

상수도 금속관의 외면과 내면 부식속도 평가에 관한 연구

Assessment of External and Internal Corrosion Growth Rate for Metallic Water Pipes

배 철 호[†] · 김 주 환¹⁾ · 김 정 현¹⁾ · 홍 성 호²⁾

Bae, Chulho · Kim, Juhwan · Kim, Jeonghyun · Hong, Seongho

ABSTRACT : In this study, external and internal pit growth rate model and external non-linear regression corrosion model were proposed by measuring pit depths and evaluating various soil factors known to contribute to the corrosion for metallic water pipes. Average pit depths of external and internal for metallic water pipes were measured 1.38 mm and 2.13 mm, and internal pit growth rate also fasted twice than external pit growth rate. This means the corrosion potential of water quality was higher than soil. The correlation between external corrosion rate and each soil corrosion factor was low. However, proposed external non-linear regression corrosion model considering all soil corrosion factors showed a little higher correlation ($R^2=0.46$) than conventional model.

Keywords : Soil corrosivity, Metallic water pipes, Pit growth rate, Corrosion rate

요 지 : 본 연구에서는 상수도 금속관의 관 내·외면 부식상태를 평가하고, 내·외면 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계를 통하여 내외면 공식성장속도, 그리고 국내의 토양특성 인자들이 관 외면부식에 미치는 영향을 평가하여 관 외면의 노후상태를 예측할 수 있는 부식속도 모델을 제안하였다. 수집된 관체의 외면 부식깊이는 평균적으로 1.38 mm, 내면은 2.13 mm이었고, 이는 수질 등 내면부식영향 인자가 토양 등 외면부식영향 인자보다 부식에 미치는 영향이 크기 때문이며, 평균 공식성장 속도도 내면이 외면보다 두 배정도 빠른 것으로 나타났다. 외면부식에 영향을 주는 각 토양과 외면부식속도와외의 상관성은 높지 않았으나, 모든 토양항목을 포함하여 회귀분석을 통하여 수립된 외면부식속도 예측모델은 기존 모델과 비교하여 더 높은 상관성을 보였다.

주요어 : 토양부식성, 상수도 금속관, 공식성장속도, 부식속도

1. 서 론

현재 국내 상수관로 총연장은 129,844 km('06 상수도통계)로 매우 거대한 시스템으로 성장하였다. 그러나 상수관로는 지하에 매설되어 유지관리하기가 매우 어려운 특징을 가지고 있다. 특히 시간경과에 기인한 부산물로서 상수관로는 노후상태에 도달하게 된다. 현재 상수관로 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 관의 강도 감소로 인해 내·외부 하중에 대한 저항력이 감소되어 결국 파손에 도달하게 된다. 내부적으로는 결절 등 부식생성물의 발생으로 통단면적이 감소되어 소요수량의 공급과 소요수압의 확보를 할 수 없게 되고, 더 나아가서는 이들 부식생성물 등으로 인한 적수 등 다양한 수

질적 문제를 야기하여, 결국 상수관로 본래의 기능을 상실하게 한다.

향후 이러한 노후된 상수관로의 교체 또는 갱생 등 개량사업에 막대한 예산이 투자될 것으로 전망되고 있는데, 미국에서는 향후 25년까지 \$77에서 \$325 billion이 소요될 것으로 전망되고 있다.

따라서 전세계적으로 어느 관부터, 어떻게, 언제 개량해야하는지 등 우선순위를 결정하여 개량사업을 효과적으로 추진할 수 있는 진단과 평가기술의 개발이 이슈가 되고 있다. 그러나 현재까지 관 노후상태에 영향을 주는 인자에 대한 영향 평가는 매우 미흡한 실정이다. 특히 토양은 상수관로 부식에 영향을 주는 매우 중요한 인자로 상수도 금속관의 수평평가를 가능하게 하고, 개량시기 도출에도 도움을 줄 수 있으나 정량화된 평가가 미흡한 실정이다.

현재 관 외부에서 부식에 영향을 주는 대표적인 인자로는 토양의 비 균질적인 토양특성(토양조직과 구조), 토양

† 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원, 선임연구원(E-mail : baech@kwater.or.kr)

1) 비회원, 한국수자원공사 수자원연구원, 수석연구원

2) 비회원, 숭실대학교 환경화학공학과, 부교수

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 주므로, 이들 환경적 조건 변화가 상수도관의 부식에 구체적으로 어떠한 영향을 주는지 규명하기는 현재까지도 매우 어려운 것으로 평가되고 있다(Rajani 등, 2000).

부식속도에 대한 초기 모델은 회주철관(Gray cast iron pipe)에 대한 모델들이며, 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. 그러나 이들 모델들은 토양특성과 외부 부식에 대한 관계를 규명하는 데에는 한계가 있었다. 최근에도 Rajani 등(2000)이 토양특성과 부식에 대한 상관성을 규명하고자 하였으나 좋은 상관성을 얻는데 실패하였고, 비선형 지수함수 형태의 모델을 발표한 바 있다.

