

工學碩士 學位論文

産業用 熱交換設備에서의
파울링 診斷技術에 관한 研究
A Study on Fouling Diagnostic Technology
in an Industrial Heat-Exchange System

指導教授 柳 吉 洙

2004年 8月

韓國海洋大學校 大學院

컴퓨터工學科

金 相 烈

목 차

목 차	1
표 목 차	2
그림목차	3
Abstract	7
제 1 장 서 론	9
제 2 장 파울링 현상과 기존기술에 관한 고찰	13
2.1 파울링 발생 현상 고찰	13
2.2 파울링 발생대상 분석	32
2.3 기존기술의 특징 분석	52
제 3 장 파울링 진단기술개발	56
3.1 전열계수	56
3.2 오염도계수	58
3.3 전열면 오염현상 주요 영향인자	59
3.4 오염도계수 예측 모델	64
3.5 파울링 진단장치 구성	69
제 4 장 성능실험 및 평가	85
4.1 성능실험	85
4.2 필드테스트	118
4.3 성능평가	121
제 5 장 결 론	122
참고문헌	124

표 목 차

표 2.1 스케일 종류 및 전열계수 비교	14
표 2.2 수온에 따른 상수 A값	21
표 2.3 총 용존고형물 변화에 따른 상수 B값	22
표 2.4 복합화력발전소 발전용량 및 냉각설비 현황	34
표 2.5 복합화력발전소 수처리설비 현황	35
표 2.6 복합화력발전소 공업용수 수질현황	37
표 2.7 다관식 열교환기 특징	43
표 2.8 각종 이온쌍의 수중 용해도 비교	47
표 2.9 계절별 증발손실량 비교	49
표 3.1 열교환기 설계시 적용되는 오염도계수($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	59
표 3.2 Fouling 센서 사양	73
표 4.1 합성수 조제시 이온 보강용 화학약품 사용량	91
표 4.2 합성수 조제시 약품사용량	93
표 4.3 1차 성능실험 운전조건	94

그림 목 차

그림 2.1 결정핵의 성장과정 개념도	17
그림 2.2 탄산칼슘의 결정성장	18
그림 2.3 수온변화에 따른 황산칼슘 용해도 변화	24
그림 2.4 pH에 따른 수중 규산성분	28
그림 2.5 pH와 온도에 따른 실리카 용해도	29
그림 2.6 실리카 중합체의 구조	30
그림 2.7 규산마그네슘 침전에 의한 실리카농도 변화	30
그림 2.8 화력발전소 발전설비 계통도	33
그림 2.9 일과식 냉각수계	39
그림 2.10 개방순환식 냉각수계	40
그림 2.11 밀폐순환식 냉각수계	41
그림 2.12 다관식 열교환기 구조	42
그림 2.13 냉각탑 통풍방식의 종류	44
그림 2.14 물분자에 의한 광물질의 용해작용	46
그림 2.15 냉각탑 용수발란스 개념도	51
그림 2.16 EPRI fouling monitor sensor structure (US Patent 5,590,706, 1997) ·	52
그림 2.17 Rohrback Cosasco사의 DATS시스템 구조	54
그림 2.18 Yost & Son사의 파울링모니터	55
그림 3.1 간단한 수냉식 열교환기	58
그림 3.2 부착물 두께와 오염계수와의 관계	64

그림 3.3 불균일한 스케일의 측정	70
그림 3.4 개선된 파울링 센서의 구조	71
그림 3.5 파울링 센서 제작도면	72
그림 3.6 분해한 파울링 센서	72
그림 3.7 연결된 2개의 센서	73
그림 3.8 시스템 블럭다이어그램	75
그림 3.9 파울링 진단기 시제품	75
그림 3.10 시스템 하우징 설계도면	76
그림 3.11 센서 관찰용 pylex관	78
그림 3.12 pylex관 지지대	79
그림 3.13 전원공급부 배선도	80
그림 3.14 전체 시스템 배선도	80
그림 3.15 진단장치 사용자 인터페이스	81
그림 3.16 PC 모니터링화면	82
그림 3.17 모니터링 프로그램 설정 창	83
그림 3.18 모니터링 데이터 저장	84
그림 4.1 제작한 파울링 진단장치	86
그림 4.2 제작한 파울링 진단장치의 배관도	86
그림 4.3 모델복수기 전·후면	87
그림 4.4 모델복수기 냉각타워	89
그림 4.5 전체 성능실험 설비 구성도	90
그림 4.6 1차실험 장치구성	96

그림 4.7 모델복수기 모니터링 프로그램	97
그림 4.8 모델복수기 모니터링 프로그램 취득 데이터	98
그림 4.9 모델복수기 1차실험 HX 온도 및 입·출구 수온 (1)	99
그림 4.9 모델복수기 1차실험 HX 온도 및 입·출구 수온 (2)	99
그림 4.10 모델복수기 1차실험 입·출구 수온 (1)	100
그림 4.10 모델복수기 1차실험 입·출구 수온 (2)	100
그림 4.11 모델복수기 1차실험 대수평균온도차 (1)	101
그림 4.11 모델복수기 1차실험 대수평균온도차 (2)	101
그림 4.12 A & B Tube U-coefficient (1)	102
그림 4.12 A & B Tube U-coefficient (2)	102
그림 4.13 파울링 진단장치 모니터링 프로그램 인터페이스	103
그림 4.14 모니터링 데이터	104
그림 4.15 냉각튜브 내의 파울링(스케일) 부착량 확인	105
그림 4.16 스케일 일부제거 후 센서 사진	105
그림 4.17 모니터링용 온도센서 검량	106
그림 4.18 판넬용 온도센서 검량	106
그림 4.19 2차 실험시 진단장치 형태	108
그림 4.20 2차 실험 장치구성	108
그림 4.21 오염도 차트	110
그림 4.22 파울링 진단기의 2차 오염도 차트	111
그림 4.23 센서 질량 측정 결과	111
그림 4.24 3차 실험 장치 구성	112

그림 4.25 모델복수기의 초·중·종반 오염도 평균 차트	113
그림 4.26 파울링 진단장치 3차 오염도 데이터(전반)	114
그림 4.27 파울링 진단장치 3차 오염도 데이터(후반)	114
그림 4.28 센서에 부착된 스케일의 사진	115
그림 4.29 부착된 스케일을 부분별로 떼어낸 결과	115
그림 4.30 4차 실험 장치 구성	116
그림 4.31 4차실험에 적용한 최종 시제품	117
그림 4.32 진단장치 4차 실험결과	118
그림 4.33 파울링 진단기의 필드테스트 블록다이어그램	120
그림 4.34 파울링 진단기의 필드테스트 장면	120
그림 4.35 파울링 진단기의 필드테스트 결과 그래프	121

A Study on Fouling Diagnostic Technology in an Industrial Heat-Exchange System

Sang Yeol Kim

Department of Computer Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University

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.

On the development for the fouling diagnostic technology, we have used a new method which is changed multi-measuring points from a single-measuring point with U-coefficient. The performance of the diagnostic system has been evaluated with a scaling simulator that generates scaling on the tested tube wall. The measured values with the diagnostic system were compared with the amounts of the scaling

generated by the simulator. In addition to, we performed a field test for a reliable qualification of the diagnostic technology and verified a good performance and a stability of the diagnostic system.

The main conclusion is, that the proposed technology can feature great performance under worst operating conditions, easy maintenance and supervision, fast exploitation, and affordable cost.

제 1 장 서 론

오늘날 고도로 발달된 산업사회에서 가장 심각하게 직면하는 문제는 에너지 낭비에 따른 에너지 고갈의 가속화이다. 이러한 문제를 해결하고자 여러 분야에 걸쳐 에너지 사용의 최소화와 효율의 극대화를 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.

에너지가 생산 및 사용되고 있는 대표적인 에너지 공급설비는 발전소, 산업용 보일러, 냉각시스템 등을 들 수 있으며, 이들의 에너지 사용효율에 따라 막대한 양의 자원을 절약할 수가 있다. 에너지 공급설비의 효율은 여러 요인에 의해서 좌우되지만 특히 열교환기가 열효율 상승가치에 있어 상당히 중요한 부분을 차지하고 있다. 이는 온도가 다른 2개의 유체를 직·간접적으로 접촉시켜 열교환을 시키기 때문이다. 또한 열교환기는 열매체에 따라 가열기, 냉각기, 예열기 등으로 사용되며, 각 장치 및 시스템의 안전과 성능유지를 위하여 중요한 역할을 수행하고 있다.

전열면에 발생하는 파울링은 제조공정 및 보일러 설비의 효율을 크게 저하시키는 원인 중에 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 스케일이 형성되는 현상으로 한정한다. 이러한 스케일은 전체 열저항 중 가장 큰 열저항으로 작용하여 막대한 에너지 손실을 초래하고, 파이프 등이 교차되는 부분에 퇴적되어 마찰계수를 증가시킨다. 또한 열교환 시스템에 압력손실을 발생시

켜 원활한 운영을 방해하므로 보일러의 수명과 에너지 효율에 심각한 악 영향을 끼치는 요인이 된다^{[1][2][3]}.

