



&lt;연구논문&gt;

ISSN 1225-8024(Print)  
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지  
J. Korean Inst. Surf. Eng.  
Vol. 49, No. 5, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.5.408>

## 해상구조물의 방식설계 최적화를 위한 설계요건 분석 및 시간의존적 방식성능 해석

박재철\*, 최유열, 편강일, 천강우, 장화섭, 노길태

(사)한국선급

### Design Requirements Review and Time-dependant CP Performance Analysis for Corrosion Protection Design Optimization of Offshore Structure

Jae-Cheul Park\*, Yoo-Youl Choi, Kang-Il Pyeon, Kang-Woo Chun,  
Hwa-Sup Jang, Gill-Tae Roh

Korean Register, 36, Myeongji ocean city 9-ro, Gangseo-gu, Busan 46762, Korea

(Received August 29, 2016 ; revised September 6, 2016 ; accepted September 7, 2016)

#### Abstract

The offshore structures exposed to harsh corrosive such as the marine environment is essential for the quality management technique throughout the life cycle of initial design, construction and operation. Also, it should satisfy the design life and ensure the safety of the substructure with optimization of design process. This study focused on optimization of design condition for corrosion protection of wind turbine structure and computational analyzing was performed to evaluate the performance of corrosion protection with utilizing practical experimental data. We expect this analytical study contribute to improve the corrosion maintenance stability and economical efficiency of designing wind turbine structures. As a result, the design of cathodic protection system using sacrificial anodes required accurate identification of current density in order to meet the long term design life, which can be seen that a change of structure surface's coating breakdown factor is one of the key influencing factors.

*Keywords* : Offshore structure, Corrosion protection, Coating breakdown factor, Cathodic protection design, CP performance analysis

## 1. 서 론

지난 수년간 조선해양산업의 활성화로 인해 9,000기 이상의 해상구조물이 설치되어있으며 최근에는 이러한 구조물의 급진적 노후화에 따른 문제를 대처하기 위한 기술적인 방안이 요구되고 있다. 해상구조물의 노후화는 막대한 유지보수 및 개조 비용을 발생하며 운용안전성과 기술적 신뢰성을 확보하기 위한 지속적인 투자가 이뤄질 것으로 예상된다[1-3].

특히, 해양환경과 같은 가혹한 부식환경에 노출되는 해양구조물은 초기 설계, 건조 단계에서 운영단계까지의 생애주기 전반의 품질관리 기술이 필수적이며 초기 설계공정의 기술수준을 최적화하여 구조물의 안전성을 확보하고 설계수명을 만족시켜야 한다.

본 연구에서는 장기수명을 요구하는 해양플랜트 산업의 전반에 필요한 핵심기술인 부식방지 설계에 대하여 부식손상 억제 및 설계공정을 기술적으로 보완하고자 해상풍력 지지구조물을 대상으로 최적화된 방식설비 설계조건을 규명하고 실증적 실험을 통해 얻은 데이터 기반의 해석적 성능검증을 수행하였다. 이처럼 방식설비의 최적화 설계기술 개발의 목적은 해상구조물의 신뢰성을 확보하여 과도한

\*Corresponding Author : Jae-Cheul Park

Machinery technology research team, Korean register  
Tel : +82-70-8799-8758 ; Fax : +82-70-8799-8774  
E-mail : jchpark@krs.co.kr

설계, 제작 및 유지보수에 따른 지나친 비용투자를 방지하기 위함이다. 국외 선진 기술과 대비하여 국가적인 경쟁력을 확보하기 위해서는 해상구조물의 방식시스템 설계 기술에 대한 국내의 관련 국제기준 및 국외선급 가이드라인에 대한 종합적인 분석과 장기 수명안정성 검토를 위한 해석적 성능평가가 필수적이다. 이와 같이 조선해양산업과 관련한 요소기술에 대한 수준 높은 기술력의 확보는 향후 조선해양산업의 활성화에 대비하여 기술적 역량을 강화하기 위한 측면에서 대단히 중요하다고 판단된다.

## 2. 설계조건 및 경계요소 결정

### 2.1. 국제요구조건 분석

본 연구에서는 해상구조물의 방식설계와 관련한 국제기준, 코드 및 선급 가이드라인 등을 대상으로 하여 방식설계평가에 있어서 세부적인 요구조건을 분석하였으며 이들이 제시하는 최소요구조건이 실제 환경에서 적절한지 검토 하였다. 이를 통해 해상구조물에 적용되는 방식시스템이 요구성능을 충족할 수 있는지에 대한 예측 및 성능평가 해석을 위한 경계조건의 설정이 가능하다. 다수의 설계기준을 바탕으로 도출된 핵심 검토항목은 해양환경 평가와 소재의 선정, 보호도장의 설계, 음극방식 설계, 검사 및 유지보수로 대부분이었으며 이에 대한 검토결과는 방식설계 요구조건을 결정하기 위한 매개변수로 작용한다. 그러나 각 기준별 제시하는 설계조건은 대부분이 유사하나, 각 해양환경 조건에 따른 부식영향성은 대단히 큰 차이를 나타내므로 실제 대상해역에 대한 해양환경의 물리적 특성을 반드시 고려하여야 한다.

