

## 가속열화시험에 의한 건축용 도료의 신뢰성 평가

권영일\* · 김승진\*\*

청주대학교 산업공학과\* · 한국건자재시험연구원 신뢰성평가센터\*\*

## Reliability Assessment of Anticorrosive Paints with Accelerated Degradation Test

Young Il Kwon\* · Seungjin Kim\*\*

Dept. of I.E., Cheongju University\* · Korea Institute of Construction Materials\*\*

### Abstract

Accelerated and field degradation tests are performed for reliability assessment of an anticorrosive paint for steel structures. Test data were analyzed to obtain the degradation model and the life time distributions of the paint. A power law degradation model and lognormal performance distribution were used to predict the lifetime of the anticorrosive paint and the method of finding an acceleration factor is provided.

Key words : performance degradation(성능열화), service life prediction(사용수명예측), accelerated degradation test(가속열화시험), power law model(역승모형), lognormal distribution(대수정규분포), anticorrosive paint(방식도료)

## 1. 서 론

일반적으로 건설자재의 경우 다른 내구재 제품에 비해 상대적으로 오랜 사용수명(service life)이 요구된다. 또한 기계, 전기, 전자부품 등에 대한 신뢰성 시험과 평가는 주로 요구기능이 종료되는 고장시간의 관측에 의해 이루어지나, 플라스틱, 도료, 실란트 등과 같은 소재 위주의 건설자재는 고유물성이나 성능의 저하를 관측하고 성능이 특정수준에 도달하는 시점을 고장으로 판정하는 방식을 사용한다. 이러한 특성을 지닌 자재의 경우, 고장이 발생하기까지 긴 시간이 소요되는 수명시험보다는 시간의 경과에 따른 성능이나 물성의 변화를 관측함으로써 수명 평가나 보증방법을 설계하는 것이 더 효과적이다.

성능열화모형과 열화데이터의 통계적 분석방법들이 Meeker (1998), Bain (1978), Nelson (1990) 등을 비롯한 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 그리고 건설자재나 토목분야에서도 Beek et al. (2003), Bakker, J.D. et. al. (1999), Van Noortwijk (1998, 1999)을 비롯하여 BS7453(2003), ISO 15686-1 (2000), ISO 15686-2 (2001), ISO 15686-3 (2002), 그리고 European organization for technical approvals (1999) 등의 국가 및 국제기구에 의해 열화성능에 의한 수명평가 방법들에 대한 연구의 필요성과 방법론에 관한 논의가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 강구조물의 수명과 밀접한 연관성을 가진 방식도료(anticorrosive paint)의 색변화(색차)와 광택저하, 그리고 강재부식에 대하여 가속시험과 옥외폭로시험을 통해 성능 변화를 측정하고, 관측된 열화데이터로부터 수명을 예측할 수 있는 수학적 모형을 도출하여 방식도료의 사용수명 및 보수시기 결정에 활용할 수 있는 평가방법을 제공하고자 한다.

도료는 건축물을 이루고 있는 구조물이나 각종 내외장재 등의 소지보호, 미관 및 기능성 부여를 위하여 다양하게 사용되고 있다. 특히 이중에서도 강구조물은 소지의 보호가 되지 않을 경우 부식에 의하여 그 내구도가 크게 감소하며 구조물의 수명을 저하시키는 가장 큰 원인이 된다. 도막의 열화는, 주로 경시적인 도막결함으로서 나타나며, 도막열화를 유발시키는 일반적인 요인과 그에 따라 발생하는 대표적인 현상(결함)은 표 1과 같다. 도막열화는 이들 요인의 복합적 작용에 기인한 도막의 구성성분인 수지, 안료, 첨가제 등의 화학적 혹은 물리적 변화에 의해 발생한다.

