

디젤발전 자켓냉각시스템 열성능 향상 연구

이재근[†], 문전수*, 윤석원*, 박필양*

*한전전력연구원 녹색성장연구소

Performance Research of a Jacket Cooling Water System in a Diesel Electric Generation

JAEKEUN LEE[†], JEONSOO MOON*, SEOKWON YOON*, PILLYANG PARK*

*Green Growth Lab., Korea Electric Power Research Institute,
65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760, Korea

ABSTRACT

One of the most efficient techniques improving the heat transfer performance of a diesel electric generation is a corrosion control in jacket cooling water system. The environmental parameters most affecting corrosion are dissolved salt concentration, temperature, and pH of cooling water. No corrosion occurs in carbon steel probe at pH 11 in normal operating condition of diesel electric generation cooling water. pH control agent in this study is trisodium phosphate. pH control appears to be the most convenient way to enhance the thermal performance of a diesel electric generation.

KEY WORDS : Heat transfer(열전달), Cooling water(냉각수), Corrosion(부식), Diesel electric generation(내연발전), SEM(주사전자현미경), Dissolved oxygen(용존산소)

Nomenclature

W : mass loss, mg
D : density, g/cm³
A : area, inch²
T : time, hr
Cr : corrosion rate, mpy
R : resistance, milliohm
i : current, milliamperes
E : voltage, millivolts

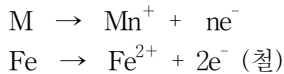
1. 서 론

열전달은 엔진성능, 연료효율, 열교환기 재질 선정, 배출가스 등에 직접적인 영향을 미친다. 디젤엔진의 효율은 연소로 발생한 열을 얼마나 효과적으로 열교환기에서 열전달이 이루어지는가에 달려있다. 열교환기 성능은 열전달 표면에 스케일 형성이나 부식성 유체에 의한 표면변질에 의해 저하된다. 열전달 능력에 영향을 주도록 표면이 변경될 때, 표면이 오염된다고 한다. 이러한 오염저항이 발생할 때, 열저항이 증가하고 열교환기는 설계치 성능이하의 에너지가 전달되게 한다¹⁾. 국내에서는 35개

[†]Corresponding author : jaeklee@kepri.re.kr

[접수일 : 2009.10.25 수정일 : 2009.12.8 게재확정일 : 2009.12.15]

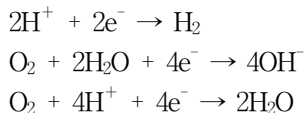
도시내연발전소를 운영하고 있으며, 발전기에 필요한 발전용수를 지하수와 해수 담수화로 공급하고 있다. 내연발전기의 불필요한 열제거를 위해 냉각수가 공급되고, 열교환기를 통과한 냉각수는 냉각탑에서 냉각 후 재사용한다. 냉각탑에서 수분이 일부 증발하고 보충수에 함유된 불순물이 농축되어 스케일과 부식이 빈번하게 발생한다. 냉각계통에서 발생하는 부식은 냉각계통 설비수명을 단축하고, 운전효율 감소와 냉각수 누출 등 각종 장애가 발생한다. 물과 금속면에서 부식이 일어나기 위해서 금속면에 전위차가 발생하여야 하며, 전위가 낮은 부위에서 높은 부위로 전류가 흐르게 된다²⁾. 이러한 금속의 부식은 전기화학적 반응이다. 금속의 용출과정은 금속이온이 생성되어 용액 속으로 녹는 과정이다. 금속 부식 반응에서 음극반응은 다음 식으로 표현된다.



양극 환원반응 중 가장 간단한 반응은 산용액 중의 수소이온의 환원반응을 들 수 있고, 다른 하나는 용액중의 산화이온의 환원반응인 redox 반응을 들 수 있다. 대표적인 redox 반응 예는 제이철이 산화제일철로 환원반응이다.



