

급 · 배수관망에서 부식 및 녹물발생의 영향인자에 관한 연구(Ⅰ)

이 광 호

충북대학교 도시공학과

(1997년 3월 17일 접수, 1997년 5월 24일 채택)

Factors Affecting Internal Corrosion and Red-Water Problems in the Water Distribution Network(Ⅰ)

Kwang-Ho Lee

Dept. of Urban Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT

Water quality analysis and experiments were conducted to identify the reasons of red-water problem which frequently occurs in the distribution networks. The progress of internal corrosion were also investigated. Experimental results showed that the main cause of the red-water in the pipe networks was due to the existence of Mn and/or Fe in the raw water and in the treated water. Also, 42.8~54.8% of manganese was found in the flushed water of the water distribution network.

The results showed that the internal corrosion in the pipelines occurred in the order of steel pipe > cast iron pipe > stainless steel pipe. However, the internal corrosion in the synthetic resin pipe was of the same magnitude as the stainless steel pipe. Corrosion of steel pipe progressed faster than the other pipes.

After ten years of use, the reduction rate of pipe materials in weight before and after removing rust was about 12% in the steel pipe and about 0.2% in the cast iron pipe. The analysis of the rust removed from the pipelines showed that about 95% of the rust was Fe and Al. Part of them might be deposited from water.

Key Words : Distribution Networks, Internal Corrosion, Red-Water, Pipe Materials, Flushed Water, Rust

요 약 문

본 연구에서는 급·배수관망에서 녹물발생 문제가 자주 발생되는 원인과 관재질 및 경년에 따른 부식정도를 규명하기 위한 연구로써 현장의 시료를 대상으로 수질분석과 실험을 행하였다.

연구결과 관로에서의 녹물발생의 주원인은 원수 및 정수내의 Mn과 Fe성분이었으며, 관로세척수에서도 Mn성분은 물을 제외한 모든 구성 성분 중에서 42.8~54.8%를 나타냈다.

재질별로 관의 부식정도는 강관 > 주철관 > 스텐레스관 = 합성수지관 순서였으며 특히 강관의 부식속도가 가장 빨랐다.

경년 10년에서 녹제거 전후의 중량 비교결과 중량감소율은 강관에서 12%, 주철관이 0.2%였다.

관내부의 제거녹을 성분 분석결과 금속성분 중 Fe성분이 95%이상이었으며 일부 침전물로 형성된 Al성분이 포함되어 있었다.

주제어 : 급·배수관망, 부식, 녹물, 관재질, 세척수, 녹

1. 서 론

현대 도시생활에서 시민들의 삶의 질을 높이는 데는 쾌적한 주거환경, 원활한 교통문제와 함께 양질의 수돗물을 안정적으로 공급하는 것이 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

우리의 일상생활과 가장 밀접한 관계에 있는 수돗물은 물론 조리에서 세탁, 목욕, 청소등에 이르기까지 다양한 용도로 사용되므로 건강등에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 점에서 수질의 안전성 확보가 무엇보다도 큰 쟁점으로 부각되고 있다. 그러나 최근에 들어 원수 수질저하와 시민들의 생활수준 향상으로 더 맑은 물을 요구하는 욕구가 날로 증대됨에 따라 이제는 공급되는 수돗물의 양 못지않게 질의 향상이 더욱 큰 문제로 대두되고 있다. 현재와 같은 추세로 계속 수질이 악화되어갈 경우 깨끗한 상수원수의 확보가 어려워짐과 동시에 현재의 정수처리 시스템으로는 그 처리효율도 한계에 이르러 안전한 수돗물의 공급을 기대할 수 없는 시점에 도달할 수도 있다는 가능성을 배제하여서는 안될 것이다.

더욱이 1989년에 중금속 오염사건, 1990년에 수돗물에서 THM의 검출, 1991년의 낙동강 폐놀사건, 그리고 낙동강 유역의 벤젠, 툴루엔, 디클로로메탄 검출등 일련의 상수도와 관련된 오염사건이 발생하여 상수원수와 정수시설에 대해서는 수질과 관련하여 깊은 관심이 고조되는 상황에 있으나 정수장에서 처리된 물을 각 가정까지 공급하는 급·배수시설에는 상대적으로 관심이 낮은 것이 사실이다.

