수의 부식인자, 즉 pH, 비저항, 용존산소, 함수량, 염분농도 등을 정량화하였다 (Table 1).⁹⁻¹³⁾ Table 1을 바탕으로 제조한 인공 침출수의 조성은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1에는 열배관 감지시스템의 전기회로를 나타내었다. 배관과 감지선 사이에 발생하는 절연저항을 통하여 전류를 측정하여 수분침투 및 누수정도를 감지한다. 전류의 분포를 위치 및 절연저항에 따라 다음식을 이용하여 산출하였다 (Table 3).

$$I_T = \frac{V}{R_T} \quad R_T = R_{s1} + \frac{R_{s2} \cdot R_p}{R_{s2} + R_p} \quad I_p = \left(\frac{R_{s2}}{R_{s2} + R_p} \right) \times I_T \quad (1)$$

I_T : total current, R_T : total resistance

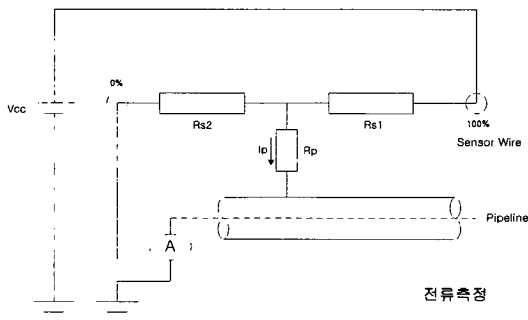


Fig. 1. Schematic circuit for the corrosion detection system.

Table 2. Characteristics of synthetic ground water

CaCl ₂	133.2mg/ℓ
MgSO ₄ · 7H ₂ O	59mg/ℓ
NaHCO ₃	208mg/ℓ
H ₂ SO ₄	85mg/ℓ
HNO ₃	22.2mg/ℓ
pH	6.8
resistivity	1.736KΩ cm
S.I.(saturation index)	-0.4

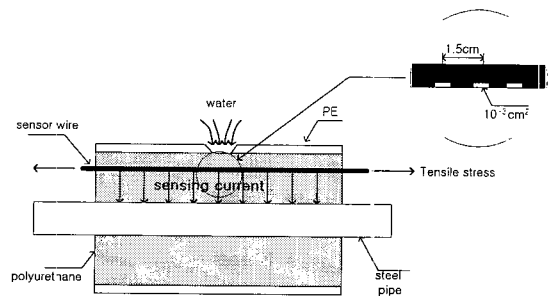


Fig. 2. Schematic diagram of preinsulated pipeline and sensing system.

감지시스템의 회로를 분석해보면 회로에 흐르는 감지전류에 의하여 감지선은 양극으로 작용하고 강관은 음극으로 작용하게 된다 (Fig. 2). 따라서, 감지선은 양극용해로 인하여 부식이 가속화될 가능성이 크다.

2.2. 분극시험

본 연구에 사용된 감지선은 직경 0.5mm의 니크롬선 (bal. Ni-19.4% Cr-1.32% Si-0.57% Fe-0.27% Mn)이다. 감지선의 피복을 제거한 후에 노출길이 150×0.5(∅)mm의 나선모양으로 성형하여 사용하였다.⁸⁾ 노출부를 제외한 표면은 에폭시로 피복하였다. 시편의 전기화학적 분극은 EG & G 273A potentiostat를 사용하였다 (Fig. 3). 주사속도는 0.166mV/s로 하였고, 상대전극은 탄소봉을, 기준전극으로는 포화감홍전극을 사용하였다. 인공 침출수 분위기에서 20℃, 50℃, 65℃, 80℃, 95℃의 온도에서 분극시험을 행하였다.

Table 3. Current values(A) at various distance(m) and resistance(Ω)

resistance(Ω) distance(m)	200000 Ω	100000 Ω	50000 Ω	10000 Ω	5000 Ω
100m	4.0398E-05	8.0594E-05	1.6038E-04	7.7113E-04	1.4717E-03
200m	3.5839E-05	7.1361E-05	1.4146E-04	6.6079E-04	1.2212E-03
300m	3.1316E-05	6.2268E-05	1.2310E-04	5.6371E-04	1.0201E-03
400m	2.6820E-05	5.3284E-05	1.0517E-04	4.7602E-04	8.5120E-04
500m	2.2344E-05	4.4379E-05	8.7549E-05	3.9474E-04	7.0313E-04
600m	1.7880E-05	3.5523E-05	7.0115E-05	3.1735E-04	5.6747E-04
700m	1.3421E-05	2.6686E-05	5.2759E-05	2.4159E-04	4.3718E-04
800m	8.9599E-06	1.7840E-05	3.5366E-05	1.6520E-04	3.0529E-04
900m	4.4887E-06	8.9549E-06	1.7820E-05	8.5682E-05	1.6352E-04
1000m	0	0	0	0	0

