

## 상수도관로중 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구

이현동<sup>†</sup> · 배철호<sup>\*</sup> · 홍성호<sup>\*\*</sup> · 황재운 · 곽필재

한국건설기술연구원 건설환경연구부

<sup>\*</sup>한국수자원공사 수자원연구원

<sup>\*\*</sup>승실대학교 환경·화학공학과

## Residual Life Assessment on Cast Iron Pipes of Water Distribution System

Hyun-Dong Lee<sup>†</sup> · Chul-Ho Bae<sup>\*</sup> · Seong-Ho Hong<sup>\*\*</sup> · Jae-Woon, Hwang · Phill-Jae Kwak

Korea Institute of Construction Technology Construction Environment Research Dept.,

Korea Water Resources Corporation, Korea Institute of Water and Environment<sup>\*</sup>

Soongsil Uni. Env. & Che. Eng.<sup>\*\*</sup>

(Received 18 October 2003, Accepted 17 February 2004)

**Abstract** : Residual wall thicknesses, corrosion rates, and residual life of thirty four samples of cast iron pipes(CIPs) and ductile cast iron pipes(DCIPs) collected from water mains of B city were studied to estimate their remaining service life or optimum time of rehabilitation.

The internal maximum corrosion depths of samples measured using a dial gauge after shot blasting were twice higher than the external in most cases. Therefore corrosion of water pipes was much more affected by internal water quality than soil. Residual wall thicknesses of DCIPs were higher than those of CIPs. That reason was thought to be that DCIPs have been protected from internal corrosion by lining cement mortar.

Residual life calculated by maximum corrosion rate was ranged up to 44 years with 12.40 years average. Since most CIPs were much deteriorated, rehabilitation plan should be established soon in B city. Residual life of DCIP was 33.52 years average. When cement mortar lining is used up by neutralization of DCIPs. DCIP also should be rehabilitated.

**keywords** : Remining service life, Residual Life, Residual wall thickness, Corrosion rate

### 1. 서 론

상수도관망에서의 누수현상은 수도물 공급의 수량적인 불안정과 더불어 수자원의 막대한 경제적인 손실을 초래한다. 특히 우리나라의 경우는 워싱턴소재 UN의 국제연구행동연구소(PAI)의 발표에 따르면, 현재 활용가능한 수자원량은 661억m<sup>3</sup>으로서, 이를 국민 1인당 활용가능량으로 환산할 경우, 1950년 3,247m<sup>3</sup>에서 1995년에는 1,472m<sup>3</sup>로 줄어들어 물 부족국가로 분류되고 있다. 또한, 2025년에는 1,258m<sup>3</sup>로 떨어질 것으로 전망되어, 향후 적극적으로 물소비량을 줄이지 않는다면, 우리나라는 물 기근 국가로 전락할 위기에 처해 있는 실정이다.

더구나, 우리나라 상수도의 유수율을 보면, 2001년도 1년간 우리나라에서 생산·공급된 수도물 총량은 5,791백만톤이다. 이 가운데 유효수량은 4,986백만톤이며, 유수율은 75.4%에 불과하며, 누수량이 804백만톤으로 막대한 수자원이 손실되고 있다(환경부, 2003). 이로 인한 경제적인 손실도 약 5천억원에 이르는 것으로 알려져 있다. 또한, 관망

의 누수는 빙현상에 따른 관파손의 증가, 관의 외부부식 증가에 의한 노후화, 누수사고에 의한 사고처리 비용 등으로 누수에 기인하는 경제적인 손실은 천문학적인 수치가 될 것으로 추정된다. 그러므로, 상수도관망에서의 누수방지를 위한 대책과 기술 개발은 반드시 필요하다.

현재 상수도관망에서의 누수에 가장 큰 원인은 부식으로 인한 상수도관의 노후화에 기인한다. 이러한 부식은 자연발생적인 현상이며, 동시에 매우 다양한 인자가 영향을 준다. 상수도관의 경우, 관 외부로는 주로 토양과 접촉하고 있고, 관 내부로는 공급되는 수도물과 접촉하고 있다. 따라서, 이들 토양 또는 물과 관련된 다양한 물리·화학적 인자들에 의해서 영향을 받는다(이 등, 2000, 2001, 2002; AWWA, 1996; Kelly, 1989).

그러나, 이들 영향인자들의 전체적인 영향력은 결국 관체 내부에 녹과 스케일 발생에 따른 통수능 저하 또는 적수발생으로 인한 수질악화의 초래, 특히 내·외면 침식으로 인한 내구성 저하에 따른 누수발생으로 나타난다. 따라서 누수를 저감하기 위한 효율적인 방안으로, 상수도관의 내·외면의 침식에 따른 잔존두께를 평가하고, 향후 상수도관이 부식에 의해서 관통이 되는 시기인 잔존수명을 추정하여 상수도관의 갱생 또는 교체를 위한 개량 계획을 수립한다

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
hdlee@kict.re.kr

면, 기존 상수도관의 누수발생을 저감시킬 수 있을 것이다. 특히, 기존에는 대부분 파손특성 또는 사고이력파 같은 자료를 통하여 간접적으로 상수도관의 구조적인 성능을 평가하고, 개량시기를 예측하는 경우가 많은데, 이는 대부분 과거의 자료에 기초하고 있고, 간접적인 지표를 통하여 평가된 것이므로 정확한 미래의 상수도관의 구조적 성능에 대한 평가에는 무리가 있다.

