

# 환경에 따른 구조용 강의 열화거동 분석

이창순\*    박인규\*\*    김용기\*\*\*    장세기\*\*\*\*

## Analysis of Degradation Behavior of Structural Steels Depending on Environment

Chang-Soon Lee    In-Gyu Park    Yong-Ki Kim    Se-Ky Chang

### ABSTRACT

Electro chemical corrosion tests were conducted on two structural steels, SS400 and SM490A, in various solutions with different pH values. All materials showed typical active corrosion behaviors in the solutions, and corrosion potential and current density were measured from the slopes obtained from the Tafel curves using linear polarization method. Corrosion potential increased in the acidic region and then decreased depending on the pH values of the solutions. All materials showed the fast corrosion rate in artificial acid rain(pH=4.7), but the slower corrosion rate was observed in NaOH solution(pH=12.0) for SS400 and in distilled water(pH=7.0) for SM490A, respectively, which is thought to come from the difference in chemical composition of two alloys. Generally homogeneous corrosion occurred in acid rain condition, and almost no corrosion was observed in distilled water in both alloys. NaOH solution produced more corrosion than distilled water, and more corrosion had progressed in SS400 than in SM490A in 3.5% NaCl solution.

### 1. 서론

부식(corrosion)이란 금속(또는 합금)과 주위 환경 사이의 화학적 반응으로 인해 야기되는 파괴적인 현상으로 인간생활과 밀접한 관련이 있다<sup>[1-4]</sup>. 미국을 비롯한 선진국들에서도 부식으로 인한 경제적 손실이 GNP의 3~5%에 달하는 것으로 보고되고 있으며<sup>[1,5]</sup>, 우리나라에서도 1994년의 성수대교 붕괴사고, 1996년의 당산철교 철거사건, 전국의 상수도 배관의 부식과공으로 인한 누수사건 등과 같이 많은 구조물에서 부식으로 인한 피해사례가 빈번히 발생하고 있으며, 그 외에도 각종 배관, 항만시설, 콘크리트 구조물의 철근 등에서도 부식문제가 광범위하게 일어나고 있다. 이런 직접적인 경제적 손실 외에 부식으로 인한 조업중지, 제품손실, 효율저하, 환경오염 및 과설계 등에 의한 간접적인 경제적 손실도 추정하기가 힘들 정도로 훨씬 더 클 것으로 예상된다<sup>[1,2]</sup>.

최근의 산업발전과 더불어 금속 구조물, 교량, 선박, 항공기, 철도, 건축구조물 및 기계장치와 설비 등이 늘어나고 있으며, 이들 구조물은 각종 환경조건 하에서 사용되고 있다. 그 외에도 자동차와 냉난방 장치의 보급증가에 따른 화석에너지의 소비량이 증대되어 각종 오염물질의 배출도 증대되어 환경오염을 가속화시켜 이들 오염물질이 대기 중의 수분과 결합하여 금속 구조물의 부식을 촉진시키고 있다<sup>[6-8]</sup>.

\*

\*\*

\*\*\*

\*\*\*\*

전차선로 가선재의 경우도 도심지역, 공업지역, 해안인접지역, 산악지역 등 다양한 지역에 가설되어 있어서 그에 따른 부식환경도 다르게 나타난다. 전차선로 중 가선재료는 대기오염, 산성비 및 해수에 근접한 지역에서는 염소이온( $Cl^-$ )에 의한 다양한 부식환경에 항상 노출되어 있으며, 이에 따른 재질의 파손 및 보수유지에 따른 비용의 증가를 고려할 때 적절한 환경오염 방지대책이 시급히 마련되어야 한다.

본 연구는 전차선로 가선재의 환경오염에 대한 방지대책을 마련하기 위한 기본 연구로서, 구조용으로 사용되고 있는 강의 각종 환경에 따른 부식거동을 파악하고자 실시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 실험 재료

본 연구에 사용된 재료는 구조용으로 사용되고 있는 두 가지의 재료를 사용하였으며, 그 화학적 조성을 <표 1>에 나타내었다. SS400은 기계구조물, 선박 및 차량, 건축과 교량 등에 사용되는 열간압연 강재이며, SM490A는 철도 차량등에 많이 사용되고 있는 용접구조용 압연강이다.