양극 환원반응의 대표적인 예로 수소 발생반응과 산소환원반응을 들 수 있다. 용존산소의 환원은 공기 중에 노출되어 있는 중성 및 산성용액에서 주로 발생하는 데, 각각의 환원반응은 다음과 같이 표현된다³⁾.



부식율 측정법으로 금속시편 무게감량, 전기적 측정, 시험용 열교환기, 수질에 의한 방법을 들 수 있다. 부식율은 mils penetration per year(MPY)²⁾ 표

기하며 다음 식으로 계산된다.

$$MPY = \frac{543 W}{DAT}$$

여기서 W는 무게감량(mg)이고, D는 밀도(g/cm³), A는 면적(inch²), T는 경과시간(hr) 이다.

부식율이 2mpy보다 크게 발생하였다면 부적절한 냉각수 처리가 이루어졌음을 의미한다. 이러한 부식율을 줄이기 위해 부식억제제가 냉각수 순환 시스템에 많이 사용된다. 철 부식억제제로 대표적인 음극 부식억제제는 크롬산염, 아질산염, 몰리브덴산염, 인산염류가 양극 부식억제제로는 아연염, 중합인산염, 유기인산염, 아민 등을 들 수 있다⁴⁾. 이러한 부식억제제의 효과는 용액의 부식성, 농도, 온도 증가에 따라 감소한다.

본 연구는 도시 내연발전소 냉각설비 운영의 개선하고 디젤발전 자켓수 냉각부분의 부식반응을 제어함으로써 냉각시스템 수명연장과 열효율 향상을 위한 최적의 운전조건을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 실 험

2.1 도시발전 자켓냉각 시스템

도시지방에서 운영되고 있는 디젤발전소 자켓냉각 시스템⁵⁾은 Fig. 1과 같이 엔진에 연료를 공급하는 연료탱크, 발전기, 발전기와 연결되어 있는 디젤엔진 자켓, 엔진자켓의 냉각을 위한 열교환기, 열교환기에서 열을 냉각수로 흡수하는 냉각탑, 냉각탑에서 손실된 물을 보충하기 위한 원수탱크, 원수의

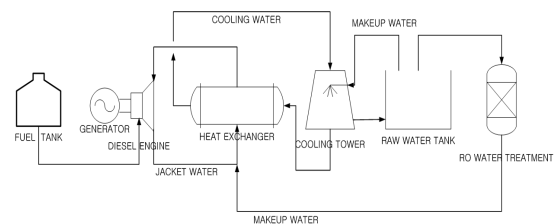


Fig. 1 Schematic diagram of diesel electric generator system.

물을 정제하기 위한 역삼투압 물처리 장치로 구성된다. 자켓냉각수가 순환하는 배관과 디젤엔진 자켓은 탄소강이 사용되고 있다. 도서발전수명과 밀접한 디젤엔진 성능은 효과적인 냉각시스템을 관리에 의존하며, 냉각시스템의 부식발생을 최대한 억제하는 기술과 연관되어 있다. 특히 밀폐순환식 냉각수계통인 자켓냉각수 계통에서의 부식반응은 pH와 밀접한 관련이 있다. 금속표면에서 산소환원 반응시 OH⁻ 이온의 생성으로 pH가 증가하며 under-deposit 부식이 발생하면 pH가 감소한다⁴⁾.

