

수치해석에 의한 LNG 저장탱크용 강관파일 전기방식 설계 최적화 연구

김 영 근[†] · 송 홍 석

한국가스공사 가스연구원, 경기도 안산시 상록구 수인로 1248
(2017년 11월 22일 접수, 2017년 12월 18일 수정, 2017년 12월 19일 채택)

A Study on the Cathodic Protection Design Optimization of Steel Piles for LNG Storage Tanks by Numerical Analysis

Young Keun Kim[†] and Hong Seok Song

KOGAS Research Institute, 1248 Suin-ro, Sangrok-ku, Ansan-si, Korea

(Received November 22, 2017; Revised December 18, 2017; Accepted December 19, 2017)

For the longer service life of steel pile, cathodic protection is selected sometimes at corrosive environment. The cathodic protection design improvement was investigated in this study. The current demand for cathodic protection was calculated from the potentiostatic current monitoring of the steel specimen in the deaerated soil samples. In this study, the current distribution was studied using the Boundary Element Method (BEM) and the Finite Element Method (FEM) numerical analysis methods. The optimum layout of the anode was developed and confirmed by numerical analysis. Under the conventional design of the anode, the length of the anode hole is same as the pile length. We found that, at the bottom end of the pile, the current density is too high. When the anode hole length was 80% of the pile length, the current consumption at the end was reduced. The construction cost of anode hole drilling was decreased about 20%, as compared to the conventional design. Furthermore, the life of the anode materials could be extended by reducing the current consumption at the end section. Using this approach, the construction cost was reduced significantly without any under-protection area on the steel piles.

Keywords : steel pile, cathodic protection, BEM, numerical analysis, design

1. 서 론

LNG 저장탱크를 지지하는 강관파일은 주로 해양 매립지 토양환경에 매설되고 있다. 강관파일의 경우 설계 수명을 달성하기 위하여 두께 여유분을 감안한 설계를 하거나 전기방식을 실시한다. 일반적인 강관 파일의 경우 토질에 따른 부식 수명을 예측하여 방식대책을 수립하고 있다. 토양환경 중의 강관파일의 부식속도는 NACE (National Association of Corrosion Engineer)의 보고서 [1]에 따르면 토양의 부식성은 부지조성을 위하여 사용된 매립토의 성분에 따라 달라지며 부지조성과정에서 교란된 토양의 경우 원토양에 비하여 높은 부식속도를 나타낸다. 일반적으로 적용되는 부식속도 예측치는 0.03 mm/year이지만 토양 환경에 따라 최대 0.08 mm/year의 높은 부식속도가 관찰되기도 한다. LNG

저장탱크의 경우 설비의 중요성을 감안하여 토양의 부식성 평가, 황산염 환원박테리아에 의한 부식속도 증가 가능성을 감안하여 위험도가 높은 경우 전기방식을 실시하게 된다. 강관파일의 전기방식설비는 피방식체에 피복이 적용되지 않고 규모가 매우 커 소요방식전류 또한 커지게 된다. 장현영 외 많은 연구자들이 수치해석적 방법으로 전기방식설계를 분석하는 연구를 통하여 방식설계를 최적화하는 방안을 연구하였다 [2-4]. 본 연구에서는 규칙적으로 배열된 강관 파일에 대하여 수치해석 방법으로 전류 분포를 해석하여 양극분포를 최적화함으로써 방식설비투자를 최소화하는 연구를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 강관파일의 방식설계 조건

해양 매립지에서 외부 토양으로 바다를 매립하는 경우

[†] Corresponding author: unplugged@kogas.or.kr

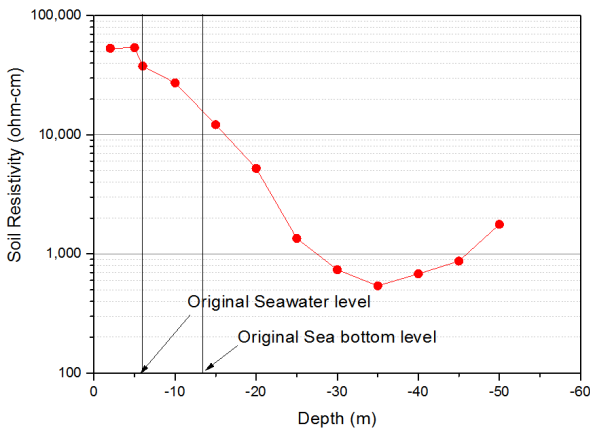


Fig. 1 Layer resistivity with reclaimed soil depth.