한편, 우리나라의 1차 에너지 전체 소비량은 1999년 기준으로 181,363천 TOE이며, 이중 석유에너지가 97,270 TOE로 상당부분을 점유한다. 석유 에너지의 대부분이 산업분야의 보일러에서 소비되고 있어 보일러 효율 개선이 바로 국가에너지를 절감하는 첩경이 된다. 현재 국내에는 약 5만여 대의 보일러가 가동되고 있으며 배기가스 열손실, 보일러벽체 방열, 미연소분 손실, 블로우 손실 등으로 인하여 보일러의 효율이 82~92% 범위로써 아직 효율 개선의 여지가 많다. 보일러의 열효율 저하에 영향을 미치는 주요인자 중 스케일은 보일러 공정 효율을 크게 저하시킴과 동시에 전체설비의 부식축진 및 고장의 원인 가운데 하나로 작용한다. 따라서 공정 전열면에서의 스케일 또는 파울링을 정확하게 진단하여 이를 저감할 수 있는 기술개발이 요구된다.

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^[4].

미국, 일본, 캐나다, 프랑스는 보일러 및 열교환기 설계와 제작분야의 선진국으로서 발전소건설과 관련한 다수의 업체가 활동하고 있으며, 열교환기의 오염도계수(Fouling Resistance) 측정과 관련한 사업도 다양하게 이루어지고 있다. 이들 국가에서는 이미 상용화된 열교환기 오염도 감시장치가 개발되어 활용되고 있으나 아직도 감도와 정확도 측면에서 초보적

인 단계이며, 국내에서 관련분야의 기술개발이나 상용화 제품은 전무한 실정이다.

일반적으로 세정주기 및 효율계산을 위해서는 설비를 중단한 후 튜브를 발취하여 육안관찰 또는 스케일 부착량을 측정하는 방법 등이 사용되어 왔으나 설비의 연속적인 운전에 지장을 초래하므로, 최근에는 열교환설비의 스케일 부착 또는 오염도 증가를 지속적으로 감시할 수 있는 장치들이 개발되어 현장적용이 이루어지고 있다^[5]. 이렇게 설치되어 사용하고 있는 파울링 감시 장치는 입구, 출구와 전열면에 각각 하나 또는 둘씩의 온도 센서로부터 측정되는 값을 이용하여 전열계수를 계산하고 그 변화로 청결도를 측정해 왔다. 그러나, 실제 조건에서는 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 변화가 감지되기 때문에 측정감도 및 신뢰성이 부족한 문제점들이 있었다.

따라서, 본 논문에서는 전열면 전체의 온도변화를 관찰할 수 있는 새로운 방식의 파울링 센서를 이용하여 청결도 또는 오염도 계수를 정확히 산출하는 기술을 제안하고, 열교환기 조건과 유사한 소규모 실험장치를 구성하여 측정된 값과 실제 부착된 스케일 양을 비교·분석하여 성능실험을 수행한 결과와 실증을 위해 제작한 시제품의 필드테스트 결과에 대하여 논하고자 한다.

본 논문은 5장으로 구성된다. 2장에서는 일반적인 파울링 현상과 기존 기술의 특징에 대해 분석하고 3장에서는 본 논문에서 제안한 전열계수를

이용한 파울링 진단기술에 대해 기술하고 4장에서는 제안한 기술의 성능 실험 및 필드테스트 결과를 고찰하고 평가한다. 끝으로 5장은 결론으로 맺는다.

제 2 장 파울링 현상과 기존기술에 관한 고찰

2.1 파울링 발생 현상 고찰

냉각수계에서 스케일 발생현상은 열교환이 이루어지는 금속면에서 불용성 염류나 산화물이 부착되어 결정이 성장되는 것을 의미한다. 수중에서 용해도적(KSP: Solubility Product)에 대한 온도증가 영향으로 스케일이 빈번하게 발생한다. 스케일은 한가지의 중요한 원인에 의해 발생하는 데 그것은 수중 용존 고형물 농도가 용해도 값을 초과하기 때문에 발생하는 것이다.

염이 용액 중에 용해될 때 결정내부의 이온들이 함께 결합되도록 유지시켜 주는 정전인력을 극복하기 위해 열이 흡수되며, 이어서 물분자로 둘러싸인 이온들이 열을 방출하면서 수화된다. 이온들이 $ZnSO_4$ 와 함께 이미 수화되어 있다면 첫번째 단계에서 흡수된 열이 두번째 단계에서 흡수된 열보다 커서 전반적인 열 흡수로 인해 온도가 증가함에 따라 염의 용해도는 증가한다. 대부분의 염이 용수 중에 용해되면 열이 흡수되어 용수의 온도가 증가함에 따라 염의 용해도가 증가한다^[4].

냉각수계에 사용되는 보급수중에는 광물질이 용존상태로 들어오게 되나, 냉각수의 증발로 인한 광물질 농축, 열교환 표면에서의 온도상승 및 용수 pH변화 등으로 스케일 발생경향이 높아지게 된다. 황산칼슘과 인산칼슘을 포함한 일부 무수염들은 온도와 pH증가에 따라 용해도가 감소하며 가열하면 포화용액으로부터 결정화되는 경향이 있다. 수중에서 발생하는 스케일로는 황산칼슘, 인산칼슘, 규산마그네슘, 탄산칼슘 등이 있으며,

스케일의 열전도도는 튜브금속의 열전도도보다 대단히 낮기 때문에 스케일이 부착되면 열교환기의 열효율이 현저하게 저하된다. 또한, 과잉의 스케일이 튜브내에 성장하면 튜브가 폐색되는 경우도 있다^{[6][7]}.

냉각수계통에서 문제되는 스케일은 용수 pH와 온도상승으로 용해도가 감소하기 때문에 농축도를 높게 운전하거나 수온이 높은 부위에서 쉽게 발생한다. 이들의 대표적인 성분들은 표 2.1과 같으며 금속에 비해 열전달율이 매우 낮기 때문에 전열면에 부착될 경우 열효율을 크게 떨어뜨린다. 또한 배관내에 스케일이 부착성장할 경우 배관 폐색현상으로 압력손실의 증가원인이 된다.

표 2.1 스케일 종류 및 전열계수 비교

구분 스케일	화 학 식	전 열 계 수	비 고
탄산칼슘	CaCO ₃	3	<금속의 전열계수> ○ Al-Brass: 700 ○ Cu-Ni(7:3): 310 ○ SUS304: 113
인산칼슘	Ca ₃ (PO ₄) ₂	26	
황산칼슘	CaSO ₄ ·2H ₂ O	18	
규산마그네슘	Mg ₂ Si ₃ O _{7.5} ·3H ₂ O	1	
산화철	Fe ₂ O ₃	7	

2.1.1 스케일 생성이론

스케일이 발생되어 침전되는 과정은 (1)핵생성, (2)결정성장, (3)고형물 응집과 숙성의 삼단계로 진행되며, 수용액이 때로는 약간 과포화 상태에

서도 안정화될 수 있다. 과포화도를 증가시키거나 작은 결정입자를 과포화용액에 첨가하면 침전반응이 일어난다.

Doremus는 난용성 결정의 침전속도 연구에서 다음과 같은 일련의 발생 과정을 가정하였다. 첫째, 염의 미세 결정입자들이 일정 수 이상 형성되면 결정핵이 발생된다. 결정핵이란 그 입자를 중심으로 고상의 형성이나 침전이 자연발생적으로 일어날 수 있는 아주 작은 입자이다. 핵은 침전물 성분이 될 몇 개의 분자나 이온쌍들이 덩어리져 생성될 수도 있고, 또는 침전물과 화학적 관련성은 없지만 그 격자구조가 유사한 작은 입자일 수도 있다. 고체상이 존재하지 않는 균일용액에서 침전이 일어나려면 용액 중에 핵이 생성되어야 한다. 핵이 침전물 성분이온으로부터 생성되면 균일핵이라고 하고, 침전물성분과 무관한 입자이면 이질핵이라고 한다. 실제적으로 모든 천연수는 여러 형태의 작은 입자들을 함유하고 있으므로 천연수에 생성되는 모든 핵은 이질핵이다. 침전물을 구성할 이온이 모여 핵을 생성하는 과정은 흡열반응인데, 이는 용액중의 이온들이 무질서한 상태에서 규칙적인 구조를 가진 핵을 생성하기 때문이다. 이 에너지 소요가 충족되어야 하므로 균일용액으로부터 침전이 생성되려면 용액의 이온농도는 고형물과의 평형으로부터 예측되는 이온농도 이상, 즉 과포화상태가 되어야 한다. 핵생성의 추진력인 과포화도는 이질핵 생성시보다 균일핵 생성시에 더 커야 한다.