국내에서는 정원식 등(2001)과 이현동 등(2004)이 상수관로의 부식속도에 대한 평가를 한 바는 있으나, 정원식 등(2001)은 평균부식속도와 ANSI/AWWA 또는 DVGW 등과 통계적인 상관성을 검토하는데 그쳤으며, 이현동 등(2004)도 토양특성에 대한 부식속도 모델보다는 매설년수에 따른 부식속도에 대한 평가에 국한되었다.

본 연구에서는 기존 모델들의 접근방법을 이용하여 국내 매설 상수도 금속관의 관 내·외면 부식상태를 평가하고, 내·외면 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계를 통하여 내·외면 공식성장속도, 그리고 국내의 토양특성 인자들이 관 외면부식에 미치는 영향을 평가하여 관 외면의 노후상태를 예측할 수 있는 부식속도 모델을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 상수도 금속관의 파손 메커니즘

상수도관 노후상태에는 일반적으로 단일 인자보다는 설계, 시공, 그리고 운영을 거치면서 다양한 인자가 영향을 미치게 된다. 이중 상수도 금속관은 그림 1과 같이 매설 후 내부적으로는 결절 등 부식생성물의 발생으로 통수단면적이 감소되어 소요수량의 공급과 소요수압의 확보가 어렵게 되고, 더 나아가서는 부식생성물로 인한 적수 등 다양한 수질문제를 야기하여, 상수관로 본래의 기능을 상실한다. 특히 내·외면 부식에 의해 관의 두께가 감소하게 되고, 동시에 관의 강도가 감소하여 내·외면 하중에 대한 저항력이 감소되어 결국 다양한 구조적인 파손상태에 도달하게 된다(O'day 등, 1986). 따라서 상수도 금속관로의 노후상태를 최대한 지연시키기 위해서는 내·외면 부식방지가 반드시 필요하고, 부식억제가 가능한 운영 또는 환경 인자에 대한 관리가 중요하다.

2.2 외면부식 영향인자

현재 관 외부에서 부식에 영향을 주는 대표적인 인자로는 토양의 비균질적인 토양특성(토양조성과 구조), 함수량, 통기성, 토양 pH, 지표수 수위, 토양비저항, 그리고 용존 염과 미생물 활동도 등이다. 그리고 이들 인자들의 환경적 조건들은 계절적으로 또는 국부적으로 변화하여 상수도관의 수명에 영향을 주므로, 이들 환경변화가 상수도관의 부식에 구체적으로 어떠한 영향을 주는지 규명하기는 매우 어려운 것으로 평가받고 있다(Rajani 등, 2000).

토양의 외부부식에 대한 영향력을 평가하는 방법으로 가장 대표적인 방법은 미국국가규격(ANSI) 평가법과 독일

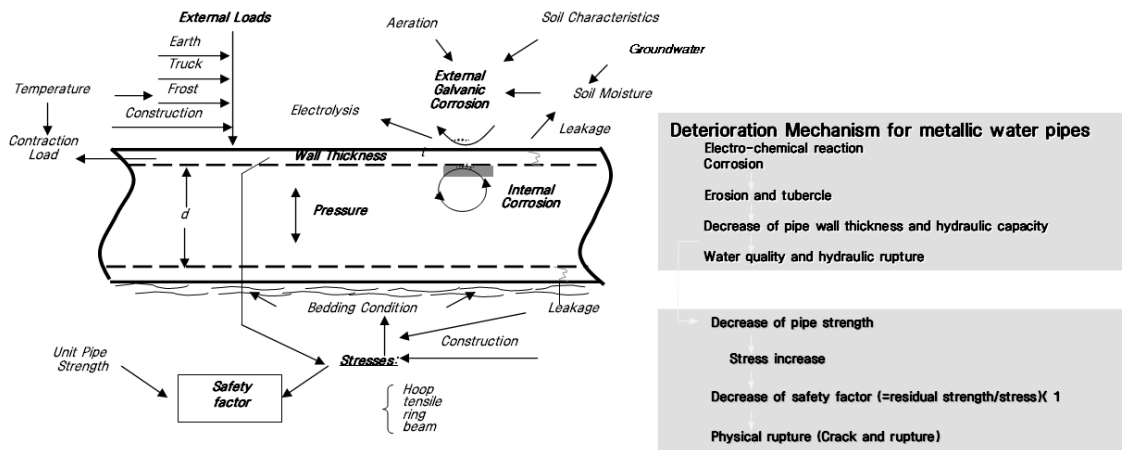


그림 1. 매설 상수도 금속관의 파손 메커니즘(O'day 등, 1986)

표 1. ANSI/AWWA 평가방법

항목	범위	가중치
토양비저항	< 700Ω-cm	10
	700~1,000	8
	1,000~1,200	5
	1,200~1,500	2
	1,500~2,000	1
	> 2,000Ω-cm	0
pH	0~2	5
	2~4	3
	4~6.5	0
	6.5~7.5	0
	7.5~8.5	0
	> 8.5	3
산화환원 전위	> 100mV	0
	50~100mV	3.5
	0~50mV (-)	4
수분	배수불량, 항상 습윤	2
	배수 상당히 양호, 반적으로 습윤	1
	배수양호, 일반적으로 건조	0
산화물 (황화물)	있음	3.5
	미량	2
	없음	0

가스수도기술자협회(DVGW) 평가법이 있다. ANSI는 1964년 CIPRA(Cast Iron Pipe Research Association, predecessor of DIPRA)에서 주철관에 대하여 제시한 10-point scouring method(ANSI/AWWA C105/A21.5-99)로, 현재 닥타일주철관에도 적용되고 있다. ANSI에서는 각 인자의 점수를 합하여 10점 이상인 경우 부식성이라고 판단한다.

