大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第28卷 第3A號・2008年 5月
pp. 341 ~ 347

고속도로 강구조물의 효율적 유지관리를 위한 도막수명예측

Prediction of Lifetime of Steel Bridge Coating on Highway for Effective Maintenance

이찬영* · 정해문 · 박진환*****

Lee, Chan-Young · Cheong, Haimoon · Park, Jin-Hwan

Abstract

Among coating systems used for steel bridge coatings on highway such as red lead-pigmented alkyd, chlorinated rubber, waterborne inorganic zinc, inorganic zinc/epoxy/urethane and inorganic zinc/epoxy/fluororesin, evaluation of deterioration degree and prediction of lifetime through regression analysis were carried out for coating systems widely used and grossly degraded. For evaluation of deterioration degree, 75 bridges on highway were selected, and evaluations were carried out according to point offering method regulated by *Guideline of maintenance coating for steel bridges* used in Korea Expressway Corporation. Lifetime prediction results showed 13.0~13.3 years for the whole nation, 11.8 years for urban and industrial region in the metropolitan area, 13.2 years for rural region except the metropolitan area, 13.5~13.7 years for chlorinated rubber coating systems, and 12.86 years for red lead-pigmented alkyd systems. For prediction of the rest life of coating, we tried to execute parallel translations of standard deterioration curve to current life and deterioration degree for both *x* and *y* axes, and it was thought that parallel translation for *x* axis corresponded to deterioration aspects in actual environment. Maximum and minimum equations were derived from standard deterioration equation by adding and subtracting error values deduced in regression analysis to/from each coefficient in order to establish maintenance coating criteria for overall steel bridges on highway. Whole domain was divided into 8 parts in order to predict the rest life of coating and optimum time of maintenance coating, and maintenance coating criteria for each 8 domains were presented.

Keywords : *steel bridge coating, prediction of lifetime, deterioration degree, maintenance*

요 지

고속도로상의 강교 도장에 사용되어온 도장계는 광명단 조합페인트, 염화고무계, 수용성 무기징크, 내후성 중방식, 초내후성 중방식 등이 있으며, 이들 도장계 중 가장 널리 사용되어온 도장계와 열화가 많이 진행된 도장계를 중심으로 도막열화도 평가를 실시하고 통계적 회귀분석을 통해 도막의 수명을 예측해 보았다. 평가 대상 교량은 고속도로상의 교량 중 75개 교량을 선정하였으며, 한국도로공사에서 사용하고 있는 "강교의 보수도장 지침"에서 규정하는 평가점 부여 방법에 따라 도막열화도 평가를 실시하였다. 도막수명예측 결과는 전국 평균이 13.0~13.3년, 수도권의 도시 및 공장지역 11.8년, 수도권 이외의 전원지역 13.2년, 염화고무계 13.5~13.7년, 조합페인트 12.86년으로 나타났다. 도막의 잔여수명 예측을 위해 기준열화곡선을 현재 시점의 열화도 위치로 *x*축 및 *y*축에 대하여 각각 평행이동시켜 본 결과 *x*축에 대해 평행이동하는 것이 실제 열화 양상과 잘 부합된다고 판단되었다. 고속도로상의 강교 전반에 걸쳐 보수도장 판정기준을 수립하기 위하여 기준열화곡선 회귀분석시 도출된 각 계수의 오차값을 가감하여 상한식과 하한식을 구하였다. 도막수명예측 상·하한곡선을 바탕으로 강교 도장의 잔여 수명과 적정 보수도장 시기를 예측하기 위하여 도막의 상태에 따라 8개 부분으로 영역을 구분하고, 각각의 영역에 대한 보수도장 판정 기준을 제시하였다.

핵심용어 : 강교도장, 수명예측, 열화도, 유지관리

1. 서 론

강교량 등의 각종 구조물에 사용되는 철강은 그 수와 규모가 급증하고 있어서 현대문명에서 필수 불가결한 중요한 재료이지만 주변 환경에 존재하는 물과 산소에 의해 부식된다는 중요한 결점이 있다. 특히, 철강 중심의 금속재료는 안정된 천연금속 산화물(녹의 형태)인 광석에 많은 에너지를 가해서 쓸모 있는 실용재료로 환원시킨 불안정한 것이므로 다시 안정한 원래상태로 되돌아가려는 천부적인 부식성을 가지고 있다.

*정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 전임연구원 (E-mail : leecy@ex.co.kr)
**정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (E-mail : haimoon@ex.co.kr)
***부경대학교 응용화학공학부 교수 (E-mail : jhpark@pknu.ac.kr)

금속재료의 부식손실은 최근의 조사에 의하면 서구공업국에서도 GNP의 무려 2~3%에 달한다고 한다(전대희, 1995). 부식에 의한 직접손실 이외에도 부식으로 인한 수리 운휴나 가동중단, 효율저하, 재건설, 과중한 설계 등의 간접손실까지 가산한다면 그 경제적인 손실은 실로 막대한 것이다. M. R. Louthan의 보고(Louthan, 1993)에 따르면 미국에서의 부식에 의한 간접손실까지 감안한 비용은 연간 약 2,500억 달러에 달하는 것으로 추산하였다. 또한 부식문제는 경제적인 면뿐만 아니라 안전사고로 인한 인명피해로도 이어질 수 있기 때문에 이러한 부식문제의 심각성을 바로 인식하는 것은 매우 중요하다고 하겠다.

