

## 열교환설비에서의 파울링 진단기술에 관한연구

정경열\*, ◦이후락\*, 박정일\*\*, 김상렬\*\*\*, 류길수\*\*\*\*

### A Study on The Diagnostic Technology for Fouling Occurred in Heat Exchanger.

K. Y. Chung\*, ◦H. R. Lee\*, J. I. Park\*\*, S. R. Kim\*\*\*, K. S. Rhyu\*\*\*\*

- \* 한국기계연구원
- \*\* 범아정밀(주)
- \*\*\* 한국정밀(주)
- \*\*\*\* 한국해양대학교

**Abstract :** Fouling causes serious maintenance problems on heat exchanger tubes and process facilities. To avoid such fouling problems, numerous efforts have been tried, e.g., diagnosis of fouling, reducing and eliminating the fouling, etc.. The objective of the present study is to develop an innovative diagnostic system of fouling, which can detect the scaling attached to the wall non-homogeneously. The performance of the diagnostic system has been evaluated with a scaling simulator that generates scaling on tested tube wall. The measured values with the diagnostic system were compared with the amounts of the scaling generated by the simulator.

**Key words:** Fouling, U-coefficient, Heat Exchanger, Fouling Sensor, Cooling Water

#### 1. 서 론

전열면에 발생하는 파울링은 제조공정 및 보일러 설비의 효율을 크게 저하시키는 원인중에 하나이다. 단, 본 논문에서 언급하는 파울링은 열매체에 포함되어 있는 물질(실리카, 탄산칼슘, 황산칼슘, 미생물, 탄소 등)이 다른 성분과 반응하거나 열교환시 온도 변화에 따라 용해조건이 변화함으로써 결정이 생성되어 열교환기면에 퇴적되거나 스케일을 형성하게 되는 현상으로 한정한다. 이러한 스케일은 전체 열저항 중 가장 큰 열저항으로 작용하여 막대한 에너지 손실을 초래하고, 파이프 등이 교차되는 부분에서는 스케일을 형성하여 마찰계수를 증가시킨다. 또한 열교환 시스템에 압력손실을 발생시켜 원활한 운영을 방해하므로 보일러의 수명과 에너지 효율에 심각한 악영향을 끼치는 요인이 된다.

따라서, 파울링 진단기술은 열교환설비의 오염도가 일정수준 이상 상승할 때 스케일 발생을 억제시켜주는 화학약품을 주입하는 조치나 스케일

제거를 위한 적정세정주기를 결정하는 등 전체 설비효율관리 측면에 귀중하게 활용할 수 있다.<sup>[1]</sup>

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 있는 장치들이 개발되어 현장적용이 이루어지고있다.<sup>[2]</sup> 이렇게 설치되어 사용하고 있는 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 오차가 발생하고, 상당량의 스케일이 부착하여야 온도센서(열전대 등) 측정값의 변화로써 감지되기 때문에 측정감도 및 신뢰성이 부족한 문제점들이 있었다.

따라서, 본 논문에서는 전열면 전체의 온도변화

를 관찰할 수 있는 새로운 방식의 파울링센서와 이를 정확히 계산하여 청결도 또는 오염도 계수를 산출하는 기술을 제안하고, 열교환기 조건과 유사한 소규모 실험장치를 구성하여 측정된 값과 실제 스케일 양을 비교·분석하여 성능실험을 수행한 결과에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 파울링 측정원리

### 2.1 파울링 진단대상

열교환기는 사용목적에 따라 복수기(Condenser), 가열기(Heater), 증발기(Evaporator) 및 냉각기(Cooler) 등으로 분류되며, 구조에 따라서는 다관형(Shell and tube type), 이중관형(Double pipe type), 공기냉각편형(Air cooled type) 등으로 구분된다.

가장 많이 이용되는 열교환기 형태로는 다관형이 있는데, 냉각수 흐름위치에 따라 셸측 또는 튜브측으로 구분된다. 일반적으로 부식성유체, 오염유체와 고압유체는 튜브측을 이용하는데, 이는 셸측에 오염유체를 통과시킬 경우 유속이 느려 스케일과 파울링 등의 장애가 쉽게 발생할 뿐만 아니라, 튜브측에 비해 세정하기가 훨씬 복잡하고 어렵기 때문이다.

본 논문에서는 가장 많이 사용되는 다관형 열교환기를 기준으로 실험을 진행하였다.

