한국부식학회지
J. Corros Sci. Soc. of Korea
Vol. 21, No. 4, Dec., 1992
〈研究論文〉

주택구조물의 콘크리트 내에 묻혀 있는 강재파이프의 부식파손에 대한 연구*

文 聖 模·邊 秀 一·全 永 甲
한국과학기술원 재료공학과

A Study on the Corrosion Failure of the Carbon Steel Pipeline Embedded in Concrete of Housebuilding

S. M. Moon, S. I. Pyun and Y. G. Chun
Department of Materials Science and Engineering,
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejon 305-701, Korea

The present work has been conducted to elucidate the cause of the unexpected failure of the steel water pipeline embedded in concrete of Korean housebuilding from the viewpoint of metallic corrosion.

For the purpose of this work, the feature of the failure and the microstructure of the steel pipeline were investigated by using scanning electron microscopy and optical microscopy, and the concrete surrounding the steel pipeline and the corrosion products were examined by using X-ray diffractometry(XRD) and energy dispersive spectrometry(EDS) analyses. It was observed that the internal surface of the water pipeline is smooth, indicating occurrence of the uniform corrosion, while the external surface of the water pipeline which has been contacted with bubble concrete has many micro pits and also several macro pits randomly distributed. The steel pipeline proved to have several deep grooves sporadically distributed along the weldment containing many impurities. The result of X-ray analysis showed the peaks of ferric chloride($FeCl_3$) in powder specimen taken from the corrosion products. From the results of EDS analyses, it was confirmed that chloride ions exist in the bubble concrete surrounding the pipeline and also in corrosion products formed on the external surface of the pipeline. From the observation of corrosion form of pipeline and the results of XRD and EDS analyses, it is suggested that the deep grooves and the pits formed due to the presence of chloride ions in the bubble concrete produce the failure of the steel water pipeline embedded in concrete.

*한국부식학회와 한국표면공학회 주최 1992년 춘계연구발표회(1992년 5월 16일 전북대학교)에서 발표한 내용임

1. 서 론

강재파이프는 비교적 부식저항성이 낮음에도 불구하고 경제성이 있기 때문에 콘크리트 건축물등에서 송수관으로 널리 사용되고 있다. 그러나, 최근들어 주택구조물의 콘크리트 내에 묻혀 사용되는 송수용 강재파이프가 예상된 수명보다 훨씬 빠른 1~2년만에 갑작스럽게 파손되는 현상이 빈번히 나타나고 있다. 이러한 파손현상은 건축물을 사용 불가능하게 만들 뿐 아니라 송수관의 대체 및 보수비용등 커다란 경제적 손실을 야기시키고 있어서 더욱 큰 주목을 받고 있다.

콘크리트 내에 묻혀 있는 송수용 강재파이프는 송수관 내부를 흐르는 물과 송수관 외부를 둘러싸고 있는 콘크리트에 접하게 된다. 따라서 예상되는 부식기구로는 송수관 내부의 전면부식, 송수관 내부의 침전물 등에 의한 틈새부식, galvanic coupling 및 stray current에 의한 부식, 응력부식파괴 그리고 콘크리트 환경에 의한 부식 등이 있다.

본 연구에서는 콘크리트 내에서 쓰인 송수용 강재파이프의 파손양상 및 조직을 관찰하고, 금속부식학적 접근을 통하여 강재파이프의 파손원인을 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 시편 준비

본 연구에 사용된 재료는 KSD 3507 흑강관으로 탄소, 규소, 망간, 황, 인의 함량이 각각 0.25, 0.35, 1.5, 0.04, 0.04 wt.%이하로 조절된 탄소강이다. 강재 파이프는 인장강도가 279 MPa인 배관용 탄소강을 전기저항 용접으로 접합하여 만들어지며, 표면에 방청 페인트가 칠해진 상태로 사용되었다. 이 강재 파이프는 건축구조물 내에서 보온재 역할을 하는 약 60 mm 두께의 기포콘크리트로 둘러싸여 있고 그 주위에는 일반 콘크리트가 약 50 mm두께로 덮혀 있다. 강재파이프가 묻혀있는 상태를 간략히 도식화하여 Fig. 1에 나타내었다.