둘째, 결정입자의 성장은 표면에 이온이 흡착되어 층을 형성함에 따라 이루어진다. 결정핵의 크기가 임계치보다 작으면 다시 녹고 임계치보다 크면 성장하며, 어떤 유도기간이 지난 후에야 과포화용액에서 결정들이

성장하기 시작한다. 포화도가 낮은 용액에서는 유도기간이 길고 포화도가 높은 용액에서는 유도기간이 짧다. 온도증가에 따라 용해도가 감소하는 탄산칼슘과 인산칼슘의 경우 높은 온도에서 포화도가 커져 유도기간이 짧아져서 결정이 쉽게 부착된다. 또한, 유속을 증가시키면 분자의 충돌빈도가 증가되어 유도기간이 짧아진다. 침전에 의하여 생성된 최초의 고형물이 주어진 조건에서 열역학적으로 가장 안정한 고형물과 다를 수 있다. 그런 경우에는 장시간에 걸쳐 침전물의 결정구조가 안정한 결정구조로 변해간다. 이러한 변화는 통상적으로 보다 안정한 상(Phase)의 용해도가 초기에 형성된 불안정한 상보다 낮기 때문에 추가적인 침전반응을 동반하여 용액의 이온농도를 감소시키는 현상과 같다. 이처럼 장시간에 걸쳐서 일어나는 결정구조 변화를 숙성이라고 한다. 결정성장속도는 결정면에서 용질의 확산속도 및 결정면에서 용질의 부착반응속도에 의해 결정된다. 용질확산의 추진력은 결정면에서의 용질농도와 용수 중에서의 용질농도 사이의 차이이다. 확산속도와 관계된 인자로는 유속, 수온, 및 용액점도 등이 있다. 결정면에서의 용질 부착현상은 매우 복잡하여 여러 종류의 부착반응기구가 제안되고 있으나 정성적인 반응기구는 아직 확립되지 않고 있다. 한가지 이론은 결정면에 흡착된 용질이 Kink라고 불리는 격자 결함부위로 이동해서 결정화된다는 것이다.

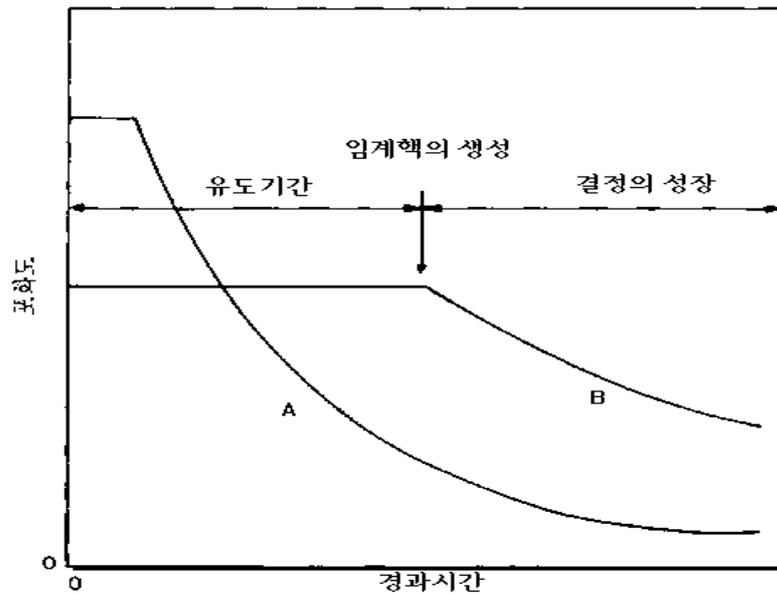


그림 2.1 결정핵의 성장과정 개념도

세제, 최초입자 크기가 증가됨에 따라 응집과정을 통해 입자끼리 결합한다. 마지막에는 Ostwald 숙성단계인 경쟁성장을 하게 되는데 이 단계에서는 작은 입자들이 용해되고 큰 입자들이 성장하게 된다. 입자크기가 작을수록 비 표면적이 크고 따라서, 표면에너지도 크므로 작은 입자와 평형인 용액의 이온농도는 큰 입자와 평형인 용액의 이온농도보다 높다. 결과적으로 크기가 다양한 입자들의 혼합물에서는 용액이 큰 입자에 대하여는 과포화 되어있고, 작은 입자들에 대해서는 불포화상태로 작용한다. 따라서, 이온들은 큰 입자 표면에 더욱 침전되고, 큰 입자의 성장으로 인하여 이온농도가 감소할수록 불포화상태에 있는 작은 입자들이 더욱 용해된다. 결국 작은 입자들이 용해되면서 큰 입자들을 더욱 성장시키는 결과가 된

다. 또한, 작은 입자들끼리의 응집에 의해서도 큰 입자로의 전환이 촉진된다. 그림 2.1은 시간경과에 따라 포화도 변화를 관찰함으로써 결정핵이 생성되어 성장하는 개략적인 과정을 나타내고 있다. 포화도가 높은 A용액은 결정이 성장할 때까지의 유도기간이 짧으며, 일단 일정크기 이상의 임계치보다 커서 결정이 성장되면 용액중의 용질농도가 감소하기 때문에 포화도는 급격히 낮아진다^[7].

성장한 결정은 이온성이 낮고 응집하려는 경향이 있다. 이러한 응집현상의 예를 그림 2.2에 나타내었다. 그림 2.2(1)은 탄산칼슘 과포화용액을 2분간 정지한 후 석출된 탄산칼슘 결정으로서 일부가 성장되었음을 알 수 있다. 12분이 경과하면 그림 2.2(2)에서 볼 수 있듯이 큰 결정이 생성됨을 관찰할 수 있다.

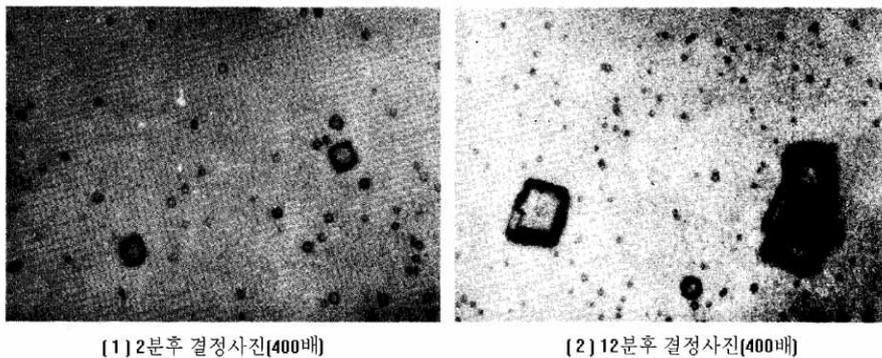


그림 2.2 탄산칼슘의 결정성장

2.1.2 스케일 종류

냉각수계에서 자주 문제가 되는 스케일들은 다음과 같은 것들이다^[8].

- 탄산칼슘
- 인산칼슘 및 인산아연
- 황산칼슘
- 실리카 및 규산마그네슘

일반적으로 냉각수계에 문제가 되는 스케일성분은 pH와 온도가 상승함에 따라 용해도가 저하되기 때문에 특히 온도가 높은 전열면에서 석출하여 부착되기 쉽다^{[9][10][11]}. 다음에서 대표적 스케일성분들의 특징을 살펴본다.

가. 탄산칼슘(CaCO₃)

지금까지 냉각수계에서 가장 많이 발견되는 대표적인 스케일이다. 일반적으로 칼슘은 중탄산칼슘 상태로 용해되어 있지만, 온도와 pH가 증가하면 식(2.1)과 같이 중탄산이온이 분해되어 탄산칼슘 스케일이 생성된다. 스케일 발생경향은 주로 수중의 칼슘경도와 중탄산알카리도 농도에 따라 영향을 받는다. 발생된 스케일은 굳껍질과 같이 단단한 부착물을 형성하여 열교환기의 전열효율을 크게 감소시키게 된다.



탄산칼슘 스케일 발생경향은 다음 세가지의 지표를 이용하여 판단할 수 있다.

○ Langelier index (포화도 지수) : $\text{LSI} = \text{pH}_{\text{act}} - \text{pH}_s$ (2.2)

* (+) : Scaling , (-) 또는 (0) : non-scaling

○ Ryzner index (안정도 지수) : $\text{RSI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}_{\text{act}}$ (2.3)

* (≤ 6) : Scaling, (> 6) : non-scaling

○ Puckorius index (수정된 안정도지수) : $PSI = 2pH_s - pH_e$ (2.4)

* (≤ 6) : Scaling, (> 6) : non-scaling

* $pH_e = 1.465 \log(M\text{-Alkalinity}) + 4.54$

이러한 지표들을 계산하기 위해서는 주어진 용수에 대해 탄산칼슘 포화시 pH값(pH_s)을 계산하여야 한다. 계산된 pH_s 값은 일반적으로 5~11 사이의 값을 갖게 된다.