2.3 외면부식속도 모델

부식속도는 주로 관 두께감소 속도에 대하여 단순한 상수로 가정하여 사용하므로 이전까지 많은 논쟁의 대상이 되었다(Ahmed and Melchers, 1994; Romanoff, 1957).

부식속도에 대한 초기 모델은 회주철관에 대한 모델들이며, 이중 대표적인 모델이 Romanoff's model(1957)과 Rossum's model(1969)이다. Romanoff's model은 미국 NBS(United States National Bureau of Standards)에서 광범위하게 수집된 자료를 토대로 시간에 따른 최대공식깊이(p_c)와의 관계를 통하여 누승형 함수 모델을 제안하였고, 이후 연구(Romanoff, 1964; Rossum, 1969)에서는 비록 초기 부식속도가 빠르다고 하더라도, 결코 무한하지 않으며, 오랜 시간이 지난 후에는 어느 일정한 정상상태에 도달하는 것으로 보고하였다. Kucera and Mattson(1987)도 누승형 함수 모델을 발표하였다.

Rossum(1969)은 NBS에서 광범위하게 수집한 자료를 바탕으로 토양특성에 따른 관 외부의 공식을 예측할 수 있

표 2. 수집관체 특성

구분		샘플개수
관종	CIP	57
	DCIP	41
	SP	37
매설년도 - known 118 - 미상 17	< =1970	5
	1971 ~ 1980	48
	1981 ~ 1990	44
	1990 <	21
공칭관경	100 mm <	24
	100 ~ 500 mm	71
	500 ~ 1000 mm	21
	< 1000 mm	19

는 모델을 제안하였는데, 평균 부식 깊이보다는 오히려 최대부식 깊이의 형성가능성에 토대를 두고 있음을 보여준 것이다.

최근에 Rajani 등(2000)은 토양특성과 공식에 대하여 비선형 지수함수 형태의 two-phase model을 발표하였다. 그러나 본 모델은 매설 초기에 대한 자료가 부족한 상태에서 개발되어 초기 공식깊이에 대한 추정(부식이 발생하는 초기시점인 15년에서 20년 사이)이 매우 불확실한 것으로 보고하고 있다.

3. 연구방법

3.1 자료수집

3.1.1 대상관로

본 연구에서는 국내의 송·배·급수관로중 노후 상수관로에 대하여 토양특성이 미치는 영향을 평가하기 위하여, 국내 B, D, N 도시, 그리고 광역상수도 등으로 부터 주철관종(CIP, DCIP, SP 등) 총 135개 관체(Pipe body)를 평가하였다.

3.1.2 토양시료

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

3.2 측정 및 분석방법

3.2.1 내·외면 부식깊이 측정

본 연구에서는 수집된 관체의 내외면 부식생성물을 솔 또는 끌 등을 이용하여 표면을 깨끗하게 한 뒤 관체 두께를 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 등 지점에서 측정하였

고(Seica 등, 2000; Rajani 등, 2000), 외면의 부식생성물과 흑연부산물을 제거하고 공식깊이를 측정하기 위하여 그림 2와 같은 절차에 따라 표면연마(Shot blasting)를 하였다. 이후 디지털 캘리퍼스(Digital calipers)와 디지털 깊이게이지 등을 이용하여 외면 부식깊이, 폭, 길이 등을 각각 측정하였다. 현장 여건상 관체 채취가 불가능한 경우에는 현장에서 일부 절단된 면에 대하여 부식깊이를 측정하였다(Dempsey and Manook, 1986).

3.2.2 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 평가방법을 이용하였다.

3.3 부식속도 모델 수립방법

본 연구에서는 상수도 금속관의 관 내·외면부식 상태를 평가하고, 내·외면 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계 등을 통하여 상수관로에 대한 매설년수에 따른 내·외면 공식성장속도, 그리고 토양특성 등을 고려한 외면 부식속도 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 매설년수에 따른 부식속도 모델 형태는 기존에 제안된 경험적 모델(Empirical model)형태인 누승형 모델(Kucera and Mattsson, 1987), 지수형 모델(Rajani 등, 2000), 그리고 선형모델(Sheikh 등, 1990)를 이용하였고, 이때 각 모델 내 인자들에 대한 최적값을 도출하여 모형추정을 위한 방법으로는 최소제곱법을 이용하였다(Bertouex and Brown, 2001).

토양특성, 그리고 토양특성과 매설년수 등을 이용한 부

식속도 모델을 도출하기 위한 방법으로는 주로 선형회귀 분석 또는 비선형회귀분석 등을 이용하였고(Doyle, 2000), 이때 상용 통계프로그램인 SPSS version 10.0을 이용하였다.

