

## 상수도관의 부식특성과 부식깊이 추정 모델

# Characteristics of Pit Corrosion and Estimation Models of Corrosion Depth in Buried Water Pipes

김재학<sup>1</sup> · 류태상<sup>1</sup> · 김주환<sup>1</sup> · 하성룡<sup>2,\*</sup>

Kim, Jea-Hag<sup>1</sup> · Ryu, Tae-Sang<sup>1</sup> · Kim, Ju-Hawn<sup>1</sup> · Ha, Sung-ryung<sup>2,\*</sup>

1 한국수자원공사

2 충북대학교

(2007년 8월 23일 논문 접수; 2007년 12월 12일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

The accurate estimation of water pipe deterioration is indispensable to prevent pipe breakage and manage in advance. In this study, corrosion of water pipe is adopted, which is relatively underestimated although it takes most part of deteriorating pipeline. Predicting corrosion rate and corrosion depth of a pipe can make an increase of the life span of the pipeline, which is laid under the ground according to characteristics of soil and water corrosion. For the purpose, mathematical models that can presume nominal depth through estimation of pit corrosion and corrosion rate is introduced. As comparison of results with conventional methods in other foreign countries, it is evaluated that the external corrosion depth is estimated less than the models, proposed by other researchers and the internal corrosion rate was processed faster than the external corrosion rate.

**Key words:** Water Pipe, Corrosion Rate, Corrosion Depth, Rehabilitation

**주제어:** 상수도관, 부식속도, 부식깊이, 개량

## 1. 서 론

상수도시설의 송 배수관로는 국가 주요 기반시설로 적정수압, 수량 및 수질 등을 유지하면서 산업시설 및 가정의 수도전까지 위생적, 안전적 및 안정적으로 공급하는 기능을 목적으로 수도시설에 차지하는

비중이 매우 크다. 따라서 상수도시설 관로에 대한 연구와 기술은 오랜 기간 동안 양적인 측면이나 질적인 측면에서 많은 발전이 진행되고 있지만, 유지관리상 기존시설의 경우 노후화에 따른 구조적 결함, 내외면 부식 등에 의한 누수 및 파손, 적수 및 탁수 등의 수질악화와 더불어 수리학적 통수능력의 감소 등 여러 가지 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 이러한

\*Corresponding author Tel: +82-43-261-2494, FAX: +82-43-261-2494, E-mail: simplet@chungbuk.ac.kr (Ha, S.R.)

문제점들을 근본적으로 해결하기 위해서는 수도관리자가 항상 관로시설을 점검하여 누수나 파손 등, 관의 현재 상태를 파악하여 문제발생에 신속하게 대응하고 문제발생을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 우리나라는 노후도에 대한 기준이나 노후도의 판정에 대한 기록 자체가 없을 뿐만 아니라, 단순히 경과년도를 기준으로 교체되고 있으며, 대부분 상수관로가 지하에 매설되어 관로 상태의 파악이나 진단을 통한 운영관리 및 유지관리에 많은 어려움이 있다. 이는 관로가 지하매설물인 점과 관로 자료 수집이 어려운 점 및 매설지역에 따른 지역적 특성 등이 복합적으로 작용하는 점과 아울러 송수, 배수, 급수관에 따른 관종, 환경 등에 대한 자료의 체계적 관리가 전무한 실정이기 때문이다. 관로사고를 사전에 예방하고 운영 및 유지관리를 효율적으로 수행하기 위해서는 관의 노후상태평가 및 파손 영향인자를 철저히 분석하는 작업이 필수적이다. 특히 국내의 경우 선진외국과 달리 토양에 의한 외면부식보다 상대적으로 내면부식 문제 등이 심각하고, 수도관 부식문제는 수질악화와 시설의 수명단축을 야기하여 보수 및 교체 등에 따른 경제적 손실이 발생하므로 노후관의 교체만이 주요대안이 될 수는 없으며, 보다 근본적인 해결점을 찾아야 한다. 이를 위해 부식깊이를 예측하는 연구가 활발히 이루어지고 예측모델이 제시되어 있으나 적용의 한계성이 있다(환경부, 2002).

현재 다타일주철관의 부식평가에 주로 적용되고 있는 방법으로는, 1964년 CIPRA(Cast Iron Pipe Research Association, predecessor of DIPRA)에서 주철관에 대하여 제시한 점수평가방법(ANSI/AWWA C105/A21.5-99)을 들 수 있다(AWWA, 1999). ANSI에서는 각 인자의 점수를 합하여 10점 이상인 경우 부식성이라고 판단한다. 한편, DVGW 평가법(정원식 등, 2001)은 강관의 부식방지를 위한 주변 토양의 부식성을 평가하기 위해 개발되었다. 주로 토질, 함수율, 토양비저항, pH, 총산도, 총알칼리도, Redox 전위, H<sub>2</sub>S 및 황화물, 염화물 이온, 황산염 등의 토양특성 인자에 대하여 각각의 점수평가를 합쳐 -10점 이하가 되면 매우 부식성이 있다고 판단하는 방법이다. 국내에서는 정 등(2001)이 국내 D도시를 대상으로 하여 CIP(Cast Iron Pipe)와 DCIP(Ductile cast Iron Pipe) 관종에 대하여 외부부식을 평가하였고, 관 외

부부식상태와 pH, 황산이온, 염소이온 등의 상관성이 높은 것으로 보고한 바 있다. 또한 부식이 관 외부 부식에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가방법으로는 해당 토양에서의 부식깊이 또는 부식속도 등을 평가하는 것으로, 많은 연구자들(Rossum, 1969; Romanoff, 1964; Dempsey & Manook, 1986; Kucera & Mattson, 1987; Doyle, 2000; Rajani & Maker, 2000)이 토양과 부식깊이 또는 부식속도 간의 상관성을 평가하기 위하여 많은 노력을 해왔으며, 이를 토대로 다양한 모델을 개발하였다. 부식속도에 대한 초기 모델은 회주철관에 대하여 멱함수로 표현한 것들이며, 이중 대표적인 모델이 Romanoff's model(1957)과 Rossum's model(1969)이다. 이들은 주로 부식속도와 매설년수 관계 또는 토양특성과의 관계를 수학적 함수를 이용하여 표현하였다.