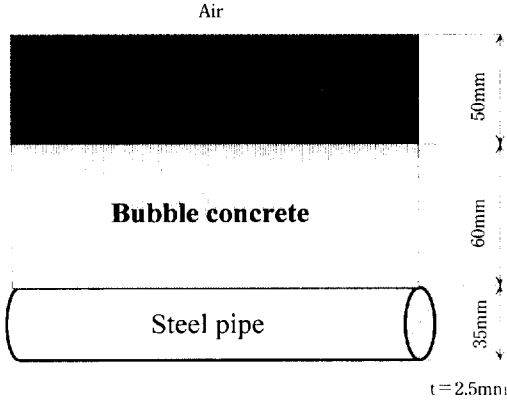

Fig. 1. Schematic diagram of the steel water pipeline embedded in concrete of housing structure

Fig. 1과 같은 환경에서 온수공급관으로 사용되던 중에 부식파손을 일으킨 강재파이프로부터 부식된 양상 및 조직관찰에 사용할 시편을 채취하였다. 또한 강재파이프 주위의 부식환경을 조사하기 위한 XRD분석에는 부식생성물 분말을 채취하여 사용하였으며, Energy Dispersive Spectrometry(EDS ; Energy Dispersive Analysis of X-ray(EDAX)) 분석에는 부식생성물 분말, 강재파이프가 접하고 있는 기포 콘크리트와 부식파손을 일으킨 pit에서 시료를 채취하여 사용하였다. 콘크리트 내의 환경과 유사한 강염기성 분위기하에서 강재 파이프의 전기화학적 성질을 조사하기 위하여 부식 파손된 강재 파이프로부터 시편을 채취하여 분극실험에 사용하였다.

2.2 부식양상 및 조직 관찰

강재 파이프에서 채취한 시편을 연마지 #1200까지 연마한 후 알루미나 분말을 사용하여 경면이 될때까지 연마하였다. 깊은 홈(groove)모양으로 부식된 용접부를 에칭하지 않은 경면상태로 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, pit의 성장과 강재의 미세조직과의 관계를 알아보기 위하여 pit이 형성된 부분을 에탄올 100 ml에 피크릴산 3g을 섞은 에칭용액으로 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 그리고 강재 파이프의 전체적인 부식경향을 알아보기 위하여, 실제로 사용된 강재 파이프를 단면방향

으로 절단하여 시편을 채취하고, 용접부위에서 부식이 일어난 것과 일어나지 않은 것의 단면모양을 각각 카메라로 사진을 찍어 그 모양을 비교하였다.

2.3 염화물의 확인

강재 파이프가 접하고 있던 환경으로부터 염소이온의 존재를 확인하기 위하여 부식 생성물 분말의 X-선 회절 분석을 행하였으며, 같은 시료에 대하여 EDS분석을 실시하였다. 또한 강재파이프를 둘러싸고 있던 기포콘크리트와 강재파이프의 부식파손을 초래한 pit의 내부에 대하여 EDS분석을 실시하였다.

2.4 분극곡선

강재 파이프가 접하고 있는 콘크리트환경과 유사한 강염기성 분위기하에서 강재파이프의 전기 화학적 성질 및 대략적인 수명을 알아보기 위하여 연마지 #1200까지 연마한 시편을 0.1M NaOH 용액 속에서 EG&G Potentiostat/Galvanostat와 flat cell을 사용하여 분극실험을 행하였다. 또한 chloride ion[Cl^-]의 영향을 알아보기 위하여 0.1M NaOH+0.01M NaCl용액과 0.1M NaOH+0.5M NaCl용액에서 각각 분극실험을 하였다. 분극실험에 사용된 기준전극은 saturated calomel electrode(SCE)이며 scan rate는 0.2mV/sec, 분극범위는 -800 mV_{SCE}~600mV_{SCE}이었으며, 위 장치와 연결되어 있는 IBM AT computer로 data처리를 하여 분극곡선을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

