

## 음극방식 시스템에서의 압입관과 배관의 부식거동에 관한 수학적 모델링

김영석 · 이선엽 · 박경완 · 전경수 · 고영태

한국가스공사 연구개발원  
(1998년 3월 7일 접수, 1998년 3월 30일 채택)

## Mathematical Modeling on the Corrosion Behavior of the Steel Casing and Pipe in Cathodic Protection System

Y.S.Kim · S.Y.Li · K.W.Park · K.S.Jeon and Y.T.Kho

*R.&D. Center/Korea Gas Corporation 277-1, Il-Dong, Ansan, Kyunggi, Korea*  
(Received 7 March 1998; accepted 30 March 1998)

### 요 약

음극방식 시스템의 방식전류에 의한 압입구간내의 압입관과 배관의 부식거동에 관한 수학적 모델링을 경계요소법을 이용하여 수행하였다. 모델은 비선형 경계조건(Tafel 방정식)을 가진 라플라스 방정식으로 이루어져 있으며 압입관의 혼합전위를 구하기 위하여 혼합전위 이론을 응용한 반복법을 사용하였으며 그위에 비선형 경계조건에 대한 해석을 위하여 이중 반복법을 사용하였다. 모델은 정상적인 압입구간 뿐만아니라 압입관과 배관과의 금속간 접촉(metal touch)이나 외부환경과 압입구간 내부를 격리시키는 절연부위의 손상과 같은 결함들을 가진 비정상적인 압입구간들에 대해서 적용되었다. 수학적 모델링의 결과로부터 압입구간내의 전위분포와 전류분포를 계산할 수 있었다. 모델링의 타당성을 증명하기 위하여 모사실험을 수행하였으며 실험조건내에서 이론적인 결과와 실험결과는 정성적으로 잘 일치 하였다.

**Abstract** - Mathematical modeling on the corrosion of the steel casing and main pipe due to the protection current resulting from a cathodic protection system was carried out using boundary element method. The model is consisted of Laplace's equation with non-linear boundary conditions(Tafel equations) and the iterative technique to determine the mixed potential of the steel casing. The model is applied to the normal steel casing section as well as abnormal one with defects such as metal touch and insulation defects. From the modeling procedure, we can calculate the potential distributions and current density distributions of the system. The theoretical results of the qualitative corrosion aspect along the steel casing and main pipe agree well with the experimental results within the experimental conditions studied.

**Key words** : Steel casing, BEM, Mixed potential, Tafel equation, Metal touch

### 1. 서 론

지하매설 배관 및 대규모의 금속 구조물의

부식을 방지하기 위하여 음극방식법이 널리 사용되어져 왔다. 음극방식법의 원리는 외부 전원법이나 희생양극법에 의해 전자를 공급함으

로서 방지하고자 하는 구조물을 음극화 하여 금속의 용출을 방지하는 것이다<sup>1</sup>. Nisancioglu는 음극방식의 설계기법에 관한 연구를 수행하였고 Newman은 원통형이나 평판형 구조에서 구조물과 평행하게 놓여있는 희생양극을 이용한 음극방식법의 설계표준을 제시하였다<sup>2,3</sup>. 또한 Deconinck와 Brichau는 경계요소법에 의한 수치해석이 수킬로미터에 달하는 배관의 음극방식에 성공적으로 적용될 수 있다는 것을 보여 주었다<sup>4</sup>.

압입이란 지하 매설배관이 선로,간선도로의 횡단부나 하천, 수로횡단부를 지나가야 하는 지점에서 Open Cut 공법으로 매설하기에는 교통체증을 야기시키거나 민원발생의 소지가 있는 경우 혹은 장애물이 존재하는 경우에 배관을 기계적으로 보호하기 위하여 배관의 주위에 압입관을 설치하는 것을 말한다. 선로횡단이나 도로횡단의 경우 주로 주철관, 흙관, 강관을 압입관으로 사용하며, 하천이나 수로 횡단부에는 콘크리트 encasing을 이용한다. 이러한 압입구간에서 주배관과 압입관의 적정한 전위분포는 음극방식의 효율성을 결정하는데 있어서 뿐만 아니라 압입구간의 건전성을 유지하는데 있어서의 중요한 변수중의 하나이다. 따라서 압입구간에서 미주전류의 거동에 관한 정확한 해석에 근거하여 음극방식과 압입구간을 설계하는 것은 아주 중요하다.