<표 1> 도막열화를 유발시키는 요인과 현상

요인	현상
Light (UV)	Chocking, 변색, 퇴색
Water	부풀음, 녹, 변색
Oxyson	백아화, 녹
Heat	균열, 박리, 변색 퇴색
해염입자	녹, 풀음

## 2. 시험자재, 장치 및 방법

### 2.1 시험자재

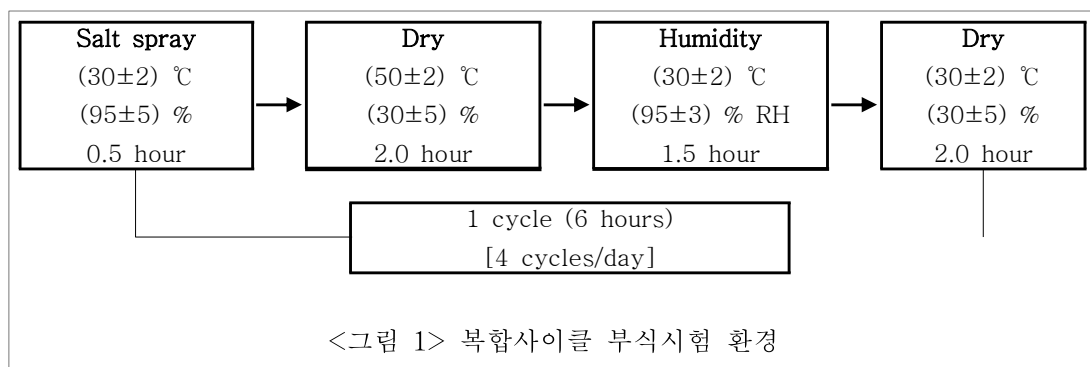
본 시험에서 다양한 방식도로 중 주제는 에폭시수지(Epikoat 828, Shell Chemical)를 사용하고 경화제로는 Phenalkamine (Cardolite® Lite 2001, Cardolite Corporation)을 사용하여 구성된 2액형 도료를 대상으로 하였다. 시험에 사용될 도장이 입혀질 금속시편은 KS D 3503 및 KS D 3512에서 규정한 철판으로 크기는 70×150×1mm 치수를 사용하였다. 또한 도장효과를 얻는데 있어서 가장 중요한 요인 중 하나인 표면처리는 SSPC 탈청처리 SP 10 기준으로 연마제 세정하였다. 도막은 제작된 철판에 에어스프레이법으로 도장하였으며, 도장두께는 120 μm 로 하였다.

### 2.2 옥외폭로시험과 가속시험

옥외 사용환경시험은 한국전자재시험연구원의 서산옥외폭로시험장에서 실시하였다. 직접옥외 폭로대에 시편을 설치하였으며 폭로각은 45° 를 유지하였다.

가속시험 중 촉진내후성 시험은 KS R 4069를 만족하는 장비로 Sunshine WM(모델명, 제조사)를 사용하였다. 시험조건은 ASTM G 152에 따라 실시하였으며, 세부적으로 120분 조사 중 18분간 물분무, 블랙패널의 온도는 63±3℃, 총 시험시간 3,750시간 동안 실시하였다. 이 시험조건에서 색차 및 광택을 시간의 경과에 따라 측정하였다.

촉진부식시험은 ISO 11997-1에 따른 복합사이클 내식성시험법을 적용하였으며, 그 시험 조건은 그림 1과 같다. 시편은 흠 없는 시편과 X-cut 시편을 ASTM D 1654에 따라 제작하여 시험하였으며 시간의 경과에 따른 녹발생의 정도를 측정하였다.



### 3. 성능열화모델 및 분포

#### 3.1 색차 및 광택

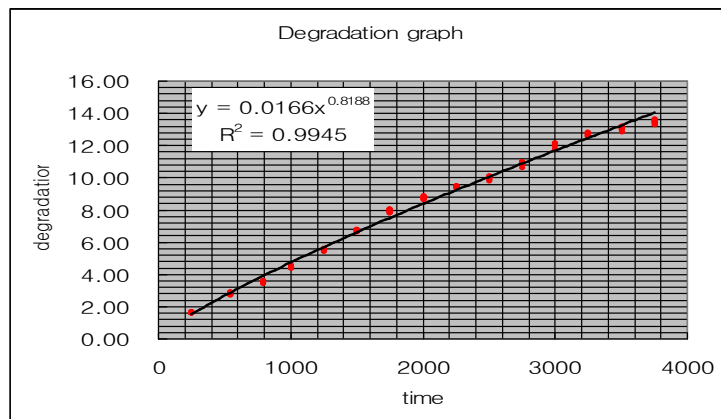
도료의 수명을 구할 때에는 성능이 일정수준 이하로 떨어지는 시점을 고장으로 판정한다. 이는 도료가 소지를 보호하는 것이 주목적이므로 도료가 소지에 대한 보호 성능이 떨어질 수 있는 시점으로 하기 때문이다. 일반적으로 도료의 경우 성능의 열화과정이 다음의 역승 모형(power law model)을 따르는 것으로 알려져 있다.

$$y = at^b \quad (1)$$

여기서  $y$ 는 열화량을,  $t$ 는 경과시간을 말하며,  $a$ ,  $b$ 는 열화모형의 모수이다.

