

## 토양특성이 상수도관의 외부부식에 미치는 영향 평가

### Assessment of Soil Characteristics on External Corrosion of Water Pipes

배철호<sup>1</sup> · 김주환<sup>1,\*</sup> · 박상영<sup>1</sup> · 김정현<sup>1</sup> · 홍성호<sup>2</sup> · 이경재<sup>1</sup>

Chul-Ho Bae<sup>1</sup> · Ju-Hwan Kim<sup>1,\*</sup> · Sang-Young Park<sup>1</sup> · Jeong-Hyun Kim<sup>1</sup>  
Seong-Ho Hong<sup>2</sup> · Kyoung-Jae Lee<sup>1</sup>

1 한국수자원공사 수자원연구원  
2 숭실대학교 환경화학공학과

(2006년 8월 12일 논문 접수; 2006년 10월 11일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

The goal of this study is to present an external pit corrosion rate( $p_{\text{ecr}}$ ) model with considering both the age of pipe and the soil characteristics. The correlation of nonlinear exponential model among conventional empirical models was a little higher than other empirical models in the prediction of  $p_{\text{ecr}}$  according to the age of pipe. However, there has been a limit to predict  $p_{\text{ecr}}$  with the model by using only a pipe age since installation as a variable. The soil analysis results from sixty nine samples showed that all of the samples were non corrosive in the assessment of ANSI/AWWA scoring system. The correlation of soil corrosion factors and  $p_{\text{ecr}}$  was also low. The application result of linear and nonlinear regression models that soil characteristics only showed a low correlation with  $p_{\text{ecr}}$ . Proposed nonlinear regression model in this study, with considering both the age of pipe and the soil characteristics, showed a little higher correlation ( $R^2=0.46$ ) than conventional model.

**Key words:** water pipe, soil corrosion potential, external corrosion rate, nonlinear regression analysis

**주제어:** 상수도관, 토양부식성, 외면부식속도, 중회귀분석

#### 1. 서 론

인간이 생명을 유지하는데 가장 중요한 자연의 산물은 물과 공기이다. 따라서 삶의 질 향상은 물론 풍요로운 생활을 유지하는데 필수적인 물을 공급하는 상수도관의 중요성은 말할 필요도 없다. 그러나 시간

경과에 기인한 부산물로서 상수도관은 노후상태에 도달하게 된다.

현재 상수도관 노후상태에는 일반적으로 단일 인자보다는 매설 후 시간에 따른 설계, 시공, 그리고 운영상에서 다양한 인자가 영향을 주어 발생된다. 이중 대표적인 것이 바로 부식(Corrosion)에 의한 관 손상이며, 이로 인한 관의 두께가 감소하게 되고, 결국 관

\*Corresponding author Tel: +82-42-860-0387, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: juhwan@kwater.or.kr (Kim, J.H.)

의 강도 감소로 인해 내·외부 하중에 대한 저항력이 감소되어 결국 파손에 도달하게 된다. 내부적으로는 결절 등 부식생성물의 발생으로 통수단면적이 감소되어 소요수량의 공급과 소요수압의 확보를 할 수 없게 되고, 더 나아가서는 이들 부식생성물 등으로 인한 적수 등 다양한 수질적 문제가 야기되어, 결국 상수관로 본래의 기능을 상실하게 한다.

현재 관 외부에서 부식에 영향을 주는 대표적인 인자로는 토양의 비 균질적인 토양특성(토양조직과 구조), 토양 수분, 통기성(토양 산화환원전위), 토양 pH, 지표수 수위(Ground level), 토양비저항(Soil resistivity), 그리고 용존 염(Soluble salts)과 미생물 활동도 등이다. 그리고 이들 인자들의 환경적 조건들은 계절적으로 또는 국부적으로 변화하여 상수도관의 수명에 영향을 주지만, 이들 환경적 조건 변화가 상수도관의 부식에 구체적으로 어떠한 영향을 주는지 규명하기는 현재까지도 매우 어려운 것으로 평가되고 있다(Rajani et al., 2000)

토양의 외부부식에 대한 영향력을 평가하는 방법으로 가장 대표적인 방법은 미국국가규격(ANSI) 평가법과 독일가스수도기술자협회(DVGW) 평가법이 있다.

ANSI는 1964년 CIPRA(Cast Iron Pipe Research Association, predecessor of DIPRA)에서 주철관(CIP)에 대하여 제시한 10-point scoring method(ANSI/AWWA C105/A21.5-99)으로 현재 닥타일주철관(DIP)에도 적용되고 있다(AWWA, 1999). ANSI/AWWA에서는 각 인자의 점수를 합하여 10점 이상인 경우 부식성이라고 판단한다. DVGW 평가법은 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 등 10개 이상의 토양특성 인자에 대하여 각각의 점수평가를 합쳐하여 -10점 이하가 되면 매우 부식성이 있다고 판단하는 방법이다.

