

산업용 열교환 설비에서의 파울링 진단 및 저감기 개발(I)



정 경 열

(KIMM 열유체공정기술연구부)

- '78 - '81 한국해양대학교 기관학(학사)
- '81 - '83 한국해양대학교 제어공학(석사)
- '83 - '86 승선근무(기관사)
- '94 - '00 한국해양대학교 제어공학(박사)
- '87 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 양 래

(KIMM 열유체공정기술연구부)

- '76 - '80 전남대학교 물리학(학사)
- '80 - '82 전남대학교 물리학(석사)
- '92 - '95 전남대학교 물리학(박사)
- '82 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



이 후 락

(KIMM 열유체공정기술연구부)

- '95 - '01 중부대학교 전자계산학(학사)
- '02 - 현재 충남대학교 컴퓨터공학(석사 재학중)
- '99 - 현재 한국기계연구원 위촉연구생

1. 서 론

전열면에 발생하는 파울링은 제조공정 및 보일러 설비의 효율을 크게 저하시키는 원인중의 하나이다. 단, 본 연구에서 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.

보일러 등에서의 Fouling방지에 관한 연구는 1821년 감자전분이 Fouling의 주원인인 스케일의 침전속도를 감소시킨다는 것이 알려지면서 시작되었으며, 그 후 여러 가지 물리, 화학적 방법들이 제안되어 왔으나 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법은 강산(acid)을 이용한 화학세관법이다. 그러나 이 방법은 그 비용을 차치하고도 처리하는 동안의 조업중단과 처리후의 폐산처리가 문제시되고 있다.

이와는 다른 On-line방식의 저감 및 제거방법에는 입자 회전 방식, 자기장을 이용한 스케일 생성 방지방식, 용수 전처리 방식과 초음파를

이용한 저감 및 제거 방식이 있는데, 초음파를 제외한 기술들은 거의 Fouling 저감효과만 존재하며 그 저감 효과가 평균 40%도 미치지 못하는 것으로 알려져 있어 결국 Off-line으로 주기적인 Fouling을 제거해야하며, 입자순환방식은 입자를 교체해야하는 것으로 유지보수 및 효율면에 큰 효과를 거둘 수가 없는 반면, 초음파를 이용한 설비는 스케일에 대한 저감 및 제거가 가능하여 효율면에서 다른 방식에 비해 월등하며, 경제적 손실을 줄이면서 친환경적인 장점이 있다.^{[1][2]}

또한 중요설비에서는 실시간으로 Fouling계수를 측정함으로써 그 성능을 배로 증가시킬 수 있는데, 측정방법은 테스트 전극의 열저항을 이용한 측정, 유속의 변화를 측정하는 방법을 이용하여 파이프 내의 스케일 생성정도를 측정하는 방식이 있으며, 가장 큰 효과를 기대할 수 있는 방법은 테스트 전극의 열저항을 이용하여 열변화를 관찰함으로써 직접적인 측정을 하는 것이다.

따라서, 파울링 진단 및 저감기술은 열교환설비의 오염도가 일정수준 이상 상승할 때 스케일 발생을 억제시키며 적정세정주기를 결정하는 등 전체 설비효율증대와 관리 측면에 귀중하게 활용할 수 있다.^[3]

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.^[4] 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 변화

로써 감지되기 때문에 측정감도 및 신뢰성이 부족한 문제점들이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 전열면 전체의 온도변화를 관찰할 수 있는 새로운 방식의 파울링센서와 이를 정확히 계산하여 청결도 또는 오염도계수를 산출하고, 초음파를 이용해 저감·제거하는 시스템을 개발하였다. 또한, 열교환기 조건과 유사한 소규모 실험장치를 구성하여 저감기가 설치된 튜브와 그렇지 않은 튜브를 비교하고, 진단기로부터 측정된 값과 실제 스케일 양을 비교·분석한 결과로부터 개발한 시스템의 우수성을 입증하고자 한다.

2. 파울링 진단 및 저감원리

2.1 적용대상

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), 공기냉각관형(Air cooled type) 등으로 구분된다.

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

본 연구에서는 가장 많이 사용되는 다관형 열교환기를 기준으로 실험을 진행하였다.

