

발전구조물의 환경조건을 반영한 도장계 선정 경제성 평가 모델 개발

김인태* · 이수영** · 안진희*** · 김창학****

Kim, In Tae* · Lee, Su Young** · An, Jin Hee*** · Kim, Chang Hak****

Development of an Economic Evaluation model for Coating System Based on Environmental Conditions of Power Generation Structure

ABSTRACT

Currently, life-cycle cost analysis methods are introduced to maintain large infrastructure facilities in Korea. However, there are not many cases in which maintenance models are applied that reflect conditions such as the location of a facility and its surroundings. In order to establish an appropriate maintenance strategy, a cost prediction, deterioration model, and a decision model reflecting uncertainty should be established. In this study, an economic analysis model was developed for long-term cost planning and management based on user decisions based on maintenance methods and judgment criteria for painting specifications applied to power generation structures. The performance of the paintwork was assessed through the paint deterioration test for the application of the economic analysis model, and the results of the economic analysis according to the applied paint specifications (Urethan, polysiloxane, fluorine) were verified by applying the proposed economic analysis model. In this study, it is believed that the selection of the repair cycle and evaluation methods applied with the development model rather than the performance of the painting can be expected to be used as basic data for the maintenance cycle, even if it is not limited to the painting.

Key words : Life cycle cost, Power generation structure, Painting performance evaluation, Decision making model, Maintenance

초 록

현재 국내의 대형 인프라시설물의 유지관리를 위해 생애주기비용분석 방법을 도입하고 있다. 그러나 시설물의 위치 및 주변환경 등의 조건을 반영한 유지관리 모델을 적용하는 사례가 많지 않다. 적절한 유지관리 전략을 수립하기 위해서는 시설물의 환경조건을 반영한 비용예측, 열화모델, 불확실성을 반영한 의사결정모델이 수립되어야 한다. 본 연구에서는 발전구조물에 적용되는 도장 사양을 대상으로 유지관리 방법과 판단기준에 따라 사용자의 의사결정에 따른 장기적인 비용 계획 및 관리를 할 수 있는 경제성 분석 모델을 개발하였다. 경제성 분석 모델의 적용을 위하여 도장열화실험을 통하여 도장의 성능을 평가하였으며, 제안 경제성 분석 모델에 적용하여 각각의 적용도장 사양(우레탄, 폴리실록산, 불소)에 따른 경제성 분석결과를 확인하였다. 본 연구에서는 도장의 성능보다 보수 주기의 선정과 개발 모델을 적용한 평가 방법을 제시한 결과로 도장에 국한되지 않더라도 유지관리 방안 수립 시 보수 주기 등을 위한 기초적인 자료로 활용을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 생애주기 비용, 발전구조물, 도장성능 평가, 의사결정 모델, 유지관리

* 중신회원 · 부산대학교 토목공학과 교수 (Pusan National University · itkim@pusan.ac.kr)

** 경남과학기술대학교 토목공학과 박사수로 (Gyeongnam National University · wooram762@hanmail.net)

*** 정회원 · 경남과학기술대학교 토목공학과 교수 (Gyeongnam National University · jhahn@gntech.ac.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 경남과학기술대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gyeongnam National University · ch-kim@gntech.ac.kr)

Received November 28, 2019/ revised December 10, 2019/ accepted December 17, 2019

1. 서론

1.1 연구의 배경

현재 국내 화력발전소를 비롯한 발전시설물은 발전시설물의 운영 및 사회적 요구에 따라 대부분 해안에 인접하여 건설되어 운영되고 있다. 해안에 있는 구조물의 경우 구조물 열화환경 조건이 내륙에 있는 구조물보다 가혹하므로 다른 플랜트 구조물과 비교하여 비교적 노후화가 빠르게 발생하고 있다. 따라서 발전플랜트 시설물의 계획과 설계과정에서 성능, 기능, 안전, 비용 및 수명에 영향을 줄 수 있는 고내구성 재료의 적용방안 수립과 유지관리 과정에서 보수 및 교체에 위한 최적 의사결정기준의 적용은 발전구조물의 수명연장 측면에서 매우 중요하다. 시설물의 생애주기 비용(LCC)은 초기공사비 이외에 추가로 발생하게 되는 유지관리의 특성을 반영하여 산정되어야 하나 시설물의 특성과 사용재료의 내구수명을 예측하지 못하여 정확한 생애주기 비용을 예측하는데 어려움을 갖고 있다. 따라서 시설물의 위치, 종류, 재료의 특성에 맞추어 시설물의 수명을 예측하고 재료의 특성을 반영한 최적의 판단기준 즉 의사결정 시스템이 필요하다.

1.2 연구의 범위 및 방법

발전사의 자산관리 도입을 위해서는 시설물의 상태평가, 성능분석, 자산정보관리 및 의사결정 시스템 등이 필요하며, 이러한 의사결정 시스템은 생애주기 비용분석을 토대로 한 경제성 평가 모델이 그 바탕을 이루게 된다. 따라서 본 연구에서는 발전구조물의 내구수명상과 유지관리비에 직접적인 영향을 미치는 초기 도장의 선택 방법, 도장 종류별 수명 그리고 재도장으로 인한 수명 감소 등을 고려하여 환경조건별 도장선택을 위한 경제성평가모델을 구축하고자 한다.