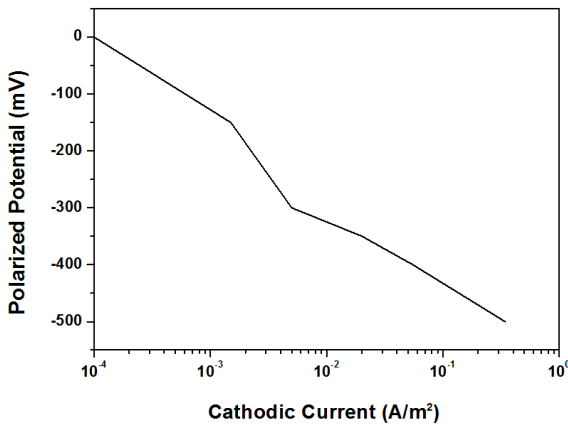


Fig. 2 Cathodic polarization from the corrosion potential (-700mV, CSE) in reclaimed soil condition.

원래의 해수면 아래지점의 토양과 상부의 매립토양 간에는 현저한 토양비저항의 차이가 발생한다. 다음의 Fig. 1은 매립부지에서 4-pin method를 이용하여 측정된 토양비저항의 프로파일을 보여준다. 이 사례에서 토양비저항은 원해저면이하에서는 1,000 ohm · cm 수준의 낮은 토양비저항을 보이지만 상부의 매립토양은 10,000 ohm · cm이상의 높은 비저항을 보인다. 토양 모델은 2층으로 나누어 상부토양은 11,000 ohm · cm, 하부토양은 920 ohm · cm로 모사하였다.

토양중 강관의 분극거동은 대상구간에서 채취한 토양시료 중에서 분극곡선을 이용하여 측정하였다 (Fig. 2 참조). 분극곡선은 정전위를 인가하고 24시간 경과 후 음극 전류값을 측정하였다. 이때 부식전위는 -700 mV (vs. CSE)로 나타났다.

2.2 전류분포 수치해석

전류 분포를 위해서는 금속구조물과 양극의 기하학적 배치를 3차원으로 모델링하여 이를 경계요소법 (BEM, Boundary Element Method) 패키지인 Catpro (Elsyca, Belgium) 와 유한요소법 패키지인 CP Master (Elsyca, Belgium) 를 사용하였다. 아래의 Fig. 3은 계산 대상 구조물의 강관파일 배치를 보여주고 있는데 강관파일 사이에 양극을 설치하여 전류분포를 관찰하였다. 설계 도면을 토대로 강관파일의 위치와 직경, 양극의 위치와 직경을 배치하여 Fig. 4와 같은 배치에 대하여 계산결과를 도시하였다.

Fig. 4의 배치에서 강관파일은 직경을 914 mm, 길이를 40 m로 하고 양극의 길이를 변경하여 계산을 실시하였다. 양극은 지표면 아래 2 m부터 시작하여 길이를 변화시켜가며 전류분포를 계산하였다.

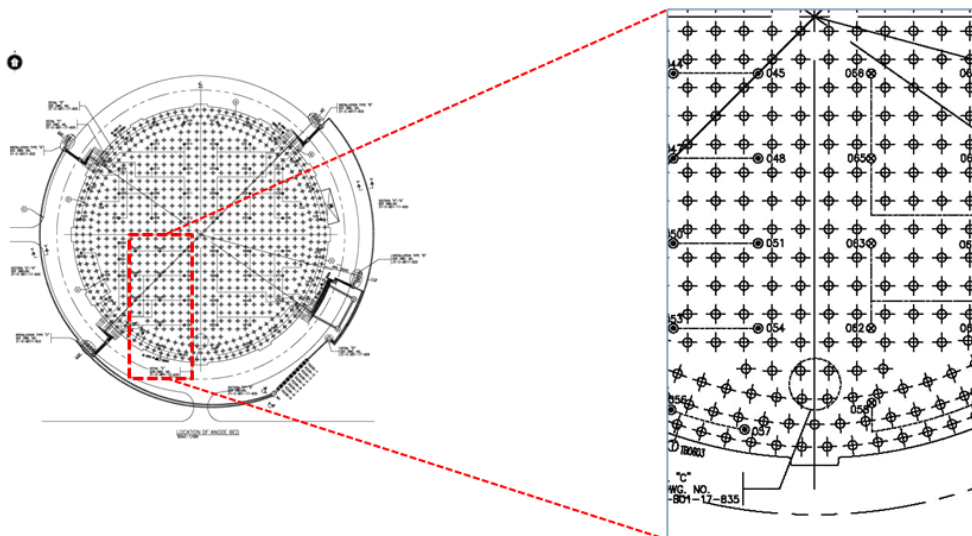


Fig. 3 Steel Piling and Anode layout.