2.2 오염도계수

오염도계수는 열교환기에서 허용되는 스케일 등의 오염정도를 나타내는 지표이다.^[5]

$$y = r_1 + r_2 = 1/Us - 1/ Uo \dots\dots\dots (1)$$

여기서, γ : 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)

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.

2.3 초음파의 파울링 저감원리

초음파 에너지가 가지는 화학적, 물리적 기능의 구체적인 작용은 사과껍질을 깎듯이 벗겨내는 작용, 스케일 형성물질을 유화시키는 작용, 매질을 잘게 분산시키는 작용 등이 있으며, 이러한 기능이 복합적이고도 지속적으로 일어남으로써 스케일의 생성방지 및 제거를 하게 된다. 대표적인 원리로는 Cavitation, Acoustic Streaming, Acoustic Radiation 등이 있는데, Cavitation(공동 현상원리)은 일반적으로 Bubble이라 부르는 유체속의 기포(공기방울)발생을 의미한다. 이는 기포에 가해진 공진주파수에 의해 기포가 파괴되면서 얻어지는 충격파(순간온도 수만도)가 원인이 되어 스케일을 제거하는 현상으로 파괴력 및 파괴이후의 순간적인 인장력에 의하여 스케일을 흡착, 탈락시키는 현상이 복합적으로 이루어지며, 유체속의 가스체를 흡수하고 팽창, 폭발을 연속적으로 반복하면서 스케일 입자를 분쇄, 탈락시킨다.

Acoustic Streaming(미세유동원리)은 초음파가 전달된 유체에 미세한 흐름으로 인한 파동이 발생하여 스케일의 구성성분이 관벽에 붙는 것을 방지한다. 또한 Acoustic Radiation(음향방사원리)은 초음파의 음향에너지를 이용하며, 이 음향에너지가 방사되고 매질속에 전달되어 이의 지속적인 작용으로 스케일이 탈락하는 원리를 적용함으로써 Fouling의 저감 및 제거를 할 수 있다.

3. 파울링 센서

3.1 기존 센서

3.1.1. Rohrback Cosasco사의 DATS시스템

현재까지 상용화된 제품중 가장 대표적인 장치로써 Bridge Scientific사의 특허기술을 개량하여 부식측정기술 (Corrator)을 접목시킨 제품이다. 그림 1을 살펴보면, 소정의 열교환 튜브내면에 공정용수를 일정 유량으로 통과시키고 튜브 외면에는 온도센서가 내장된 heating block과 non-heating block이 각각 부착되어 있는 구조로 되어 있다. Heating block에는 외부에서 전원공급장치에 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.

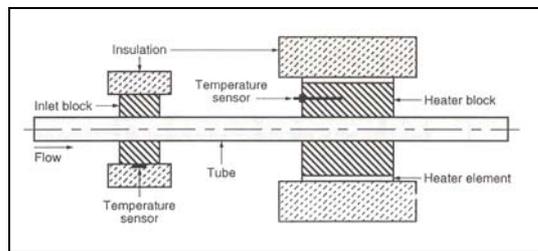


그림 1. DATS시스템의 열교환튜브와 heating block 및 non-heating block의 배치도

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 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 못하는 문제가 있다. 그림 2는 EPRI에서 개발한 Fouling Monitor 센서구조를 나타낸 것이다.

3.2 개발센서

본 연구에서는 그림 3과 같은 튜브 형태의 센서

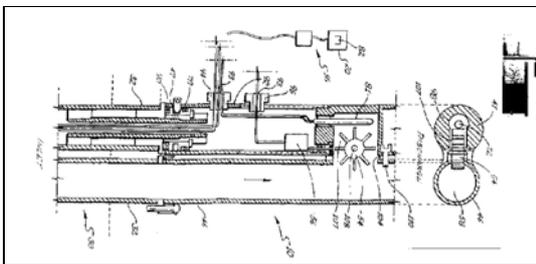


그림 2. EPRI의 Fouling Monitor 센서구조 (US Patent 5,590,706, 1997)

를 그림 4와 같은 구조로 설계하여 개발하였다.

센서의 가장 안쪽의 절연체 위로 열선(약 14Ω)을 일정한 간격으로 배치하고, 그 위에 감겨 있는 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 측정오차를 비약적으로 개선하였다.