유지관리를 위한 도장수명은 구조물에 적용된 도장 사양과 주변 환경에 따라 크게 차이가 나게 되어 보수를 위한 재도장시기는 부재의 위치, 방향 등 환경조건에 따라 열화정도의 차이로 인해 의사결정을 하는데 어려움을 갖게 된다. 본 연구에서는 도장의 성능분석과 환경조건을 반영하여 도장의 수명을 예측하여 부재에 따라 재도장 주기를 결정하기 위한 모델을 개발한다. 도장의 생애주기비용 분석을 위해 도장계별로 도장 열화 실험을 실시하여 도장의 사용수명을 예측하고 재도장 보수율에 따른 유지관리 시나리오를 설정하여 도장의 성능을 평가하였다.

2. 발전구조물의 생애주기비용 모델 구축

2.1 국내현황

정부에서는 99년 공공공사 건설사업 효율화 종합대책의 일환으

로 500억 원 이상의 대규모 정부 발주공사에 대해서는 설계 VE(Value Engineering)의 수행을 의무화하면서 설계 경제성 검토 등의 기술이 도입되기 시작하였다. 설계 VE 등을 수행하기 위해서는 생애주기비용분석을 의무화하여 검토하도록 규정하고 있으나 LCC 분석에 관한 실무자의 인식과 제도 등의 미흡으로 LCC 분석을 위한 유지관리비용 산정과 DB 구축 등의 국내 기반은 아직도 매우 부족한 실정이다. 또한 구조물 성능에 대한 이론적, 실험적 연구의 증대, 정보통신기술을 이용한 계측 및 모니터링 기법의 발전, 보수보강 기술의 개발 등 LCC 관리를 위한 관련 요소기술들은 계속해서 변화 발전하고 있지만, 요소기술의 통합을 이루어 시설물의 생애주기 관리체계를 구축하기 위한 노력은 최근에서야 적극적으로 검토되고 있다. 이에 대한 국내의 관련 연구 동향을 살펴보면 한국도로공사에서는 교량에 적용되는 도장 공법별로 각 도장의 공법별 초기공사비 산출과 유지보수 비용을 산출하여 LCC분석을 실시하기 위한 모델을 개발하여 적용함으로써 비용 절감효과를 확인하였다(Lee et al., 2015). 한국건설기술연구원에서는 강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 LCC 분석 기법 및 시스템 개발을 하였다(Park et al., 2008). 최근 국내에서는 공법 선정 및 유지관리방법의 대안선정을 위한 LCC 분석이 활발히 이루어지고 있으나 산업플랜트 등의 발전구조물에 대한 LCC 분석을 통한 유지관리 공법 선정을 위한 기준 등은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발전구조물의 도장공법 선정과 최적의 경제성 및 내구성능을 평가하기 위한 LCC 분석 모델을 개발하고 적용하였다.

발전소 도장의 LCC 분석을 통한 최적의 경제성 확보 방안을 도출하기 위해 발전소 시설의 환경조건을 반영한 도장계 선정이 필요하며, 선정된 도장계 종류에 따라 재도장 비용 및 도장의 수명을 산출하는 모델이 필요하다. 구조부재의 하도를 무기징계로 도포한 경우와 금속용사로 도포한 경우, 상도의 마감에 따라 우레탄, 세라믹, 실록산, 불소수지를 하였을 경우 등의 대안을 구분하여 분석할 수 있다. 또한 구조물 설치환경에 따라서 누수가 심하거나 외부의 충격으로 인한 도장의 손상으로 도장의 탈락이 발생하여 부식이 심하게 발생한 경우에 따라 등급을 구분하여 재도장 방법을 달리 적용하여 최적의 경제성을 추구해야 하며, 구조물의 성능 또한 유지할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 발전구조물의 적용 도장계 선정과 도장 수명을 통한 재도장 비용을 산정하였으며, 사용자의 의사에 따라 구조물 성능중심 또는 경제성 중심의 의사결정을 할 수 있도록 다양한 LCC 분석 시나리오를 도출하여 분석하였다.

2.2 생애주기비용 분석 개요

구조물의 LCC 분석 방법으로 확정적 방법과 확률적 방법을 적용할 수 있다. 확정적 방법은 생애주기비용 분석에 있어 생애주기

비용 평가시 불확실성 및 변동성을 고려하지 않는 접근법이며 확률적 방법에 의한 생애주기 비용 산정은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (1)에서 $PVLCC$ 는 현재가치의 총기대비용이며, IC 는 초기비용, $PVOMR$ 는 유지관리비용(OMR)의 현재가치이며 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있으며, PVD 는 처리비용(D)의 현재가치로 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다. Eq. (3)은 초기비용, 유지관리비용, 처리비용을 포함하여 k 년에 발생하는 모든 비용을 할인율(i)과 생애주기비용 평가기간(N)을 고려하여 평가하게 된다.

$$PVLCC = IC + PVOMR + PVD \quad (1)$$

$$= \sum_{k=0}^N \frac{C_k}{(1+i)^k}$$

$$PVOMR = \sum_{k=0}^N \frac{OMR_k}{(1+i)^k} \quad (2)$$

$$PVD = \sum_{k=0}^N \frac{D_k}{(1+i)^k} \quad (3)$$

Eq. (1)은 연구자들에 의하여 일부 변경되어 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. Eq. (4)은 초기 건설비용(C_I), 사용기간 유지관리비용(C_M), 구조물 붕괴 또는 재건설시 발생할 수 있는 직간접 이용을 포함한 파괴비용(C_F)과 재활용에 따른 이익비용(B)로 구성되어 있다. 생애주기의 비용을 평가하는 Eqs. (1) and (2)의 차이는 생애비용평가에 있어 파괴비용을 고려하는지 여부이다. 파괴비용의 경우 이를 평가하기 위해서는 신뢰성 해석의 개념이 고려되어야 한다. 구조물의 최적 설계와 성능개선을 위한 보수보강 수준을 결정하기 위한 의사결정은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 생애주기관점