본 연구에서는 주배관과 압입관의 부식거동을 해석하기 위하여 경계요소법과 혼합전위 이론을 응용하여 압입구간에서의 전위분포와 전류분포를 구하였고 이를 실험결과와 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

음극방식의 원리는 Ref.(1)과(3)에 상세히 논의되어있다. 수치해석을 할 때 토양은 거시적 관점에서 보아 일정한 전도도를 가진 균질한 매질로 가정하였으며 이온전도성 매질 즉 토양내에서의 농도 구배를 무시할수 있다고 가정하면 전위는 다음과 같이 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

그리고 전류분포는 다음의 Ohmic Law에 의하여 구할 수 있다.

$$i = -\chi \nabla \phi \quad (2)$$

여기서  $\chi$ 는 토양의 전기전도도이다.

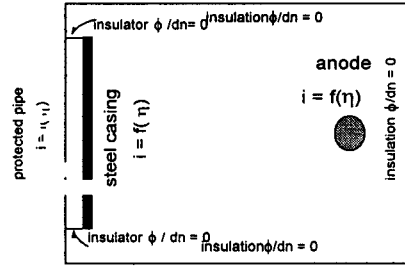


Fig.1 Boundary conditions of the system

압입관의 전기적 저항을 무시할 수 있다고 가정하면 압입관을 따라 일정한 값을 가지는 등전위(equipotential)가 형성된다. 이러한 등전위가 혼합전위(mixed potential)이며 이 전위에서 음극 부분전류(cathodic partial current)의 합과 양극 부분전류(anodic partial current)의 합은 같아지게 된다. 그리고 각 부분전류들은 또한 그에 해당하는 Tafel 식과 관련을 가지게 된다. 표면 과전압은 각각의 반응에 대해 다음과 같이 혼합전위와 관련을 가지고 있다.

$$\eta_i = E_m - E_{o,i} \quad (3)$$

여기서  $\eta_i$ 는 표면 과전압,  $E_m$ 는 혼합전위를 그리고  $E_{o,i}$ 는 관련된 각각의 반응에서의 평형전위를 나타낸다.

Fig.1에 실험장치를 모사한 경계조건을 나타내었으며 이 경계조건을 이용하여 지배방정식을 풀었다. 양극과 배관 그리고 양극과 압입관의 저항감소치(ohmic drops)와 압입관의 혼합전위를 가정한 후에 지배방정식을 풀게 되면 양극 전류밀도, 음극 전류밀도 그리고 압입관의 미주 전류밀도를 구할 수 있게 된다. 혼합전위 조건을 만족하는 혼합전위값은 이분법(bisection method)을 이용하여 구해지며 각각의 경계조건이 비선형이기 때문에 반복법을 이용하였다. 이렇게 구해진 혼합전위값을 압입관의 경계조건으로 설정하고 경계요소법을 이용하여 다시 한번 지배방정식을 풀게 되면 전체 시스템의 전위분포가 구해진다.

앞에서 구한 전위분포와 배관과 압입관의 전류분포로부터 부식발생 위치와 부식량을 예측할 수 있게 된다.

## 3. 실험 및 실험장치

모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수

행하였으며 실험장치의 모습이 사진1에 나타나 있다. 실험장치는 배관, 압입관, 양극 그리고 직류전원 공급장치(power supply)로 이루어져 있다. 배관과 압입관은 일반 구조용 강판으로 그 형태를 모사하여 사용하였으며 양극은 탄소봉을 가공하여 구의 형태로 만들어 사용하였다. 시편은 400, 800, 1200번 연마지(sand paper)로 순서대로 연마하였으며 아세톤으로 탈지한후에 실험에 사용하였다. 실험조는 일정한 값의 전도도를 갖는 NaCl용액으로 채웠다. 양극과 배관사이의 전압은 직류 전원공급장치(Hewlett Packard M 6010A)를 이용하여 일정하게 유지하였으며 포화감홍전극(saturated calomel electrode)을 기준전극으로 사용 하였다.

실험은 압입관이 완벽하게 설치되어 있고 압입구간 내부와 외부가 완전히 절연되어 있는 경우와 절연부위가 손상되어 압입관 내부가 전도성 매질로 채워져 있는 경우에 대해 수행하였다.