2.2 냉각시스템 부식실험 장치

도서발전 자켓냉각계통의 부식측정을 위해 rohback cosasco systems(RCS)사의 model RCS-1 부식측정기(corrater)가 사용되었다. 부식은 금속이 전도성 액체와 접촉할 때 발생하는 전기화학반응이다. 부식반응은 금속과 액체 접촉면에서 금속원자가 양전하로 변하며, 전자를 금속표면에 넘겨주고 액체 중에서 양이온이 되는 순간반응이다. 금속은 전자를 축적할 수 없으므로 2차반응이 동시에 일어나야 한다. 금속은 양이온의 중화나 음이온이 생성되는 액체중의 성분으로 전자를 이동시켜야 한다. 전자가 금속으로 침투되는 1차반응은 산화반응이며 전자가 금속에서 이탈하는 2차반응은 환원반응이다. 철의 경우 산화환원반응의 결과, 철 이온이 수산화이온과 반응하여 Fe(OH)₂를 생성하거나 녹이라 불리는 FeO나 Fe₂O₃가 형성된다. 전기화학 산화반응인 부식율은 금속조성, 균질도, 입상구조, 표면처리, 산화물, 용액온도, pH, 용존산소 및 용존기체, 유속, 용액의 화학조성 및 물리적 특성등 다양한 자연요인에 영향을 받는다.

RCS-1 corrater는 접촉면의 조건을 손상시키지 않는 범위에서 알려진 표면적의 금속 성분과 용액간의 접촉면에서 전기저항을 측정하는 방식으로 부식율을 계산하는 분극저항법이 적용된다. 필요로 하는 부식정보를 위해 시험 금속성분은 배관이나 용기의 재질과 같은 재질로 선정하여 용액에 침투시켜야 한다. 분극저항이라 불리는 접촉면 측정저

항은 부식율의 역함수이다. 즉

$$R = \frac{E}{i} \text{ 이므로}$$

부식율은 다음의 방정식으로 표현된다.

$$Cr \text{ (mpy)} = \frac{2,280}{R \text{ (ohms)}}$$

여기서 test element: 5cm²

Corrater 전극으로 사용되는 probe는 자동 부식시편(automatic coupon)으로서 2개의 시편간의 저항변화를 측정함으로써 부식시편의 금속손실을 결정하는 방법이다. 본 연구에 사용한 부식시편은 RCS사의 carbon steel 전극 Part no: 060814-K03005가 사용되었다. Fig. 2는 1쌍의 전극이 장착된 모듈화된 부식 sensor의 assembly 사진이다. RCS corrater²⁾는 두 전극간의 미세한 전압차를 이용하여 연속적인 부식율 측정이 가능한 장점이 있으며 부식률의 신뢰도를 높이기 위해 96시간 측정하여 평균값을 부식율로 채택하였다.

2.3 냉각시스템 용액 제조 및 중화

본 실험은 도서발전 중 백령도와 울릉도 냉각용수와 같은 조건의 나트륨농도를 탄산칼슘 당량농도로 단위 환산한 50ppm as CaCO₃ equivalent⁶⁾ 용액으로 제조하



Fig. 2 Modular electrode probe assembly.

기 위해 Junsei의 NaCl 시약을 사용하여, 매 실험 균질한 용액을 공급하기 위해 1000ppm as CaCO₃(NaCl) 저장용액을 미리 제조하여 사용하였다. 용액 pH는 Kanto Chemical의 Trisodium phosphate(Na₃PO₄·12H₂O) 시약을 사용하여 0.1 N Na₃PO₄·12H₂O 중화용액을 제조한 후, Metrohm의 751 GPD Titrimo를 사용하여 조절하였다⁴⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 도서발전 자켓냉각 시스템

부식은 측정 가능한 질량감소나 침투율의 변화가 진행되고 전자를 공유함으로써 물질 원래의 에너지준위로 복귀하려는 전기화학적 과정이다. 사실상, 부식은 정제된 금속이 광석상태의 화학조성으로 되돌아가려는 경향을 보이는 것이다. 이 과정은 복잡해 보이지만, 부식은 음극, 양극, 전해질, 금속 경로의 4가지 기본 요소만을 필요로 한다. 부식율과 부식정도는 부식이 일어나는 구조의 원자배열과 환경적인 인자에 의해 결정된다. 철이나 강철로 구성된 물질에서 금속이온이 음극표면에서 생성되고 배출된 전자는 구조를 통하여 양극표면으로 진행된다. 본 실험에서는 자켓냉각기관 부식에 가장 영향을 주는 환경인자를 파악하고 부식을 최대한 억제할 수 있는 방법을 제시하고자 매개변수를 변화시키는 실험을 수행하였다.

