

도시철도차량 부식결합의 확률론적 수명평가 연구

A Study on Probabilistic Life Evaluation for Corrosion in Electric Multiple Units

*#편장식¹, 정종덕²

*J. S. Pyun(jspyun@krii.re.kr)¹, J. D. Chung²

¹인하대학교(한국철도기술연구원), ²한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단

Key words : Corrosion, Failure Probability, Reliability Index, LSF(Limit State Function), FORM(First Order Reliability Method)

1. 서론

도시철도차량 차체 및 대차를 구성하고 있는 모든 구조물들은 최대하중과 정상운행 조건하에서, 작용하중에 의한 과도한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다. 여러 가지 결합 등으로 인해 도시철도차량의 차체 및 대차가 강도 및 강성을 유지할 수 없는 상황이 발생하므로 이를 방지하기 위해 비파괴검사를 수행하고 있다. 이렇게 부식결합 등이 발생한 구조물의 수명평가를 하는데 있어 결정론적 방법보다는 확률론적인 평가 방법을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 Von-Mises 파손평가 기준 및 피로한도기준에 기초하여 부식결합에 대한 확률론적 수명평가 방안 연구를 수행하였다.

2. 부식결합 모델

구조물에서 발생하는 부식의 과정은 전착도장의 결함 또는 수명이 도래하여 전착도장과 강판 사이에 부식생성물이 형성되고, 이러한 부식생성물은 젖음과 건조가 반복되는 과정에 따라 부피가 팽창하여 전착도장의 blistering 및 박리를 유발하게 된다. 일단, 전착도장의 박리가 일어나게 되면, 그 부분은 양극으로 작용하여 다른 부분에 비해 부식이 집중적으로 일어나게 된다. 최종적으로 부식은 지속적으로 진행하며, 이에 따른 감육현상에 따라 전체적인 구조물 두께의 감소를 가져오게 된다. Fig. 1은 부식의 형태를 나타낸 것이며, 본 연구에서는 여러 가지 모델 중 일반적인 부식모델을 적용하였다.^{1,2}

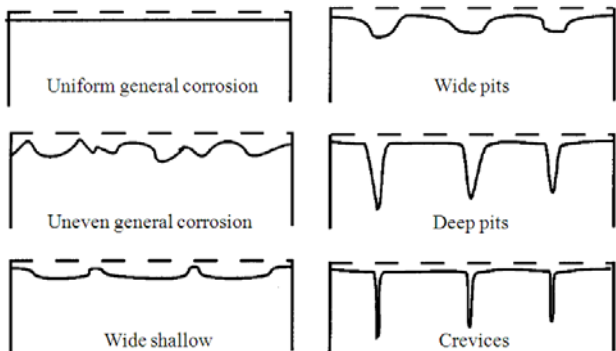


Fig. 1 Corrosion types

도시철도차량 구조물에 대한 부식 등의 결합발생은 그 재료의 강도 등을 현저히 저하시키고 결합부분에 응력이 집중되며 결합이 성장하여 임계크기에 도달하면 파괴에 이르게 되어 많은 경제적 손실을 가져오게 된다. 따라서 부식 등의 결합의 형태 및 위치에 따른 응력상태나 파손수명 등을 예측하여 파손사고들을 예방할 수 있는 기준들이 요구되고 있다. 일반적인 부식에 의한 구조물의 두께감소량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.³

$$d_n(T) = \begin{cases} k(T - T_c), & T > T_c \\ 0, & T \leq T_c \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $d_n(T)$ 는 두께 감소량이고, T 는 구조물의 사용시간이고, T_c 는 구조물에 도장된 코팅의 수명이고, k 는 부식률이다. 도시철도차량 구조물에 발생하는 응력은 차량 운행시 주행조

건 및 운전환경 등에 발생하게 된다. 운행조건이 같을 경우 부식된 구조물에 발생하는 응력은 부식된 구조물의 두께변화량에 영향을 받게 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_b = \sigma_a \frac{t}{t'} \quad (2)$$

여기서, σ_a 는 부식이 발생하기 전 차량운행시 발생하는 응력이고, σ_b 는 부식이 발생한 후 차량운행시 발생하는 응력이며, t, t' 는 부식이 발생하기 전, 후의 구조물 두께이다.

3. 파손확률모델

모든 변수들을 정규분포라 가정하고 확률분포가 평균과 표준편차에 의해 결정된다고 가정하였다. FORM(First order reliability method)은 한계상태방정식(limit state function, LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 모든 확률변수들의 평균, 분산 및 분포형태를 이용하여 파손확률에 대한 상대적인 지표인 신뢰도 지수(reliability index)를 산정하는 방법이다.

파손확률 해석을 수행할 경우에는 먼저 파손함수에 대한 정의를 내릴 필요가 있다. 이 함수는 파손에 대한 기준으로 표현할 수 있고, 한계상태방정식(LSF)을 갖는 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁴

$$Z = R - L \quad (3)$$

여기서, R 은 저항성분의 확률변수이고, L 은 하중성분의 확률변수이다. 두 확률변수 R 과 L 이 각각 서로 독립적인 정규분포 확률변수라면, 한계상태방정식(LSF)에 의한 새로운 확률변수 Z 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (4)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \quad (5)$$

여기서, μ_Z, μ_R, μ_L 은 확률변수 Z, R, L 의 평균이고, $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_L$ 은 확률변수 Z, R, L 의 분산이다. 위 확률변수들이 정규분포라고 가정하였으므로 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right\} dZ \quad (6)$$

여기서, 새로운 확률변수 U 를 $U = (Z - \mu_Z)/\sigma_Z$ 와 같이 정의하면, 파손확률은 다음과 같다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\} du = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

이때 파손확률 P_f 와 표준정규분포함수인 Φ 사이 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수라고 하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (8)$$

부식결함이 있는 구조물의 파손확률모델은 아래식과 같은 Von-Mises의 파손평가기준에 기초를 두고 있다.