### 2.2. 설계조건 변수에 따른 성능해석

본 연구에서는 해상풍력 지지구조물의 형상을 고려하여 해양환경 하에서의 방식시스템 설계조건을 반영한 성능해석을 경계요소(BEM) 해석기법인 영국 BEASY 社의 BEASY GID & CP analysis software 를 통해 수행하였다. 방식성능 해석에 앞서, 시스템 설계요소에 대한 모델링 및 경계조건을 산정하였으며 각각의 설계조건은 기준분석 결과에 따라 선정된 설계수식과 경험적 수치를 적용하여 다음과 같이 도출하였다.

#### 2.2.1. 지지구조물 모델 및 보호도장 손상율

해상풍력 지지구조물은 자켓(Jacket) 형상의 실제 구조물과 동일하게 모델링 하였으며 구조물의 주 pile 및 bracing 표면을 대상으로 희생양극을 설치

Table 1. Parameters of coating breakdown factor per year (after 15year)

Operation years	Case 1 (1.2% $f_c$ /y)	Case 2 (2.4% $f_c$ /y)
after 18 years	23.6	27.2
after 21 years	27.2	34.4
after 24 years	30.8	41.6
after 27 years	34.4	48.8
after 30 years	38	56

\*The initial  $f_c$  is 2%.

\* $f_c$  rate is applied to the same as 1.2%/y up to 15years.

하여 방식시스템의 성능해석 모델을 완성하였다. 대상 구조물의 표면적은 수심을 고려하여 총 1275.2m<sup>2</sup>이며 본 연구에서는 보호도장의 초기 손상율은 2%로 가정하고 운용기간에 따른 방식성능을 평가하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같이 연간 도장손상율을 경계조건에 대입하였다. 일반적으로 도장의 손상경향은 초기에는 변화가 거의 없으나 일정기간 이후로 급격하게 상승하는 경향을 가지는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서 적용된 도장손상율은 DNV RP B401에서 제시된 바와 같이 운용수명 15년까지는 1.2% $f_c$ 로 동일하도록 가정하였으며 이후 연간 1.2%와 그 두 배의 2.4%의 증가율을 적용하였다[4]. 본 연구에서는 ISO 12944-5의 도장설계 내구성 범위(high : 15년 이상)에 따라 보호도장 손상증대 시점을 15년 이후로 설정하였다[5].

#### 2.2.2. 희생양극 상세설계

(1) 희생양극의 설계조건인 중량, 수량, 형상 및 저항 등을 결정하기 위하여 환경조건 변수인 해수 비저항은 서남해 평균수온을 고려하여 30  $\Omega$ -cm로 선정하였다.

(2) 방식성능 해석에 사용된 희생양극 모델은 Long slender stand off 형상으로 해양구조물에 사용되는 대표적인 양극이며, 이를 통해 양극성능조건인 양극저항(Anode resistance,  $R_a$ )을 NACE RP 0176에 제시된 다음의 식(1)을 통해 산출하였다[6].

(3) 본 연구에서 적용된 희생양극은 실제 해양구조물에 사용되고 있는 알루미늄 양극이며 기대수명을 20년과 30년으로 구분하여 총 2가지 모델을 적용하였다. 양극성능을 선정하기 위하여 앞서 도출된 양극저항을  $\Delta E_{c-a} = IR$  식을 통해 출력전류(A)를 계산하였으며 해양환경에서의 비저항 변동률을 고려하여 결정하였다. 뿐만 아니라, 구조물 전체의 방식조건을 만족하기 위한 요구전류는 구조물의 표면적, 도장손상율 및 안전율을 고려하여 결정하였다. 희생양극의 중량조건은 다음의 식 (2)에 따라

Table 2. Detailed design conditions of sacrificial Al alloy anode (Type 1 & 2).

	Design conditions	Type 1	Type 2
Common	Current density	220 mA/m <sup>2</sup>	
	Resistivity	30 ohm-cm	
	Anode utilization factor	0.9	
	Safety factor	1.3	
	Capacity of anode alloy	2,600 A·h/kg	
	E <sub>a</sub> (open circuit potential)	-1,100 mV <sub>SSCE</sub>	
	E <sub>c</sub> (protective potential)	-800 mV <sub>SSCE</sub>	
	Seawater temperature	25°C	
Difference	Design life of anode	20 years	30 years
	Current requirement	51.06 A	72.95 A
	Weight requirement	3,823 kg	8,192.9 kg
	Anode resistance	0.101 ohm	0.061 ohm
	Anode current output	2.96 A	4.91 A
	Number of anode required	34 ea	28 ea

총 중량을 산출하였으며 그 외 희생양극의 상세 설계조건은 표 2에 나타낸 바와 같다.

