

강관의 부식현황 및 방식대책

김기태 / 산업과학기술연구소 강재연구실
연구부 주임연구원·공학박사

I. 서론

1. 연구배경

최근들어 강관의 사용 도중에 발생하는 부식으로 인하여 일반 수요자들의 불평, 불만이 자주 제기될 뿐만 아니라 사회적, 법률적으로 까지 문제가 되는 사례가 늘고 있다. 뿐만 아니라 일부에서는 강관의 부식 성질을 문제 삼아 일부 용도에서 강관의 사용을 아예 규격이나 법으로써 금지하려는 움직임들을 보이고 있다.

강관의 부식은 열역학적으로 자발적인 반응으로써 강관의 사용 도중에 일어날 수밖에 없는 현상의 하나이지만, 적절한 여러가지 조치들-예를들면 합금원소의 첨가, 열처리, 피복등에 의하여 그 부식 속도가 충분히 늦춰질 수 있다. 따라서 사용하고자 하는 용도에 알맞는 적절한 성질을 가진 강관을 선택하여 적절하게 시공을 한다면 현재 부식으로 인하

여 겪는 문제들중 상당수는 발생되지 않을 수도 있다. 뿐만 아니라, 강관의 사용 도중에 비정상적으로 심하게 부식이 발생된 경우 그 원인이 소재의 불량에 기인한 것인지 아니면 사용 환경의 특이성에 기인한 것인지 등을 명확하게 밝히는 것도 궁극적으로는 강관의 내식성을 향상시키기 위하여 필수적인 과정이다.

앞으로 강관 사용환경의 다양화와 사용 조건의 열악화 등에 따라 지속적으로 제기될 수 밖에 없는 부식 문제에 능동적이고도 적극적으로 대처하기 위해서는 현재 강관이 사용 용도에 따라 어떤 형태의 부식이 얼마나 문제가 되고 있는가 등에 대한 조사와 분석이 절대적으로 필요하다고 본다. 이러한 분석을 토대로, 사용하고자 하는 용도에 적합한 새로운 강관을 개발하거나, 강관 사용도중의 부식문제 발생의 정확한 원인을 찾아내는 것이 가능하게 될 것이다. 그리고 이러한 과정

을 통하여 강관 수요가에 대한 서비스 및 신뢰도 향상은 물론, 궁극적으로는 고 내식성 신강종등의 개발로 강관의 수요 확대 내지는 신수요를 창출하게 될 것이다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 우선 일반 배관용 소재로 강관이 쓰이는 경우에 있어서의 부식 사례 분석을 통하여 용도(즉 부식환경)에 따라 어떤 형태의 부식이 주로 발생되고 있으며, 그 정확한 부식 원인은 무엇인지, 또 그에 따른 대처 방안은 무엇인지 등을 조사연구하였다.

2. 연구방법 개요

강관 실수요자들을 대상으로 강관의 사용도중에 부식문제가 발생된 시편을 연구 시작 후 10개월 동안(1993. 2.~1993. 11.) 채취하여 강관의 용도 및 사용분위기에 따른 부식상태를 조사 분석하였다. 또한 정확한 원인 분석 등에 필요한 경우 별도로 실험실적 simulation test등도 병행하여 연구하였다. 한편 부식 시편 채취 대상 강종은 연구 의뢰자와의 협의에 따라 생활용수용 강관(흑관, 백관 및 피복관)으로 한정하였다.

총 14건의 부식 발생 사례가 조사되었는데, 이를 부식 유형별로 나누어 보면

- ① 가정용(단독주택, 빌라, 아파트등) 배관재의 부식(외면 pitting등 발생)이 총 6건으로 가장 많았으며,
- ② 전기저항 용접강관(ERW 강관)의 용접부를 따라 선택적으로 부식이 일어나는 소위 구상 부식 문제가 2건,
- ③ 강관 내면의 일반 부식(수용액 부식)이 3건,
- ④ 아연도금 강관의 백청 문제가 2건,
- ⑤ 기타가 1건(304 stainless steel의 pitting 문제)등이었다.

일반 생활용수용 강관의 부식 유형은 크게 외면 부식과 내면 부식으로 나뉘어질 수 있으며, 내면 부식은 다시 구상 부식과 일반 부식으로 구분될 수 있다. 물론 이들은 복합적

으로도 발생이 가능하며, 실제로 일부 시편에서는 구상 부식과 수용액 부식등이 동시에 발생하기도 하였다.

외면 부식은 강관이 설치 또는 매설된 주변 환경(토양, 콘크리트, 발포제등)이 부식 발생의 주요 인자이다. 반면, 내면 부식중 구상 부식은 용접부의 특성이 중요 인자이며, 내면 부식중 수용액 부식은 일반 부식(녹후등)을 일으키게 되는 수질, 온도, pH등 수용액 부식의 일반적 인자들이 작용하게 된다. 따라서 이들 부식 양태에 따른 영향 인자들에 대하여 하나 하나 그 영향 가능성등을 연구하였다.

II. 부식원인 분석 및 대책

1. 외면 부식

강관의 외면이 부식되어 문제가 발생된 경우는 외면의 심한 일반 부식(general or uniform corrosion)과 공식(pitting)의 발생의 두가지 형태가 있었으며, 특히 공식 발생이 문제가 된 경우가 더 많았다. 이것은 강관의 최외면에서부터 발생 시작된 공식이 비교적 단기간내에 관통에까지 이름으로써(일반 부식이 심하게 발생하지 않은 경우에도)누수등이 발생했기 때문이다. 외면 부식의 경우에는 부식의 발생이 관내면을 흐르는 유체와는 상관없이 없기 때문에 강관 자체의 재질적 문제와 강관 외면 주위 환경의 부식성이 문제가 된다. 외면 부식의 각 부식 사례들을 종합하여 토양등 고체 매질에서의 강관 외면 부식의 원인 규명을 종합적으로 정리하였다.

1.1 연구의 접근 방법

강관의 부식 원인 조사는 크게 두가지 방향으로 나뉘어 행해질 수 있다. 첫째는 강관 소재적 측면으로서, 강관 자체의 소재 결함 또는 조관 불량에 의한 결함등 소재적 원인에 의해 부식이 심하게 일어날 가능성이 있으므로 이를 조사하는 것이다. 강의 소재적

측면에서 부식에 영향을 줄 수 있는 항목들은 대개 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 강중의 비금속 개재물
- ② 강중의 S.P등의 불순물
- ③ 강의 미세 조직
- ④ 용접부의 미세 조직 및 불순물
- ⑤ 냉접, penetrator등의 용접 결함
- ⑥ coating 강관의 경우 coating층의 구조 및 결함

본 조사에서는 발생된 부식 형태들이 모두 강관의 용접선과는 관계없이 강관의 외면에 불규칙하게 발생되고 있으므로, 위에 열거한 항목들 중에서 용접부와 관련된 항목들을 제외한 나머지 ①,②,③,⑥항 등을 중점적으로 조사 하였다.

둘째는 강관 주위의 환경적 측면으로서 강관이 접하고 있는 주변 환경의 부식성이 얼마나 높은가를 조사하는 것이다. 본 조사의 경우 강관의 부식이 강관의 내면에서는 거의 발생되지 않은 반면, 주로 외면에서 발생되고 있었다. 따라서 강관의 내부를 흐르는 상수도는 분석의 대상에서 제외하였으며, 강관이 토양, 콘크리트 등의 고체 매질 중에 매설되어 있으므로 이러한 고체 매질 분위기가 어떻게 부식에 영향을 미치는가를 중점 조사하였다.

고체 매질중에 매설된 금속의 부식에 영향을 미칠 수 있는 인자는 매우 많으며, 다른 여타의 부식 형태들(예를 들면, 응력 부식, 수소 취성, 수용액중 부식등)에 비하여 그러한 영향인자들과 그 효과를 정성적, 정량적으로 규정짓는 것이 매우 어렵다. 그러나 일반적으로는 대개 다음과 같은 인자들이 고체 매질의 부식성에 영향을 미친다고 알려져 있다.

- ① 고체 매질의 종류(모래, 점토질, 암석등) 및 상태
- ② 고체 매질의 함수율, 비저항, pH, 산화/환원 전위
- ③ 고체 매질의 함유 성분(금속, 유화물, 황화물, 염류등)

- ④ 여러가지 형태의 galvanic cell (예를들면 통기차 cell, 이종금속 cell등)의 형성 여부
 - ⑤ 미주 전류(stray current) 회로의 형성 여부
- 따라서 본 조사 연구에서는 소재와 환경의 두가지 측면에서 위에 열거한 항목들을 종합적으로 하나 하나씩 조사, 검토하였다.

1.2 원인 조사

1) 소재 조사

① 시편의 채취

강관 부식 시편은 직접 부식 현장을 방문하여 가급적 누수가 진행된 파공 부위를 중심으로 절단 채취하였으며, 이것이 불가능한 경우 현장 조사 이전에 채취되어 있던 것을 분석의 대상으로 삼았다. 배관하고 남은 강관이 있는 경우에 이들도 시편 분석의 참고용 분석 대상 시편들로 삼았다. 채취된 시편은 아연 도금된 백판이거나 아스팔트 도복장 강관이였다.

② 강관의 부식 형태

강관의 내면은 부식이 거의 진행되지 않고 있는 반면, 강관의 외면에는 전면 부식(general corrosion) 또는 공식(pitting)의 형태로 부식이 발생 또는 진행되고 있는 것이 주로 관찰 되었다. 시편들에서 발견된 외면의 부식공들의 모습들 중 한 예를 <그림 1.1>에 나타내었다. 강관 두께를 관통하여 파공의 형태로까지 부식이 진행된 부위를 살펴보면, 관의 내면 쪽은 구멍 주위로 비교적 넓게 부식이 진행되어 두께 감소가 상당히 일어나 있었다.