4. 초음파 발신기

파울링의 효과적인 저감·제거를 위한 초음파 트랜스듀서는 그림 5에서 보는 바와 같이 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 자왜소자와 자왜소자에서 발생되어진 기계적 변위를 증폭시켜서 방사매질로 전달하는 도파봉의 두 부분으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 자왜소자와 도파

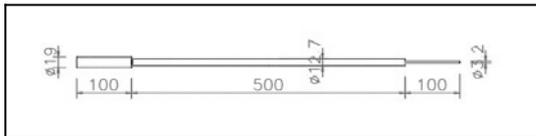


그림 3. 파울링 센서 외형

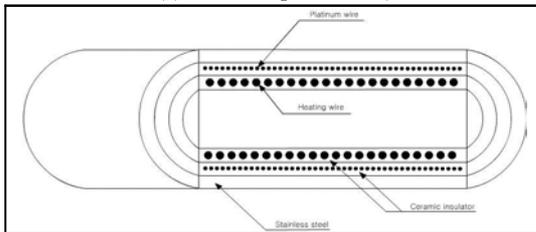


그림 4. 파울링 센서 내부

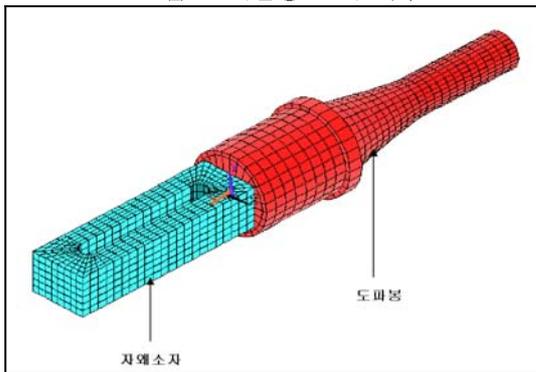


그림 5. 자왜형 초음파 트랜스듀서의 유한요소 모델

봉 각각을 설계하고, 이들 둘이 결합한 자왜형 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하였다.

4.1 자왜소자

자왜소자는 외부에서 자기장이 인가되면 그 자기장의 크기에 비선형적으로 기계적 변위를 발생시키는 재료로서 대표적인 재료로는 Nickle, Terfenol-D, Permalloy와 철이나 코발트로 이루어진 금속 합금 재료가 있다. 인가되는 자기장의 크기에 비선형적으로 기계적 변위를 발생시키는 만큼 압전소자에 비해 훨씬 작은 크기의 에너지로도 동등 이상의 고출력을 구현할 수 있고, 내구성이나 온도 환경 등에서 강유전체 세라믹보다 월등한 우수성을 제공한다고 알려져 있다.^[6]

본 연구에서는 Fe-Co-V 금속 합금의 박판 형태로 적층된 자왜소자를 제작하여 공진 특성을 분석하였다. Fe-Co-V 금속 합금 자왜소자는 금속계 자왜소자 중에서 가장 높은 포화자왜값을 갖고, 가장 높은 큐리(curie)온도를 가지며 전기저항이 작아서 자기이력손실이 적다는 장점을 가지는 반면 소재가격이 비싸고 가공이 어렵다는 단점을 가진다. 본 연구에서는 기존 연구결과를 바탕으로 공진 주파수 20kHz 이상을 가지는 Fe-Co-V 금속 합금 자왜소자의 대략적인 치수를 결정하고 제작하였다.^{[7][8]} 제작되어진 자왜소자의 치수를 그림 6에 나타내었다. 제작된 자왜소자를 가속도 센서와 주파수 계수기를 이용하여 공진 특성을 분석한 결과 자왜소자의 공진 주파수는 21.3 kHz이었다.

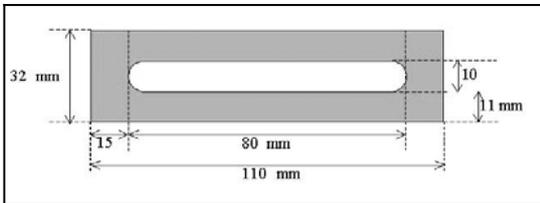


그림 6. 공진 주파수 21.3 kHz를 가지기 위한 자왜소자의 치수

4.2 도파봉

도파봉은 자왜소자에서 발생된 기계적 변위를 증폭시켜서 방사 매질로 전달하는 역할을 수행한다. 자왜소자의 공진 주파수가 정해지면, 자왜소자와 일치하는 공진 주파수를 가지도록 도파봉을 설계하여야 초음파 트랜스듀서가 최대의 효율을 가진다고 알려져 있다.^[9]