4. 연구결과

4.1 부식깊이 측정 결과

4.1.1 외면 부식깊이

그림 3에는 CIP, DIP, 그리고 SP 등에 대한 외면 최대 부식깊이(external max. pit corrosion depth, p_{ec})을 측정된 결과를 나타내었다. 그림 3에서 CIP의 p_{ec} 는 0.32~5.71mm 이었고, DIP는 0.36~4.48mm이었다. 반면 콜타르에나멜 또는 아스팔트 등으로 도장이 되어있는 SP는 p_{ec} 가 0.00mm 이었다. 단, 외면 도장이 없거나 또는 도장재가 노후되어 일부 탈리된 SP는 p_{ec} 가 0.92~2.20mm 범위로 상대적으로 높게 나타났다.

그림 3에서 CIP, DIP, 그리고 SP의 p_{ec} 를 관종별 전체 평균(SP 외면 도장 고려)으로 보면, CIP의 p_{ec} 가 2.09mm 로 가장 높았으며, DIP는 1.83mm이었다. SP는 0.23mm이

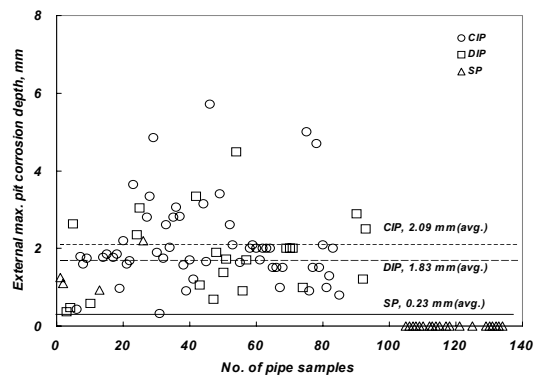


그림 3. 수집 관체의 외면 최대공식깊이(p_{ec}).

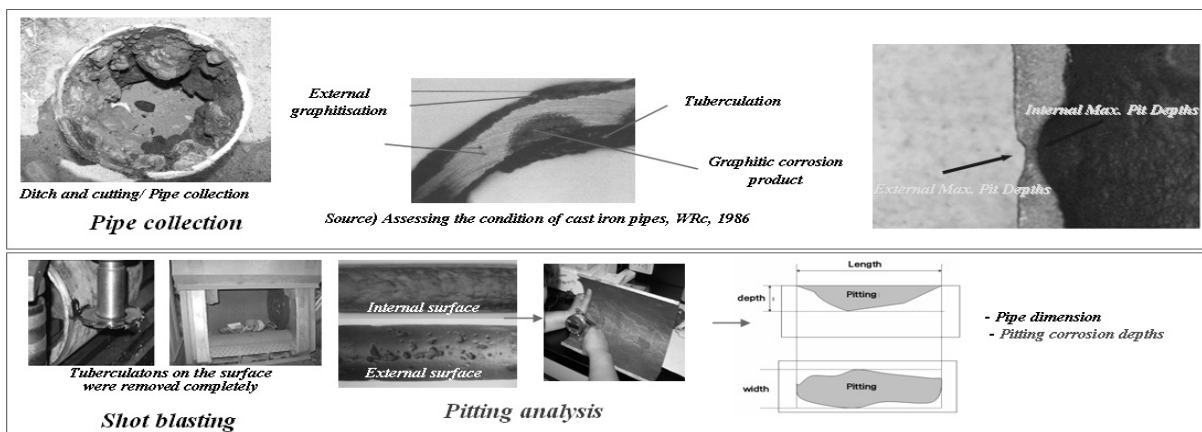


그림 2. 공식분석 방법

었으나, 외면이 미도장 되어 있거나 또는 일부 탈리된 SP는 평균적으로 1.37mm로 CIP 또는 DIP 보다도 p_{ec} 가 상대적으로 낮게 나타났다.

4.1.2 내면 부식깊이

그림 4는 CIP, DIP, 그리고 SP 등에 대한 내면 최대 부식깊이(internal max. pit corrosion depth, p_{ic})을 측정한 결과이다. 그림 4에서 내면도장이 없는 CIP는 1.0~8.3mm이었고, 내면이 시멘트모르터로 라이닝이 되어있는 DIP는 p_{ic} 가 0.00mm로 나타났다. 그러나 시멘트모르터가 없는 일부 DIP의 p_{ic} 는 0.49~6.90mm으로 시멘트모르터 라이닝으로 인한 효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 주로 콜타르에 나뭇 또는 액상에폭시 등으로 도장이 되어있는 SP도 p_{ic} 는 0.00mm이었다. 단, 내면도장이 없거나 일부 탈리된 SP의 p_{ic} 는 약 0.48~3.00mm 범위로 나타났다.