Table 1. Chemical compositions of experimental materials (wt.%)

| material | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Fe   |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| SS400    | 0.18 | 0.34 | 0.9  | 0.024 | 0.02  | 0.04 | 0.02 | bal. |
| SM490A   | 0.16 | 0.40 | 1.33 | 0.019 | 0.005 | -    | -    | bal. |

본 연구에 사용된 재료를 처리하기에 적당한 크기로 절단한 후에 호마이카로 포장하여 마운팅하였다. 그 다음 이들을 SiC 연마지(#800~2000)로 연마하고, 알루미나( $Al_2O_3$ ) 분말로 3~1 $\mu m$ 까지 미세연마하였다. 연마가 끝난 시편은 Keller 용액을 이용하여 약 20초간 부식시킨 후에 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다. 미세조직을 관찰한 결과를 <그림 1>에 보여주고 있는데, 평균입도가 SS400의 경우 37.14 $\mu m$ , SM490A의 경우 23.58 $\mu m$ 으로 각각 나타났다.

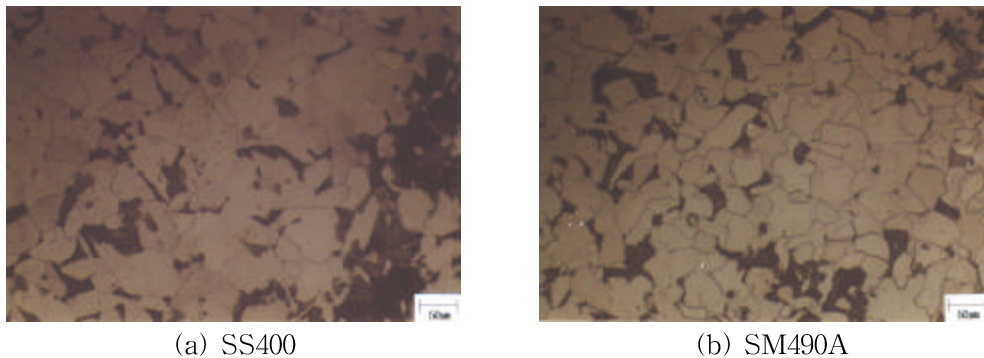


Fig. 1. Optical microstructures of experimental materials

### 2-2. 부식 시험

시험 재료의 부식전위 및 부식속도를 측정하기 위해 전기화학적 부식시험을 실시하였다. 모든 시편은 1cm×1cm의 크기로 절단한 후 구리(Cu) 도선을 연결하여 뿔납(soldering)시킨 후 호마이카로 포장하여 마운팅하였다. 마운팅된 시편은 SiC 연마지와 알루미나 분말을 이용하여 연마한 다음 부식시험을 실시하였다. 부식전위와 부식속도는 정전압장치(potentiostat, Gammy 2400)를 사용하여 전기화학적으로 측정하였으며, <그림 2>에 부식시험장치의 전체적인 계통도를 보여주고 있다. 표준전극(RE: reference electrode)으로는 포화칼로멜전극(SCE: saturated calomel electrode)을 사용하였고, 상대전극(CE: counter electrode)으로는 백금(Pt)을 사용하였다. 부식용액은 pH를 달리하는 아래 <표 2>의 4 가지 용액을 사용하였으며, 부식반응으로 생긴 기포가 시편표면에 부착

되는 것을 막고 용액의 균일성을 유지하기 위해 자석식 교반기로 교반하였다. 부식전위는 시편을 용액에 담그고 두 시간이 경과한 후에 측정하였으며, 부식속도는 potentiostat 방법으로 양극분극 및 음극분극으로 부식전위를 5~10mV 만큼 변화시키면서 15분이 지난 후 전류값을 측정하여 Tafel 곡선으로부터 선형분극법(linear polarization method)을 이용하여 구하였다.

전차선로 가선재등 철제 구조물의 경우 여러 부식환경에 노출되어 있으나 그 중에서 특히 산성비에 의한 부식이 큰 비중을 차지하고 있다. 산성비는 보통 pH<5.6의 범위이며 대기 중의 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>이 산화하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 HNO<sub>3</sub>을 만들어서 강재를 부식시키는 것으로 알려져 있다<sup>[9]</sup>. 우리나라의 산성비는 대략 pH=4~6정도이고, 염소이온 농도는 수십~수백 ppm이다. 따라서 본 연구에서는 실제 산성비를 분석하고 이에 맞게 인공산성비를 아래 <표 3>과 같이 제조하여 사용하였다.