최근 Rajani 등(2000)이 토양특성과 부식부식에 대한 상관성을 규명하고자 하였으나 좋은 상관성을 얻지는 못하였지만, 부식과정을 두 단계로 구분한 Two phase 모델을 제시하였다. 첫 단계에서는 부식이 빠르게 진행되는 지수함수적으로 진행(Exponential pit growth), 두 번째 단계에서는 부식속도는 감소하여 선형적으로 진행(Slow linear growth)하는 것으로 가정하였다. 이는 부식이 초기에 빠르게 진행되지만, 점차적으로 부식생성물인 산화철이 부식을 억제하는 특성을 반영한 것으로, Rajani et al.(2000) 등은 이를 고려하였다. 국내에서는 정 등(2001)과 이 등(2004)이 상수관로에 대한 부식속도에 대한 평가를 한 바는 있으나, 정 등은 평균부식속도와 ANSI/AWWA 또는 DVGW 등과 통계적인 상관성을 검토하는데 그쳤으며, 이 등(2004)도 토양특성에 대한 부식속도 모델보다는 매설년수에 따른 부식속도에 대한 평가에 국한되었다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라의 매설상수도관의 관종별 환경 및 경과년도에 대한 부식의 통계적 특성을 분석하고, 상수도관의 내면 및 외면 부식깊이 예측모델을 개발하고자 한다. 외면 부식깊이는 토양 부식성을 평가대상으로 하는 한편, 내면 부식깊이의 경우는 수질부식성을 대상으로 하였다.

## 2. 연구방법

상수도관의 부식으로 인하여 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 측정하여야 한다(WRC, 1986). 본 연구에서는 수집된 관체에 대하여 잔존두께의 측정을 위하여 매설관의 내·외면의 부식생성물과 흑연부산물을 제거하기 위하여 샷블라스팅(Shot blasting)을 실시한 후, Dial depth gage와 Dial caliper gage 등을 이용하여 관체의 두께, 외면 최대부식깊이와 내면 최대부식깊이를 각각 측정하였다. 닥타일추출관(DCIP)의 경우 내면의 시멘트 모르타 라이닝을 완전 제거하고, 육안관측을 하여 내면부식이 진행되었을 경우에만 내면 최대부식깊이를 측정하였다. 또한 내외면 도복장 강관(SP)의 경우에는 도복장의 탈리에 따른 부식이 진행된 상태에 한해서 해당부위를 측정하였다.

### 2.1. 부식속도

매설년수에 따른 부식속도를 추정하기 위해서는 매설후 현재시점까지 수년에서 수 십년의 장기간에 걸친 부식깊이의 측정이 요구되나, 본 연구에서는 조사된 관체의 내·외면 최대부식깊이 측정자료와 매설년수 자료를 식 (1), 식 (2)를 이용하였다. 이들 식에서는 내·외면의 부식속도는 다르지만 매설이후 경과된 시점까지는 시간에 따라 동일하게 진행되는 것으로 가정하고 관체의 내·외면 최대부식속도를 선형모델을 이용하여 산정하였다(Linear model, sheikh 등, 1990).

$$E_{mcr} = \frac{E_{mcd}}{y} \quad (1)$$

$$I_{mcr} = \frac{I_{mcd}}{y} \quad (2)$$

여기서,  $E_{mcd}$ 와  $I_{mcd}$ 는 각각 외면부식 깊이와 내면부

식 깊이를 나타내며  $E_{mcr}$ 는 외면 최대부식속도(mm/year)이고,  $I_{mcr}$ 는 내면 최대부식속도(mm/year) 그리고  $y$ 는 경과년도이다. 내·외면의 부식의 변화를 추정하기 위하여 경과년도별 도출된 부식속도를 도시하면 부식속도 범위에 해당하는 부식속도 식은 식 (3)과 같다.

$$PCR = ae^{-b \cdot time} \quad (3)$$

여기서 PCR는 부식속도(mm/year),  $a$ 와  $b$ 는 경험상수이고  $time$ 은 경과년도를 의미한다.

### 2.2. 부식깊이

Rajani 외 (2000) 등은 Rossum 모형으로부터 추정된 공식깊이는 실제자료와 비교할 때 상관성이 떨어지는 것으로 평가하였고, 다음의 식 (4)와 같이부식깊이 추정을 위한 비선형 지수함수 형태의 모델을 제안하였다.

$$p_d = \alpha \cdot time + \beta(1 - e^{-\gamma \cdot time}) \quad (4)$$

여기서,  $p_d$ 는 부식깊이(mm),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 경험상수이고,  $time$ 은 경과년도이다.

따라서 본 연구에서도 대상 관체에 대한 내·외면 부식속도(External and internal corrosion rate)를 토대로 Rajani 외(2000) 등이 제안한 식 (4)의 비선형 지수함수(Nonlinear exponential equation) 형태의 부식깊이 추정 모델을 개발하였다.