그러나 국내의 경우 상수도관의 부식에 의한 잔존두께 평가, 그리고 잔존수명의 예측에 관련된 연구는 진행된 바가 없다.

따라서, 본 연구에서는 국내 도시지역에서 상수도관을 수집하여 매설년도에 따른 관체의 잔존두께, 부식속도 등을 평가하고, 향후 상수도관이 부식에 의해서 관통이 되는 시기, 즉 잔존수명과 이를 통한 개량 시기를 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 관체수집

본 연구에서는 국내의 배수관로중 주철관종의 잔존수명을 평가하기 위하여, 매설환경이 다른 국내 B시로부터 주철관종(CIP, DCIP) 총 34개를 수집하였다. 수집한 관체

Table 1. No. of Pipe samples collected

NO.	Samples	Pipe type	Laying year	Pipe diameter (mm)	Maximum water pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Laying areas
1	P-A-02	CIP	1968	200	-	Road
2	P-B-01	CIP	-	200	5(3.5)	Coastal
3	P-B-02	CIP	1980	150	5(3)	Coastal
4	P-B-03	CIP	1966	100	5(2)	Commercial
5	P-B-05	CIP	1979	150	5(2)	Coastal
6	P-B-06	DCIP	-	250	5(3)	Coastal
7	P-C-03	CIP	1981	150	-	Road
8	P-C-04	CIP	1975	80	-	Road
9	P-D-01	CIP	1973	200	-	Residential
10	P-D-03	CIP	1974	200	-	Road
11	P-D-05	CIP	1978	150	-	Road
12	P-D-08	CIP	1976	150	-	Commercial
13	P-D-09	CIP	1983	100	-	Commercial
14	P-D-11	CIP	1979	150	-	Commercial
15	P-D-13	CIP	1973	200	-	Residential
16	P-E-02	CIP	1982	300	7(5)	Commercial
17	P-E-04	CIP	1979	200	7(3)	Commercial
18	P-E-05	CIP	1982	250	7(5)	Residential
19	P-E-10	DCIP	1983	100	7(5)	Residential
20	P-F-01	CIP	1977	300	4(1)	Commercial
21	P-F-03	CIP	1979	100	6(3)	Residential
22	P-F-09	CIP	1977	200	4(2)	Road
23	P-F-11	DCIP	1990	100	4(2)	Residential
24	P-F-13	DCIP	1985	100	3(1)	Residential
25	P-F-14	CIP	1982	150	4(2)	Residential
26	P-F-17	CIP	1995	100	4(3)	Residential
27	P-F-18	DCIP	1995	100	4(2)	Residential
28	P-F-19	CIP	1980	100	4(3)	Residential
29	P-F-20	CIP	-	100	3(1.7)	Residential
30	P-G-02	CIP	1981	100	7(5)	Residential
31	P-H-3	CIP	1990	100	6(3)	Industrial
32	P-H-4	CIP	1982	100	6(4)	Residential
33	P-I-01	DCIP	1985	100	6(2)	Commercial
34	P-I-06	DCIP	1985	200	7(3)	Commercial

의 지역별 현황은 Table 1과 같다. Table 1에서 보면, 수집된 관체는 대부분 1976년~1985년까지가 21개로 가장 많았고, 관경별로는 100mm~200mm가 대부분을 차지하고 있으며, 매설지역으로는 주택가 또는 상업지역이 많았다. 수압은 대부분 평균 1kgf/cm<sup>2</sup>~5kgf/cm<sup>2</sup>이었으며, 최대수압은 3kgf/cm<sup>2</sup>~7kgf/cm<sup>2</sup>이었다.

### 2.2. 잔존수명 추정방법

잔존수명(Residual life)은 상수도관의 물리적인 측면에서 보면, 일반적으로 현재 관의 잔존두께를 측정하여 부식에 의해 향후 관의 두께가 최초 0mm가 되는 시간, 즉 내·외면의 부식에 의해 관통이 되는 경우를 의미한다고 할 수 있다(이 등, 2002). 따라서 잔존수명을 정확히 측정하기 위해서는 조사대상 상수도관로를 대표할 수 있는 지점의 관체를 채취하여 관의 내·외면의 최대부식깊이를 정확히 측정하고, 매설년수에 따른 부식속도를 산정하여 잔존두께를 최대부식속도로 나누어줌으로서 구할 수 있다. 이때 관은 Fig. 1과 같이 부식에 의하여 내·외면의 상부에는 녹 또는 스케일 등이 발생되고, 관 자체에는 주로 흑연부산물(Graphitic corrosion product, GCP)이 발생되는데, 이들 흑연부산물은 배관의 형태로 남아 부식된 배관을 위장하지만 구조상 강도는 가지지 못하므로, 이를 제거한 후 남은 최대 내·외면 부식깊이를 측정하여 잔존두께를 측정해야 한다(이 등, 1998; WRc, 1986).