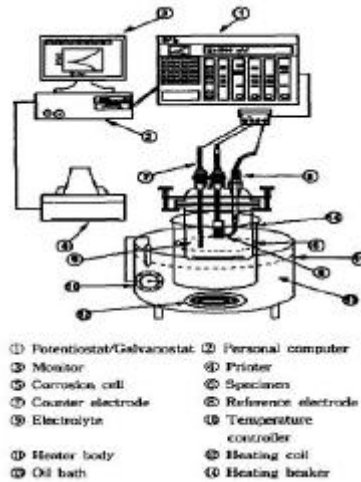


Fig. 2. Schematic diagram of potentiostatic polarization equipment

Table 2. pH values of used solutions for corrosion test

| solution        | pH   |
|-----------------|------|
| acid rain       | 4.7  |
| distilled water | 7.0  |
| NaOH            | 12.0 |
| 3.5% NaCl       | 6.2  |

Table 3. Analysis of acid rain

| component                     | natural acid rain (mg/ml) | artificial acid rain (mg/ml) |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1.98                      | 0.9                          |
| Cl                            | 3.41                      | 3.592                        |
| K <sup>+</sup>                | 0.77                      | 0.74                         |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 22.44                     | 4.28                         |
| Mg <sup>+</sup>               | 0.50                      | 0.486                        |
| Na <sup>+</sup>               | 1.84                      | 0.712                        |
| Ca <sup>+2</sup>              | 5.4                       | 0.4                          |

### 3. 실험 결과 및 고찰

pH를 달리하는 각 수용액 내에서 실시한 부식시험 결과를 아래 <그림 3>에 보여주고 있다. 각 수용액 내에서 재료에 따라 전형적인 활성화 분극거동을 보여주고 있으며, Tafel 분극곡선의

기울기로부터 구한 부식전위( $E_{corr}$ )와 전류밀도( $I_{corr}$ )를 <표 4>와 <표 5>에 각각 나타내었다. 각 용액의 pH에 따라 부식전위는 산성영역에서는 증가하다가 그 후 감소하였다. 부식속도는 두 재료 모두 pH=4.7인 산성비 용액에서 가장 빨랐으나, SS400의 경우는 pH=12.0인 NaOH 용액에서, 반면에 SM490A는 pH=7.0인 증류수에서 부식속도가 가장 느리게 나타났다. 이는 두 재료의 합금성분의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 탄소강과 저합금강의 경우 일반적으로 대부분의 환경에서 활성화 부식거동을 보이는데, 이는 이들이 용액 조성, pH 값, 유속, 산화제 유무, 온도 등과 같은 인자에 의해 결정되는 부식속도로 지속적으로 부식이 일어난다는 것을 의미한다<sup>[10]</sup>.