콘크리트 내에 묻힌 상태로 사용된 강재파이프는 galvanic coupling이나 stray current에 의한 부식, 응력부식파괴등의 영향이 없는 상태였다. 또한 물과 접하고 있는 송수관 내벽에서 일어난 부식은 전면적으로 균일하게 일어나 비교적 매끈하게 나타났으며 갑작스럽게 발생한 부식파손에는 거의 영향을 주지 못한 것으로 보인다. 반면에 기포 콘크리트와 접하고 있는 강재파이프의 외부표면에서는 많은 macro pit과 micro pit들이 관찰되었고, 또한 용접부에 형성된 깊은 홈(groove)이 관찰되었으며 파손은 주로 이같은 pit과 깊은 홈에서 발생하였다.

Fig. 2는 주사전자현미경 사진을 이용하여 송수용 강재파이프의 파손에 결정적으로 기여한 pit의 모양을 나타내었다. 테두리는 다소 불규칙적인 모양을 하고 있으나 전반적으로 등방성을 가지고 성장한 형상을 하고 있으며, pit의 가운데 부분이 제일 먼저 강재파이프의 안쪽까지 도달하여 누수를 일으킴으로써 강재 파이프의 파손을 일으켰음을 알 수 있다.

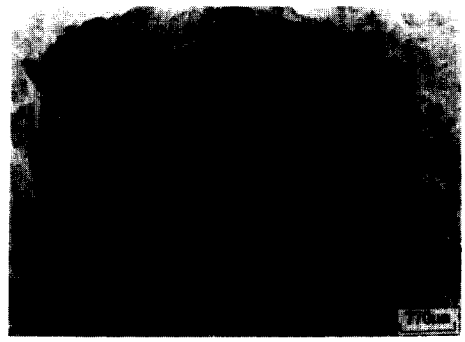

Fig. 2. SEM photograph of a pit inducing the failure.

Fig. 3은 부식이 일어난 송수용 강재파이프에서 나타나는 대표적인 pit의 단면을 광학현미경으로 관찰한 것으로서 pit이 강재파이프의 미세조직에 큰 영향을 받지 않으면서 관의 내부로 성장함을 알 수 있다.

송수관의 용접부를 관찰한 결과 용접부를 따라서 홈이 형성되지 않은 부분과 형성된 부분은 대략 비슷한 면적을 나타내었다. Fig. 4 (a), (b)는 각각 홈(groove)이 형성되지 않은 용접부위와 깊은 홈이 형성된 것의 단면모양을 보여주고 있다. 또한, Fig. 4 (a), (b)에서 모두 강재파이프의 외부표면에 불규칙적으로 발생된 많은 macro pit과 micro pit들이 관찰되었다.

콘크리트 환경은 시멘트, 혼합제, 물, 첨가제 등으로 이루어진다. 시멘트는 식(1)과 같이 물과

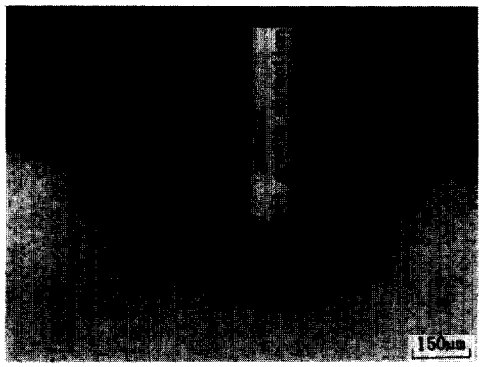

Fig. 3. Optical micrograph of a typical pit cross section.