에서 최소비용을 투입하여 최적의 성능과 성능개선을 얻을 수 있어야 한다.

$$LCC = C_I + C_M + C_F - B \quad (4)$$

확률적 방법에 의한 생애주기 비용 산정은 비용 산정에 고려되는 요인에 대한 불확실성과 변동성을 고려하는 것으로, 확률적 방법은 비용항목의 발생가능성과 비용항목이 발생 가능한 전체범위에서의 비용을 시뮬레이션을 통하여 해석하므로 합리적이며 과학적인 방법일 수 있다. 하지만 다양한 요인에 대한 자료 및 검토가 필요하다.

2.3 사용수명

생애주기 비용 산정을 위해서는 대상 구조물이나 구조물의 구성 요소에 대한 기대사용수명이 제시되어야 한다. 항만 및 어항 설계기준(사)한국항만협회(Korea Ports and Harbors Association, 2010)에 따르면 “내구 연한”이란 시설의 설계에서 구조나 재료를 결정할 때 고려함과 동시에 현재 시설의 개량 필요성 및 개량 정도를 결정하는데 고려하는 경우가 있다. 내구 연한에는 다음의 기능적인 것, 경제적인 것, 사회계획적인 것과 물리적인 것이 있다. 내구 연한의 설정에서는 이들에 대하여 검토를 하고 적절한 결정을 하는 것이 바람직하다. 설계에 있어서 위의 내용으로부터 내구 연한을 결정하는 경우 이에 적합한 구조, 재료를 선정할 필요가 있다고 정의하고 있으나 실제 구조물의 사용수명은 매우 불확실성이 큰 변수일 수 있다. 실제 구조물의 생애주기 기간 동안 발생하게 되는 비용의 분석기간이 구조물의 사용수명기준이 될 수 있을 것이다. 사용수명의 기준은 구조물의 안전과 관련된 구조성능 감소와 관련하여 일반적으로 고려될 수 있을 것이며, 이와 함께 서비스 수준, 기능적 수명에 도달하게 되면 구조물의 구조성능이 유지되더라도 구조물의 해체나 교체가 필요할 수 있다. 따라서 사용수명은 구조물의 구조적 안전과 관련된 구조성능과 함께 기능적 수명 또한 고려하여야 한다.

콘크리트 구조물의 경우 내구성과 내용 연수에 관한 연구가 많이 진행되어 내구성 모델 등이 제안됨에 따라 상대적으로 사용수명을 확인하기 쉬우나 강구조물의 경우 도막 열화와 강제 부식과 관련된 강제 내구성의 경우 열화 모델이나 열화 환경에 대한 정의가 명확하지 못하고 방식재료에 대한 성능 평가도 어렵다. 특히 도장의 경우 다양한 환경에 대하여 다양한 도장재료가 제안되고 적용되고 있으므로 각 도장의 열화 특성과 사용수명을 평가하여야 하며, 수명평가 및 예측에 있어 일정 수준 이하의 성능을 수명으로 정의할 것인가가 제시되어야 할 필요가 있으므로 실제 환경에 적합한 도장의 열화 수명이 적용되어야 할 것이다.

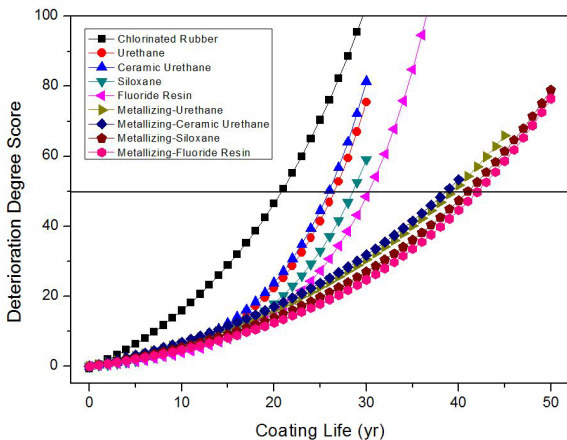


Fig. 1. Service Life of Coating System by General Environment Condition of Korea Expressway Corporation (Lee et al., 2015)

2.4 발전소별 내용연수

전기의 사용을 위해 발전시설은 다양한 방법을 통해 전기를 생산하고 있다. 화력을 이용하여 발전하는 방법, 수력을 이용한 방법, 원자력, 풍력, 태양광과 같은 방법을 이용하고 있다. 각 발전소의 내용연수에 대해 한국감정원에서 공용수명을 제시하고 있는데, 다음 Table 1은 화력발전소의 경우 각각 시설에 대해 평균적으로 15~20년의 내용연수를 가지며, 수력발전소 20년, 원자력발전소 30년, 풍력발전소 15~20년, 태양광발전소 10~15년의 내용연수를 갖는다. 따라서 평균적으로 발전소의 내용연수는 20년으로 평가되고 있다고 볼 수 있다(Korea Appraisal Board, 2013). 다음 Table 2는

Table 1. Durable Years Depending on the Power Plant of Korea Appraisal Board (Korea Appraisal Board, 2013)