③ 강의 성분 분석

몇개의 강관들에 대하여 모재 성분(Zn등 coating층 제외)을 습식 분석 방법으로 정량 분석한 결과, 강관 시편의 원소재는 통상적인 배관용 흑관 또는 아연도 강관의 소재로 이용되는 KS D3503에 규정된 SS34 또는 SS41 정도인 것으로 나타났다. (JIS 규격으로는 JIS G3132에 규정된 SPHT1 또는 SPHT2 정도이며, AISI 규격으로는 SAE1008 또는

1006 정도이다)

④ 강관의 조직 검사

시편들의 부위별로, 부식이 심하게 일어나 관통이 일어난 부위, 부식이 pit의 형태로 약간 진행된 부위 및 부식이 전혀 일어나지 않은 건전 부위등을 택하여 각각의 시편 단면에 대하여 광학 현미경 및 주사전자현미경(SEM)으로 미세 조직 검사, 비금속 개재물 검사 및 청정도 검사를 행하였다.

미세 조직 검사: 시편의 미세 조직들은 대부분 잘 발달된 균일 크기의 ferrite(및 일부 pearlite) 결정립 조직을 보여주고 있으며, 평균 결정립 크기는 약 10~15 μ m 정도이다. 또한 일부의 시편에서 혼립 조직이 나타나기도 하였으나, 조사된 시편 모두 부식성에 영향을 미칠만한 조직의 이상은 발견되지 않았다.

개재물 검사: 소재 금속내에 MnS등과 같은 비금속 개재물이 존재하는 경우에는 이것들이 부식의 생성 기점 또는 부식의 쉬운 전과 경로로서 작용을 하게 된다. 따라서, 비금속 개재물이 많고, 크기가 크며, 모양이 불균일 할수록 일반적으로 강의 내식성은 떨어지게 된다. 소재금속에 비금속 개재물이 얼마나 존재하는지를 광학 현미경과 image analyser를 이용하여 분석하였다. 비금속 개재물들은 대개 그 크기가 매우 작고 (대개 2 μ m 이하), 밀도가 매우 낮았다. image analyser로 분석

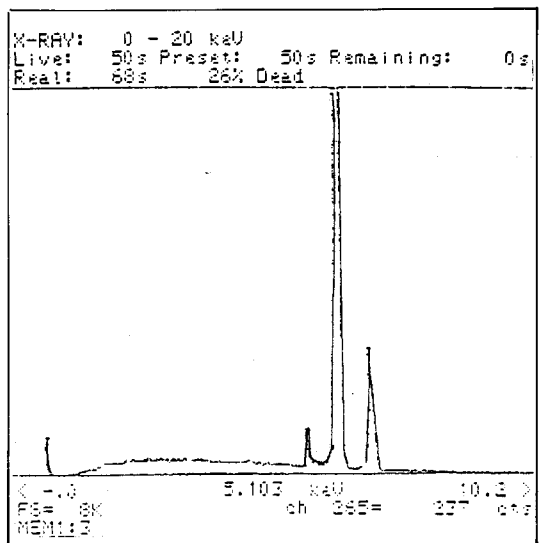


<그림 1.1> 강관의외면 부식과 공식으로 관통이 일어난 모습

한 결과, 청정도(개재물 비율)가 0.012~0.031%정도인 비교적 깨끗한 강임을 알 수 있었다.

주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)검사: 부식이 일어난 부위에 소재의 어떤 금속학적 이상이 없었는지를 알아보기 위해 부식이 일어난 시편들의 부식부위를 절단하여 그 단면을 SEM으로 관찰하고 몇가지 성분 원소에 대해 mapping하여 보았다. 조사된 모든 시편에 있어서 부식이 발생된 부위 근처(부식의 진행 선단 부위)에서 성분이나 미세구조의 특이한 이상은 발견되지 않았다. 또 이 부위들을 EDAX로 분석하여 보았으나 역시 matrix의 Fe peak만이 나타나고 있었다. EDAX측정 결과의 한 예를<그림 1.2>에 나타내었다.

재료내에 어떤 한 부위에 금속학적 이상이 있어서 부식이 이 부위에서 특별히 빠르게 진행 되었을 경우, 부식에 의해 이 부분이 이미 용출되어 없어졌을 가능성은 물론 있다. 그러나 그런 이상이 있다면 부식의 진행 선단 부위에서는 어느 정도 재질의 이상이 나타날 것으로 예상된다. 그런데 조사된 결과들



<그림 1.2> 부식 pit의 edax 측정 결과

은 모두 특이한 이상은 보이지 않고 있다.

한편, 파공이 되었거나 부식이 pit형태로 어느정도 진행된 부위들의 부식 표층부를 SEM으로 관찰한 결과들중 일부를 <그림 1.3>과 <그림 1.4>에 나타내었다. 표층에 부식 생성물들이 덮여 있었다. 이 부식 pit의 중심부 근처에서 부위별로 EDAX분석한 결과들 중 일부를 <그림 1.5>와 <그림 1.6>에 각각 나타내었다.

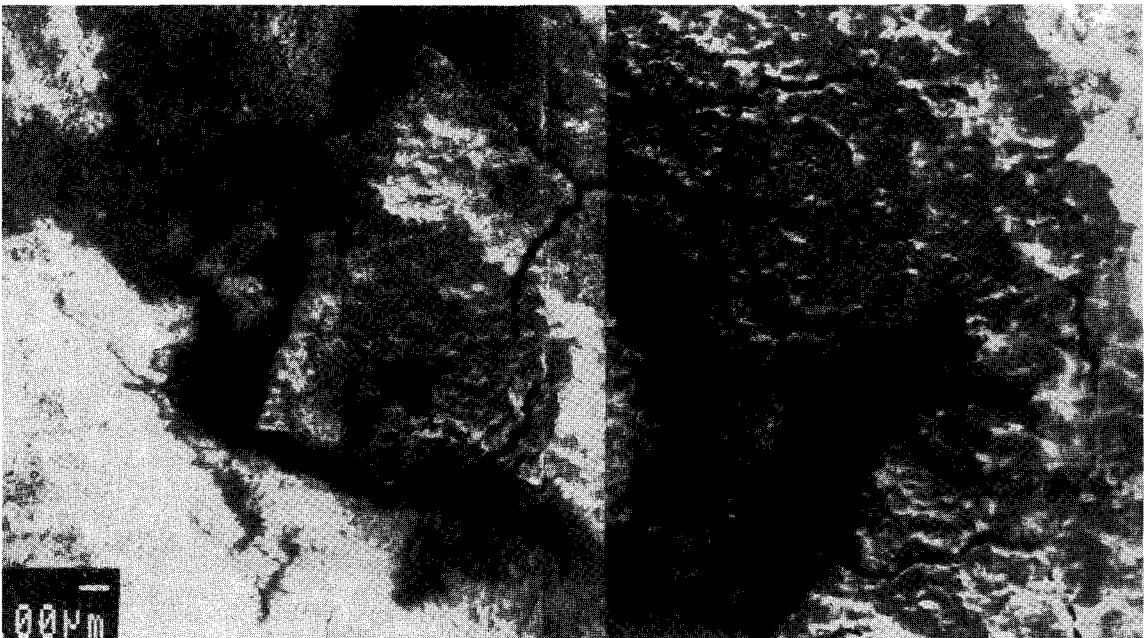
<그림 1.5>에 나타낸 시편의 부식 생성물에서는 Fe 이외에도 Al, Si등이 검출되었으며, 기타 S, Ca 및 K도 소량 검출되었다. 그러나 Cl은 검출되지 않았다. 이러한 부식 생성물중의 Fe 이외의 조성과 성분 함량은 부식 pit 중심부로부터 외곽의 모재부 방향으로 나아가며 측정할수록 감소하였다.

Al, Si등은 토양중 부식에 의한 강의 부식 생성물중에서 자주 발견되는 원소이다. 그런데 pit의 중심부등에서 S, Ca 및 K 등도 검출이 되었으므로 좀더 이들의 분포상태를 알아보고자 pit의 중심부와 외곽 부분의경계 부

분에 대해 성분 mapping 조사를 하였다. 그 결과, 조사된 성분 원소들중 Mn, Al, Si, K등은 별다른 특이한 분포를 보이지 않았으나, S는 pit 내부에서 특정한 위치에 많이 모여 있는 것으로 나타났다. 이것은 pit 내부의 부식 생성물중 FeS 등의 황화물이 존재하고 있다는 것을 보여주고 있다.

반면, <그림 1.6>에 나타낸 시편의 EDAX 분석에서는 Cl, Si, Ca, Zn등이 검출되었다. 이경우 Zn은 강관 표면의 일부 잔존 아연도금층으로부터 검출된 것으로 보이나, Cl과 Ca은 다음절의 고체 매질 분위기 분석 항목에서 보듯이 강관 주변 환경중의 이들 원소의 농도가 높기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 특히 Cl은 강관의 부식을 조장시키고, 부식 반응으로 생겨난 Fe ion과 반응하여 FeCl₃등의 부식 생성물을 형성시키는 것으로 잘 알려져 있는 원소이다.

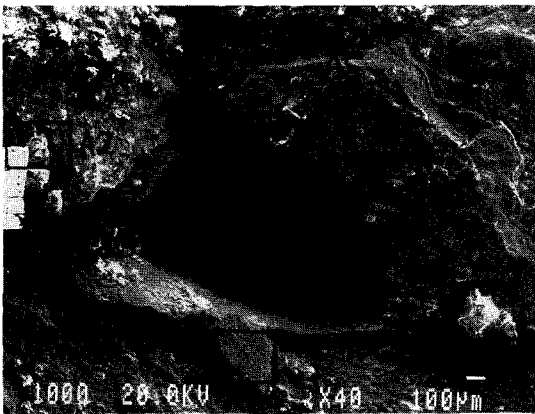
⑤ 강관의 아연 도금 및 도복장 상태
파공이 이미 일어난 부위의 아연 도금 또는 아스팔트 도복장 상태는 시편 채취시 확



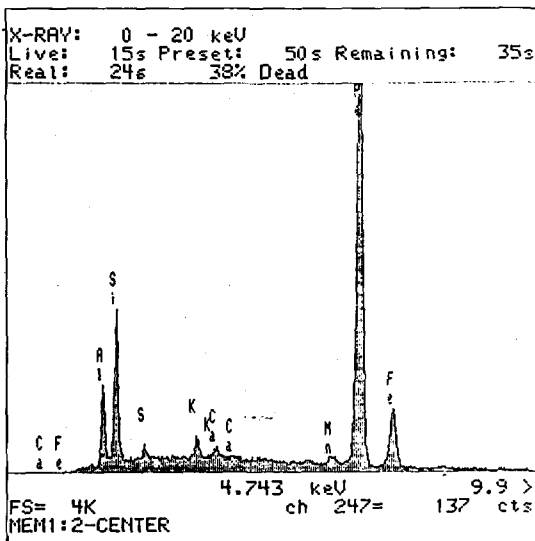
<그림 1.3> 부식 pit의 표층부의 SEM 사진

인할 방법이 없었다. 그러나 파공부 주위와 기타 부식이 일어나지 않은 곳의 Zn도금 상태 및 아스팔트 도복장 상태를 확인한 결과 특별한 coating 상태의 이상은 발견할 수 없었다. 아연 도금층의 두께는 대략 50 μ m 정도였다.