## 3. 자료의 수집 및 특성

본 연구에서는 수집된 관체에 대한 내외면 부식에 대한 평가를 통하여 부식속도를 도출하여, 이를 토대로 공식깊이를 추정할 수 있는 부식깊이 예측모델을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 수집된 현장자료들은 단수 수반 및 체계적인 데이터 부족 등 기존 관체 조사에 대한 한정된 자료조사로 동일지역에서 수집된 자료가 아니기 때문에 경과년도와 관경, 관종에 따라 조사된 부식깊이와 토양영양인자, 수질(LSI값) 등 대표적인 영향인자만 고려하여 내외면 부식깊이를 추정할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위하여

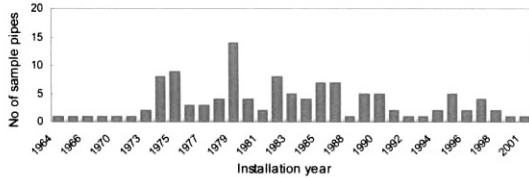


Fig. 1. Distribution of elapsed years for study pipes.

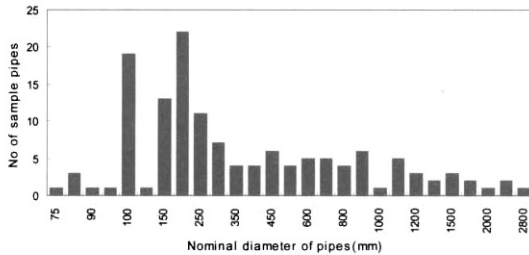


Fig. 2. Distribution of diameters for study pipes.

조사된 부식깊이 자료를 이용하여 매설년도 및 관종별 통계적 특성을 검토하였다. 또한 기존방법을 활용하여 부식깊이 예측모델을 추정하기 위하여 조사된 관체자료 변동경향을 분석하여 부식속도를 도출하였다.

부식속도 추정을 위한 관체자료는 주로 국내 송배수관로를 대상으로 수집 조사하였으며, 매설환경이 다른 국내 한강, 낙동강 및 금강권역의 광역상수도 및 공업용수도, N시, B시로 부터 주철관종(CIP, DCIP 등) 총 135개를 수집, 부식깊이 예측모델 평가에 활용하였다. 이중 CIP가 57개, DCIP가 41개, SP(Steel pipe)가 37개이다. 모델 개발을 위한 조사된 대상관체의 매설년도 분포현황은 Fig. 1과 같다. 이중 매설년도가 확인된 관체수는 118개, 매설년도 미확인 관체수는 17개이다. 본 연구에서 조사된 관체는 대부

분이 10~30년 경과된 관으로 10년 이전의 관체자료와 30년 이후의 관체조사 자료가 미흡한 실정이다. 주요 원인으로서는 매설된 관로시설에 대한 관체 조사를 위해서는 터파기 및 단수 등이 수반되어야하는 어려움과 대부분의 지자체에서는 경과년도 16~20년 이상을 기준으로 노후관 개량사업을 시행하기 때문이며 앞으로 이에 따른 정기적인 진단조사 및 자료의 체계적인 관리가 필요하다고 할 수 있다.

이들 대상관체에 대한 관경별 분포현황은 Fig. 2와 같이 D75~D2800mm의 분포를 나타내고 있다.

이들 수집된 관체의 관경분포현황을 관종별로 구분하여 보면 직경 600mm 이하 관로에서는 CIP와 DCIP가 700mm 이상 관로에서는 강관이 많이 사용되어 왔음을 알 수 있다.

#### 4. 자료의 분석 및 고찰

수집된 관체에 대한 부식깊이를 측정하여 분석된 결과를 토대로 강관(SP), 닥타일주철관(DCIP), 회주철관(CIP) 관종별로 분류하여 내외면 부식깊이자료의 통계적 특성과 관경에 따른 내외면 부식깊이와의 상관관계 및 경과년도에 따른 내외면 부식깊이와의 상관관계를 분석하였다. 또한 한정된 관체자료 부족 등을 고려시 관종별 개별 부식속도 및 부식깊이 추정모델은 현 연구단계에서는 수행하기 어려워 회주철관과 닥타일 주철관은 내부도복장이 없는 상태에서는 부식에서 동일관으로 분석이 가능하므로 닥타일주철관과 회주철관을 합쳐서 주철관(CIP & DCIP)에 대해서 부식깊이의 특성을 검토하였다. 수집된 관체에 대한 내외면 최대 부식깊이 측정결과 관종별 내외면 부식깊이 현황은 Table 1과 같이 조사되었다. 또

Table 1. Internal and external corrosion depth

Item	Pipe materials	corrosion (pit) depth [mm]			
		Average	STD	Maximum	Minimum
External	CIP	2.088	1.090	5.71	0.32
	DCIP	1.826	1.047	4.48	6.9
	SP	0.227	0.559	2.20	0
Internal	CIP	3.952	1.864	8.30	0
	DCIP	1.196	2.146	0.36	0
	SP	0.872	1.394	5.09	0

한 부식깊이는 관체표면의 부식생성물을 솔 또는 끌 등으로 제거 표면처리 후 원주방향에 따라 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 지점에서 디지털깊이측정기(digital depth gage)를 사용하여 측정하였다.