Fig. 1. Pictures of CIPs after and before shot blasting.

#### 2.2.1. 부식깊이

본 연구에서는 잔존두께의 측정을 위하여 CIP와 DCIP의 경우 주철관 내·외면의 부식생성물과 흑연부산물을 제거하기 위하여 Shot blasting을 하였다.

이후 Dial depth gage와 Dial caliper gage 등을 이용하여 관체의 두께(Initial Pipe Thickness)와 외면 최대부식깊이(External Maximum Corrosion Depth)와 내면 최대부식깊이(Internal Maximum Corrosion Depth)를 각각 측정하였다.

DCIP의 경우 내면의 시멘트모르터 라이닝을 완전 제거하고, 육안관측을 하여 내면부식이 진행되었을 경우에만 내면 최대부식깊이를 측정하였다.

2.2.2. 잔존두께

일반적으로 수집 관체의 최대 내·외면 부식깊이는 동일 수직선상에 놓이기보다는 서로 다른 지점에서 상이하게 발생된다. 따라서 잔존두께를 결정함에 있어 최대 내·외면 부식깊이를 측정하여 각각의 해당 깊이에서의 잔존두께를 구하고, 각각의 내·외면 최대부식속도를 적용하여 잔존수명을 구하는 것이 타당할 것이다. 그러나 이는 전체적인 상수도관로를 고려한다면 매우 제한적인 것이므로 최대부식깊이가 동일선상 또는 인접해 있는 경우 관통으로 인한 사전 누수발생의 위험성을 예측할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 내·외면의 최대부식이 비록 서로 다른 지점에서 상이하게 발생하였더라도 동일 수직선상에서 발생하는 것으로 간주하였다. 이는 해당 상수도관로의 부식에 대해서는 내용년수 동안 안전측면에서 해석이 가능하므로 잔존두께는 식 (1)과 같이 내·외면의 최대부식깊이의 합을 제한 나머지 두께를 잔존두께로 하였다. 이때 잔존두께가 음의 값을 가지는 경우에는 잔존두께를 0으로 간주하였다.

$$|R_t| = I_t - (E_{mcd} + I_{mcd}) \tag{1}$$

if  $|R_t| \leq 0, R_t = 0$ , or  $|R_t| > 0, R_t = R_t$

- Where,  $R_t$  = Residual wall thickness of pipe, mm
- $I_t$  = Initial pipe wall thickness of pipe, mm
- $E_{mcd}$  = External maximum corrosion depth of pipe, mm
- $I_{mcd}$  = Internal maximum corrosion depth of pipe, mm

2.2.3. 부식속도

일반적으로 부식속도는 매설년수에 따라 초기에 빠르게 진행하고, 점차 그 속도가 감소는 경향을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 정확한 부식속도를 측정하기 위해서는 매설후 현재시점까지 수 년에서 수 십년의 장기간에 걸친 측정이 요구되므로 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 DCIP와 CIP의 경우에는 내·외면 최대부식깊이 측정자료와 매설년수를 이용하여 다음의 식과 같이 내·외면의 부식속도는 다르지만 현 시점까지는 시간에 따라 동일하게 진행되는 것으로 간주하고 각 관체의 내·외면 최대부식속도(Maximum Corrosion Rate)를 산정하였다.

$$E_{mcr} = \frac{E_{mcd}}{y} \tag{2}$$

$$I_{mcr} = \frac{I_{mcd}}{y} \tag{3}$$

where,  $E_{mcr}$  = External maximum corrosion rate of

pipe, mmpy

$I_{mcr}$  = Internal maximum corrosion rate of pipe, mmpy

$y$  = Periods of laying, year

그러나 DCIP의 경우 내면부식은 매설후 바로 진행되지 않는다. 이는 DCIP 내부에 부식방지를 위하여 시멘트모르터가 라이닝이 되어 있기 때문이다. 따라서 DCIP의 경우 잔존수명은 시멘트모르터가 중성화가 된 시점으로부터 부식이 진행된 후 내면부식이 진행되는 것으로 보는 것이 타당할 것이다. 따라서 본 연구에서는 DCIP의 잔존수명 추정의 경우 DCIP의 중성화속도를 산정하여, 향후 완전 중성화가 되는데 소요되는 기간동안, 즉 CML이 완전 중성화되는데 걸리는 소요시간,  $t_n$  동안은 부식이 진행되지 않는 것으로 간주하여 식 (3)의 매설년수에서  $t_n$ 을 고려하여 다음의 식을 이용하여 산정하였다.

$$I_{mcr} = \frac{I_{mcd}}{y - t_n} \tag{4}$$

Where,  $t_n$  = Periods required of CML being 100% neutralization

$$= \frac{100\% - CML \text{ neutralization}}{\text{Rate of CML neutralization}}$$

Rate of CML neutralization =

$$\frac{CML \text{ neutralization ratio}}{\text{Periods of pipe laying}}$$

상기 식 (4)에서 시멘트모르터 라이닝(CML)의 중성화는 중성화된 두께를 전체 CML의 두께로 나누어 백분율로 계산하였으며, 시간에 따른 중성화속도는 동일한 것으로 간주하였다. 또한, CML과 접촉된 표면에 내면부식이 진행되지 않은 경우, 내면부식속도는 해당 지역에서 수집된 관체의 매설년수별 최대 평균 내면부식속도를 활용하여 잔존수명을 추정하는데 활용하였다.