그림 4에서 이들 CIP, DIP, 그리고 SP에 대하여 내면 도장을 포함한 p_{ic} 를 평균적으로 보면, CIP의 p_{ic} 가 4.08mm로 가장 높았으며, DIP는 1.44mm, SP는 0.87mm로 내면도장이 없는 상태로 제조되었던 CIP가 DIP보다는 2.83배, SP보다는 4.69배 이상 내면부식으로 인한 영향을 더 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

Seica 등(2000)과 Rajani 등(2000)의 연구에 따르면, 미국 또는 캐나다 등은 본 연구의 결과와는 달리 내면부식보다는 외면부식에 의한 영향이 더 큰 것으로 보고되고 있다. 그림 5에서 Seica 등(2000)은 북미지역에 매설된 CIP에 대하여 조사한 결과에 따르면, 내면보다는 외면부식이 더 큰 것으로 보고하였다. 또한 Rajani 등(2000)도 이러한 결과로 내면보다는 외면부식이 관 노후상태에 미치는 영향이 크기 때문에 외면부식만을 고려한 부식속도 모델을 제안한 바 있다. 그러나 국내에서는 외면부식에 대한 부식방지도 중요하나, 수질 등 내면부식영향인자에 의한 부식이 관 노후상태에 미치는 영향이 더 크므로 내면부식방지

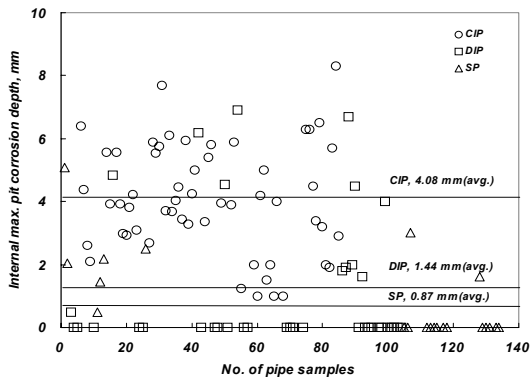


그림 4. 수집 관체의 내면 최대공식깊이(p_{ic})

또는 억제를 위한 대책이 시급한 것으로 판단된다.

4.2 공식성장(pit growth)특성

4.2.1 외면 공식성장(External pit growth) 특성

본 연구에서는 매설년수에 따른 외면 공식의 성장특성에 따른 모델을 구현하기 위하여 기존의 경험적 모델을 이용하여 매설년수에 따른 p_{ec} 의 성장특성을 모사하였다.

이때 외면도장으로 인하여 p_{ec} 가 0인 경우는 제외하였고, 모든 관종이 동일한 부식 메커니즘에 의해서 부식이 진행된다는 가정하에 모사하였다. 관종에 대한 구분을 하지는 않았다.

그림 6에서 매설년수에 따른 p_{ec} 의 변화가 매우 뚜렷한 증가 경향을 보이기보다 다소 분산(scatter)되어 있는 것으로 보인다. 기존 경험적 모델을 통하여 모사한 결과, 세 모델 중 누승형 모델과 지수형 모델에서는 외면부식이 매설 초기에 매우 빠르게 진행되어 공식이 빠르게 성장하는 것으로 예측하였고, 매설년수 10년 이후부터는 공식의 성장이 크게 둔화되는 경향을 보였다. 그러나 이는 기존의 수학적 모델특성이 반영된 결과로 실제 현상(Fact)과 개연성은 있을 것으로 판단된다.

그림 6에서 매설년수가 길어질수록 p_{ec} 의 성장이 둔화되는 이유에 대해서 이 등(2004)도 상수관로에 대한 부식

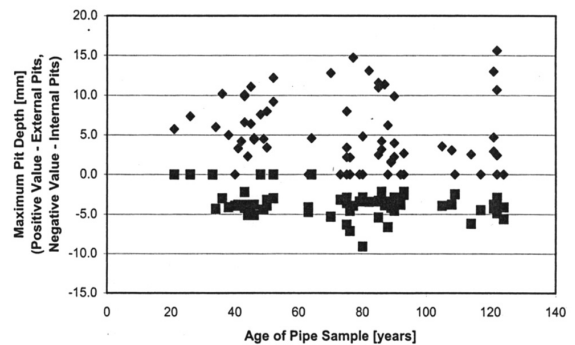


그림 5. CIP의 p_{ec} 와 p_{ic} (Seica et al., 2000)

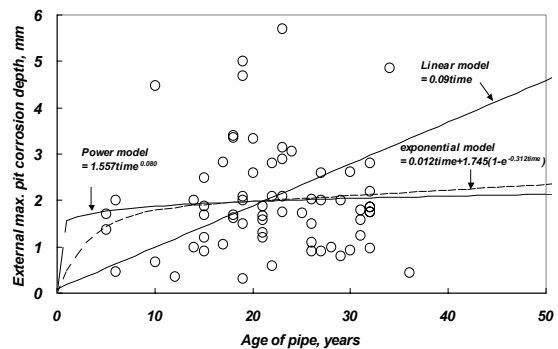


그림 6. 경험적 모델에 의한 외면 공식깊이(p_{ec}) 성장 모델

속도가 매설초기에 빠르고, 매설년수가 길어질수록 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고한 바 있다. 따라서 매설년수가 길어질수록 외면 부식생성물 등이 성장하고, 이들 외면 부식생성물들이 순수금속과 부식발생 인자간의 반응에 제한을 주므로 결국 전기화학적 부식메커니즘 속도에 영향을 주기 때문에 판단된다.

4.2.2 내면 공식성장(Internal pit growth) 특성

그림 7에는 외면 공식성장 속도와 동일하게 매설년수에 따른 p_{ic} 의 성장특성을 모사한 결과를 나타내었다. 이때 내부 도장으로 인하여 p_{ic} 가 0인 경우는 제외하였고, 이들 모든 관종이 동일한 부식메커니즘에 의하여 부식이 진행된다는 가정하에 모사하였다.