수집된 자료 중에서 가장 많은 비율을 차지하고 있는 CIP의 경우 평균부식깊이는 외면이 2.088mm, 내면이 3.952mm로 나타났으며, DCIP의 평균적인 부식깊이는 외면이 1.826mm, 내면이 1.196mm로 내부도장(시멘트모르타르 라이닝 등)이 되어있어 내면부식은 대부분이 양호하였으나, 일부 라이닝이 미설치된 관체 및 내면의 라이닝이 탈락된 관체에서 내면부식이 진행된 관체가 조사되었으며, 관 외면부식은 모든 관체에서 발견되었다. SP의 경우 평균적인 부식깊이가 외면 0.227mm, 내부 0.872mm로 모두 내외면도복장처리 되어있어 대부분이 양호한 것으로 나타났으나 외면보다는 내면부식이 더 부식깊이가 크다는 것을 알 수 있었다.

이는 국내 상수도 매설관로의 경우 강관이나 닥타일주철관의 도복장을 감안하더라도 부식발생시 외면부식보다는 내면부식 부식깊이가 크다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. 따라서 외면부식뿐 아니라 내면부식에 대한 지속적인 관리도 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

#### 4.1. 강관

강관 내외면 부식깊이 특성을 살펴보면 국내수도용 강관의 경우 내면도복장은 콜탈에나멜(1994년 이전 KS D8307), 콜탈에폭시(1994년 이전 KS D8501), 액상에폭시(1994년 이후 KS D8502)로 외면도복장은 콜탈에나멜(KS D8307), 아스팔트(KS D8306), 폴에틸렌(KS D3607) 등이 적용되어 사용되어 왔으며 이에 따라 대부분이 내외면 부식이 발생하지 않은 것으로 조사되었다.

대구경관로에 주로 사용되는 강관의 관경별 내외부 부식깊이를 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 관경이 작을수록 외면부식 보다 내면부식깊이가 크게 나타나고 있으며 시간의 경과에 따라서도 외면보다는 내면에서의 부식깊이가 크게 관측되었다. 따라서 직경이 1500mm 이상의 대구경 관로보다 그 이하의 직경을 갖는 관로에서 내외면 부식에 취약하며, 외면보다는 내면부식이 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

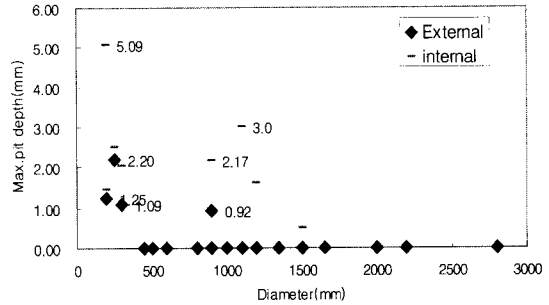


Fig. 3. External & Internal corrosion depth of SP for each diameter.

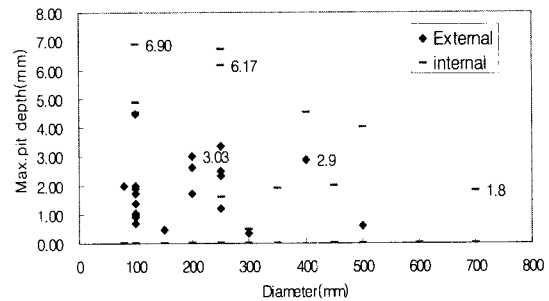


Fig. 4. External & Internal corrosion depth of SP for each exposure year.

경과년도별 부식깊이는 Fig. 4에 도시하였으며, 여기서 매설경과년이 20년 이하인 관체에서 내외부 부식흔적을 발견할 수가 없었는데 이는 내외면 도복장의 영향으로 판단되며 도복장강관의 경우 매설 후 도복장의 탈리가 발생된 이후부터 부식이 발생하는 경향을 보이는데 이는 도복재 부착력의 감소, 도복재료의 열화 등 재료적 측면에서 평가할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4.2. 닥타일 주철관

닥타일주철관의 내외면 부식깊이 특성을 살펴보면 국내수도용 닥타일 주철관의 경우 내면에 몰타라라이닝(KS D4316) 또는 에폭시수지분체도장(KS D4317)으로 적용 사용되어 왔으며 이에 따라 대부분이 내면부식이 도장이 없는 외면부식보다 적게 부식이 발생한 것으로 조사되었다. 내면이 몰탈라이닝된 경우 페놀프탈레인 지시약을 사용 관을 절단한 단면에 바른 후 결과에 따라 중성화 여부를 판단하였다.

Fig. 5에서는 직경이 700mm 이하의 관경에 대한 내외면 부식깊이를 도시한 것으로 직경이 작은 관로에

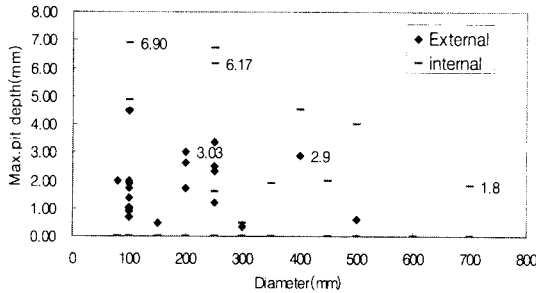


Fig. 5. External & Internal corrosion depths of DCIP for each diameter.

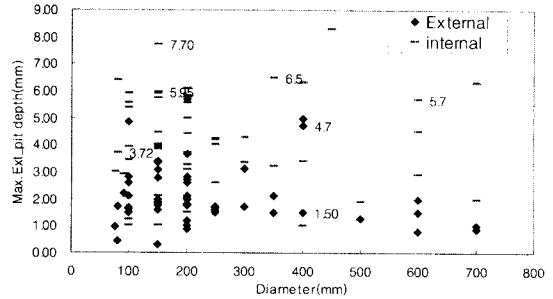


Fig. 7. External & Internal corrosion depth of CIP for each diameter.