3. 연구결과 및 고찰

기존의 강관파일 건설 시에는 양극의 하단을 강관파일의 하단과 동일한 깊이까지 설계하여 시공하였다. 동일한 배치를 수치모델로 구성하여 전류 전위분포를 계산하였다. 강관파일의 길이방향의 전위 분포는 양극과 가까울수록 방식전위가 낮게 나타나고 거리가 멀어질수록 전위가 점차 상승하게 된다. 양극과 강관파일의 거리가 상대적으로 가장 먼 경우에서의 파일의 전위는 Fig. 5와 같이 나타나게 된다. 상부의 전위가 높게 나타나는 것은 상부의 토양 비저항이 더 높고 양극의 상부 (2 m)가 절연되기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 파일의 하부에서는 전위가 급격하게 낮아지는 현상이 관찰되는데 이는 강관파일에 유입되는 전류가 전류집속효과에 의하여 Fig. 6과 같이 하단부에 전류가 집중되어 전류밀도가 높아지기 때문이다. 강관파일의 상부에서 전위가 통상적인 방식기준인 -850 mV (vs. CSE)에 미달되는 것으로 나타나지만 상부 토양의 비저항이 $10,000\text{ ohm} \cdot \text{cm}$ 이상으로 부식성이 낮으며, 부식전위보다 100 mV 이상의 음분극이 유지되는 것으로 분석되어 ISO [5] 및 NACE [6]의 100 mV 분극 기준을 충족하는 것으로 판단할 수 있다.

양극의 길이를 파일의 끝 단부까지 길게 하는 경우 파일 하단부에 전류가 집중되어 방식전위가 낮아짐으로써 불필요한 양극의 소모를 가져오며 전체적으로 양극설비 설치비용을 증가시킬 수 있다.

하부의 전류 집중현상을 방지하기 위하여 양극의 길이를 강관파일의 길이보다 짧게 설치하는 경우를 검토하였다. 양

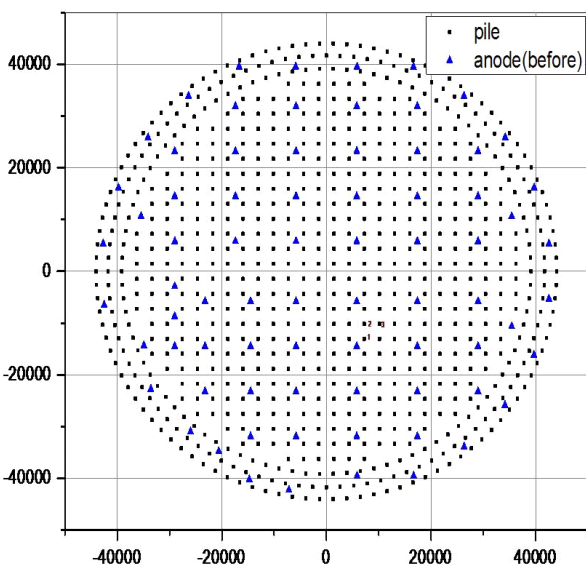


Fig. 4 Plan view of steel piles and anodes in the FEM model (unit: mm).

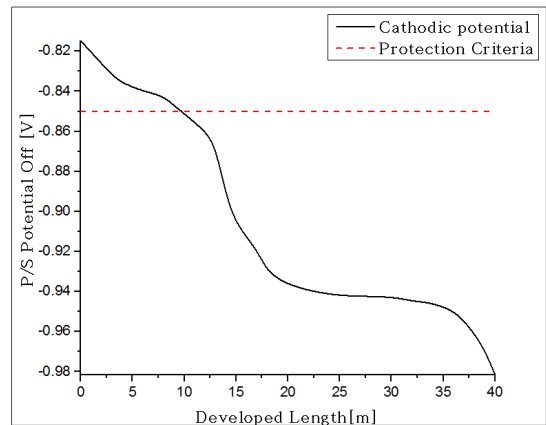


Fig. 5 Typical Cathodic potential profile of the pile with 100% length of anode.

