한국부식학회지
J. Corros Sci. Soc. of Korea
Vol. 27 No. 3, June, 1998
〈특별주제〉

해수용 열교환기의 최적 음극방식 방안

김 기 준
한국해양대학교

Methodology for Optimum Cathodic Protection of Heat Exchangers using Sea Water

Ki-Joon Kim
Korea Maritime University

At heat exchanger(HEgr) in steam and nuclear power stations seawater is being used for their coolant. Since seawater is highly corrosive, the metal parts in HEgr should be properly protected against corrosion to minimize repairment and/or shutdown of the power station for a safe and economic reason. Cathodic protection (CP) is a primary technique to protect the seawater-side of HEgr. Impressed current cathodic protection(ICCP) is mainly applied to the water box with coating, and corrosion resistance materials used for tubes and tube holding plates. In this review paper various CP methodologies are discussed for an optimum CP of seawater-side of HEgr which has complicated shape and area. Sacrificial anode cathodic protection(SACP) with ICCP is suggested for an uniform CP current distribution. In addition, the proper application of a ferrous ion supplying technique through a pure iron dissolution, and the required current density for the optimum CP are discussed as well.

Keywords : heat exchanger, cathodic protection, sea water, impressed current cathodic protection(ICCP), sacrificial anode cathodic protection(SACP), cooling tubes, cooling tube plates, required current density.

1. 서 론

해수를 냉각제로 하는 열교환기 또는 복수기는 화력발전소, 원자력발전소, 선박, 제철소 및 화학플랜트를 포함한 공장 시설, 폐열 이용장치 등 여러곳에 사용되고 있다. 해수는 전기전도도가 높고 염분이 많기 때문에 금속에 대한 부식성이 매우 강하다. 특히 열교환기와 같이 여러가지 금속이 혼용되며 온도차가 있는 곳에서는 갈바닉부식이 일어나기 쉽고, 해수중의 염소에 의한 공식이 발생할 수도 있다.

대형 열교환기 및 복수기에 사용되는 금속의 재질을 살펴보면 과거부터 수실(water box)은 주로 주철 또는 탄소강이 사용되었으며, 냉각관(cooling tube)에는 주로 동합금(알루미늄브라스, 네이발브라스, 큐프로니켈)이 사용되어 왔다. 그러나 근간에 들어 열교환기내 부식문제가 심각해 짐에따라 이에 견딜수 있는 2상 스테인

레스강 등이 개발되었고 최근에는 내식성이 매우 뛰어난 티타늄합금이 발전설비의 열교환기나 복수기 냉각관으로 사용되는 빈도가 높아가고 있다. 그리고 냉각관 지지판(tubesheet plate)은 대부분 냉각관과 같은 재질을 사용하거나 일반적으로 동합금을 쓰고 있다.

열교환기나 복수기 내부는 이와같이 여러 종류의 금속이 서로 접촉하고 있기 때문에 갈바닉 부식(galvanic corrosion)이 발생하기 쉽고, 또한 전기전도도가 높은 해수를 매체로 하고 있기 때문에 전기화학적 부식현상은 시간에 따라 가속된다. 따라서 열교환기 내부의 방식은 불가피하며 이에는 피복(coating)과 함께 음극방식(cathodic protection)이 선호되고 있다. 특히 수실(water box)은 강재를 주로 사용하기 때문에 냉각관과 냉각관지지판의 동합금이나 티타늄합금 등과 갈바닉커플(galvanic couple)을 형성함으로써 양극으로 작용하여 부식되므로, 고무피복(rubber coating)과 음극방식을 병행하고 있다. 이 방식법은 먼저 고무로 피복하고 피복손상부에 대해서 음극방식으로 방식하는 것으로 이때의 피복손상율을 열교환기나 복수기의 경우 대개 5%로 설정하고 있다. 그리고 냉각관과 냉각관지지판은 피복할 경우 열전달율이 저하하기 때문에 피복 대신 내식성이 높은 금속을 사용하는 것이 일반적이다.

열교환기에 유입되는 해수에 의해 형성되는 난류는 동이나 티타늄 합금으로 만들어진 냉각관 입구에서 침식부식을 일으킬 수 있으며, 또한 유속의 증가로 부식전류가 증가될 수 있다. 이러한 기계적 및 전기화학적 원인으로 인한 제 문제점은 음극방식법의 채용으로 해결될 수 있다. 열교환기에 적용되는 음극방식법을 세분하면 외부전원법과 희생양극법으로 나눌수 있는데, 방식법의 최종결정은 방식면적과 방식부의 형상 등 주위조건을 충분히 고려하여 선택하고 있다.