그림 7에서 매설년수에 따른 p_{ic} 의 성장특성도 p_{ec} 와 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 기존 경험적 모델을 통한 p_{ic} 의 성장 특성도 p_{ec} 의 성장 특성과 유사한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 단지 그림 6에서 p_{ec} 의 성

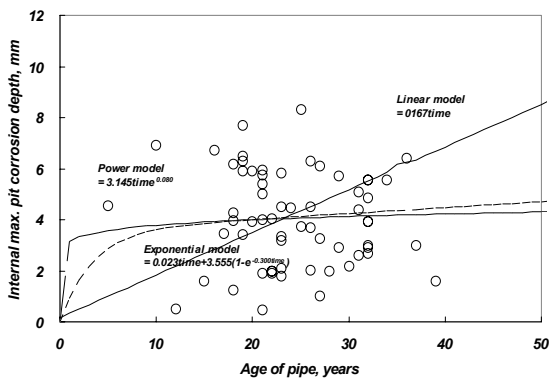


그림 7. 경험적 모델에 의한 내면 공식깊이(p_{ic}) 성장 모델

표 3. 외면과 내면 공식깊이 성장 모델

모델형태		함수형태	상수	본 연구	기존 연구
선형모델	외면공식깊이 (p_{ec})성장	kT	k	0.09	0.08 (Sheikh 등, 1990)
	내면공식깊이 (p_{ic})성장	여기서, $T =$ 매설년수, years $k =$ 상수	k	0.167	-
누승형 모델	외면공식깊이 (p_{ec})성장	kT^n	k n	1.55 0.080	2.0 0.3
	내면공식깊이 (p_{ic})성장	여기서, $n =$ 상수	k n	3.145 0.080	- -
지수형 모델	외면공식깊이 (p_{ec})성장	$aT+b(1-e^{-cT})$	a b c	0.012 1.7425 0.312	0.0125 5.85 0.058 (Rajani 등, 2000)
	내면공식깊이 (p_{ic})성장	여기서, $a, b, c =$ 상수	a	0.023	-
			b	3.555	-
		c	0.300	-	

장과 비교해 보면 p_{ic} 가 p_{ec} 보다 성장이 빠른 것으로 판단된다.

그림 7에서 선형모델의 경우, p_{ic} 의 성장은 연간 0.09mm, p_{ec} 는 0.167mm로 p_{ec} 보다 p_{ic} 성장이 두 배정도 더 빠른 것으로 예측되었고, 누승형 모델과 지수형 모델도 매설년수 초기에 p_{ic} 가 p_{ec} 보다 성장이 두 배정도 더 빠르게 성장되는 것으로 판단된다.

따라서 내면부식에 미치는 영향인자가 외면부식에 미치는 영향인자보다 부식에 미치는 영향이 더 크고, 이로 인해 p_{ic} 가 p_{ec} 의 성장보다 더 빠르게 진행되는 것으로 판단된다.

본 연구에서 내·외면 부식깊이를 측정된 결과를 바탕으로 선형모델, 누승형 모델, 그리고 지수형 모델 형태의 공식성장 모사하여 수립된 예측모델을 기존 외국의 연구결과와 함께 표 3에 나타내었다. 외면공식성장 모델변수의 경우, 기존 연구결과와는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 부식에 미치는 외국의 토양특성과 국내의 토양특성의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

4.3 토양특성에 따른 외면 부식속도

4.3.1 토양특성

본 연구에서 수집한 관체가 매설된 지점에서 채취한 토양에 대한 분석결과는 표 4와 같다. 표 4에서 조사한 토양 자료를 토대로 보면, 토양비저항, 토양 pH, 산화환원전위 등이 부식에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. ANSI/AWWA 평가방법에 의한 부식성 평가결과는 조사대상 토양시료의 대부분 부식성평가 값은 모두 10이하로 나타났다.

표 4. 토양특성

토양항목	평균(최소~최대)
ANSI/AWWA 평가점수	4.84(2.00~8.50)
토양비저항(ohm·cm)	8,252(1,570~32153.6)
pH	7(5~9.3)
산화환원전위(mV)	315(105~617.3)
황화물(mg/kg)	151(5~845.0)
함수율(%)	23(6~56.1)

4.3.2 토양특성과 외면부식속도

그림 8에는 토양비저항, 토양 pH, 산화환원전위, 황화물, 수분함유량, ANSI/AWWA 평가점수 등에 따른 p_{ecr} 를 나타내었다. p_{ecr} 를 매설년수로 나누어 표현된 외면 최대 부식속도(external max. pit corrosion rate, 이하 p_{ecr})이다. 그림 8에서 p_{ecr} 은 0.012~0.448mm/year로 나타났다. 전반적으로 각 토양부식성 항목이 p_{ecr} 과 뚜렷한 상관성을 보이지는 않았다. 이는 각 관체가 매설된 토양의 부식 영향인자의 양이 매우 상이하게 상존하고 있고, 특히 이들 인자들 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.