국내에서는 정 등(2001)이 국내 D 도시를 대상으로 하여 CIP와 DIP 관종에 대하여 외부부식을 평가하였고, 특히 ANSI/AWWA와 DVGW 등의 적용범위에 대하여 각각 4점 이상, 5점 이상으로 조정되어야 함을 보인바 있으며, DVGW보다는 ANSI/AWWA 등이 더 적합한 것으로 평가하였다. 또한 정

등(2001)은 관 외부부식상태와 pH, 황산이온, 염소이온 등의 상관성이 높은 것으로 보고한 바 있다.

그러나 이들 ANSI/AWWA 또는 DVGW는 토양이 부식에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가보다는 부식잠재력(Corrosion potential)에 대한 평가이다. 현재 부식이 관 외부부식에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가방법으로는 해당 토양에서의 부식깊이 또는 부식속도 등을 평가하는 것이며, 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 회주철관(Gray cast iron pipe)에 대한 model들이며, 이중 대표적인 모델이 Romanoff's model(1957)과 Rossum's model(1969)이다.

이들 모델은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 주로 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계를 이용하거나 또는 토양특성과의 관계에 토대를 두고 있다.

Romanoff's model은 미국 NBS(United States National Bureau of Standards)에서 광범위하게 수집한 자료를 토대로 시간에 따른 최대부식깊이( $p_c$ )와 관계를 Power law 형태의 모델을 제안하였다. 그러나 Romanoff's model은 이론적으로 초기 매설시기에는 부식속도는 무한한 속도를 가지며, 오랜 시간이 지난 후 부식속도는 "Zero"에 도달한다는 의미를 포함하고 있다. Rajani 등(2000)도 비록 초기 부식속도가 빠르다고 하더라도, 결코 무한하지 않으며, 오랜 시간이 지난 후에는 어느 일정한 정상상태(Steady state)에 도달하는 것으로 보았다.

Rossum(1969)도 NBS에서 광범위하게 수집한 자료를 토대로 토양특성에 따른 관 외부의 부식(Pit)을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. Rossum's model은 주로 부식속도를 부식깊이에 대하여 토양비저항, 토양 pH, 토양산화환원전위, 그리고 통기성(Aeration)과 연관된 상수 n 등으로 표현된 모델로서 전기화학적 원리를 토대로 부식은 토양 pH 5에서 9 범위내에서 Cell potential 발생한다라는 가정 하에서 유도되었다. 토양 pH가 5 이하일 때 수소의 유리(Liberation)로 부식이 발생되며, pH 10 이상에서는

주철관은 부동태가 된다. 이러한 Rossum의 분석은 평균부식 깊이보다는 오히려 최대부식깊이(External max. pit corrosion depth)의 형성가능성에 토대를 두고 있음을 보여주는 것이다.

이후 Caproco Corrosion Prevention Ltd. 등도 토양 비저항이 부식속도와 매우 관련이 깊은 것으로 보고는 하였으나, 구체적인 상관관계를 규명하지는 못하였고, O'day 등(1986)이 수행한 PWD(Philadelphia Water Department)의 상수관로에 대하여 현장조사를 하였으나, 토양특성과 외부부식에 대한 관계를 규명하는데에는 한계가 있었다. 최근에는 Rajani 등(2000)이 토양특성과 부식부식에 대한 상관성을 규명하고자 하였으나 좋은 성공성을 얻는데 실패하였고, 비선형 지수함수 형태(Nonlinear exponential model)의 Two-phase model을 발표하였다. Two-phase model은 부식속도를 두 단계로 구분하고 있으며, 첫 번째 단계에서는 부식이 빠르게 진행되고(Exponential pit growth), 두 번째 단계에서는 부식속도는 감소하여 매우 선형적으로 성장(Slow linear growth)하는 것으로 가정하였다. 이는관이 부식이 진행되면서, 초기에 빠르게 진행되지만, 점차적으로 부식생성물(산화철)로 부식이 억제되는 특성이 향상되는데, Rajani et al. (2000) 등은 이를 고려하였다. 그러나 본 모델은 매설 초기에 대한 충분한 자료 확보가 부족한 상태에서 개발되어 부식깊이에 대한 추정(부식이 발생하는 초기시점인 15에서 20년 사이)이 매우 불확실한 것으로 평가하였다.

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.