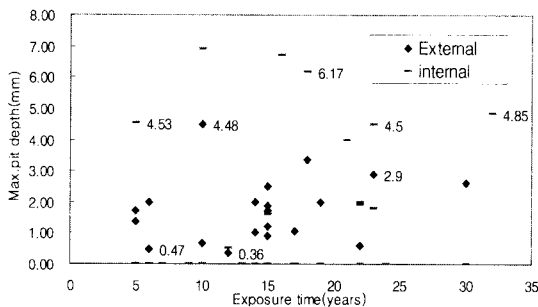


Fig. 6. External & Internal corrosion depth of DCIP for each exposure year.

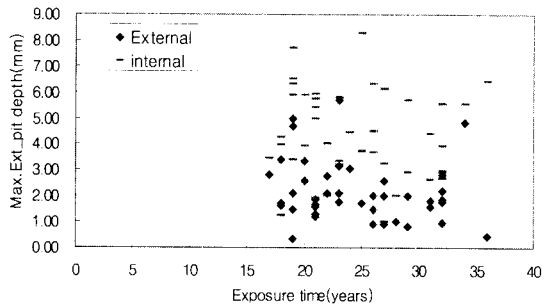


Fig. 8. External & Internal corrosion depths of CIP for each exposure year.

서 내외면 부식이 크게 관측되었고 내·외면 모두 환경이 커질수록 부식깊이가 감소하는 경향을 보여주었다.

관체직경을 80~100mm, 200~350mm, 400~700mm의 3개 그룹으로 구분하여 각 그룹별 최대, 최소, 평균 외면 및 내면 부식깊이를 분석한 결과, 외면부식의 경우에는 200~350mm에서 평균외면 부식깊이가 2.14mm로 가장 높게 나타났으며, 내면의 경우에는 80~100mm에서 평균 5.42mm로 가장 크게 나타나 환경이 커질수록 부식깊이가 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6에서 경과년도별 내면부식의 경우 도복장의 영향으로 외면부식보다 발생이 적으나 부식깊이는 외면보다 내면에서 크게 발생하였다.

경과년도별 부식특성을 알아보기 위하여 3개 그룹(5~10년, 11~19년, 20~30년)으로 나누어 최대, 최소, 평균 외면 및 내면 부식깊이를 비교하였다. 그 결과 경과년도가 20~30년에서 평균외면 부식깊이가 2.29mm로 가장 큰 값을 보였고, 내면의 경우에는 경과년도 5~10년 초기년도에서 평균값 5.72mm로 가장 크게 나타났다. 이는 5~10년이 경과된 관체 대부분

이 직경이 100mm 이하로 내면 도복장이 없는 것으로 조사되어, 도복재료의 탈리는 직경이 큰 관체보다는 직경이 작은 관로에서 쉽게 발생되었기 때문인 것으로 추측된다.

#### 4.3. 회주철관

국내수도용 회주철관은 내외면 도복장이 없으므로 1957~1970년까지 주로 사용되어 왔으나 1968년 닥타일 주철관이 처음 생산을 시작하면서 그 사용이 급속하게 줄었으며 1982년 이후, 현재에는 내면에 몰타르라이닝(KS D4316)을 대부분 사용하고 있고 회주철관은 1991년 규격이 폐지되었다.

직경 700mm 이하에서 주로 사용된 회주철관 환경에 대해 내외면 부식을 도시하면 Fig. 7과 같으며 내외면 도복장이 되어 있지 않아 모두 부식이 발생하였으며 다른 관종과 동일하게 대부분이 내면부식이 외면부식 보다 부식깊이가 크게 나타났다.

환경을 그룹별로 구분하여 최대, 최소, 평균 외면 및 내면 부식깊이를 조사한 결과 외면부식의 경우 200~350mm에서 평균외면 부식깊이가 2.09mm, 내면

**Table 2.** Corrosion depth of cast iron pipe for diameters

Item	Pipe diameter (mm)	Corrosion depth of statistics					
		Mean	STD	Skew	Kurtosis	Max.	Min.
External	Group A (80~100)	2.09	1.40	0.91	0.25	5.00	0.32
	Group B (200~350)	2.03	1.00	1.60	4.80	5.71	0.36
	Group C (400~700)	2.28	0.98	1.15	3.22	4.85	0.59
Internal	Group A (80~100)	4.60	1.97	0.07	-0.07	7.70	1.24
	Group B (200~350)	4.18	1.94	-0.05	-0.71	8.30	0.49
	Group C (400~700)	4.02	1.45	-0.16	-0.99	6.40	1.80

**Table 3.** Corrosion depth of cast iron pipe for exposure years

Item	Exposure years (year)	Corrosion depth of statistics					
		Mean	STD	Skew	Kurtosis	Max.	Min.
External	Group A (5~10년)	1.93	1.03	0.99	1.44	4.85	0.32
	Group B 11~19년	2.10	0.98	1.64	5.08	5.71	0.36
	Group C 20년 이상	1.95	1.43	1.30	0.76	5.00	0.59
Internal	Group A (5~10년)	4.28	1.76	-0.22	-0.30	7.70	1.00
	Group B 11~19년	3.88	1.71	-0.07	-0.91	6.70	0.49
	Group C 20년 이상	3.72	2.12	0.81	0.16	8.30	1.00

부식의 경우 200~350mm에서 평균내면 부식깊이가 4.0mm로 그룹별로 유사한 경향을 볼 수 있었다. 이는 회주철관(CIP)의 경우 전체 내외면에서 일정하게 부식이 진행된다는 것을 알 수 있었다. 또한 내외면 환경그룹에 따른 내외면 모두 평균 부식깊이가 유사하여 환경의 크기에 관계없이 모두 부식이 발생된 것을 알 수 있다.