강재의 방식법에는 여러 가지가 있을 수 있지만 그 중에서도 도장은 부식을 억제하는데 효과적이고 편리한 방법으로 현재까지 주로 사용되어 왔고, 도로의 주요 구조물인 강교의 경우도 대부분 부식방지를 위해 도장을 이용한다. 그러나 도막의 수명이 교량의 수명보다 훨씬 짧기 때문에 건설당시에 이루어진 도장이 교량의 수명이 다할 때까지 제 역할을 하는 것은 불가능하므로 이에 대한 지속적인 유지보수가 반드시 필요하다. 강구조물의 효율적인 유지보수를 위해서는 내구성 증진을 위해 사용되는 방식도장의 도막 열화도를 올바르게 평가하고 그 잔존 수명을 예측하여 최적의 시기에 보수도장 혹은 재도장하는 것이 매우 중요하다.

도장의 성능평가 및 도막수명 예측을 위해 주로 사용되는 방법으로는 실내촉진시험 또는 옥외폭로시험과 같이 인위적으로 도장 시편을 열화시킨 후 평가하는 방법이 있다. 실내촉진시험은 비교하고자 하는 대상 도장계(coating system)의 시편을 자외선 조사, 염수분무 또는 침지 환경 등의 열악한 조건하에서 열화를 촉진시키고, 그 촉진열화 과정에서 도막의 외관상태를 비교하거나 전기화학적 임피던스법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)과 같은 전기화학적 방법을 통해 상대 비교하는 등의 방법이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 방법은 시험기간을 크게 단축시킬 수 있고, 대상 도장계의 미세한 성능 차이도 구분이 가능하다는 장점이 있으나 촉진열화 환경과 실제 공용환경 하에서의 도막수명의 상관관계를 도출하기가 매우 어렵고, 실제 공용환경 하에서는 촉진시험에 따른 성능평가 결과와 다소 다른 결과가 나타날 수도 있다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 종종 옥외폭로시험 방법을 사용한다. 촉진시험법은 특정 파장 대역의 인위적 자외선을 조사해 주는 데 반해 옥외폭로시험은 자연광을 이용함으로써 실제 공용환경 하의 조건에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있으나 상대적으로 시험기간이 너무 길어지기 때문에 촉진시험과 병행하는 경우가 많다. 그러나, 실내촉진시험과 옥외폭로시험을 병행하더라도 이러한 인위적 열화과정을 통한 평가방법은 평가대상 도장계의 상대적 성능 비교 기법으로 유용하나 현장데이터와의 비교 분석 없이 그 자체만으로는 절대적 수치로서의 도막 수명을 예측할 수 없다.

본 연구에서는 인위적 열화에 의한 방법이 아닌 실제 공용환경 하에서 자연적으로 열화된 도막의 외관조사 결과를 바탕으로 통계적 회귀분석을 실시하였으며, 충분한 수의 현장 데이터를 보유할 경우 사용 가능한 통계적 회귀분석에 의한 도막수명 예측 방법을 제시하고자 한다.

2. 고속도로상의 강교 도장현황

고속도로상의 강교 821개에 대한 연대별 적용 도장계를 살펴보면 그림 1에 나타낸 바와 같이 1970년대에는 광명단 조합페인트만이 사용되었고 80년대에는 염화고무계의 사용이 증가하여 광명단 조합페인트와 염화고무계가 대등하게 사용되었으며, 90년대에는 염화고무계의 사용회수가 압도적으로 많았다. 또한, 수용성 무기징크가 새롭게 등장하면서 비교적 상당한 부분을 차지하고 있고 내후성 중방식 사양이 극소수 사용되었다. 2000년대 들어서는 대부분의 신설교량에 내후성 중방식 도장계를 사용하게 되어 내후성 중방식이 염화고무계를 앞질렀고 초내후성 중방식은 극소수 사용되었다. 최근에는 세라믹계, 메탈라이징 등의 고내구성 도장계 및 방식공법이 강교도장 시방에 포함되었고, 가장 많이 사용해왔던 염화고무계와 재래식 도장계인 조합페인트가 환경보호를 위해 제외되고 있는 추세이므로 향후에는 내구성이 우수하고 환경친화적인 도장계의 사용이 증가할 것으로 예상된다. 그러나, 표 1에 나타낸 바와 같이 현재의 도장계별 적용 교량수는 염화고무계가 467개로 가장 많고, 유지관리의 편의성을 위해 주로 같은 도장계로 보수하게 될 것이므로 기존 구조물의 공용기간 동안에는 광명단 조합페인트나 염화고무계를 사용하지 않을 수 없을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 기존에 널리 사용되어왔고 열화가 많이 진행된 광명단 조합페인트, 염화고무계 등의 도장계를 중심으로 도막열화도 평가를 실시하고 통계적 회귀분석을 통해 도막의 수명을 예측해 보았다.

