전기화학적 방법에 의한 수돗물의 부식성 평가

○곽필재*, 이현동*, 서규태**, 김운지**

1. 서 론

상수도관로는 계속적으로 정수와 접촉하고 있기 때문에, 내부에서 발생하는 부식은 수돗물의 부식성에 의해 큰 영향을 받게 된다. 수돗물의 부식성은 LI(Langelier Index), RSI(Ryznar Saturation Index), CCPP(Calcium Carbonate Saturation Index)등 탄산칼슘의 포화도를 평가하여 나타내는 방법이 많이 활용되어왔다[1)2)3)]. 하지만 이들 모델들은 단순히 상수도관로 내부면에 탄산칼슘의 침전가능성을 나타내는 지표이기 때문에 수돗물의 부식성을 평가하기에는 그 적용성 및 신뢰성에 대해 많은 의문들이 제시된다. 또한 부식발생에 큰 영향을 미치는 다른 수질인자들(용존산소 등)의 영향을 배제하였기 때문에, 관내면에 탄산칼슘이 침전하였다 하더라도, 침전층이 가지는 물리적·화학적 특성에 의해 부식발생 가능성은 여전히 존재하고 있다고 할 수 있다. 그러므로 수돗물이 가지는 부식성을 정확히 평가하기 위해서는 이들 여러 수질인자들의 영향을 함께 평가할 수 있는 모델의 확립이 필요하다고 하겠다.

현재 Pisigan과 Singley[4)]가 강관에 대해 칼슘, 염소이온, 황산이온, 알칼리도, 완충강도(Buffer intensity), 용존산도 등의 함수로 부식예측 모델을 제시하였으며, Ferguson은 부식억제제 투입량을 결정할 수 있는 부식예측 모델을 개발하였다. 하지만 이들 식들은 시편 실험결과를 바탕으로하여 특정 관종의 부식속도를 나타낸 것이기 때문에 전체 관종에 대한 수돗물의 부식성 영향을 예측하는데는 활용될 수 없을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 부식영향 수질인자들이 포함된 수질조건에 대해 비교적 간단하고, 정밀한 측정이 가능한 전기화학적 방법을 사용하여 금속표면에서 산화·환원 반응속도를 나타내는 I_{corr}값을 측정하여 개별 관종에 대한 정수의 부식성 평가모델 개발의 가능성을 검토하였다.

---

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부
** 창원대학교 환경공학과

2. 연구 방법

2.1 전기화학적 부식측정법

부식은 전기화학적 경로를 통하여 발생하기 때문에 전기화학적 방법은 부식의 평가에 있어서 유용한 도구가 된다[5]. 전기화학적 방법들은 금속내에서 일어나는 부식속도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 부식을 제어하는 금속표면에서의 반응특성을 나타낼 수 있다.

전기화학적 방법은 부식발생 형태에 따라 다르게 나타난다. 표면에서 큰 공식(Pitting)이 발생할 경우에는 전기화학적 방법으로는 적절히 표현하기 어렵지만, 금속표면에서 균일부식이 발생할 경우에는 부식속도를 매우 정확히 측정할 수 있다. 또한 무게감소법(Weight loss method)[7]과는 달리 부식공정을 연속적으로 측정이 가능하며, 어떤 수질조건에서 유속의 변화에 따른 부식속도의 변화 혹은 어떤 수질성분을 변화시켰을 때의 부식속도의 변화와 같이 특정 시간에 특정 지점에서의 부식속도를 측정할 수 있다.

전기화학적 방법은 분극측정(Polarization measurements)에 기초를 하고 있으며, 본 연구에서는 PS(Polariaztion measurements) 법을 활용하여 실험을 실시하였다. PS법에서는 측정하고자 하는 금속을 상대전극(백금)에 대해 일정한 속도로 전위를 변화시켰을 때 그림 1에서와 같이 전위변화에 대해 양극 및 음극전류를 측정한다. 그리고 이를 (식 1)의 Tafel(1904)식을 활용하여 산화·환원반응이 동일한 값을 나타내는 I_{corr}값을 측정하게 된다. I_{corr}값의 범위는 non-Tafel 범위에 속하기 때문에 여러 가지 통계적인 방법을 활용하게 된다.