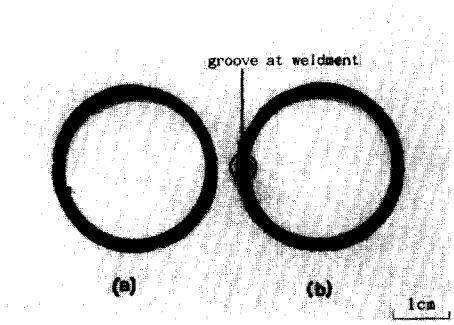

Fig. 4. Cross section of the steel pipeline specimen taken from the water pipeline embedded in concrete : (a)without groove produced at weldment ; (b)with groove produced at weldment.

반응하여 수화물과 calcium hydroxide($Ca(OH)_2$)를 형성한다.[1)]

$$2(3CaO \cdot SiO_2)+6H_2O \rightleftarrows 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2)+4H_2O \rightleftarrows 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O+ Ca(OH)_2 \quad (2)$$

잘 수화된 시멘트는 $Ca(OH)_2$를 원래 시멘트의 15~30% 정도 포함하고 있으며, 이 양은 콘크리트 내에 습기가 없는 경우에도 콘크리트 내의 기공용액을 pH 12 이상으로 유지시킨다. 이러한 강 염기성 분위기하에서 강의 표면에는 안정한 부동태 피막이 형성된다. 또한 콘크리트는 낮은 투과성을 가지고 있어서 부식 유발물질의 유입이 어렵다. 이러한 고유의 보호작용으로 콘크리트 내에 묻혀 있는 강은 잘 부식되지 않는다. 그러나 예상하지 못한 부식분위기의 존재, 콘크리트 내에 여러가지 불순물의 존재등에 의하여 강의 부식이 일어날 수 있다.

콘크리트 내에 묻혀 있는 강의 부식은 보통 다음의 두가지 형태로 나타난다. 하나는 콘크리트의 탄산염화로 $Ca(OH)_2$와 CO_2가 반응하여 calcium carbonate($CaCO_3$)를 형성하여 기공용액의 pH를 낮추어서 강이 더이상 부동태(passivity)의 성질을 갖지 못하고 부식이 진행되는 경우이다.[2)]

$$Ca(OH)_2+CO_2 \rightleftarrows CaCO_3+H_2O \quad (3)$$

그러나 탄산염화는 보통 기공도가 크거나 균열등이 존재하여 외부로부터 CO_2의 공급이 원활한 경우에 나타나며, 속도가 느린 과정이어서 크게 문제가 되는 부식형태는 아니다. 다른 하나는 Cl^-이온에 의한 부식으로 콘크리트 내에서 강의 예상보다 빠른 부식의 주 요인으로 알려져 있다.[1~3)] Cl^-이온은 부식거동에 가장 치명적인 영향을 미치는 불순물로서 보호성 산화피막의 생성을 억제 시킬 뿐만 아니라 이미 생성된 피막을 깨뜨리는 역할을 하여 국부 부식을 조장한다. Cl^-이온은 자연상태에서 많이 존재하고 있으며 콘크리트의 혼합시 고의로 첨가된 수화가속제($CaCl_2$)나 물, 혼합제 등에서 원하지 않은 경로로 첨가될 수 있다.[1)] 외부로부터 콘크리트 내로 염소이온의 이동은 콘크리트내 기공용액과 염소이온과 결합되어 있는 양이온에 의해 영향을 받으며 콘크리트가 염화물에 노출되어 있을 때 일어난다.[4)]

콘크리트 내에서 사용된 송수용 강재파이프의 부식양상을 관찰한 결과, 송수관 외부로부터 pit이 성장하고 있었고, 이것으로부터 송수관을 둘러싸고 있는 외부환경중에 염소이온이 존재하여 공식이 일어난 것임을 예측할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 강재파이프의 주위환경을 조사하였다.