또한 아스팔트 도복장 강관의 경우도, 파공(부식)이 진행되고 있는 부위의 외부 도복장은 이상이 없었으며 도복장을 제거하여야만 발견되었다. 따라서 강관의 도복장 상태는 양



<그림 1.4> 부식 pit의 표층부의 SEM 사진



<그림 1.5> 부식 pit의 표층부의 부위별 EDAX 측정 결과

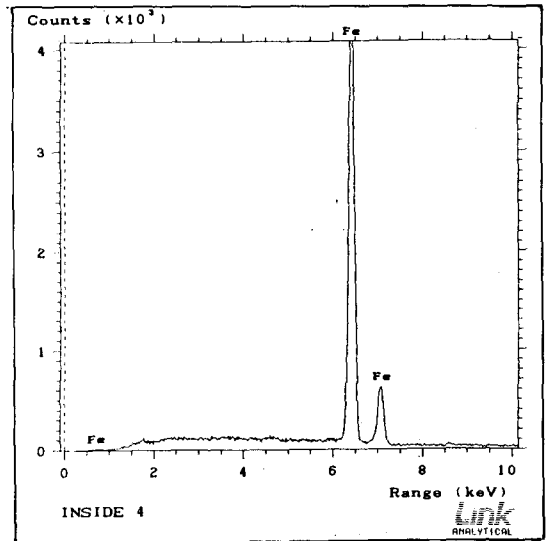
호하였던 것으로 판단되며, 강관 파공의 원인이 도복장 불량에 기인한 것으로는 보이지 않는다.

⑥ 소재 조사 결론

이상과 같이 외면 부식이 일어난 강관을 분석하여 본 결과 소재의 성분, 비금속 개재물, 미세 조직 등에 있어서 특별한 이상은 발견되지 않았으며, 조관후 아연 도금 또는 아스팔트 도복장 등의 과정에서도 문제가 없었던 것으로 판단된다. 따라서 강관의 비정상적 부식의 원인은 소재에 기인하지는 않았던 것으로 판단된다.

2) 부식 환경 조사(고체 매질 분석 및 기타)

강관의 외면 주위 환경은 매설 환경으로서 콘크리트, 토양 및 잡석, 발포(재)층, 단열재(POZOL재:인공생성된 fly ash의 일종으로서 경량 콘크리트 제조시 이용됨)등의 고체 매질이었다. 따라서, 고체 매질이 부식에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이미 부식으로 인하여 강관의 누수가 발생된 곳 주위들과 주변의 아직 부식이 문제되지 않은 곳 등에서 토양, 콘크리트등의 고체 매질을 채취하여



<그림 1.6> 부식 pit의 표층부의 부위별 EDAX 측정 결과

pH, 비저항, 함수율 및 함유 성분등을 측정하였다. 또 이들 고체 매질들과 특성을 비교하기 위하여 포항시 외곽 주변에서 토양 부식성이 크지 않은 한 곳에서 비교용 토양 시편을 채취하였다.

측정된 고체 매질 시편들의 여러가지 성질들을 다음의 <표 1.1>에 나타내었다. 이 표에 나타난 경과들을 보면, 부식이 일어난 곳과 부식이 일어나지 않은 곳 모두 고체 매질이 토양인 경우는 pH가 중성에 가까우며 약알칼리성을 띄고 있는 반면 콘크리트 등인 경우에는 강 알칼리성을 띄고 있다. 일반적으로 토양등 고체 매질의 경우, pH가 4정도 이하일 경우에는 매우 심한 부식을 일으키는 것으로 알려져 있으며, pH가 높아져서 중성이나 약 알칼리성인 경우에는 pH가 직접적인 원인이 된 심한 부식은 잘 일어나지 않는다

<표 1.1> 채취된 고체 매질 시편의 여러가지 성질들

시 편	외관특성	pH	함수율	비저항
비교용 토양	짙은 갈색 진흙, 잔돌 약간	7.78	18.4%	1233kΩcm
부식 토양 #1	적갈색 진흙, 굵은 모래 및 잔돌 다수	7.42	-	-
부식 토양 #2	갈색 진흙, 굵은 모래 및 잔돌 약간	7.87	-	-
부식 토양 #3	갈색 진흙	7.79	-	-
미부식 토양	황색 진흙, 모래 약간	7.67	13.2%	649kΩcm
부식 콘크리트 #1	토양 및 잡석 발포재	9.84	15.6%	5.89kΩcm
		11.88	8.4%	23.17kΩcm
부식 콘크리트 #2	토양, 잡석 및 발포재	12.3	11.8%	-
		12.2	16.3%	-
부식 단열재	부식된 강관 주변에 포설된 단열재	12.57	20.7%	7.5 kΩcm

고 알려져 있다. 물론 pH가 중성이나 약알칼리성인 경우에도 토양의 다른 성질들, 예를들면 불순물 함유량, 토양의 비저항, galvanic cell등에 기인한 심한 부식은 얼마든지 일어날 수는 있다.

본 조사 대상 시편의 경우는 pH가 중성에 가까운 약알칼리성 또는 강알칼리성을 보이고 있으므로 적어도 고체 매질중의 pH가 직접적인 부식의 원인은 아닌 것으로 판단된다.

<표 1.1>의 결과들을 보면, 콘크리트중 부식의 경우와 단열재 중의 부식의 경우에는 토양과 발포재, 단열재등이 모두 알칼리성을 띄고 있는 것으로 나타났다. 정상적인 콘크리트의 경우 종류에 따라 약간 다르기는 하나 보통 pH가 12.5~13.2정도의 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 이것은 주로 콘크리트 속에 함유된 Ca(OH)₂ 때문인데, 이런 pH 값의 범위에서는 강의 표면에 부식을 억제하게 되는 부동태 피막(passive layer)이 잘 형성되게 되어 부식 속도가 늦춰지게 된다. 즉 정상적인 콘크리트라면, 그것에 의한 pH가 강알칼리성이 되고 그안에 들어있는 강관의 부식 속도는 비교적 느리게 된다. 일반적으로 콘크리트의 pH가 11.5이하가 되면 부동태 피막의 형성이 어렵게 되어 강관의 부식속도가 증가하게 되는 것으로 알려져 있다.

본 조사 대상 시료들의 경우, 토양은 pH가 알칼리성을 보이고 있으므로 적어도 pH가 직접적인 부식의 원인은 아닌 것으로 판단되며, 발포재의 경우도 pH가 11.5 보다 약간 높으므로 역시 pH가 직접적인 원인은 아닌 것으로 판단된다. 단 다음항에서 설명하겠지만, 이러한 pH의 효과는 분위기중의 불순물 농도에 따라 달라지게 되므로 불순물의 종류 및 농도와 함께 고려되어야 한다.

한편, 고체 매질들의 함수율과 비저항값들은 자료로 알려져 있는 일반적 토양등 고체 매질의 그것들과 별로 다르지가 않다. 따라서 토양이나 콘크리트, 단열재등의 고체 매질 내

부 함수율이거나 비저항도 심한 부식의 직접적 원인은 아니었던 것으로 판단된다.

고체 매질중에 함유된 성분을 고주파 Plasma 발광 분석 장치(Inductively Coupled Plasma Spectrometer: I.C.P.)를 이용하여 조사하였다. 그 측정 결과를 다음의 <표 1.2>에 나타내었다. 성분 원소가 부식에 미친 영향은 다음과 같이 2가지 경우로 나누어 살펴 볼 수 있다.

① 토양중 부식의 경우

<표 1.2> 시편에 따른 함유 원소량(ppm)

원소	부식 콘크리트 (토양, 잡석, 콘크리트, 발포제등)	
	#1	#2
Cl ⁻	225.9	193.7
SO ₄ ⁻²	35.0	23.6
NO ₃ ⁻²	tr.	tr.
CO ₃ ⁻²	12.2	14.3
Mg	0.44	tr.
Fe	0.17	0.09
Zn	0.08	0.13
Ca	1672.7	1087.1

토양에 함유된 여러가지 원소들 중에서 금속의 부식에 크게 영향을 줄 수 있는 것은 Cl⁻, SO₄⁻² ion 등을 비롯하여 여러가지가 있다. Cl⁻은 다량 존재할 경우에 금속의 공식을 매우 쉽게 유발시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 조사 시편에 있어서는 강관의 부식이 아직 발생되지 않은 미부식 지역의 토양 시편을 제외하고는 부식이 일어난 곳과 일어나지 않은 곳 모두 Cl⁻의 농도가 매우 낮으며, 우리나라 논외의 평균값(10~20ppm)과 유사한 값을 보이고 있다. 따라서 고체 매질중의 Cl⁻ ion은 본조사 대상 시편의 부식의 직접적 원인은 아니었던 것으로 판단된다.

