

전기전도도에 의한 파울링 진단시스템 개발



정 경 렬
한국기계연구원

- 열유체공정기술연구부 책임연구원
- 관심분야 : ppb 계측 및 파울링
- E-mail : kychung@kimm.re.kr

이 후 락

한국기계연구원

- 열유체공정기술연구부 연구생
- 관심분야 : 제어 · 계측 및 통신
- E-mail : ihr@kimm.re.kr



오 상 훈
한국기계연구원

- 열유체공정기술연구부 연구생
- 관심분야 : 메카트로닉스
- E-mail : admor@kimm.re.kr

1. 서 론

발전소, 정유공장 등 산업체에서는 열을 회수 하거나 유체(기체, 액체)를 냉각시키기 위하여 다양한 종류의 열교환기를 이용하고 있다. 특히, 지하수, 강물이나 호소수를 냉각매체로 사용하는 냉각계통의 열교환기에는 수중 오염물질들이 다량 부착하여 공정효율을 저하시키고 국가에너지 낭비의 주 요인이 되고 있다. 따라서, 일정기간 운전후 열교환기의 성능을 회복시키기 위하여 화학적 또는 물리적 세정을 실시하거나 파울링과 스케일 발생을 방지하기 위하여 억제제(inhibitor)를 주입하고 있다.

일반적으로 세정주기 및 효율계산을 위해서는 설비를 중단한 후 튜브를 발취하여 육안관찰 또는 스케일 부착량을 측정하는 방법 등이 사용되어 왔으나 설비의 연속적인 운전에 지장을 초래하므로, 열교환설비의 스케일 부착 또는 오염도 증가를 지속적으로 감시할 수 있으며, 공정 오염 원 특성에 적합한 고감도 파울링 진단기술의 개발과 현장적용이 요구된다.^[1] 해외일부 연구개발기관에서는 여러 가지 방법을 이용하여 요구사항을 충족시킬 수 있는 장치들을 개발하여 현장 적용을 하고있다.^[2] 이렇게 설치되어 사용하고 있는 대부분의 파울링 감시 장치는 입구, 출구와 전열면에 각각 하나 또는 둘씩의 온도센서로 전열계수를 계산하여 그 변화로 청결도를 측정해 왔으나, 스케일이 전열면 전체에 균일하게 생성되는 형태만 존재하는 것이 아니므로 센서의 위치에 따라 청결도 측정값이 다르게 나오는 오차

가 발생하고, 상당량의 스케일이 부착하여야 온도센서(열전대 등) 측정값의 변화로써 감지되기 때문에 측정감도 및 신뢰성이 부족한 문제점들이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 전열면 전체의 온도변화를 관찰하는 방법과 전기전도도를 이용한 새로운 방식의 파울링센서와 이를 정확히 계산하여 청결도 또는 오염도 계수를 산출하는 기술을 제안하고, 일반적인 보일러의 조건과 유사한 소규모 실험장치를 구성하여 측정된 값과 실제 스케일 양을 비교·분석하여 성능실험을 수행한 결과에 대하여 논하고자 한다.

2. 기존기술의 검토

2.1 Rohrback Cosasco사의 DATS시스템

현재까지 상용화된 제품중 가장 대표적인 장치로써 Bridge Scientific사의 특허기술을 개량하여 부식측정기술 (Corrator)을 접목시킨 제품이다.

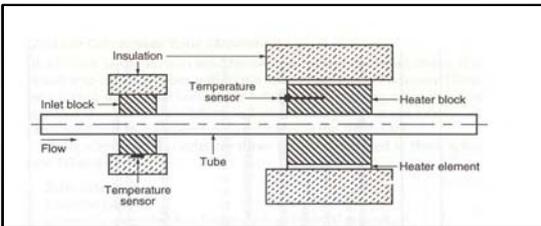


그림 1. DATS시스템의 열교환튜브와 heating block 및 non-heating block의 배치도

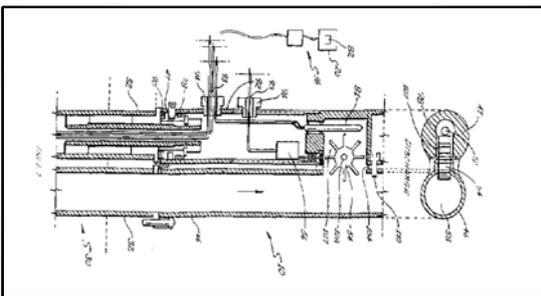


그림 2. EPRI의 Fouling Monitor 센서구조 (US Patent 5,590,706, 1997)