실제로 급·배수관의 부식현상은 누수율의 증가와 아울러 관의 통수능력을 감소시키는 직접적인 원인이 될뿐만 아니라 녹물발생으로 식수로서의 미관적 측면에서의 문제뿐만 아니라 수돗물을 마시는 시민들에게 보건위생학적 측면에서도 상당한 문제를 일으키게 된다.^{1, 2)}

따라서 본 연구에서는 녹물발생 문제가 비교적 많이 나타나는 지역과 적게 발생되는 급수구역을 대상으로 실제 공급되고 있는 수돗물의 원수, 정수 및 실제 매설되어있는 관로를 대상으로 경년별, 재질별로 시료를 채취하여 녹물발생의 주 원인 및 상태를 비교 평가, 분석함으로써 부식 및 녹물발생의 영향인자를 규명하였다.

2. 수질분석 및 실험

본 연구에서는 급수구역 중 녹물발생의 문제가 많은 A정수장계열과 문제가 적은 B정수장계열의 급수구역을 대상지역으로하여 원수 및 급·배수관내의 정수, 관로세척수의 수질분석과 채취된 관로의 시편을 대상으로 관로내 퇴적물, 부식층의 분석 등을 통해 부식 및 녹물발생의 영향인자와 그 정도를 평가하였으며 그 방법 및 내용은 다음과 같다.

2.1. 현장 수질분석

2.1.1. 관로 수질

대상시료는 수원(水原) 계통이 다른 2개 정수장을 대상으로 원수, 정수의 수질을 분석하였으며 수질분석항목은 정수의 경우, 녹물발생에 영향을 미치리라 예상되는 pH, 잔류염소, 철, 망간, 황산이온, 알카리도 등 6개 항목, 원수는 4개항목 이었으며 분석방법은 우리나라 수질오염공정시험법³⁾, 먹는물 관리법⁴⁾과 미국의 Standard Methods⁵⁾에 준하였다.

2.1.2. 관로 세척수

관로 세척은 관로내에 침전된 침전물을 정기적으로 제거하거나 녹물발생시 침전물을 제거하기 위한 목적으로 시행하며 관로 세척에 사용하는 세척수는 주변의 깨끗한 수돗물을 사용하여 시행된다. 따라서 본 연구에서는 후자의 목적으로 시행된 관로 세척후의 관로 세척수를 녹물발생에 따른 민원이 많은 A정수장계열 현장에서 채취하여 수질을 분석함으로써 구성성분을 파악하고 아울러 녹물 생성 원인을 규명하도록 하였으며 분석항목은 Al, Si, Ca, Mn, Fe, W 등 6개 항목이었다.

2.2. 부식도 측정

2.2.1. 시편 제작

본 실험에 사용된 시편의 제작은 부식현황을 파

악하기 위해 대상 급수구역내에서 수거된 관을 대상으로 재질별, 경년별로 선택하였으며 시편의 크기는 대략 가로 4cm×세로 5cm를 기준으로 절단하여 만들었다.

시편 제작시 이미 형성되어 있는 녹덩어리가 손상되지 않도록 최대한의 노력을 기울였으며 제작된 시편의 재질별 경년은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the Samples

pipe materials	elapsed years			
steel	10	15	20	25
cast-iron	10	15	20	25
P V C	10	15	20	
stainless steel	10			

2.2.2. 육안 관찰

관종별, 경년별로 채취한 시편은 육안으로도 부식정도를 확인하게 구분할 수 있어 이의 특성을 세밀히 관찰분석 하였다.

2.2.3. 재질별, 경년별 종량측정

재질별, 경년별로 채취된 일정크기의 시편을 대상으로 부식 생성물을 완전 제거, 전후의 중량감소비율과 두께를 측정함으로써 부식의 정도를 파악하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 수질분석결과