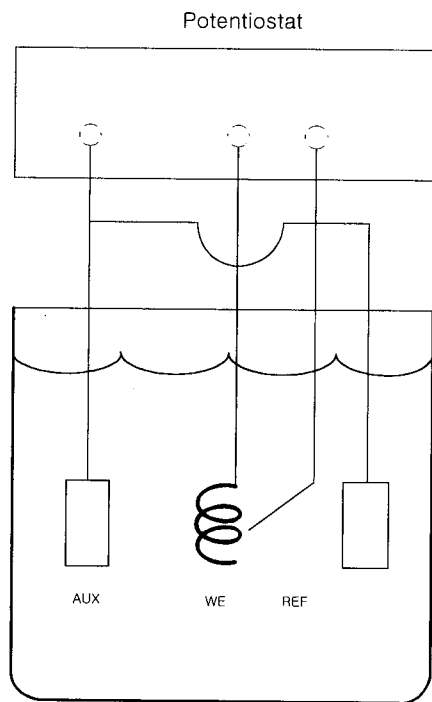


Fig. 3. Schematic polarization test system.

2.3. 인장시험

인장시험은 Instron을 사용하여 crosshead speed 10mm/min로 gauge length 25mm인 감지선을 시험하였다.

2.4. 일정하중 응력부식시험

일정하중 응력부식균열 시험은 장치가 단순하고 실제 사용환경에 대한 응력부식이 일어나지 않는 최대 허용 응력을 구할 수 있고 아울러 구조물의 수명을 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한 파괴까지의 시간을 정량적으로 비교가 가능한 이점이 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 일정하중에서 파단까지 소요되는 시간을 측정하여 응력부식균열에 대한 저항성을 평가하였다. 부과하중에 대하여 시편에는 1:1의 하중이 부과되며 파단과 동시에 타이머가 작동되어 파단시간을 측정할 수 있도록 하였다 (Fig. 4). 시편은 감지선의 노출부

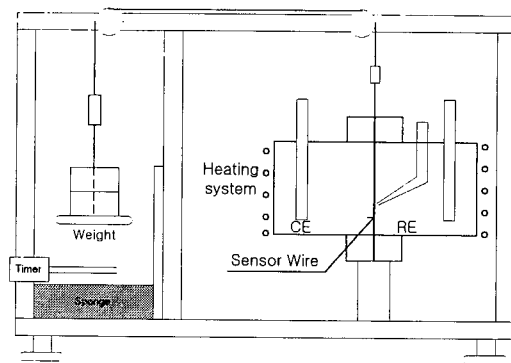


Fig. 4. Schematic of the apparatus for constant load testing.

1개를 (노출면적 $10^{-3}cm^2$) 제외한 부분은 에폭시로 코팅을 하였다. 부식조에는 고순도 탄소봉을 상대전극으로 사용하여 전류를 인가하였고 포화감홍 기준전극으로 전위를 측정하였다. 온도는 온도조절기와 센서를 사용하여 $80^{\circ}C$ 로 유지하였고 시험기간 동안 용액의 농도변화를 최소화하기 위하여 응축기를 부착하였다. 응력은 항복강도의 30, 50, 70, 90%의 일정하중을 시편에 적용하여 인가전류에 따른 파단시간을 측정하였다. 시험 후 파단면을 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부식특성

침출수 분위기에서 온도 변화에 따른 감지선의 부식거동을 분극시험을 수행하여 평가하였다 (Fig. 5). 감지선은 온도변화와 상관없이 부동태 거동을 보이고 있으며, 0.05mpy 이하의 낮은 부식속도를 나타낸다 (Table 4). 그러나 온도증가에 따라 공식전위 (pitting initiation potential)는 감소하였다 (Fig. 6). 즉, 감지선은 온도증가에 따라 부동태 피막의 불안정에 의해 공식에 더 민감해짐을 알 수 있다. 특히, 감지선에 인가되는 전류값이 부동태형성 전류밀도값 ($1\mu A/cm^2$) 이상일 때 공식에 매우 민감해진다. Fig. 7에서 보면 부동태 형성 전류밀도 $i_{app}(ii)$ 에서는 표면에 부동태 피막을 형성하여 공식에 대한 민감도가 전혀 없다. (양극

Table 4. Results of corrosion rate measurement by Tafel extrapolation

온도(°C)	부식속도(mipy)
25	9.3×10^{-3}
50	2.4×10^{-2}
65	1.3×10^{-2}
80	3.5×10^{-2}
95	4.6×10^{-2}

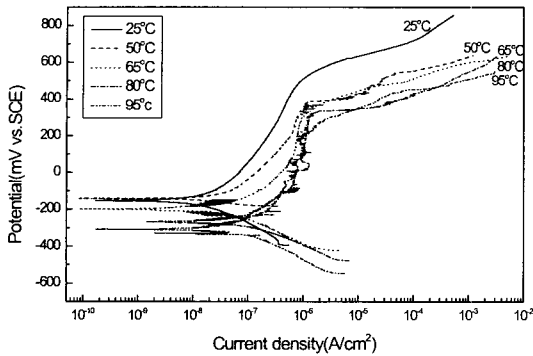


Fig. 5. Potentiodynamic curves of sensor wire in synthetic ground water.