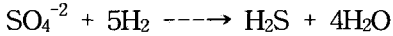
한편, 부식이 일어난 곳에서는 Cl⁻ ion과 마찬가지로 부식성이 높은 것으로 알려진 SO₄⁻² ion의 농도가 부식이 일어나지 않은 비교 대상 위치의 그것 보다도 높게 나오고 있다. 이것은 부식이 일어난 부위에서 황산염 자체에 의한 부식은 물론이고, 더불어 황산염 환원균의 작용에 의한 일종의 미생물 부식이 일어날 가능성이 높음을 보여주고 있다. 고체 매질중에서 금속의 부식을 일으키는 세균류와 그것의 작용 기구는 여러가지 종류가 많

(고체 매질:물=1:1 용해)

원 소	시 편	비교용 토양	부식 토양			비부식 토양	부식 콘크리트		부식 단열재
			#1	#2	#3		토양등	발포제	
Cl ⁻		9.32	13.41	11.84	14.18	136.8	29.43	227.70	271.05
SO ₄ ⁻²		54.45	89.64	105.21	234.99	43.02	222.35	57.29	4007.09
Mg		35.42	12.56	23.63	9.09	81.9	32.04	tr.*	tr.
Fe		8.10	19.58	138.36	3.24	1074.6	301.14	0.18	0.15
Zn		0.342	0.95	0.63	0.50	5.18	5.58	tr.	tr.
Cd		tr.	tr.	tr.	tr.	0.405	0.14	tr.	tr.
Cu		0.158	tr.	0.149	0.95	1.17	0.43	tr.	tr.
As		0.63	0.41	1.98	0.140	11.34	4.59	tr.	tr.
Ca		77.81	52.74	70.20	93.74	57.02	118.44	400.0	0.004
Pb		tr.	tr.	0.81	tr.	6.89	2.07	tr.	tr.
Cr		tr.	tr.	0.27	tr.	1.35	0.54	0.22	0.37
Na		-	-	-	-	-	-	-	246.32

(*: tr. = trace, 검출 가능량 이하, -: = 미조사)

이 있으나, 일반적으로 가장 널리 알려진 것은 다음과 같은 반응식으로 황산염을 환원시켜 H₂S등을 형성 시키는 혐기성의 황산염 환원균이다.



이와같은 과정으로 생성된 H₂S는 부식 분위기의 pH를 낮추는 등 여러가지 부식 반응을 촉진 시키게 된다. 이와같은 반응에 의해 부식이 진행되면 FeS등을 비롯한 여러가지의 S를 함유한 부식 생성물들을 만들게 된다. SEM으로 관찰한 부식 pit 주위의 성분 mapping 결과를 보면 부식으로 인해 움푹 파인 부위의 안쪽에서 S의 화합물이 많이 나타나고 있다.

황산염 환원균은 일종의 세균이기 때문에 번식에 적절한 온도와 습도 및 산소 농도등이 존재하게 되는데, 대개 온도는 약 25~30℃이고, pH는 6~7.5종도이며, 혐기성이기 때문에 공기가 없을수록(산소의 농도가 낮을수록) 좋게 된다. 고체 매질중의 공기 함량은 토질에 따라 다르기는 하지만, 일반적으로는 깊이가 깊어질수록 산소의 농도가 낮아지게 된다. 본 조사 대상 토질의 경우, 앞에서 살펴본 pH값 등의 조사 결과를 보면 이와같은 황산염 환원균등의 번식에 적당한 조건인 것으로 판단된다. 또한 아스팔트 도복장 층의 밀면(도복장 층과 강관의 사이)은 이러한 혐기성 세균이 활동하기에 좋은 부위일 것으로 보여진다.

따라서 토양과 강관의 조건 및 pit에서의 부식 생성물 등을 종합적으로 검토하여 볼 때, 본 조사 시편의 경우 황산염 환원균에 의한 부식이 상당히 일어났던 것으로 판단된다.

② 콘크리트, 발포제, 단열재등 중의 부식의 경우

<표 1.2>에 나타난 부식이 발생한 콘크리트, 발포제, 단열재들 중의 함유 성분을 보면 Cl⁻ ion 또는 SO₄²⁻ ion 의 농도가 높거나, 또는 두가지 ion모두 다 농도가 높게 검출되고

있다. 이것이 강관의 급속한 부식을 초래한 주요 원인의 하나라고 보여진다.

왜냐하면, Cl⁻ 은 농도가 100~200 ppm정도만 되어도 강관 표면의 부동태 피막의 형성을 억제하거나, 또는 형성된 부동태 피막의 파괴를 매우 쉽게 일으키는 등 부식을 조장하기 때문이다. Cl⁻ 은 콘크리트 시공시, 충분히 세척하지 않은 바닷모래를 사용하였거나, 콘크리트의 경화를 촉진하기 위하여 염화칼슘(CaCl₂)을 과다하게 첨가하였거나, 불량 재질의 발포제를 사용하였을 경우에 쉽게 농축이 되어 강관의 부식을 일으키게 된다.

한편, Cl⁻ ion과 마찬가지로 부식성이 높은 것으로 알려진 SO₄²⁻ ion의 농도가 높게 측정된 곳도 있다. 이런 곳에서는 황산염에 의한 부식도 상당히 일어났을 것으로 보인다. 황산염은 애초에 토양에 많이 함유되어 있었거나, 아니면 발포제에 함유된 불순물로부터 나왔을 가능성이 높다. 황산염의 농도가 높은 곳에서는 일반적으로 황산염 환원균의 작용에 의한 일종의 미생물 부식이 일어날 가능성도 높으나, 이 경우는 pH가 매우 높아 이러한 미생물의 번식에 적당한 조건이 아니기 때문에 이로 인한 부식은 별로 없었을 것으로 판단된다.

분위기중에 함유된 다른 성분들중 Fe와 Ca의 농도가 비교적 높게 나온 경우가 있다. Fe의 경우, 원래 함유된 양 외에 부식으로 인해 분위기 내로 용출된 것에 의해 농도가 높아진 것으로 보여지나, 이것은 강관의 부식에 별 영향을 미치지 못한다. Ca는 발포제 내에서 매우 높게 측정되었는데, 이것은 앞에서도 설명했듯이, 콘크리트 시공시에 경화제로서 CaCl₂를 많이 첨가했기 때문인 것으로 추정된다. 이외의 원소들을 미량이기 때문에 부식에 영향을 거의 주지 못했을 것으로 판단된다.

콘크리트, 발포제, 단열재등의 함유물등을 종합적으로 검토하여 볼 때, 본 조사 시편들

의 심한 부식은 분위기 중에 함유된 Cl^- ion 또는/과 SO_4^{2-} 때문인 것으로 판단된다.

한편, 매설 강관이 다른 종류의 금속과 전기적으로 접촉이 되어 있는 경우나, 또는 다른 종류의 금속과 접촉되어 있지 않더라도 고체 매질의 여러가지 성질들(예를들면, 산소 함유량, 수분 함유량, pH등)이 불균일한 경우에는 소위 말하는 galvanic cell이 형성되어, 강관의 부위에 따라 부식이 잘 일어나는 anode 부위와 상대적으로 부식이 덜 일어나게 되는 cathod 부위가 생기게 된다. 고체 매질중에서는 고체 매질의 불균일성 때문에 특히 이러한 galvanic cell이 형성되며, 이러한 galvanic cell을 형성 시키는 인자들은 매우 많다.

따라서 galvanic cell의 형성 여부는 부식 현장을 정밀하게 조사하여야만 파악을 할 수가 있다. 그런데 분석용 시편 채취시 부식 현장을 조사한 바에 의하면 대부분의 경우에 문제가 된 배관은 다른 종류의 금속과의 전기적인 접촉은 되어있지 않거나(매설 강관의 전 line을 확인할 수는 없었으나, 적어도 누수가 문제가된 부위 근처에서는 없었다), <표 1.1>에 나타내었듯이 고체 매질의 여러가지 성질들도 위치에 따라 크게 다르지는 않다. 따라서 극심한 galvanic cell의 형성은 이루어지기 어려운 것으로 보인다. 따라서 galvanic cell의 형성이 매설 강관의 극심한 부식을 가져온 주된 원인이라고 보기는 어렵다. 단, 부분적으로 micro한 galvanic cell의 형성은 얼마든지 가능한 것으로 판단되고, 또 강관 표면에 일단 부식 pit가 형성된 이후에는 pit 부위와 주변 모재 사이에 형성된 galvanic cell이 pit의 성장을 어느정도 촉진시켰을 것으로는 보인다.

그런데 한군데의 부식 현장에서는 강관 line이 한쪽은 토양중에 매설되어 있고 이어서 바로 벽면의 콘크리트 내로 연결되고 있었다. 이렇게 되면 벽면 콘크리트 내의 강관의 표

면에는 부동태 피막이 형성되어 있는 반면, 토양중의 강관 표면은 그렇지 못해서 일종의 galvanic cell이 형성되게 된다. 따라서 벽면 콘크리트와 인접한 토양중에 묻힌 부위의 강관에서 부식이 잘 발생되게 된다. 따라서 이 경우는 강관이 토양 분위기와 콘크리트 분위기를 바로 인접하며 연결되면서 galvanic cell을 형성한 것도 부식의 한가지 원인으로 작용했다고 판단된다.

한편, cathodic protection이라던가, 기타 전기적 회로에 의해 토양내를 흐르던 전류가 예상치 않게 주변에 매설되어 있는 강관등을 타고 흐르게 되는 경우가 있다. 이러한 전류를 미주 전류(stray current)라 하며, 강관을 타고 이러한 미주 전류가 흐르게 되는 경우에는 강관으로부터 전류가 빠져나가는 부분이 심하게(흐르는 전류의 크기 만큼)부식이 일어나게 된다.

미주 전류에 의한 부식의 특징은, 전류가 빠져 나가는 곳에서 부식이 생기게 되므로 강관의 경우 외면에 나타나게 되며 또 그때의 부식 모양이 대개 누질러진 pit의 형태를 띠게 된다. 또 부식 발생 부위가 전체적 전류 흐름으로 볼 때 최소의 저항을 이루는 곳(즉 전류가 흘러들어갈 곳과 가장 가까운 곳)이 된다는 것 등이다.

본 연구의 조사 대상 부식 시편의 경우, 일부 pit의 부식 형태가 미주 전류에 의한 것과 아주 유사하다. 따라서 미주전류에 의한 부식도 일부 경우에는 발생되었던 것으로 추정된다. 그러나 가정용 배관 부식의 경우에는 현장 조사 결과 이것에 의한 부식은 없었던 것으로 판단된다.

미주 전류에 의한 부식의 발생 가능성을 보다 정확히 조사하려면 강관 배관망 인근 공장의 대용량 전기기기의 배치 및 접지 상황, 주위의 cathodic protection 장치 설치 여부, 주위의 다른 배관망 설치 현황등에 대한 엄밀한 조사가 필요하다.

1.3 방식 대책

방식 대책으로는 다음과 같은 것들을 제안한다.