도파봉을 설계하는 방법으로는 탄성 작동 영역하에서 아주 미세한 요소의 평형 상태 파동방정식을 이용하여 공진을 위한 도파봉의 길이를 수학적으로 결정하는 방법,^{[10][11]} 도파봉이 회로의 트랜스포머 역할과 유사하다는 것을 이용하여 간단한 등가회로법으로 설계하는 방법,^{[12][13]} 그리고 단면적 차이, 곡률 등으로 인한 오차를 줄이고 정확성을 높이기 위하여 유한요소법을 이용하는 세 가지 방법이 주종을 이루고 있다.

본 연구에서는 먼저 변위 증폭도가 우수하다고 알려진 catenoidal 및 exponential 도파봉에 대해서 이론적으로 연구하고, 이를 바탕으로 유한요소법을 이용하여 도파봉을 설계 및 제작하였다.

5. 파울링 진단기

5.1 제어 및 연산

상기한 일반적인 이론과 열교환 설비의 운전

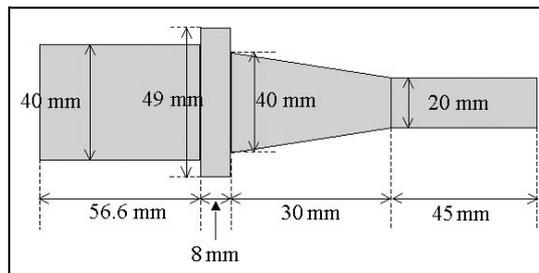


그림 7. 제작된 catenoidal 도파봉의 치수(20kHz)

조건을 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(초기 ΔT_0 , 종료 ΔT_t)를 이용하여 총괄전열계수(U)값을 계산한 후 산출한다.

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

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

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

5.2 진단기 제작

진단기의 전체 구성은 그림 8에서 나타내었으며, 앞서 설명한 컨트롤 장치, 파울링 센서, 입·출구 온도센서, 유량센서, 유량조절밸브, 트랜스미터, 정밀저항측정장치, 정전압 공급장치 등으로 구성하였다.

그에 따라 제작한 시제품의 사진을 그림 9에서 나타내었다. 파울링 센서의 백금선은 정밀저항측정장치에 연결되며, 내부의 열선은 외부의 정전압 공급수단에 연결된다. 이때, 열선에 교류전류를 공급할 경우에는, 금속선에 전류가 유도되어 전기저항 측정치에 오차를 발생시키므로, 정전압 공급장치는 직류전원을 사용하도록 구성하고, 전압을 50~120V로 변화시켜 파울링 센서 내부에서 발생하는 열량을 조절함으로써 실제적인 열교환기의 운전조건과 유사한 전열면의 열부하를 유지할 수 있도록 구성하였다. 전열면의 스케일 부착

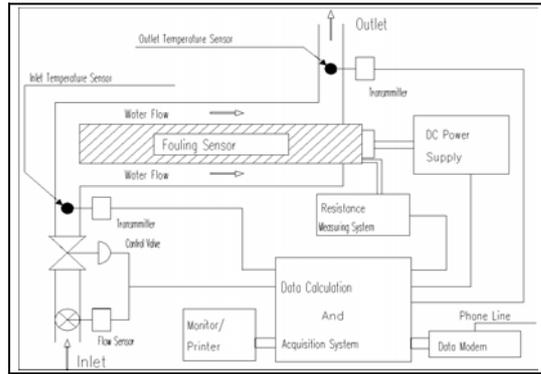


그림 8. 파울링 진단기 구성도



그림 9. 진단기 시제품

량은 유속이 낮을수록 심하게 부착되는 경향이 있기 때문에, 현장의 유속조건과 유사하게 유량 조절밸브를 이용하여 유량을 조절하였다.

6. 파울링 저감기

6.1 전자구동부

본 전자구동장치는 고출력으로 초음파 발신기를 구동하므로 충분히 고전압과 고전류에도 견딜수 있어야 하며 장시간의 사용에도 구동장치의 회로에 무리가 없도록 설계에 신중을 기해야 한다.