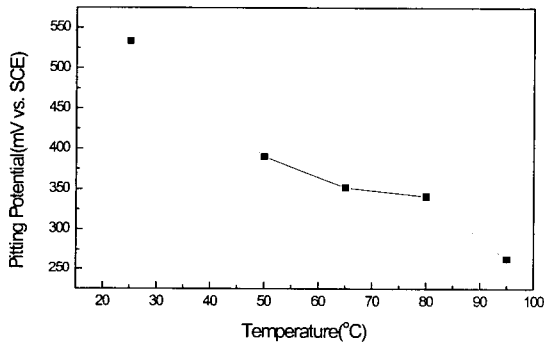


Fig. 6. Effect of temperature on pitting potential.

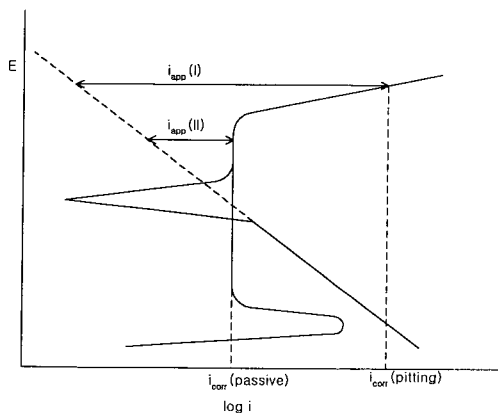


Fig. 7. Schematic diagram showing anodic protection range and pitting range.

방식효과)¹⁵⁾ 그러나 인가전류밀도가 $i_{app}(i)$ 으로 증가하면 공식전위보다 높아져서 공식이 발생하여 전파된다. SEM

Table 5. Mechanical properties of sensor wire

Tensile Strength (MPa/mm²)	Yield Strength (MPa/mm²)	% Elongation
858	507	30.7%



Fig. 8. SEM photograph showing pitting on sensor wire after anodic polarization test in synthetic ground water at 80°C.

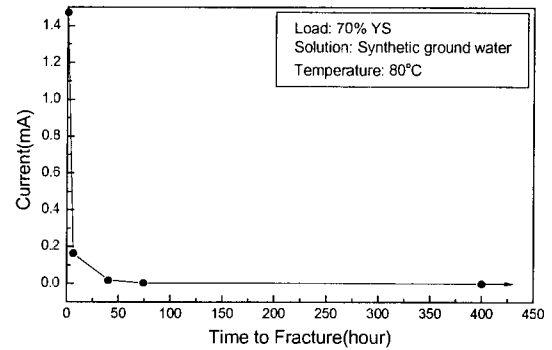


Fig. 9. Applied current vs. time to fracture at an applied of 70% yield stress.

을 통하여 시험시편의 표면을 관찰한 결과, 공식이 관찰되었다(Fig. 8).

3.2. 인장특성

응력부식균열 시험에 앞서, 감지선의 인장시험을 수행하여 기계적 특성을 평가하였다(Table 5). 항복강도는 507MPa/mm²이며, 연신율은 30.7%로 연성이 우수한 재료이다.

3.3. 응력부식균열특성

80°C의 침출수 분위기에서 항복강도의 70%의 정하중을 부과하고 인가전류를 변화시키면서 파단시간을 측정하였다. 인가된 전류값은 $1.5 \times 10^{-3}A$, $1.6 \times 10^{-4}A$, $1.8 \times 10^{-5}A$, $4.5 \times 10^{-6}A$ 이다. 그 결과 인가전류량에 비례하여 파단시간이 단축되었다(Fig. 9). 인가전류값이 0일 때는 400시간이 지나도 파단이 일어나지 않았다. 하중의 영향을 알아보기 위하여 항복강도의 30, 50, 70, 90%에 해당하는 하중을 부과하고 동시에 $1.6 \times 10^{-4}A$ 의 전류를 인가하면서 파단시간을 측정하였다(Fig. 10). 하중 증가에 따라 선형적으로 파단시간이 감소하였다. 이로써 감지선 파단의 직접적인 원인은 감지전류에 의한 부식이라는 것을 확인할 수 있다.

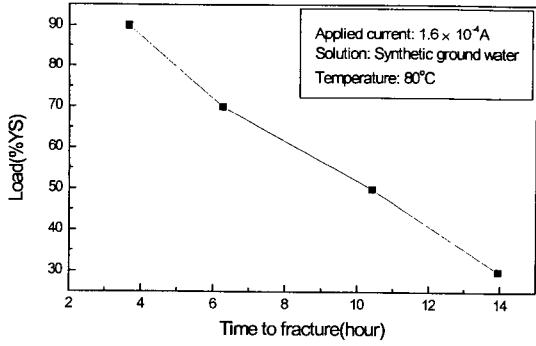


Fig. 10. Load vs. time to fracture at an applied current of $i_{app} = 1.6 \times 10^{-4} A$.