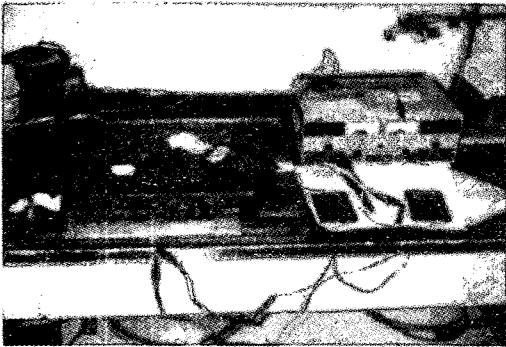


사진 1

#### 4. 결과 및 검토

절연부위의 여러 가지 손상형태에 따른 배관과 압입관의 전류분포 및 전위분포가 Ohm의 법칙에 의해 계산되었으며 전류밀도의 양의 부호는 배관과 압입관의 부식을 야기하는 양극전류밀도를 나타내며 음의 부호는 산소환원이나 수소발생과 같은 환원반응에 의해 부식이 방지되는 음극전류밀도를 나타내고 있다.

Fig.2에 절연부위의 손상이 전혀 없는 경우의 전류밀도와 Fig.3에 이때의 전위분포를 나타내었다. 모델링 결과로부터 부식양상을 예측하여 보면, 양극으로부터 나온 전류는 압입관표면의 대부분의 지점에서 유입되면서 방식전류로 작용하며, 음극방식되고 있는 배관과 가까

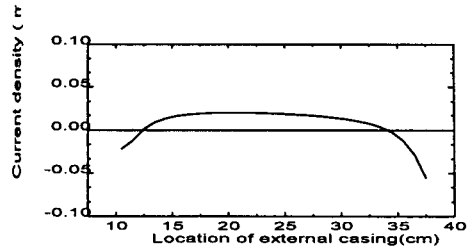


Fig. 2. Stray current density distribution on the external surface of casing

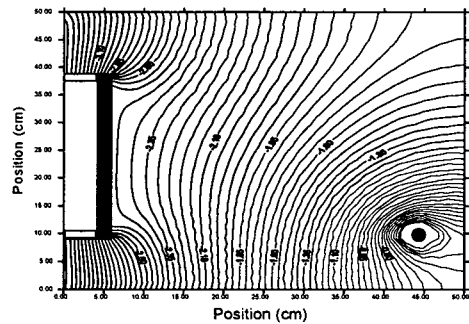


Fig.3 Potential distributions expressed in constant equipotential line in case of well operated casing section

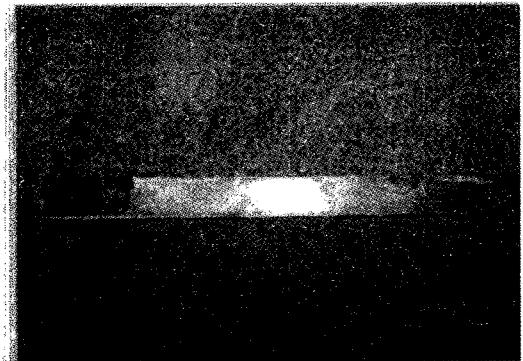


사진 2

운 압입관의 양 끝단에서는 양극화로 인하여 유입된 방식전류의 유출때문에 이 지점에서 집중적인 부식이 일어나게 된다. 이때 압입관의 내부 표면과 압입구간 내부의 배관의 표면은 대기부식 분위기에 노출되게 되는데 배관의 다른 지점에서 유입된 방식전류와 압입관의 외부에서 유입된 방식전류가 이러한 지점에서 쉽게 유출되기 때문에 일반적인 대기 부식 환경에서 보다 더 빠른 속도로 부식될 것으로 예측된다. 이와 같은 경우에 대한 실험 결과가 사진2-4에