- 1) 콘크리트/토양/발포제/단열재등 내의 염소 이온 및 황산염 이온의 농도를 낮춘다. 그 방법으로는,
 - ① 바닷모래를 이용하지 말고 강모래를 이용한다.
 - ② 바닷모래를 이용할 경우, 충분한 수세를 거쳐야 한다.
 - ③ 콘크리트 경화제로서 염화 칼슘의 사용을 최소화 한다.
 - ④ 불량 발포제 및 단열재 등을 사용하지 않는다.
- 2) 배관 시공시 가급적 galvanic cell이 형성되지 않도록 한다. 그 방법으로는,
 - ① 한 강관 line의 경우는 한가지 분위기(토양이면 토양, 콘크리트면 콘크리트등)만을 지나가도록 배관, 매설한다.
 - ② 부득이 서로 다른 분위기를 지나야 할 경우에는, 분위기 경계면 근처의 강관 연결 부위를 가스켓등을 이용하여 전기적 절연을 시키며 연결한다.
- 3) 일반 아연도금 강관(규격:SPP)보다 아연 부착량이 많은 수도용 아연도 강관(규격:SPPW)을 사용한다.
- 4) 강관에 희생 양극을 부착시키거나, 음극 방식을 실시한다.

1.4 결론

고체 매질중의 배관 부식 원인을 조사한 결과 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 1) 강관이 매설된 토양/콘크리트/발포제/단열재 등을 조사 분석한 결과, 부식이 일어난 곳의 산도(pH), 매질 비저항, 함수율등은 별 이상을 보이지 않은 반면, 염소이온 또는 염소 이온 및 황산염 이온의 농도가 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 일부 부식 파공 부위

에서도 염화물 및 황화물이 다량 검출되었다. 따라서 이들 염소 이온 및 또는 황산염 이온의 높은 농도가 부식의 직접적 원인이었던 것으로 판단된다. 이들 이온들은 배관 시공시 사용된 바닷 모래등으로부터 추출된 것으로 추정된다.

2) 강관의 매설 상황에 따라 galvanic 부식(토양/콘크리트)과 미주 전류에 의한 부식도 일부 발생된 것으로 판단된다.

3) 소재로 쓰인 강관의 조성, 미세 조직, 개재물, 아연도금 및 아스팔트 도복장 상태등을 조사한 결과 특이한 이상은 발견되지 않았다. 따라서 파공등의 심한 부식의 원인은 소재가 아닌 부식 환경으로부터 기인한 것으로 판단된다.

2. 구상 부식

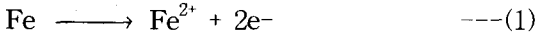
전봉 강관(Electrical Resistance Welded (이하 ERW라 약칭한다) Steel Pipe)을 급배수, 냉각수, 공업용수, 해수등의 배관용으로 이용할 때 용접부위를 따라 선택적으로 부식이 일어나는 경우가 많이 있다. 이 때 부식된 단면을 잘라보면 <그림 2.1>에 나타난 것처럼 용접선을 중심으로 그 근처(용접부 또는 용접 열 영향부)가 마치 도랑(溝)이 파진 것처럼 선택 부식을 당한 모습을 보이게 되므로 이와같은 부식 현상을 구상(溝狀) 부식(grooving corrosion)이라 부른다. 구상 부식이 발생되면 강관의 모재부는 부식이 약간 일어나게 되는 반면 용접 부위에서는 심한 부식이 일어나게 되어 결국에는 관통까지도 일어나게 된다.

2.1 발생원인

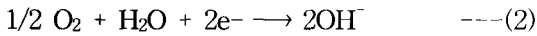
구상 부식의 발생원인으로는 용접부와 모재부의 전기화학적 거동 차이, 강중의 비금속 개재물에 의한 영향등이 주로 거론되고 있다. 이들에 대해 자세히 검토, 조사해 보기로 한다.

- 1) 갈바닉 셀(Calvanic Cell)의 형성

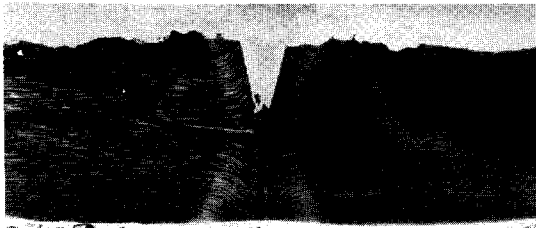
탄소강 또는 저합금강의 해수(또는 인공해수) 분위기하의 부식은 용액의 산도(pH)가 거의 중성에 가까우므로 일반적으로 산소의 환원 반응에 의해 제어된다. 다시 말하여 부식 반응의 양극 용해 반응이 다음과 같은 Fe의 산화반응인데 비하여



환원 반응은 다음과 같은 산소의 환원 반응이 된다.



이와같은 산소 환원 반응의 제어하에서는 부식 반응이 산화가 일어나는 영역 및 환원이 일어나는 영역으로 분리되어 일어나는 소위 부식 cell이 형성되기 쉽다. 다시 말하여 재료에 용접부, 열 영향부 및 모재부 등과 같이 미세 조직 및 성질들이 다른 부위들이 존재하면 이들의 성질에 따라 산화가 쉽게 일어나는 곳과 환원이 쉽게 일어나는 곳 등으로 구분이 생기게 되어 소위 말하는 선택적 부식(local corrosion)이 일어나게 된다.



<그림 2.1> 강관의 사용 도중에 발생된 구상 부식의 예

모재부와 열 영향부 및 용접부의 전위에 따른 양극 용해 반응 속도(양극 전류밀도)를 개략적 그림으로 나타내 보면 다음의 <그림 2.2>와 같이 된다. 이와같이 한 시편내에 모재부, 열 영향부, 및 용접부가 함께 존재하는 시편을 해수와 같이 전기적 전도도가 비교적 좋은 부식 매질 안에 놓아두게 되면 시편에 걸리게 되는 전위는 각 부위에 관계없이 하나의 전위, E로 같게된다. 그렇게 되면 <그림 2.2>에서 볼 수 있듯이 각각의 부위의 양

극 전류 밀도는 i_1, i_2, i_3 로 다르게 된다. 따라서 각각의 부위에 따라 부식 속도의 차이가 생기게 된다. 그런데 <그림 2.2>에 나타낸 경우처럼 열 영향부나 용접부가 일정 전압하에서 모재부보다 높은 부식전류값을 갖는 거동을 보인다면 용접부에서의 선택적 부식이 일어나게 된다.

실제로 ERW 제조한 일반 SPHT2 강관의 모재부와 용접부의 산소포화 3.5 wt % NaCl 용액에서의 분극 곡선을 구한 결과를 <그림 2.3>에 나타내었다. 여기에서 보듯이 용접부위의 부식 전위가 모재부 보다 약 30mV 정도 낮을 뿐만 아니라, 양극 분극 거동도 전위 증가에 따른 전류 밀도값의 증가율이 용접부위가 더 빨리 증가함을 알 수 있다. 다시 말해서 용접부위가 모재부 보다 더 빨리 용해 될 수 있음을 보이고 있다. 이것은 심한 구상 부식이 발생할 가능성이 있음을 보여주고 있는 것이다.

이렇게 모재부와 용접부의 부식 평형 전위 및 분극 거동에 차이가 나는 경우는 인공 해수중에서 용접부의 평형전위가 모재부에 비하여 약 70 mV 정도나 낮은 경우도 보고 되고 있다. 이 경우 부위별 분극 거동도 역시 용접부가 모재부보다 약간 더 양극 용해 속도가 큰 것으로 알려졌다.

한편, 이러한 용접부와 모재부간의 전기화학적 특성 차이는 용접후 열처리 과정에 의해서 상당히 해소될 수 있는 것으로 알려져 있다. 즉 seam annealing등의 용접후 열처리에 의해 모재부와 용접부의 조직 차이를 줄여주게 되면 두 부위간의 평형전위나 분극 거동의 차이가 거의 없어지게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 일반적으로는 모재부와 용접부의 미세 조직이 다를 경우 용접후 열처리가 내 구상 부식성의 증가에 기여를 한다고 말할 수 있다. 그러나 한가지 주의하여야 할 것은 열처리에 의해 시편 전체의 부식 속도(균일 부식 또는 공식등)가 증가될 수도

있다는 점이다.

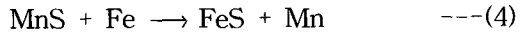
이상의 결과로 볼 때 용접부와 모재부의 미세 조직 차이등에 의해 형성된 일종의 galvanic cell이 용접부의 선택적 부식을 일으키는 한가지 주요 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

2) 강중 비금속 개재물의 영향

ERW 강관은 용접이 되어지는 양끝이 고온으로 가열되며 압력에 의해 붙게 되므로 용접부위의 단면을 살펴보면 <그림 2.1>에 나타낸 것처럼 용접선을 중심으로 metal flow가 강관 표면에 수직으로 발달하게 된다. 그리고 용접후 대개는 용접 bead를 제거하게 되므로 이와같은 띠(band)모양의 metal flow가 그대로 강관 표면에 노출되게 된다. 따라서 만일 재질내에 MnS등과 같은 개재물들이 존재하게 되면 이러한 metal flow를 따라서 개재물들이 노출되게 된다.

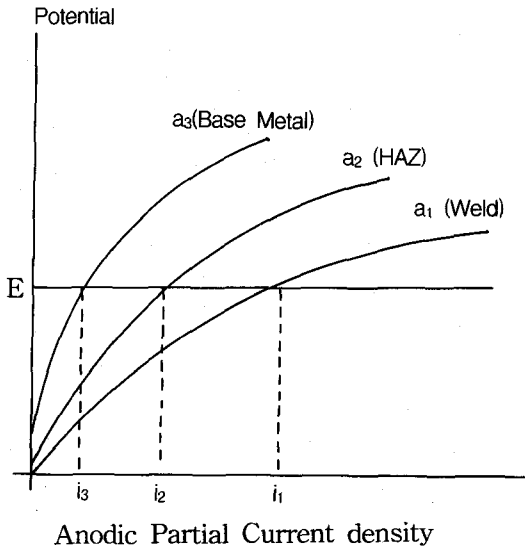
한편 강중의 S는 대개 MnS의 형태로 존재하게 된다. 그런데 ERW 용접시에는 용접 부

위가 용접 조건에 따라 다르기는 하지만 대개 약 1600℃까지 가열되어 순간적으로(대개 0.1초 이내) 용해가되며 압착된 후 급속 냉각되어 약 5초 후 정도에는 약 400℃ 정도까지 떨어지게 되고 이어서 수냉에 의해 약 10 초 후에는 상온까지 떨어지게 된다. 이와같은 급속 가열 및 냉각의 과정 중에서 용접부 또는 열 영향부의 온도가 MnS의 용점인 1530~1620℃를 넘게될 수가 있으므로 MnS는 다음의 두가지 반응으로 전부 또는 일부의 분해가 일어나게 된다.