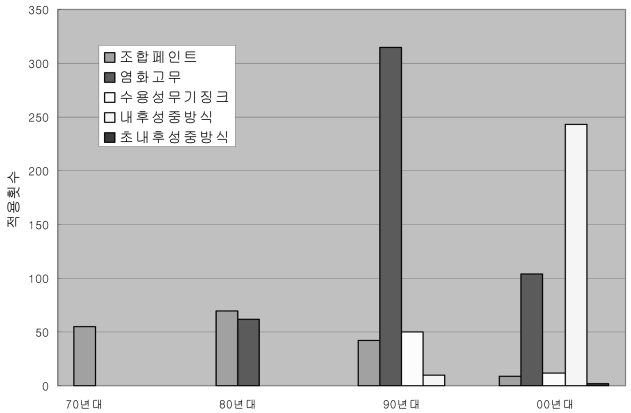


그림 1. 연도별 적용 도장계

표 1. 도장계별 적용 교량수

도장계	교량수
광명단 조합페인트	39
염화고무	467
수용성 무기징크	76
내후성 중방식	237
초내후성 중방식	2
계	821

3. 도막열화도 평가

3.1 평가 방법

도막열화도 평가 대상 교량의 선정은 표 1에 나타낸 5개 도장계가 골고루 포함되는 동시에 일반적으로 널리 사용되는 부식환경의 분류방법에 따라 전원, 산간, 도시, 공장, 해안지역이 골고루 포함되도록 하여 총 75개 교량을 선정하였다. 그림 2에 평가대상 교량의 위치를 나타내었다. 도막열화도 평가기준은 실무 적용성을 고려하여 한국도로공사에서 사용하고 있는 "강교의 보수도장 지침"에서 규정하는 평가점 부여 방법을 수정하지 않고 그대로 사용하였다. 표 2에 도막열화도 평가 기준을 나타내었다. 평가 항목은 녹, 박리, 체킹, 쵸킹, 경관조건 등 총 5가지이며, 평점의 배점은 녹이 최대 40점, 박리가 최대 30점이고, 나머지 체킹, 쵸킹, 경관조건은 최대 10점이다. 평가 항목 중 체킹(checking)은 도막이 노화됨에 따라 표면에서만 발생하는 갈라짐 현상이고, 쵸킹(chalking)은 자외선에 의해 바인더의 분자사슬이 파괴되어 표면에 안료만 남게 되는 현상이다(Munger 등, 1999).

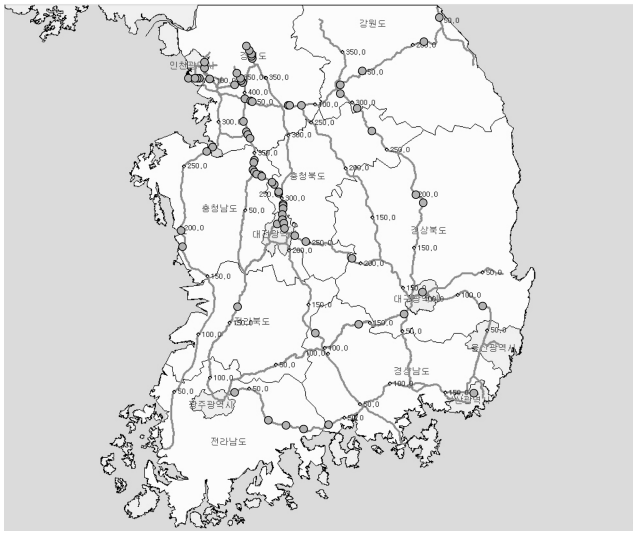


그림 2. 평가대상 교량의 위치

3.2 평가결과 및 고찰

총 75개의 조사대상 교량에 대해 최종 도장 후 경과년수에 따른 열화도 평점을 회귀분석하여 회귀식을 산출하였다. 본 현장조사에서는 평가자 2인이 부여한 평점의 평균값을 최종 평점으로 사용하였는데, 2명의 평가자가 부여한 평점의 편차가 10점 이상(총점 100점의 10%)인 경우 신뢰도가 떨어진다고 판단하여 제외하고 71개의 데이터에 대해서만 회귀분석하였다. 岡本 拓 등(2002)의 연구결과와 같이 강교 도장의 도막열화곡선은 지수곡선이 일반적이며, 片脇 清 등(1991)의 연구결과와 같이 3차곡선을 사용하는 경우도 있다. 본 연구에서는 지수곡선과 3차곡선을 모두 적용해 보았으며, 이때의 수명예측식은 각각 식(1), 식(2)와 같다.

$$y = Ae^{\frac{x}{t}} + B \quad (1)$$

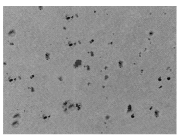
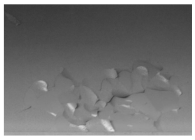
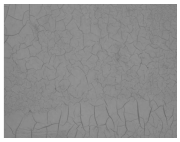
여기서, x : 도장후 경과년수
y : 도막열화도 평점
A : 8.026
B : 0
t : 6.008