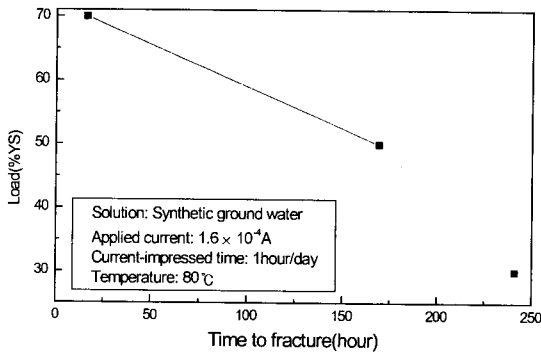
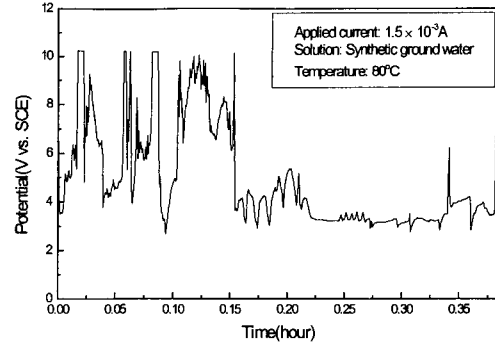


Fig. 11. Load vs. time to fracture at an applied current of $i_{app} = 1.6 \times 10^{-4} A$ for 1 hour/day.

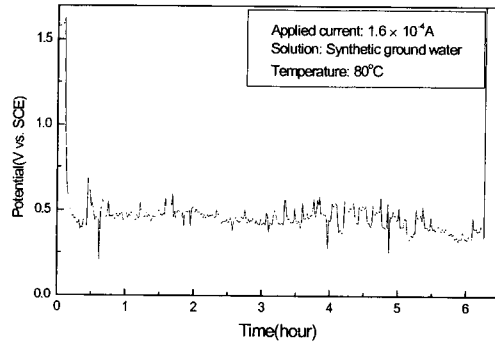
부식환경이 없는 상태에서 항복강도 이하의 응력 하에서 감지선은 파괴가 발생하지 않아야 한다. 결론적으로 감지선은 이 부식환경에서 응력부식균열에 매우 민감한 재료이다.

감지전류가 인가된 시간의 영향을 알아보기 위해 1일 1시간씩 $1.6 \times 10^{-4} A$ 의 전류를 인가한 결과, 연속적으로 전류를 인가한 경우보다 파단시간이 상당히 연장되었다 (Fig. 11). 감지전류가 흐르는 1시간 동안에 공식이 발생하여 응력부식균열이 시작된다. 그러나 전류가 인가되지 않으면 분극곡선에서 알 수 있듯이 개회로전위에서 감지선은 재부동태화되는 특성이 있다. 따라서 이 상태에서는 균열성장 이 지연된다.

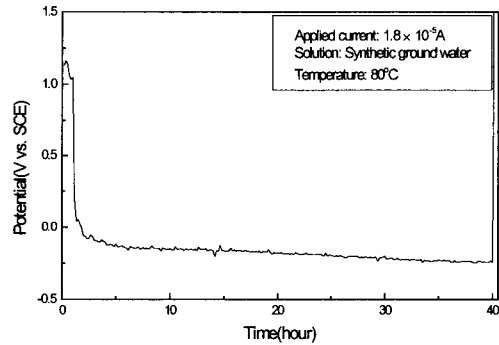
Fig. 12는 각각의 인가전류에서 응력부식시험을 행하였을 때의 전위의 변화를 나타낸다. 인가전류가 증가함에 따라 전위의 변화폭도 증가한다. 여기서 전위의 상승은 부동태 피막의 형성을, 하강은 피막의 파괴를 나타내며, 전위의 요동은 공식의 생성 및 성장에 따른 균열의 전파에 기인한다고 사료된다.^{7,16)} 가장 높은 전류값인 $1.5 \times 10^{-3} A$ 의 경우에는 공식과 균열의 성장에 따라 부동태 피막의 형성이 힘들어, 지속적인 양극용해가 일어난다. 또한 $1.6 \times 10^{-5} A$ 인 경우, 불안정한 부동태 피막의 형성으로 인해 양극용해와 재부동태가 번갈아 일어나며, $1.8 \times 10^{-5} A$ 에서는 안정된 부동태 피막의 형성으로 인해, 안정된 전위값을 보이고, 가장 낮은 전류값인 $4.5 \times 10^{-6} A$ 인 경우에는 부동태 피막 형성에는 부족한 전류값이기 때문에, 양극-음극 반응이 교차적으로 일어난다.¹⁷⁾