그림1을 살펴보면, 소정의 열교환 튜브내면에 공정용수를 일정 유량으로 통과시키고 튜브 외면에는 온도센서가 내장된 heating block과 non-heating block을 각각 부착되어 있는 구조로 되어 있다. Heating block에는 외부에서 전원공급 장치에 연결되어 있어 튜브 전열면의 열부하를 실제 공정과 유사하도록 전압을 조정하여 공급한다. Non-heating block에서는 공정 용수의 온도를 측정하고 heating block에서는 튜브내면에 스케일 발생이 진행됨에 따라 증가되는 온도를 감지하여 공정용수의 온도와 heating block의 온도차로부터 오염도계수를 산정하고 있다.

그러나, 본 장치는 heating block의 열이 대기로 연속적으로 손실되고 대기의 온도변화에 따라 손실되는 열량이 변화되기 때문에 heating block의 온도 측정에 오차가 발생하며, heating block과 열교환튜브 사이의 접촉이 불완전하여 정확한 오염도계수의 측정이 곤란하다는 문제가 있다.

2.2 EPRI의 On-line Fouling Monitor

미국의 전력연구기관인 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 발전소 현장 열교환기(복수기)의 2개 튜브의 구조를 개조하여, 1개의 열교환기 튜브내에는 튜브입출구 수온측정센서와 정밀급 유량측정센서를 설치하고 나머지 1개 튜브는 관막음을 한 후 튜브 입구측 수온과 열교환기 셸(shell)측의 응축수 온도측정센서를 설치하여 열교환기 튜브의 청결도(Cleanliness Factor)를 측정하는 기술을 개발하였다. 이 방법은 실제공정 열교환기의 성능변화를 관찰하기 위하여 개발되었으나, 열교환기 개조를 위해 고가의 비용이 소요되고 현장설비 구조를 변경하여야 하기 때문에 광범위하게 적용되지 못하고 있다. 또한 유지보수가 곤란하고 얻어진 측정값도 정확하지 않은 문제가 있다. 그림 2는 EPRI에서 개발한 Fouling Monitor 센서구조를 나타낸 것이다.

2.3 Yost & Son사의 Fouling모니터

미국의 YOST & Son사에서는 히터 카트리지를 이용하여 전열면의 오염도를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 히터 카트리지의 외표면에는 온도센서(열전대)가 삽입되어 있고, 히터 카트리지에 일정한 전원을 공급하여 공정 열부하(heat flux)를 모사하도록 되어 있다.



그림 3. Yost & Son사의 파울링모니터

이 장치에서는 sight glass 내에 히터 카트리지를 설치하여 파울링(또는 스케일) 발생정도를 외부에서 육안 관찰이 용이하다는 큰 장점이 있어 열교환기 오염도 감시를 위하여 비교적 다수 적용하고 있다. 그러나, 파울링 발생에 따른 히터 카트리지 표면온도 측정감도가 매우 낮고 오차발생이 높기 때문에 오염도계수 산출 자료로는 이용하지 못하고 현장에서 육안 관찰용으로 주로 이용되고 있어 측정자료의 정확도를 개선하기 위한 개량기술의 개발이 요구된다. Yost & Son사에서 생산되고 있는 파울링 모니터의 외형을 그림 3에 나타내었다.