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 \quad (2)$$

여기서, x : 도장후 경과년수
y : 도막열화도 평점
A : 14.57
B : -3.115
C : 0.81
D : -0.02

도막열화도 평가기준에서 당장 보수해야 하는 열화도 평점은 70점 이상이므로 도막의 수명은 열화도 평점 70점에 도달하는 시간으로 가정하였다. 그림 3에 나타낸 회귀분석 결과에서 도막의 수명이 다하는 열화도 평점 70점에 도달하기까지 소요되는 시간은 지수곡선 적용시 13.0년(R^2=0.56), 3차곡선 적용시 13.3년(R^2=0.57)으로 나타났다. 2001년도에

표 2. 평가점 부여 방법에 따른 도막열화도 평가 기준

평가 항목	녹		박리		체킹		쵸킹		경관조건		
열화 예											
항목별 평가	평점	면적율 (%)	평점	면적율 (%)	평점	상황	평점	상황	평점	환경	경관 중요도
	40	3 이상	30	33 이상	10	심함	10	심함	10	공장, 도시	중요
	30	1~3	24	17~33	5	보통	5	보통	8	해상, 해안	중요
	20	0.3~1	18	10~17	0	없음	0	없음	6	전원, 산간	중요
	10	0.1~0.3	12	3~10					4	공장, 도시	보통
	0	0.1 미만	6	3 미만					2	해상, 해안	보통
			0	이상없음					0	전원, 산간	보통
종합 평가	평균평점		70~100		40~70		20~40		20 미만		
	보수도장 판정		긴급한 보수도장 필요		차년도 보수계획에 반영		적당한 시기에 보수도장 (주의 깊은 관찰 요망)		현재 보수도장 필요 없음		

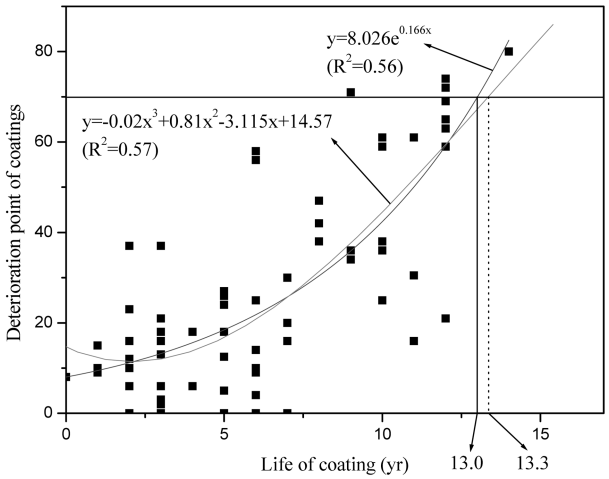


그림 3. 도막열화곡선(전국)

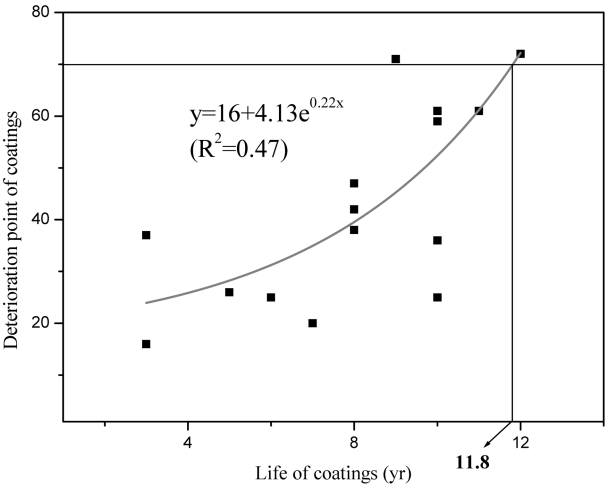


그림 4. 수도권 도시 및 공장지역의 도막열화곡선

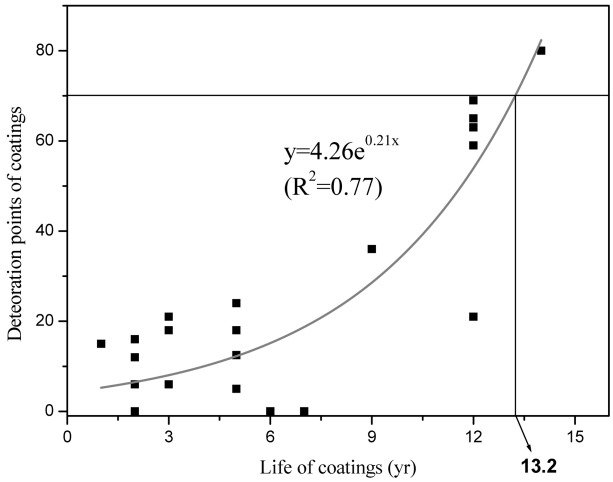


그림 5. 전원지역의 도막열화곡선(수도권 제외)