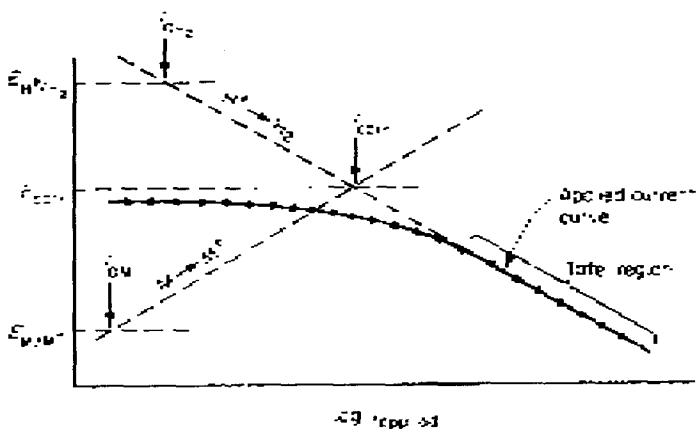

그림 1. 균일 금속의 분극곡선

$$\eta = \pm \beta \log \frac{i}{i_{corr}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 1)}$$

여기서, η : 분극

β: Tafel slope

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에서는 대상 관종으로 송·배·급수관종으로 사용되는 탄소강관, 아연도강관, 닥타일주철관, 동관, 스테인레스강관 304를 사용하였다. 시편을 1×1cm로 절단하여 표면을 매우 정밀하게 연마하여, 세척·건조한 후 전기를 흐르게 할 수 있는 전선이 연결된 면과 사방의 옆면을 코팅하여 Cell에 설치였다. 그리고 시편에 묻은 유기물 및 이물질을 에탄올 및 초순수로 세척하고 건조시켜 곧바로 실험을 수행하였다.

본 연구에 이용한 Potentiostat는 PAR 273을 사용하였으며, GPIB(General Purpose Information Bus)에 의해 IBM-PC와 연결하였다. 기준전극은 SCE를, 보조전극은 백금전극을 사용하였으며 Cell은 Princeton Applied Research (PAR) Model K47을 사용하였다. Potentiostat의 조정 및 운전 프로그램은 PAR Model 352 SOFTCORR를 사용하였다.

부식관련 수질인자로는 수온, pH, 용존산소, 염소이온, 경도, 알칼리도 등을 선정하였으며, 시험수질조건을 표 1에 나타내었다.

표 1 시험수의 수질조건

수 온 (℃)	pH	DO (mg/L)	Cl^- (mg/L)	Hardness (mg/L as $CaCO_3$)
20, 2	6, 8	9, 2	15, 75, 150	40, 50, 80

3. 결과 및 고찰

3.1 I_{corr}에 대한 수질인자의 영향

각 수질인자가 I_{corr}에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 pH, DO, 경도, 칼슘, 알칼리도, 잔류염소 등을 독립변수로 하고, 각 조건에서 측정한 I_{corr}를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 수행하여 각 관종에 대한 다중회귀식을 표 2에 나타내었다.

표 2 수질조건에 따른 다중회귀식

Pipe	Equation
DCIP (Ductile castiron pipe)	Icorr = 41.5379 - 6.8454 · pH + 2.4648 · DO + 0.2695 · Alkalinity - 0.0015 · Cl
SSP (Stainless steel pipe)	Icorr = -25.9281 + 120.0252 · pH - 61.1931 · DO - 3.3105 · Alkalinity - 5.2344 · Cl
CSP (Carbon steel pipe)	Icorr = -124.3346 - 19.604 · pH + 62.2153 · DO + +165.7859 · Ca - 0.69.875 · Alkalinity - 6.097 · Cl
GSP (Galvanized steel pipe)	Icorr = -9.4430 + 4.8308 · pH + 1.3355 · DO - 0.2574 · Alkalinity - 0.1394 · Cl
CP (Copper pipe)	Icorr = -7.9022 + 1.0238 · pH + 0.4879 · DO - 0.0084 · Alkalinity - 0.0122 · Cl

닥타일주철관과 스테인레스강관의 경우 검증통계량이 각각, F=2.234, 1.465이고, signif = 0.1456, 0.2905로 유의수준 α=0.05에서 다중회귀식은 유의하지 않는 것으로 나타나고 있지만, 탄소강관의 경우 F=4.7999, signif=0.0253으로 유의수준 α=0.05에서 다중회귀식은 유의하며, r^2=0.75로 총변화량중에서 약 75.0%가 회귀방정식으로 설명되어진다. 그리고 아연도강관과 동관의 경우 검증통계량이 각각, F=3.8764, 3.5960이고, signif = 0.0424, 0.0513로 유의수준 α=0.05에서 다중회귀식은 유의하다고 볼 수 있으나, r^2가 각각 0.633, 0.615로 탄소강관과 비교하면 약간 낮은 값을 나타내고 있다.