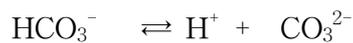
다음에서 pH_s 값 계산을 위한 식의 유도과정을 살펴본다. 탄산칼슘 용해도적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}] = K_{sp} \quad (2.5)$$

K_{sp} : 탄산칼슘의 용해도 적

[] : 이온의 몰농도(mol/L)

중탄산이온의 화학평형은 다음과 같다.



$$K_2 = \frac{[H^+] \cdot [CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (2.6)$$

K_2 : 탄산의 2차 해리상수

위의 두식에 의해 탄산칼슘 용해도적은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{sp} = \frac{[K_2] \cdot [Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]}{[H^+]} \quad (2.7)$$

HCO₃⁻ 농도가 M-Alkalinity와 같기 때문에 위의 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log[\text{Ca}^{2+}] + \log[\text{M-Alk}] + \text{pH} = \log(\text{K}_{\text{sp}}/\text{K}_2) \quad (2.8)$$

log(K_{sp}/K₂)값은 유일하게 온도의 영향을 받아 변화되는 값이다. 위식은 탄산칼슘의 포화상태에서의 수질 특성치의 상관관계를 보여주고 있으며, 이 식을 만족시켜 주는 pH값을 pH_s라고 한다. 위에서 유도한 식은 무한 희석용액에서의 분자의 활동도가 1이라는 가정하에 유도된 것으로 실제 적용하기에는 현실성이 없으므로, 다음과 같은 일반화된 식을 이용하면 pH_s값을 용이하게 계산할 수 있다. 여기서, 칼슘이온과 알카리도 단위는 mg/L as CaCO₃이다.

$$\text{pH}_s = A + B - \log [\text{Ca}^{2+}] - \log [\text{M-Alkalinity}] \quad (2.9)$$

여기서 A는 식(2.8)에서의 log(K_{sp}/K₂)와 같은 항으로 온도에 관계된 상수이며, B는 수중 총 용존고형물과 관련되는 상수 값이다. 표 2.2와 표 2.3은 온도와 총 용존고형물 농도에 따른 상수 A, B 값들을 나타낸 것이다.

표 2.2 수온에 따른 상수 A값

수온(°C)	0	4	8	12	16	20	25
A 값	2.60	2.50	2.40	2.30	2.20	2.10	2.00
수온(°C)	30	40	50	60	70	80	-
A 값	1.90	1.70	1.55	1.40	1.25	1.15	-

표 2.3 총 용존고형물 변화에 따른 상수 B값

TDS,mg/L	0	100	200	400	800	1000
B 값	9.70	9.77	9.83	9.86	9.89	9.90

결정성장을 억제하고 결정격자를 변형시켜 주는 산이나 특수약품을 사용함으로써 탄산칼슘 발생을 억제할 수 있으며, 저렴한 황산이 가장 많이 사용된다. 산을 주입하면 CaCO₃보다 용해성이 더 큰 염들이 생성되는데, 이러한 염들도 포화되면 열전달 표면에서 부착물을 발생 할 수 있다.



기타 화학약품 처리로 탄산칼슘 침전을 억제할 수 있으며, 비용면에서 효과적인 처리약품은 중합인산염들이다. 이러한 부류에 속하는 화합물들은 피로인산염, 트리폴리인산염 및 헥사메타인산염이 있다. 대략 1mg/L의 약품이면 탄산칼슘 포화농도를 44배까지 안정화시킬 수 있다. 기타 효과가 있는 인산화합물들로는 AMP, HEDP와 같은 유기인산염이 있다. 이들의 사용농도는 0.25~0.5 mg/L 정도이다. 유기폴리머들도 효과적인 탄산칼슘 억제제인 것으로 알려져 있다. Polyacrylate, Polymethacrylate, Polymaleate 및 이들의 공중합체들과 같은 Polycarboxylate가 있다. 이들의 처리농도는 2~4mg/L 범위에서 보통 사용되며 인산염처리시 보다 처리농도가 높다. 효과적인 스케일억제를 위해 위와 같은 중합체의 분자량은 100~10,000amu정도가 되어야 한다. 탄산칼슘 스케일억제를 위해 이중 관능기를 가진 화합물들이 최근에 개발되었다. Phosphinocarboxylic Acid는 유기인산 관능기와 카르복실산 관능기를 함유하고 있다. Phosphono와 Carboxylic 관능기를 결합시킨 단순한 분자들도 개발되어 매우 효과적인

탄산칼슘 스케일억제제로 사용되고 있다. 그러나, 관례적으로 사용하는 저분자중합체, 중합인산염 및 유기인산염 사용시보다 처리비용이 고가이다 [8].

나. 황산칼슘(CaSO₄)

시멘트와 성상이 유사하며 연한 회색을 띠고 있다. 수온이 증가하거나 pH가 감소할수록 용해도가 감소한다. 이러한 스케일은 주로 pH조절을 위해 사용하는 황산으로부터 유리된 황산이온과 수중의 칼슘경도가 반응하여 발생된다. 탄산칼슘과 같이 매우 치밀해서 열전달 효율을 크게 감소시키며 화학세정으로 거의 제거되지 않는다.

황산칼슘에는 98℃이하에서는 안정한 2수염(CaSO₄·2H₂O), 98℃와 170℃사이에서 안정한 반수염(CaSO₄·½H₂O), 170℃이상에서 안정한 무수염(CaSO₄)의 세가지 종류가 있다. 냉각수계에서 존재하는 가장 일반적인 황산칼슘은 2수염 형태이다. 그림 2.3은 온도증가에 따른 각종 황산칼슘의 용해도 변화를 나타낸 것이다.

황산칼슘의 용해도는 탄산칼슘 용해도의 약 50배정도이다. 따라서 황산주입으로 탄산칼슘 스케일 발생을 억제하기 위해 용수 pH를 제어하여야 한다. 황산칼슘 용해도는 37℃까지는 수온이 증가함에 따라 증가하고, 37℃이상에서는 온도증가에 따라 용해도가 감소하는 경향이 있다. 스케일억제제를 사용하지 않은 경우 칼슘이온과 황산이온 농도의 상한은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$[Ca^{2+}] \times [SO_4^{2-}] = 500,000, \quad [] : \text{mg/L} \quad (2.11)$$



그림 2.3 수온변화에 따른 황산칼슘 용해도 변화

황산칼슘 스케일은 Polyacrylate, Phosphinocarboxylate를 사용하면 효과적으로 억제된다. 탄산칼슘 스케일에서와 마찬가지로 1,000~10,000amu 범위내의 분자량을 갖는 저분자 중합체 사용으로 스케일발생을 효과적으로 억제할 수 있다. 1~2mg/L 처리농도로 황산칼슘 용해도를 20배까지 증가시킬 수 있다. 황산칼슘침전을 효과적으로 억제하기 위한 기타 처리약품으로는 AMP가 있으며, AMP처리농도는 대략 0.5mg/L 정도이다^[9].

다. 인산칼슘 [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$]

인산칼슘 스케일은 탄산칼슘 스케일에 이어 두번째로 가장 많이 발생되며 보통 연노랑색을 띠고 있다. 냉각수계에서 금속의 부식억제를 위해 정인산염과 중합인산염을 사용한다. 고온에서 중합인산염은 정인산염으로 가수분해되며 이 분해율은 순환수의 체류시간에 따라 다르지만 40~90% 정도이다. 정인산염은 칼슘이온과 결합하면 비정질의 인산칼슘이 생성된다. 냉각수계에서 가장 일반적인 인산칼슘 스케일은 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 형태이며, 용수의 pH, 온도, 칼슘이온 농도 및 인산이온 농도가 증가함에 따라 증가한다. 다른 발생원은 정인산 이온을 다량 함유하고 있는 농업용수나 도시하수를 보급수로서 이용할 때 발생할 수 있다.

인산칼슘 스케일을 예측하는 데는 두가지의 방법이 있다. Green 과 Holmes는 인산칼슘 포화용액에 대해 다음과 같은 식을 보고하고 있다.

$$2 \log \left[\frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 + [H^+]^3 + K_1 \cdot [H^+]^2 + K_1 \cdot K_2 \cdot [H^+]} \right] - \log K_{sp}$$

$$= -3 \log [\text{Ca}^{2+}] - 2 \log \{[\text{H}_3\text{PO}_4] + [\text{H}_2\text{PO}_4^-] + [\text{H}_2\text{PO}_4^-] + [\text{PO}_4^-]\} \quad (2.12)$$

K_{sp} : 인산칼슘의 용해도적, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

K_1, K_2, K_3 : 인산의 제1, 제2, 제3 해리상수

[] : 인산염 및 기타 이온의 용적몰농도

위식의 왼편은 pH와 온도인자라고 하고 오른편의 첫번째, 두번째항은 칼슘 및 인산염 인자이다. Green은 이러한 인자들과 인산칼슘포화도 사이의 다음관계식을 제안하였다.