경과년도별 부식특성은 내외면 모두 조사된 관체에서 고르게 발생하였으나 DCIP와 같이 부식깊이는 외면부식보다 내면부식이 높게 나타났다. 최대, 최소, 평균 외면 및 내면 부식깊이는 내외면 평균 부식깊이가 유사하게 나타났으며 내면의 경우 경과년도가 큰 30~36년 그룹에서 평균 부식 깊이가 4.58mm로 가장 크게 나타났다.

다타일주철관과 회주철관을 유사 관종으로 간주하여 환경에 따른 부식깊이의 통계적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 수록하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 부식의 진행은 토양환경에 의한 외면부식보다 내면부식이 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있었으며 관경을 3개 그룹으로 나누어 자료집단의 유의수준을 산정해본 결과 차이는 미흡하지만 내면부식의 경우

환경이 작을수록 평균 부식 깊이가 큰 것으로 나타났다. Table 2에서 외면부식의 경우 C그룹에서 평균 부식깊이가 가장 큰 것으로 나타났으나 전반적으로 평균 부식깊이는 유사한 결과를 보였다.

주철관의 환경별 내면, 외면 부식깊이에서는 일반적으로 내면부식의 경우 환경이 작을수록 대상관체의 부식 깊이가 커지는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

주철관 전체관로에 대하여 경과년도에 따른 부식깊이의 통계적 특성을 분석하여 Table 3에 나타내었다. 분석결과, 경과년도에 따라 평균값은 비슷하게 나타났으나 내면, 외면 부식 모두 5~10년 사이에 가장 크게 발생하였으며 이후에는 부식깊이가 일정하게 진행되고 있음을 알 수 있었다. 즉 부식이 매설이후 초기년도에서 부식이 발생하고 이후 부식발생은 일정하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 특히 내면부식의 경우 Table 3에서와 같이 5~10년이 경과된 관체에서 평균 4.28mm로 조사되어 내면부식이 가장 크게 나타났으며 경과년도별 내외면 부식깊이는 일반적으로 초기년도 부식이 크게 발생하고 있는 것으로 나타났다. 이후에는 경과년도에 따라 그 차이는 크지 않음

을 알 수 있었다.

### 5. 부식깊이 예측모델 개발

다양한 관종이 생산되고 있는 수도관에서 관종별 예측모델 개발은 현재 연구단계에서는 매우 어렵다. 따라서 부식예측모델의 개발을 위해 수집된 자료의 정규성을 검토하였다. 그 결과 강관은 수집된 자료의 부족 및 내외면 도복장 영향으로 부식깊이에 대한 정규성을 찾아내기 어려웠으나, 주철관과 닥타일주철관의 경우에는 자료가 정규성을 띄고 있는 것으로 나타났다. 즉, 회주철관과 닥타일 주철관은 내면도복장이 없는 상태에서는 부식에서 동일관으로 분석이 가능하므로 닥타일주철관과 회주철관을 합쳐서 주철관에 대한 부식속도 및 부식깊이 추정모델을 개발하는 것으로 한다.

#### 5.1. 부식속도 평가

부식속도는 주철관 내외면의 부식깊이를 경과년도로 나누어 산정하였다. 부식속도는 선형적으로 일정한 것이 아니라 매설초기에는 매우 높게 나타나는 특징을 보였으며, 매설년수가 길어질수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 매설년수가 길수록 관내외면으로부터 부식생성물이 성장함에 따라 토양, 수질 등의 부식영향 인자가 금속부분과의 접촉거리 또는 면적이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 경과년도에 따른 내외면의 부식의 변화를 추정하기 위한 평균 부식속도 식은 선형모형에 의한 부식속도 평가방법에 의해 도출된 식 (3)의 형태로 적용할 수 있었으며, 이 때의 추정된 매개변수는 **Table 4**에 제시하였다.

경과년도에 따른 부식속도 범위 중 가장 약조건의 부식속도를 추정하기 위하여 조사된 관체의 해당 년

**Table 4.** Internal and external corrosion ratio of cast iron pipe

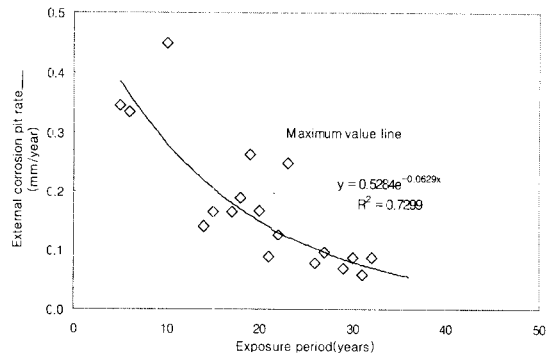
Item	Parameter		
	a	b	
External	ALL(전체그룹)	0.2352	0.0476
	MAX(최대부식속도그룹)	0.5284	0.0629
Internal	ALL(전체그룹)	0.4688	0.0451
	MAX(최대부식속도그룹)	0.9178	0.0532

수에서 부식속도가 가장 빠른 값을 선정하여 경과년도별 외면, 내면 부식속도를 도시한 것이 **Fig. 9**와 **Fig. 10**이다. 여기에서는 최대부식속도를 나타내는 모델의 결정계수는 외면은 0.7299로 내면은 0.7593으로 산정되었다.