3.1.1. 원수 수질

대상급수구역내에서 녹물문제가 계절에 따라 잘 발생되는 A정수장계열과 녹물문제가 거의 없는 B정수장계열을 대상으로 유입원수를 13회에 걸쳐

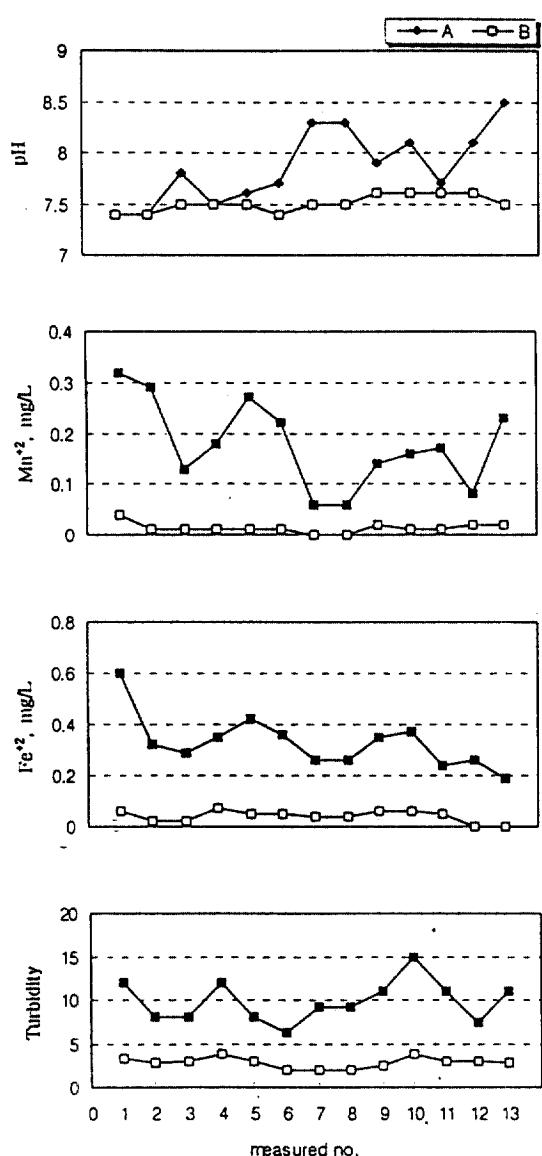


Fig. 1. Analytical results of the raw water quality.

분석한 결과는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보면 녹물과 직접 관련이 되는 Mn, Fe의 농도는 A정수장 원수의 경우 Mn이 0.06~0.32mg/l 범위로 평균은 0.18mg/l (표준 편차 : 0.08mg/l), Fe농도는 0.19~0.60mg/l 범위에 평균은 0.33mg/l (표준 편차 : 0.10mg/l)

인 반면, B정수장 원수의 경우는 Mn이 0.00~0.04mg/l로 평균은 0.01mg/l (표준 편차 : 0.01mg/l)이었고, Fe농도는 0.00~0.07mg/l 범위에 평균은 0.04mg/l (표준 편차 : 0.02mg/l)로 나타났다.

확률그래프상에서 측정치를 분석해본 결과 B정수장원수의 경우는 측정치의 범위가 상당히 적은 폭으로써 정규분포치를 형성하지 못하였으며, 50% 확률치는 A정수장원수의 경우 Mn이 0.17mg/l, Fe이 0.32mg/l인 반면에 B정수장원수의 경우는 Mn이 0.01mg/l, Fe은 0.05mg/l로 A정수장의 원수가 B정수장 원수보다 높게 나타남으로써 원수중의 Mn과 Fe가 A정수장계열에서의 녹물 발생 원인으로 작용하고 있었음을 알 수 있었다.

탁도의 경우에 있어서도 A정수장의 원수가 6.3~15.0도로써 1.9~3.8도인 B정수장 원수보다 매우 높게 나타남으로써 전체적인 수질면에 있어서도 수질이 양호하지 못함을 알 수 있었다.

3.1.2. 정수 수질

A정수장과 B정수장에서 정수처리된 정수를 대상으로 월 1회씩 수질분석한 결과는 Fig. 2와 같으며 항목별 특성은 다음과 같다.

pH의 경우는 A 및 B정수장의 정수 모두가 pH 7.0~7.4 범위이나 A정수장의 정수가 B정수장의 정수에 비해 비교적 약간 높은 상태로 이는 A정수장의 원수가 하천복류수의 특성을 갖는 이유^{6,7)}로 판단되며 현재 범위 내에서의 소폭의 차이는 영향을 줄 수 있는 정도는 아니라고 판단된다.

총알칼리도 및 경도의 경우는 년간 수질측정에서 A정수장에서 총알칼리도가 32~35mg/l, 경도는 48~92mg/l로 B정수장 정수에 비해 비교적 높게 나타나므로써 관로내에서 스케일의 형성 가능성⁷⁾이 높을것으로 판단되어 총알카리도 및 경도도 관로의 부식에 영향인자로 작용할것으로 사료된다.