(pH,온도인자) > {(칼슘인자) + (인산염인자)} : 인산칼슘 과포화용액
 (pH,온도인자) < {(칼슘인자) + (인산염인자)} : 인산칼슘 불포화용액
 Green에 의해 얻어진 지수는 인산염의 평형조건으로부터 유도되었기 때문에 현장의 실제조건과 다르다. Kubo 등은 실험에 의해 인산칼슘의 임계부착 pH(pH_s)를 결정하여 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$pH_c = \frac{11.755 - \log[CaH] - \log[PO_4] - 2\log t}{0.65} \quad (2.13)$$

여기서, [CaH] : 칼슘경도 (CaCO₃)
 [PO₄] : 인산염농도 (PO₄³⁻)
 t : 온도 (°C)

포화지수의 정의는 다음과 같다.

$$SI = pH_a - pH_c \quad (2.14)$$

여기서, pH_a : 실제 pH

SI > 0 : 인산칼슘의 과포화 조건

SI < 0 : 인산칼슘의 불포화 조건

인산칼슘의 용해도는 pH가 증가함에 따라 감소하여 석출되는 경향이 있으며 온도(25~75°C)의 영향은 적다. 이러한 부착물은 보통 비정질로서 시간이 지남에 따라 보다 결정질인 Hydroxyapatite, Ca₅(PO₄)₃OH로 변형된다. 인산칼슘의 용해도(약 10⁻³⁰)가 낮기 때문에 pH7~7.5에서 5mg/L의 정인산이온과 300mg/L의 칼슘이온들을 함유하는 용수 중에서는 쉽게 부착물들을 형성할 수 있다.

인산칼슘 스케일발생을 억제하는 것은 매우 어렵기 때문에 쉽게 발생되는 부착물을 억제하기 위한 연구가 집중적으로 이루어졌다. 이 스케일억제제들로는 Acrylic acid-hydroxypropyl acrylate copolymer, Styrene sulfonic acid-maleic acid copolymer, Acrylic acid-sulfonic acid copolymer 및 Phosphino/Acrylic acid-organo sulfonic acid copolymer가 있다. 이것들은 열전달면에서의 인산칼슘 부착을 방지시켜줄 뿐만 아니라 인산칼슘 부착물 형태와 크기를 크게 변형시켜 스케일 성장을 억제한다. 이러한 Copolymer의 사용농도는 pH8~8.5, 500mg/L as CaCO₃ 의 칼슘경도, 10mg/L의 PO₄³⁻ 이온농도 조건에서 10~15mg/L정도이다. 칼슘경도와 인산이온 농도가 증가하면 사용하는 처리제의 농도를 증가시켜야 한다. 인산칼슘 스케일 발생억제를 위한 Copolymer 적용기술 개발로 탄소강 부식억제를 위한 정인산염을 효과적으로 사용할 수 있다.

라. 실리카와 규산마그네슘

규산의 해리평형조건은 다음식으로 표현된다.



$K_1 = 10^{-9.1}$, 규산의 제1해리상수

$K_2 = 10^{-11.77}$, 규산의 제2해리상수

그림 2.4는 여러 pH 범위에서 메타규산의 존재비를 보여주고 있다. 규산은 해리되지 않은 상태가 안정하며 pH8.0 미만에서는 HSiO₃⁻농도가 매우 낮다. 따라서 공업용수중에서 규산은 해리되지 않은 상태로 존재한다.

pH9.0 이상에서는 HSiO_3^- 이온평형 농도 증가로 규산의 용해도가 증가한다. 그림 2.5에 나타난 실리카의 용해도는 규산단량체의 용해도를 도시한 것이다. 규산농도가 단량체농도를 초과할 때 규산이 농축중합에 의해 결합되어 그림 2.6에 나타난 구조를 갖게 된다. 중합체의 분자량이 증가하면 전열면에 부착되어 매우 단단한 스케일이 형성된다. 실리카부착을 방지하기 위해서는 수중의 실리카 농도를 용해도 미만으로 유지하여야 한다.

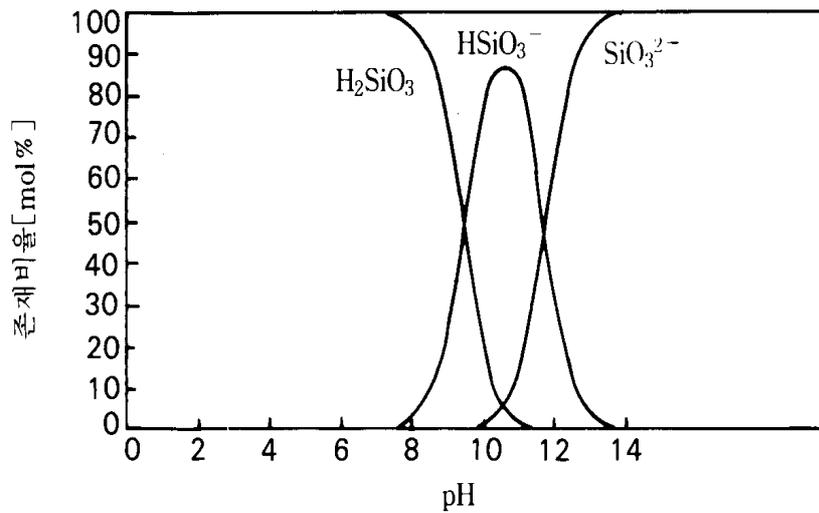


그림 2.4 pH에 따른 수중 규산성분

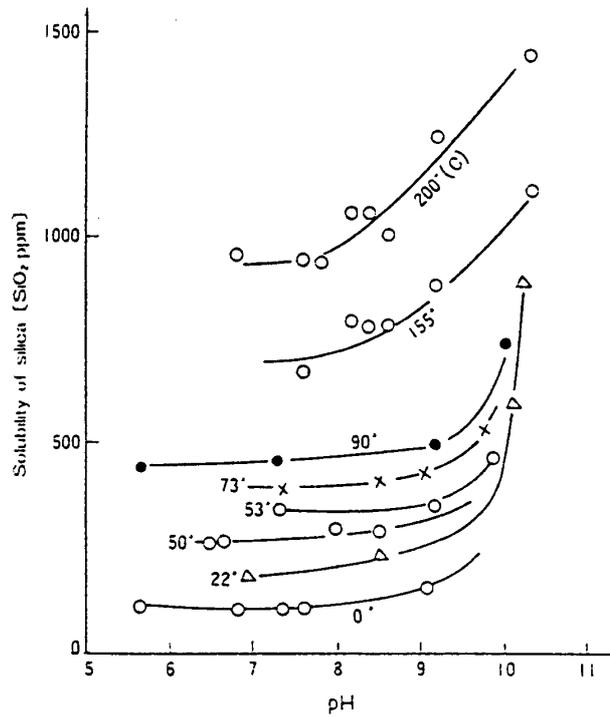


그림 2.5 pH와 온도에 따른 실리카 용해도

규산마그네슘에는 Forsterite[Mg_2SiO_4], Chrysolite[$Mg_3SiO_5(OH)_4$], Talc [$Mg_3SiO_4(OH)_2$], Sepiotile[$Mg_2Si_3O_{7.5}OH \cdot 3H_2O$]과 같은 4가지 종류의 분자가 있다. 냉각수계통에서 일반적으로 발견되는 스케일은 Talc(활석) 형태이다. 그림 2.7은 실리카가 용해도 미만으로 유지된다고 할지라도 마그네슘이온 존재시 규산마그네슘 스케일이 형성되는 것을 보여주고 있다. 그림 2.5를 보면 온도와 pH가 증가하면 실리카 용해도가 증가하나, 규산마그네슘의 경우는 20°C에서는 1개월이 지난 후에도 부착물이 발생되지

않으나, 70°C에서는 짧은 시간내에 발생되어 온도증가가 규산마그네슘 발생속도를 가속화시키는 것을 알 수 있다.