먼저, 구동장치를 모두 디지털로 하여 각종 설정변수(주파수, ON/OFF Time 및 duty비 등)를 해당설비에 맞도록 용이하게 바꿀수 있도록 하였으며 이 설정값은 온도, 습도 등의 외부환경

에 영향을 받지않고 쉽게 조정·저장되게 함으로써 정확한 값으로 작동되는 것이 특징이다.

회로의 구성은 제어부와 전원부, 출력부로 나눌 수 있으며 특히, 출력부의 진동자 구성방식은 기존의 임펄스 방식을 P.W.M(Pulse Width Modulation)으로 하여 초음파의 파워증대 및 효율성을 제고하였고, 이는 스케일을 제거하는데 있어서 각각의 해당설비의 조건에 부합되도록 펄스의 주기를 임의조정하여 달성할 수 있다.

P.W.M 방식이란 구동전원을 일정주기로 ON/OFF 하는 펄스형상으로 하고 그 펄스의 duty 비(ON시간과 OFF시간의 비)를 바꿈으로써 실현되고 특히, 초음파를 물리적으로 응용하는 분야에 있어서는 펄스주기를 높일수록 그 효율이 증대된다.

따라서, 본 연구에 적용하기 위한 저감장기의 전자구동장치 전자구동회로 구조는 그림 10과 같다.

6.2 저감기 제작

시제품으로 제작된 저감기는 그림 11에 나타냈으며 주요특징은 아래와 같다.

전력변환방식을 회로가 간단하고, multi-output에 유리하여, low cost로 만들 수 있는 Single ended flyback convert로 하고 Switching 소자는 FET BJT의 장점 요소를 살리고 실용적인 측면에서 독립적인 Single Module화가 가능하도록 IGBT를

채택하였다. IGBT 보호를 위해 발열저항을 이용하였으며, 전원에는 정전 검출부를 두어 순간 정전이나 기타 전원의 불안정에서 발생 될 수 있는 문제점에 대비하였다. 정전시에도 Setting치가 변하지 않도록 비휘발성 메모리를 사용하였다. 콘트롤 보드는 3개 까지의 출력보드가 연결 가능하도록 하였다. LED를 통하여 외부에서 동작상태를 알 수 있도록 하였으며, 4개의 Key S/W로 주파수, ON/OFF Time, Duty비를 조정할 수 있도록 하였다. 출력보드 1장에서 구동 가능한 발신기는 2개까지 연결하도록 하여 구동시스템당 1~6개의 발신기를 구동할 수 있도록 하였다.

7. 실험 및 성능평가

7.1 성능실험

그림 12, 13에 파울링 진단 및 저감기의 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 표 1, 2와 같이 실제 조건과 유사하게 조건을

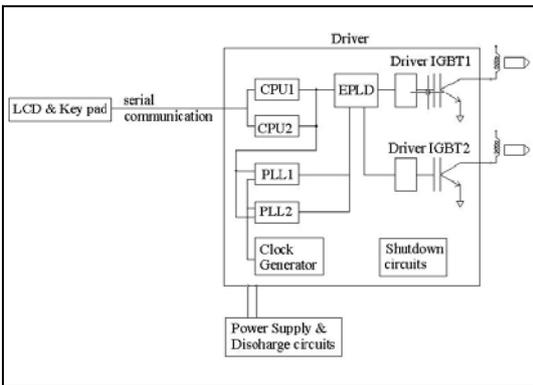


그림 10. 전자구동회로 구성도

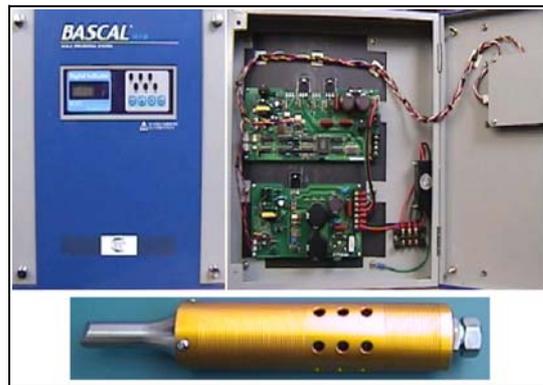


그림 11. 파울링 저감기 시제품

설정하여 소요되는 시간을 단축시킬 수 있었다.