황산이온(SO₄²⁻)은 우리나라 먹는 물 수질기준에는 200mg/l⁸⁾를 넘지 않도록 되어 있는데 주로 심미적으로 영향을 주는 항목으로 수질분석에서 A정

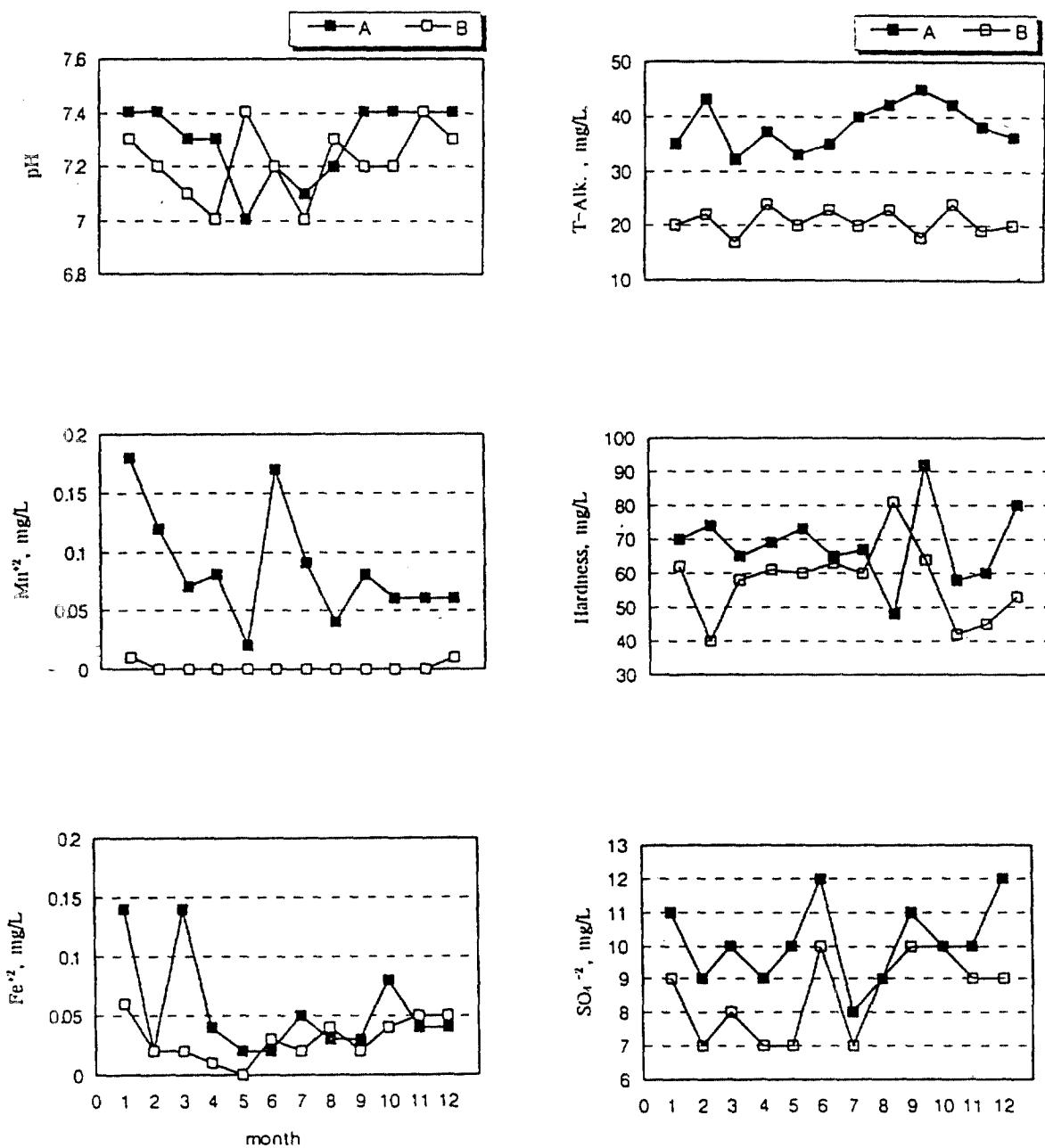


Fig. 2. Analytical results of the treated water quality.

수장의 경우 $8\sim12\text{mg/l}$, B정수장의 경우 $7\sim10\text{mg/l}$ 의 비교적 낮은 농도로 녹물발생에 영향을 거의 미치지 않을 것으로 판단된다.