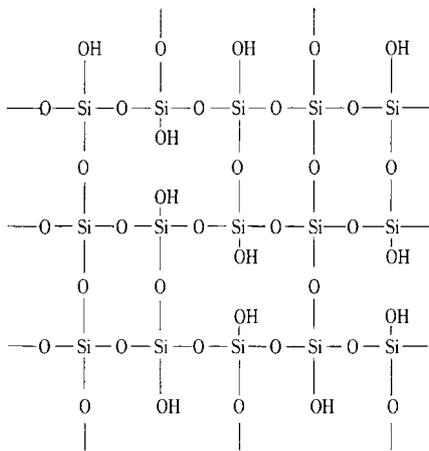


그림 2.6 실리카 중합체의 구조

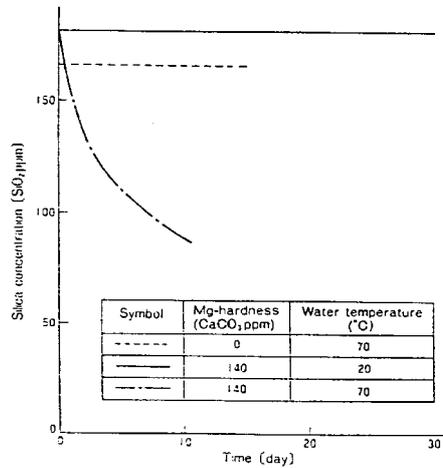


그림 2.7 규산마그네슘 침전에 의한 실리카농도 변화

규산칼슘(CaSiO₃)과 규산마그네슘(MgSiO₃) 스케일은 pH8.5이상의 알칼리수용액 조건에서 형성되는 경향이 있다. 이러한 스케일은 매우 치밀해서 열전달표면으로부터 제거하기 어렵다. 실리카의 용해도는 pH증가에 따라 증가하지만, 알칼리성 실리카염의 용해도는 pH 증가에 따라 감소한다. 재순환냉각수계에서 허용되는 실리카농도는 기타의 여러 인자에 의해 영향을 받지만 보통 150mg/L 정도이다. 마그네슘 농도가 50mg/L의 경우에도 실리카농도가 150mg/L이면 규산마그네슘이 열전달면에 침전될 수 있다. 마그네슘과 실리카의 용해도적은 35,000(Mg²⁺, mg/L as CaCO₃ × SiO₂, mg/L as SiO₂)이하 인 것으로 알려져 있다. 예방조치로서 화학약품

의 주입에 의한 예방법은 없으며 가장 효과적인 방법은 재순환 냉각수계에서 실리카 농도를 150mg/L 미만으로 유지하는 것이다.

2.1.3 파울링 저감 및 제거방법

냉각계통에서 파울링현상은 보급수중에 유입된 부착물, 대기오염물, 부식생성물, 화학반응생성물 및 미생물생장으로부터 발생된다. 냉각탑에서는 진흙과 미생물 협잡물로 인해 공기 및 용수의 흐름이 방해를 받아 열방출이 감소되고 극한 경우는 충전재를 손상시킬 수 있다. 강물중의 찰흙과 같은 부유물질이나 응집조 또는 침전조 유출수중 Floc과 같은 상당량의 부유물질이 함유되어 있는 경우에 Side-stream여과기를 설치하는 것이 큰 도움이 될 수 있다. 순환수 유량의 2%만 통과시킬 크기의 여과장치이면 5~8의 운전농축도에서 부유물질의 80~90%를 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 조건하에서 여과속도는 대략 증발속도와 같다. 보급수중에 연속적으로 유입되는 침적토 등을 제거하기 위하여 필요한 여과용량은 다음 식으로 주어진다.

$$\text{여과수 유속} = \frac{100}{100 - \text{제거율, \%}} - \text{Blow-down}(gpm) \quad (2.17)$$

또한, 파울링을 저감 및 제거하는 방법 중 화학약품을 이용한 스케일 억제나 세척에는 부수적인 환경 오염문제가 발생하고 그에 따른 부대비용이 상당히 지출된다. 따라서, 대부분의 설비 관리자들은 약품으로 처리하는 정도를 조절하고 일정한 시기를 선택하여 주기적인 오프라인 세척을 실시한다. 그 외에 다른 방법으로 연구되어 개발된 방법으로는 입자 순환 방식이^{[1][2]} 있는데 이는 스케일이 부착될 수 있는 성질의 입자를 순환식

열교환기내에 투여하여 일정한 시간이 지나고 입자를 교체/세척하는 방식인데, 이 또한 스케일의 생성을 늦추는 방법일 뿐 결국에는 열교환기를 교체하거나 오프라인의 세척이 필요하다.

따라서, 여러 가지의 방법을 혼합하여 최적의 효율을 유지하며 설비의 지속적인 가동을 위해선 실시간으로 열교환기내의 오염상태를 진단하고 파울링(스케일)의 부착을 최대한 방지하는 것이 바람직 할 것이다.

2.2 파울링 발생대상 분석

2.2.1 발전설비 현황

신도시 복합화력 발전소는 고청정 연료인 액화천연가스를 발전연료로 사용하고 전기와 지역난방열을 수요에 따라 가변적으로 생산·공급하도록 설계되어있다. 그림 2.8은 일반적인 화력발전소 발전설비 계통도를 나타낸 것으로, 가운데 둥근 점선부분에 열교환기의 일종인 복수기가 위치하여 수증기를 응축시켜 용수로 환원해주는 역할을 담당한다.

반면, 복합화력 발전소 계통은 발전소 주기로 가스터빈, 가스터빈발전기, 배열회수 보일러(Heat Recovery Steam Generator: HRSG), 증기터빈, 증기터빈 발전기, 냉각탑, 지역난방 열교환기가 있으며, 가스터빈으로부터 발생된 연소가스는 배열회수 보일러(HRSG)에서 열이 회수된 후 연돌을 통해 대기로 배출된다.

전력생산을 위한 발전기는 가스터빈 발전기와 증기터빈 발전기로 구성되는 데, 각 발전소에는 3~5개의 가스터빈 발전기와 1개의 증기터빈 발전기가 있다. 여러개의 가스터빈에서 발생된 연소가스는 온도가 540℃ 정

도이나 배열회수보일러에서 열이 회수되어 130℃정도로 냉각되어 대기로 배출된다. 이때 보일러 내에서는 증기가 발생되며 이 증기는 두가지 용도로 사용된다. 첫째는 증기터빈 발전기에 이용하는 것이고, 둘째는 지역난방용 열교환기 열공급원으로 사용하는 것이다. 열성수기인 동절기에는 증기터빈 대신 지역난방 열교환기를 위주로 운전하는 열추종방식의 운전이 되며, 전력성수기인 하절기에는 지역난방 열교환기 대신에 증기터빈 발전을 통한 전력부하 추종방식의 운전이 된다. 증기터빈 운전시에는 터빈을 통과한 증기를 응축시키기 위하여 냉각탑설비의 운전이 필요 하게 된다. 표2.4에는 발전소별 발전용량 및 냉각설비 현황을 나타내고, 표2.5에는 수처리설비 현황을 나타내었다. 수처리설비 중 전처리 설비의 용량이 순수 생산설비 용량에 비해 매우 크게 설계된 것은 냉각탑에서 필요로 하는 전력을 생산하여 공급하기 위해서이다.