Classification code	Types and details of equipment	Durable years	Standard Industrial Classification
23-1	Thermal power station	15~20	35113
23-2	Hydro power station	20	35112
23-3	Nuclear power station	30	35111
23-4	Wind power station	15~20	35119
23-5	Solar thermal power station	10~15	35119

Table 2. Bridge Durable Years of Korea Appraisal Board (Korea Appraisal Board, 2013)

Classification code	Types of equipment	Details	Durable years
3-3-10	Bridge	Steel	40 years

Table 3. Estimated Lifetime of Coating System by Common Environment Conditions of Korea Expressway Corporation (Lee et al., 2015) (unit : year)

Coating system		Public environment		
		Severe	Normal	Mild
General coating (Inorganic zinc)	Chlorinated rubber	10.8	20.8	36.6
	Urethane	13.4	26.6	Semipermanent
	Ceramic urethane	13.7	26.6	Semipermanent
	Poly siloxane	12.9	28.6	Semipermanent
	Fluorine resin	11.4	30.3	Semipermanent
Heavy-Duty coating (Metal spraying)	Urethane	18.2	39.4	Semipermanent
	Ceramic urethane	16.6	38.9	Semipermanent
	Siloxane	22.4	41.1	Semipermanent
	Fluorine resin	24.7	42.2	Semipermanent

한국감정원에서 강교량의 경우 평균적으로 40년의 수명을 가지고 있는 것에 비해 발전소 구조물의 내용 연수가 상대적으로 짧은 것으로 나타난다(Korea Appraisal Board, 2013). 따라서 발전구조물의 유지관리가 강교량의 유지관리보다 더욱 활발한 유지관리가 필요하며 경제성과 안정성을 고려한 효율적인 유지관리체계가 필요하다.

3. 도장의 수명주기 판단 모델

3.1 도장 수명주기

최근의 강교 및 발전소 등의 산업구조물에서 사용하는 도장계는 일반적으로 중방식 도장 및 초내후성 중방식 도장을 사용하고 있으며, 중방식 도장으로는 염화고무계, 내후성 중방식 도장으로 우레탄계, 초내후성 중방식 도장은 불소수지계를 사용하고 있다. 최근에는 우레탄계도료를 가장 많이 사용하고 있으나 현재의 환경 및 도장상태에 따라서 최적의 경제적인 도료선정 및 재도장주기산정이 필요하다. 다음 Table 3은 한국도로공사의 공용 환경조건에 따른 도장사양의 예측수명을 나타내었다. 설치환경에 따라 같은 도장사양이라고 할지라도 수명이 달리 평가되는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 환경조건을 고려하여 적절한 도장계 선정 등의 의사결정 과정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한 Table 4의 일본사례의 경우 국내 사례보다 더욱 장기적으로 도장성능이 평가되고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 도장 수명주기 평가시행

도장 수명주기를 평가하기 위하여 실내부식실험을 통한 노화 면적을 측정하였다. 도장의 실제 노화 속도를 평가는 장기간의 노출 기간을 요구하므로 도막 표면에 인위적인 손상을 적용하여 시간 경과에 따른 손상 면적을 측정하였다. 또한, 무도장 모니터링

Table 4. Predictive Life of Coating System in Japan (Japan Bridge Association, 2006)

Coating system		C2	C4	Proposal specification for LCC of Highway Corporation in Japan
		(Blast cleaning)	(Blast cleaning)	(Blast cleaning)
Coating process		Inorganic zinc rich shop primer 15 μm (Not applied to new construction)	Inorganic zinc rich shop primer 15 μm (Not applied to new construction)	Inorganic zinc rich shop primer 15 μm (Not applied to new construction)
		Inorganic zinc rich varnish 75 μm	Inorganic zinc rich varnish 75 μm	Inorganic zinc rich varnish 75 μm
		Mistcoat	Mistcoat	Mistcoat
		Epoxy resin varnish 60 μm	Epoxy resin varnish 60 μm	Thick-film Epoxy resin varnish 125 μm
		Epoxy resin varnish 60 μm	Epoxy resin varnish 60 μm	Fluorine resin varnish 25 μm
		Poly urethane resin varnish 30 μm	Fluorine resin varnish 30 μm	Fluorine resin varnish 25 μm
		Poly urethane resin varnish 30 μm	Fluorine resin varnish 25 μm	-
Severe corrosion environment	Landscape durable years	12 year	45 year	85 year
	Anti-corrosion durable years	40 year	70 year	110 year

강판을 1년간의 옥외노출 실험을 통한 부식속도와 실내실험을 통한 부식속도의 상관관계를 이용하여 촉진 배율을 계산하여 도장 수명을 평가하였다. 실내 부식실험은 혹독한 부식 환경하에서 도장계 내후성능 평가에 사용되는 ISO 20340 (ISO 20340-09, 2009)을 사용하였다. 혹독한 대기 부식환경을 모사한 ISO 20340 부식촉진 실험은 3일간의 자외선 노출/결로, 3일간의 염수 분무, 1일간의 저온 노출의 총 7일 1 Cycle로 구성되어 있으며, 자외선 노출/결로는 ISO 11507 (ISO 11507-07, 2007)의 조건에 따라 60 ± 3 °C, 방사 조도 0.71 W/m²에서 4시간 자외선 노출과 50 ± 3 °C에서 4시간의 결로의 반복으로 총 72시간 실시하였다. 또한, 염수 분무는 ISO 9227 (ISO 9227-17, 2006)의 조건에 따라 5 % 염도의 35 ± 2 °C 염수를 총 72시간 분무하였으며, 저온 노출은 -20 ± 2 °C에서 24시간 노출하였다(Jeong et al., 2019). 해당 실험에 적용한 도장 사양은 화력발전소용 도장계와 풍력발전소용 도장계를 사용하였으며, 각각의 도장계는 화력발전소의 경우 하도 징크 75 μm, 중도 에폭시 100 μm, 상도 우레탄계 50 μm로 건조도막두께가 225 μm이며 풍력발전소의 경우 하도 에폭시징크계 60 μm, 중도 에폭시계 180 μm, 상도 우레탄계 50 μm로 건조도막두께를 290 μm로 적용하였다.