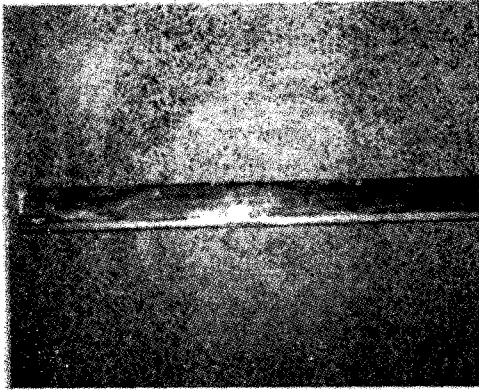


사진 3

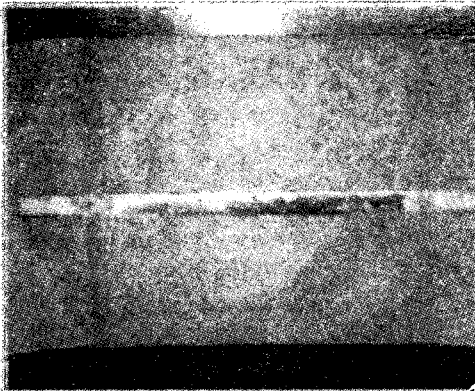


사진 4

나타나 있다. 사진2에서 보여진 시편은 압입관의 외부 표면을 나타내고 있는데, 시편의 중앙 부분은 부식이 전혀 일어나지 않은 반면에 양 끝단에서 심한 부식이 발생한 것을 볼 수 있다. 사진3은 압입관의 내부 표면을 나타내고 있으며 시편의 전 표면에서 균일부식이 일어난 것을 볼 수 있다. 사진4는 배관의 표면을 나타내고 있는 사진인인 유입에 의해 방식되어 부식이 발생하지 않는데 압입구간 내부의 표면만이 균일 부식이 발생하였으며 압입구간 외부는 방식전류의 직접적이고 있는 것을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있듯이 실험결과와 수치해석의 결과는 아주 잘 일치하였다.

압입관의 절연부위에 손상이 일어나 압입관과 배관사이의 고리 모양의 공간에 지하수와 같은 전해질이 침입이 가능한 경우의 수치해석 결과를 Fig.4-6에 나타내었다. Fig.4와 Fig.5는 압입관 외부와 내부의 전류밀도 분포를 나타내고 있으며 이때의 전위분포를 Fig.6에 나타내었다. 모델링 결과로부터 예측할 수 있듯이 양

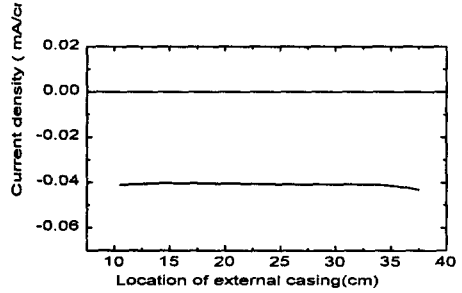


Fig. 4. Stray current density distribution on the external surface of casing

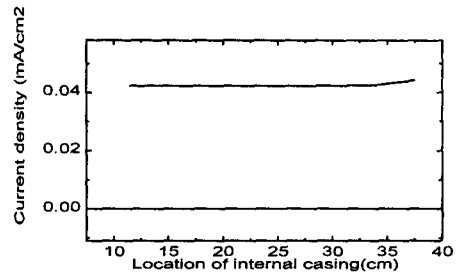


Fig. 5. Stray current distribution on the internal surface of casing

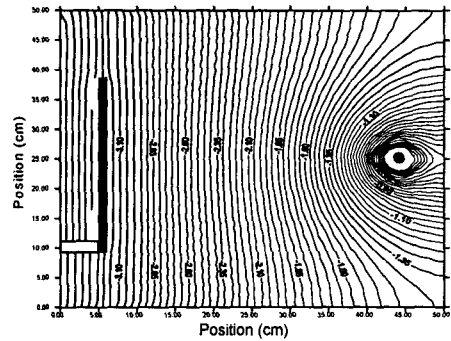


Fig.6 Potential distributions expressed in constant equipotential line in case of having defect in insulation portion

극에서 나온 전류는 압입관 외부 표면에서 유입되어 방식전류로 작용하고 압입관 내부에서 유출되어 부식전류로 작용한다. 이때 유출된 전류는 압입구간내의 배관과 압입관 내부의 고리모양에 존재하는 전해질을 통과하여 다시 배관의 표면으로 유입되므로 배관 표면을 방식하게 된다. 따라서 압입관의 외부는 부식이 전혀 일어나지 않으며 내부는 심한 부식을 일으킬 것으로 기대되며, 압입관 내부에서 유출된 전류가 유입되는 압입구간 내부의 배관 표면은 부