Mn의 경우는 녹물발생에 직접적인 영향을 미치는 항목으로서 정수처리과정에서 일부가 제거되어 A정수장 정수에서는 $0.02\sim0.18\text{mg/l}$ 였으며, B정수장 정수에서는 $0.00\sim0.01\text{mg/l}$ 로 낮은 농도를 나타내 A정수장의 정수는 녹물발생에 영향을 미칠 수 있는 0.05mg/l ⁹⁾ 이상을 나타냈고, B정수는 그 이하를 나타내고 있어 A정수장 급수구역에서 녹물발생 영향인자로 작용하였음을 알 수 있었다.

Fe 역시 녹물발생에 직접 원인이 되는 항목^{7,9,10)}으로 A정수에서는 $0.02\sim0.14\text{mg/l}$, B정수에서는 $0.00\sim0.06\text{mg/l}$ 로 A정수장 정수는 정수과정에서 일부가 제거된 반면, B정수장 정수는 원수와 거의 같은 농도로 정수 처리과정에서 낮은 농도 수준에서의 제거율은 거의 나타나지 않았다. 수질상으로는 영향한계농도⁹⁾인 0.3mg/l 이하를 나타냈으나 A정수장 정수에서 B정수보다는 높게 나타나 급수구역내에서 녹물발생의 원인인자로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

3.1.3. 관로 세척수

세척수의 시료는 세척당시 회석수가 흔재되어 형성됨으로써 채취된 시료 자체의 성분별 농도의 분석은 별 의미가 없으므로 채취시료를 고농도로 농축후 압축시켜 시편을 제작하여 분석용 주사현미경을 이용한 EDS(Energy Dispersive Electron Spectroscopy)방법으로 항목별 중량비(%)로 나타냈다. 시료의 분석은 A정수장계열 세척수 시료 6개를 대상으로 실시하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

그림에서 보면 세척수 수질에서 가장 높게 나타난 것은 Mn성분으로써 $42.8\sim54.4\%$ 였으며, Al성분은 평균 $31.5\sim40.2\%$ 였고, Fe성분은 $1.7\sim17.7\%$ 를 나타냈다.

이상의 결과로 보아 A정수장계열에서의 녹물형성은 앞에서 원수 및 정수수질에서 Mn농도가 B

정수장 계열보다 높게 나타난 결과와 연계해서 생 각해볼때 정수내의 Mn이 주 원인^{7,11,12)}으로 판단된다.

3.2. 부식도

3.2.1. 관종별, 경년별 부식현황

관 재질별로 매설년한에 따른 부식도는 실제 시편의 육안관찰만으로 충분히 분석이 가능하였으며 육안관찰 결과 강관의 녹스케일 형성은 다른관보다도 빠르게 형성되어 경년 10년에서 거의 기존 관 두께의 1.5배정도였으며 15년이후는 부식정도가 매우 심화된 상태였다.

주철관의 경우는 강관과는 달리 경년 10년에서는 내부표면에 몇개의 줄 형태로 녹이 형성될 정도였으며 20년에서는 강관의 10년 경우와 거의 대동소이할 정도로 녹이 솟아 올라 심한 부분은 관 두께의 2배 이상을 형성하기도 하였다.

합성수지관(PVC)의 경우는 부식현상이 전혀 없이 내부 표면에 얇은막 형태로 녹이 부착되어 있는 형태였으며, 경년별로는 전혀 차이를 나타내지 않았다.

스텐레스관의 경우도 경년 10년의 경우, 내부 표면에 자체 부식은 전혀없이 다른 재질에서 형성된 녹이 얇게 부착되어 있을 정도였다.

부풀은 녹을 전기 부러쉬로 제거한 후 관찰한 내부표면은 강관의 경우 부식으로 매우 기복이 큰 상태였으나 주철관의 경우는 비교적 매끈한 편이었으며 스텐레스관이나 합성수지관의 표면은 녹도 쌓이지 않았을 뿐 아니라 매우 매끄러운 상태였다.

3.2.2. 재질별 및 경년별 중량변화

관의 재질 및 경년별 부식도를 조사하기 위하여 일정크기의 시편에 나타난 부식생성을 제거 전후의 중량감소 비율과 두께를 측정하였다.

Table 2는 관의 재질 및 경년별 부식생성을 제거 전후의 중량차이를 나타낸다.