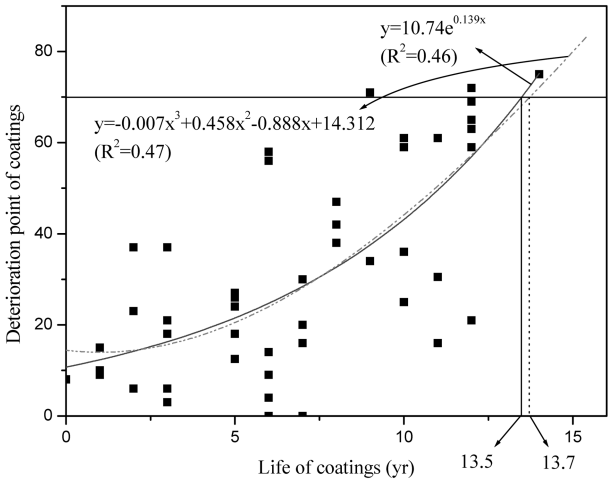


그림 6. 염화고무계 도장의 도막열화곡선

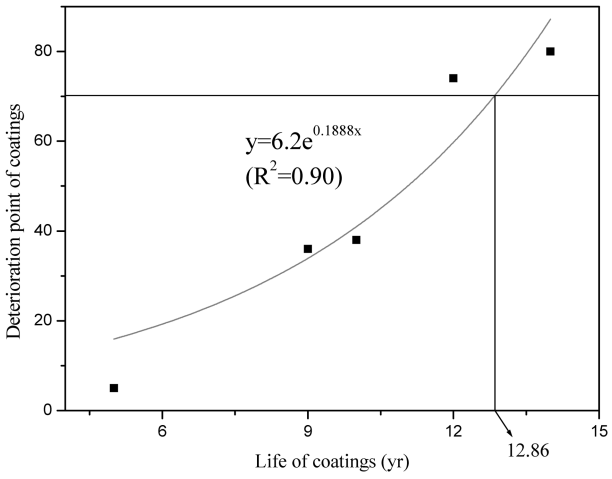


그림 7. 조합페인트의 도막열화곡선

조사된 고속도로상의 강교 평균 재도장 주기는 약 10년이었으므로(이찬영 등, 2002) 과학적인 점검에 의해 최적의 시기에 재도장이 이루어진다면 평균 재도장 주기를 약 3년 정도 연장할 수 있다고 판단된다.

3.2.1 주변환경에 따른 영향

그림 4에 수도권의 도시 및 공장지역에 대한 도막수명 예측 결과를 나타내었다. 데이터의 수가 적을 경우 3차곡선에는 잘 맞지 않으므로 지수곡선에 따라 회귀식을 구하였으며, 그 결과 11.8년으로 예측되었다. 이는 전국 평균인 13년보다 1년 이상 짧은 값이며, 이 결과는 공장, 자동차 등에서 배출되는 SO_x와 같은 부식성 가스가 많이 발생하기 때문이라고 생각된다.

그림 5에 수도권 이외의 전원지역에 대한 도막수명 예측 결과를 나타내었다. 수도권 지역은 전원지역이라고 해도 도심과 거리가 가깝고 교통량이 많아 부식성 가스의 영향이 크다고 판단하여 분석에서 제외하였다. 수명예측 결과는 13.2년으로 나타나 수도권의 도시 및 공장지역보다 1.4년 길고, 지수곡선에 의한 전국평균보다 0.2년 길게 나타났다.

일반적으로 도장이 적용되는 주변환경의 분류는 전원, 산간, 도시, 공장, 해안 등 5가지 환경으로 분류되나 본 연구에서 조사된 교량 중 산간 및 해안에 위치한 교량들은 도장 후 경과년수가 길지 않아 수명예측이 불가하였다.

3.2.2 도장계에 따른 영향

그림 6, 7에 염화고무계 및 조합페인트에 대한 도막열화곡선을 나타내었다. 염화고무계는 지수곡선 적용시 13.5년, 3차곡선 적용시 13.7년으로 나타났으며, 조합페인트는 12.86년으로 나타나 재래식 도장계인 조합페인트가 염화고무계보다 다소 수명이 짧다고 판단된다. 일반적으로 도장계의 수명은 하도의 도막 성능에 가장 크게 좌우되는데, 조합페인트의 하도에는 방청안료로 광명단(red lead)을 사용하고, 염화고무

계의 하도는 다량의 아연 분말이 포함된 무기징크(inorganic zinc) 도료를 사용한다. 광명단은 인체에 침입할 경우 골조직에 침착하여 혈액 중에서 유리되어 독성을 발휘하므로 인체에 치명적이고(방극진, 1995), 주변 환경에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 방청 성능도 최근에 널리 사용되고 있는 무기징크 도료에 비해 떨어진다고 알려져 있다.

그 외의 도장계로 수용성 무기징크, 내후성 중방식, 초내후성 중방식 도장계가 있으나, 적용기간이 길지 않아 열화가 많이 진행되지 않았거나 대상 교량수가 적어 분석이 불가능했다. 향후에는 이들 도장계에 대해서도 추가 조사를 실시하여 도장계별, 주변환경별, 지역별 도막열화 경향을 분석해 볼 필요가 있다고 생각된다.