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{\gamma}\right) - 1 \right] \tag{1}$$

- \*L = length of anode
- \*γ = radius of anode
- \*ρ = seawater resistivity

$$M = i_m \times t_{dl} \times \frac{8760}{\mu \times \varepsilon} \tag{2}$$

- \*M = anode total mass
- \*i<sub>m</sub> = required current density [mA/m<sup>2</sup>]
- \*t<sub>dl</sub> = design life of structure (or anode)
- \*μ = Utility factor
- \*ε = Capacity

2.2.3. 경계조건 확보를 위한 실측 및 모사시험

(1) 본 연구에서는 해상풍력 구조물의 부식손상거동 해석을 통해 방식시스템의 시간의존적 성능변화를 검토하였다. 이는 해상구조물에 적용되는 방식시스템의 최적설계를 위한 것으로 설치해역에 대한 환경조건 및 연간 도장손상을 등의 시간에 따라 변화하는 경계조건을 대입하여 SACP 시스템에 대한 방식성능을 해석적으로 평가하였다.

(2) 해양환경의 대표적인 부식인자인 유속과 온도를 고려한 경계조건을 확보하기 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 실제 서남해 기상탑(해모수 1호기)에서의 실측시험과 Lab의 모사환경에서의 분극곡선을

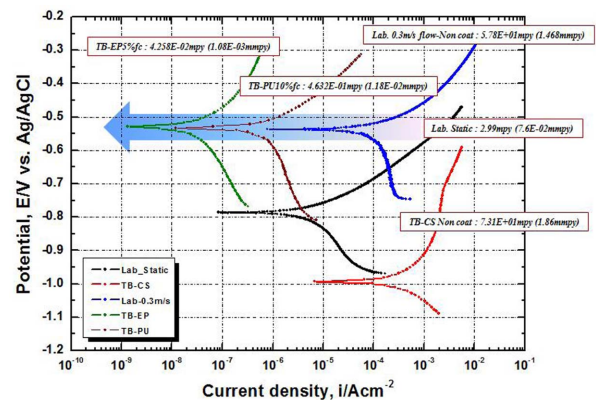


Fig. 1. Comparison of Tafel trends for offshore site and Lab. test results (TB : test bed, CS : carbon steel, EP : epoxy coat, PU : polyurethane coat).

취득하였다. 구조물의 대상재료는 총 3가지로 보호도장을 적용하지 않은 탄소강 및 Epoxy coating, polyurethane coating이며 환경조건을 고려한 실측시험과 모사시험으로 구분되며 각 보호도장 사양을 표 3에 제시하였다. 실측 및 모사시험을 바탕으로 구조물 소재의 분극특성에 대한 경계조건을 확보하였으며 본 연구에서 다루어질 성능해석은 전체 실험결과에서 가장 신뢰할 수 있고 우수한 부식저항성을 나타낸 실측 에폭시계 보호도장(TB-epoxy 5%f.)을 적용하였다. 이와 같이 Pre-processing 단계에서는 사전 설계항목에 대한 모델링을 완료하고 해석 시 필요한 환경조건, 구조물 형상, 강제 및 보호도장의 분극특성 등을 경계조건으로 산정하였으며 각각의 설계조건은 기준분석 및 체크리스트 분석결과에 따라 선정된 설계수식 및 경험적 수치를 적용하였다.

Table 3. Specification of protective coating system

Subsequent coat		Generic type	NDFT [ $\mu\text{m}$ ]
Epoxy coating	1	Zinc rich epoxy	80
	2	epoxy	200
	3	epoxy	200
Polyurethane coating	1	Zinc rich epoxy	80
	2	epoxy	300
	3	epoxy	300
	4	polyurethane	70

### 3. 설계 및 성능평가

#### 3.1. 설계기준 분석 및 검토

다음은 방식설계 조건의 상세검토를 위해 설계 주요항목을 분류하였으며 세목별 중점적인 항목에 대한 각 기준들의 비교·검토를 수행하였다. 핵심 검토항목은 환경 및 재료설계, 보호도장 설계, 전기방식 설계이며 각 항목에 대하여 국제기준 및 코드에서 제시하는 개략적인 내용은 다음과 같다.