본 실험에 사용한 수질은 발전소현장 냉각탑 계통보다 농축도 10배에 해당하는 수질을 갖도록 장치에 공급되는 용수에 불순물인 보강용 화학약품을 가하여 양이온과 음이온 합성수를 각각 조제하였으며, 실험시는 양이온용액과 음이온용액을 같은 비율로 사용하였다. 표 3은 실험실 공급용수와 합성수의 대표적인 수질을 나타낸 것이고, 표 4는 1회 실험에 사용된 실험설비용수용적에 따른 화학약품 투여량이다.

표 1. 성능실험 운전조건

목 록	설 정 치	
불순물 농도(약품)	초기투입 및 Make Up시 ※ 합성수 조제시 약품사용량 참조	
순환수 온도	35℃~40℃	
유 속	1m/s : 21.77 L/min(튜브 A, B) 11.36 L/min(진단장치)	
열부하	모델복수기 공급전력	9,500 Btu/ft ² /hr : 9,698W 12,000 Btu/ft ² /hr : 12,250W
	진단장치 공급전압	9,500 Btu/ft ² /hr : 50.2509V 12,000 Btu/ft ² /hr : 56.4772V
Make-Up	Auto	

표 2. 이온 보강용 화학약품 사용량

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



그림 12. 모델복수기를 이용한 성능실험 장치

실험은 순환수유속 1m/sec, 열부하 12,000Btu/ft²/hr와 표 3의 합성수 수질조건하에서 전열면의 오염도계수 측정시험을 수행하였다. 전열면에서 발생하는 스케일은 주로 탄산칼슘과 인산칼슘인 것으로 확인되었다.

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 ⁺²	ppm as CaCO ₃	43.26	472.80
Mg ⁺²	"	12.92	172.40
Fe ⁺³	ppm as Fe	<0.004	-
Na ⁺	ppm as CaCO ₃	15.30	668.72
HCO ₃	"	30.00	402.40
PO ₄	"	0	6.90
SO ₄	"	20.16	439.96
Cl ⁻	"	16.76	446.31
NO ₃	"	4.09	-
SiO ₂	ppm as SiO ₂	2.61	2.61

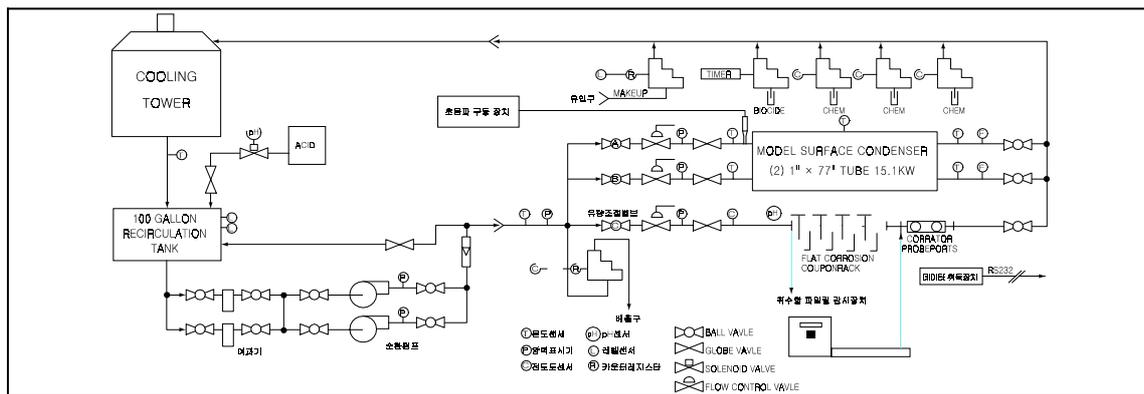


그림 13. 성능실험장치 구성도

표 4. 합성수 조제시 약품 사용량

구분	순도 (%)	사용량 (g/L)	1회 투입량 (g/L)	
양이온	CaCl ₂ ·2H ₂ O	99	0.6444	0.6444×420L = 270.648g
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	99	0.3962	0.3962×420L = 166.404g
음이온	Na ₂ SO ₄	99	0.3735	0.3735×420L = 156.870g
	NaHCO ₃	99	0.6257	0.6257×420L = 262.794g