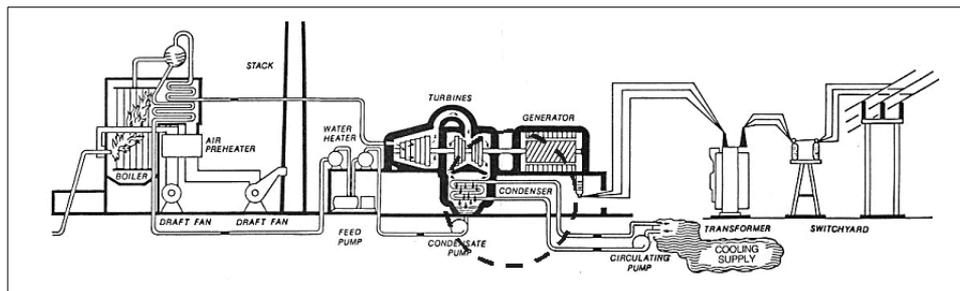


그림 2.8 화력발전소 발전설비 계통도

표 2.4 복합화력발전소 발전용량 및 냉각설비 현황

발전소		분 당	안 양	일 산	부 천
발전설비	G/T	79.4×5	79.4×4	100×5	100×3
	S/T	200×1	160×1	200×1	150×1
MW×기수	계	600	450	600	450
준공년도	G/T	92. 4.30	92. 4.30	93. 2.28	93. 2.28
	S/T	93. 9.16	93.10.25	93.11.30	93.11.12
냉각탑	형 식	Wet/ Dry	Wet/ Dry	Wet/ Dry	Wet/ Dry
	순환방식	Counter flow	Counter flow	Counter flow	Counter flow
	배 열	11 Cell 병렬	9 Cell 병렬	14 Cell 병렬	10 Cell 병렬
	규 격	134.8m ×20m×20.2m	110.6m ×21.9m×20.2m	171.9m×20m ×24.64m	122.8m×20m ×24.64m
	순환수량	34,060 T/H	28,080 T/H	43,178 T/H	32,000 T/H
	보충수량	957 T/H	870 T/H	1,058 T/H	793 T/H
	Basin용량	3,700 m ³	3,080 m ³	4,800 m ³	3,400 m ³
	사 용 처	복수기 보조냉각계통	복수기 보조냉각계통	복수기 보조냉각계통	복수기 보조냉각계통
제 작 사	Hamon -sobelco	Hamon -sobelco	MHI	MHI	
설계 운전농축도	2.8	2.4	5	5	
손실율 (%)	증발율	1.8	1.8	2.04	2.04
	비산율	0.01	0.01	0.01	0.01
	배출율	1	1.29	0.4	0.4
	손실계	2.81	3.1	2.45	2.45
냉각온도 (°C)	Hybrid운전	39.66 → 27.2	40.2 → 27.6	38.5 → 27.8	39.7 → 27.2
	Wet 운전	44.7 → 33	44.8 → 33	44.86 → 34.1	44.8 → 34.1
주냉각수	순환수량	30,960 T/H	25,180 T/H	35,980 T/H	26,970 T/H
	보충수량	870 T/H	780 T/H	882 T/H	661 T/H
	보 급 수	여과수 사용	여과수 사용	여과수 사용	여과수 사용
보 조 냉 각 수	순환수량	3,100 T/H	2,900 T/H	7,196 T/H	5,394 T/H
	보충수량	87 T/H	90 T/H	176 T/H	132 T/H
	보 급 수	여과수 사용	여과수 사용	여과수 사용	여과수 사용
열교환기 튜브금속	복수기	Al-brass	Al-brass	SUS 304	SUS 304
	냉각탑	Cupro-Nickel	Cupro-Nickel	SUS 304	SUS 304
년평균 보급수량	282-382 T/H	264-353 T/H	341-446 T/H	255-333 T/H	

* 분당, 일산복합화력의 증설설비는 포함안됨

표 2.5 복합화력발전소 수처리설비 현황

구 분		발전소		분당복합	안양복합	일산복합	부천복합
				한 강	백운저수지	한 강	한 강
	원수 취수원	-		한 강	백운저수지	한 강	한 강
	원수 저장조	m ³ ×기	15,000× 1	15,000× 1	7,500× 2	7,500× 2	7,500× 2
	응집 침전조	m ³ /hr×기	660× 2	580× 2	660× 2	580× 2	580× 2
여 과 기	형 식	-	압력식	압력식	압력식	압력식	압력식
	처리용량	m ³ /hr×기	330× 4	296× 4	330× 4	290× 4	290× 4
	여 재 량	L/기	27,400	28,500	33,250	15,540	15,540
	여과수조	m ³ ×기	15,000× 2	15,000× 2	15,000× 2	15,000× 2	15,000× 2
활 성 탄	처리용량	m ³ /hr×기	32× 2	28× 2	36× 2	30× 2	30× 2
	활성탄량	L/기	3,200	3,450	4,710	2,800	2,800
2 B 온	채 수 량	m ³ /Cycle	768	581	864	660	660
	양 이 수 지 종 류	-	Dowex HCR-S-H	Amberlite IR-120	Amberlite IR-120	Dowex HCR-SE	Dowex HCR-SE
	총 진 량	L/기	1,600	1,500	3,600	1,600	1,600
	탈탄산탑	(설치여부)	○	○	○	○	○
3 T 온	음 이 수 지 종 류	-	Dowex SBR-P-Cl	Amberlite IRA-420	Amberlite IRA-420	Dowex SBR-P	Dowex SBR-P
	총 진 량	L/기	2,000	1,800	4,400	2,075	2,075
M B P	채 수 량	m ³ /Cycle	4,480	4,032	5,184	5,040	5,040
	양 이 수 지 종 류	-	Dowex HCR-S-M B	Ambersep IR-120	Ambersep IR-120	Dowex HCR-SE-M B	Dowex HCR-SE-M B
	총 진 량	L/기	400	400	550	400	400
	음 이 수 지 종 류	-	Dowex SBR-P-C- MB	Ambersep IRA-420	Ambersep IRA-420	Dowex SBR-P-C	Dowex SBR-P-C
	총 진 량	L/기	400	400	550	400	400
	순수저장조	m ³ ×기	1,700× 2	1,500× 2	2,000× 2	1,500× 2	1,500× 2
제 작 사	설 계	-	현대 Eng'g	대림 Eng'g	동아Eng'g	대우Eng'g	대우Eng'g
	시 공	-	한국정수	롯데기공	롯데기공	롯데기공	대우중공업

* 분당, 일산복합화력의 증설설비는 포함안됨

2.2.2 공업용수 수질현황

일반적으로 수중에 존재하는 불순물 종류에 따라 다음과 같이 부식을 유발시키거나 또는 부착물을 유발시키는 용수로 분류할 수 있다.

- 부식발생에 영향을 주는 수질인자
 - 총 용존고형물(TDS) 또는 전기전도도
 - 염소이온 농도
 - Stability/scaling indices(RSI, LSI, PSI)
 - Sulfides농도: 0.1ppm이상이면 금속의 부식증가 원인
 - Ammonia농도 : 0.5ppm이상이면 구리합금 부식 증가
- 부착물발생에 영향을 주는 수질인자
 - 총 부유물질(TSS)
 - Stability/scaling indices(RSI, LSI, PSI)
 - 인산이온 : 소량 존재시에도 철 및 칼슘이온과 결합하여 부착물 형성
 - 철분 농도: 주로 전열면에 부착물 발생시켜 열효율을 저하시킴
 - 망간 농도: 주로 전열면에 부착물 발생시켜 열효율을 저하시킴
 - 총 유기탄소(TOC): 30ppm이상이면 부식과 부착물 발생을 증가시킴

복합화력발전소에서 사용하는 공업용수 수질은 표 2.6과 같으며 비교적 양호한 편이다. 안양복합화력을 제외하고는 모두 한강에서 취수하여 사용하고 있어 비슷한 수질분포를 보여주고 있다. 분당복합화력은 한강상류(팔당)에서 취수하기 때문에 수질이 가장 양호한 편이며, 일산복합화력은 한강하류에서 취수하기 때문에 수질이 가장 나쁜 편이다. 안양복합화력은 인근의 백운저수지에서 취수하여 사용하고 있으며 비교적 양호한 수질을 보여주고 있다.

이러한 원수를 응집침전과 여과공정을 통과시킨 후 이 여과수를 이온교

환수지탑에서 추가로 처리하여 수중 불순이온을 제거한 후 냉각탑에 공급하여 보일러수로 사용하고 있다^[10].

표 2.6 복합화력발전소 공업용수 수질현황

분석항목	발전소	단 위	분당복합화력		안양복합화력		일산복합화력		부천복합화력	
			'94	'95	'94	'95	'94	'95	'94	'95
일반사항	pH	25℃	7.6	7.4	7.0	7.0	7.0	7.2	7.1	7.2
	Cond.	μS/cm	154	185	138	120	304	288	257	179
	탁도	FTU	* 55	(5.1)	7	(4.1)	19	(10.7)	3	(8.4)
		NTU	* 130	-	20	-	43	-	8	-
양이온	Ca ²⁺	ppm as CaCO ₃	41.15	44.20	30.95	28.50	50.48	48.80	56.33	40.00
	Mg ²⁺	"	14.73	7.70	11.24	9.90	18.31	22.30	20.21	17.00
	Na ⁺	"	22.02	17.90	19.90	14.00	61.87	41.10	46.30	32.00
	K ⁺	"	1.71	3.10	2.63	3.30	4.83	5.70	3.26	4.80
	Fe ³⁺	"	Tr	0.20	0.76	0.30	1.26	0.50	Tr	0.70
	Al ³⁺	"	Tr	-	Tr	-	0.54	-	Tr	-
	NH ₄ ⁺	"	0.60	0.30	-	0.20	1.20	19.60	3.00	8.10
	FMA	"	-	34.90	-	27.60	29.20	73.40	22.00	59.00
	계	"	80	108	65	74	168	211	151	162
음이온	HCO ₃ ⁻	"	37.00	39.20	30.00	28.60	59.00	64.30	51.30	50.00
	SO ₄ ²⁻	"	14.50	18.20	12.59	11.90	21.61	24.60	19.90	27.00
	NO ₃ ⁻	"	6.40	6.00	3.35	5.50	4.78	9.50	11.93	9.10
	Cl ⁻	"	0.99	10.70	15.16	10.20	48.63	39.30	32.87	19.00
	PO ₄ ³⁻	"	0.24	-	0.49	-	0.77	-	3.80	-
	HSiO ₃ ⁻	"	5.72	4.70	5.18	4.60	7.93	3.10	6.22	3.70
	계	"	65	79	67	61	143	141	126	109
기타	CO ₂	ppm as CO ₂	1.85	3.30	5.99	5.20	11.77	8.50	8.13	8.40
	COD	ppm as O ₂	4.2	3.00	3.8	2.70	3.6	3.10	2.6	1.60
	ABS	mg/L	0.029	0.02	0.052	0.03	0.108	0.09	0.044	0.30
용수단가 (원/톤)	원수료		130	135	50.25	50.25	95.6	90.69	115	115
	여과수		204.4	281.2	102.81	97.99	133.7	123.03	410	380
	폐수처리		661.4	668.4	1,154	1,623	953	960	1,400	1,330
	하수도료		50	55	45	45	없음	없음	70	70

* : 시료채취 오차로 추정, 탁도 () : ppm as SiO₂

2.2.3 열교환시스템의 분류 및 구성

가. 냉각수계의 분류

냉각계통은 열교환기를 이용하여 각종 공정유체를 냉각하는 간접 냉각 방식과 노즐을 이용하여 제품에 직접 살수하여 냉각하는 직접 냉각방식으로 분류되며, 화력발전소에서는 간접 냉각방식을 채택하고 있으며, 냉각수의 이용방법에 따라 다음과 같이 세가지의 냉각수계로 세분된다.