Table 2로부터 알 수 있듯이 재질분포는 강관 > 주철관 > 스텐레스관의 순서로 부식에 따른 중량

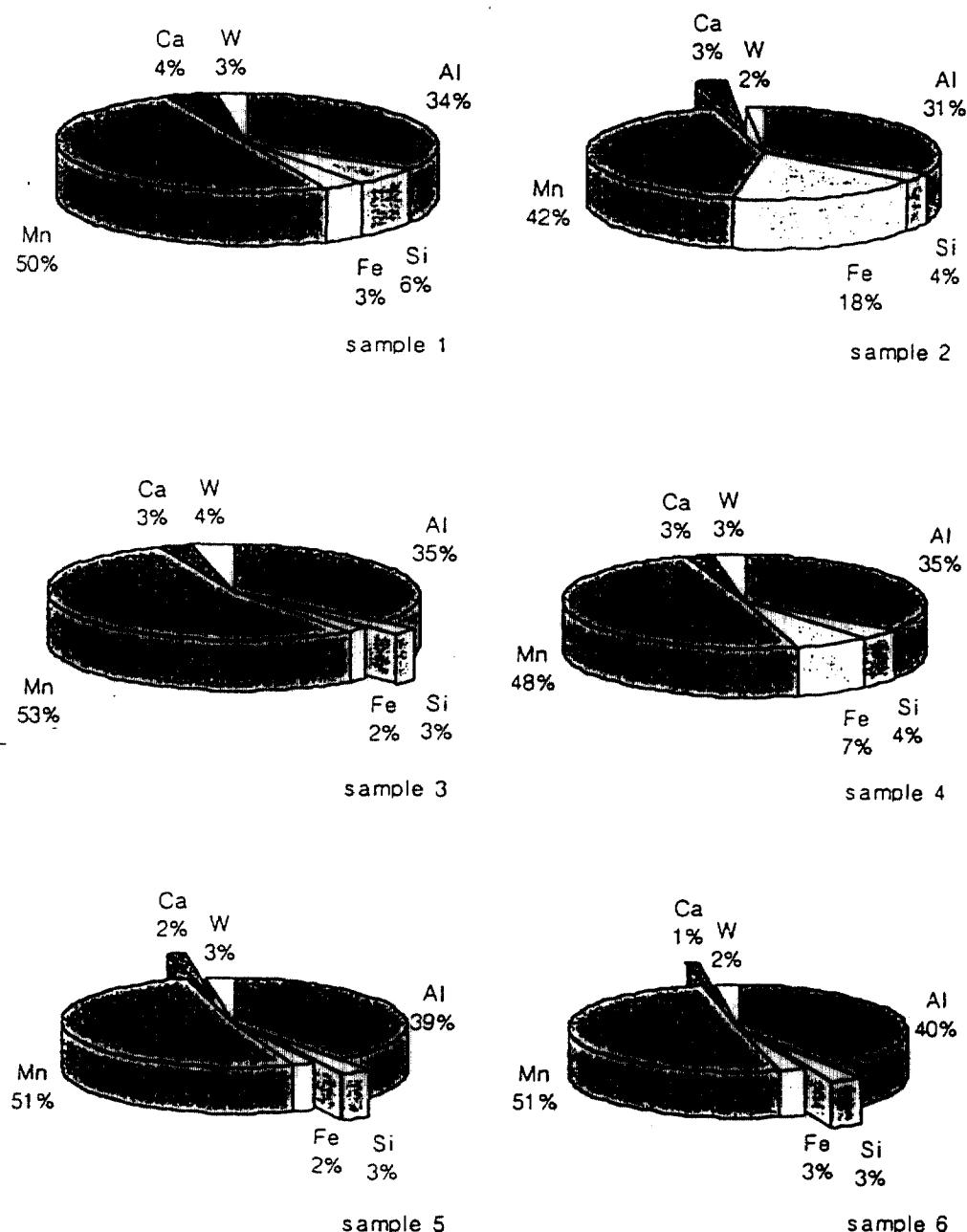


Fig. 3. Analytical results of the flushed water.