Fig. 5는 부식 생성물 분말의 X-선 회절분석 결과를 나타낸 것으로 Iron(Ⅲ) chloride($FeCl_3$)의

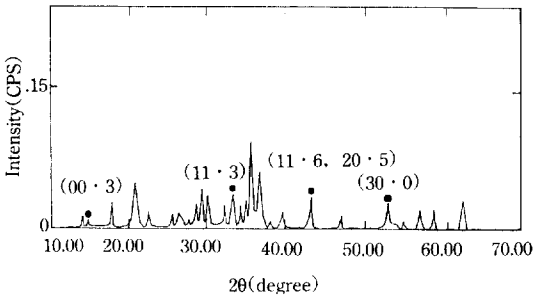

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of the powder specimen obtained from the corrosion products : ●, $FeCl_3$; (hk · l) represents Miller indices for hexagonal($FeCl_3$) structure.

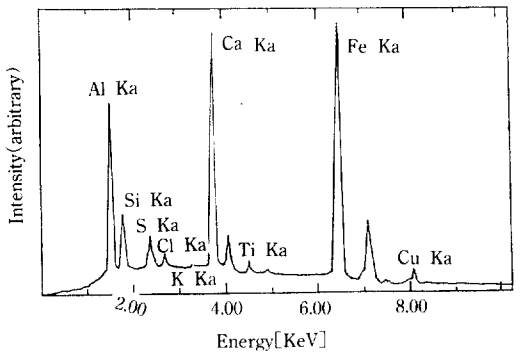

Fig. 6. Energy dispersion spectrum of the powder specimen obtained from the corrosion products.

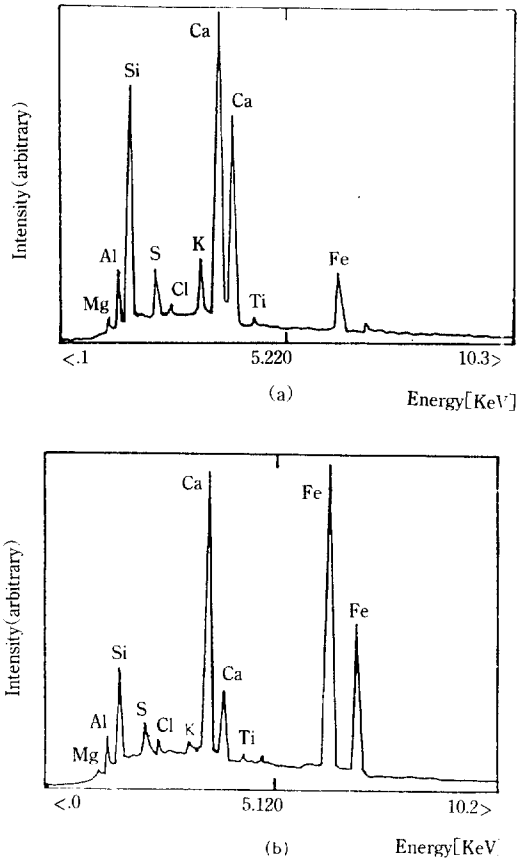

Fig. 7. Energy dispersion spectrums of (a) bubble concrete and (b) interior of the pit inducing the failure.

peak이 잘 나타나 있다. $FeCl_3$는 강재표면에 형성된 부동태 피막을 깨뜨리는 역할을 하여 pit의 생성을 조장하는 것으로 잘 알려져 있다.[5)]

같은 시료를 사용하여 EDS분석을 실시한 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 염소이온의 peak을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 강재파이프를 둘러싸고 있던 기포콘크리트와 강재파이프의 부식파손을 일으킨 pit의 내부에 대하여 EDS분석을 실시한 결과를 나타낸 것으로, 기포콘크리트와 pit의 내부에도 역시 염소가 함유되어 있음을 보여준다.

Fig. 8은 용접부위에서 관찰된 날카로운 모양의 홈(groove)을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 용접된 부분은 다른 기지부분에 비해서 매우 빠른

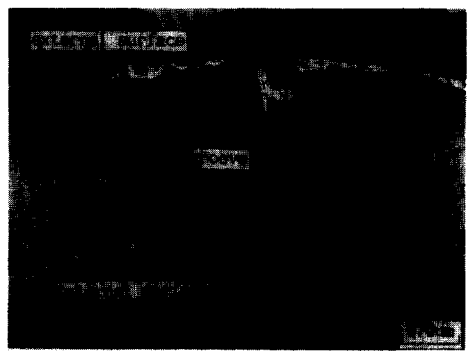

Fig. 8. SEM photograph of a deep groove formed at weldment of the steel pipeline specimen.