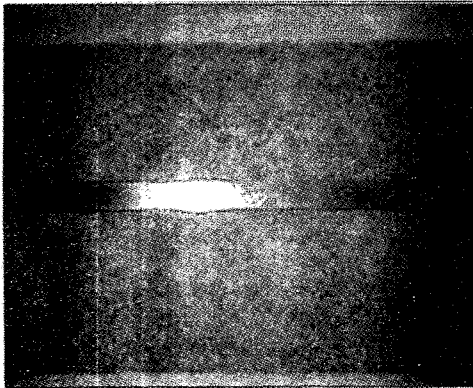


사진 5

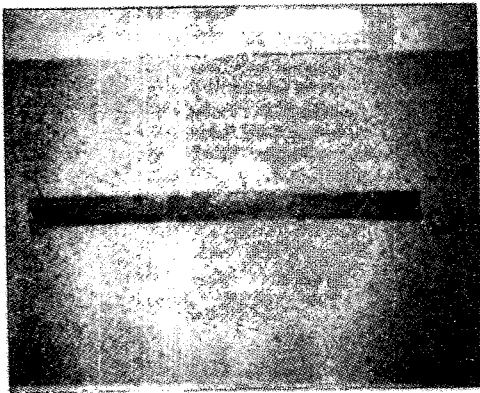


사진 6

식이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 이와같은 경우의 실험결과를 사진5-6에 나타내었다. 사진5는 압입관 외부 표면으로서 부식이 전혀 발생하지 않고 있는 것을 알 수 있으며, 사진6은 압입관의 내부 표면인데 심한 균일 부식이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이와같은 현상은 앞에서 설명한 모델링 결과의 해석에서 기대된 현상이며, 실험결과와 모델링 결과는 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

앞에서 그 타당성이 검증된 모델링 기법을 배관과 압입관이 전기적으로 접촉이 되어 있는 경우와 배류기를 이용한 압입관의 방식대책에 적용하여 그 결과를 예측하여 보았고 방식 효율성을 진단하여 보았다.

압입관의 절연부위에 손상이 존재하면서 압입관과 배관의 접촉(metal touch)이 있는 경우의 모델링 구성이 Fig.7에 나타나 있고 수치해석 결과가 Fig.8-10에 나타나 있다. Fig.8의 전위분포에서 알 수 있듯이 양극으로부터 나온 전류는 압입관의 외면전체와 내면의 일부분으

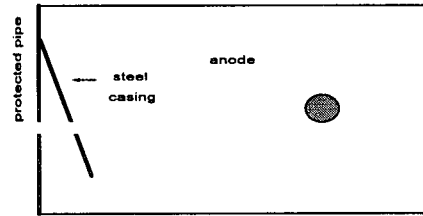


Fig. 7. Boundary conditions of the system in case of casing being contacted with the pipe

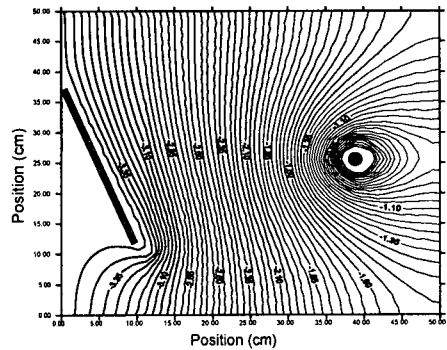


Fig.8 Potential distributions expressed in constant equipotential line in case of metal touch existing

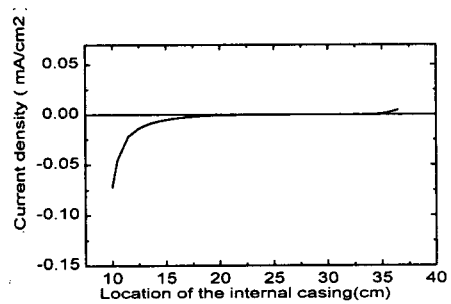


Fig. 9. Stray current density distribution on the internal surface of the casing in case of metal touch existing

로 유입되거나 배관의 열려진 공간으로 유입되어 유입된 부분을 방식시키게 된다. 그러나 Fig.9-10에서 알 수 있듯이 유입된 전류는 배관과 압입관이 접촉된 부위 근처에서 일부가 유출되어 압입관 내부와 배관의 일부분을 부식시킨다. 그러나 대부분의 전류는 접촉부를 통해서 배관으로 돌아오게 된다. 따라서 양극에서 나온 전류가 방식전류로서 작용하지 못하고

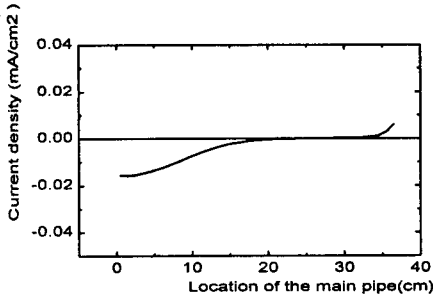


Fig. 10. Stray current density distribution on the surface of the main pipe in case of the metal touch existing