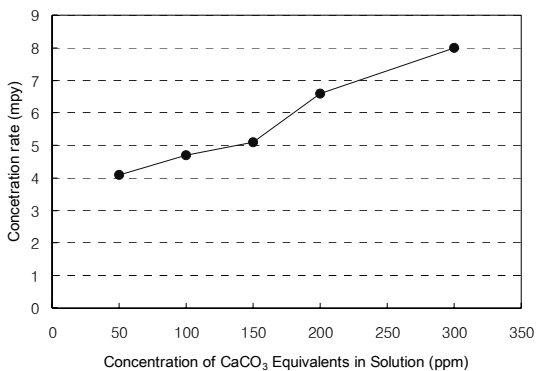


Fig. 3 Effect of NaCl solution concentration on corrosion of carbon steel.

Fig. 3은 냉각수 염도에 따른 탄소강 부식율 실험 결과이다. 도서발전소 지하수의 일반적인 나트륨 양이온 농도 범위를 탄산칼슘당량으로 환산한 농도 50-300ppm에서 부식율은 농도증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 부식율이 일반적으로 용액의 전도도가 증가할수록 증가하는 경향 때문이다. 탄산칼슘당량(calcium carbonate equivalent)은 다양한 양이온과 음이온의 농도를 서로 정량적으로 비교하기 위한 기준단위로 사용된다. Na⁺양이온의 경우엔 농도에 2.18을 곱한 값이 CaCO₃ equivalent 농도값이다. 전도도가 낮을 때에는 단지 인접한 공간의 음극과 양극에서 작용하고, 음극반응 생성물이 양극 산소환원반응을 제한하는 경향이 있다. 고전도도는 인접한 음극과 양극간의 부식전류를 높임으로써 분극현상이 저하된다. 그러나 NaCl염 부식 임계농도인 3%이상을 초과하면 염농도가 용존산소량을 줄여 결과적으로 부식율이 감소하는 현상이 일어난다고 보고 되어 있다³⁾. 본 실험의 염농도는 NaCl 임계농도에 10%에 지나지 않으므로 염농도 증가에 따른 부식율 증가는 자연스런 현상으로 이해된다.

Fig. 4는 Na⁺양이온 CaCO₃(calcium carbonate) equivalents 환산농도 100ppm, 80℃에서 pH변화에 따른 탄소강 부식율 실험결과이다. 부식율이 pH 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. pH 6에서 8.6mpy 이던 부식율이 pH 10에서 5.5mpy까지 감소했다. 부

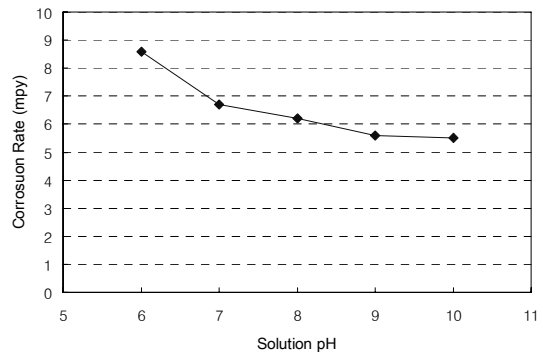


Fig. 4 Effect of pH on corrosion of carbon steel using Na₃PO₄·12H₂O in NaCl solution.

식율은 초반엔 현저히 감소하지만 pH가 10까지 증가할수록 감소율이 둔화되는 현상이 나타난다. 일반적으로 부식율은 양극환원반응에서 pH변화에 따라 변화한다. pH 7과 pH 10 범위에서는 견고하지 않은 다공성 산화철이 표면에 부착되어 부착산화물 하부의 pH를 일정하게 유지하는 역할을 하므로 부식율이 거의 일정한 수준으로 유지되는 것으로 보인다³⁾. 이 pH범위의 부착산화물을 통과하는 용존 산소의 일정한 확산에 의해 부식율이 좌우된다. 산화물 하부의 금속표면에서 산소는 전자를 받아들이는 양극반응을 거쳐 다음의 식과 같이 환원된다.