본 연구에서는 기존 모델들의 접근방법을 이용하여 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계, 그리고 관의 외부부식에 미치는 국내 대상현장의 토양특성 인자들이 관 외부부식에 미치는 영향을 평가하였고, 매설년수와 토양특성을 동시에 고려한 외면부식속도 모델을 제안하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 자료수집

#### 2.1.1. 대상관로

본 연구에서는 국내의 송·배·급수관로중 노후 상수관로에 대하여 토양특성이 미치는 영향을 평가하기 위하여, 국내 B, D, N 도시, 그리고 광역상수도 등으로 부터 주철관종과 강관(CIP, DIP, SP 등) 등 총 135개 관체(Pipe body)를 평가하였다. 이 중 CIP가 57개, DIP는 41개, SP는 37개 등이다. 이들 관로 매설년도로 보면 약 1964~2001년 정도이다. 관경별로는 80~2,800mm까지며, 100~500mm 관경이 약 52%를 차지하였다.

#### 2.1.2. 토양시료

본 연구에서 토양특성이 외부부식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수집한 관체의 주변으로부터 전체 69개 토양시료를 채취 분석하였다.

### 2.2. 측정 및 분석방법

#### 2.2.1. 외면부식깊이 측정

일반적으로 매설된 상수도관(Unlined pipe)은 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

Table 1. Characteristics of pipe samples considered in the study

Category	No. of samples		
Pipe type	CIP	57	
	DIP	41	
	SP	37	
Installation year	<=1970	5	
	- known 118	1971~1980	48
	- unknown 17	1981~1990	44
		1990 <	21
Nominal diameter	100 mm <	24	
	100~500 mm	71	
	500~1000 mm	21	
	< 1000 mm	19	

남은 최대 내·외면 부식깊이를 측정해야 한다 (WRc, 1986).

따라서 본 연구에서는 수집된 관체의 외부 부식 생성물을 솔 또는 끌 등을 이용하여 표면을 깨끗하게 한 뒤 관체 두께(Nominal pipe wall thickness)를 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 등 지점에서 측정하였고(Seica et al., 2000; Rajani et al., 2000), 외면의 부식 생성물과 흑연부산물(Graphitization)을 제거하기 위하여 표면연마(Shot blasting)를 하였다. 이후 디지털 캘리퍼스(Digital calipers)와 디지털 깊이계이지(Digital depth gauge) 등을 이용하여 외면 부식깊이, 폭, 길이 등을 각각 측정하였다. 현장 여건상 관체 채취가 불가능한 경우에는 현장에서 일부 절단된 면에 대하여 부식깊이를 측정하였다.

### 2.2.2. 토양분석

본 연구에서는 토양특성이 외부부식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 토양비저항, 토양 pH, 토양산화환원전위, 황산화물, 그리고 함수율 등을 각각 측정하였다. 토양비저항은 현장에서 토양비저항기(Soil resistance meter, NILLSON, Model 400)를 이용하여 측정하였으며, 그 외 4개 항목은 실험실로 시료를 운반하여 분석하였다. 토양에 대한 부식성에 대한 평가는 ANSI/AWWA scoring method를 이용하였다.

### 2.3. 부식속도 모델 수립방법

본 연구에서는 상수도관에 대한 매설년수 또는 토양특성 등을 고려한 부식속도 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 매설년수에 따른 부식속도 모델 형태는 기존에 제안된 경험적 모델(Empirical model) 형태인 Power model(Kucera and Mattsson, 1987), Exponential model(Rajani et al., 2000), 그리고 linear model(Sheikh et al., 1990)를 이용하였고, 이때 각 모

델 내 인자들에 대한 최적 값을 도출하여 모형추정을 위한 방법으로는 최소제곱법(Method of least squares)을 이용하였다(Bertouex and Brown, 2002).

토양특성, 그리고 토양특성과 매설년수 등을 이용한 부식속도 모델을 도출하기 위한 방법으로는 주로 선형회귀분석(Linear regression analysis) 또는 비선형회귀분석(Nonlinear regression analysis) 등이 이용되었다(Doyle, 2000). 따라서 본 연구에서도 토양특성 또는 토양특성과 매설년수 등을 이용한 부식속도 모델은 선형 또는 비선형회귀분석 등을 수행하였고, 이때 상용 통계프로그램인 SPSS version 10.0을 이용하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1. 매설년수에 따른 외면부식속도

#### 3.1.1. 외면부식깊이 측정 결과

Fig. 1과 Fig. 2는 CIP, DIP, SP 등에 대한 외면최대부식깊이(External max. pit corrosion depth, 이하  $p_c$ )를 측정된 결과이다. Fig. 1에서 외부도장이 되어 있지 않은 CIP는 0.32~5.71mm이었으며, Fig. 2의 히스토그램에서 보면 주로 1.5~2.0mm의  $p_c$ 가 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. DIP는 Fig. 1에서  $p_c$ 가 0.36~4.48mm로 나타났으며, 주로 1.0~2.0mm 수준의  $p_c$ 가 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. SP는 상대적으로 콜타르에나멜 또는 아스팔트 등으로 도장이 되어있어, 대부분  $p_c$ 가 0.00mm이었다. 단 외면이 미도장이 되어 있거나 일부 탈리된 강관의 경우  $p_c$ 는 약 0.92~2.20mm 범위이었다.