그러나 아직까지도 우리나라의 열교환기와 복수기의 음극방식법 적용은 그 역사가 짧고, 경험이 부족하여 방식설비상의 문제와 방식기술 적용문제 등 해결해야 할 과제들이 많다. 따라서, 본 고에서는 상기 문제점을 분류, 검토하고 최적 음극방식을 위해 향후 적용가능한 방안을 몇가지 제시하고자 한다.

2. 음극방식상의 문제점

2.1 음극방식 기준

음극방식 기준은 열교환기 뿐만 아니라 지중매설물 등 여러분야에서 오랫동안 토론의 쟁점이 되어 왔으며, 국제적으로도 아직 통일된 안이 확립되어 있지 못하다. 그러나 일반적으로 널리 채용되고 있는 음극방식기준은 강재의 경우, (1) -850mV(CSE) 기준, (2) -100mV 분극전위기준, (3) -300mV 전위변이 기준, 그리고 (4) E-Log i 기준 등이 알려져 있으며, 사용재료의 용도와 적용환경에 따라 적용기준을 달리하고 있다.

현재 해수용 열교환기나 복수기의 경우 수실(water box)을 방식대상으로 하여 -250mV 전위변이를 방식기준으로 채용하고 있다. 그러나 이 방식기준도 정밀히 검증된 것이 아니며, 열교환기내부가 철강재 뿐만아니라 동합금 및 티타늄이 공존하고 있기 때문에 어느 한가지 재료만을 대상으로 한 방식기준보다는 여러 금속에 동시에 적용될 수 있는 방식기준 마련이 필요하다.

2.2 방식설비상의 문제점

현재 해수용 열교환기 및 복수기의 방식시설에 사용되고 있는 대표적 부품에 대한 종류와 문제점을 기술하면 다음과 같다.

1) 음극방식용 양극

외부전원법 양극으로는 일반적으로 불용성금속을 사용하는 것이 원칙이나 경제성을 고려하여 Pb-Ag 합금 또는 platinized Ti(Pt-Ti 합금) 등을 사용한다. 이들은 완전한 불용성이 아니고

어느정도의 소모율을 갖는데, 가장 많이 사용하는 Pb-Ag 합금양극의 경우 그 소모율을 0.01-0.09(보통 0.032 적용)Kg/A·Yr로 보고 있으며 수명 10년형이 주로 사용되고 있다. 희생양극법의 경우 희생양극재로는 알루미늄합금을 가장 많이 사용하며 그 소모율은 일률적으로 2.94Kg/A·Yr로 산정하고 있다.

2) 기준전극의 종류

선박용 열교환기와 같이 소형이며 냉각수의 온도가 높지 않은 곳에는 염화은전극을 기준전극으로 사용하나, 고온 대용량의 화력 또는 원자력 발전설비용 열교환기나 복수기의 경우는 순도가 높은 Zn봉 전극을 주로 사용하고 있다. 그러나 이 Zn전극은 사용중 온도 및 유속 등 외부환경에 민감하게 반응하므로 기준전극으로서의 신뢰성이 부족하여 장기간 안정적으로 전위를 측정할 수 있는 새로운 전극의 개발이 필요한 실정이다.

3) 기준전극의 위치설정

외부전원법에서 전원공급용 정류기 1대에 양극을 1개 또는 2개이상 연결하여 사용할 수 있다. 정류기 1대당 양극이 한 개일때는 출력조정을 위한 기준전극의 위치 선정이 비교적 쉽다. 그러나 정류기 1대당 2개이상의 양극이 연결되는 경우 기준전극의 위치 선정이 대단히 어려운 문제가 된다. 즉, 위치선정이 잘못된 기준전극에서 측정된 전위에 의해 정류기의 출력이 잘못 조절될 수 있기 때문이다. 즉, 잘못 설치된 기준전극으로 부터 측정된 전위를 기준으로 정류기의 방식전류가 조정될 경우, 국부적으로 과방식 또는 미방식 부분이 발생할 수 있다.