또한 그림 8(f)에서 ANSI/AWWA 평가점수에 따른 p_{ecr} 의 관계를 보면, 4점 이상에 매우 높은 외면부식속도를 보이는 것으로 판단된다. 이는 10점을 전·후로 부식성을 판단하는 ANSI/AWWA 평가방법의 항목별 측정범위에 따른 점수배분과 국내 토양특성에서 나타나는 부식에 대한 영향력 간의 다소 차이가 있기 때문으로 판단된다. 따라서 부식성에 대한 판단기준에 대한 조정(10점에서 4점으로) 또는 항목의 점수부여 기준이 되는 측정범위의 조정을 통하여 부식성에 대한 판단기준을 현실화해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 표 5에는 본 연구에서 제안하는 토양 부식성 항목중 토양비저항, pH, 그리고 산화환원전위 등 대한 항목별 판단기준을 제안하여 나타내었다. 표 5에서 토양비저항은 ANSI/AWWA 평가방법에서 2,000 (ohm·cm) 이상에서 비부식성으로 판단하고 있으나, 그림 8(a)에서 보면 국내에서는 6,000 (ohm·cm) 이상에서 부식속도가 크게 감소하고 있어 6,000 (ohm·cm)이상으로 조정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 토양 pH도 pH 4 이하 또는 8.5 이상 보다는 pH 4 이하 또는 7.5 이상으로, 토양산화환원전위도 100 mV 이하에서 부식성이 높은 것으로 판단하고 있으나, 200 mV이하로 조정이 필요할 것으로 판단된다.

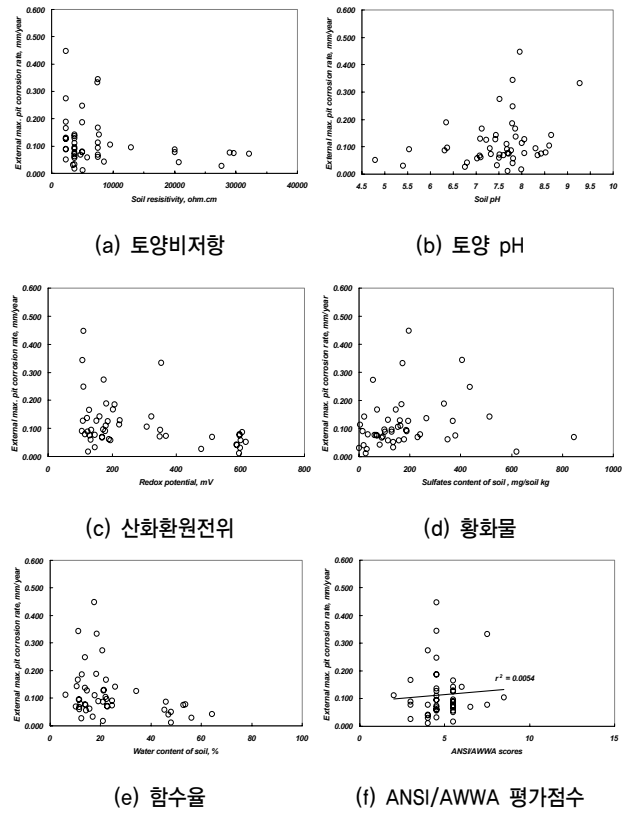


그림 8. 토양 부식성 항목과 외면 최대부식속도와의 관계

4.3.3 회귀분석에 의한 외면부식속도 모델

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

선형회귀분석은 토양특성(5개 항목)만을 고려하여 수행하였다. 그러나 대부분 observed p_{ecr} 과 predicted p_{ecr} 간의 상관성이 없는 것으로 나타났다.

반면 Doyle(2000)의 연구에서도 각 토양항목과 외면 부식속도 간 상관성은 거의 없는 것으로 나타난 바 있다. 단 선형회귀분석에서 Doyle은 토양 pH와 토양비저항에 대한 상관성이 높게 나타나 이들 항목을 대상으로 한 선형회귀 모델을 제안한 바 있다.

그러나 본 연구에서는 각 토양항목과 외면 부식속도 간 상관성이 없는 것으로 나타나, 이들 토양항목(5개 항목) 모두를 대상으로 다양한 형태의 비선형 함수를 대상으로 하여 비선형회귀분석을 실시하였고, 매설년수와 토양특성 인자 모두를 포함한 먹급수의 곱으로 이루어진 함수, 표 6의 Eq. 1의 함수가 다른 다양한 함수에 비하여 상대적으로 observed p_{ecr} 과 predicted p_{ecr} 간의 높은 상관성을 보여주었다. 본 비선형회귀모형에서는 6개 항목 중 하나를 제외할 경우에는 모델의 정확성이 크게 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 토양특성 5개 항목과 매설년수 등을 모두 고려

표 5. 토양부식성 항목에 대한 범위 조정 제안

토양 부식성 항목	ANSI/AWWA 평가범위	조건	수정범위
토양비저항	> 2,000 Ohm·cm	비부식성	> 6,000 ohm·cm
pH	pH 4 < or > pH 8.5	부식성	pH 4 < or > pH 7.5
산화환원전위	> 100 mV	비부식성	> 200 mV