가) 환경인자 분석 : 해양환경의 주요 부식인자는 구조물 표면의 건습반복, 젖음시간, 염화물의 전착, 적외선, 온도변화, 바람, 미립자 또는 파도 등이며 이에 따른 소지금속 표면의 부식물의 생성, 거칠기 변화로 구조물의 내구성 저하가 발생할 수 있다[7]. 특히 해양환경 하에서 반드시 고려되어야 하는 환경인자는 유속과 온도인데 대부분의 해양부식인자는 온도와 밀접한 관계를 가지므로 전기전도도, 용존산소량 등의 음극방식을 위한 농도분극과 활성화분극에 영향을 미치는 인자를 제어하여야 한다. 뿐만 아니라 유속에 따른 녹의 탈리, 산소공급, 캐비테이션 발생 등은 소지금속 표면에 형성되는 농도분극 현상을 급격하게 제거함으로써 요구전류밀도를 증대할 수 있다[6]. 이와 같이 방식설계에 직접적인 영향을 미치는 환경인자는 대부분 해당 해역의 기후와 수심에 근거하며 대상구조물의 설계수명을 만족하기 위해서는 대상해역의 환경조건을 실측하여 적절한 설계조건 선정이 필요하다[8].

나) 보호도장 시스템 설계 : 보호도장 시스템은 성능시험을 통해 검증된 도료를 사용하여야 하며 이는 노출환경에 대한 물리적 손상 및 부식에 대한 내구성이 요구된다. 또한 강재 구조물에 대한 방식도료는 구조물의 형상, 부식성 환경조성, 기상조건 및 해양생물 부착, 구조물의 설계수명, 도장방식의 시공성 및 유지보수 용이성 등을 고려하여 선정하여야 한다. 보호도장 시스템의 선택에 있어서 구조

물의 위치에 따른 특정 상황(구조물의 내부 부식 등)에서 비롯된 응력 또한 반드시 고려해야 하며, 이는 기존 설계나 경험적 근거가 반영되어 있는 분류체계에서 고려되지 않았던 예상치 못한 부식응력이 발생할 수 있기 때문이다. 또한 부식의 막대한 증가를 유발시키는 응력 혹은 보호도장시스템의 성능을 더 높게 요구하는 응력을 ‘Special stress’로 정의하고 있으며, 화학적 응력과 기계적 응력으로 분류한다[9]. 해양구조물에 적용하기 위한 도장공법은 구조물의 재료, 구조적 형상, 구조물 위치에 따라 달라질 수 있으며 Liquid Coating, TSA Coating, Hot-Dip Galvanized Coating, SUS Coating으로 구분하여 도장의 각 층을 의미하는 Primer/Intermediate/Topcoat에 필요 기능 및 역할에 부합하도록 설계되어야 한다[10]. 또한 보호도장의 사양을 선정하기 위해서는 수심에 따라 대기부, 수중부, 침적부로 구역을 분류하여 이에 적합한 도장기법과 도장재를 우선적으로 검토하여야 한다. 도장시스템의 설계는 먼저 대기 부식정도(6단계)와 해수/담수/토양 등 3가지 조건으로 분류하여 기호로 적용대상 환경을 식별 한 후, 도장시스템의 설계에 반영하여야 하며 상세 설계분류는 다음과 같다[11].

- (1) C5-I와 C5-M 부식 환경에서의 저 합금 탄소강에 대한 도장시스템 설계
- (2) Im1, Im2 및 Im3 분류에 대한 저 합금 탄소강에 대한 도장시스템 설계
- (3) C2에서 C5-M까지의 부식 환경에서 hot-dip-galvanized 강에 대한 도장시스템 설계
- (4) C4, C5-I, C5-M 및 Im1에서 Im3 환경의 열용사 코팅에 대한 도장시스템 설계

다) 전기방식 시스템 설계 : 방식시스템 설계에 있어서 소요전류밀도는 시스템의 수명과 사양, 설계도면을 결정하기 위한 핵심요소로 작용한다. 특히, 환경설계 및 대상구조물의 면적, 보호도장의 성능 및 손상율, 양극의 성능 및 사양 등 전반적인 시스템의 설계사양을 결정하는데 고려하여야 하며 이는 설치해역에서의 부식거동 실측결과에 대단히 의존적인 사항이라 할 수 있다. 방식전류의 균일분배를 위해서는 기준상의 요구전류밀도 대비, 10%~50%의 여유치를 고려하여 설계하며 유속조건(0.5m/s 기준)과 도장손상율( $f_c$ ) 및 분극상태를 고려하여 초기(분극), 평균, 말기(소극 후 재분극) 각각의 전류밀도를 결정하여야 한다. 총 요구전류량을 결정하는 인자는 전해질의 저항, 양극과 구조물의 전위차, 설치 및 운용시의 물리적 손상 발생 가능성, 양극재료의 유효사용 기대수명 및 구조적 제한사항 등을 고려하