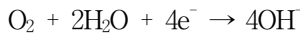


Fig. 5는 Na⁺양이온 CaCO₃(calcium carbonate) equivalents 환산농도 50ppm 용액에서, 온도와 pH 변화에 따른 부식율 실험결과를 보여준다. 60°C, 75°C, 90°C 온도에서 용액온도가 증가할수록 부식율이 증가하고, pH 10 이상인 pH 11에서의 부식율이 감소하여 60°C와 75°C의 경우엔 부식이 거의 없는 0mpy 수준까지 급격히 감소함을 발견하였다. 상온 이상으로 가열되는 수용액 중의 스틸은 온도가 상승함에 따라 부식율이 증가하나, 용존산소의 용해도는 감소하므로 열린 용기내의 부식율이 80°C 이상에서는 감소하는 것으로 알려져 있다. 본 실험은 밀봉된 용기 내에서 진행되어 용존산소가 유지되므로 80°C

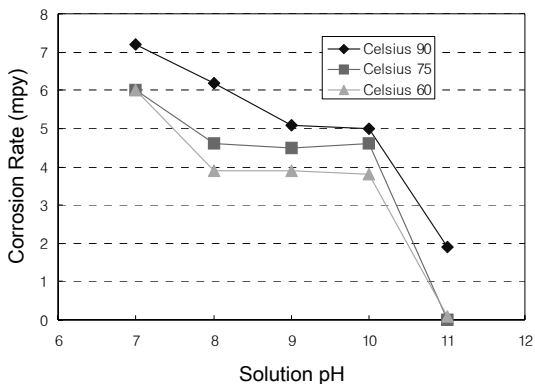


Fig. 5 Effect of pH and temperature on corrosion of carbon steel in NaCl solution

이상이 되더라도 부식율은 증가한다. 이러한 부식율은 pH 10 이상에서 부식율이 저하하는데 이는 비활성철산화물막이 생성되기 때문에 나타나는 현상이다³⁾.

Fig. 6은 Na⁺양이온 CaCO₃ equivalents 환산농도 50ppm, 75°C 수용액의 pH를 Na₃PO₄·12H₂O를 사용하여 pH 10 - pH 11 범위로 조성하여 pH변화에 따른 부식율 측정결과이다. 인산나트륨은 도서 내 연발전소 탄소강 냉각시스템 냉각수에 첨가하여 pH 조절용으로 사용되고 있으므로 본 실험에서는 인산나트륨의 부식억제 효과를 확인하기 위해 사용하였다. pH 10에서 4.6mpy의 부식율이 pH 증가에 따라 급격한 선형감소가 이루어져 pH 11에서 0mpy의 부식율로 급감함을 보인다. 이러한 부식율의 감소

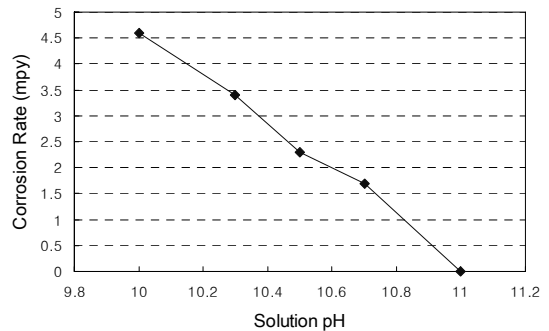


Fig. 6 Effect of pH above 10 on corrosion of carbon steel in NaCl solution at 75°C.