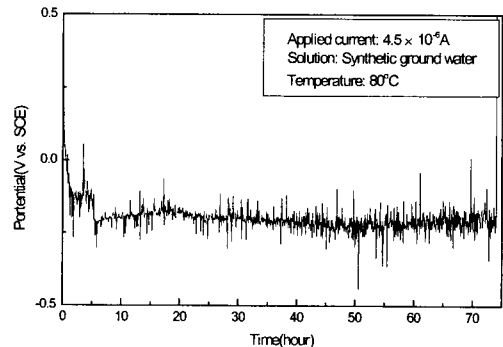
(a) $I_{app} = 1.5 \times 10^{-3} A$



(b) $I_{app} = 1.6 \times 10^{-4} A$



(c) $I_{app} = 1.8 \times 10^{-5} A$



(d) $I_{app} = 4.5 \times 10^{-6} A$

Fig. 12. Potential vs. time at various applied current (load = 70% yield strength).

3.4. 파면 분석

공기 중에서 인장시험을 한 결과, 감지선은 전형적인

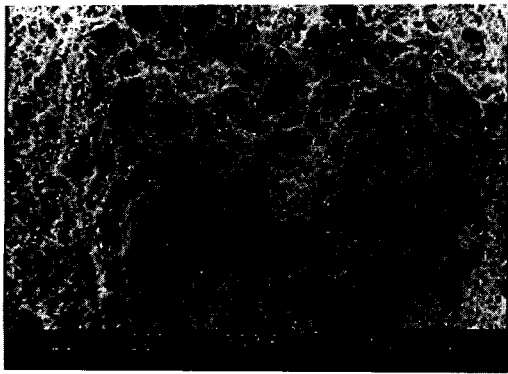


Fig. 13. SEM photograph of fracture surface after tensile test in air.

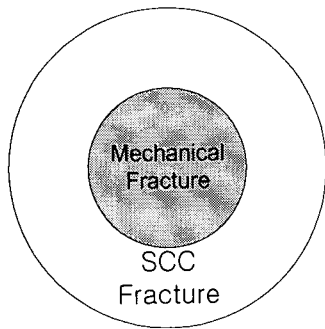
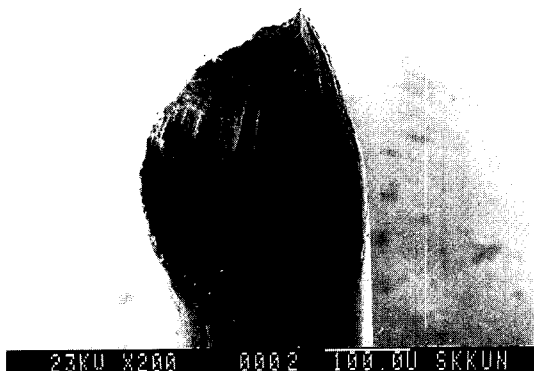


Fig. 14. Schematic illustration of the fracture surface in sensor wire after SCC test.

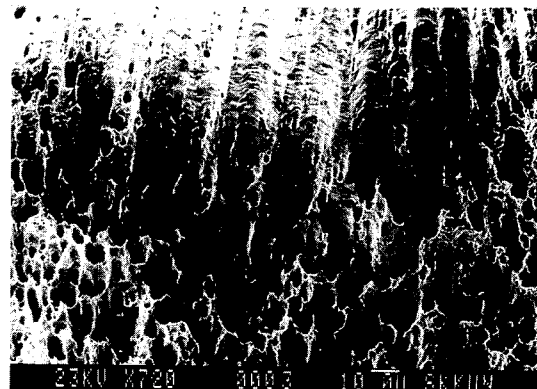
cup and cone 형태의 연성과파괴를 나타낸다. 파면은 dmples 조직을 보인다 (Fig. 13).

항복강도의 70%에 해당하는 하중을 인가하고 인가전류를 변화시키는 일정하중 응력부식시험 후의 파단면에서, Fig. 14와 같이 응력부식에 의한 파괴가 감지선의 외부에서 발생하고 내부에서는 단면적 감소에 따라 인가된 하중이 항복강도를 넘어서게 되면 소성변형에 이은 기계적 연성과파단이 발생한다. 이때 응력부식 파단부와 기계적인 연성 파단부 사이에 step이 관찰된다. 감지선 외부에서부터 공식이 관찰되었으며 이 부분에서 응력부식에 의한 파괴가 시작되