3.3 도장 수명주기 평가모형개발

도장계에 따른 사용수명을 평가하기 위하여 도막 표면에 인위손상을 도입하여 도장에 초기 결함이 발생한 것으로 모사하였다. 인위 손상을 도입한 초기 결함은 0.5 mm, 1 mm, 3 mm, 5 mm의 원형 결함을 적용하였다. 인위 손상을 도입한 실험체는 실내 부식실험의 진행에 따라 전자현미경을 이용하여 원형 결함을 이미지

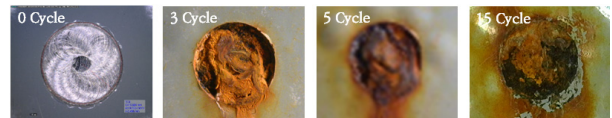
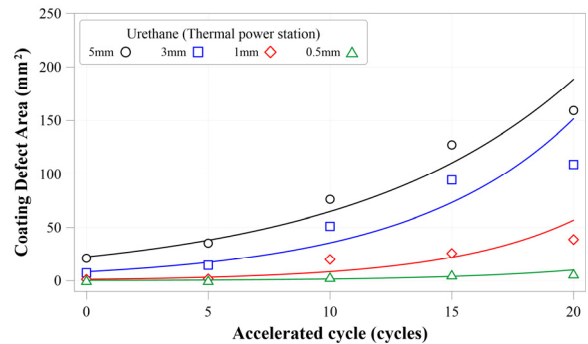
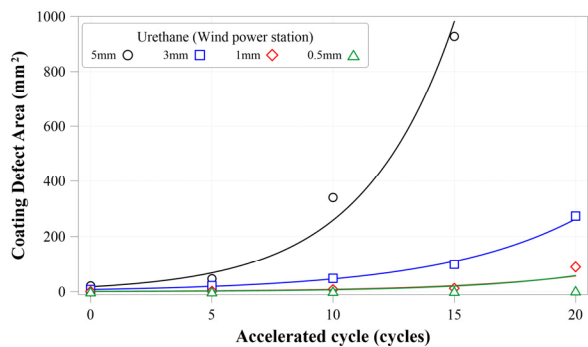


Fig. 2. Corrosion Process of Artificial Damaged Surface



(a) Urethane (Thermal Power Station)



(b) Urethane (Wind Power Station)

Fig. 3. Corrosion Accelerated Test Results

프로세싱을 통하여 부식의 진전도를 확인하고 도막하 부식 발생 면적을 측정하였다. Fig. 2는 전자현미경을 이용하여 촬영한 화력발전소용 도장계의 5 mm 원형 결함의 부식 진전도를 나타내었다.

부식촉진실험을 통하여 측정된 부식면적을 통하여 화력발전소용 도장계와 풍력발전소용 도장계의 도막 손상 면적을 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 5 mm 인위손상을 도입한 위치에서 5 cycle 경과 후 초기 결함보다 약 1.8~2.4배, 10 cycle 경과 후 약 3배, 15 cycle 경과 후 약 6배 증가하는 것을 확인하였다. 초기결함의 크기 및 녹 발생면적에 따라 부식속도는 다르게 나타났으며, 일정시간 경과 이후 결함의 크기 및 녹

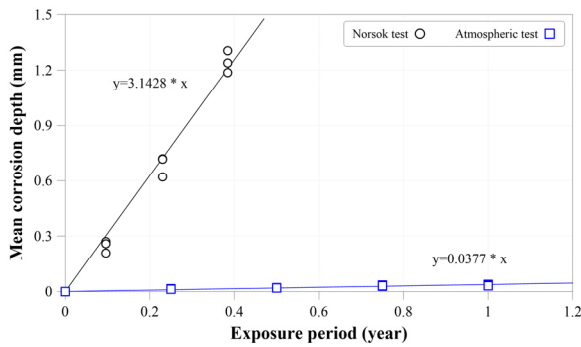
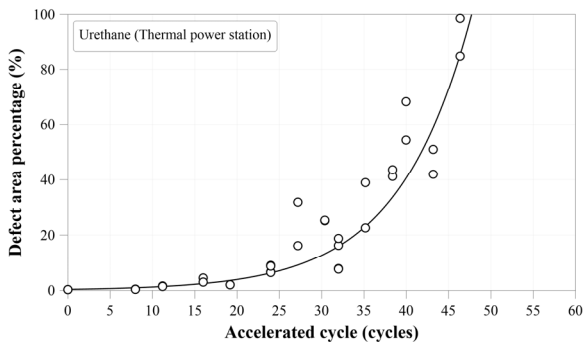
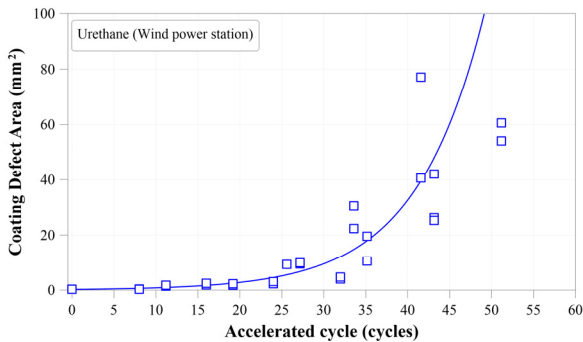