3. 파울링 측정원리

3.1 전열계수를 이용한 측정

오염도계수는 열교환기에서 허용되는 스케일 등의 오염정도를 나타내는 지표이다.^[3]

$$\bar{\gamma} = r_1 + r_2 = 1/U_s - 1/U_o \dots\dots\dots(1)$$

여기서, $\bar{\gamma}$:총괄오염계수($m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C/kcal$), U_s :일정 시간 운전후 총괄전열계수($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$), U_o : 운전초기의 설계 총괄전열계수($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$)이다. 또한, 오염도계수는 부작물의 두께와 열전도율을 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$r_1 = L_1 / \lambda_1, r_2 = L_2 / \lambda_2 \dots\dots\dots(2)$$

L_1 : 공정측 오염물 두께(mm)

L_2 : 냉각수측 오염물 두께(mm)

λ_1 : 공정측 오염물 열전도율($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)

λ_2 : 냉각수측 오염물 열전도율($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)

냉각수의 오염특성에 따라 다르지만 일반적으로 열교환기 오염계수(r_2)는 $0.0002 \sim 0.0006 m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C/kcal$ 범위내에서 설계한다. 따라서, 운전중의 r_2 값은 설계 r_2 값 이하로 유지되어야 한다. 또한, 설계 r_2 값과 λ_2 값으로부터 허용스케일 두께를 계산할 수 있는데, 이때의 λ_2 값은 냉각수 수질과 약품처리법에 따라 변화된다.

이러한 기본원리를 이용하여 다음과 같이 전열계수로부터 오염도 및 청결도를 구할 수 있다.

오염도계수(R_f)와 청결도(R_c)의 계산은 파울링 센서 히터선에 들어가는 소비전력(Q), 전열면적(A), 냉각수 온도와 전열면온도의 차(초기 ΔT_0 , 종료 ΔT_t)를 이용하여 총괄전열계수(U)값을 계산한 후 산출한다.

$$\text{전열량} : Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [W/hr] \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{열부하} : L = V^2/R \cdot A \quad [W/cm^2] \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{총괄전열계수} : U_0 = \frac{Q}{A \times \Delta T_0}, U_t = \frac{Q}{A \times \Delta T_t} \quad (5)$$

$$\text{오염도} : R_f = U_t/U_0 \times 100 \quad [\%] \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{청결도} : R_c = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0} \quad [cm^2 \cdot ^\circ C/W] \dots\dots\dots(7)$$

3.2 전기전도도를 이용한 측정

전기전도도를 이용한 파울링 측정방법은 두 전극사이의 전기저항 값이 전극표면에 스케일이 발생함에 따라 증가하는 전기화학적 측정원리를 응용하여 파울링의 발생을 계산하였다.

단, 본 논문에서 전열면에 부착된 스케일 성분은 전기 부도체로 가정하였다.

측정을 위해서는 기준센서와 측정센서의 두 개의 센서가 필요하다. 즉, 한 쪽 전극에는 열교환기 열부하와 동일하도록 가열 후 전기저항 측정하고, 기준 및 측정센서의 전기저항 값 비교로부터 Fouling Index를 산출한다.

$$\text{기준센서 저항} / \text{측정센서 저항} \times 100[\%] = \text{측정센서 전기전도도} / \text{기준센서 전기전도도} \times 100[\%] \dots (8)$$

4. 파울링 센서구조

본 연구에서 개발한 파울링 센서를 그림 4에 나타내었다.

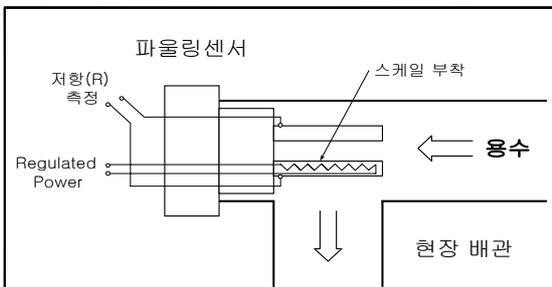


그림 4. 파울링 측정센서 개념도

그림에서 알 수 있듯이 개발한 센서는 현장배관에 직접 삽입할 수 있는 형태로 설계하였다. 그림에 나타난 구조는 측정센서이고 기준센서는 전열선만을 제외하고는 같은 구조이다. 따라서, 기준센서는 비전열 전극 2개로 구성하였고, 수질 변화 보정용으로 사용하였다. 측정센서는 비전열 및 전열의 2개 전극으로 구성하여, 파울링 측정

용으로 사용하였다. 이렇게 제작한 센서를 그림 5에 나타내었다.