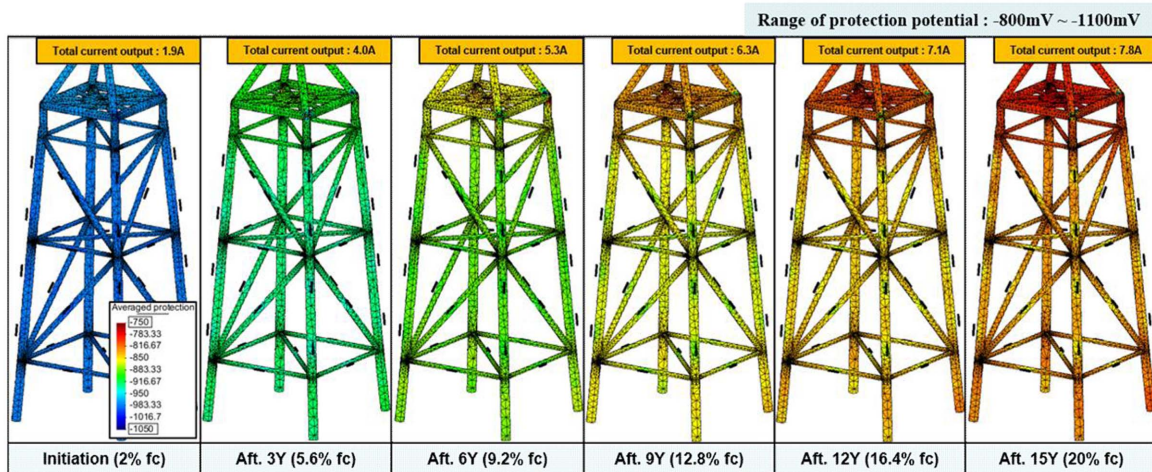
여야 하며 대상구조물의 방식면적에 따라 결정되어진다[12]. 수중부의 전류밀도는 55 ~ 540 mA/m<sup>2</sup>, 침적부는 10 ~ 30 mA/m<sup>2</sup>로 제시되고 있다. 도장구조물의 전류밀도는 무도장 강재에 비해 100분의 1 또는 그 이상의 비율이며 도장의 손상율에 따라 요구 전류밀도는 비례하여 증가한다. 반면, 무도장 강재에 대한 보호전류밀도는 기본적으로 유사한 환경하의 유사구조물에 대한 실증실험을 바탕으로 이루어져야 하는데 이는 설치해역에서 측정된 실증실험 결과의 중요성을 의미한다. 즉, 대상 실 해역에서의 분극거동, 표면상태, 해수 비저항, 용존산소량, 유속 및 온도 등 환경적 영향인자에 대한 고려는 필수적인 사항이다. 뿐만 아니라, 환경적 영향인자 외에 소요전류밀도를 결정하는 핵심요소인 도장손상율은 도장사양, 표면 전처리, 적용공법, 제작 및 운전조건 등에 대단히 의존적이라 할 수 있다[7].

### 3.2. SACP 시스템 성능해석

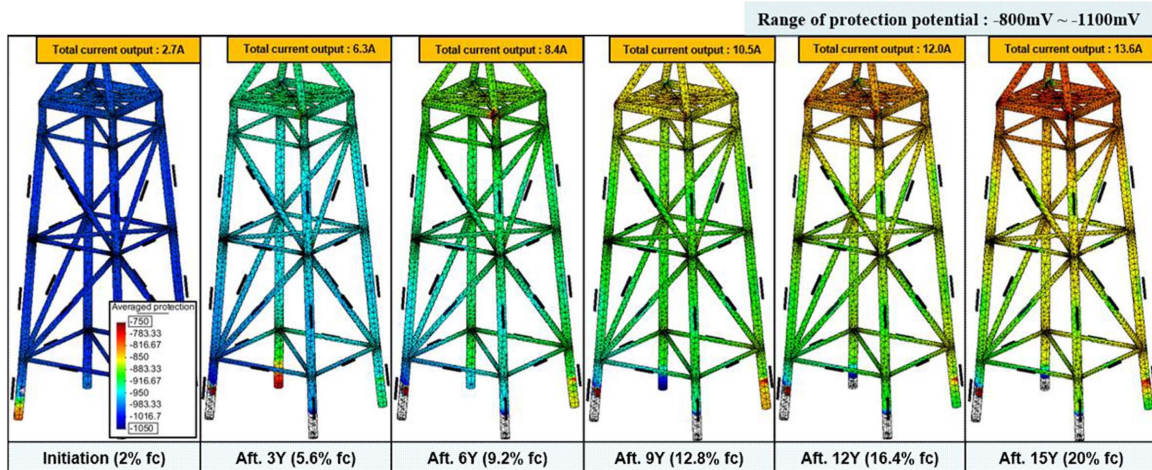
다음은 해상풍력 구조물의 방식시스템 설계조건에 따른 성능해석을 수행하였으며, SACP 시스템에 대하여 도장손상율을 고려한 시간의존적인 성능변화를 평가한 것이다. 이는 앞서, 국제기준 분석결과를 바탕으로 방식시스템의 설계조건 및 환경인자 변수를 선정하여 경계조건으로 대입하였다. 또한 해상에서의 25년 이상의 장기 내구수명을 요구하는 지지구조물의 지속적이고 안정적인 방식성능을 검증하기 위하여 평가기간을 30년으로 설정하고 시간의존적 성능변화를 3년 간격으로 평가하였다.