Table 2. Soil analysis method

Soil characteristic	Analysis methods
Soil resistivity	Four Pin soil resistance test meter
Soil pH	pH Meter
Redox potential	ORP Meter
Sulfate ion	Turbidimetric Method
Water contents	KS F 2306(Weight method)

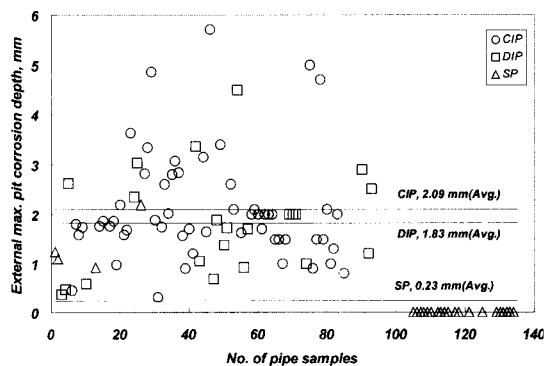


Fig. 1. External maximum pit corrosion depths of pipe samples.

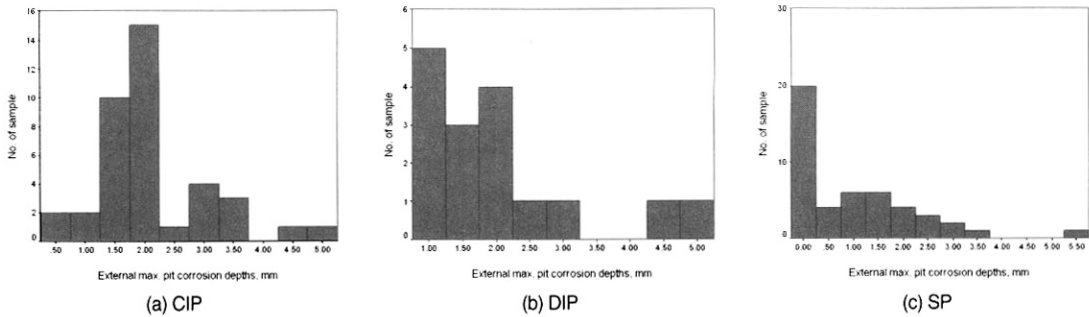


Fig. 2. Histogram on external maximum pit corrosion depths of pipe samples.

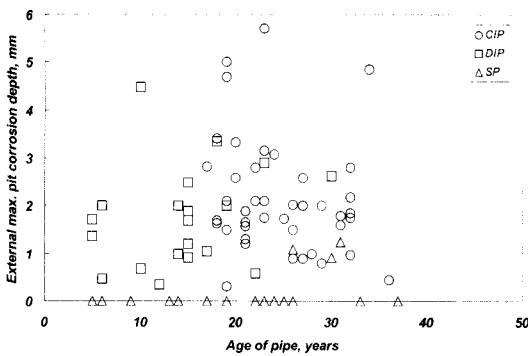


Fig. 3. External maximum pit corrosion depths according to age of pipe.

Fig. 1에서 이들 CIP, DIP, SP의  $p_c$ 를 평균적으로 보면, CIP의  $p_c$ 가 2.09mm로 가장 높았으며, DIP는 1.83mm, SP는 0.23mm 수준이었다.

Fig. 3에서 매설년수에 따른  $p_c$ 의 변화를 나타내었다. Fig. 3에서 보면 매설년수에 따라  $p_c$ 의 변화가 매우 뚜렷한 증가 경향을 보이기보다는 다소 분산(Scattered)되어 있는 것으로 나타났다. 이는 매설년수에 따라  $p_c$ 와의 상관성이 뚜렷하지 않고, 매설년수만을 통해서 관 외부부식 상태를 판단하기에는 다소 무리가 있음을 보여주는 것으로 판단된다. 즉, 관 외부부식에 미치는 영향인자가 토양특성 등 다양하고, 따라서 이에 대한 고려가 필요함을 의미하는 것으로 볼 수 있다. Fig. 3에서 외부 도장으로 인한  $p_c$ 가 0인 경우를 제외하고, 관중에 관계없이 매설년수별(10년 단위) 평균으로 보면, 10년 이하는 1.787mm, 20년까지는 2.140mm, 30년까지는 1.922mm, 30년 이상은 1.928mm이었다.

### 3.1.2. 매설년수에 따른 외면부식속도

본 연구에서는 매설년수와  $p_c$ 와의 상관성은 낮은 것으로 분석되었다 그러나 기존의 연구사례에 대한 접근방법을 통하여 수학적인 함수관계를 도출하고, 경향을 살펴보고자 하였고, 그 결과를 Fig. 4에서 Fig. 6에 나타내었다.