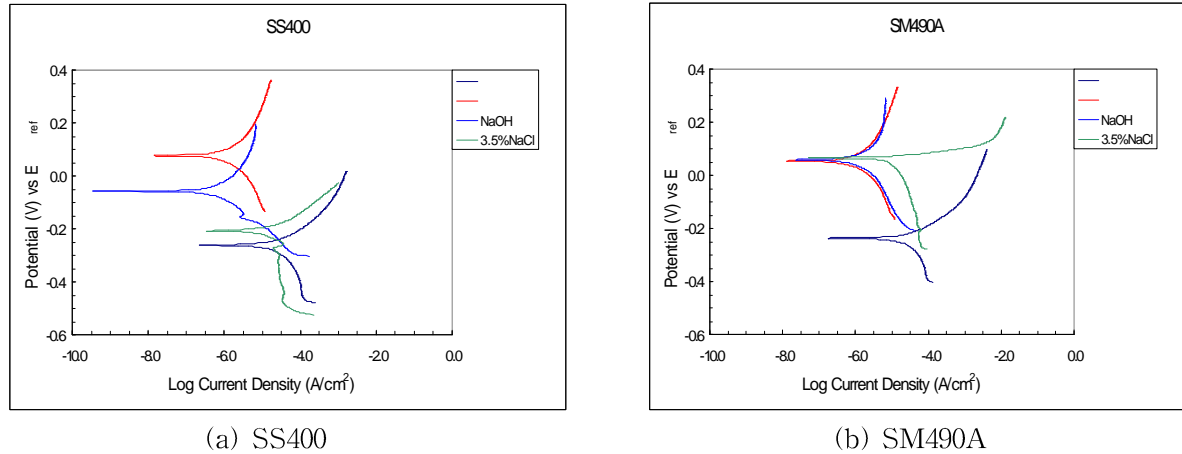


Fig. 3. Polarization curves of structural steels in various solutions

Table 4. Corrosion potential ( $E_{corr}$ ) of materials in various solutions

| $E_{corr}$ (mV) | acid rain<br>(pH = 4.7) | distilled water<br>(pH = 7.0) | NaOH<br>(pH = 12.0) | 3.5% NaCl<br>(pH = 6.2) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|
| SS400           | -261.8                  | 77.3                          | -58.0               | -207.0                  |
| SM490A          | -238.2                  | 52.5                          | 57.8                | 64.2                    |

Table 5. Corrosion current density ( $I_{corr}$ ) of materials in various solutions

| $I_{corr}$ ( $\mu$ A/ $cm^2$ ) | acid rain<br>(pH = 4.7) | distilled water<br>(pH = 7.0) | NaOH<br>(pH = 12.0) | 3.5% NaCl<br>(pH = 6.2) |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|
| SS400                          | 91.28                   | 2.863                         | 1.055               | 31.19                   |
| SM490A                         | 78.42                   | 3.755                         | 15.98               | 26.14                   |

SS400과 SM490A를 각 수용액 내에서 부식시험을 실시한 후에 관찰한 표면의 상태를 각각 <그림 4>와 <그림 5>에 보여주고 있다. 산성비 용액 내에서는 두 합금 모두 전반적으로 고르게 부식이 일어난 것을 알 수 있으며, 증류수 내에서는 거의 부식이 일어나지 않은 것으로 보여진다. NaOH 수용액 내에서는 증류수에서 보다 많은 부식이 일어났으며, 3.5% NaCl 용액에서는 SS400보다 SM490A에서 부식이 더 많이 진행된 것을 볼 수 있다.

철강재료의 경우 산성 또는 중성의 pH 분위기에서 부식에 대한 저항성이 낮으며, 용존산소가 존재할 경우에는 더 심하다. 따라서 철강재료의 경우 안전한 사용을 위해 표면을 도금하거나 음극 방식 처리를 한다. 철계합금인 경우 보통의 대기에만 노출되어도 가끔 사용이 어려울 정도로 부식이 일어나기도 하는데, 대기 중의 습도, 온도, 진습주기, 염소이온의 존재 및 황과 질소화합물 같은 공해물질 등이 부식거동에 영향을 미친다. 대기 중에는 일정량의 수분이 존재하며, 습도가 대략 60% 이상이 되면 부식속도가 증가하게 된다. 보통 이슬, 비, 해수 등에 의해 금속표면에 수분층이 형성될 때 습식부식이 발생하며, 얇은 수분층은 대기 중의 고농도 기체를 분해시켜 금속표면에 농축용액을 형성함으로써 단기간에 높은 부식속도를 일으킨다<sup>[10]</sup>.

공중부유 오염물은 심한 대기부식을 일으키는데,  $SO_2$ 와 같은 기체는 금속표면에 선택적으로 흡

착하여  $\text{SO}_3$ 을 형성하는 촉매제로 작용함으로써 습한 분위기에서  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 를 형성하거나, 물과 염소를