그리고 다시 냉각 과정 중에 MnS로 재석출하게 된다. 그런데 MnS의 용해 이후, 급속 냉각의 과정을 거치게 되는 동안 용해된 S는 재석출 되는 MnS 주위에 S 또는 FeS의 고용체 형태로 남게 되어 이 부위의 S 함량이 높아지게 된다.

또 조관 과정의 온도가 1600℃ 정도까지 높아지지 않는다 하여도 ERW 방법은 가열 속도가 매우 크므로 이러한 급속 가열에 의해 1200℃ 이상 정도만 되면 MnS 석출물 주위에는 앞의 (4) 반응식에 의해 FeS의 얇은 용융 피막이 형성되고, 이 용융 피막은 급속한 냉각 과정 중에 거의 그대로 굳어지게 되어 MnS 주위의 S 농도를 증가시키게 된다. 이와같이 S 농도가 증가된 층은 MnS라든가 주위의 S가 농축되지 않은 기지에 대하여 anode로 작용을 하게 되어 부식 분위기하에서 이 부분이 제일 먼저 용해가 일어나게 된다. 그리고 이 부분의 용해가 일어나게 되면 일종의 공식(pitting)이 일어나는 것과 같이 되어 이 주위의 pH가 낮아지게 되고 따라서 MnS의 용해가 뒤 따르게 된다. 이러한 MnS의 용해를 시작으로 용접부위의 구상 부식이 발달하게 된다. 반면 모재부에 존재하는 MnS의 경우에는, 모재부가 급속 가열, 냉각의 열처리 과정을 거치지 않으므로 MnS 주



<그림 2.2> 모재부, 열영향부 및 용접부의 전위에 따른 양극 용해 반응 속도

위에 S가 농축된 부분이 존재하지 않게 되고, 따라서 이 부분에서의 부식이 촉진되지 않으므로 MnS 석출물을 중심으로한 부식이 잘 일어나지 않게 된다.

따라서 S의 함량이 비교적 높은 일반 SPHT2등의 소재를 써서 제조한 강관의 경우에는 조관 공정이 정상적으로 잘 진행되어 냉접이나 penetrator등과 같은 용접 결함이 발생되지 않았다 하더라도 구상부식이 발생할 가능성이 높다. 물론 냉접이나 penetrator등과 같은 용접 결함이 존재하는 경우 또는 비정상적으로 용접 부위에 MnS등의 개재물들이 석출되는 경우에는 구상 부식은 심각하게 발생되게 된다.

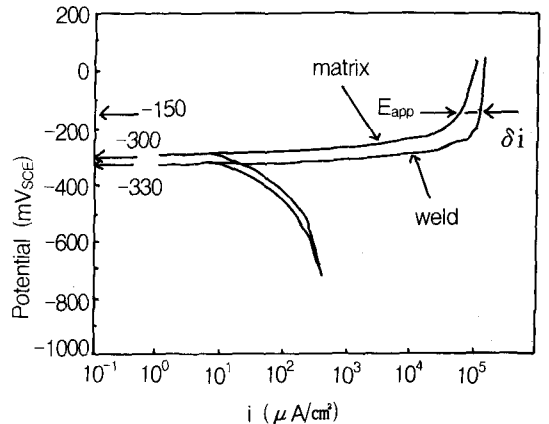
3) 기타 인자의 영향

ERW 용접부위(열 영향부 포함)의 폭은 보통 매우 좁으므로 모재부에 비해 면적이 상당히 작게된다. 그런데 용접 부위는 부식이 일어나는 anode로 작용하고 모재부는 cathode로 작용을 하게 되므로 galvanic 부식의 면적 효과(area effect)에 의해서도 용접부의 부식이 촉진되어 구상 부식성이 증가하게 된다.

용접부와 모재부의 조직(상)차이 이외에 결정립의 크기도 큰 차이를 보일 경우가 있다. 그러나 결정립의 크기 자체는 각 부위의 부식 전위에 별 영향을 주지 못한다. 다만 일반적으로 불 때 입계가 입내보다 내식성이 취약하기 때문에 입계 부식이 일어나는 경우에는 결정립의 크기가 작을수록 입계 면적이 증가하여 내식성이 저하될 수 있다. 그런데 구상 부식의 경우에는 부식 양상이 입계 부식이 아닌 용접부위 전체의 부식 형태로 발달하게 되므로 모재부위와 용접부위간의 입도 차이로 인한 효과는 거의 없는 것으로 보인다.

한편, 모재 금속의 성분(합금 원소)에 따라서도 내구상 부식성은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 합금 원소의 첨가에

의하여는 내구상부식성이 증가하게 되며 그 이유는 다음의 두가지로 설명된다. 하나는 합금 원소의 첨가에 의해 MnS를 제거하거나 또는 다른 형태의 황화물로 만듦으로서 구상 부식에 미치는 S의 효과를 줄이는 것이고, 다른 하나는 원소 첨가에 의해 ERW 용접 과정 중의 급열 급냉에 의한 용접부의 미세 조직이 모재부와 달라지는 것을 억제하는 것이다. 이러한 성질을 가진 합금 원소로는 대개 Cu, Ni 및 희토류 원소 (REM) 등이 알려져 있으며, 이외에도 Cu-Sb, Cu-Ti 및 Cu-Ti-Cr 등의 미량 첨가도 내 구상부식성을 향상 시킨다고 알려져 있다.



<그림 2.3> ERW 제조한 일반 SPHT2 강관의 모재부와 용접부의 분극 곡선

산소 포화 3.5wt % NaCl 용액,
분극 속도 = 0.5mV/sec

2.2 방지 대책

강관의 내 구상 부식성을 증가시키기 위해서는 다음과 같은 처리를 하는 것이 바람직하다.

- 1) 일반 SPHT2 또는 SPHT1 급의 강종은 S 함량이 높아서 내구상 부식성이 열악하므로 강관의 사용 매질의 부식성이 높은 조건에는 이런 강종의 사용을 지양하고, 내구상 부식성이 향상된 강종

(PACOS등)을 이용한다.

- 2) 강관 원소재 제조시 강종의 S 함량을 최대한 낮추고(최소 0.005 wt % 이하), Cu, Ni, 희토류 원소(REM) 등의 내식성 향상 합금 원소를 첨가한다.
- 3) 조관 용접후 열처리를 행한다.
- 4) 조관 용접 공정중의 정확한 가열, 냉각 온도 조절등 용접 방법을 최적화 한다.

2.3 결론

- 1) 구상 부식의 주요 발생 원인은 주로 ① 모재의 높은 S 함량, ② 모재와 용접부의 조직 차이에 의한 두 부위간의 전기 화학적 성질 차이(부식 전위 및 분극 거동)등에 기인 한다.
- 2) 강관의 내 구상 부식성을 증가시키기 위해서는 ① 강관 소재 측면에서, 강종의 S 함량을 최대한 낮추고(최소 0.005 wt % 이하), Cu, Ni, 희토류 원소(REM)등의 내식성 향상 합금 원소를 첨가하며, ② 강관 제조시에는, 조관 용접 공정중의 정확한 가열, 냉각 온도 조절등 용접

방법을 최적화 하고, 조관후 열처리를 실시한다.

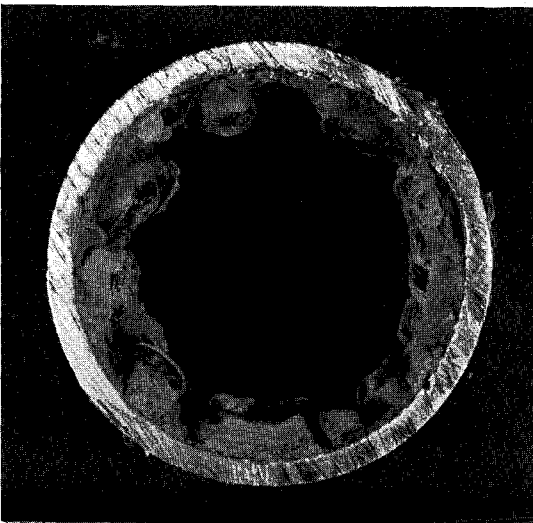
- 3) 강관의 사용 매질의 부식성이 높아 구상 부식이 잘 발생하는 경우에는 일반 SPHT1,2 등의 강종의 사용을 지양하고, 내구상 부식성이 향상된 강종(PACOS 등)을 사용하는 것이 바람직하다.

3. 수용액 부식

생활용수용 강관의 내면이 심하게 부식되어 문제가 발생하는 경우는 크게 보아 두가지 유형이 있다. 하나는 공식 또는 일반 부식이 심하게 일어나 강관 두께의 감소가 일어나는 경우이며, 다른 하나는 부식이 진행됨에 따라 부식 생성물(rust/scale)이 형성되고 이것이 관 내부에 쌓임으로써 오히려 관 내경의 감소가 일어나게 되는 경우이다. 후자의 경우에는 다음의 <그림 3.1>에 나타낸 것처럼 소위 ‘녹혹’ 이라고 하는 두터운 scale 층이 발생되게 되며, 이로인해 다음과 같은 문제들이 발생하게 된다.

- ① 부식 생성물이 관을 점점 막게됨에 따라 pumping 압이 높아져야 되고 따라서 운전 비용등이 상승.
- ② 부식으로 인한 구멍 발생에 의해 물과 수압의 손실 발생.
- ③ 누수 또는 막힘으로 인해서 관, 보일러, header등의 교체 필요.
- ④ 물의 적수(赤水) 현상, 녹, 냄새, 맛 등으로 인한 소비자 불만 증대.