중성화를 측정하는 방법은 페놀프탈레인 지시약을 사용해서 시멘트모르터를 절단한 단면에 발라 수분 후에 분홍색이면 건전한 경우(알칼리성 상태)이고, 무색이면 노후화(중성 상태)가 진행된 것으로 판단하였다.

2.2.4. 잔존수명

본 연구에서는 다음의 식과 같이 잔존두께, 내·외면 최대부식속도 등을 이용하여 관체(CIP, DCIP)의 잔존수명을 추정하였다.

$$R_{lf} = \frac{R_t}{[E_{mcr} + I_{mcr}]} = \frac{R_t}{C_t} \tag{5}$$

where,  $R_{lf}$  = Residual life of pipe, year

$C_t$  = Maximum corrosion rate, mmpy

$R_t$  = Residual thickness of pipe, mm

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 내·외면 최대부식깊이

본 연구에서 수집한 B시 상수도관인 CIP와 DCIP에 대하여 내·외면 최대부식깊이와 잔존두께를 Table 2에 나타내었고, Fig. 2에 매설년도 따른 내·외면 최대부식깊이의 분포를 나타내었다. Table 2에서 CIP의 내면 최대부식깊이는 초기 관체의 두께가 차이는 있으나 1.24 mm~7.70mm, 외면 최대부식깊이는 0.32mm~5.71mm로 외면 부식깊이보다는 내면부식깊이가 더 커서 토양보다는 수질특성이 상수도관의 부식에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단된다. CIP의 내면 최대부식깊이는 평균 4.51mm이고, 외면 최대부식깊이는 평균 2.40mm로 내면 최대부식깊이가 외면에 비하여 2배 정도 컸다.

또한, 매설년도에 따른 내·외면 최대부식깊이의 분포를 보면, 매설년도에 따라 부식깊이가 매우 다양했다. 이는 비록 상수도관의 부식이 매설년도에 따라 더욱 악화되는 것이 사실이나 해당 관체가 매설되어 있는 위치에서의 수질 또는 토양내 존재하는 부식성 인자들의 영향력 또한 매우 크기 때문인 것으로 판단된다.

DCIP의 경우 Table 3에서 내면 최대부식깊이는 모두 0mm, 외면 최대부식깊이는 0mm~1.70mm 이었다. DCIP의 내면부식깊이가 0mm인 것은 DCIP 내부에 라이닝된 시멘트모르타의 방식효과인 때문이다. 또한 외면부식도 CIP에 비하여 대체적으로 낮은 범위를 갖는 것은 대부분 1980

년 이후 본격적으로 국내에 매설되기 시작하여 그 매설년수가 상대적으로 짧기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 3에서 수집한 CIP와 DCIP 각각의 내·외면 최대부식깊이의 평균을 합하여 산정된 최대부식깊이를 비교해 보면, CIP가 DCIP에 비하여 5배 정도 더 높았다.

#### 3.2. 잔존두께

Table 2와 Table 3에서 수집한 CIP와 DCIP의 잔존두께 측정 결과를 보면, CIP의 경우 초기 관체의 두께가 차이는 있으나 0mm~6.73mm이었으며, DCIP는 5.98mm~9.65mm 이었다. 초기 관체의 두께와 비교해 보면, CIP의 경우 32.4% 정도에 해당하고, DCIP는 85.1%이다. 이를 부식지수(=내·외면 최대부식깊이의 합/초기 관체두께)로 보면, Fig. 4에서 CIP 대부분의 부식지수가 0.32~1.0의 높은 범위로 나타나 대부분의 CIP 관종의 경우 부식이 상당히 진행된 것으로 판단된다. 특히 수집된 관체 중 20% 정도가 부식지수가 1로 나타나 이들 관로에 한해서는 개량이 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다. 반면, DCIP의 경우 0.07~0.23으로 CIP에 비하여 상대적으로 매우 낮은 수치를 보여 현재까지 부식에 의한 영향이 매우 작은 것으로 판단되며, Fig. 4에서 수집한 CIP와 DCIP의 부식지수의 평균이 CIP의 경우, 0.68, DCIP는 0.15로 약 4.5배정도 차이가 있었다.

Fig. 2. Distribution of internal & external maximum corrosion depths on CIP and DCIP.

Fig. 3. Comparison of corrosion depth average on CIP and DCIP.

Fig. 4. Distribution of corrosion index on CIP and DCIP.