### 2.2 오염도계수

오염도계수는 열교환기에서 허용되는 스케일 등의 오염정도를 나타내는 지표이다.<sup>[3]</sup>

$$v = r_1 + r_2 = 1/U_s - 1/U_o \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $v$ : 총괄오염계수( $m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C/kcal$ ),  $U_s$ : 일정시간 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 부착물의 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)

$\lambda_1$ : 공정측 오염물 열전도율( $kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$ )

$\lambda_2$ : 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  $\lambda_2$  값으로부터 허용스케일 두께를 계산할 수 있는데, 이때의  $\lambda_2$  값은 냉각수 수질과 약

품처리법에 따라 변화된다.

## 3. 파울링 센서

### 3.1 기존 센서

#### 3.1.1. Rohrbach Cosasco사의 DATS시스템

현재까지 상용화된 제품중 가장 대표적인 장치로써 Bridge Scientific사의 특허기술을 개량하여 부식측정기술(Corrator)을 접목시킨 제품이다. 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 전원공급장치에 연결되어 있어 튜브 전열면의 열부하를 실제 공정과 유사하도록 전압을 조정하여 공급한다. Non-heating block에서는 공정용수의 온도를 측정하고 heating block에서는 튜브내면에 스케일 발생이 진행됨에 따라 증가되는 온도를 감지하여 공정용수의 온도와 heating block의 온도차로부터 오염도계수를 산정하고 있다.

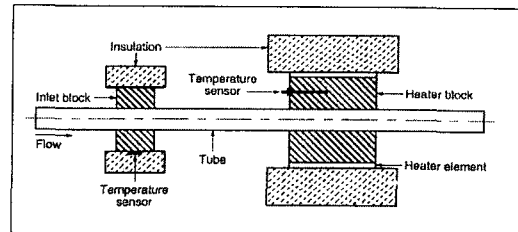


그림 1 DATS시스템의 열교환튜브와 heating block 및 non-heating block의 배치도

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.

#### 3.1.2. EPRI의 On-line Fouling Monitor

미국의 전력연구기관인 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 발전소현장 열교환기(복수기)의 2개 튜브의 구조를 개조하여, 1개의 열교환기 튜브내에는 튜브입출구 수온측정센서와 정밀급 유량측정센서를 설치하고 나머지 1개 튜브는 관막음을 한 후 튜브 입구측 수온과 열교환

기 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 못하는 문제가 있다. 그림2는 EPRI에서 개발한 Fouling Monitor 센서구조를 나타낸 것이다.

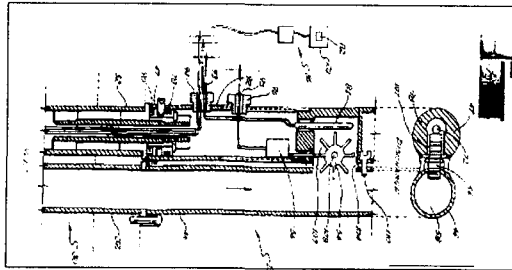


그림 2 EPRI의 Fouling Monitor 센서구조 (US Patent 5,590,706, 1997)

3.2 개발 센서

본 논문에서는 그림3과 같은 튜브 형태의 센서를 그림4와 같은 구조로 설계하여 개발하였다.

센서의 가장 안쪽의 절연체 위로 열선(약 14Ω)을 일정한 간격으로 배치하고, 그 위에 감겨있는 온도측정용 백금선(Φ:70μm, 순도:99.99%)과 절연하였다. 가장 외벽 또한 백금선과 절연을 하고 부식에 강한 합금(SUS 304)으로 덮는 형태로 구성하여 기존의 파울링 센서에서 발생할 수 있는 측정 오차를 비약적으로 개선하였다.

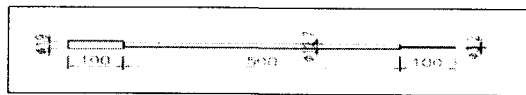


그림 3 파울링 센서 외형

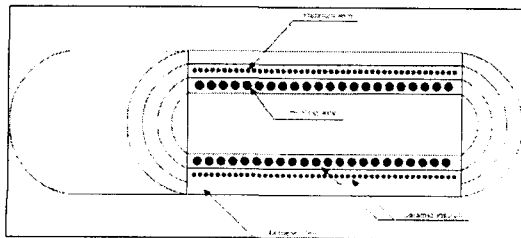


그림 4 파울링 센서 내부

4. 진단 시스템

4.1 제어 및 연산

상기한 일반적인 이론과 열교환 설비의 운전조건을 고려하여 정밀한 측정과 온라인으로 적용이 가능한 센서 및 모니터링 장치를 제작하고 그에 맞는 계산식을 적용한 프로그램을 구현하였다.