열화시험이란 수명을 직접 관측하는 대신 주기적으로 또는 지속적으로 성능을 관측하여 고장시간을 추정하는 시험방법이다. 대상소재의 성능이 사용기간이 지남에 따라 저하되는 경우 미리 정해진 성능 값 이하가 되는 시간을 고장시간으로 추정한다. 가속열화시험이란 성능감소를 촉진하기 위해 사용조건보다 높은 스트레스수준에서 수행하는 열화시험을 말한다. 본 연구에서는 성능의 열화데이터로부터 열화모형식을 도출하고 이 모형식을 사용하여 각 시료의 고장시간 예측 값을 구한 후 이들 고장시간데이터로부터 대상도료의 수명분포와 사용수명을 예측하는 방법을 제시하였다.

먼저 촉진시험 데이터로부터 색차변화에 대한 열화모형(degradation model) 및 모수(parameter)를 구하고, 고장시간을 예측한다. 촉진시험 및 옥외시험의 시료는 각각 10개씩을 사용하였다. 촉진시험은 3,750시간동안 수행하였으며 현재 옥외시험은 1년간의 시험자료가 확보되어 있다. 촉진시험에서 시험시간의 경과에 따른 색차의 변화, 즉 열화추이는 다음 그림 2와 같이 나타났다.



<그림 2> 촉진시험에서의 열화추이

그림에서 열화패턴이 도료의 열화모형으로 자주 사용되고 있는 역승모형을 따름을 보여주고 있다. 이 모형의 모수  $a$ ,  $b$ 의 최소제곱 추정값은 각각 다음과 같다.

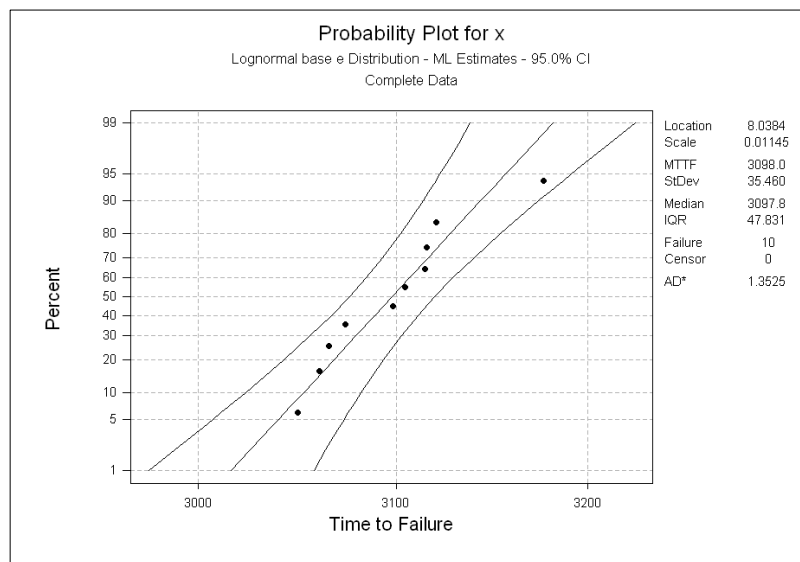
$$a = 0.0166, \quad b = 0.8188$$

이 도료의 경우 색차 또는 열화량이 12.0 이상이면 고장으로 간주한다. 각 시료별 시험데이터에 대해 역승모형을 적용하여 각 시료의 고장시간을 추정하면 다음과 같다.

<표 2> 열화모형에 의한 고장시간 추정

시료	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
고장시간	3,060.7	3,074.0	3,120.6	3,065.4	3,049.8	3,115.5	3,104.4	3,114.6	3,098.3	3,176.6

위의 고장시간 데이터를 사용하여 분포의 적합성(goodness of fit test for distributions)을 검토 한 결과 대수정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 그림 3은 대수정규 플롯을 보여주고 있다. 이 그림은 축진시험에서의 도료의 수명이 위치모수(location parameter)가 8.0384, 척도모수(scale parameter)가 0.01145 인 대수정규분포를 따름을 보여준다. 이 분포로부터 고장확률이 10%가 되는 시점인  $B_{10}$  수명을 구하면 3,052.7 시간이 된다. 평균수명은 3,098 시간으로  $B_{10}$  수명과 별 차이가 나지 않는다. 이는 각 시료들의 고장시간이 거의 동일함을 의미한다.