### 3.3. 부식속도

B시에서 수집한 CIP와 DCIP에 대한 내·외면 최대부식속도 산정 결과를 Table 4와 Table 5에 나타내었다. 표에서 CIP의 내면 최대부식속도는 0.07mmpy~0.69mmpy, 외면 최대부식속도는 0.03mmpy~0.45mmpy로 외면부식속도보다는 내면부식속도가 더 높았다. 평균적으로 보면, 내면 최대부식속도가 0.26mmpy이고, 외면 최대부식속도가 0.13mmpy로 내면부식속도가 외면부식속도에 비하여 2배정도 빨랐다. 또한, Fig. 5에서 매설년도에 따른 내·외면 최대부식속도의 분포와 매설년수에 따른 변화를 보면, 매설년도가 짧을수록 부식속도가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 상수도관의 부식이 매설년도에 따라 초기에 빠르게

증가하고, 매설년수가 길어질수록 부식속도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6에서 내·외면 최대부식속도를 합한 최대부식속도는 1975년 이전 매설된 CIP는 0.15mmpy~0.32mmpy의 범위로 나타났으며, 1976년에서 1985년까지 매설된 CIP는 0.16mmpy~0.53mmpy이었고, 85년 이후 매설된 CIP는 수집된 관체수가 2개에 불과했으나 1.14mmpy~1.18mmpy로 부식속도가 매우 빨랐다.

Table 5에서 DCIP의 경우 매설년수에 관계없이 내면 최대부식속도는 모두 0.00mmpy로 관체 자체의 부식은 아직 진행되지 않는 것으로 판단되며, 외면 최대부식속도의 경우에는 0.06 mmpy~0.34mmpy로 전체적인 최대부식속도는 CIP에 비하여 매우 낮았다. Fig. 7은 CIP와 DCIP의 부식속

**Table 2.** Results of internal & external maximum corrosion depths and residual wall thickness on CIP

Samples	Pipe type	Laying year	Initial wall thickness of pipe (mm)	Internal maximum corrosion depths of pipe (mm)	External maximum corrosion depths of pipe (mm)	Corrosion Index	Residual wall thickness of pipe (mm)
P-A-02	CIP	1968	10.5	2.68	2.81	0.52	5.02
P-B-01	CIP	-	12	3.90	2.28	0.52	5.82
P-B-02	CIP	1980	9.2	5.89	3.34	1.00	0.00
P-B-03	CIP	1966	8.2	5.55	4.85	1.00	0.00
P-B-05	CIP	1979	11.25	5.75	1.89	0.68	3.61
P-B-06	DCIP	-	7.75	0.00	0.88	0.11	6.87
P-C-03	CIP	1981	12.4	7.70	0.32	0.65	4.38
P-C-04	CIP	1975	10.35	3.72	1.74	0.53	4.89
P-D-01	CIP	1973	9.45	6.11	2.60	0.92	0.74
P-D-03	CIP	1974	12.1	3.69	2.02	0.47	6.39
P-D-05	CIP	1978	6.55	4.02	2.80	1.00	0.00
P-D-08	CIP	1976	10.45	4.45	3.07	0.72	2.93
P-D-09	CIP	1983	11.2	3.45	2.83	0.56	4.92
P-D-11	CIP	1979	8.4	5.95	1.58	0.90	0.87
P-D-13	CIP	1973	10.9	3.27	0.90	0.38	6.73
P-E-02	CIP	1982	8.25	4.26	1.70	0.72	2.29
P-E-04	CIP	1979	10.15	5.00	1.20	0.61	3.95
P-E-05	CIP	1982	10.45	6.17	3.35	0.91	0.93
P-F-01	CIP	1977	12.1	3.35	3.15	0.54	5.60
P-F-03	CIP	1979	10.75	5.40	1.66	0.66	3.69
P-F-09	CIP	1977	11.75	5.81	5.71	0.98	0.23
P-F-14	CIP	1982	6.6	3.95	3.40	1.00	0.00
P-F-17	CIP	1995	10.85	4.53	1.37	0.54	4.95
P-F-19	CIP	1980	9.75	3.91	2.60	0.67	3.24
P-F-20	CIP	-	9.2	3.70	0.83	0.49	4.67
P-G-02	CIP	1981	10.35	5.89	2.10	0.77	2.36
P-H-3	CIP	1990	11.4	6.90	4.48	1.00	0.02
P-H-4	CIP	1982	9.05	1.24	1.63	0.32	6.18
Average			10.05	4.51	2.40	0.68	3.26

**Table 3.** Results of internal & external maximum corrosion depths and residual wall thickness on DCIP

Samples	Pipe type	Laying year	Initial wall thickness of pipe (mm)	Internal corrosion depths of pipe (mm)	External corrosion depths of pipe (mm)	Corrosion Index	Residual wall thickness of pipe (mm)
P-E-10	DCIP	1983	8.2	1.05	0.00	0.13	7.15
P-F-11	DCIP	1990	9.95	0.68	0.00	0.07	9.27
P-F-13	DCIP	1985	8.35	1.89	0.00	0.23	6.46
P-F-18	DCIP	1995	7.7	1.72	0.00	0.22	5.98
P-I-01	DCIP	1985	8.6	0.91	0.00	0.11	7.69
P-I-06	DCIP	1985	11	1.70	0.00	0.15	9.30
Average			8.97	1.33	0.00	0.15	7.64

Fig. 5. Distribution of internal & external maximum corrosion rates.