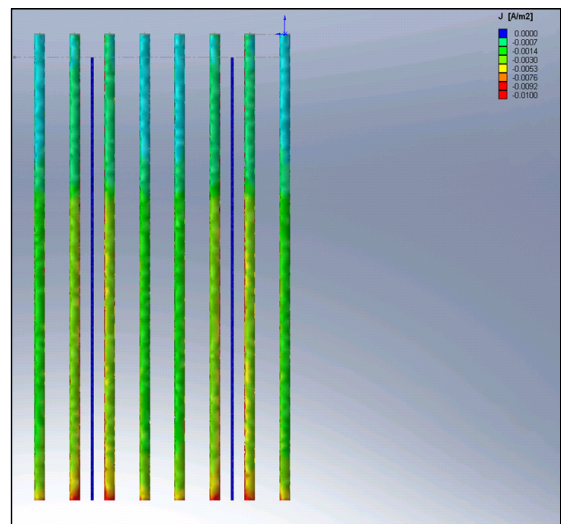


Fig. 6 Cathodic current distribution on the pile (vertical view, current density shown as color legend).

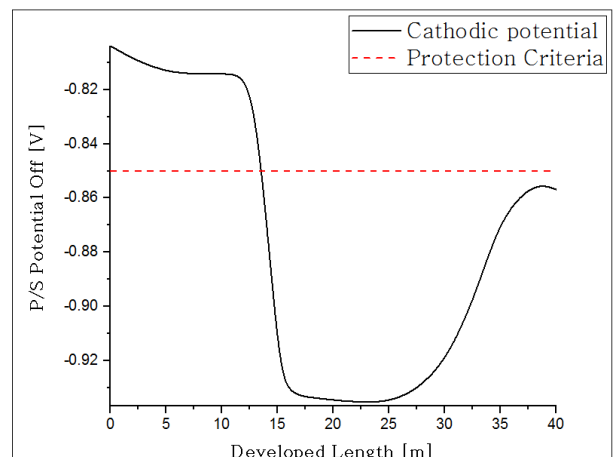


Fig. 7 Typical Cathodic potential profile of pile with 80% length of anode.

극의 깊이를 강관파일의 깊이의 80% 수준으로 하였을 경우에도 Fig. 7에서와 같이 강관파일 하단의 전위가 방식기준을 충족할 수 있음을 확인할 수 있었다. 파일 상단의 전위는 상부의 토양비저항이 높아 -850 mV 기준에는 미달되나 -100 mV 분극조건을 앞절에서의 결과와 같이 충족하였다.

탱크 당 824개의 파일을 방식하기 위하여 양극이 75개의 홀에 40 m 깊이로 설치되는 기존 설계와 비교할 때 양극 홀의 위치 및 수량은 동일하게 유지하되 양극의 길이를 기존 양극의 길이에 비해 80% 수준으로 짧게 설치하게 되면 양극 재료비, 설치 노무비 및 경비 등의 관점에서 탱크 당 약 4억 원의 비용(산출 당시의 파일 단가 비용 기준)이 절감될 수 있는 것으로 산출되었다.

4. 결론

LNG 저장탱크를 지지하기 위해 해양의 매립토에 매설되는 강관파일에 대한 경제적인 음극방식 설계방안을 도출하기 위하여 상용 해석 프로그램을 활용하여 강관파일의 전위 분포를 해석하여 설계를 최적화 하였다.

1. 해양 매립토 환경에서 매립 깊이별 비저항 및 산소 농도가 다르고, 퇴적토에 의한 미생물 등이 부식의 위험성을 높이게 되는데 설계 수명기간 동안 효과적인 부식방지를 위해서는 음극방식을 적용할 필요가 있다.

2. 해수면 상부는 매립된 높은 비저항의 토양이고 하부는 낮은 비저항의 토양으로 구성된 환경에서 양극의 매설 깊이가 강관 파일의 매설 깊이와 같게 되는 조건으로 방식전위 분포를 해석한 결과 파일의 끝 단부에서 방식전류가 집중하게 되어 나타나게 되는데, 이는 양극의 소모를 촉진하게 되고 시공비용의 상승을 초래하게 된다.

3. 양극의 길이를 파일의 80% 수준으로 설계하는 경우 시공비용이 절감되며 비용 절감액은 탱크 1기당 약 4억 원에 달하였다.

References

1. NACE International Task Group 018, *State-of-the-Art Survey on Corrosion of Steel piling in Soils*, No. 05101, NACE International Publication, Texas (2001).
2. H. Y. Chang, K. T. Kim, B. T. Lim, K. S. Kim, J. W. Kim, H. B. Park, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **16**, 115 (2017).
3. P. Yao and J. Wu, *Corros. Sci. Tech.*, **7**, 197 (2017).
4. Y. -S. Kim, S. Y. Le, G. -W. Park, G. -S. Jeon, and Y. -T. Go, *Corros. Sci. Tech.*, **27**, 613 (1998).
5. ISO15589-1, Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Cathodic protection of pipeline systems-Part 1: On-land pipelines (2015).
6. NACE SP0169, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems (2013).