3.3 회귀분석의 신뢰도 향상 방안

본 연구에서 실시한 회귀분석 결과의 R^2 값은 0.46~0.90으로 상당히 낮게 나타난 경우가 많았다. 이는 인위적으로 동일한 열화조건을 가해주는 촉진시험에 의한 열화시편을 대상으로 하지 않고, 열화 조건이 각기 다른 실제 공용환경하의 도막을 대상으로 하였기 때문이라고 생각된다.

회귀분석의 신뢰도 향상을 위해서는 유사 조건끼리 분류해 줄 필요가 있다고 생각된다. 그림 3의 모든 조사대상 교량에 대한 회귀분석 결과의 R^2 값(지수곡선)은 0.56이었고, 전원지역에 대해서만 분석하였을 때는 0.77(그림 5), 조합페인트에 대해서는 0.90(그림 7)으로 나타나 회귀분석의 신뢰도가 향상되었음을 알 수 있다. 그러나 수도권의 도시, 공장지역의 경우는 0.47, 염화고무 도장계에 대해서는 0.46으로 오히려 약간 감소하였다.

회귀분석의 신뢰도를 보다 향상시키기 위해서는 주변환경 및 도장계에 따라 조건을 보다 세분화할 필요가 있다. 즉, 일반적인 주변환경 분류 방법에 의한 5가지 지역조건(전원, 산간, 도시, 공장, 해안)과 사용된 도장계 조건 5가지(광명단 조합페인트, 염화고무, 수용성 무기징크, 내후성 중방식, 초내후성 중방식)를 조합하여 25가지 조건으로 세분화하면 데이터 편차가 크게 감소할 것으로 예상된다. 또한, 일반적인 주변환경 분류 조건을 객관적 측정 데이터로 대체하는 방법도 생각해 볼 수 있다. 즉, 주관적 판단에 의한 지역 구분이 아닌 강교 주변의 대기 부식도(atmospheric corrosivity)를 실제로 측정하여 구분하는 것이다. 대기 부식도에 따른 환경분류 방법을 규정하고 있는 ISO12944-2에서는 철이나 아연 등의 시편을 대기 중에 1년간 노출시킨 후 측정된 부식감량에 따라 5가지 카테고리(C1~C5)로 분류하는 방법을 소개하고 있다. 향후 교량 주변의 대기 부식도와 도막수명 간의 상관관계에 대한 후속 연구도 필요하다고 생각되며, 대기 부식도 측정 방법이 비교적 간단하므로 실무 적용에도 큰 무리가 없을 것으로 생각된다.

4. 도막수명예측 및 보수도장 관리

4.1 도막의 잔여수명 예측

도막의 잔여수명을 예측하기 위해서는 먼저 기준열화곡선을 정해야 한다. 본 연구에서 사용한 2가지 회귀분석 방법 중 片脇 淸 등(1991)이 사용한 3차 곡선에 의한 방법은 데이터 수가 적을 경우 잘 맞지 않는 경향이 있었는데, 이는 片脇 淸 등(1991)이 사용한 도막열화도 평가 기준과 본 연구에서 사용한 평가 기준(표 2)간에 차이가 있기 때문이라고 생각된다. 반면, 岡本 拓 등(2002)이 사용한 평가 기준은 본 연구에서의 기준과 거의 유사하며, 모든 경우에 무리 없이 사용 가능하였다. 따라서 기준열화곡선은 지수곡선에 따르는 것을 원칙으로 하였으며, 모든 경우에 대략적으로 적용이 가능한 그림 3의 전국 평균 도막열화곡선 중 지수곡선(식 1)을 기준열화곡선으로 정하였다.

그림 8에 기준열화곡선을 현재 시점의 열화도 위치로 x축 및 y축에 대해 각각 평행이동한 곡선을 나타내었다. 그래프에서 '현재시점의 열화도'라고 표시한 점은 도장 후 경과년수가 8년, 열화도 평점이 46점인 경우를 가정한 가상의 점이다. 이 점과 기준열화곡선 간의 그래프 상 x축 방향 실제 거리 2.6만큼 x축에 대해 평행이동한 경우, 도장 후 경과년수가 짧을 때는 기준열화곡선과의 열화도 격차가 작고, 경과년수가 길어질수록 기준열화곡선과의 열화도 격차가 커진다. 반면, 그래프 상 y축 방향 실제 거리 16만큼 y축에 대해 평행이동한 경우, 도장 후 경과년수가 짧을 때 기준열화곡선과의 열화도 격차가 오히려 크고, 경과년수가 길어질수록 기준열화곡선과의 열화도 격차가 작아진다. 실제 도막의 열화 양상은 도막의 도포 초기에는 도막열화도 차이가 거의 없고 도장 후 경과년수가 길어질수록 열화도 차이가 커지는 것이 일반적이다. 따라서 y축에 대해 평행이동한 경우보다는 x축에 대해 평행이동하는 것이 실제 열화 양상과 잘 부합된다고 판단된다. 그림 8에 나타낸 도막의 예에서 잔여수명은 약 2.5년으로 추정할 수 있으며, 향후의 도막열화 경향은 식(3)을 따를 것으로 추정할 수 있다.