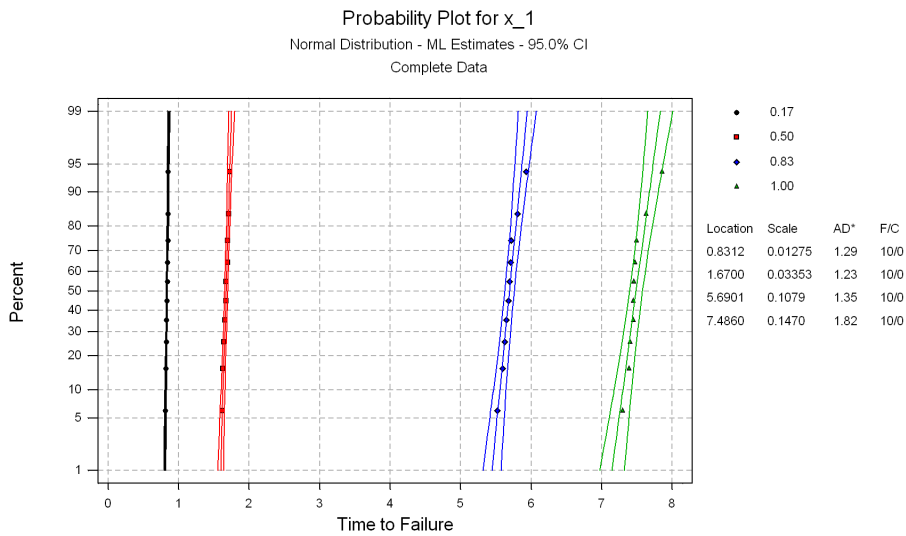
<그림 3> 고장시간에 대한 대수정규 플롯

다음은 옥외폭로시험 자료를 사용하여 색차(성능)의 분포를 추정하였다. 시간의 경과에 따른 색차의 분포로서 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 그림 4는 옥외폭로시험에서 시간의 경과에 따른 색차 데이터를 정규분포에 적합시켜 플롯한 것이다. 그림에서 각 경과시간에서의

색차 데이터 분포로서 정규분포가 적합함을 나타내고 있으나, 척도모수(표준편차)가 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보임으로서 동일하지 않은 것으로 나타난다.

옥외시험자료의 분석결과 시간이 경과함에 따라 표준편차가 증가하는 경향을 보이므로 동일 시간대(yr)의 시험 데이터를 그 평균으로 나눈 값을 사용하여 변동계수가 동일한지를 검토하기로 한다.  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  일 때  $Y = \frac{X}{\mu}$ 로 변환하면  $Y = \frac{X}{\mu} \sim N(1, \frac{\sigma^2}{\mu^2})$  이다. 따라서

$Y$ 의 분산이 동일하다면  $X$ 의 변동계수  $\frac{\sigma}{\mu}$ 가 동일한 것이다.  $Y$ 의 분산의 동일성에 대한 카이제곱 검정결과가 표 3과 같다.  $Y$ 의 분산이 동일한 것으로 나타났으며 이는 색차 변화 데이터의 변동계수가 일정함을 의미한다.