그림 5. 제작한 파울링 센서 외형

전열전극 크기는 $\phi 6.3 \times L 50 \text{mm}$ 이고, SUS304 재질을 사용하였다. 비전열 전극은 외경19(내경 15) $\times L 50 \text{mm}$ 에 티타늄 재질을 사용하였다.

Cell 상수는 0.056 cm^{-1} 를 적용하였고, Heater 용량은 $\text{Max } 20 \text{ W/cm}^2$ (120V)이다. 내장된 온도센서로는 K-type 열전대를 사용하여 측정할 수 있도록 구성하였다.

5. 측정회로

상기한 센서를 이용하여 정밀하게 측정하기 위한 회로를 설계하기 위해서 우선 고려되어야 할 조건으로 교류와 직류 중 측정에 간섭을 주지 않는 성질의 전원을 설정하여 공급해야 한다.

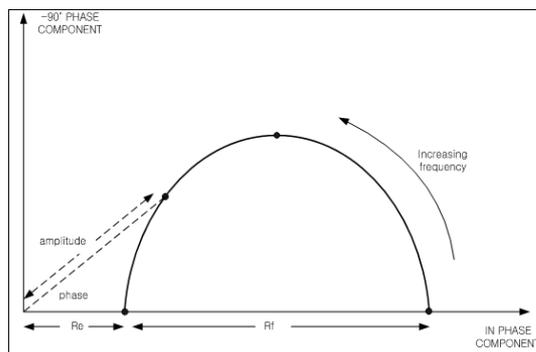


그림 6. 주파수에 따른 저항 값의 변화

따라서, 그림 6과 같은 원리를 이용하여 AC전원의 주파수를 구하고 설계한 회로를 이용하여 2,000 μ S/cm의 용액에서 실험하였다. 그 결과 400mV/5kHz의 AC전원 사용시 전기 저항치인 28 Ω 과 DC전원 사용시 113 Ω 을 비교한 결과 DC전원을 사용했을 때는 Faradarc resistance로 인한 오차가 발생함을 알 수 있었고, AC전원에서도 전압이 높을수록 수중이온이 발생하여 파울링의 생성에 영향을 미치므로 최대한 미소전압을 사용하여 설계하였다. 그림 7에 설계한 회로의 개념도를 나타내었다.

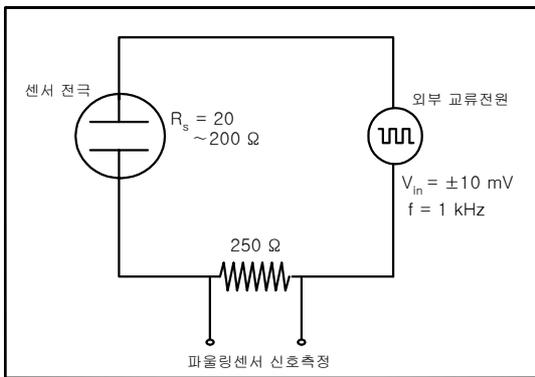


그림 7. 측정회로 개념도

6. 실험 및 성능평가

6.1 실험장치 제작

개발한 측정기술의 성능을 단기간 내에 평가를 완료하기 위하여 스케일 발생경향이 높은 합성수 (synthetic water)를 순환시킬 수 있는 시험장치를 제작하였다.

그림 8은 시험장치의 구성을 나타낸 것으로 스케일 발생경향이 높은 합성수를 저장하기 위한 용수탱크, 일정 유량을 유지하기 위한 자동제어 밸브, 파울링센서(기준센서, 측정센서) 등으로 구성되어 있다. 또한, 전열면에 오염이 발생함에 따라 합성수중의 스케일성분의 감소분을 보충하기 위한 약품주입 장치(양이온, 음이온)와 순환수 수

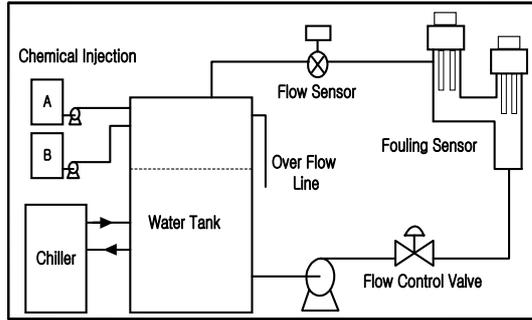


그림 8. 성능실험장치 구성도

온을 일정하게 유지하기 위한 냉동장치를 부설하였다. 그림 9는 실험실에 설치한 센서 성능평가용 시험장치를 나타낸 것이다.