표 6. 외면부식에 대한 비선형 회귀부식속도 모델

모델	상수	R ² *
$p_{cer} = C_0 \cdot x_1^{C_1} \cdot x_2^{C_2} \cdot x_3^{C_3} \cdot x_4^{C_4} \cdot x_5^{C_5} \cdot x_6^{C_6}$ (This study) (Eq. 1)	C ₀ = 상수, 15.042 C ₁ = 상수, 1.000 C ₂ = 상수, -0.970 C ₃ = 상수, 0.851 C ₄ = 상수, 0.393 C ₅ = 상수, -0.870 C ₆ = 상수, -1.088	0.457
Where, p_{cer} = 외면부식속도, mm/yr. x ₁ = 산화환원전위, mV x ₂ = 토양비저항, ohm·cm x ₃ = 토양 pH x ₄ = 황화물, mg/soil kg x ₅ = 함수율, % x ₆ = 매설년수, year		
$P_{cer} = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2$ (Doyle, 2000) (Eq. 2)	C ₀ = 상수, 0.6874 C ₁ = 상수, -0.0370 C ₂ = 상수, -0.0887	0.41
Where, p_{cer} = 외면부식속도, mm/yr. x ₁ = 토양 pH x ₂ = 토양비저항의 로그, ohm·cm		

해야 더 정확한 외면 최대 부식속도(p_{cer})를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 상수도 금속관의 관 내·외면부식 상태를 평가하고, 내·외면 부식깊이(속도)와 매설년수의 관계 등을 통하여 상수관로에 대한 매설년수에 따른 내·외면 공식성장속도, 그리고 토양특성 등을 고려한 외면 부식속도 모델을 제안하고자 하였다.

첫째, 수집한 관체에 대하여 내·외면 공식깊이에 대한 평가 결과, 외면보다 내면 공식깊이가 평균적으로 2배 정도 더 크게 나타나 내면부식이 더 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.

둘째, 공식의 성장특성을 반영하여 power, exponential, 선형모델 등을 구현하였고, power와 지수형 모델에서 내·외면 공식성장은 초기에 매우 빠르게 성장하고, 10년 이후부터 성장속도가 크게 둔화되는 특성을 보였다. 부식속도도 유사한 경향을 보였다. 선형모델에서는 외면(0.09mm/yr.)보다 내면의 공식성장이 0.16mm/yr.로 내면이 외면부식보다 두 배 정도 빠른 것으로 예측되었다.

셋째, 조사대상 토양 분석결과 이들 토양 대부분이 ANSI/AWWA의 판단기준에 비교해서 부식성이 없는 것으로 분석되었고, 이들 토양특성과 내·외면 부식속도와의 상관성

은 뚜렷하지 않은 것으로 판단된다.

또한, 기존 부식성에 대한 판단기준에 대한 조정또는 항목의 점수부여 기준이 되는 측정범위의 조정을 통하여 부식성에 대한 판단기준을 현실화해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

넷째, 외면 부식속도, 토양 그리고 매설년수 등을 포함하여 선형 또는 비선형회귀분석을 수행한 결과, 외면 부식속도에 대한 비선형회귀모델의 실측값에 대한 예측값의 R²는 0.457이었다.

사 사

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

참 고 문 헌

- 이현동, 배철호, 홍성호, 황재운, 광필재(2004), 상수관로중 주철관중의 잔존수명 평가에 관한 연구, *한국물환경학회지*, Vol. 20, No. 3, pp. 206-214.
- 정원식, 이현동, 유명진, 광필재(2001), 토양환경 영향인자를 이용한 상수도관 외부부식 평가에 관한 연구, *대한상하수도학회지*, Vol. 23, No. 10, pp. 1611-1619.
- Ahammed M. and Melchers R.E(1994), "Reliability of Underground

- Pipelines Subject to Corrosion". *Jour. Transportation Engineering*. 120(6), pp. 989~1002.
4. American Water Works Association (AWWA).(1999), "American national standard for polyethylene encasement for ductile-iron pipe systems." ANSI/AWWA C105/A21.5-99, AWWA, Denver. pp. 1~26.
 5. Berthouex P.M, Brown, L.C.(2002), *Statistics for environmental engineers*, Lewis Publishers, pp. 289~297.
 6. 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.
 7. Kucera, V., Mattson, E(1987), *Atmospheric corrosion, Corrosion mechanics*, F.Mansfeld, Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY. pp. 211~284.
 8. O'day, D.K., Weiss, R., Chiavari, S., Blair, D.(1986), *Water main evaluation for Rehabilitation/Replacement*, Dnver, Colo., AWWARF and AWWA, pp. 28~30.
 9. Rajani B., Maker J.(2000), *Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life*, AWWARF, pp. 1~249.
 10. Romanoff, M(1957), *Underground corrosion*, National Bureau of Standards Circular 579, Washington D.C., US Government Printing Office.
 11. Romanoff, M.(1964), Exterior Corrosion of Cast-iron Pipe, *AWWA*, 56(9), pp. 1129~1143.
 12. Rossum, J.R.(1969), Prediction of Pitting in ferrous Metal From Soil Parameters, *Jour. AWWA*, 61(6), pp. 305~310.
 13. 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.
 14. Sheikh, A.K., Boah, J.K., Hensen, D.A.(1990), Statistical modelling of pitting corrosion and pipeline reliability, *Corrosion*, 46(3), pp. 190~197.

(접수일: 2007. 11. 15 심사일: 2007. 11. 16 심사완료일: 2007. 12. 7)