먼저 Fig. 4에는 기존에 제안된 매설년수만을 고려한 경험적 모델인 Power model(Kucera and Mattsson, 1987), Exponential model(Rajani et al., 2000), 그리고 linear model(Sheikh et al., 1990)등을 토대로, 최소제곱법(Method of least squares)를 이용하여 매설년수에 따른  $p_c$ 의 변화를 예측한 결과를 나타내었다. 이때 외부 도장으로 인한  $p_c$ 가 0인 경우는 제외하였으며, 관중에 대한 구분을 하지 않았다. 이는 CIP 또는 DIP 등이 유사한  $p_c$ 를 보였고, SP는 주로 외면 도복장 또는 매설년수 미상 등으로 단 3개소에만  $p_c$ 가 나타났기 때문이다. 본 연구에서는 관중에 대한 구분을 하지 않고, 이들 모든 관종을 포함하여 모형을 추정하였다.

Fig. 4에서 보면, 각 경험적 모델의 형태에 따라  $p_c$ 의 변화가 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 세 모델 중 Power model이 매설초기에 매우 빠르게 부식이 진행되는 경향을 보였으며, Linear model을 제외하고 Power model과 Exponential model은 매설년수 10년 이후부터는  $p_c$ 가 일정한 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 4에서 나타난 결과는 기존의 수학적 모델특성이 반영된 결과이나 실제 현상(Fact)과 개연성이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 또한 본 연구에서 추정된 Exponential model을 기존 Rajani 등(2000)이 수행한 모델을 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 매설 초기 5년까지는 두 모델 모두 유사한 증가형태를 보였다. 그러나 본 연

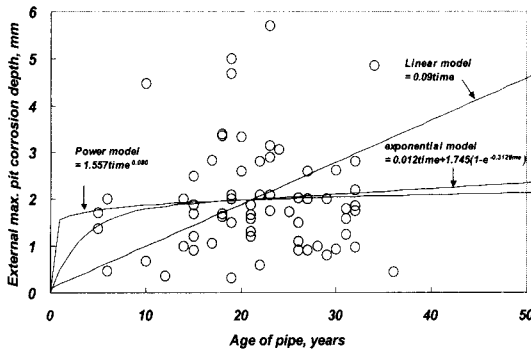


Fig. 4. External max. pit corrosion depths ( $p_c$ ) prediction by empirical models.

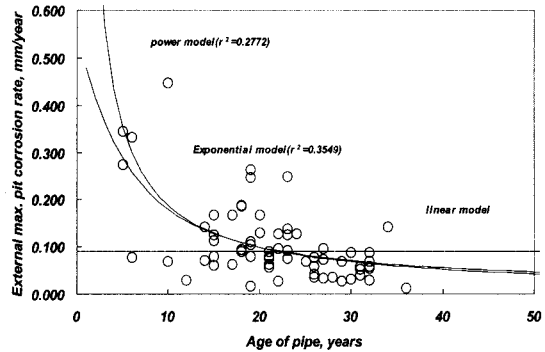


Fig. 6. External maximum pit corrosion rates ( $p_{ecr}$ ) prediction by empirical models.

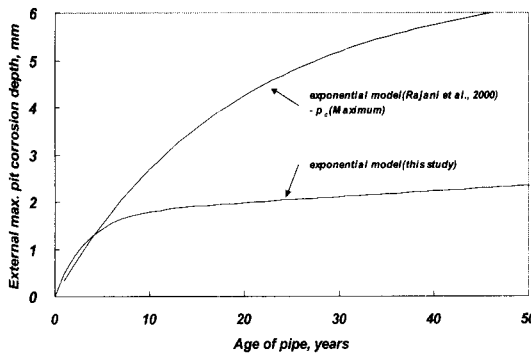


Fig. 5. Comparison with conventional model (Rajani et al., 2000).

구에서 추정된 모델과는 달리 Rajani's model은 10년 이후에도 지속적으로 높은 상승곡선을 보였다. 이러한 이유로는 첫째, Rajani's model에서 대상관체(Pit and Spun CIP)의 매설년수가 120년까지로 상대적으로 길고, 특히  $p_c$ 가 본 연구의 대상관체  $p_c$  값보다도 상대적으로 높았다(Rajani et al., 2000). 두 번째로는 토양에 의한 외면부식이 상대적으로 낮았기 때문에 판단된다. 이는 본 연구에서 수행한 대상관체에 대한 ANSI/AWWA 토양부식성 평가에 따르면, 대부분 평가결과가 모두 10 이하로 토양이 외면부식에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 평가되었기 때문이다(Fig. 7 참조). 따라서  $p_c$  곡선 자체가 Rajani 등(2000)이 제안한 모델보다도 상대적으로 낮은 증가속도를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 6에서  $p_c$ 를 매설년수로 나누어 표현된 외면최대부식속도(External max. pit corrosion rate, 이하  $p_{ecr}$ )는 매설년수에 따라 Power model과 Exponential model

은 매설초기에 매우 빠르게 감소하는 경향을 보였고, 10년 이후부터는 부식속도의 감소 폭이 매우 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 6에서 측정된  $p_{ecr}$ 과 각 Empirical model에 의해서 예측된  $p_{ecr}$ 의 상관성은 power model은  $r^2=0.2272$ , Exponential model은  $r^2=0.3549$ 로 Power model보다는 Exponential model이 더 실측값과 상관성이 다소 높은 것으로 나타났다.