가) 설치 이후 15년까지의 시간의존 성능해석 ( $i_c : 1.2\%/y$ )

본 연구에서는 그림 2와 같이 운용기간 15년 동안은 연간 1.2%의 도장손상율을 적용하여 동일한 조건을 구현하였으며 30년까지의 방식성능 해석결



(a) SACP Type 1 (number of anodes : 34ea)

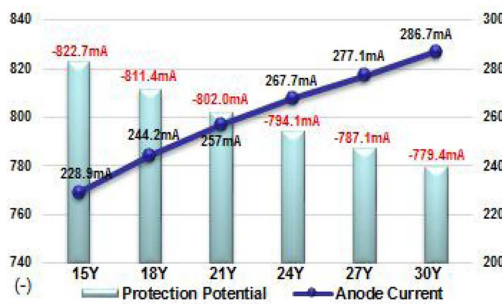


(b) SACP Type 2 (number of anodes : 28ea)

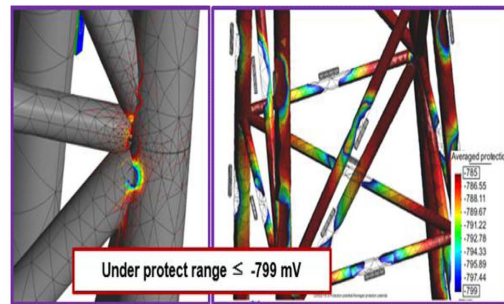
Fig. 2. Potential profile of substructure for sacrificial anode type 1 & 2 up tp 15years with 1.2%<sub>y</sub>.

Table 4. Results of time dependant analysis for substructure

Sacrificial anode design : Type 1		Sacrificial anode design : Type 2	
operation time / $f_c$ tot	Protective potential	operation time / $f_c$ tot	Protective potential
Initial / 2%	-980.6 mV <sub>sce</sub>	Initial / 2%	-1001.6 mV <sub>sce</sub>
After 3Y / 5.6%	-916.9 mV <sub>sce</sub>	After 3Y / 5.6%	-944.4 mV <sub>sce</sub>
After 6Y / 9.2%	-877.7 mV <sub>sce</sub>	After 6Y / 9.2%	-913.1 mV <sub>sce</sub>
After 9Y / 12.8%	-854.2 mV <sub>sce</sub>	After 9Y / 12.8%	-885.6 mV <sub>sce</sub>
After 12Y / 16.4%	-836.5 mV <sub>sce</sub>	After 12Y / 16.4%	-866.0 mV <sub>sce</sub>
After 15Y / 20%	-822.7 mV <sub>sce</sub>	After 15Y / 20%	-847.9 mV <sub>sce</sub>



(a) Potential and anode current



(b) under protection (after 30years)

Fig. 3. Potential profile of substructure after 15years with 1.2% $f_c$  (Anode type 1).

과를 기준으로 SACP 시스템의 성능평가를 실시하였다. 도장손상율은 모두 동일하며 초기 설치 직후는 2% 손상기준을 적용하였고 이후 연간 1.2%씩 증가하여 15년까지는 최대 20%의 도장손상율로 동일한 조건이다[4]. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 해상구조물의 경계조건은 모두 동일하나, 희생양극의 수와 중량, 크기 등의 방식시스템 설계요건의 차이를 가진다. 즉, 희생양극의 형상에 따른 양극저항( $R_a$ )은 출력전류를 결정하는 중요한 인자로서 동일한 연간 도장손상율 변수에 따른 출력전류의 차이를 나타냈다. 이에 따라, 양극에서 출력되는 전류용량이 다소 차이를 나타냈으며 type 1의 경우에 전체 구조물의 소요전류밀도 범위는 1.9 A ~ 7.8 A의 범위로 증대되었다. 반면, type 2의 경우에는 소요전류밀도가 초기에 2.7A이며 15년 이후는 13.6 A로 상대적으로 큰 증가율을 나타냈다. 표 4는 희생양극 type 1과 type 2에 대하여 연간 1.2% $f_c$  조건에서의 운영기간 15년까지에 대한 평균표면전위 측정결과를 나타낸 것이다. 연간 1.2% 도장손상율을 적용한 결과, 모든 설계조건에서 15년까지 방식충족조건(-800 mV<sub>sce</sub> 이하)을 만족하였다. 해석조건별 방식전위는 최소 -800 mV<sub>sce</sub> 보다 비한 전위를 가지며 희생양극 type 1과 type 2의 운영기간 15년( $f_c$  : 20%)에서의 구조물 전위는 모두 -820 mV<sub>sce</sub> 이하의 전위를 충족하였다.