$$y = 8.026e^{(x+2.6)/6.008} \tag{3}$$

4.2 수명예측 상・하한식의 도출

고속도로상의 강교 전반에 걸쳐 도막열화곡선에 따라 최적의 시기에 재도장을 실시할 수 있도록 식 (1)로부터 상한식과 하한식을 도출하였다. 수명예측 상한식과 하한식은 식(1)의 지수곡선 일반식으로부터 회귀분석시 도출된 각 계수 A, t, B의 오차값 δA, δt, δB를 가감하여 상한식은 식(4), 하한식은 식(5)와 같이 구하였다. 도출된 수명예측식과 수명예측

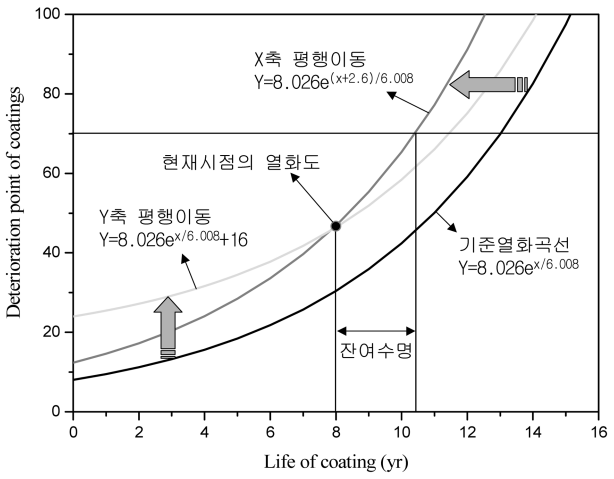


그림 8. 도막열화곡선의 평행이동에 의한 잔여수명 예측

표 3. 회귀분석에 의해 도출된 수명예측 상・하한식

일반식	회귀분석값			하한식	평균식	상한식
	Parameter	Value	Error(d)			
$y = Ae^{\frac{x}{t}} + B$	A	8.02626	1.62596	$y = 6.4e^{\frac{x}{6.706}}$	$y = 8.026e^{\frac{x}{6.008}}$	$y = 9.65e^{\frac{x}{5.31}}$
	t	6.00785	0.69822			
	B	0	0			

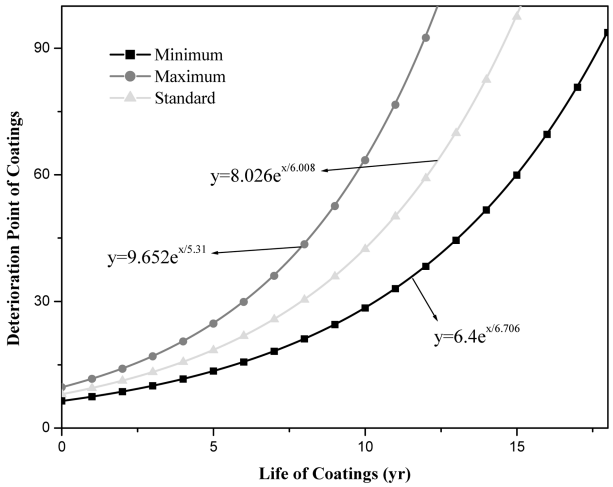


그림 9. 회귀분석에 의해 도출된 수명예측 상・하한곡선

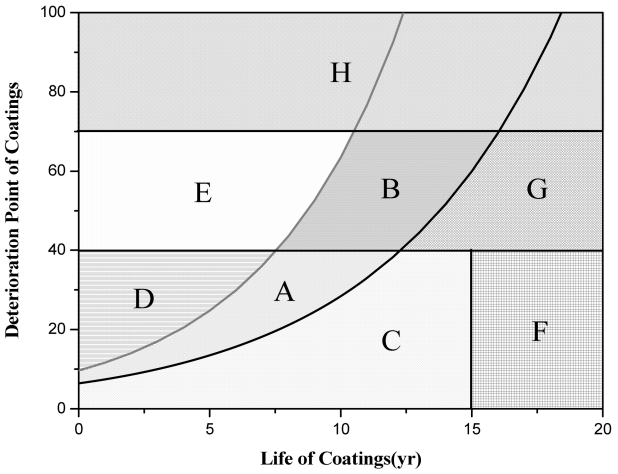


그림 10. 도막의 상태에 따른 영역 구분

표 4. 도막의 상태에 따른 보수도장 판정

영역	보수도장 판정
A	도막의 상태 양호하며, 열화속도는 평균 수준이다.
B	도막의 열화가 상당히 진행되었고 1~2년 내로 보수계획을 수립해야 한다. 열화속도는 평균 수준이다.
C	도장후 경과년수에 비해 도막 상태가 매우 양호하다. 열화속도가 느리다.
D	도막 상태는 양호한 편이나 도장후 경과년수에 비해 열화속도가 빠르다.
E	도막 열화가 상당히 진행되었고 열화속도도 매우 빠른 편이므로 조속히 보수계획을 수립해야 한다.
F	도장후 매우 긴 시간이 흘렀음에도 불구하고 도막 상태가 매우 양호하며, 열화속도가 느리다. 그러나 도장년수가 오래되었으므로 지속적이 관찰이 필요하다.
G	열화속도는 느린 편이지만 도막의 열화가 상당히 진행되었다. 1~2년 내로 보수계획을 수립해야 한다.
H	열화가 매우 심하고 도막의 수명이 다 되었다. 보수가 시급하다.