Table 2. Reductions of Weights by Corrosion with the Materials and Elapsed Years of Pipe

(unit : g)

pipe materials	elapsed years	sample 1		sample 2		sample 3	
		weight 1 *	weight 2 **	weight 1	weight 2	weight 1	weight 2
steel	10	72.09	64.85	60.20	52.67	58.90	52.26
	15	74.28	63.89	62.34	53.49	65.82	57.27
	20	93.72	78.06	78.81	66.02	79.01	67.82
cast-iron	10	161.03	160.83	202.24	202.05	183.52	182.82
	15	272.65	269.05	241.21	236.79	292.83	290.88
	20	180.56	166.14	254.00	227.86	227.83	201.50
	25	300.90	231.79	293.05	254.28	235.61	199.28
stainless steel	10	39.63	39.23	28.52	28.45	27.27	27.02

* weight before removing rust

** weight after removing rust

Table 3. Changes of Rust Thickness by Corrosion with the Materials and Elapsed Years of Pipe

(unit : mm)

pipe materials	elapsed years	sample 1		sample 2		sample 3	
		thicknees max	thicknees min	thicknees max	thicknees min	thicknees max	thicknees min
steel	10	22.8	6.5	17.2	2.2	12.8	2.4
	15	5.8	1.8	6.2	1.9	12.5	1.8
	20	9.1	1.8	6.8	1.6	12.4	0.8
cast-iron	10	1.2	0.2	1.2	0.5	2.2	0.8
	15	1.3	0.2	1.4	0.1	1.2	0.2
	20	19.5	7.2	16.8	3.5	12.0	5.4
	25	21.8	2.4	17.8	5.0	21.8	4.6
stainless steel	10	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0

감소가 증가하였다.

또한 동일 재질에 대하여 비교하면 경년수가 길수록 부식에 의한 중량감소는 역시 증가함을 알수 있었다.

동일한 경년(10년)에 대하여 비교하면 강관의

중량 감소율은 11~12%, 주철관은 0.1~0.4%.

스텐레스관은 0.2~1.0%로 강관의 부식이 제일 심하였고 주철관과 스텐레스관은 비슷한 값을 보여 주었다. 경년 15년에서는 강관이 13~14%, 주철관은 0.7~1.8%였다. 그러나 주철관은 경년

수가 길어질수록 부식이 빨리 진행되어 25년된 주철관의 부식감량은 평균 16% 정도로 증가되었다.

이와 같은 결과로 주철관은 강관보다 수명이 10배 이상 유지될 수는 있으나 일정기간의 경년이 지난 후부터는 부식속도가 가속화되어 감을 알 수 있었다.

Table 3은 관의 재질 및 경년에 따른 두께변화를 측정한 결과이다.

Table 3에서 경년별로 형성된 녹의 두께를 보면, 강관의 경우 경년 10년에서 최대 22.8mm를 보이다가 15년 이후는 오히려 감소되는 형상을 보였으며, 주철관의 경우는 경년 15년 까지는 매우 얇은 녹을 형성하다가 20년에서 최대 19.5mm, 25년에서 최대 21.8mm의 녹두께를 형성하였다.

이의 결과로 보아 본격적인 녹의 형성은 강관에서 10년, 주철관에서 20년부터로 판단되며, 강관

에서 경년 15년 이후 녹 두께가 감소된 것은 부식이 거의 완료된 상태에서 부풀은 녹이 시간경과에 따라 관내 유속의 영향으로 일부가 떨어져 나온 결과로 해석된다. 반면, 스텐레스관과 PVC관에서는 내부 표면에 녹이 미미하게 쌓인 정도였다.

특히 강관 시편에서는 측정위치에 따른 두께 변화율의 기복이 심하였는데 이것은 강관의 내부부위에 따라 부식정도가 다르게 나타남을 의미하며¹³⁾ 이러한 현상으로 예상 수명보다 훨씬 빨리 국부적으로 천공이 발생될 가능성이 높아질 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3. 부식관로에서 제거된 녹성분 분석결과

급수관로인 주철관 내에 형성된 녹스케일을 제거하여 성분분석을 실시한 결과는 Table 4와 같

Table 4. Analytical Results of the Removal Rust in Water Treatment Plant Pipe Line

(unit : weight%)

Pipe line	sample	item no.	Si	Fe	Al
A	a	1	0.83	99.17	0.00
		2	0.61	99.39	0.00
		3	0.24	99.76	0.00
		ave.	0.56	99.44	0.00
	b	1	16.90	72.89	9.76
		2	16.44	73.81	9.75
		3	35.58	46.01	15.55
		ave.	22.97	64.24	11.69
B	a	1	5.81	94.19	0.00
		2	2.73	97.27	0.00
		3	2.78	97.22	0.00
		4	5.73	94.27	0.00
		ave.	3.51	95.74	0.00
	b	1	0.69	99.31	0.00
		2	0.74	99.26	0.00
		ave.	0.72	99.29	0.00

으며, 재거녹의 성분분석 역시 시료를 압축시켜 시편으로 제작 후 EDS 방법으로 구성중량비(%)로 나타냈다.