그림 10은 실험장치로부터 취득되는 데이터를 수집 및 연산하기 위해 사용된 장치이다.

6.2 파울링 진단 프로그램 개발

상기의 실험장치로부터 측정되는 센서 전극간 저항측정 및 연산회로를 적용하여 실험을 진행하였다. 회로는 수중에 침적되어 있는 두 전극간의 저항(R_s)을 측정하기 위하여 고속 DAQ보드를 이용하여 analog output 2개 채널에 구형파를 1~5kHz로 발생시켜 그림 6에 보인 current resistor (250 Ω) 양단의 전압을 측정한 후 다음 식으로부터 전극간의 용수의 전기전도도를 산출하였다.

$$V_{out} = 250 / (R_s + 250) \times V_{in} \quad [V] \dots \dots (9)$$

$$R_s = 250 \times (V_{in} / V_{out} - 1) \quad [\Omega] \dots \dots (10)$$

$$\text{용수의 전기전도도} = \text{Cell상수/용액의 저항} \times 106 [\mu\text{S/cm}] = 0.056/R_s \times 106 [\mu\text{S/cm}] \dots \dots (11)$$

상기 식으로부터 전기화학적 측정원리에 의한 오염도(Fouling Index) 연산식인 식(8)을 적용하여 오염도를 산출하였다.

측정한 센서신호를 이용하여 원하는 오염도



그림 9. 성능실험장치



그림 10. Data aquisition system

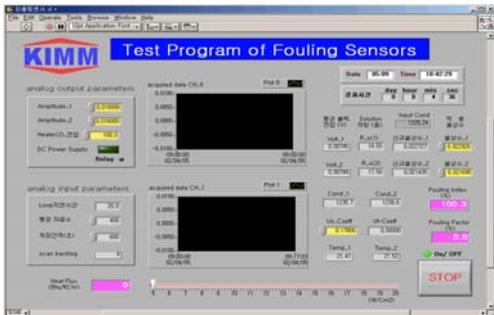


그림 11. 파울링 연속감시 화면

(Fouling Factor 및 Fouling Index)를 산출하기 위하여 National Instruments사의 LabView 6i로 연산처리프로그램을 작성하였다. 그림 11은 작성된 프로그램의 연속감시 화면이다.

6.3 유속별 성능평가

성능실험장치를 구성하고 여러 조건을 고려한 상태에서 실험을 진행하여 지속적인 데이터 수집/분석을 수행하였다.

실험을 진행하기 위한 조건으로 합성수는 Ca^{2+} 300 ppm as $CaCO_3$, HCO_3^- 200 ppm as $CaCO_3$ 으로 설정하였다. 열부하는 각각 $10.8W/cm^2$, $13.3W/cm^2$, $16.1W/cm^2$ 로 설정하였고, 유속은 0.20 m/sec, 0.30 m/sec, 0.40 m/sec으로 하였으며 수온은 $25.0^\circ C$ 로 하였다.

그림 12는 파울링센서의 성능실험 후 부착된 파울링의 형태를 나타낸 것이다. 열부하가 높거나 유속이 낮은 경우는 스케일 부착량이 많고 시험중 부착된 파울링의 국부적인 탈락현상이 관찰되었고, 유속이 높거나 열부하가 낮은 경우는 얇은 파울링이 형성되고 국부적인 탈락현상은 없었다.



그림 12. 실험 후 파울링 부착상태

그림 13~15는 동일한 시험조건에서 유속만을 변경하였을 때의 시간에 따른 Fouling센서의 오염도 감시결과를 보여준 것이다. 총괄전열계수를

이용한 Fouling Factor는 시험초기(60분 이내) 급격하게 감소한 후 일정하게 감소함을 보여주었고, 전기화학적 측정원리를 이용한 오염도는 전체 시험시간 동안 선형적으로 감소함을 보여주었다.