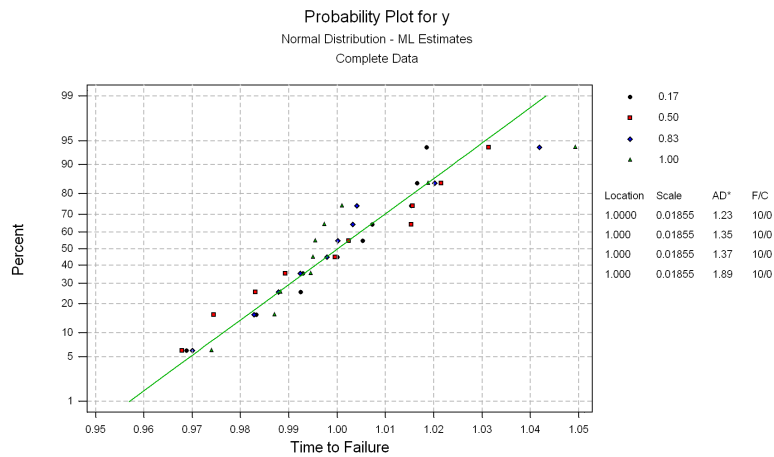


<그림 4> 색차데이터에 대한 정규분포 적합결과

<표 3> Y 표준편차의 동일성 검정

Chi-Square	DF	P
1.007	3	0.800

다음 그림 5는 동일한 분산을 가정했을 때의  $Y$ 의 분포(정규분포)를 나타낸다.



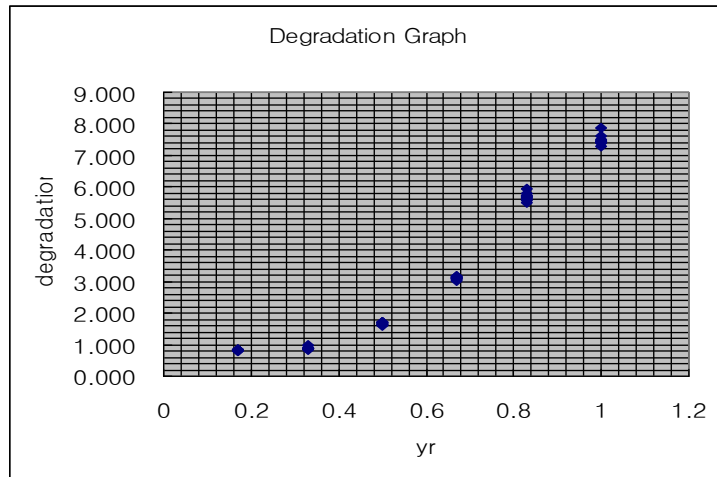
<그림 5> 동일한 분산의 가정 하에 정규분포 플롯 결과

다음은 광택저하에 대해 색차시험에서와 동일하게 열화모형 및 모수들을 추정하고, 고장 시간과 성능의 분포를 예측하였다. 축진시험자료로부터 도출된 색차변화와 광택저하에 대한 열화모형과 수명분포 특성자료가 표 4에 요약되어 있다.

<표 4> 중방식 도료의 열화모형, 성능분포 및 수명분포 특성 요약

성능 특성	고장 기준	열화메커니즘	열화요인	수학적 열화모형	열화모형 계수	성능분포 및 특성	수명분포
색차	색차 변화 12	weathering cracking creep, wear corroision /oxidation fatigue	Solar radiation UV 온도변화 화학적 오염 (습기, 염분, 오존, 황)	Power law 모형 $y = at^b$ $y = \text{색차}$ $t = \text{시험시간}$	$a = 0.0166$ $b = 0.8188$	정규분포 변동계수가 일정	대수 정규분포
광택	초기 광택의 80%	weathering cracking creep, wear corroision /oxidation fatigue	Solar radiation UV 온도변화 화학적 오염 (습기, 염분, 오존, 황)	Power law 모형 $y = at^b$ $y = \text{광택열화량}$ $t = \text{시험시간}$	$a = 0.0053$ $b = 1.124$	정규분포 표준편차가 일정	2모수 지수 분포

다음 옥외시험 자료를 분석하여 축진시험 데이터의 분석결과와 비교하여 가속계수(acceleration factor)를 산출한다. 축진시험 및 옥외시험의 시료는 각각 10개씩을 사용하였다. 축진시험은 3,000시간동안 수행하였으며 현재 옥외시험은 1년간의 시험자료가 확보되어 있다. 다음 그림 6은 색차에 대한 1년간의 옥외시험데이터를 나타내고 있다.