나) 15년 이후의 시간의존 성능해석  
( $f_c$  rate : 1.2%/y & 2.4%/y)

(1) 희생양극 Type 1 성능해석 : 그림 3은 연간 도장손상율 1.2% $f_c$ 의 조건에 대한 운영년수 15년 이후 도장손상율 변수에 따른 희생양극 type 1에 대한 성능해석 결과를 나타낸 것이다. 1.2% $f_c/y$ 의 경우는 구조물의 운영년수가 27년(34.4% $f_c$ , -787.1 mV<sub>sce</sub>)이 경과한 이후로 평균방식전위는 -800 mV<sub>sce</sub> 이하로 방식조건을 충족하지 못하였다. 30년 이후로는 그림 3(b)와 같이 희생양극의 전류공급이 미치지 못하는 일부 영역이 관찰되었으며 해당영역의 평균전위가 -779.4 mV<sub>sce</sub> 이하로 상승하여 구조물 전체에서 방식전위 구간을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 연간 도장손상율 2.4% $f_c/y$ 의 조건에 대한 운영년수 15년 이후 도장손상율 변수에 따른 해석결과로 대상구조물의 소요전류밀도가 급격하게 증가하여 양극출력전류 또한 비례적으로 상승하는 경향을 나타냈다. 구조물 전체에 대한 평균방식전위는 운영기간 18년까지 -802 mV<sub>sce</sub> 이하이나, 이후 운영기간 21년(34.4% $f_c$ , -787.1 mV<sub>sce</sub>) 이후부터는 상대적으로 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 결과적으로 도장손상율의 변화는 양극의 소요전류밀도에 직접적인 영향을 미치며 희생양극 type 1은 보호도장이 최대 27.2% $f_c$  이상 손상되는 경우에는 구조물의 일부영역에서 방식범위를 벗어나 안정적인 방식조건을 충족하지 못하는 것으로 판단된다.

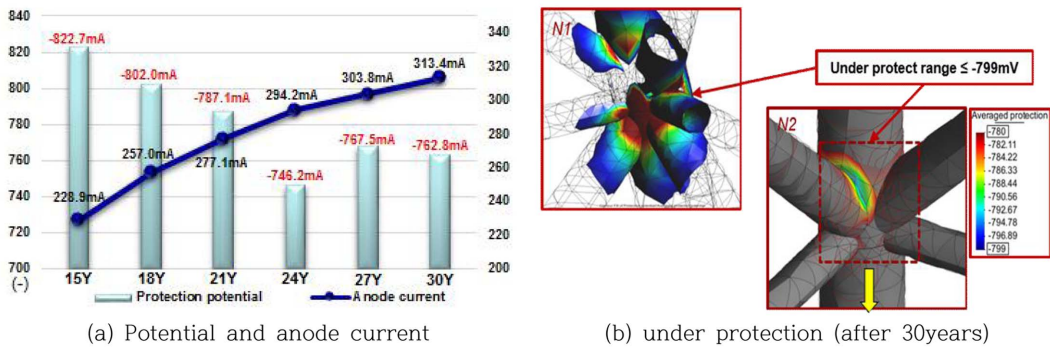


Fig. 4. Potential profile of substructure after 15years with 2.4%fc (Anode type 1).

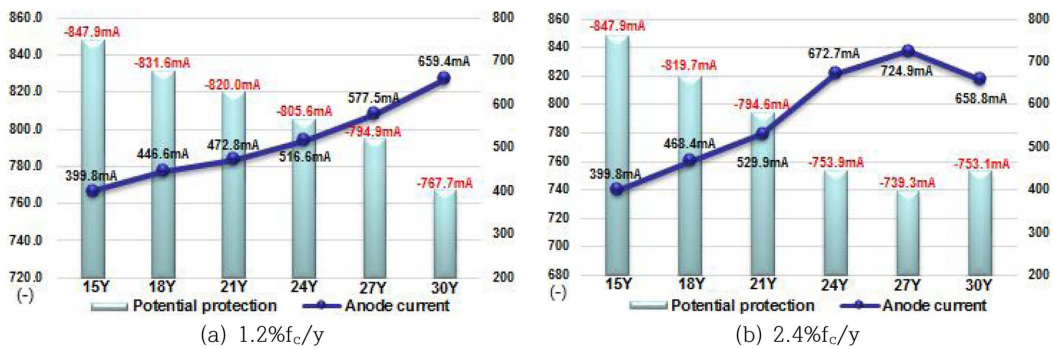


Fig. 5. Trends of potential profile and anode current after 15years (anode type 2).