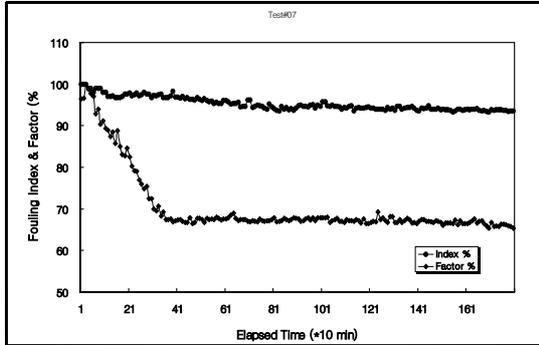


그림 13. 실험결과 (13.3W/cm², 0.20m/sec)

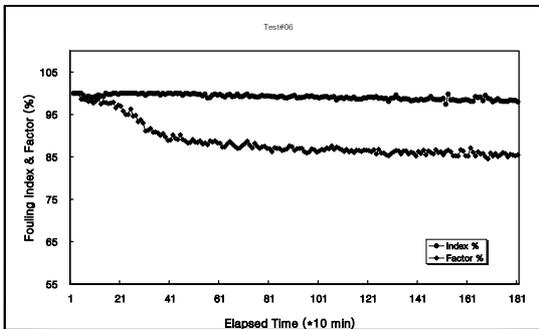


그림 14. 실험결과 (13.3W/cm², 0.30m/sec)

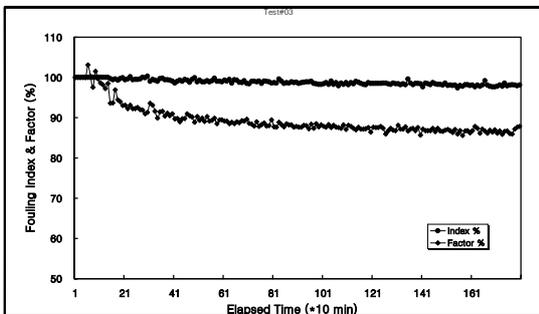


그림 15. 실험결과 (13.3W/cm², 0.40m/sec)

표 1. 유속별 파울링센서 성능시험 결과

시험 번호	열부하 (W/cm ²)	유 속 (m/sec)	스케일 부착량(g)	청결도 (%)	오염율 (%/min)
Test#07	13.3	0.20	0.1194	67	0.0023
Test#04	13.3	0.30	0.0754	76	0.0017
Test#03	13.3	0.40	0.0469	86	0.0010

동일한 열부하 조건에서 유속이 증가할수록 전 열면 오염현상(Fouling Factor 및 Fouling Index)은 감소하고 스케일 부착량도 적은 경향을 보여주었다. 표 1의 오염율을 살펴보면 오염도의 시간경과에 따른 감소 기울기로부터 산출한 값으로써, 제한한 파울링 센서를 이용할 경우 전열면의 오염현상뿐만 아니라 오염속도와 관련한 귀중한 정보를 얻을 수 있었다.

6.4 열부하별 성능평가

성능실험장치를 이용하여 열부하별 조건을 고려한 성능실험을 수행한 결과를 평가하였다.

표 2. 열부하별 파울링센서 성능시험 결과

시험번호	열부하 (W/cm ²)	유 속 (m/sec)	파울링 부착량(g)	청결도 (%)	오염율 (%/min)
Test#04	13.3	0.30	0.0754	76	0.0017
Test#05	16.1	0.30	0.1110	74	0.0038
Test#06	10.8	0.30	0.0515	84	0.0012

표 2는 동일한 유속조건에서 열부하를 변경하였을 때 얻은 파울링센서 성능시험결과를 나타낸 것이다. 측정된 오염도는 열부하가 높을수록 증가하는 동일한 경향을 보여주었다. 다만, 열부하가 16.1W/cm²에서는 과도한 파울링이 부착하였다. 이로 인해 단열효과가 발생하여 센서 내부온도가 150℃까지 상승하였다.