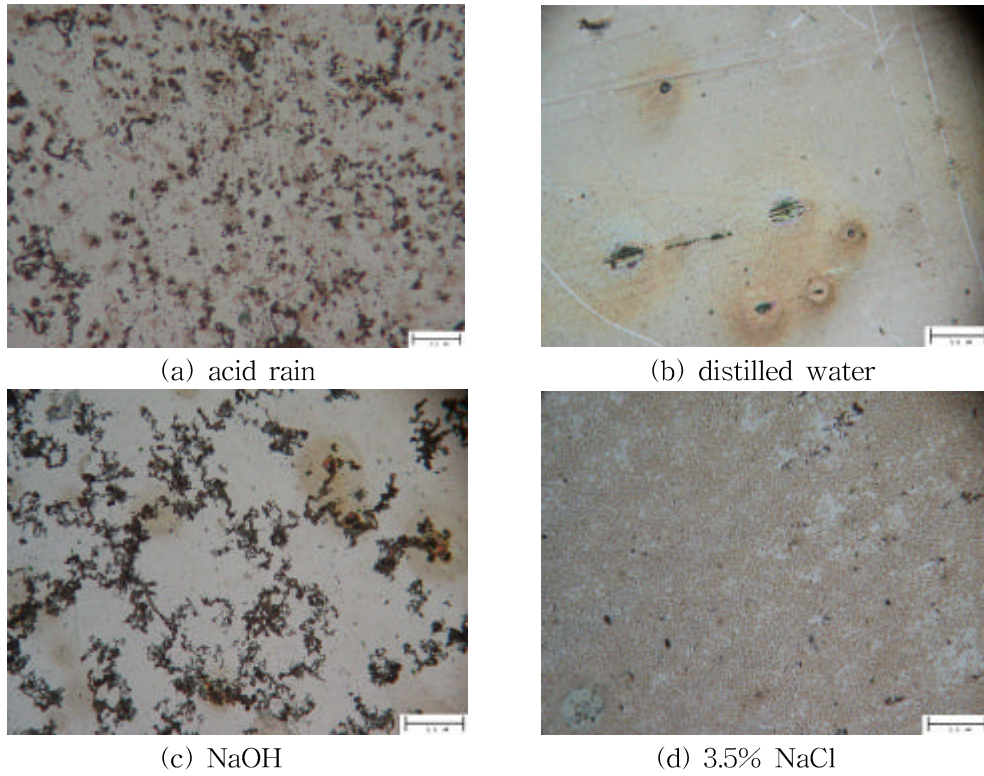


Fig. 4. Optical microstructures of SS400 after corrosion test in various solutions

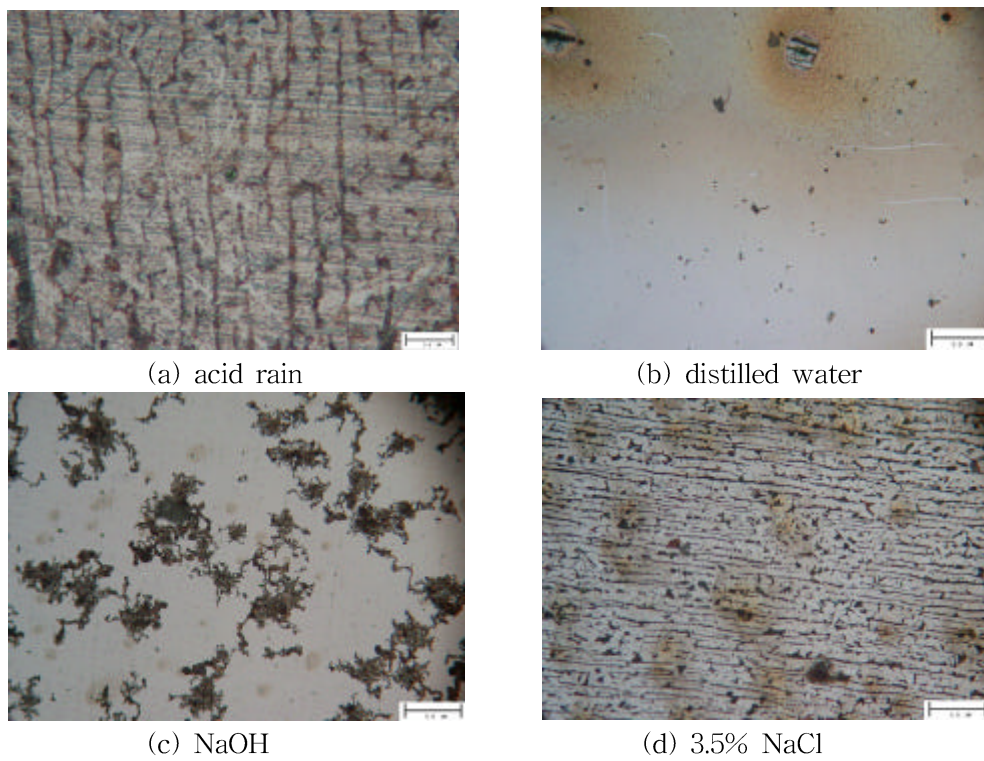


Fig. 5. Optical microstructures of SM490A after corrosion test in various solutions