특히 ④항의 문제점은 강관내의 부식으로 형성된 녹혹의 일부가 떨어져 나와 물의 색깔을 붉게 만들고(소위 적수현상), 물에서 과도한 철분 냄새와 녹맛이 나게되는 원인이 되고 있다. 따라서 이 문제점은 강관을 통하여 이송된 수돗물을 음용수로 이용하는 일반 국민의 육체적 건강상 문제와 이에 따른 심리적, 사회적 문제를 일으키게 되기 때문에 그 원인 규명과 대책 수립이 반드시 필요하다고



<그림 3.1> 아연도 강관의 내면에 수용액 부식으로 인하여 발생된 녹혹

본다. 본 절에서는 적수가 문제된 배관재 시편과 그 수질의 분석등을 통하여 '녹혹'의 발생 원인과 그 방지 대책등을 밝히고자 한다.

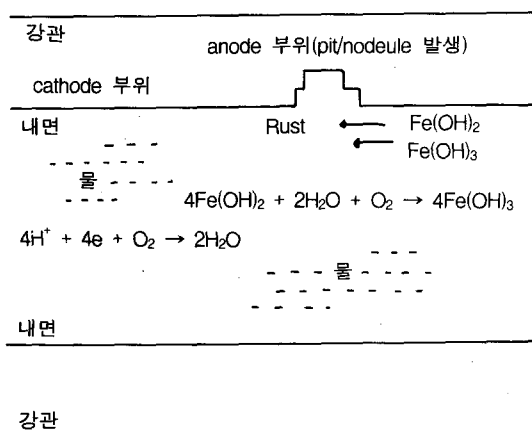
3.1 녹혹 발생 상수도용 배관재의 부식 상태 분석

1) 부식 상태

아연도 강관의 외부는 거의 부식이 일어나지 않은 반면, 내부는 전면에 걸쳐 매우 두꺼운 적갈색 녹층이 형성 되었다. 특히, 소위 말하는 녹혹(scale nodule)이 많이 발생되어 있었다. 이 녹혹 부위는 외면의 적갈색 부위와 내면의 흑갈색 부위로 이루어져 있으며, nodule scale을 제거 시키면 모재 내부가 심한 공식(구멍 부식)형태로 파여져 있는 것이 대부분이었다. 용접선을 따라 부식이 선택적으로 일어나는 소위 구상부식은 약간 진행되고 있었으나, 녹혹에 비해 심각한 정도는 아니었다.

2) 녹층의 성분

X-ray diffractometer(XRD)를 이용하여 녹혹 부위의 조성을 조사한 결과, 녹층의 조성은 대부분 γ - 및 α -FeOOH인 것으로 나타났으며 Fe₃O₄도 일부 검출이 되었다. 이러한 녹층의 조성은 대부분의 수용액 부식의 경우



<그림 3.2> 강관의 수용액중의 부식 반응과 생성물

에 전형적으로 나타나는 것이다.

3) scale nodule의 발생 기구

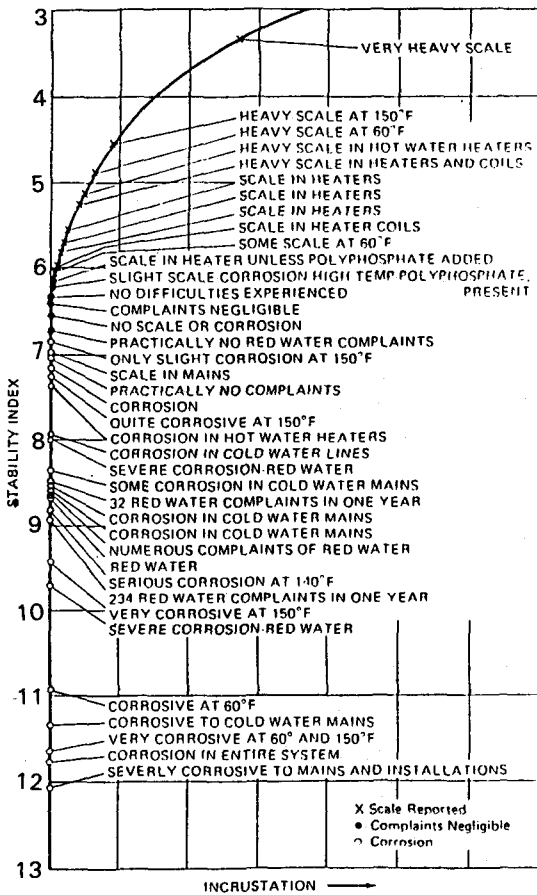
철의 수용액 부식시 nodular type의 scale 발생 기구는 공식 발생의 기구와 유사한 것으로 알려져 있으며, 생성된 pit 주변에 scale의 nodule이 형성되는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 다음의 <그림 3.2>에 개략적으로 묘사해 놓은 것과 같이 부식 반응에 의해서 pit가 형성되며 그에 따라 Fe ion이 용출되는 부위 바로 옆에서는 부식 반응의 상대 반응인 cathodic 반응이 일어나게 된다. 이때 이 cathodic 반응의 생성물이 수도물과 같은 중성 용액에서는 OH⁻ ion인 것이 보통이다. 따라서 이 수산기 이온과 부식 생성물이 서로 반응하여 FeOOH를 형성하게 된다. 그리고 이 철의 수산화물은 다시 용존 산소와 반응하게 되어 여러가지 형태의 철 산화물들, 예를들면 Fe(OH)₃, Fe₃O₄, Fe₂O₃ 등을 형성하게 된다.

3.2 상수도 수질 분석

녹혹이 심하게 발생한 지역의 상수도를 채취하여 수질 분석을 행한 결과는 다음의 <표 3.1>에 나타낸 것과 같다. 또한 이표에는 팔당과 영등포 수원지에서 채취된 물의 수질의 검사 결과도 함께 나타내었다.

이 <표 3.1>에서 보듯이 부식 현장에서 채취된 시료에서는 Cl⁻ 이나 SO₄²⁻ 와 같이 부식을 잘 일으키는 것으로 알려진 성분들의 농도가 그다지 높지 않다. 따라서 이들 성분에 의한 부식은 아닌 것으로 판단된다. 또한 pH도 중성을 보이고 있어 역시 녹혹 발생의 직접적 원인은 아닌 것으로 판단된다.

반면 물의 경도는 매우 낮은 값을 보이고 있다. 일반적으로 철의 부식 속도는 이러한 연수중에서가 경도값이 높은 경수중에서 보다 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 수질의 수화학(water chemistry)적인 특징이 녹혹 발생을 조장 시킨 것으로 판단된다. 이 점에 대해서 다음 절에서 좀더 자세히 분석



<그림 3.3> Ryznar 안정화지수(RI)값과 실제 부식의 발생관계

3.3 부식 원인 분석

일반적으로 수도용 아연도 강관의 심한 녹혹 발생 내지는 적수 현상의 원인으로는 다음의 3가지로 정도가 중요하게 작용하는 것으로 알려져 있다.

1) 아연도 강관을 온수용으로 이용하였을 때는, 상온용으로 이용하였을 때와는 달리 아연이 철에 대한 희생양극으로서의 작용을 못하고 오히려 철의 부식을 조장하는 성질이 나타나게 된다. 즉 상온 근처에서는 철에 비해 아연의 부식 전위가 낮아 철 대신 아연이 녹아나게 되나, 온도가 약 60℃ 이상이 되면

부식 전위가 반대로 아연보다 철이 낮게 되어 아연 대신 철이 녹아나게 된다. 따라서 이런 경우에는 강관의 부식이 심하게 일어나게 된다. 그러나 본 부식 문제의 경우에는 강관의 용도가 상온의 상수도용이었으므로 이러한 전위 역전이 부식의 원인은 아닌 것으로 판단된다.

2) 강관내를 흐르는 물중의 용존 산소가 통상 수준보다 높을 경우에 비정상적으로 심한 부식이 일어나게 된다. 용존 산소량은 용수 배관중의 가압 pump, 저수조, 폭기장치등의 설치 구조등에 영향을 받으므로, 이들에 의해 용존 산소량이 영향을 받았는가를 검토해 볼 필요가 있다.

<표 3.1> 상수도 수질 검사 결과

(단위:mg/l - pH 및 온도 제외)

	시료1	시료2	시료3	팔 당	영등포
pH	7.1	7.3	7.3	6.90	7.0
경도	47.6	51.9	55.4	46.18	49.68
증발잔유물	103.2	98.5	101.1	-	-
Na	-	-	-	4.0	4.5
K	-	-	-	1.2	1.6
Ca	13.5	25.2	18.6	12.68	20.55
Mg	-	-	-	3.74	10.68
Cl	17.8	22.5	23.7	9.21	12.17
SO ₄	13.3	9.3	11.9	-	-
SiO ₂	-	-	-	5.7	5.0
Fe	0.213	0.157	0.184	0.03	0.008
Alkalinity	38.21	36.37	37.93	31.92	34.48
온도(℃)	16.0	15.7	15.6	11.11	11.01

3) 강관내를 흐르는 물의 조성에 따라 철의 용해가 쉽게 일어나는 수질이 있다. 예를 들면, Cl⁻ 또는 SO₄²⁻ 등의 농도가 비정상적으로 높다던가, pH가 너무 낮다던가 또는 물의 Ca 경도가 너무 낮다던가 하는 것 등이다. 이와같이 물의 화학적 성질이 강의 부식에 미치는 영향을 하나의 지표로서 나타내려는 노력이 오래 전부터 진행되어 왔으며, 이러한

지표 중의 하나로서 Langelier 포화 지수(Langelier Saturation Index)가 있다. 이 지표는 강관의 표면에 보호피막의 역할을 하게 되는 CaCO₃층의 형성이 수용액이 가진 조건에서 화학적으로 가능한가 아닌가를 판단내리는 것이다.

다시 말해서 수용액중의 CO₃⁻² 이온이 carbonate 형태로 강관의 표면에 석출을 하게 되면 이것이 일종의 강관 보호 피막의 역할을 하게되어 더 이상의 강관 용해를 억제하게 되는 반면, CO₃⁻² 이온 상태가 안정하게 되면 이 용액은 강관의 지속적인 부식을 가져오게 되고 이것이 심한 경우에 녹혹의 발생등을 유발하게 되어 적수현상을 일으키게 되는 것으로 알려져 있다.