Fig. 6. Distribution of maximum corrosion rates.

도를 비교한 것으로, CIP가 DCIP에 비하여 상대적으로 최대부식속도가 3배 이상 빠른 것으로 분석되었다.

3.4. 중성화속도

B사에서 수집한 DCIP에 대한 중성화율과 중성화속도, 그리고 완전히 중성화가 되는 시기를 추정한  $t_n$  등에 대하여 산정한 결과를 Table 6에 나타내었다. B시의 DCIP의 중성화율은 10%~100%이었으며, 평균적으로 52%가 중성화된 것으로 분석되었다. 중성화속도는 1.00%/year~6.67%/year(평균 3.65%/year)로 평균적으로 27년을 전후로 대부분 CML은 중성화가 될 것으로 예측할 수 있다.

3.5. 잔존수명 평가

일반적으로 잔존수명은 잔존두께를 최대부식속도로 나누면 산정이 가능하다. 그러나 최대부식속도는 매설년수에 따라 그 차이가 크고 최근에 매설된 관의 최대부식속도가 큰 특징이 있다. 따라서 이들 최대부식속도를 그대로 매설년수가 짧은 상수도관의 잔존두께에 적용할 경우, 추정된 잔존수명이 상대적으로 낮게 나타날 우려가 있다. 따라서, 향후 잔존수명의 정확한 추정을 위해서는 매설년수에 따라 감소되는 최대부식속도를 고려해 주어야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 수집된 CIP를 5년 단위별 매설년수로 구분하고, Fig. 8와 같이 최대부식속도간의 상관관계를 구하여, 이를 Table 7에서와 같이 매설년수를 5년 단위로 하여 6단계로 구분하고, 각 단계별 최대부식속도를 구하여 매설년수에 증가에 따라 단계별로 적용하였다. 그러

Fig. 7. Comparison of corrosion rate on CIP and DCIP.

Fig. 8. Relationship of periods of CIP laying and maximum corrosion rate.

나, 이는 매설년수가 비슷하지만 부식속도가 Table 4에서의 최대부식속도보다도 상대적으로 작게 나타난 관체에 대해서는 부식속도가 과대평가되어 잔존수명이 더 짧아지는 경향이 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 Table 4의 최대부식속도를 적용하여 추정된 잔존수명을  $R_{f1}$ , 그리고 Table 7의 매설년수에 따라 최대부식속도를 단계별로 보정하여 산정된 잔존수명을  $R_{f2}$ 로 하여,  $MAX(R_{f1}:R_{f2}) = R_f$ 을 최종 잔존수명을 간주하였다.

최근에 매설되기 시작한 DCIP의 경우, 잔존수명 추정시 CML이 중성화되기 이전까지는 DCIP의 외면부식속도만을 그대로 적용하였고, 중성화가 100% 진행된 이후에는 Table 7에서 얻은 매설년수별 CIP의 내면 최대부식속도를 적용하였다.

CIP와 DCIP 최종 잔존수명을 산정결과는 Table 8과 Table 9와 같다. CIP의 경우 잔존수명은 0년~44년(평균 12.4년)으로 분석되었다. 따라서, 대부분의 CIP의 잔존수명이 매우 짧은 것으로 분석되어 갱생 또는 교체에 대한 개량 계획의 수립이 시급할 것으로 판단된다.

이는 상수도관의 경우 지하에 매설되어 내부로부터는 높은 수압이 작용하고, 상부로부터는 높은 토압을 포함한 많은 외압이 작용하기 때문에 누수발생이 반드시 잔존수명이 0이 되는 시기, 즉 상수도관이 부식으로 인해 관통이 될 때 발생되지는 않을 것이기 때문이다.

**Table 4. Results of internal & external maximum corrosion rates on CIP**

Samples	Pipe type	Laying year	Internal maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	External maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	Maximum corrosion rate (mm/year)
P-A-02	CIP	1968	0.08	0.09	0.17
P-B-02	CIP	1980	0.29	0.17	0.46
P-B-03	CIP	1966	0.16	0.14	0.31
P-B-05	CIP	1979	0.27	0.09	0.36
P-C-03	CIP	1981	0.41	0.02	0.42
P-C-04	CIP	1975	0.15	0.07	0.22
P-D-01	CIP	1973	0.23	0.10	0.32
P-D-03	CIP	1974	0.14	0.08	0.22
P-D-05	CIP	1978	0.18	0.13	0.31
P-D-08	CIP	1976	0.19	0.13	0.31
P-D-09	CIP	1983	0.20	0.17	0.37
P-D-11	CIP	1979	0.28	0.08	0.36
P-D-13	CIP	1973	0.12	0.03	0.15
P-E-02	CIP	1982	0.24	0.09	0.33
P-E-04	CIP	1979	0.24	0.06	0.30
P-E-05	CIP	1982	0.34	0.19	0.53
P-F-01	CIP	1977	0.15	0.14	0.28
P-F-03	CIP	1979	0.26	0.08	0.34
P-F-09	CIP	1977	0.25	0.25	0.50
P-F-14	CIP	1982	0.22	0.19	0.41
P-F-17	CIP	1995	0.91	0.27	1.18
P-F-19	CIP	1980	0.20	0.13	0.33
P-G-02	CIP	1981	0.31	0.11	0.42
P-H-3	CIP	1990	0.69	0.45	1.14
P-H-4	CIP	1982	0.07	0.09	0.16
Average			0.26	0.13	0.40