Fig. 4. Corrosion Accelerated Scale Calculation Result



(a) Urethane (Thermal Power Station)



(b) Urethane (Wind Power Station)

Fig. 5. Corrosion Accelerated Test Results

발생면적이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

앞서 평가한 실내 부식촉진실험 결과를 이용하여 발전소가 건설된 위치의 부식환경에 대한 실제 시간으로 환산하기 위하여 무도장 실험체의 부식실험을 통하여 Fig. 4와 같이 실내 부식촉진실험결과와 발전소에 설치한 대기 부식실험을 위한 무도장 실험체의 평균 부식 깊이의 상관관계를 통하여 촉진 배율을 계산하고 실내 부식실험결과에 적용하여 사용수명을 평가하였다.

각각의 초기결함으로부터 측정된 모든 도막노화면적이 그 이상의 결함 크기 면적에 도달하게 되며, 결함의 초기면적으로부터 도막노화면적이 점차 증가하는 과정으로 재구성 될 수 있다. 도장의 사용수명 평가는 앞서 계산한 촉진 배율의 적용과 인위 손상부의 초기 결함 면적을 이용하여 기준 면적을 산출하고, 열화 면적과 기준 면적간의 상관관계를 백분율로 나타내어 각각의 부식 면적률에 따른 사용수명을 평가하였다. 사용수명 평가 결과 Fig. 5와 같이 화력발전소용 도장계의 경우 3 % 열화되었을 때 약 18년, 5 % 열화되었을 때 약 22년, 풍력발전소용 도장계의 경우 3 % 열화 되었을 때 약 21년, 5 % 열화되었을 때 약 25년으로 평가되었다. 현장보수용 도장계 사용수명의 경우 도막하 부식 또는 백이화 등의 장기간의 도장열화에 따라 발생하는 도장의 상태를 모사하기 어려우므로 초기 적용한 도장 수명의 20 % 수준으로 가정하였으며, 각각의 사용수명 평가 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다.

본 연구 결과를 반영한 도장의 생애주기 분석은 도장의 열화 수준 3 %와 5 %를 가정하여 보수 주기를 어떻게 판단할 것인지에 따라 도장의 수명, 유지보수와 재도장 주기가 달리 평가될 것이다. 재도장의 주기가 달라지는 것은 경제성과 직접적으로 연관성을 띠고 있으므로 사용자의 판단이 매우 중요한 요인으로 작용하게 될 것으로 판단된다.

4. 도장사양에 따른 LCC 모형 시나리오

구조물에 적용된 도장사양과 주변 환경에 따라 도장수명은 다르

Table 5. Coating Life Results by Deterioration Test (unit : year)

Coating system	Coating life	
	Deterioration 3 %	Deterioration 5 %
Urethane (Thermal power staion)	18	22
Urethane (Wind power staion)	21	25
Repair urethane (Thermal power staion)	3.6 (4)	4.4 (4)
Repair urethane (Wind power staion)	4.2 (4)	5

게 평가되며, 실제 재도장을 할 때 일부 부재에 대해선 열악한 환경으로 평가되어 도장의 기능을 상실한 부재가 있을 수 있다. 이에 대한 대책은 다양한 방법으로 접근할 수 있으며, 다양한 분석으로 유지관리비용 절감이나 구조물의 수명증가를 목표할 수 있다. 본 연구에서는 도장의 성능에 따라 재도장 주기를 제시하며, 제시된 재도장 주기에 따른 경제적 효율성을 분석하고자 한다. 따라서 다음 Fig. 6에 나타난 3가지 시나리오를 통해서 LCC 분석을 실시한다. 본 시나리오는 발전소의 통상적인 유지관리기준을 반영하여 유지관리를 위한 시나리오를 3가지로 구성하였다. 시나리오 분석에 필요한 비용은 견적자료와 기존 유지관리비용을 토대로 분석하였으며, 적용 할인율은 한국은행 기준금리 20년 평균하여 3.4 %를 적용하였다. Fig. 6(a)에 나타난 Case 1의 경우 도장 수명의 1/2

수준에서 부분 재도장을 실시하여 유지관리를 실시하는 시나리오를 나타내었다. 도장 수명의 1/2수준으로 부분재도장을 하더라도 성능의 감소가 이루어지는 것을 반영하기 위해 부분 재도장시 초기상태와 동일할 수 없는 것을 반영하여 10 %의 성능감소를 적용하였으며, 도장성능이 50 % 수준으로 하락하였을 경우 전면 재도장을 통하여 도장의 성능을 증가시키는 방법을 나타내었다. Fig. 6(b)에 나타난 Case 2의 경우 초기안전진단 후 전면 재도장을 통해 도장의 성능을 증가시킨 후 Case 1과 동일한 방법으로 도장수명의 1/2수준에서 부분 재도장이 이루어졌을 경우의 LCC 분석을 나타내었다. 부분재도장의 경우에 Case 1과 동일하게 부분재도장 이후 10 %의 성능감소를 고려하였다. Fig. 6(c)의 경우 Case 2와 동일하게 초기안전진단 후 전면 재도장을 실시하여 도장의 성능을 증가시켰으며, 부분 재도장의 주기를 도장수명과 관계없이 발전소 토건시설물 안전점검 주기를 기준으로 부분 재도장을 실시하여 유지관리를 실시하는 시나리오를 나타내었다.