프로그램은 파울링 센서, 입·출구 온도센서, 용수유량센서, 정전압 공급장치, 정밀저항 측정기 등으로부터 발생하는 아날로그 신호를 디지털로 변환하여 계산 후 메모리에 저장하고 PC에 각 데이터를 송신하는 기능을 한다.

오염도계수(Rf)와 청결도(Rc)의 계산은 파울링 센서 히터선에 들어가는 소비전력(Q), 전열면적(A), 냉각수 온도와 전열면온도의 차(초기ΔT0, 종료ΔTt)를 이용하여 총괄전열계수(U)값을 계산한 후 산출한다.

$$Q = [\text{히터공급전압}(V)]^2 / \text{히터선 전기저항}(\Omega) \dots\dots(3)$$

$$U_0 = \frac{Q}{A \times \Delta T_0} \quad U_t = \frac{Q}{A \times \Delta T_t} \dots\dots(4)$$

$$\therefore R_f = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0}, \quad R_c = U_t / U_0 \times 100 \dots\dots(5)$$

4.2 시스템 구성

시스템의 전체 구성은 그림5에서 나타내었으며, 앞서 설명한 컨트롤 장치, 파울링 센서, 입·출구 온도센서, 유량센서, 유량조절밸브, 트랜스미터, 정밀저항측정장치, 정전압 공급장치 등으로 구성하였다.

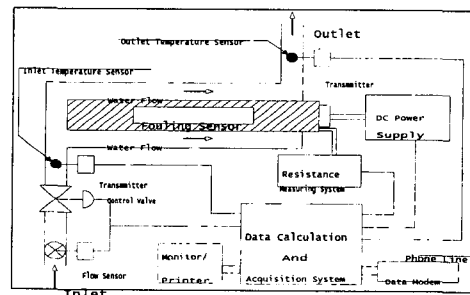


그림 5 파울링 감시시스템 구성도

파울링 센서의 백금선은 정밀저항측정장치에 연결되며, 내부의 열선은 외부의 정전압 공급수단에 연결된다. 이때, 열선에 교류전류를 공급할 경우에는, 금속선에 전류가 유도되어 전기저항 측정에 오차를 발생시키므로, 정전압 공급장치는 직류전원을 사용하도록 구성하고, 전압을 50~120V

열교환설비에서의 파울링 진단기술에 관한연구

로 변화시켜 파울링 센서 내부에서 발생하는 열량을 조절함으로써 실제적인 열교환기의 운전조건과 유사한 전열면의 열부하를 유지할 수 있도록 구성하였다. 전열면의 스케일 부착량은 유속이 낮을수록 심하게 부착되는 경향이 있기 때문에, 현장의 유속조건과 유사하게 유량조절밸브를 이용하여 유량을 조절하였다.

5. 실험 및 성능평가

5.1 성능실험

그림6, 7에 파울링 진단장치의 성능시험을 위한 모델복수기 실험설비 구성을 나타내었다. 실험설비는 모델복수기, 냉각타워, 진단장치 및 PC 등으로 구성되었다. 이러한 실험 설비의 특징은 실제의 복수기에 장착하지 않고도 상수도에 화학약품을 적량 주입하여 합성수를 조제함으로써, 실제보다 가혹한 수질을 조성할 수 있다. 또한, 이렇게 조건을 임의로 변경하여 짧은 기간내에 실험을 진행할 수 있었다. 전체적인 실험조건은 표1, 2와 같이 실제 조건과 유사하게 조건을 설정하여 소요되는 시간을 단축시킬 수 있었다.

본 실험에 사용한 수질은 발전소현장 냉각탑 계통보다 농축도 10배에 해당하는 수질을 갖도록 장치에 공급되는 용수에 불순물이온 보강용 화학약품을 가하여 양이온과 음이온 합성수를 각각 조제하였으며, 실험시는 양이온용액과 음이온용액을 같은 비율로 사용하였다. 표3은 실험실 공급용수와 합성수의 대표적인 수질을 나타낸 것이고, 표4는 1회 실험에 사용된 실험설비용수용직에 따른 화학약품 투입량이다.