4) 방식전위의 분포

외부전원법을 채용하는 경우 열교환기 내부의 면적이 너무 넓거나, 또는 균일한 발생전류를 분포시키기 위해 1개 이상의 불용성양극을 설치해야 하는 경우가 있다. 이때 이들 양극을 적절히 분산, 배치해야 서로 간섭을 일으키거나 전류가 도달하지 못하는 부분 없이 균일한 방식전류를 얻을 수 있다. 그러나 과학적인 근거에 바탕을 두지 않은 현재의 경험에 의존한 양극배치는 부분적으로 불균일한 전류공급을 초래하여 과방식 또는 미방식 부분이 생길 수 있다. 희생양극법을 채용하는 경우 양극의 설치갯수가 많아 비교적 균일하게 분산, 배치할 수 있으나 수명이 짧기 때문에 주기적인 교체작업을 해야하는 단점이 있다. 상기 두 방식법중 사용수명과 효과적인 방식면에서는 외부전원법이 유리하나 앞에서 지적한 바와같이 양극의 최적위치 선정이라는 과제가 아직 남아 있다.

2.3 냉각관 내부의 방식 문제

외부전원에 의한 방식전류의 흐름은 이론적으로 관 내경의 10~20배 정도까지 도달한다는 보고가 있다. 그러나 일반적으로 방식시 최하 도달거리인 10배로 산정하고 있다. 따라서 길이가 긴 열교환기나 복수기는 관 양끝의 일부분만이 방식이 되고, 관 내부 깊숙한 곳은 방식전류가 도달하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하고자 최근 냉각수 입구측에 Pure-Fe양극을 설치해 전기적으로 용해시켜 Fe^{2+}이온을 공급하여 관내부 부식을 방지하는 방법이 개발되어 적용되고 있다. 이 방식법 적용시에는 순도가 높은 Fe양극이 필요하나 현재 우리나라에서는 고순도 Fe양극을 아직 생산하지 못해 전량 수입에 의존하고 있으며 시공경험 또한 매우 부족한 실정이다. 이 방식법의 적절한 운전을 위해서는 냉각수내에 0.0005~0.01ppm의 적정 Fe^{2+}이온농도가 유지되어야 한다고 한다. 그러나 실제 운전시 열교환기내부의 냉각수량의 변동 등 Fe^{2+}농도변화에 따른 Fe양극의 용해량 조절에 어려움이 있다. 이를 위해서는 냉각수내의 Fe^{2+}농도를 정밀하게 측정할 수 있는 모니터링 장치와 이 값에 따라 Fe양극 용해에 필요한 전류를 흘려주어 적정양의 Fe를 용해시키는 제어시스템의 개발이 필요하다. 또한 이와 같은 모니터링 및 조절장치는 관류내에 필요한 Fe^{2+}농도를 정확히 유지할 수

있을 정도로 충분히 민감하게 반응해야 한다. 그러나 해수가 오염된 경우, 적절한 Fe^{2+}이온농도 유지가 어려워져 방식효과를 저감하기 때문에 이에 대한 대책 또한 강구되어야 할 과제이다.

2.4 소요전류밀도 문제

방식에 필요한 전류밀도값은 방식설계상 매우 중요한 요소이다. 열교환기 및 복수기 내부의 재질에 따라 소요전류밀도값은 달라진다. 여러 연구자료를 토대로 현재 한전에서 채택하고 있는 소요전류밀도값에 대한 설계기준은 동합금 tube의 경우 200mA/m^2이며, 티타늄관의 경우 100mA/m^2가 적용되고 있다. 그리고 철강재를 사용하는 수실(water box)의 경우는 rubber coating된 점을 감안하여 10mA/m^2를 적용하고 있다. 그러나 이와같은 소요전류에 영향을 주는 것은 비단 재질적 문제뿐만 아니라 유속과 방식 대상부의 크기 및 형상도 소요전류밀도에 커다란 영향을 끼치므로 최적 소요전류의 결정에는 이와같은 여러요소가 종합적으로 고려되어야 한다.

3. 최적방식을 위한 제안

3.1 수실내 최적방식 시스템의 구성

열교환기 또는 복수기의 수실내에 외부전원법이나 희생양극법중 한 가지만 적용하지 말고 방식면적이나 조건에 따라 두 방식법을 병용하는 방안이다. 외부전원용 양극의 배치는 전체적으로 넓은 방식면적을 대상으로 분포시키고 국부적으로 외부전원용 양극의 배치가 곤란하거나 비경제적인 부분에 대해서는 희생양극을 설치하는 것이다. 이를 위해서는 현재 방식 시스템구성에 관한 정확한 수치해석을 통하여 외부전원용 양극과 희생양극을 배치해야 한다. 적절치 못한 양극의 배치는 외부전원에 의한 방식전류가 희생양극까지 방식시킬 수 있기 때문이다. 현재의 개발된 공학기술로서 유한요소법 또는 경계요소법에 의한 컴퓨터시뮬레이션(상업용 음극방식설계 소프트웨어)을 이용한다면 이 문제는 어렵지 않게 해결될 수 있을 것이다.