어 내부에서의 기계적 연성과파괴로 전환되었다 (Fig. 15 (a)). 인가전류가 높은 경우, 파단이 시작되고 있는 부분에서는 무수한 공식이 관찰되며, 기계적 연성과파괴로 전환되는 부분에서는 step이 관찰된다 (Fig. 15 (b)). 이것은 인가 하중에 의해 부동태 피막의 파괴와 균열의 개방이 국부적인 공식의 발생을 유발하기 때문으로 사료된다.^{18,19)} Fig. 16과 같이 응력이 작용하여 균열을 개방시켜 부동태피막을 파괴한다. 부동태피막이 파괴된 균열부는 급속히 용해하여 균열진전이 촉진된다. 일단 균열전파가 시작되면 피막파괴 속도가 재부동태 속도보다 빠르기 때문에 균열선단은 부식에 노출된다. 따라서 균열의 진전과 함께 공식이 생성된다. 뿐만 아니라, 인가전류에 의해 피막이 파괴되며 국부적인 공식이 발생·성장한다.²⁰⁾ 이때 부동태 피막은 완전히 사라지게 되고 금속의 빠른 용해가 진행된다. 이 부분에서 단면적 감소와 함께 응력의 집중이 발생하여 균열이 시작, 전파한다.^{4,21)} 파단면에서 부식터널로 작용하는 많은 공식이 관찰되고, 연성 변형 및 파괴의 형태가 일어난 것으로 관찰되었다. Fig. 17(a)에서 보듯이, 슬립면에 형성된 공식이 노치로 작용하여 응력이 집중된다. 양극반응의 진행으로 인해 공식의 길이와 직경이 성장하여 단면적이 감소하게 되면 집중된 응력이 항복강도를 넘어서게 되어 소성변형을 일으키게 되고, 결국 최대인장응력에 도달하게 되어 Fig. 17(b)와 같이 감지선의 파단이 발생한다. 이때 터널 사이에 기계적인 연성과파괴가 발생한다. 공기 중에서 인장시험을 하였을 때와 마찬가지로 파단면이 덩굴 조직과 같은 연성과파단의 형태를 보인다. 즉, 터널 메카니즘에 의한 응력부식균열의 파단 형태를 나타낸다. 또한 인가전류가 클수록 감지선은 부식의 진행이 빠르게 되기 때문에 감지선의 직경이 급격히 감소하게 된다. 따라서 인가된 하중이 항복응력을 쉽게 넘어서게 되며, 응력부식에 의한 파괴에서 기계적 연성과파괴로의 전환이 빠르게 발생하는 것으로 사료된다. 그보다 낮은 전류를 인가한 경우에도 파괴의 시작은 역시 공식에서 시작되었다 (Fig. 18(a)). 시편의 측면에 공식이 보이며 파괴의 형태는 취성과파괴를 보이고 있다. Fig. 15(b)와는 다르게, 전반적인 파괴의 진행은 취성과파괴의 형태로 이루어졌다 (Fig.



(a)



(b)

Fig. 15. SEM photographs of fracture surface at an applied current of $i_{app} = 1.5 \times 10^{-3} A$ (load = 70% yield strength) : (a) $\times 200$ (b) $\times 720$.

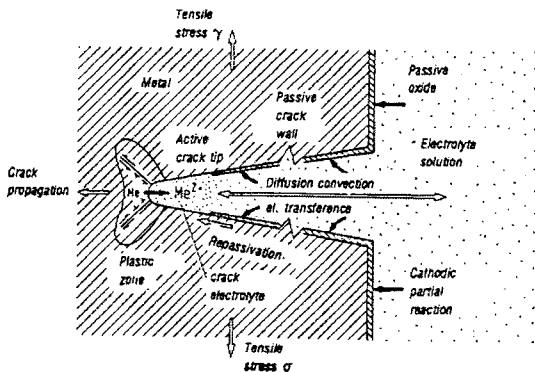


Fig. 16. Electrochemical model for SCC of a passive alloy by anodic metal dissolution at the zone of plastic deformation in advance of the crack tip.

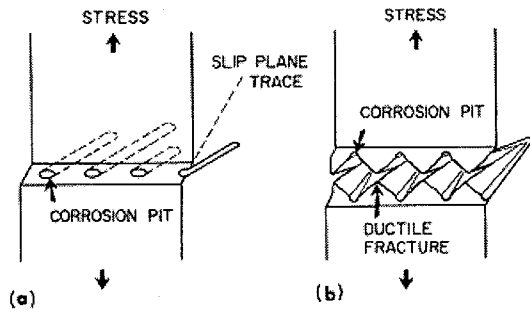


Fig. 17. Schematic representation of tunnel model.

18(b)). 파괴 모드는 입내파괴의 형상을 나타내고 있다. 최종적으로는 취성파괴에서 기계적 연성파괴로 전환되고 있음이 보인다. 인가전류가 감소함에 따라 공식의 수도 감소하고 터널 메카니즘에 의한 파단 형태는 표면 피막파괴 모델에 의한 입내파단의 형태로 증가하였다.