표 1 성능실험 운전조건

목적	실험치	
불순물 농도(약품)	초기부입 및 Make Up시 ※ 합성수 조제시 약품사용량 참조	
순환수 온도	35°C ~ 40°C	
유 속	1m/s : 21.77 L/min(튜브 A, B) 11.36 L/min(진단장치)	
입부하	모델복수기 공급전력	9,500 Btu.ft <sup>2</sup> /hr : 9,698W 12,000 Btu.ft <sup>2</sup> /hr : 12,250W
	진단장치 공급전압	9,500 Btu.ft <sup>2</sup> /hr : 50,2509V 12,000 Btu.ft <sup>2</sup> /hr : 56,4772V
Make-Up	Auto	

표 2 이온 보강용 화학약품 사용량

구 분	순도(%)	주입량(g/L)	
양이온	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	98.0	0.6444
	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	99.2	0.3962
음이온	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	99.0	0.3735
	NaHCO <sub>3</sub>	100	0.6257
	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	99.5	0.0745



그림 7 모델복수기를 이용한 성능실험 장치

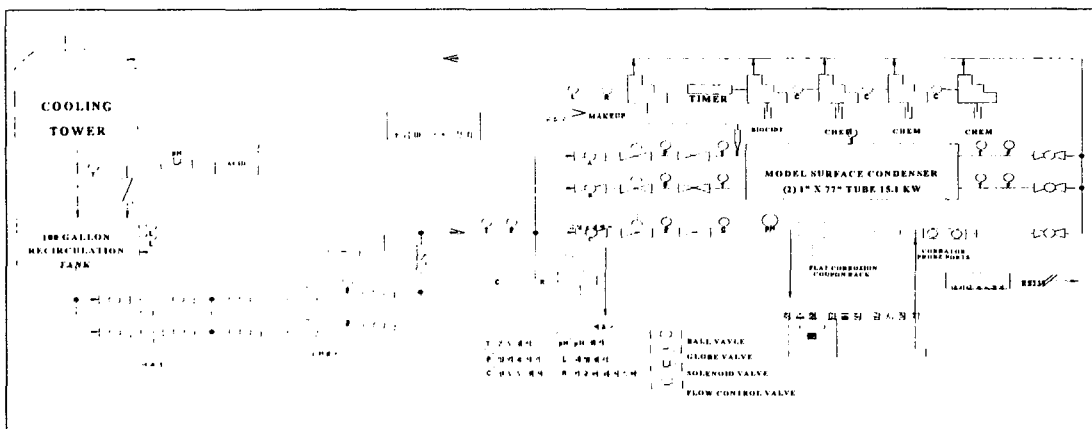


그림 6 성능실험장치 구성도

표 3 실험실 용수 및 합성수의 대표적 수질

항 목	단 위	실험실 용수	합 성 수
pH		7.52	9.1
전도도	μs/cm	131.5	2,200
Ca <sup>2+</sup>	ppm as CaCO <sub>3</sub>	43.26	472.80
Mg <sup>2+</sup>	"	12.92	172.40
Fe <sup>3+</sup>	ppm as Fe	<0.004	-
Na	ppm as CaCO <sub>3</sub>	15.30	668.72
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	"	30.00	402.40
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	"	0	6.90
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	"	20.16	439.96
Cl	"	16.76	446.31
NO <sub>3</sub>	"	4.09	-
SiO <sub>2</sub>	ppm as SiO <sub>2</sub>	2.61	2.61

실험은 순환수유속 1m/sec, 열부하 12,000Btu/ft<sup>2</sup>/hr 와 표3의 합성수 수질조건하에서 전열면의 오염도계 수 측정시험을 수행하였다. 전열면에서 발생하는 스케일은 주로 탄산칼슘과 인산칼슘인 것으로 확인되었다.

표 4 합성수조제시 약품사용량

구 분	순 도 (%)	사용량 (g/L)	1회 투입량 (g/L)	
양 이 온	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	99	0.6444	0.6444×420L = 270.648g
	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	99	0.3962	0.3962×420L = 166.404g
음 이 온	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	99	0.3735	0.3735×420L = 156.870g
	NaHCO <sub>3</sub>	99	0.6257	0.6257×420L = 262.794g

그림8은 PC모니터링 인터페이스이다. 이를 이용해 항시 일정간격으로 디스플레이 되는 값을 관찰하며, 저장된 자료를 출력하여 분석하였다.