그리고 기준전극에서 감지한 전위에 의해 외부전원용 양극전류를 자동조절되도록 시스템을 구성한다면 설계시는 물론, 운전중에도 희생양극의 소모에 따라 감소되는 방식전류를 어느 정도까지 자동으로 조절하여 최적방식상태를 유지할 수 있을 것이다. 기준전극의 위치선정시에도 전체적인 양극분산배치와 함께, 앞에서 설명한 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 최고 및 최저 전위지점을 조사한후 기준전극을 설치한다면 전 범위가 균일하게 방식되는 최적 시스템을 이룩할 수 있을 것이다.

3.2 tube내의 방식 시스템 구성

앞에서 설명한 바와 같이 관직경의 10배이상되는 깊은 곳의 방식에는 tube재질 자체의 내식성과 Fe양극의 용해에 의한 산화철에 의해 방식한다. 따라서 최적방식 시스템의 구성을 위해서는 열교환기 또는 복수기의 냉각수 출구측에 Fe^{2+} 농도를 측정할 수 있는 센서를 설치하고 일정한 Fe^{2+}농도가 유지되도록 측정 농도값에 따라 Fe 양극에 흐르는 용해전류값을 자동조절하는 시스템을 구축하는 것이다. 이러한 시스템의 구축은 열교환기나 복수기내의 냉각수량이 불규칙하게 변하거나 유속이 변해도 출구측 Fe^{2+}농도를 일정하게 유지하도록 하기 때문에 방식상 문제는 해결될 수 있으리라 판단된다. 다만, 해수의 오염으로 인하여 용존산소량 감소에 따른 Fe^{2+}의 방식효과 감소문제는 연구가 더 필요하리라 생각된다. 경제성이 검토된다는 조건에서 용존산소와 Fe양극간의 상관관계가 밝혀진다면 냉각수 출구측의 용존산소량도 동시에 검출하여 일정이하의 용존산소가 검출되었을 때에는 별도의 방식조치를 취하는 방안도 검토될 수 있을 것이다.

3.3 기타 개선을 위한 제안

- 외부전원용 불용성양극의 개발

- 고온 고유속용 기준전극의 개발
- 음극방식시 발생하는 수소취화현상의 대책(특히 Ti관)
- tube의 외부전원방식용 선형 불용성양극개발(관내부에 가는 선형의 양극을 삽입하여 외부전원방식하는 시스템)

4. 결 언

상기 기술한 내용은 열교환기와 복수기의 음극방식에 관한 현재까지의 상황과 문제점 그리고 문헌을 중심으로 판단되는 필자개인의 대체방안을 기술하였다. 제안된 대처방안은 우리나라의 기술적 상황과 경제성이 종합적으로 검토되지 않았기 때문에 비현실적일 수도 있다. 다만 본고는 문제의 제기를 통해 서로의 공감대를 형성하려는 목적이므로 추후 많은 전문가들의 고견을 통해 더욱 좋은 대처방안이 제시될수 있으리라 생각된다.

References

1. NACE RP-0169-96, "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems", No. 21001.
2. NACE RP-0572-95, "Design, Installation, Operation and Maintenance of Impressed Current Deep Ground Beds", No. 21007.
3. NACE RP-0176-94, "Corrosion Control of Steel, Fixed Offshore Plateforms Associated with Petroleum Production", No. 21018.
4. BSI-CP1021, "Code of Practice for Cathodic Protection".
5. ASM International, "Corrosion", Metal Handbook, Vol. 13 (1987).
6. NACE 97 Conference presented paper, "Marine Corrosion and Cathodic Protection".
7. F. L. Laque, "Marine Corrosion Causes and Prevention", John Willey & Sons, Inc. (1975).
8. Nippon Corrosion Engineering, "Automatically Controlled Cathodic Protection System for Marine Condenser", Technical Catalogue.
9. Dae-Hee Jeon, "Cathodic Protection", Practical Corrosion Protection Engineering (1989).
10. J. Morgan, "Cathodic Protection", NACE (1987).
11. V. Ashworth, & C.J.L. Booker, "Cathodic Protection : Theory and Practice", Ellis Horwood Ltd., (1986).
12. J. Wagner, "Cathodic Protection Design I", NACE (1993).