Fig. 19는 일정한 전류를 인가하면서 인가하중의 변화에 따른 감지선 파단면의 SEM 표면 사진이다. 시편 측면에 공식이 관찰되고 있다. 따라서, 파단이 공식에서 시작되고 있음을 알 수 있다. 즉, 터널 메카니즘에 의한 파단 형태를 나타낸다. 인가하중이 증가함에 따라 취성파괴에서 연성파

괴로의 진행이 빠르고 공식에서 부식터널에 의한 불연속적인 균열전파가 진행되었다.^{3, 22)} 인가전류가 공식을 생성, 증식, 성장시키며, 인가하중은 연성변형을 일으키기 때문에 공식들이 찢어짐에 의해 침상의 파단 모습을 보이고 있다. 30% 항복강도에서 부식표면은 균일 부식과 같은 형태를 보이고 있다. 부식에 의해 감소된 단면적에 가해지는 응력이 항복응력을 넘어서게 되고 인장강도에 도달하게 되면 파단이 일어난다.

감지선의 파단 원인은 응력과 부식이 상호작용하여 발생한 현상으로 그 메카니즘에 따라 두 가지 형태를 보인다. 부식터널 메카니즘에 따르면 감지전류와 부식환경의 작용으로 공식이 발생하여 직경 및 길이가 성장하게 된다. 인장 응력에 의해 피막의 파괴로 인하여 공식이 생성되고 공식의 기저에 응력의 집중이 발생하며⁴⁾, 이에 따라 공식의 성장은 집중된 응력으로 인하여 연성변형 및 파단이 일어날 때까지 진행된다. 따라서, 균열은 공식의 성장과 연성파괴의 반복 과정에 의해 전파된다. 이 경우에는 부식이 응력에 비해 더 큰 비중을 차지한다 (Fig. 15(b)). 한편, 응력부식의 다른 형태로는 응력이 작용하여 균열을 개방시켜 부동태 피막을 파괴하면 균열부는 급속히 용해하여 균열진전이 촉진된다. 여기에서 균열진전은 균열의 첨단에서 양극용해에 의해 진행된다. 파단의 형상은 입내파단이 나타난다²³⁾ (Fig. 18(b)).

4. 결 론

부식감지선이 인공침출수에 노출되었을 때 단선원인 및 방지대책은 다음과 같다.

- 1) 감지전류가 감지선 파단의 직접적인 원인으로 작용한다. 감지전류가 인가되지 않을 경우, 감지선은 400시간 이상에서도 파단이 발생하지 않았다. 그러나 감지전류가 인가되는 경우, 감지선의 수명이 급격히 감소하였다.
- 2) 감지전류가 부동태피막을 형성하는 전류보다 더 높을 때 국부적인 공식이 발생하여 응력집중의 원인이 된다.
- 3) 공식이 성장하여 부식터널을 형성함에 따라 연성 변형 및 파단이 발생한다.
- 4) 1일 1시간씩 감지시스템을 작동시킬 경우, 연속적으

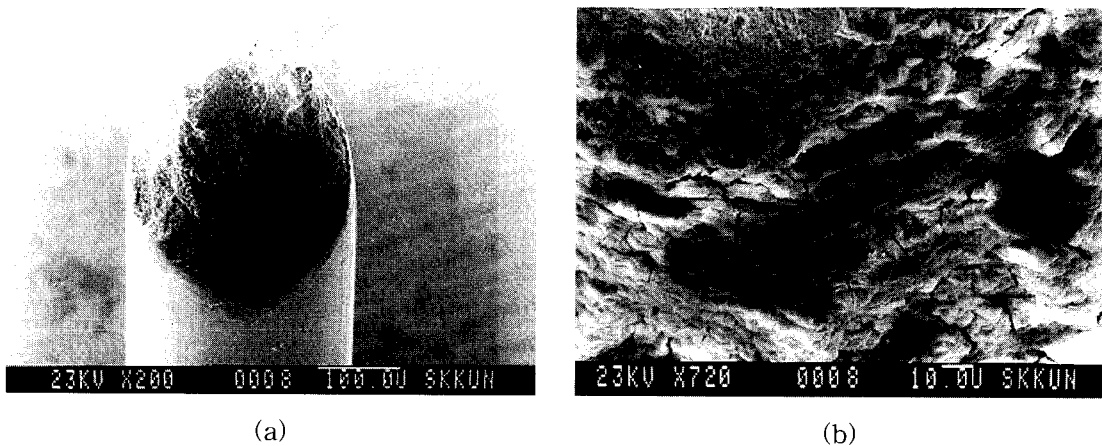
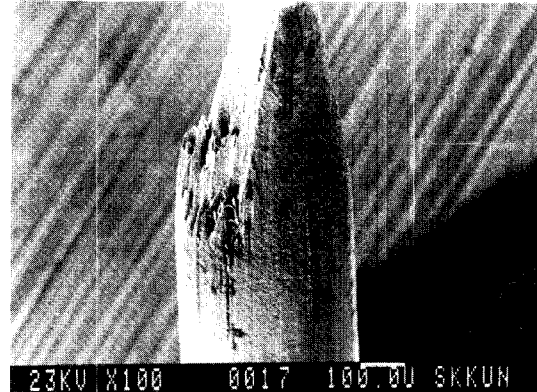