부식이 진행되어 있었고 그 모양은 응력부식에서 일어나는 균열모양이나 공식(pitting)에 의해서 일어나는 pit의 모양(Fig. 3)과는 양상이 매우 다른 형태의 깊은 홈을 나타내고 있다. 이로부터 강재파이프의 용접부에서 일어난 부식은 공식 이외에 또 다른 부식요인이 작용하고 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 9는 깊은 홈이 형성된 용접부위를 경면으로 연마하여 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 용접부위를 따라 다량의 불순개재물들이 분포되어 있음을 관찰할 수 있었으며, 용접부위에서 관찰된 깊은 홈은 이 불순개재물들과 연관이 있을 것으로 생각된다. 즉, 불순개재물과 기지 사이에 국부전지가 형성되어 부식이 불순개재물의 분포방향을 따라 빠르게 진행되고, 그 결과 용접부에서 깊은 홈이 형성된 것으로 사료된다.

콘크리트 내에 묻혀 있는 강재파이프의 전기화학적 성질을 알아보기 위하여 여러가지 용액중에서 분극실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 결과로부터 부식전위, 피막의 파괴전위, 부식속도를 구하여 Table 1에 표시하였다. 콘크리트내 기공용액은 $Ca(OH)_2$를 다량 포함하여 강염기성 분위기를 형성시킨다. 이와 유사한 분위기인 pH 12 이상의 0.1M NaOH 분위기하에서 분극실험을 한 결과 부식전위는 약 $-368mV_{SCE}$로 나타났으며 anodic overpotential을 가하여도 부식속도가 일정한 passive region을 보이고 있다. 한편 같은 용액에 염소이온이 첨가된 경우 부식전위는 $-380\ mV_{SCE}$~$-385mV_{SCE}$로 큰 차이가 없었으나 부식속도는 조금 증가하였다. 또한 염소이온의 농도가 증가함에 따라 passive region은 크게 감소하여 부동태 피막의 파괴전위(breakdown potential) E_b는 $575\ mV_{SCE}$에서 $-70\ mV_{SCE}$, $-220\ mV_{SCE}$로 현저히 낮아졌다. 따라서 안정된 산화피막을 형성하는 강염기성 분위기하에서도 염소이온이 함유되어 있는 경우 공식 저항성이 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 내에 묻혀있는 강은 안정된 부동태 피막을 형성하는 강염기성 분위기하에 있지만, 분위기중에 염소이온이 존재하는 경우 공식이 일어나게 된다.

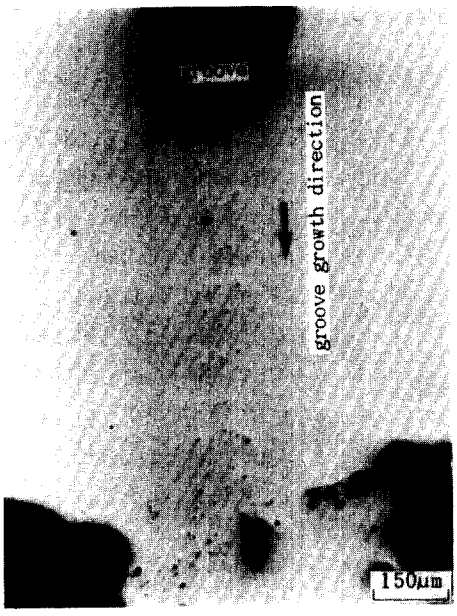

Fig. 9. Optical micrograph of defects formed around the weldment of the unetched steel pipeline specimen.