<그림 6> 옥외시험에서의 색차변화

옥외시험에서의 열화추이가 촉진시험에서와 다르게 나타나는 이유는 1년 동안 계절적 영향을 받기 때문으로 추정된다. 옥외시험에서의 최초 1년간 열화량은 7.456 이며 이는 촉진시험에서

$$t = \left(\frac{7.456}{a}\right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{7.456}{0.0166}\right)^{\frac{1}{0.8188}} = 1,735.3 \text{ 시간} \quad (2)$$

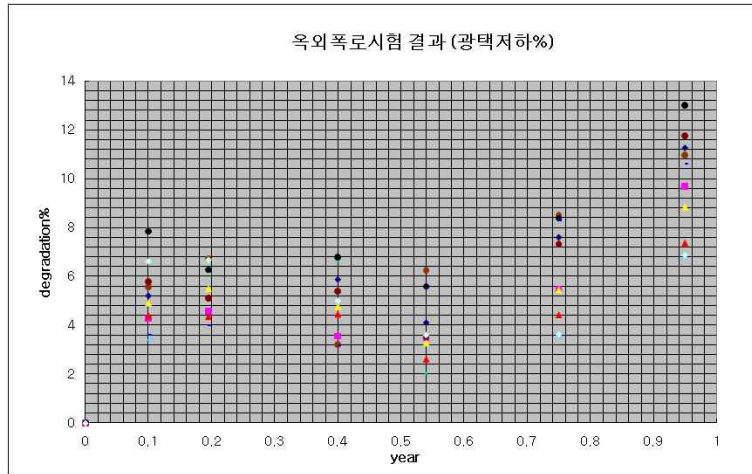
의 열화량에 해당한다. 장기간의 옥외시험자료가 확보되면 이들 데이터로부터 계절적 영향을 배제한 연간 열화량을 이용하여 열화모형의 모수를 추정하고 이로부터 고장시간을 추정하여 옥외조건 대비 촉진시험의 가속계수를 산출할 수 있다. 열화량(색차)에 대한 고장판정기준을  $d^*$ , 옥외시험 및 촉진시험에서 열화모형 (1)의 모수를 각각  $a_f, b_f$  및  $a, b$ 라 둘 때 가속계수는 다음과 같이 구해진다.

$$AF = \frac{(d^*/a_f)^{1/b_f}}{(d^*/a)^{1/b}} \quad (3)$$

이와 같이 수명분포 및 가속계수가 얻어지면 동일계열의 도료에 대해서 단기간동안 촉진 시험을 실시하여 옥외사용조건에서의 사용수명을 예측할 수 있다.

다음 그림 7은 광택에 대한 1년간의 옥외시험 데이터이다.





<그림 7> 옥외시험에서의 광택변화

옥외시험과 촉진시험에서의 열화추이가 다르게 나타나는 이유 역시 계절적 영향을 받기 때문으로 추정된다. 옥외시험에서의 최초 1년간 평균 열화량은 9.7% 이며 이는 촉진시험에서의 시간으로 환산하면

$$t = \left(\frac{9.7}{a}\right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{9.7}{0.0053}\right)^{\frac{1}{1.1224}} = 806.7 \text{시간} \tag{4}$$

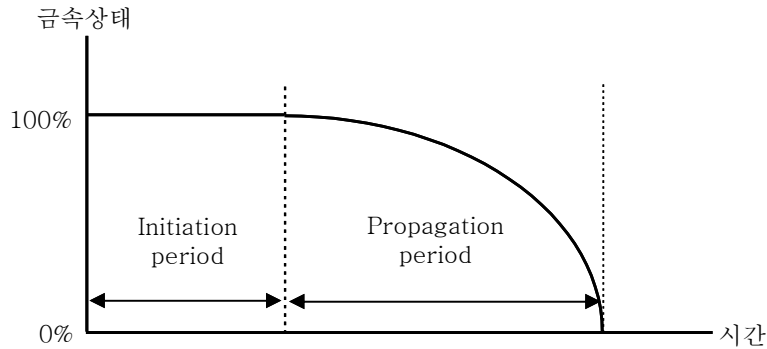
즉 최초 806.7 시간의 열화량에 해당한다. 추후 다년간의 옥외시험자료가 확보되면 이들 데이터로부터 광택저하에 대한 가속계수(acceleration factor)를 구하고, 이로부터 동일 계열의 도료에 대해서 단기간동안 촉진시험 결과로부터 옥외 사용조건에서의 사용수명을 예측할 수 있다.