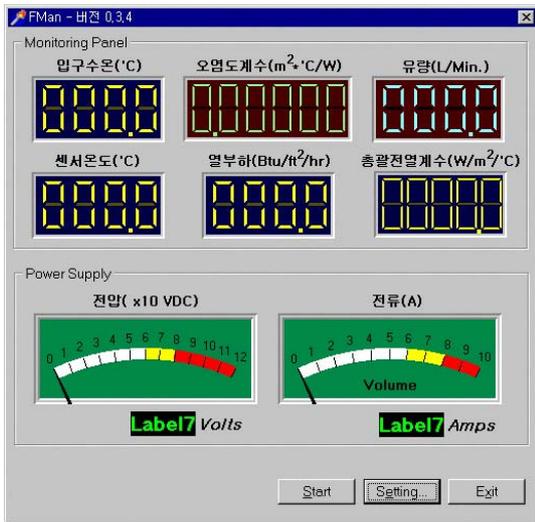


그림 14. 모니터링 화면

그림 14는 진단기의 PC모니터링 인터페이스이다. 이를 이용해 항시 일정간격으로 디스플레이 되는 값을 관찰하며, 저장된 자료를 출력하여 분석하였다.

7.2 성능평가

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

그림 15, 16은 모델복수기로부터 취득된 데이터를 간단한 오염계수식으로 계산하여 차트로 표시한 데이터이다. 실험 초반과 중반에 각 튜브의 오염계수 차는 A 튜브측에 초음파를 이용한

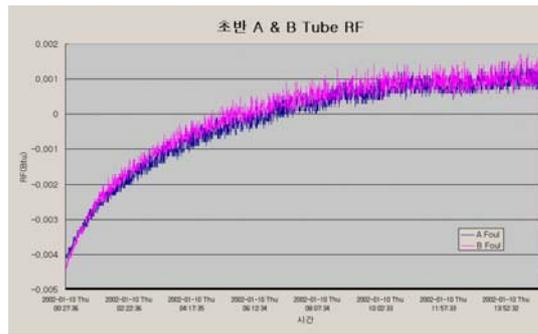


그림 15. 초반 A & B Tube RF

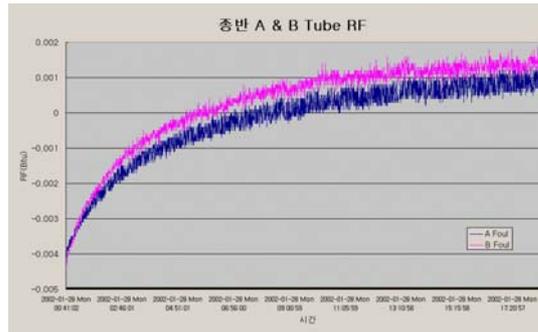


그림 16. 중반 A & B Tube RF

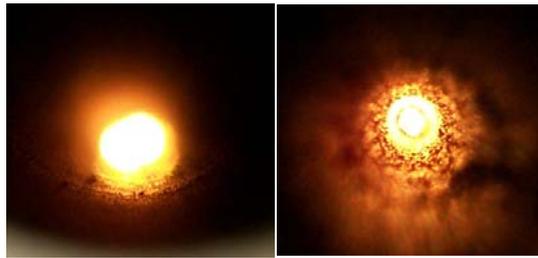


그림 17. 튜브 A

그림 18. 튜브 B

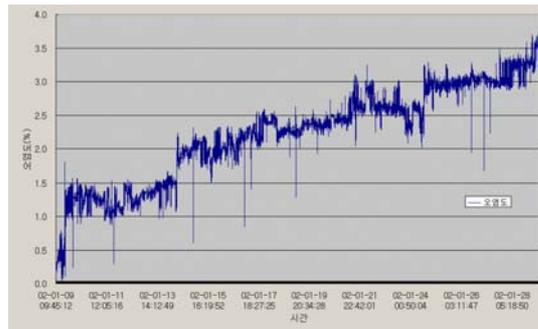


그림 19. 진단장치 오염도(%) 측정 결과

파울링 저장기를 장착함으로써 발생한 것이다. 이는 초음파를 주사한 튜브와 주사하지 않은 튜브의 파울링의 발생정도가 확연히 다른 것을 확인할

수 있게 해주는 데이터이다. 또한, 그림 17, 18을 육안으로 비교함으로써, 열교환 튜브에서의 초음파 저감기의 성능을 직접 확인할 수 있었다.