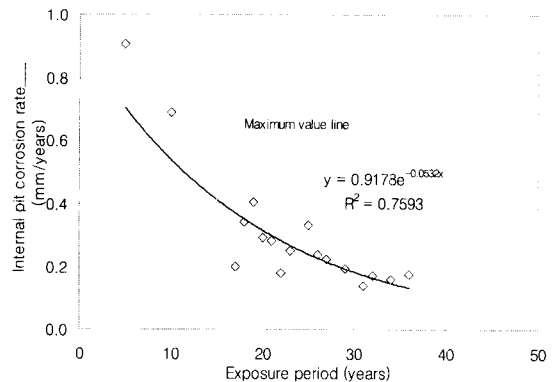
#### 5.2. 부식깊이 예측모델 개발

본 연구에서는 대상관체에 대한 내외면 부식속도를 토대로 Rajani 외(2000) 등이 제안한 비선형 지수함수 형태의 부식깊이 추정모델인 식 (4)의 형태의 식을 적용 매개변수를 추정하였다. 주철관에서 내외면 전체그룹 및 최대부식속도그룹에 대한 경과년도에 따른 내외면 부식깊이 모델은 식 (4)로 표현이 가능하며 추정된 매개변수는 **Table 5**와 같다.

위 수집된 주철관에서 비선형 지수함수 형태의 부식깊이 추정 모델인 식 (4) 형태의 식에 산정한 매개



**Fig. 9.** Variation of maximum external corrosion rate of CIP&DCIP for exposure years.

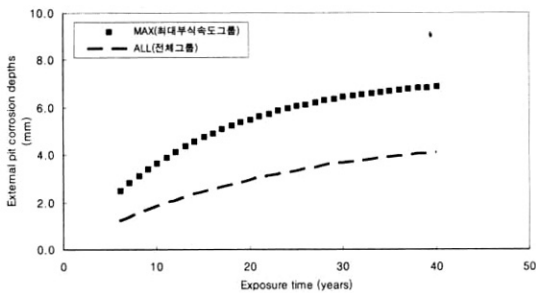


**Fig. 10.** Variation of maximum internal corrosion rate of CIP&DCIP for exposure years.

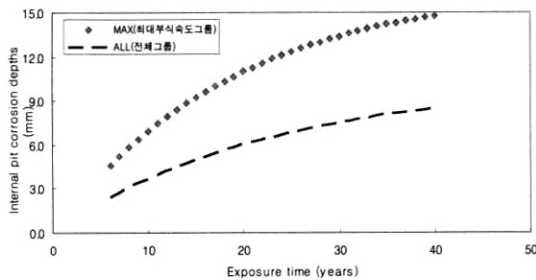


**Table 5.** Prediction model of internal and external corrosion depth

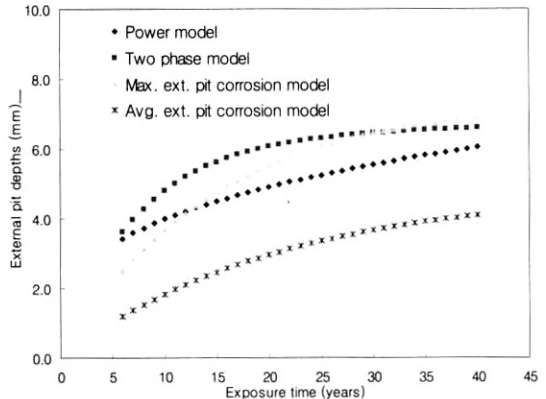
Item		Parameter		
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
External	ALL(전체그룹)	0.00019	4.8124	0.0476
	MAX(최대부식속도그룹)	0.00014	8.1317	0.0629
Internal	ALL(전체그룹)	0.00002	10.1611	0.0451
	MAX(최대부식속도그룹)	0.00018	16.7873	0.0532



**Fig. 11.** Prediction result of CIP & DCIP's external corrosion depth for exposure year.



**Fig. 12.** Prediction result of CIP & DCIP's internal corrosion depth for exposure years.



**Fig. 13.** Comparison results of external corrosion depth for each model.

변수를 적용하여, 내외면 전체그룹 및 최대부식속도 그룹에 대한 경과년도에 따른 내면, 외면 부식깊이 전체 예측모델을 도시하여 보면 Fig. 11 및 Fig. 12와 같으며, 내면부식이 외면부식 보다 경과년도에 따른 부식 깊이가 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 전체그룹과 최대부식속도그룹의 평균 부식깊이를 비교할 때 경과년도가 증가할수록 그 차이가 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 외면 부식깊이 추정모델과 기존의 문헌에서 제시된 국외의 개발식을 Fig. 13과 같이 비교한 결과, 국내의 관체 조사를 토대로 기존방법을

이용한 평균 부식깊이 예측모델식이 기존 문헌에서 Kucera와 Mattsson(1987) 또는 Rajani 등 (2000)이 제시한 식보다는 전반적으로 부식깊이가 작게 나타났으며 최대 부식속도 그룹을 고려하더라도 문헌에서 제시한 모델과 유사하게 나타났다. 이는 국내의 경우 외국보다는 외면부식이 적게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 매설상수도 관의 관종별 환경 및 경과년도에 대한 부식의 통계적 특성을 분석하고, 상수도관의 내면 및 외면 부식깊이 분석을 통하여 기존방법에 의한 부식깊이 예측모델을 제시하였다. 본 연구로부터 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 국내 상수도관의 내면부식 및 외면 부식자료를 분석한 결과 강관이나 주철관의 경우 도복장을 감안 하더라도 외면 부식보다는 내면부식이 더 크게 나

타나는 경향을 보였다.