곡선을 표 3과 그림 9에 각각 나타내었다.

$$y = (A+\delta_A)e^{\frac{x}{t-\delta_t}} + B + \delta_B \quad (4)$$

$$y = (A-\delta_A)e^{\frac{x}{t-\delta_t}} + B - \delta_B \quad (5)$$

4.3 보수도장 관리

회귀분석에 의해 도출된 상·하한곡선을 바탕으로 적정 보수도장 관리를 위하여 그림 10과 같이 도막의 상태에 따라 A~H 8개 부분으로 영역을 구분하였다. 영역 구분 경계는 수명예측 상・하한곡선, 열화도 평점 40 및 70점, 도장 후 경과년수 15년으로 하였다. 각각의 영역에 대하여 도막의 열화 상태 및 열화 속도를 근거로 하여 표 4와 같이 적정 보수시기를 예측할 수 있도록 관리 기준을 수립하였다. 이와 같이 체계적인 기준에 따라 보수도장을 실시한다면 최적의 시기에 보수가 이루어짐에 따라 유지보수 비용을 최소화 하고 전체 구조물의 수명도 연장시키는 효과가 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 실내촉진시험 또는 옥외폭로시험과 같이 인위적 열화에 의한 방법이 아닌 실제 공용환경 하에서 자연적으로 열화된 도막의 외관조사 결과를 바탕으로 통계적 회귀분석을 실시하였으며, 충분한 수의 현장 데이터를 보유할 경우 사용 가능한 통계적 회귀분석에 의한 도막수명 예측 방법 및 적정 보수도장 판정 기준을 제시하였다.

1. 도막수명예측 결과는 조사된 75개 교량 전체에 대해 13.0~13.3년, 수도권의 도시 및 공장지역 11.8년, 수도권 이외의 전원지역 13.2년, 염화고무계 13.5~13.7년, 조합페인트 12.86년으로 나타났다.
2. 도막열화도 조사 결과로부터 회귀분석을 실시하여 기준열화곡선을 구하였고, 도막의 잔여수명 예측을 위해 현재 시점의 열화도 위치로 x축 및 y축에 대하여 각각 평행이동

시켜 보았다. 그 결과 x축에 대해 평행이동하는 것이 실제 열화 양상과 잘 부합된다고 판단되었다.

3. 고속도로상의 강교 전반에 걸쳐 도막열화곡선에 따라 최적의 시기에 재도장을 실시할 수 있도록 기준열화곡선 회귀분석시 도출된 각 계수의 오차값을 가감하여 상한식과 하한식을 구하였다.
4. 도막수명예측 상・하한곡선 바탕으로 강교 도장의 잔여수명과 적정 보수도장 시기를 예측하기 위하여 도막의 상태에 따라 8개 부분으로 영역을 구분하고, 각각의 영역에 대한 보수도장 판정 기준을 제시하였다.
5. 회귀분석의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 주변환경 및 도장계에 따라 조건을 보다 세분화할 필요가 있다고 생각되며, 일반적인 주변환경 분류 조건을 객관적 측정 데이터로 대체하는 것도 좋은 방법이라고 생각된다. 즉, ISO12944-2의 방법과 같이 주관적 판단에 의한 지역 구분이 아닌 강교 주변의 대기 부식도(atmospheric corrosivity)를 실제로 측정하여 구분하는 방법이 유용할 것으로 판단된다. 향후 강교 주변의 대기 부식도와 도막열화도 간의 상관관계에 대한 추가 연구도 필요하다고 생각되며, 이와 같은 방법으로 신뢰도 높은 도막수명예측이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

방극진(1995) **환경오염・유해화물질 편람.** 성안당.

이찬영, 정해문, 김옥선(2002) **환경친화적인 강교용 보수도장에 관한 연구**. 연구보고서, 도교기 ME-02-15, 한국도로공사 도로교통기술원.

전대희(1995) **실용방식공학**. 도서출판 동화기술.

岡本 拓, 羽田野和久, 本村 均(2002) **Paint Viewシステムを用いた鋼橋塗膜の余壽命豫測に關す る 研究**. 日本道路公 試驗研究所報告 Vol. 39, 日本道路公團.

片脇 淸, 守屋 進, 他(1991) **塗膜診斷に關する共同研究報告書**(II). 第59, 日本土木研究所.

Louthan, M. R. (1993) *Corrosion Failures of Austenitic Steel Piping*, WSRC-MS-93-010, U. S. Department of Energy.

Munger, C. G., Vincent L. D. (1999) *Corrosion Protection by Protective Coatings*, NACE International.

(접수일: 2007.10.2/심사일: 2007.11.28/심사완료일: 2008.4.7)