그림 19는 파울링 진단장치로부터 취득된 데이터로 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 20은 진단장치에 사용된 파울링 센서인데, 이를 분리해 건조한 뒤 각 부분별 부착된 파울링을 제거하여 질량을 측정하였다. 그림에서 ①번이 전열코일과 백금선이 감긴 부분이다. 따라서, 이 부분에 가장 많은 파울링이 부착된 것을 볼 수 있다.

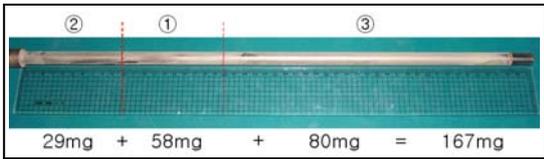


그림 20. 센서부착 파울링 질량측정

8. 결 론

본 연구에서 제안한 파울링 진단 및 저감기의 성능확인을 위해 모델복수기를 이용한 실험장치를 구성하고, 성능 테스트를 수행하였다. 진단기의 성능확인을 위해 실험 도중에 센서를 육안으로 관찰하여 파울링 부착 정도와 측정값과의 비교를 하였고, 실험 종료후 센서에 부착된 파울링 질량과 측정된 값을 비교·검토하였다. 또한, 저감기의 성능확인을 위해 모델복수기의 데이터를 진단기와 동시에 측정·수지하여 분석하고 실제 사용된 튜브를 실험종료 후 발취하여 육안으로 비교한 결과, 진단장치가 모델복수기에서 측정된 값보다 더욱 민감하게 반응하는 경향을 보였고, 측정 값이 실제 센서에 부착된 질량과 유사한 경향을 나타냈음을 알 수 있었으며, 저감기 또한 발신기를 부착한 열교환 튜브가 부착

하지 않은 튜브보다 월등히 청결함을 확인할 수 있었다.

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

본 연구는 산업자원부의 에너지 절약 기술개발 사업의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

[1] A. P. Pandey, K. K. Mallick, P. C. Pandey, and S. Varma, "Prevention of scale seposition on heat exchanger surfaces by use of high intensity ultrasonic waves during concentration of wet process phosphoric acid," Fert, News, 28(6), pp. 45-48, 1993.

[2] A. G. Duncan and C. D. West, "Prevention of incrustation on crystallizer heat exchangers by ultrasonic vibration," Trans. Instn. Chem. Engrs, 50, pp. 109-114, 1972.

[3] McCoy, J.W. "The Chemical Treatment of Cooling Water," Chemical Publishing Co., N.Y., 1984.

[4] NACE, "Standard Recommended Practice On-line Monitoring of Cooling Water", RP0189-95, 1995.

[5] "Kurita Handbook of Water Treatment", Kurita Water Industrials Ltd., 1985.

[6] O. B. Wilson, Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers (Peninsula, Los Altos, 1988), chap. 7, pp. 126-134.

[7] V. F. Nozdreva, Ultrasound in industrial processing and control (Consultants Bureau, New York, 1964).

- [8] Z. Kaczkowski, "Piezomagnetic device," Proceedings of the first international meeting on magnetoelastic effects and applications Naples, Italy, 24-26, May, pp. 177-183, 1993.
- [9] S. G. Amin, M. H. M. Ahmed, and H. A. Youssef, "Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis," Journal of Materials Processing Technology, 55, pp. 254-260, 1995.
- [10] Edward Eisner, "Complete solution of the Webster horn equation," J. Acoust. Soc. Am, 41(4), pt. 2, pp. 1126-1138, 1967.
- [11] Shuyu Lin, "Study on the longitudinal-torsional composite mode exponential ultrasonic horns," Ultrasonics, 34, pp. 757- 762, 1996.
- [12] W. P. Mason and R. F. Wick, "A barium titanate transducer capable of large motion at an ultrasonic frequency," J. Acoust. Soc. Am, 23(2), pp. 209-214, 1951.
- [13] Peter Lesniewski, "Discrete component equivalent circuit for Webster's horns," Applied Acoustics, 44, pp. 117-124, 1995.