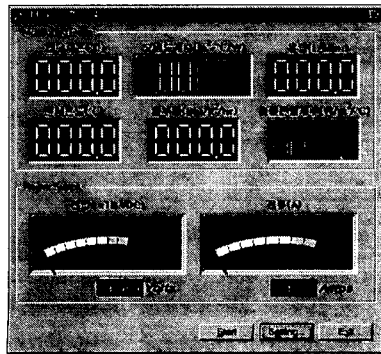


그림8 모니터링 화면

5.2 성능평가

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

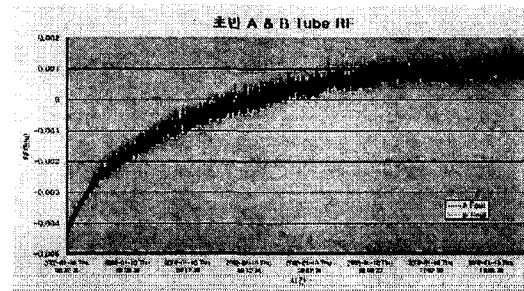


그림 9 초반 A & B Tube RF

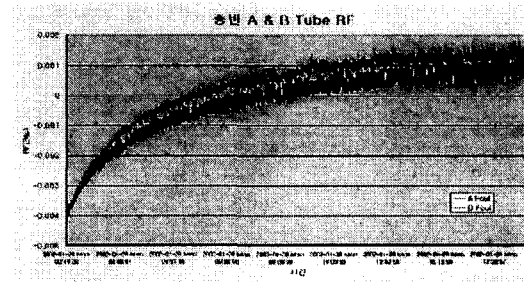


그림 10 중반 A & B Tube RF

그림 9, 10은 모델복수기로부터 취득된 데이터를 간단한 오염계수식으로 계산하여 차트로 표시한 데이터이다. 실험 초반과 중반에 각 튜브의 오염계수 차는 A 튜브측에 초음파를 이용한 파울링 측정장치를 장착함으로써 발생한 것이다.

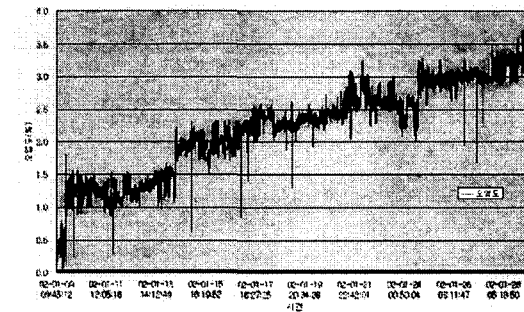


그림 11 진단장치 오염도(%) 측정 결과

그림 11은 파울링 진단장치로부터 취득된 데이

## 열교환설비에서의 파울링 진단기술에 관한연구

터로 모델복수기에서 취득된 데이터의 경향과 거의 유사한 경향으로 나타난 것을 알 수 있다. 차트에서 곡선이 선형적이지 못한 것은 공급전압의 변동이 심한 것과 모델복수기의 진공도를 주기적으로 조정함에 따른 수온변화로 발생한 것으로 파악된다. 그림 12는 진단장치에 사용된 파울링 센서인데, 이를 분리해 건조한 뒤 각 부분별 부착된 파울링을 제거하여 질량을 측정하였다. 그림에서 ①번이 전열코일과 백금선이 감긴 부분이다. 따라서, 이 부분에 가장많은 파울링이 부착된 것을 볼 수 있다.

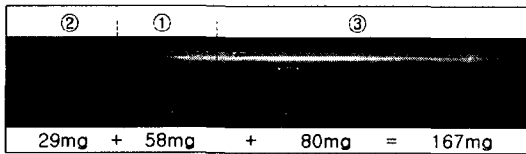


그림 12 센서부착 파울링 질량측정

## 6. 결 론

본 논문에서 제안한 파울링 진단 기술의 성능 확인을 위해 모델복수기를 이용한 실험장치를 구성하고, 성능 테스트를 수행하였다. 실험 도중에 센서를 육안으로 관찰하여 파울링 부착정도와 측정값과의 비교를 하였고, 실험 종료후 센서에 부착된 파울링 질량과 측정된 값을 비교·검토 하였다. 그 결과, 진단장치가 모델복수기에서 측정 한 값보다 더욱 민감하게 반응하는 경향을 보였고, 측정 값이 실제 센서에 부착된 질량과 유사한 경향을 나타냈음을 알 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.

본 연구는 산업자원부의 에너지 절약기술개발사업의 일환으로 수행된 연구결과 일부입니다.

## 참고문헌

- [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.