본 분석결과 스테인레스강관과 닥타일주철관은 수질인자에 대한 I_{corr}의 값이 일정한 상관성을 나타내지 않았다. 이와 같은 결과는 이들 관종들은 다른 관종들에 비해 상대적으로 내식성이 뛰어나며, 수돗물이 약전해질이기 때문에 산화·환원 반응의 발생이 억제되기 때문에 측정에 있어서 오차 발생이 켜졌기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 스테인레스강관과 닥타일주철관의 경우는 본 수질범위내에서는 전기화학적방법을 이용한 정수의 부식성평가가 불가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 그 외 탄소강관, 아연도강관, 동관은 총변동중에서 각각 약 75%, 63.3%, 61.5% 가 본 회귀방정식에 의해 설명되는 변동으로 나타났기 때문에, 이들 관종들에 대해서는 본 수질범위내에서 본 회귀식에 의한 부식성영향 예측이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 탄소강관, 아연도강관, 동관에 대한 각 변수들의 상관성은 용존산소는 예상대로 세 관종에 대해 모두 양의 상관성을 나타내었으며, 알칼리도도 역시 세 관종에 대해 음의 상관성을 나타내었다. 하지만 pH는 탄소강관에서는 음의 상관성을 나타내었지만, 아연도강관과 동관에서는 양의 상관성을 나타내었다. 일반적으로 pH는 I_{corr}값과는 음의 상관성을 가지는 것으로 알려져 있지만 이와 같은 결과가 나타난 것은 pH의 변화폭이 6~8의 범위로 제한되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 I_{corr}에 의한 부식성 평가

LI값과 I_{corr}과의 상관성을 평가하기 위하여 각 수질조건에서의 LI값과 동일한 수질조건에서의 전체 관종에 대한 I_{corr}값을 그림 2에 나타내었으며, 닥타일주철관, 스테인리스 강관, 탄소강관, 아연도강관, 동관에 대한 상관계수는 각각 0.17, 0.3312, 0.0002, 0.18, 0.36로 두 인자간의 상관성은 거의 없는 것으로 나타났다.

일반적으로 LI값이 0 이하일 경우에 부식이 발생하며, 음의 방향으로 절대값이 커질수록 정수의 부식성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 정수의 부식성과 부식발생량(I_{corr})과는 비례하는 것으로, LI 값이 음의 범위로 증가할 수록 I_{corr}값도 같이 증가하는 것으로 추측할 수 있다. 하지만 본 실험에서는 두 인자간의 어떠한 상관성도 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이와같은 LI 값이 실제 관표면에서 발생하는 산화·환원반응속도에 영향을 미치지 않는 것은 ① 본 수질범위 내에서 부식발생 자체에 영향을 미치는 않는 경우로서 본 연구에서는 닥타일주철관과 스테인레스강관이 이에 속하는 것이며, ② LI 값이 부식성변화에 큰 영향을 미치는 않는 경우로서 탄소강관, 아연도강관, 동관이 이에 속하는 것으로 판단된다. 따라서 정수의 부식성을 평가하기 위해서는 전기화학적 실험결과를 바탕으로 한 개별 관종 각각에 적합한 새로운 부식모델의 적용성이 아주 높은 것으로 판단된다.