### 3.2. 토양특성에 따른 외면부식속도

#### 3.2.1. 토양특성

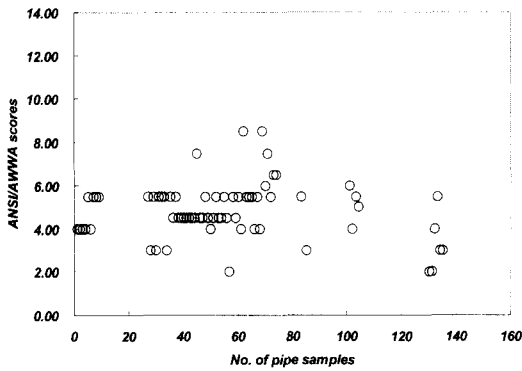
토양 분석결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 보면, 조사한 토양의 토양비저항은 평균적으로 8,252 ( $\text{ohm} \cdot \text{cm}$ )으로 부식성이 높지 않은 것으로 나타났다. 일반적으로 토양비저항은 토양내 부식전류의 흐름에 대한 저항력으로 토양비저항이 낮을수록 부식성이 높다. 현재 ANSI/AWWA에서는 토양비저항이 700( $\text{ohm} \cdot \text{cm}$ ) 이하이면 부식성이 매우 심한 것으로 판단하고 있다(Chaker and Palmer, 1989).

토양 pH는 토양의 산성도(Acidity)를 나타내는 지표로서 pH 4 또는 pH 8.5 이상이면 부식성이 높은 것으로 판단하고 있다. 본 연구에서 조사한 토양시료는 평균 7로서 토양 pH가 주로 부식성이 매우 낮은 중성상태인 것으로 나타났다.

토양의 산화환원전위는 토양이 산화적이거나 환원적인가를 평가하는 지표로서, 산화환원전위가 100mV 이상으로 높으면 부식성이 낮은 것으로 판단하고 있다. 본 연구에서 조사한 토양은 105~617.3mV로 부식성이 낮은 것으로 나타났다. 그 외 황화합물( $\text{SO}_4^{2-}$ )

**Table 3.** Soil characteristics

Soil items	Mean Value(Ranges)
Soil resistivity(ohm · cm)	8,252(1,570~32153.6)
pH	7(5~9.3)
ORP(mV)	315(105~617.3)
Sulfates(mg/kg)	151(5~845.0)
Water content(%)	23(6~56.1)



**Fig. 7.** Results of the ANSIAWWA scoring system.

은 151mg/kg이었으며, 토양함수율도 23%로 다소 높게 나타났다. 황화합물의 존재는 바로 환원성 유황박테리아에 의한 부식가능성을 보여주므로, 이들 미생물에 의한 부식가능성은 있는 것으로 판단된다. 또한 산화환원전위(Redox potential)를 낮추면서 이산화탄

소의 농도를 높여주어 부식을 촉진시키는 역할을 한다(Seica et al., 2000).

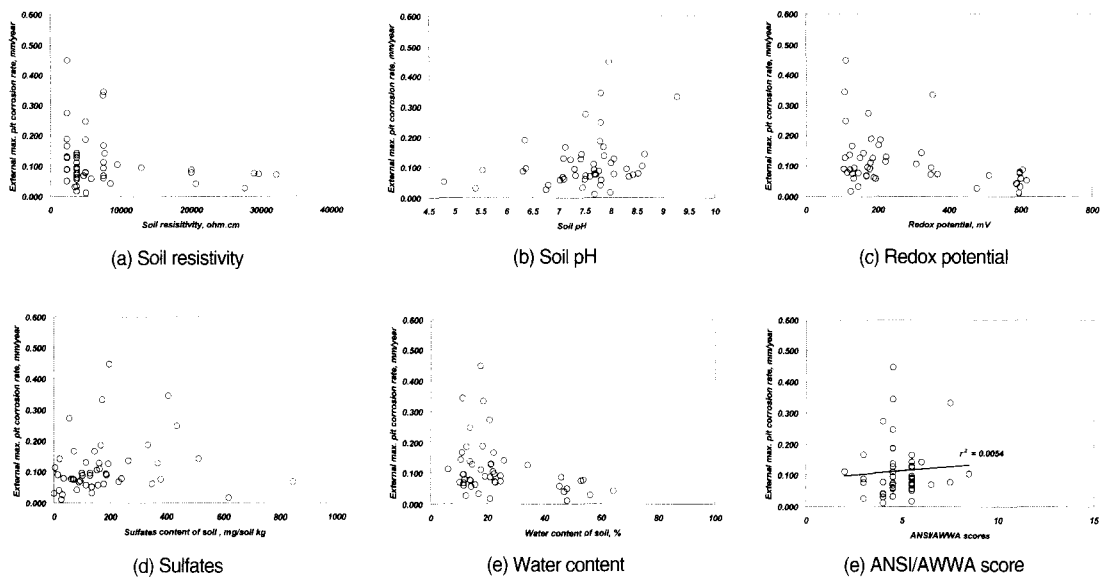
따라서 조사한 토양자료를 토대로 보면, 토양비저항, 토양 pH, 산화환원전위 등이 부식에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 황화합물 또는 토양함수율 등이 부식에 미치는 영향이 클 수도 있으나 ANSIAWWA Scoring method에서 이들 항목의 최대 점수 25.5 중 5.5점으로 약 25% 수준에 불과하므로 조사대상 토양이 관 외부부식에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 ANSIAWWA에 의한 부식성평가결과에서도 조사대상 토양시료의 대부분 부식성평가 값은 모두 10 이하로 부식성이 없는 것으로 나타났다.