**Table 5. Results of internal & external maximum corrosion rates on DCIP**

Samples	Pipe type	Laying year	Internal maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	External maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	Maximum corrosion rate (mm/year)
P-E-10	DCIP	1983	0.00	0.06	0.06
P-F-11	DCIP	1990	0.00	0.07	0.07
P-F-13	DCIP	1985	0.00	0.13	0.13
P-F-18	DCIP	1995	0.00	0.34	0.34
P-I-01	DCIP	1985	0.00	0.06	0.06
P-I-06	DCIP	1985	0.00	0.11	0.11
Average			0.00	0.13	0.13

**Table 6. CML-N ratio and rate of CML neutralization**

Samples	Pipe type	Laying year	CML-N ratio* (%)	Rate of CML neutralization (%/year)	t <sub>n</sub> (year)
P-E-10	DCIP	1983	100	5.88	0.00
P-F-11	DCIP	1990	10	1.00	90.00
P-F-13	DCIP	1985	50	3.33	15.00
P-F-18	DCIP	1995	10	2.00	45.00
P-I-01	DCIP	1985	50	3.33	15.00
P-I-06	DCIP	1985	50	3.33	15.00

\*CML-N ratio : Neutralization ratio of cement mortar lining.

따라서, 누수방지를 고려한 상수도관의 개량을 위해서는 추정된 잔존수명 이전에 적절한 개량 대책이 수립되어야 할 것이다. 또한, P-H-3의 경우, 비록 최근에 매설된 관이지만 잔존수명이 매우 짧았으며, P-A-02의 경우에는 매설년수가 32년이 지났지만 잔존수명은 29년으로 추정되었다. 따라서, 기존의 매설년수에 따른 단순 노후관 개념에 따른 개량 계획보다는 상수도관의 적절한 잔존수명의 평가를 할

때 경제적인 개량과 효율적인 누수방지 계획이 수립될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8에서 현재까지의 매설된 기간과 잔존수명을 합한 것으로 이를 각 관체의 내구년수로 보면, CIP의 내구년수는 평균적으로 33.52년으로 평가되었다. 따라서 B시에 매설된 CIP는 전체 사용연한 중 약 3분의 1정도만이 남아있는 것으로 분석되었다.

Table 7. Maximum corrosion rate modified by Fig. 8

Step	Laying year	Internal maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	External maximum corrosion rate of pipe (mm/year)	Maximum corrosion rate (mm/year)
I	Pre 10	0.51	0.33	0.84
II	11~15	0.31	0.20	0.51
III	16~20	0.24	0.14	0.39
IV	21~25	0.19	0.12	0.31
V	26~30	0.17	0.10	0.27
VI	over 31	0.15	0.09	0.24

Table 8. Prediction of residual life on CIP of B city

Samples	Pipe type	Laying year	Periods of laying (year)	Residual life of pipe (year)			Total life of Pipe (year)
				$R_{1/2}$	$R_{1/2}$	$R_f$	
P-A-02	CIP	1968	32	29	21	29	61
P-B-02	CIP	1980	20	0	0	0	20
P-B-03	CIP	1966	34	0	0	0	34
P-B-05	CIP	1979	21	10	13	13	34
P-C-03	CIP	1981	19	10	16	16	35
P-C-04	CIP	1975	25	22	20	22	47
P-D-01	CIP	1973	27	2	3	3	30
P-D-03	CIP	1974	26	29	26	29	55
P-D-05	CIP	1978	22	0	0	0	22
P-D-08	CIP	1976	24	9	11	11	35
P-D-09	CIP	1983	17	13	17	17	34
P-D-11	CIP	1979	21	2	2	2	23
P-D-13	CIP	1973	27	44	28	44	71
P-E-02	CIP	1982	18	7	6	7	25
P-E-04	CIP	1979	21	13	15	15	36
P-E-05	CIP	1982	18	2	2	2	20
P-F-01	CIP	1977	23	20	22	22	45
P-F-03	CIP	1979	21	11	14	14	35
P-F-09	CIP	1977	23	0	1	1	24
P-F-14	CIP	1982	18	0	0	0	18
P-F-17	CIP	1995	5	4	6	6	11
P-F-19	CIP	1980	20	10	11	11	31
P-G-02	CIP	1981	19	6	7	7	25
P-H-3	CIP	1990	10	0	0	0	10
P-H-4	CIP	1982	18	39	22	39	57
Average			21.16	11.28	10.52	12.40	33.52