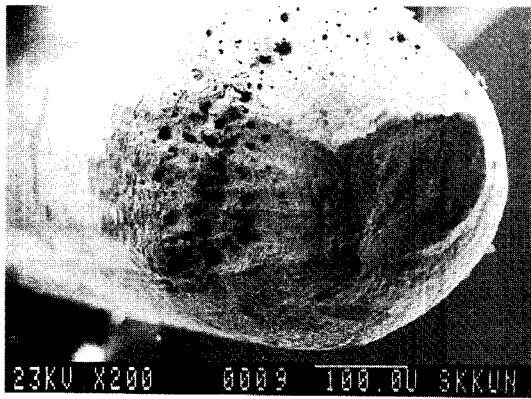
Fig. 18. SEM photographs of fracture surface at an applied current of 4.5×10^{-6} A (load = 70% yield strength) : (a) $\times 200$ (b) $\times 720$.



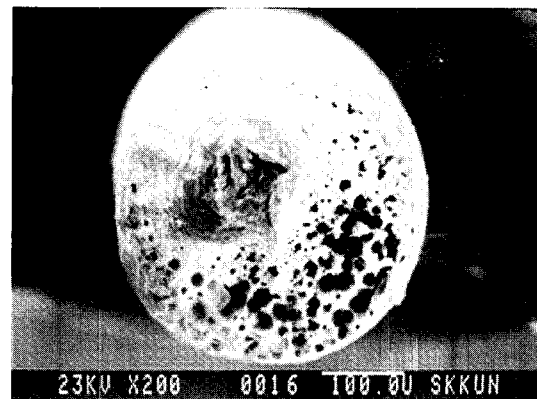
(a) 30% YS



(b) 50% YS



(c) 70% YS



(d) 90% YS

Fig. 19. SEM photographs of fracture surface with various applied loads($i_{app}=1.6 \times 10^{-4}A$)

로 감지시스템을 작동시키는 경우보다 감지선의 수명이 연장될 수 있다.

5) 단선을 방지하기 위해서는 감지전류를 부동태형성전류밀도 ($10^{-6}A/cm^2$) 이하로 유지해야 한다.

감사의 글

연구비를 후원한 한국지역난방공사에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed., pp.273, Prentice-Hall, NJ, USA, (1996).
2. J.B. Lee, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **34**, 1585 (1996).
3. R.H. Jones and R.E. Richer, *Stress-Corrosion Cracking*, 2nd ed., pp. 33, R.H. Jones (Ed.), ASM International, Ohio, (1993).
4. T.K. Christman: *Corrosion*, **46**, 450 (1990).
5. B.F. Brown, *Theory of Stress Corrosion Cracking in Alloys*, pp.100, NATO, Brussels (1971).
6. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed., pp.209, Prentice-Hall, NJ, USA (1996).
7. M. Drogowska, H. M nard, *J. of Applied Electrochemistry*, **27**, 169 (1997).

8. D.A. Jones: *Corrosion*, **40**, 181 (1984).
9. ASTM G51, *Annual Book of ASTM Standards*, PA, USA, **04.08**, 1409 (1993).
10. ASTM G57, *Annual Book of ASTM Standards*, PA, USA, **04.08**, 1411 (1993).
11. ASTM D2216, *Annual Book of ASTM Standards*, PA, USA, **04.08**, 294 (1993).
12. ASTM D512-89, *Annual Book of ASTM Standards*, PA, USA, **11.01**, 449 (1993).
13. ASTM D1126-86, *Annual Book of ASTM Standards*, PA, USA, **11.01**, 283 (1993).
14. Bruce Craig, *ASM Metals Handbook*, 9th ed., pp.146, **13**, (1987).
15. D.A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed., pp.133, Prentice-Hall, NJ, USA (1996).
16. F. King, C.D. Litke and B.M. Ikeda, *Proceedings of NACE's 54th Annual Conference & Exposition, Corrosion/99*, April 25-30, 1999, San Antonio, Texas, USA, paper No. 482
17. J.A. Richardson and G.C. Wood, *Corrosion Sci.*, **10**, 313 (1970).
18. H.W. Pickering and P.R. Swann, *Corrosion*, **19**, 373

- (1963).
19. L.L. Sheir, R.A. Jarman and G.T. Burstein, Corrosion, 3rd ed., pp.83, Butterworth Heinemann, Oxford (1994).
20. Z. Szklarska-Smialowska, **Pitting Corrosion of Metals**, NACE, pp.341, Texas (1986).
21. I.W. Kang, S.I. Pyun: J. Corros. Sci. Soc. of Korea, **17**, 51 (1988).
22. Bruce Craig, ASM Metals Handbook, 9th ed., **13**, 160 (1987).
23. E.N. Pugh, **Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys**, pp.37, NACE, Texas, (1973).