4.1 도장사양에 따른 LCC 분석 결과

공용중 구조물에 적용된 도장계의 경우 설치환경에 따라 동일한 도장 사양이라도 수명이 다르게 평가되었으며, 환경조건을 고려하여 도장계 선정 등의 의사결정으로부터 다양한 보수 주기 설정에 따라 유지관리비용의 절감 또는 구조물의 부식에 의한 내구수명의 증가를 목표할 수 있다. Table 6은 Fig. 6에서 나타난 보수 주기 시나리오에 Table 5의 도장열화실험에 따른 도장 수명 결과를 적용하여 도장 사양에 따른 LCC 분석 결과를 나타내었다.

LCC 분석에서 도장이 적용된 구조물의 공용기간을 60년으로 설정하고 도장 비용에 따라 초기 건설비용, 유지관리비용, 해체 및 폐기비용으로 나타내었다. LCC 분석을 위하여 적용된 도장 비용은 시간에 따라 할인율을 적용하여 평가하였다.

적용 시나리오에 따른 경제성 분석 결과 Fig. 7과 같이 시나리오 Case 1의 경우 화력발전소용 도장계는 열화 면적이 5 %, 풍력발전소용 도장계는 3 %일 경우 경제성이 우수한 것으로 나타나며, 시나리오 Case 2의 경우 화력발전소용 도장계를 적용하고 열화 면적이 3 %일 경우 경제성이 우수한 것으로 나타났다. 시나리오 Case 3에서는 화력발전소용 도장계를 적용하며 열화 면적이 3 %일 때 경제성이 우수한 것으로 평가되었다. 또한, 각각의 도장 사양에 따른 비목별 비용을 비교한 결과는 초기 건설비용은 유사하게 나타나지만, 유지관리비용에서 Case 1의 시나리오를 적용하는 경우 유지관리 비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 도장 LCC 분석 결과 Case 1의 시나리오를 적용하며, 열화 수준을 5 %로 적용한 화력발전소용 도장 사양과 열화 수준을 3 %로 적용한 풍력발전소용 도장 사양이 상대적으로 경제성이 우수한 것을 나타내었다.

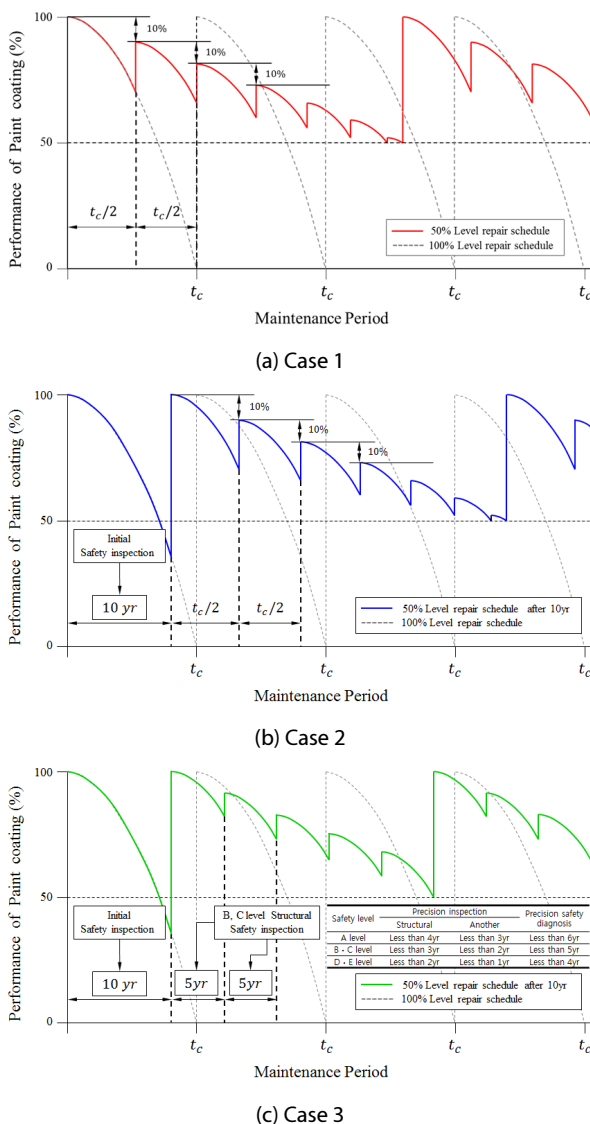


Fig. 6. Scenario by Coating Maintenance Period

Table 6. LCC Analysis Results by Scenario

(unit : won/m²)

Scenario	Initial coating system	Deterioration area (%)	60 Year Base Costs			
			Construction	Maintenance	Decommissioning	LCC
Case 1	Urethane (Thermal power staion)	3	28,235	25,445	9,042	62,721
		5	28,235	26,520	7,003	61,758
	Urethane (Wind power staion)	3	29,582	23,106	9,071	61,758
		5	29,582	26,120	6,439	62,141
Case 2	Urethane (Thermal power staion)	3	28,235	30,058	6,419	64,711
		5	28,235	34,571	5,191	67,997
	Urethane (Wind power staion)	3	29,582	30,222	6,483	66,288
		5	29,582	35,049	4,948	69,580
Case 3	Urethane (Thermal power staion)	3	28,235	29,657	4,284	62,175
		5	28,235	34,523	4,380	67,138
	Urethane (Wind power staion)	3	29,582	29,823	4,108	63,513
		5	29,582	35,024	4,169	68,775