Table 9. Prediction of residual life on DCIP of B city

Sample	Pipe type	Laying year	Periods of laying (year)	$t_n$ (year)	Residual life of pipe, $R_{1/2}$ (year)	Total life of Pipe (year)
P-E-10	DCIP	1983	17	0.00	14	31
P-F-11	DCIP	1990	10	90.00	95	105
P-F-13	DCIP	1985	15	15.00	24	39
P-F-18	DCIP	1995	5	45.00	41	46
P-I-01	DCIP	1985	15	15.00	28	43
P-I-06	DCIP	1985	15	15.00	29	44
Average			12.83	30.00	38.50	51.33



Table 9에서 DCIP의 최종 잔존수명은 38.50년으로 CIP 보다는 약 3배 이상 더 높았으며, 내구년수는 약 51.33년으로 평가되었다. 따라서, DCIP의 경우는 전체 사용연한중 2분의 1 이상 남아있는 것으로 분석할 수 있다. 그리고 CIP와 내구년수를 비교해 보면, 대략 1.5 배 이상 더 긴 것으로 평가할 수 있다. 그러나, DCIP는 CML이 중성화가 진행되면, 내면부식이 빠르게 촉진므로 CML이 중성화되기 이전에 적절한 갱생을 해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 매설년도에 따른 관체의 잔존두께, 부식속도 등을 평가하고, 향후 상수도관이 부식에 의해서 관통이 되는 시기, 즉 잔존수명과 이를 통한 개량 시기를 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

B시의 경우, 외면부식깊이보다는 내면부식깊이가 약 2배 정도 더 커서 상수도관의 부식에 미치는 영향이 토양보다는 수질적 영향력이 더 큰 것으로 판단된다. CIP와 DCIP의 잔존두께 측정 결과, CIP는 0mm~6.73mm 이었으며, DCIP는 5.98mm~9.65mm로 CIP 보다는 DCIP의 잔존두께가 더 컸다.

또한, 부식속도는 CIP의 경우, 내·외면 최대부식속도를 합한 최대부식속도가 1975년 이전 까지는 0.15mmpy~0.32mmpy, 1976년에서 1985년까지는 0.16mmpy~0.53mmpy이었으며, 85년 이후 매설된 CIP는 1.14mmpy~1.18mmpy로 부식속도가 매우 빨랐다. DCIP의 경우 매설년수에 관계없이 내면 최대부식속도는 모두 0.00mmpy이었으며, 외면 최대부식속도의 경우에는 0.06mmpy~0.34mmpy로 전체적인 최대부식속도는 CIP에 비하여 매우 낮았고, CIP의 DCIP대한 최대부식속도가 3배 이상 빠른 것으로 나타났다. DCIP의 CML의 중성화속도는 1.00%/year~6.67%/year 이었으며, 평균적으로 3.65%/year 이었다.

CIP의 경우, 잔존수명은 0년~44년(평균 12.4년)으로 CIP의 잔존수명이 매우 짧은 것으로 분석되어 갱생 또는 교체에 대한 개량 계획의 수립이 시급할 것으로 판단된다. DCIP의 최종 잔존수명은 38.5년으로 CIP보다는 약 3배 이

상 더 높은 것으로 분석되어, CML이 중성화가 되면, 내면 부식이 빠르게 진행되므로 CML이 중성화되기 이전에 이에 대한 적절한 개량을 해야 할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 건설교통부/과학기술부가 주관하는 '수자원의 지속적 확보기술개발'의 '누수방지 및 저감기술 개발' 과제의 연구성과의 일부입니다. 연구개발비를 지원해 주신 건설교통부/과학기술부와 사업단, 그리고 참여기업인 수경산업(주)에 도 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 한국물학술단체연합회/한국수자원공사, 21세기의 물, 제8회 세계 물의 날 기념 물 심포지엄 (2000).
2. 김만기, 이현동, 정원식, 최준향, 상수도시스템의 누수 저감 방안에 관한 연구(1), 대한환경공학회 2002년도 춘계학술연구발표회 논문집(1), pp. 171~172 (2002).
3. 2002 상수도통계, 환경부 (2003).
4. 이현동 등, 상수도관로의 부식 및 노후도 예측모델 개발, G-7환경공학 기술개발사업, 환경부 (2002).
5. 이현동, 정원식, 김만기, 배철호, 광필재, 김종훈, 김웅석, 상수도관로의 관체부식 평가기법에 관한 연구, 대한환경공학회 2000년 추계학술연구발표회 논문집(1), pp. 485~486 (2000).
6. 정원식, 이현동, 유명진, 광필재, 토양환경영향인자를 이용한 상수도관 외부부식 평가에 관한 연구, 대한환경공학회지, 23(10), pp. 1611~1619 (2001).
7. 이현동, 지재성, 서규태, 정원식, 정해룡, 배수시스템내 부식영향 수질인자의 변화 특성, 대한환경공학회지, 20(8), pp. 1151~1160 (1998).
8. Dempsey, P., Manook, B.A., Assessing the Condition of Cast Iron Pipes, WRc, United Kingdom (1986).
9. AWWA Research Foundation, Internal corrosion of water distribution systems, Second Edition. U.S.A (1996).
10. Kelly, D., Day, O., External corrosion in distribution systems, AWWA, 81(10), pp. 45~52 (1989).