4. 결 론

전기화학적 방법을 사용하여 금속표면에서 산화·환원 반응속도를 나타내는 I_{corr}값을 측정하여 개별 관종에 대한 정수의 부식성평가 모델 개발의 가능성을 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 스테인레스강관(SSP)과 닥타일주철관(DCIP)은 수질인자에 대한 I_{corr}의 값이 일정한 상관성을 나타내지 않았으나, 탄소강관(CSP), 아연도강관(GSP), 동관(CP)은 본 수질범위내에서 본 회귀식에 의한 부식성영향 예측이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 각 수질조건에서 LI와 I_{corr}에 대하여 회귀분석한 결과 모든 관종에서 두 인자간의 상관성은 거의 없었다. 즉 수질의 탄산칼슘포화도를 나타내는 LI 만으로는 관종에 따른 부식정도를 예측하기는 어려울것으로 생각되며. 정수의 부식성을 평가하기 위해서는 전기화학적 실험결과를 바탕으로 한 개별 관종 각각에 적합한 새로운 부식모델의 적용성이 아주 높은 것으로 판단된다.

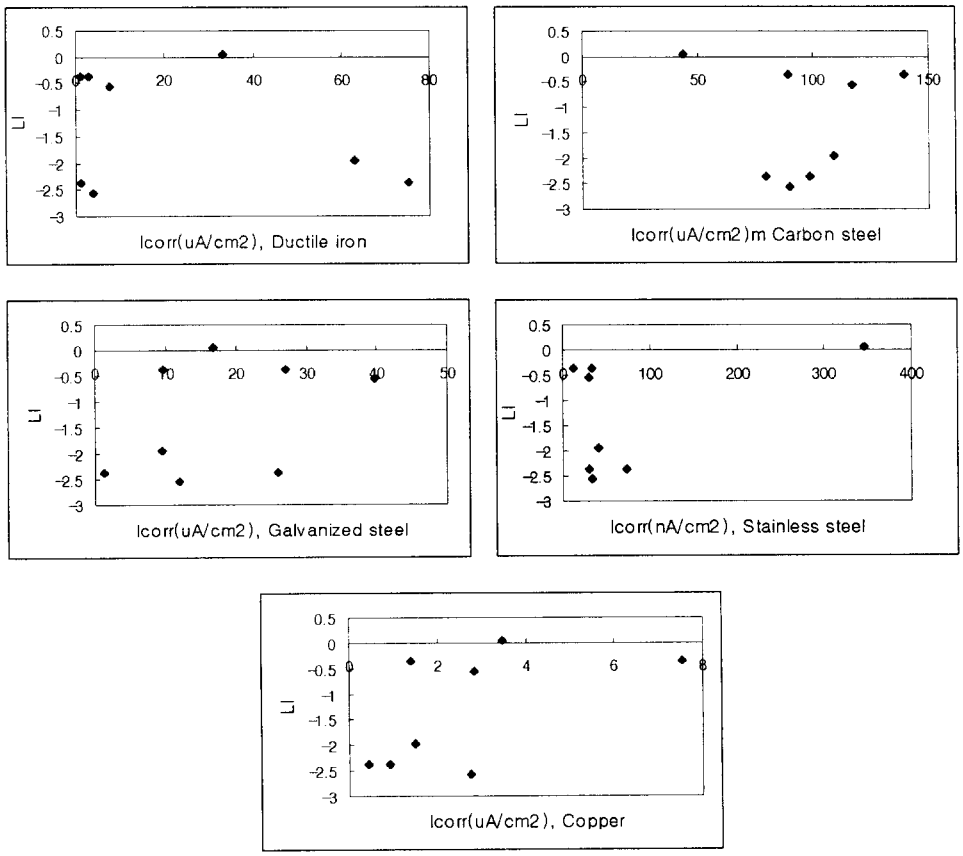

그림 2. 관종별 수질에 따른 Icorr과 LI의 관계

5. 참고 문헌

1) 김갑수, 이현동, "상수관 부식방지 기법 연구" 한국건설기술연구원, 1990, 12.

2) 곽필재, 이현동, 남상호, " 상수도관로의 부식방지를 위한 수돗물의 침식성 평가" 대한상하수도학회지, 제 11 권, 제 1 호, pp 53~63, 1997. 1.

3) 서규태, 정해룡, 이현동, 정원식, "배수시스템내 부식영향 수질인자의 변화특성", 대한환경공학회지, Vol.20, No.8, pp.899~909, 1998

4) R. A. Pisigan, J. E. Singley, "Evaluation of Water Corrosivity Using The Langelier Index and Relative Corrosion Rate Models", Corrosion, Vol. 84, No. 149, NACE, 1984.

5) AWWARF, DVGW-TZW, Internal Corrosion of Water Distribution Systems, 2nd edition, 1996.