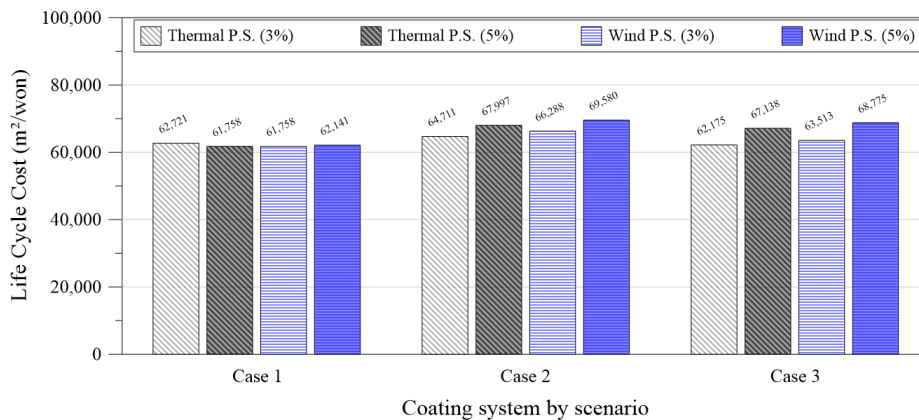


Fig. 7. LCC Analysis Results by Scenario Depending on the Coating System and Deterioration Area

5. 결론

현재 국내 화력발전소를 비롯한 발전시설물은 발전시설물의 운영 및 사회적 요구에 따라 대부분 해안에 인접하여 건설되어 운영되고 있다. 해안에 있는 구조물의 경우 구조물 열화 환경조건이 내륙에 있는 구조물보다 가혹하므로 다른 플랜트 구조물과 비교하여 비교적 노후화가 빠르게 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 발전구조물 도장의 성능에 따라 재도장 주기를 제시하고 제시된 재도장 주기에 따른 경제적 효율성을 분석하였다. 도장의 LCC 분석을 위하여 도장계별 도장 열화실험을 실시하여 도장의 사용수명을 예측하기 위한 식을 개발하고 이를 기반으로 사용자의 의사결정으로부터 도장계, 도장성능에 따른 열화 면적을 고려한 보수 주기 설정에 따른 내구수명을 평가할 수 있는 경제성분석모델을 개발하였다.

본 연구에서 시행한 도장 열화 실험 결과, 열화 면적이 3%일 때, 화력발전소용 도장계는 18년, 풍력발전소용 도장계는 21년으로 평가되었다. 또한, 열화 면적이 5%일 때, 화력발전소용 도장계는 22년, 풍력발전소용 도장계는 25년으로 평가되었다. 도장의 성능 평가 결과로부터 보수 주기 시나리오에 따라 LCC 분석결과 Case 1을 적용하며, 열화 면적을 5% 기준으로 보수 주기를 결정하고 풍력발전소용 도장계를 적용하였을 경우 상대적으로 가장 경제적인 임을 확인하였다.

본 연구에서 적용한 도장성능은 제한된 환경에서 평가한 결과로 지역 조건에 따라 평가 결과가 다를 수 있으며, 도장의 비용 또한 다르게 평가될 수 있다. 본 연구에서는 도장의 성능과 비용보다 보수 주기선정을 위한 개발 모델의 평가 방법을 제시하고 있으며 향후 다양한 조건에서의 개발 모델의 적용으로 개발 모델의 검증 및 적용성을 평가할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 경남과학기술대학교 기성회 연구지원(2018)결과의 일부임.

References

- ISO 11507-07 (2007). *Paints and varnishes - Exposure of coatings to artificial weathering - Exposure to fluorescent UV lamps and water*, International Organization for Standardization.
- ISO 20340-09 (2009). *Paints and varnishes - Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures*, International Organization for Standardization.
- ISO 9227-17 (2006). *Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests*, International Organization for Standardization.
- Japan Bridge Association (2006). *Painting guidebook for bridge engineers*, Japan Bridge Association, Tokyo, p. 67.
- Jeong, Y. S., Kim, M. J., Jeon, S. H., Ahn, J. H. and Kim, I. T. (2019). "Suggestion of deterioration curve for new-type coating on atmospheric environment by acceleration corrosion test." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 2, pp. 75-83 (in Korean).
- Korea Appraisal Board (2013). *Tangible fixed assets useful life table* (in Korean).
- Korea Ports and Harbors Association (2010). *Harbors and fishery ports design standard* (in Korean).
- Lee, C. Y., Cheong, H. M. and Chang, T. S. (2015). *A study on application of high performance coatings for service life extension of steel bridge coatings*, 2015-46-534.9607, Research Report, Korea Expressway Corporation Research Institute (in Korean).
- Park, K. H., Hwang, Y. G., Song, J. J., Park, K. T., Lee, S. Y., Seon, J. W., Choi, Y. M., Min, D. H., Park, C. W. and Im, J. K. (2008). *Development of asset management framework for increasing performance and service-efficiency of bridge*, Research Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).