### 3.2 부식(corrosion)

철판시편에 도막을 형성하여 부식시험을 5,000시간 이상 진행하였으며 현재 옥외폭로시험과 가속시험의 모든 시편에서 부식현상은 발생하지 않았다. 이러한 결과는 금속표면에 부식을 유발하는 수분이나 산소 등 화학물질이 도막을 통과하여 금속표면에 침투하기까지 발단기간 (initiation period)동안은 부식이 발생하지 않으며, 그 기간 이후부터 부식이 발생하기 시작하여 확산기간(propagation period)동안 빠른 속도로 부식이 진행된다는 일반적인 이론에 부합하는 것으로 판단된다. 이러한 일반적인 부식의 과정에 의해 시간이 경과함에 따른 부식 현상은 그림 8과 같은 열화추이를 따르는 것으로 알려져 있다. 여기서 금속의 상태는 금속의 두께를 말한다. 그림은 초기 두께 100%에서 완전히 부식되기까지 (0%) 금속두께의 변화를 나타낸다. 이 열화모형은 다음의 역승모형으로 표현된다.

$$y(t) = c - at^b \tag{5}$$

식 (5)에서  $t$ 는 시간을,  $y(t)$ 는 금속의 두께(%)를 나타낸다.



<그림 8> 금속부식 열화 모델

참고로 Bakker et. al. (1999)의 철 구조물 도막 수명연장을 위한 연구결과에 의하면, 발단 기간이 용접 연결부위(joint)의 경우 5년, 평면부위(slabs)의 경우 약 25년으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 부식시험에서는 시료가 분석시점에서 아직 발단기간에 있어 부식이 진행되는 확산기간(propagation period)에 도달하지 않은 것으로 판단되며 부식에 의한 수명 예측을 위해서는 부식시험을 계속 진행하며 관찰해야 할 것이다.

#### 4. 결 론

오랜 사용수명이 요구되는 건축용 자재의 경우 고장이 관측되기까지 진행되는 일반적인 수명시험보다는 가속열화시험이나 옥외폭로시험을 통해 시간의 경과에 따른 성능이나 물성의 변화를 관측함으로써 수명을 예측하고 평가하는 것이 여러 측면에서 더 효과적이다. 본 연구에서는 건축용 철 구조물에 적용되는 방식도료를 대상으로 가속열화시험과 필드조건에서의 옥외폭로시험을 실시하여 도료의 주요성능인 색차와 광택, 그리고 부식의 열화를 관측하고 이들 성능의 수학적 열화모형과 성능분포를 이용하여 사용수명 예측방법을 제시하였다. 옥외폭로시험 자료가 축적될 경우 가속열화시험과 필드조건간의 가속계수를 산출하여 단기간에 필드조건에서의 사용수명을 예측하고 평가 할 수 있는 가속열화 시험방법을 개발하는데 활용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 권영일 (2006), 열화성능에 의한 건설자재 수명평가에 관한 연구, 신뢰성응용연구, 제6권 제4호, pp. 275-284.
2. Bain, L.J. (1978), Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models: Theory and Methods, Statistics: Textbooks and Monographs, Vol 24, Marcel Dekker.
3. Bakker, J.D. et. al. (1999), Model of Lifetime-extending maintenance, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair, London, UK, pp. 13-15.
4. Beek A.V. et al. (2003), Validation model for service life prediction of concrete structures, 2nd International RILEM workshop on life prediction and aging management of concrete structures, Paris, France, pp. 257-267.
5. British standard BS7543 (2003), Guide to durability of buildings and building elements, products, and components, BSI.
6. European Organization for Technical Approvals (1999), Assessment of working life of products.
7. ISO, International Organization for Standardization (2000), Building and constructed assets. Service life planning, Part 1: General principles, ISO 15686-1.
8. ISO, International Organization for Standardization (2001), Building and constructed assets. Service life planning, Part 2: Service life prediction procedures, ISO 15686-2.
9. ISO, International Organization for Standardization (2002), Building and constructed assets . Service life planning, Part 3: Performance audits and reviews, ISO 15686-3.
10. Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (1998), Statistical Method for Reliability Data, Wiley
11. Nelson, W. (1990), Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, John Wiley & Sons.
12. NFPA/T2.6.1 R2-2000 (2000), Fluid power components-Method for verifying the fatigue and establishing the burst pressure ratings of the pressure containing envelope of a metal fluid power component, National Fluid Power Association
13. Noortwijk, J.M. (1998), Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration, In Andrzej S. Nowak, editor, Proceedings of the Eighth IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Kraków, Poland, 1998, pages 273-280. Ann Arbor:

University of Michigan.

14. Noortwijk, J.M., and Klatter, H.E. (1999), Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier, *Reliability Engineering and System Safety*, 65(3), pp. 203–211.