흡착하여 국부전지를 형성하게 되는 먼지 같은 입자들은 합금의 부식을 촉진시킨다. 기후조건도

부식속도에 여러 효과를 보이는데, 추운 기간이라도 대기 중에  $\text{NO}_x$ 와  $\text{SO}_2$  같은 연소합성물을 증가시키는 연료를 사용하면 여름보다 겨울이 더 심각할 수도 있다. 주기적으로 비가 오게 되면 표면이 항상 젖은 상태에 있는 경우에 비해 세척작용을 일으켜 더 유용할 수도 있다. 더욱이 불용성 부식생성물이 존재하게 되면 수분을 유지하게 하여 금속표면이 젖은 상태에서 지속적인 부식을 일으키게 된다<sup>[10]</sup>.

#### 4. 결론

구조용으로 사용되고 있는 SS400과 SM490A에 대한 전기화학적 부식시험을 실시하였으며, 분극곡선으로부터 Tafel 외삽법을 이용하여 각 수용액에 대한 부식전위와 부식전류밀도를 측정하여 부식거동을 관찰한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 각 수용액 내에서 재료에 따라 전형적인 활성화 분극거동을 나타내었다.
- 2) 각 용액의 pH에 따라 부식전위는 산성영역에서는 증가하다가 그 후 감소하였다. 부식속도는 두 재료 모두 pH=4.7인 산성비 용액에서 가장 빨랐으나, SS400의 경우는 pH=12.0인 NaOH 용액에서, 반면에 SM490A는 pH=7.0인 증류수에서 부식속도가 가장 느리게 나타났다. 이는 두 재료의 합금성분의 차이에 기인한 것으로 사료된다.
- 3) 산성비 용액 내에서는 두 합금 모두 전반적으로 고르게 부식이 일어난 것을 알 수 있으며, 증류수 내에서는 거의 부식이 일어나지 않은 것으로 보여진다.
- 4) NaOH 수용액 내에서는 증류수에서 보다 많은 부식이 일어났으며, 3.5% NaCl 용액에서는 SS400보다 SM490A에서 부식이 더 많이 진행된 것을 볼 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 국가지정연구실사업의 철도차량 구조물의 잔존수명 평가기술 개발연구의 지원에 의해 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 이의호, 이학렬, 황운석, 김광근 (1999), “부식과 방식의 원리”, 동화기술.
2. 이학렬 (1995), “금속부식공학”, 연경문화사.
3. 손운택 (1981), “금속부식학”, 남영문화사.
4. 전대회 (1975), “부식과 방식”, 한국해양대학 해사도서출판부.
5. M.G. Fontana and N.D. Greene (1978), “Corrosion Engineering”, McGraw Hill.
6. 임우조, 정기철, 안석환, 윤병두 (2000), “해양환경중에서 SS400강재의 간극부식거동에 관한 연구”, 한국박용기관학회 2000년 추계학술대회논문집, pp.M-1~M-6.
7. 임우조, 정기철, 구영필, 윤병두 (2001), “해양환경 중에서 SS400강재의 간극부식방지 특성에 관한 연구”, '01년도 한국박용기관학회 춘계학술대회논문집, pp.M-152~M-157.
8. 임우조, 윤병두 (2001), “해양환경 중에서 SS400 강재의 간극부식거동에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제25권 6호, pp.1336~1340.
9. 정원석, 김정구, 서창제, 이병훈 (1997), “산성비 분위기에서 교량용 강재 SWS400의 용접부 부식에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제15권 5호, pp.498~507.
10. R.H. Jones (2001), “Environmental Effects on Engineering Materials”, Marcel Dekker, Inc.