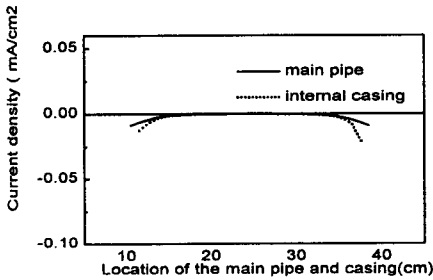


Fig. 11. Stray current density distribution in case of the electrical bonding between main pipe and casing

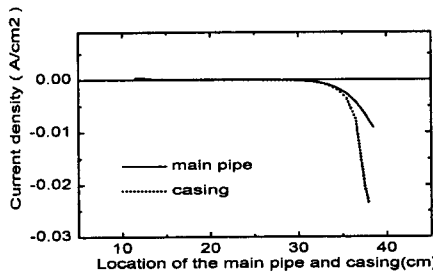


Fig. 12. Stray current density distribution in case of the electrical bonding between main pipe and casing

배관으로 들어가는 경로가 존재할뿐만아니라, 규정에 의해 압입관은 나배관을 사용하도록 되어 있기 때문에 압입관 외면으로의 전류의 유입이 지나치게 커져 전류소모량은 증가하며 상대적으로 방식효율은 감소하게 된다.

전기방식을 하고 있는 동안 압입구간에서 압입관의 부식을 방지하여 수명을 연장시키고자 할 때 배관과 압입관을 배류기로서 전기적으로 연결시켜 등전위가 되게하는 것이 쉽게 생각할

수 있는 방식방법중의 하나이다. 이에 대해 모델링을 적용하여 보았고 그 결과를 Fig.11-12에 나타내었다. Fig.11은 압입관의 절연부가 양쪽 모두 파손되어 방식전류가 양쪽의 결합을 통해 들어갈 수 있는 경우의 배관과 압입관의 전류분포이다. 이 경우에는 그림에서 알 수 있듯이 배관과 압입관의 중간 부위에도 극히 미세한 양이지만 방식전류가 도달하기 때문에 전 표면에 걸쳐 방식이 이루어 지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.12는 한쪽의 절연부만이 파손되어 이쪽으로만 방식전류가 들어갈 수 있는 경우이다. 그림에서 보면 결합부위 반대쪽 안쪽 부위에는 방식전류가 미치지 못하여 배관과 압입관 모두에서 부식이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 수치해석 결과에 의하면 배류기를 사용하는 것이 압입관과 배관의 정확한 상태를 알지 못하는 경우에는 효과적이지 않다는 것을 예측할 수 있다.

## 5. 결 론

음극 방식은 지하 매설배관이나 여러 철구조물의 방식이나 부식속도를 감소시키는데 널리 사용되고 있는 방식방법중의 하나이다. 그러나 압입구간의 경우 압입관과 배관은 미주전류의 영향으로 부식이 발생하여 배관과 압입관의 수명을 단축시킬 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 음극방식 시스템이 작동하고 있는 경우, 압입구간에서의 미주전류의 거동과 영향에 관한 모델링을 여러 가지 경우에 대해서 경계요소법을 이용하여 수행하였으며 이를 실험결과와 서로 비교 하여 모델링의 타당성을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절연부의 손상이 없는 경우에는 모델링에 의해 압입관의 외부의 양끝단에서 양극화가 일어나 부식이 발생할 것을 예상할 수 있었으며 이는 실험결과와도 일치하였다. 그리고 배관과 압입관의 내부는 유입된 전류에 의해 일반적인 대기부식환경보다 부식이 더욱 심하게 일어나는 것을 실험에 의해 관찰할 수 있었다.

2) 압입관의 절연부에 손상이 있을 경우에는 모델링에 의해 압입관 내부에 미주전류의 유출로 인하여 부식이 심하게 일어날 것을 예상할 수 있었으며 이는 실험결과와도 일치하였다.

3) 배관과 압입관이 전기적으로 접촉이 되어 있을 경우 접촉부위 근처에서 부식이 발생할 것으로 예상할 수 있었다.

4) 압입관의 방식을 위하여 배류기를 사용할 경우 압입관의 절연 상태에 의해 방식 효과가 결정 된다는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. K. Nisancioglu, "Modern Aspects of Electrochemistry", B.E.Conway, J.O'M. Bockris and R.E.White Editors, Chap.3, Plenum Press, New York(1992)
2. J. Newmann, *J. Electrochem. Soc.*, 138, 3554 (1994)
3. J. Newmann, *J. Electrochem. Soc.*, 144, 450 (1997)
4. F. Brichau and J. Deconinck, *Corrosion*, 50, 39 (1994)