Langelier 포화 지수는 수용액의 포화 pH_s(saturation pH)를 계산해 내고, 이 값과 실제 측정된 수용액의 pH 값의 비교를 행하는 것이다. 즉, Langelier Index(LI)는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Langelier Index(LI)} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

여기서, $\text{pH}_s = A + B - \log[\text{Ca}^{++}] - \log[\text{total alkalinity}]$

A, B는 각각 수온과 증발 잔류 총량에 따른 상수값들로서 다음과 같은 값들을 갖는다

수온(°C)	A	증발 잔류 총량(mg/l)	B
0	2.60	0	9.70
4	2.50	100	9.77
8	2.40	200	9.83
12	2.30	400	9.86
16	2.20	800	9.89
20	2.20	1000	9.90
25	2.10		
30	1.90		
40	1.70		
50	1.55		
60	1.40		
70	1.25		
80	1.15		

이때 tptal alkalinity는 중화 적정에 의해서

또는 다음 식으로부터 구한다.

$$\text{즉, } [\text{Alk}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

total dissolved soild는 증발 잔유물 측정 또는 다음 식으로 구한다.

$$\text{즉, TDS} = 0.6(\text{alkalinity}) + \text{Na} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Cl} + \text{SO}_4 + \text{SiO}_2 + (\text{NO}_3\text{-N}) + \text{F}$$

만일 LI 값이 '0' 이면 이 수용액은 화학적으로 평형 상태에 있는 것이고(CO₃⁻²에 대해), 만일 양의 값을 가지면 CaCO₃의 석출물층이 형성되어 강관의 부식이 억제되고, 반대로 음의 값을 나타내면 강관의 부식이 일어나게 되는 것을 뜻한다.

이와같이 수용액중의 주요 이온 성분들의 화학적 안정성(즉, 화합물의 형태로 석출할 것인가, 아니면 이온상으로 해리될 것인가)을 가지고 수질의 강의 대한 부식성을 평가하는 지수는 Langelier 포화 지수 이외에도 5, 6가지가 있다. 그중의 하나로서 수용액의 부식성 평가시 많이 사용되는 것에 Ryznar 안정화 지수(stability index)가 있다. Ryznar 안정화 지수는 다음과 같이 정의되며, 그 값에 따른 수용액의 부식성 정도는 다음의 <그림 3.3>에 나타낸 것과 같이 되는 것으로 조사된 바 있다.

$$\text{Ryznar Index (RI)} = 2\text{pH}_s - \text{pH}$$

Langelier 포화 지수 또는 이와 유사한 원리의 Ryznar 안정화 지수(stability index)에 의한 수질 분석 결과는 상수도관등에서 자주 나타나는 적수(red water) 현상등을 잘 설명하는 것으로 알려져 있다. 즉 LI 값이 음이거나, RI 값이 7보다 크게되면, 적수현상이 나타날 가능성이 높은 것으로 알려졌다. 반면, LI값이 양인 경우에는 시간이 지남에 따라 관 내부에 CaCO₃의 너무 scale층이 두껍게 형성될 수가 있게 되고, 이것은 보일러관 같은 경우에는 열효율을 떨어뜨리는 등의 악영

향을 미치게 된다. 따라서 강관의 방식면에서는 LI값이 너무 크지않은 양의 값을 나타내는 것이 최적인 것으로 판단된다.

따라서 앞의 <표 3.1>에 나타낸 수질 검사 결과로부터 수질의 LI 및 RI를 계산해 보았다. 그 결과를 다음의 <표 3.2>에 나타내었다. 표에서 보듯이 조사된 수질의 경우에 모두 LI 지수 및 RI 지수가 강의 심한 부식이 일어날 것임을 가리키고 있다. <표 3.2>에 나타낸 RI 값을 <그림 3.3>의 자료와 비교해 보면 현재 우리나라 상수도 수질의 부식성이 전체적으로 매우 높음을 알 수가 있다.

<표 3.2> 상수도의 Langelier Index(LI) 및 Ryznar Index(RI)

	시료1	시료2	시료3	필 당	영등포
LI	-2.16	-1.72	-1.83	-2.59	-2.24
RI	11.42	10.74	10.96	12.08	11.48

· 증발 잔유물의 양을 10 (mg/l)으로 가정한 계산치 임.

3.4 부식 억제 대책

수도용 강관의 녹취 발생을 억제하여 궁극적으로 적수 발생을 막기 위해서는 다음과 같은 방법들이 적극적으로 이용되어야 할 것이다.

- 1) 용존 산소의 제거:부식 반응의 상대 환원 반응이 용존 산소의 환원 반응이므로 수중의 용존 산소를 제거하여 주면 부식이 억제 될 수가 있다. 용존 산소를 제거하는 방법으로는 filter membrane 을 이용하는 방법등이 있다.
- 2) inhibitor의 사용:인산염등과 같은 부식 억제제(inhibitor)를 적정량 첨가하여 강의 부식 속도를 늦출 수 있다. 그러나 이 방법은 수돗물과 같은 음용수용에는 적용하기가 어렵다.
- 3) anodic 또는 cathodic protection:희생 양극 설치, 외부 전원 공급등과 같은

anodic 또는 cathodic protection 방법을 적극적으로 실시한다.

- 4) 수처리:정수장등에서 Ca(OH)₂ 와 같은 약품을 수용액 중에 투입하여 수질의 안정화를 꾀한다. 또한 수질의 pH등을 약알카리성으로 조절한다. 이들 방법에 의해 수용액의 Langelier Index 또는 Ryznar Index등을 부식이 잘 일어나지 않는 조건으로 만들어 줄 수가 있다.
- 5) 내식성 강관재 사용:수질의 부식성이 심한 경우에 일반 배관용 탄소강관이나 백관 이외에 보다 내식성이 향상된 강종을 강관재로 사용한다.
- 6) 내식성 관종 선택:수용액의 부식성이 매우 심하고 수처리등에 의한 수질 변경이 불가능한 경우, 일반 강관이외에 적절한 내식성 관종(예를 들면 PE-coating 강관, 스텐레스 강관등)을 선택 사용한다.

3.5 결론

아연도 강관의 심한 녹취 발생 원인과 대책을 조사한 결과 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 1) 녹취 발생의 주 원인은 ① 현재 사용되고 있는 수질이 Ca, Mg등의 함량이 비교적 낮은 연수(soft water)이며, ② 수용액중의 이온 평형(Langelier Index등)에 있어서 강관의 부식이 잘 발생되는 수화학적(water chemistry) 특성을 갖고 있기 때문이다.
- 2) 용존 산소 제거, 정수장에서의 약품 처리등에 의한 수질의 변경이 녹취의 발생억제에 효율적이라고 판단된다.
- 3) PE-coating 강관, 내식성 강관등과 같은 수용액에 대한 내식성이 향상된 재료를 배관 재료써 사용한다.

III. 결론

최근들어 점점 더 빈발해지고 있는 생활용

수용 강관(배관, 흑관, 도복장 강관등)의 내외면 부식 현상들을 조사한 결과 공식(pitting), 구상 부식, 녹혹등 여러가지 형태의 다양한 부식이 발생되고 있음을 알 수 있었다. 강관의 부식은 강관의 사용 도중에 일어날 수 밖에 없는 자연적 현상들중의 하나지만, 조사된 부식 사례들 중 많은 경우가 부식 매질재의 심한 부식성, 강관 배관시 부적절한 시공 재

료 및 시공 방법, 용도에 적합하지 않은 강종의 사용등으로 인하여 비정상적으로 급속한 부식이 진행된 것으로 나타났다. 따라서, 사용하고자 하는 용도 및 부식이 환경에 알맞는 적절한 성질을 갖춘 강관을 선택하여 주의깊게 시공을 한다면 현재 겪고 있는 부식 문제들중의 상당수는 발생되지 않을 수도 있을 것이다.

행정규제완화추진, 건설기술자 운용기준확정

정부는 3백억원이상 규모 주요공사현장에만 기술사를 배치토록하는 등 건설공사 현장기술자 배치기준을 완화하는 한편 건설공사 시공자격 및 관리제도의 통합을 장기로 추진키로 했다.

최근 경제행정규제완화실무위는 건설분야 회의를 갖고 건설공사 현장기술자 배치기준을 완화해 공사금액 2백억원 이상에는 기술사만을 배치해야 했으나 기사 1급으로 실무에 10년이상 종사한 자도 배치할 수 있게 했다.

특히 기술사는 공사금액 3백억원이상 주요공사로 △교량 △터널 △철도 △공항 △삭도 △항만 △방파제 △사방 △간척 △댐 △상하수도 △발전설비 △가스설비 △산업설비 △종합병원 △관광숙박시설 △관광집회시설 △대규모소매점 △기타 16층 이상 건축물에 배치하도록 했다.

또 공사금액 50억원이상 공사에는 기사 1급으로 실무에 10년이상 종사한 자를 배치하던것을 기사1급으로 실무 5년이상 종사자로 낮추고 기사1급 배치대상공사를 현재 공사금액 10억원이상에서 20억원미

만으로 각각 완화했다.

실무위는 이와함께 건설업면허기준도 대폭 낮춰 토목, 건축등 단일 공사업의 기술자보유기준을 8인에서 4인으로, 토목건축공사업은 20인에서 10인으로, 특수공사업은 10인에서 5인으로, 전문건설업은 5인에서 3인으로 축소시켰다.

경제행정규제완화실무위는 중소건설업체의 보호와 하도급관리제도를 개선했다.

실무위는 건설업자가 도급받은 공사를 일괄해서 하도급하는 것을 금지해 왔으나 설계·시공 일괄발주공사인 경우에는 발주자의 동의를 얻어 시공부분의 전부를 2인 이상의 건설업자에게 분할 하도급하는 것을 허용, 일괄하도급제한을 완화했다.

또한 하도급공사의 기성실적증명을 간소화, 하도급공사의 기성실적 증명서는 수급인만 발행할 수 있었던 것을 발주자도 발행할 수 있도록 했으며 건설업법에 의거 하도급계약 사실을 발주처에 통보해야 하는 경우 장기계약공사는 관행상 하도급통지를 매년 해왔으나 이를 계약체결시 한번만 하면 되도록 개선했다.