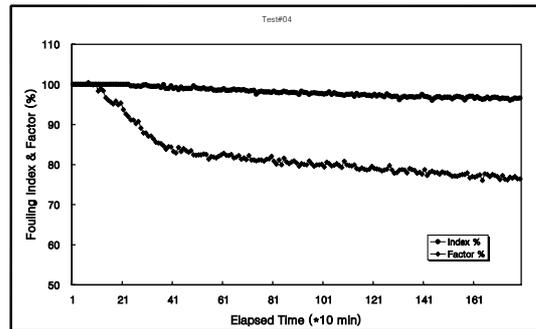


그림 16. 실험결과 (10.8W/cm², 0.30m/sec)

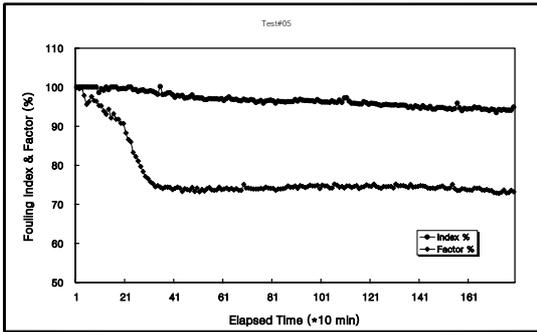


그림 17. 실험결과 (16.1w/cm², 0.30m/sec)

주어진 열부하 조건에서 파울링 센서 시험결과와 전열면의 면적(10cm²)으로부터 전열면 오염속도가 0.00012 ~ 0.00038 cm³/min 범위로 관찰되었다. 그림 16과 17은 각 실험결과를 그래프로 나타낸 것이다.

7. 결론

본 연구에서 제안한 파울링 진단 기술의 성능 확인을 위해 센서를 제작하고 실험장치를 구성하여 성능실험 및 평가를 수행하였다. 이로써, 제안한 파울링 진단기술의 성능을 평가한 결과, 전열계수를 이용한 오염도는 정확하게 측정되었으나 전기화학적 측정원리에 의한 오염도는 수온상승으로 인해 측정센서에 heating전원이 가해지는 동안에는 정확하게 측정되지 않으므로, 자료취득시 측정전극에 가해지는 heating전원이 자동으로 차단되도록 자료취득 프로그램을 수정·보완하여 정확한 결과를 얻었다.

또한, 일정한 유량조건에서는 상기 두 방법의 오염도 측정값에 오차발생이 없으나 유속이 변화할 경우 전기화학적 측정방법이 보다 더 정확하였음을 확인할 수 있었다.

다만, 파울링을 유발시키는 변수는 다양하기 때문에, 실제 복수기 등의 열교환설비에 적용하기 위해서는 여러 산업체의 설비에서 장기간의 시험을 수행하고, 그에 따른 보안을 하여야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] McCoy, J.W. "The Chemical Treatment of Cooling Water," Chemical Publishing Co., N.Y., 1984.
- [2] NACE, "Standard Recommended Practice On-line Monitoring of Cooling Water", RP0189-95, 1995.
- [3] "Kurita Handbook of Water Treatment", Kurita Water Industrials Ltd., 1985.
- [4] EPRI, TR-109232 On-Line Condenser Fouling Monitor Development, 1997.
- [5] J.F. Gary, D. Wiebe, J.L. Tsou, On-Line Monitoring of Performance Losses Due to Fouling. Proc. Condenser Technol. Conf., EPRI, 1996.
- [6] Zisson, P.S., et al., Monitoring And Controlling Microbiological growth in A Standby Service water System, Material Performance, March, 1996.
- [7] K.J. Caserta, F.J. Holler, S.R. Crouch, C.G. Enke, Analytical Chemistry, 50, 1534, 1978.
- [8] D.E. Johnson, C.E. Enke, Analytical Chemistry, 42, 329, 1970.
- [9] S. Kar, K.D. Purnendu, H. Liu, H. Hwang, Analytical Chemistry, 66, 2537, 1994.
- [10] P.H. Daum, D.F. Nelson, Analytical Chemistry, 45, 463, 1973.
- [11] C.R. Powley, R.F. Geiger, T.A. Nieman, Analytical Chemistry, 52, 705, 1980.
- [12] C.R. Powley, T.A. Nieman, Analytical Chemistry, 54, 61, 1982.
- [13] N. Papadopoulos, M. Limniou, Journal of Chemical Education, 78, 245, 2001.