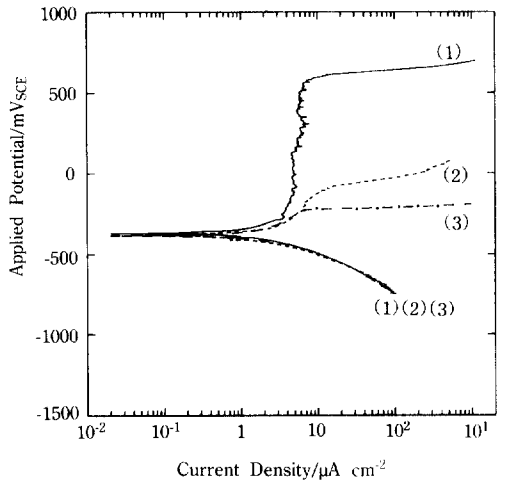

Fig. 10. Potentiodynamic polarization curves of the steel pipeline specimen in (1) —— 0.1M NaOH; (2) --- 0.1M NaOH+0.01M NaCl; (3) —·— 0.1M NaOH+0.5M NaCl solutions with a scanning rate of 0.2 mV/s.

Table 1. Corrosion properties of the steel pipeline specimen in 0.1M NaOH, 0.1M NaOH+0.01M NaCl and 0.1M NaOH+0.5M NaCl solutions.

	Breakdown potential[mV_{SCE}]	Corrosion potential[mV_{SCE}]	Icorr [$\mu A/cm^2$]	Corrosion rate[mm/year]
(1) 0.1M NaOH	575	−368	0.9	0.011
(2) 0.1M NaOH +0.01M NaCl	−70	−380	1.56	0.018
(3) 0.1M NaOH +0.5M NaCl	−220	−385	4.02	0.047

강염기성 분위기인 0.1M NaOH용액중에서 염소이온(0.5M)이 존재할 때 전체적으로 균일한 부식이 진행된다고 가정하면 강재의 부식속도는 년간 0.05 mm 정도로 계산된다(Table 1). 즉, 이와같은 전면부식속도로 한 방향에서 관 두께 2.5 mm의 강재 파이프가 부식된다면 약 50년 이상의 수명이 예상된다. 그러나 염소이온이 존재할때 위에서 관찰한 바와 같이 국부적인 공식이 일어나 예상되는 강재의 수명보다 훨씬 빨리 파괴에 이르게 된다. 따라서 염소이온에 의한 강재의 부식을 줄이기 위해서는 부식분위기에 염소이온이 임계량 이상으로 존재하지 않도록 주의해야 한다.[1)]

4. 결 론

콘크리트내에 묻힌 온수공급용 강재파이프의 파손에 대한 원인을 규명하기 위하여 파손양상 및 조직을 관찰하고 강재 파이프가 접한 주위 환경에 대한 XRD 및 EDS 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 강재 파이프의 파손은 관의 외부로부터 발생, 성장한 pit과 불순개재물들을 포함하고 있는 용접부위에서 형성된 깊은 홈(groove)에서 주로 관찰되었다.

2. 강재파이프의 외부표면에 접한 기포 콘크리트와 부식생성물 분말의 EDS분석결과 염소의 존재를 확인할 수 있었으며, 부식 생성물 분말의 XRD 분석결과 $FeCl_3$의 peak이 관찰되었다.

3. 이상의 결과로부터, 관 외부의 기포 콘크리트에 존재하는 염소이온에 의해 용접부에서는 깊은 홈(groove)이, 기지부분에서는 pit이 각각 형성되어 콘크리트 내에 묻힌 송수용 강재 파이프의 파손을 일으킨 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 222, *ACI Journal*, 82, 3(1985)
2. J. E. Klater, "Corrosion in Structures, Metal Handbook", 9th ed., Vol. 13, p. 1302, J. R. Davis et al.(ed.), Metals Park, Ohio, 1987
3. C. L. Page, N. R. Short and W. R. Holden, *Cement and Concrete Research*, 16, 79(1986)
4. O. E. Gjorr and O. Vennesland, *Cement and Concrete Research*, 9, 229(1979)
5. M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3rd ed., p. 69, McGraw-Hill, New York, 1986