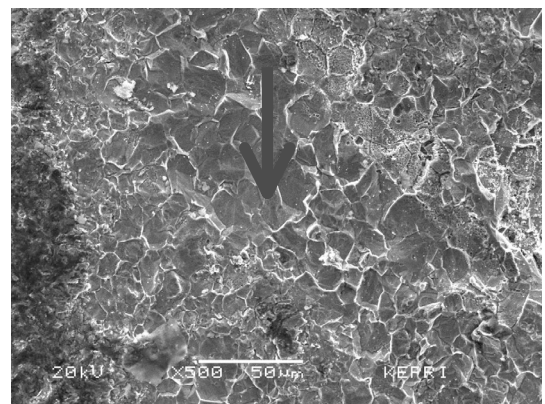


Fig. 7 Surface images of a carbon steel electrode in NaCl solution by scanning electron microscopy.

는 Fig. 5 경우에 언급한 바와 같이 비활성철산화물 막이 생성되기 때문에 일어나는 현상으로 설명할 수 있다.

Fig. 7은 Na^+ 양이온 CaCO_3 equivalents 환산농도 50ppm 용액, 75°C에서 170 시간 부식 실험한 탄소강전극 표면조직 전자현미경 사진이다. 주철표면의 현저한 부식은 발생하지 않았지만, 중간부분의 넓게 파인 화살표 위치에 입상 부식자극이 나타난다.

4. 결 론

국내 도서 내연발전소 냉각설비의 효율적인 운영을 위해 자켓 냉각수 계통 부식억제를 위한 냉각수 공급 운전 조건을 제시하기 위한 탄소강의 부식 성향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Na 양이온 농도증가는 용액의 전도도를 촉진함으로써 부식율의 상승을 초래하므로, 도서지역 여건에 적합한 냉각수 전처리로 NaCl 농도를 조절할 필요가 있다.
- 2) 부식율은 온도와 pH에 따라 민감하게 반응한다. 온도의 증가에 따라 부식율이 증가하나 자켓내 냉각수 온도가 열교환기 설계상 통상 75°C인 것을 감안하면, chemical 첨가로 pH 변화를 유도하여 부식 억제 가능하다.
- 3) 부식실험 결과에 의하면 pH 10까지는 허용 부식율 2mpy를 초과하므로, pH를 10이상으로 조절할 필요가 있으며, 인산나트륨($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)을 냉각수에 첨가하여 pH 조절을 하는 방식이 가장 손쉬운 부식억제 방식으로 추천된다.
- 4) pH 11에서는 부식율이 0mpy에 도달하며, 부식 허용치 2mpy를 만족하기 위해 최소 pH 10.7을

유지하여야 함을 본 연구를 통해 발견하였다.

- 5) 부식실험은 rohrback cosasco systems(RCS) model RCS-1 부식측정기(Corrater)의 장점인 단시간 부식율 측정 결과이므로, SEM 사진결과, Fig. 7과 같이 전극표면에서 현저한 부식은 발견되지 않았다.

후 기

본 과제는 한국전력 자체과제로 수행되었으며, 원만한 과제 수행을 위해 협조하여 주신 배진운영처와 진우실업 연구 관계자 여러분께 감사합니다.

참 고 문 헌

- 1) J. R. Welty, C. E. Wicks, and R. E. Wilson, "Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer", John Wileys & Sons, New York, 1984, pp. 401-425.
- 2) Rohrbach Cosasco Systems, "Corrater User Manual", Claifornia, 2004, pp. 19-23.
- 3) D. A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Prentice Hall, New Jersey, 1996, pp. 5-34.
- 4) E. W. Flick, "Corrosion Inhibitors", Noyes, New Jersey, 1987, pp. 503-510.
- 5) K. P. Devdatta, R. S. Wajjha, D. K. Das, and D. Oliva, "Application of Aluminum Oxide Nanofluids in Diesel Electric Generator as Jacket Water Coolant", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, 2008, pp. 1774-1781.
- 6) A. M. Agree, et al., "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning", Betz, Trevose, PA, 1991, p. 368.