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 > \sigma_y^2 \quad (9)$$

범함수 Z를 항복응력과 주응력의 함수로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Z = \sigma_y^2 - (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2) \quad (10)$$

4. Case Study

파손확률을 구하기 위하여 Table 1에 나타난 확률변수와 그 값을 이용하였으며, 각각의 확률변수들의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고 해석을 수행하였다.^{3,4,5}

Table 1 Mean and C.O.V of probabilistic parameters

Variable	Mean	C.O.V
t	8mm	0.03
k	0.1mm/year	0.01
σ_1	1.58kg/mm ²	0.1
σ_2	-2.67kg/mm ²	0.1
σ_y	21kg/mm ²	0.1
T _c	5year	0.1
σ_f	7kg/mm ² (weld zone) 14kg/mm ² (parent metal)	-

5. 결과 및 고찰

Fig. 2은 용접부위에 부식이 발생한 구조물에서 발생하는 응력에 따른 파손확률을 나타낸 것으로 coating의 수명이 다하는 지점부터 파손확률이 증가하는 것을 볼 수 있으며 발생하는 응력의 크기가 클수록 파손확률이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 3는 모재부위에 부식이 발생한 구조물에서 발생하는 응력에 따른 파손확률을 나타낸 것이며, 같은 응력분포에서 파손확률이 약 10배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 coating 수명에 따른 파손확률을 나타낸 것으로 coating 수명이 클수록 파손확률 증가비율이 더 작다는 것을 확인할 수 있다.

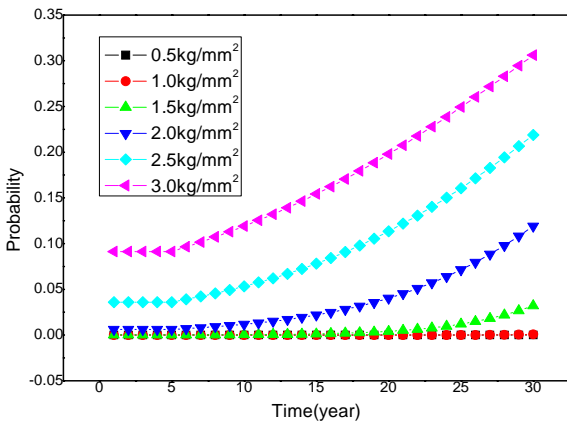


Fig. 2 Failure probability of the weld zone(Fatigue limit:7kg/mm²)

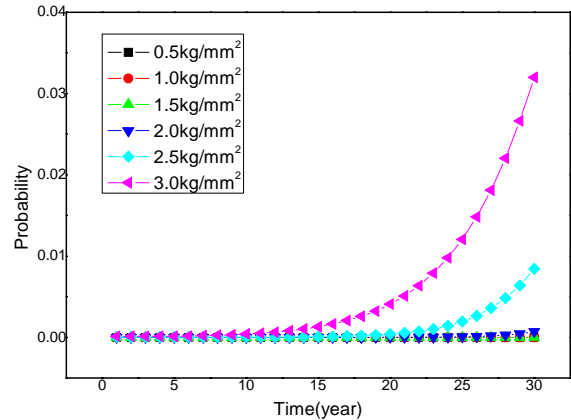


Fig. 3 Failure probability of the parent metal(Fatigue limit:14kg/mm²)

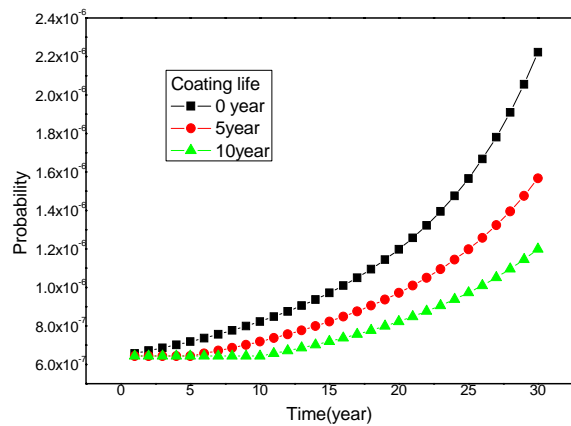


Fig. 4 Relationships between failure probability and time(year) for varying coating life

6. 결론

본 연구에서는 피로한도기준 및 Von-Mises 평가기준을 적용하여 일반적인 부식이 도시철도차량 구조물에서의 파손확률에 대한 연구를 수행하였으며, 각각의 확률변수들이 파손확률에 미치는 영향을 확인하였다. 일반적인 부식형태의 모델에 대한 연구를 수행하였으며, 추후에 다른 부식모델 적용에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료 된다.

참고문헌

1. Robert E. Melchers, "Probability models for corrosion in structural reliability assessment-Part 1 : Empirical models", Transaction of the ASME, Vol. 125, November 2003.
2. Kee Paik Jeom, Kyu Kim Sung, Kon Lee Sang, "Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers", Ocean Engineering, Volume 25, Issue 10, November 1998, Pages 837-860.
3. C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang, "Corrosion wastage model for ship crude oil tanks", Corrosion Science, Volume 50, Issue 11, November 2008, Pages 3095-3106.
4. 이억섭, 편장식, 김의상, "매설된 강 파이프의 경계조건이 파손확률에 미치는 영향", 한국정밀공학회지, v.20, no.4, pp.204-213, 2003년 4월.
5. 한국철도기술연구원, "서울시 1호선 사고전동차 안전진단 최종보고서", 2004년 11월.