3.2.2. 토양특성과 외면부식속도

Fig. 8에는 토양비저항, 토양 pH, 산화환원전위, 황화합물, 토양함수율, ANSIAWWA scores 등에 따른  $p_{ecr}$ 를 나타내었다.

Fig. 8(a)에서 토양비저항에 따른  $p_{ecr}$ 의 상관성은 뚜렷하지는 않으나 토양비저항이 10,000ohm · cm 이하에서는 평균적으로  $p_{ecr}$ 이 0.123mm/year이었으나 10,000ohm · cm 이상에서는  $p_{ecr}$ 이 0.069mm/year에서 보다 약 2배 이상 높게 나타났다. Fig. 8(b)에서 토양 pH에 따른  $p_{ecr}$ 의 분포를 보면, pH 7.5 이상에서



**Fig. 8.** External max. pit corrosion rate vs. soil corrosivity factors.

$p_{ecr}$ 이 다소 높게 나타나는 특성을 보였다. 산화환원 전위도 Fig. 8(c)에서 주로 200mV 이하에서  $p_{ecr}$ 이 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보였다.

황화합물에 따른  $p_{ecr}$ 의 분포도 뚜렷한 경향은 나타나지 않았으며, 토양함수율이 높은 경우보다는 20%을 전후로  $p_{ecr}$ 가 높게 나타나는 특징을 보였다. 또한 본 연구에서는 정 등(2001)이 평가와는 달리 ANSI/AWWA scores와도 상관성이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

따라서 전반적으로 각 토양부식성 항목이  $p_{ecr}$ 과 뚜렷한 상관성을 보이지는 않았다. 이러한 이유는 각 관체가 매설된 토양의 부식 영향인자의 양이 매우 상이하게 산존하고 있고, 특히 이들 각 인자에 의해서 부식성이 좌우되기 보다는 이들 인자를 포함한 다양한 영향인자들이 복합적으로 관 외부부식에 영향을 주고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 부식속도 모델도 이러한 토양특성인자 뿐만 아니라 다양한 인자들에 대한 영향을 종합적으로 고려하여 도출되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2.3. 선형 및 비선형 중회귀분석

본 연구에서는 토양특성, 그리고 토양특성과 매설년수 등을 이용한 부식속도 모델을 도출하기 위한 방법으로 선형모델과 다양한 형태의 비선형모델에 대하여 회귀분석을 수행하였다.

선형회귀분석은 매설년수를 고려하지 않고 토양특성(5개 항목)만을 고려한 선형회귀분석과 매설년수와 토양특성을 동시에 고려한 선형회귀분석을 수행하였다. 그러나 대부분 Observed  $p_{ecr}$ 과 Predicted  $p_{ecr}$  간의 상관성이 없는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 다양한 형태의 비선형 함수를 대상으로 하여 비선형회귀분석을 실시하였고, 매설년수와 토양특성 인자(5개 항목) 모두를 포함한 멱급수의 곱으로 이루어진 함수, Eq. 1의 형태의 함수가 다른 다양한 함수에 비하여 Observed  $p_{ecr}$ 과 Predicted  $p_{ecr}$  간의 높은 상관성을 보여주었다. 본 비선형회귀모형에서는 6개 항목중 하나를 제외할 경우에는 모델의 정확성이 크게 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 토양특성 5개 항목과 매설년수 등을 모두 고려해야 더 정확한 외면최대부식깊이( $p_{ecr}$ )를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