(2) 희생양극 type 2 성능해석 : 그림 5는 연간 도장손상율 1.2%fc/y와 2.4%fc/y에 대한 운영년수 15년 이후 도장손상율 변수에 따른 희생양극 type 2에 대한 성능해석 결과를 나타낸 것이다. Type 2는 Type 1과 대비하여 양극의 크기 및 중량의 증대됨에 따라 개별 양극출력전류와 도장손상율 변화에 따른 방식전위를 충족하는 기간이 증대되었음을 알 수 있다. 연간 도장손상율 1.2%fc/y의 경우, 운용기간이 27년까지 평균표면전위가  $-794.9 \text{ mV}_{\text{scc}}$  이상으로 오차범위 1% 이내의 방식전위를 나타냈으며 이때 개별양극의 평균전류출력은 577.5 mA로 측정되었다. 반면, 도장손상율을 2.4%fc/y를 적용한 경우는 운용기간 21년에 평균표면전위가  $-794.6 \text{ mV}_{\text{scc}}$  이하로 오차범위 1% 이내의 방식전위를 만족하였으며 이후 도장손상율이 증가에 따라 방식조건을 충족하는 수명이 급격하게 감소하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 희생양극 type 2의 설계조건은 도장손상율이 최대 34.4%fc까지 방식성능을 만족하였으며 이는 type 1 대비 7.2% 이상 향상된 성능을 보장하였다.

### 3. 결 론

1) 국제기준/코드/선급 기준의 설계/인증기준에 대

한 분석결과, 대상구조물의 설치해역 환경 및 구조물 재료에 대한 이해를 통해 방식시스템의 상세 설계요건을 선정하여야 하며 이는 방식설계의 기초개념을 바탕으로 한다.

2) 상세 설계조건 선정은 해양 부식인자와의 상관관계, 각 공정단계별 기술적 수위, 각 방식시스템의 사양 등을 종합적으로 고려하며 기준에서 제시된 설계값(소요전류밀도, 도장손상율, 방식전위 등)이 실측해역의 요구치에 충족하는지에 대한 검토가 대단히 중요하다. 즉, 설치해역에서의 실험결과를 확보하여 방식시스템의 설계 시 반영하여야 하며 설계기준에서 제시하는 수준과 실제 해상에서의 요구수준을 상대적으로 비교평가하여 적정성을 검토하여야 한다.

3) 희생양극 시스템 설계모델에 대한 성능평가를 위하여 설치해역에서 측정된 경계조건을 바탕으로 희생양극 type 1과 2에 대한 성능해석을 경계요소 해석법을 통해 수행하였다. 희생양극 type 1의 해석결과, 전체 도장손상율이 대략 27.2%fc를 초과하는 시점에서 방식충족전위가  $-787.1 \text{ mV}_{\text{scc}}$  이하로 감소하여 설계수명을 만족할 수 없는 성능적 한계를 확인하였다. 이와 달리, type 2는 34.4%fc에서 1% 오차범위 이하로 전위가 감소하여 성능한계의 변곡을 나타냈으며 대략 도장손상율이 35%fc 이상

손상되는 시점부터는 구조물 전체의 적절한 방식이 불가능 한 것으로 판단된다.

4) 이와 같이, SACP 시스템의 양극사양 설계는 장기적인 설계수명을 충족하기 위해서 소요전류밀도의 정확한 규명이 필요하며 이는 대상 구조물 표면의 도장손상율의 변화가 중요한 영향인자임을 알 수 있다. 그러므로 실제 해상구조물에 적용된 보호도장의 지속적인 모니터링을 수행하여 실제 연간 손상율과 그 변화추이에 대한 정확한 평가를 수행하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTTE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20143010021820).

## References

- [1] J. Wintle and J. Sharp, Requirements for life extension of ageing offshore production installations, TWI report (2008).
- [2] Zeinoddini *et al.*, Remaining fatigue life assessment of aging fixed steel offshore jacket platforms, Structure and infrastructure engineering, Vol. 12, No. 2 (2016) 223-238.
- [3] Ji. C, Li. S, Structural Reliability Assessment of Aging Offshore Platforms With Corrosion and Cracks, Proceedings of the international conference of offshore mechanics and arctic engineering, Vol. 27, No. 2 (2008) 585-590.
- [4] DNV RP B401, Cathodic protection design, DNV (2010).
- [5] ISO 12944-1, Paint and varnishes-corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 1 : General introduction, ISO (1998).
- [6] NACE RP 0176, Corrosion control of submerged areas of permanently installed steel offshore structures associated with petroleum production, NACE (2003).
- [7] ISO 11303, Corrosion of metals and alloys-Guidelines for selection of protection methods against atmospheric corrosion, ISO (2002).
- [8] NORSOK M-001, Materials selection, NORSOK (2004).
- [9] ISO 12944-2, Paint and varnishes-corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2 : Classification of environments, ISO (1998).
- [10] NACE SP 0108, Corrosion control of offshore structures by protective coatings, NACE (2008).
- [11] ISO 12944-5, Paint and varnishes-corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 5 : protective paint systems, ISO (2007).
- [12] ISO 13174, Cathodic protection of harbour installations, ISO (2012).