둘째, 매설경과년수에 따른 부식깊이를 분석한 결과 강관의 경우, 일정기간 경과된 관로에서 내면부식이 처음 발생한 것으로 조사되어, 매설 초기에는 내면 도복장에 의하여 부식이 발생하지 않고 일정기간이 경과된 이후부터 부식이 증가되는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 또한 부식깊이는 매설초기 보다 매설년수가 길어질수록 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 부식영향인자가 금속 부분과의 접촉거리 또는 면적이 감소하기 때문인 것으로 평가된다.

셋째, 본 연구에서 개발된 물리적인 추정 모델은 경과년도에 따른 부식깊이를 추정하기 위한 시도로서, 기존의 문헌에 제시된 모델에 의한 결과보다 전반적으로 부식깊이가 낮게 산정되는 것으로 나타나, 외국과 비교해 볼 때 국내의 경우 외면부식의 영향이 더 적은 것을 알 수 있었다.

넷째, 부식속도 예측모델은 조사된 관체에 한정되어 실제로 발생한 부식경험을 바탕으로 하기 때문에 이론적인 근거가 불충분한 경우가 있는 것으로 판단할 수 있으나, 공학적이고 실용적인 관점에서 본다면 이러한 기준을 제시하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

상수도관의 부식깊이를 예측하기 위해서는 매설관 조사에 대한 체계화를 통하여 영향인자간의 메카니즘에 입각한 체계적인 항목 도출 및 분석체계가 필요하다. 또한 매설지역의 토양, 수질 부식성에 대한 잠재력 등이 향후 관 노후상태에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 예측할 수 있는 정량적인 평가방법을 연구하여야 할 것이다.

## 사사(Acknowledgement)

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2006).

## 참고문헌

1. 환경부 (2002) 관망의 진단,개량 및 부식방지 기술개발, G-7 환경공학기술개발, pp. 153-369

2. 정원식, 이현동, 유명진, 곽필재 (2001) 토양환경 영향 인자를 이용한 상수도관 외부부식 평가에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 23(10), pp.1611-1619.

3. 이현동, 배철호, 홍성호, 황재운, 곽필재 (2004) 상수관 로중 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구, *한국물환경학회지*, 20(3), pp. 206-214.

4. 김주환, 성권식 (2003) 상수관 노후도 평가방법 개선, *한국수처리기술학회지*, 11(2), pp. 63-73.

5. 류태상, 김재학 (2004) 수도관로사고 분석을 통한 국내 관로파손 확률 산정 및 부족량 기대치(신뢰성) 적용연구, 2004 Water Korea 15회 운영기술발표회.

6. 배철호, 김주환, 박상영, 김정현, 홍성호, 이경재 (2006) 토양특성이 상수도관의 외부부식에 미치는 영향 평가, *상하수도학회지*, 20(5), pp. 737-745.

7. Rajani B., Maker J. (2000) Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life, *AWWARF*, pp. 1-249.

8. Rossum, J.R. (1969) Prediction of Pitting in ferrous Metal From Soil Parameters, *Jour. AWWA*, 61(6), pp. 305-310.

9. Romanoff, M. (1964) Exterior Corrosion of Cast-iron Pipe, *AWWA*, 56(9): 1129-1143.

10. Dempsey, P., Manook, B.A. (1986) Assessing the condition of cast iron pipes, WRc United Kingdom, pp. 1-40.

11. Seica, M.V., Packer, J.A., Grabinsky, M.W.F., Adams, B.J., Karney, B.W. (2000) Evaluation and testing of cast iron and ductile iron water main samples, Final report to city of Toronto, Department of civil engineering, University of Toronto, Ontario, pp. 1-203.

12. Berthouex P.M, Brown, L.C. (2002) Statistics for environmental engineers, Lewis Publishers, pp. 289-297.

13. Romanoff, M. (1957) Underground corrosion, National Bureau of Standards Circular 579, Washington D.C., US Government Printing Office.

14. O'day, D.K., Weiss, R., Chiavari, S., Blair, D. (1986) Water main evaluation for Rehabilitation/Replacement, Denver, Colo., AWWARF and AWWA

15. Sheikh, A.K., Boah, J.K., Hensen, D.A. (1990) Statistical modelling of pitting corrosion and pipeline reliability, *Corrosion*, 46(3), pp. 190-197.

16. Kucera, V., Mattson, E. (1987), Atmospheric corrosion, Corrosion mechanics, F. Mansfeld, Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY.

17. Doyle, G. (2000), The role of soil in the external corrosion of cast iron water mains in Toronto, Canada, the degree of master of applied science, Graduate department of civil engineering, University of Toronto, pp. 1-75.

18. ANSI/AWWA C105/A21.5-99 (1999) American national standard for polyethylene encasement for ductile-iron pipe

- 
- systems, AWWA, Denver, CO.
19. Chaker V., Palmer J.D. (1989) Effect of soil characteristics on corrosion, ASTM. Philadelphia, PA 19103.
20. Njjaran, H, Sadiq, R., Rajani, B., Modeling pipe deterioration using soil properties-an application of fuzzy logic expert system, ACSE international conference on pipeline engineering and construction, Pipelines (2004) San Diego, CA., August 1-4, 2004, pp. 1-10.