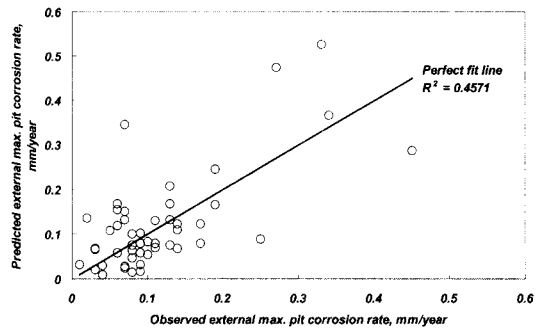


Fig. 9. Observed and predicted external max. pit corrosion rate by nonlinear regression model.

$$P_{ecr} = C_0 \cdot x_1^{C_1} \cdot x_2^{C_2} \cdot x_3^{C_3} \cdot x_4^{C_4} \cdot x_5^{C_5} \cdot x_6^{C_6} \quad (\text{Eq. 1})$$

Where,  $x_1$  = redox potential, mV

$x_2$  = soil resistivity, ohm · cm

$x_3$  = soil pH

$x_4$  = sulfates, mg/soil kg

$x_5$  = water content, %

$x_6$  = age of pipe, years

$C_0$  = constant, 15.042

$C_1$  = constant, 1.0

$C_2$  = constant, -0.970

$C_3$  = constant, 0.851

$C_4$  = constant, 0.393

$C_5$  = constant, -0.870

$C_6$  = constant, -1.088

## 4. 결 론

본 연구에서는 매설년수와 토양특성을 동시에 고려한 외면부식속도 모델을 제안하고자 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 기존 경험적 모델로서 비선형지수함수가 매설년수에 따른 외면최대부식속도의 추정에서 실측값과 가장 상관성이 높은 것으로 나타났으나, 매설년수만으로 외면최대부식속도를 추정하기에는 한계성이 있음을 현장 수집자료의 측정결과를 분석하여 제시하였다.

(2) 조사대상 토양시료 69개에 대한 분석결과 이들



토양 대부분이 ANSI/AWWA 판단기준에 따르면 대부분 비부식성인 것으로 분석되었다.

(3) 또한 토양부식성 각 항목과 외면최대부식속도와외의 상관성이 매우 낮아 국내 실정을 감안할 때, 토양 특성만으로 상수도관의 외부부식 상태를 추정하기에는 한계성이 있는 것으로 나타났다.

(4) 따라서 매설년수와 토양특성을 동시에 고려한 선형 및 비선형 중회귀 분석을 실시하였으며, 그 결과 선형회귀함수에 의한 추정결과 보다 비선형함수에 의한 추정결과가 실측 외면최대부식속도를 비교적 잘 반영하여 주었고, 이 결과를 활용함으로써 상수관의 외부부식상태를 평가하는데 기존의 방법보다 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project인 수처리 선진화사업단(과제번호: I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Rajani B., Maker J. (2000) Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life, *AWWARF*, pp.1-249.
2. 정원식, 이현동, 유명진, 곽필재 (2001) 토양환경 영향 인자를 이용한 상수도관 외부부식 평가에 관한 연구, *상하수도학회지*, 23(10), pp.1611-1619.
3. Rossum, J.R.(1969), Prediction of Pitting in ferrous Metal From Soil Parameters, *Jour. AWWA*, 61(6), pp.305-310.
4. Romanoff, M.(1964), *Exterior Corrosion of Cast-iron Pipe*,

- AWWA*, 56(9): 1129-1143.
5. 이현동, 배철호, 홍성호, 황재운, 곽필재 (2004) 상수관 로중 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구. *한국물환경학회지*, 20(3), pp.206-214.
6. Dempsey, P., Manook, B.A. (1986) Assessing the condition of cast iron pipes, WRC United Kingdom, pp. 1~40.
7. 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.
8. Berthouex P.M, Brown, L.C. (2002) Statistics for environmental engineers, *Lewis Publishers*, pp.289-297.
9. Romanoff, M. (1957) Underground corrosion, National Bureau of Standards Circular 579, Washington D.C., US Government Printing Office.
10. O'day, D.K., Weiss, R., Chiavari, S., Blair, D. (1986), Water main evaluation for Rehabilitation/Replacement, Dnver, Colo., AWWARF and AWWA.
11. Sheikh, A.K., Boah, J.K., Hensen, D.A. (1990), Statistical modelling of pitting corrosion and pipeline reliability, *Corrosion*, 46(3), pp.190-197
12. Kucera, V., Mattson, E. (1987) Atmospheric corrosion, Corrosion mechanics, F. Mansfeld, Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
13. 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.
14. ANSI/AWWA C105/A21.5-99 (1999) American national standard for polyethylene encasement for ductile-iron pipe systems, AWWA, Denver, CO.
15. Chaker V., Palmer J.D. (1989) Effect of soil characteristics on corrosion, ASTM. Philadelphia, PA 19103.