〈A〉정수장 계열관로에서 제거된 a시료의 경우는 Fe가 99.44%, Si가 0.56%로써 철성분이 대부분을 형성하고 있는 반면, b시료에서는 Fe가 64.24%, Si가 22.97%, Al이 11.69%로써 정수과정중 용접처리 공정에서 발생된 침전물의 일부가 관로내에 퇴적된 것이 녹스케일 형성시 포함된 것으로 판단된다.

〈B〉정수장 계열 관로에서의 시료 a와 b에서도 Fe가 95.74%, 99.26%로써 철성분이 대부분을 구성하고 있었다.

이의 결과로 보아 관로 내부면에 형성된 녹스케일은 관 재질 자체내의 Fe성분과 일부 침전물로 형성된 Al성분으로 구성됨을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

1. 대상급수구역내에서 녹물문제가 잘 발생되는 정수장 계열의 원수 및 정수를 분석한 결과 Mn, Fe, 알칼리도, 경도의 농도가 비교적 높게 검출되었으며 특히 이중 Mn, Fe를 녹물발생의 원인물질로 판단할 수 있었다.
2. A정수장계열의 6개 지점에서 관로내 세척수의 분석결과 Mn이 42.8~54.4%, Al이 31.5~40.2%, Fe성분이 1.7~17.7%로 세척수내 Mn성분이 주 성분을 이루었으며 이외에 용접제 성분인 Al성분이 상당량 포함되어 있음을 확인 할 수 있었다.
3. 관로의 재질 및 경년별로 녹발생 정도를 관찰한 결과, 부식의 정도는 재질별로 강관 > 주철관 > 스텐레스관, 합성수지관 순서였다.
경년별로는 강관의 경우 10년이 지나면서 녹 생성이 많았으며, 주철관의 경우는 20년에서 녹 발생이 많아 녹 발생정도는 강관 10년과 주철관 20년이 거의 대등한 정도였다.
4. 부풀은 녹을 전기 부러쉬로 제거한 후 관찰한 내부표면은 강관의 경우 부식으로 매우 기복이 큰 상태였으나, 주철관의 경우는 비교적 매끈한 편이었으며 스텐레스관이나 합성수지관의 표면

은 녹도 쌓이지 않았을 뿐 아니라 매우 매끄러운 상태였다.

5. 부식에 따른 두께 변화에 있어서도 위와 같은 경향을 나타내었으며, 특히 강관시편에서는 축정위치에 따른 두께 변화율의 기복이 심하게 나타나 위치에 따라서는 예상수명보다 훨씬 빠른 천공이 발생될 가능성이 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. 충북대학교 산업과학기술연구소, 물의 효율적 보전관리 심포지움자료집, 청주, pp. 168~171 (1995)
2. 이광호, "상수도관 시설현황과 전망," 21세기를 향한 음용수 관리기술에 관한 심포지움, 대한위생학회, 서울, pp. 1~9 (1994)
3. 환경처, 수질오염공정시험방법 (1991)
4. 환경부, 먹는물 관리법 (1995)
5. APHA, AWWA, WPCF, Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 18th Ed, Washington D.C. (1992)
6. 육종각, 충북대학교, "충북도시상수도의 문제점과 개선방안에 관한 연구," 충북대학교 산업대학원 석사학위논문, pp. 32~33 (1995)
7. 石橋多聞, 上水道事故의 對策, 技報堂, 東京, pp. 63~77 (1977)
8. 보건사회부, 음용수 수질관리 지침서, pp. 522~527 (1990)
9. AWWA, Basic Level Water Treatment Operator's Practices, AWWA No. M18, Denver, pp. 59 (1971)
10. 김원만, 박영숙, "수도관의 부식거동에 관한 연구," 대한위생학회, 서울, pp. 1~15 (1992)
11. ASCE, AWWA, Water Treatment Plant Design, New York, pp. 251~257, (1969)
12. AWWA, Water Distribution Training Course, AWWA No. M8, Denver, pp. 54~68 (1962)
13. 이현동, 안윤주, 지재성, "현장조사를통한 수도관의 진단평가," 대한상하수도학회, 서울, pp. 10~28 (1996)