(1) 일과식 냉각수계

그림 2.9에 나타난 바와 같이 냉각수가 열교환장치를 단 1회 통과한 후 외부로 배출되는 냉각계통이다. 소규모 냉각설비일지라도 다량의 용수가 소요되기 때문에 저온상태의 물을 대량으로 이용할 수 있고 용수료가 저렴한 지역에서만 채택된다. 이러한 냉각계통에서는 냉각수의 증발손실이 없어 열교환기 유입수와 배출수의 수질변화가 거의 없으며, 다량의 용수를 취수하여 열교환기에 이용하기 때문에 냉각수의 온도 상승폭도 적어 스케일 발생을 무시할 수 있다. 그러나, 다량의 냉각용수를 사용하기 때문에 수중에 약간의 탁도성분만 함유되어 있어도 파울링 장애가 문제될 수 있다. 일과식 냉각수계 열교환기의 금속재료로는 방식제를 주입하지 않아도 되는 구리합금, 스텐레스강, 티타늄과 같은 내식성 재료를 사용한다. 그러나, 일과식 냉각계통에 탄소강(Mild Steel) 재질을 사용할 경우는 다량의 부식억제제주입이 필요하기 때문에 경제적이지 못하다. 일과식 냉각수계에 사용되는 용수원으로는 해수, 강물 및 호수 등이 사용된다.

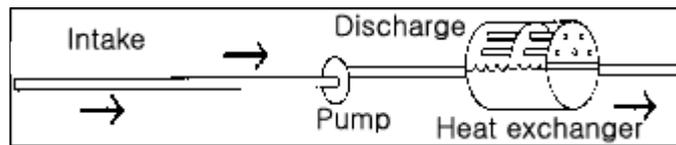


그림 2.9 일과식 냉각수계

(2) 개방순환식 냉각수계

수자원보호에 대한 환경문제가 대두되고 용수 재이용에 대한 관심이 크게 증가되면서 최근에 많이 채택되고 있는 냉각방식으로서 내륙에 위치한 복합화력발전소에서 채택하고 있다. 그림 2.10에 나타낸 냉각계통에서는 열교환에 의해 온도가 상승된 순환수를 냉각탑 상부에 보내어 노즐을 이용하여 분무시키고 탑 하부에서는 공기를 유입시켜, 순환수와 공기의 접촉으로 순환수의 일부가 기화된다. 이때 순환수중의 폐열이 제거되고 냉각되면서 일부는 대기로 방출되나 대부분이 냉각되므로 연속적으로 순환시켜 재이용할 수 있다. 순환수손실은 냉각탑에서 증발(Plume), 비산(Drift) 및 배출(Blow-down)에 의해 발생되며, 순환수 부족량은 냉각탑저수조에 연속적으로 공급하여 보충하여야 한다. 냉각탑에서 순환수가 공기와 접촉하여 언제나 용존산소로 포화되어 있고, 대기중의 각종 불순물들이 흡수되고 냉각수 증발에 따른 수중 고형물질 농축으로 인하여 타 냉각계통에 비해 장애현상(부식, 스케일, 슬라임 등)이 쉽게 나타난다.

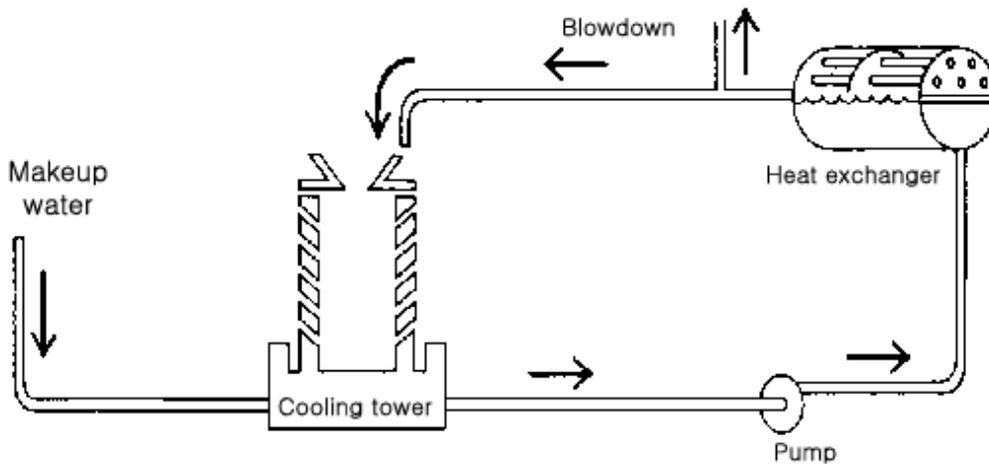


그림 2.10 개방순환식 냉각수계

(3) 밀폐순환식 냉각수계

그림 2.11과 같이 공정유체 냉각으로 상승된 냉각수를 제2의 열교환기에서 냉각시킨 후 재순환 이용하는 냉각계통이다. 냉각계통 외부로 냉각수의 손실이 적어 보급수량이 거의 없고 증발에 의한 불순물 농축이 발생하지 않는 반면, 부식생성물이 발생될 경우 적절한 배출방법이 없어 계통 내에 쉽게 축적되어 계통을 오염시킬 수 있다. 냉각수의 운전온도는 Chiller계통의 냉각수와 같이 저온에서부터 내연기관의 냉각수와 같은 고온까지 광범위하게 적용된다. 이러한 계통에서는 보통 고순도의 용수를 사용하거나 부식방지를 위해 고농도의 부식억제제를 사용한다. 이 냉각방식은 다른 냉각방식에 비해 다음과 같은 몇가지 장점이 있다. 냉각수의 손실이 없어 수처리가 비교적 간단하고, 미생물에 의한 장애발생이 없으며 대기중에 개방되어 있지 않아 용존산소가 적어 부식발생에 대해서도

안전하다.

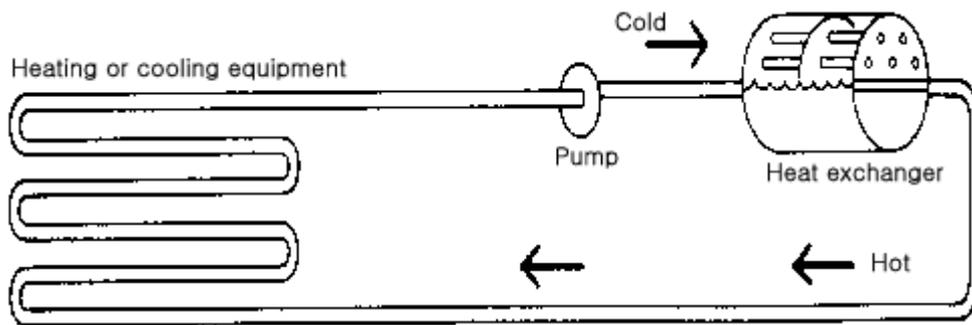


그림 2.11 밀폐순환식 냉각수계

나. 냉각시스템의 주요 구성장치

(1) 열 교환 기

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), 공기냉각핀형(Air cooled type) 등으로 구분된다. 그림 2.12는 다관식 열교환기 구조를 나타낸 것이다. 냉각수 흐름위치에 따라 셸측 또는 튜브측이 있다. 일반적으로 부식성유체, 오염유체 및 고압유체는 튜브측을 이용하는데, 이는 셸측에 오염유체를 통과시킬 경우 유속이 느려 스케일, 파울링 등의 장애가 쉽게 발생할 뿐만 아니라, 튜브측에 비해 세정하기가 훨씬 복잡하고 어렵기 때문이다^{[10][11]}. 표 2.7에는 다관식 열교환기 특징을 나타낸 것이다.

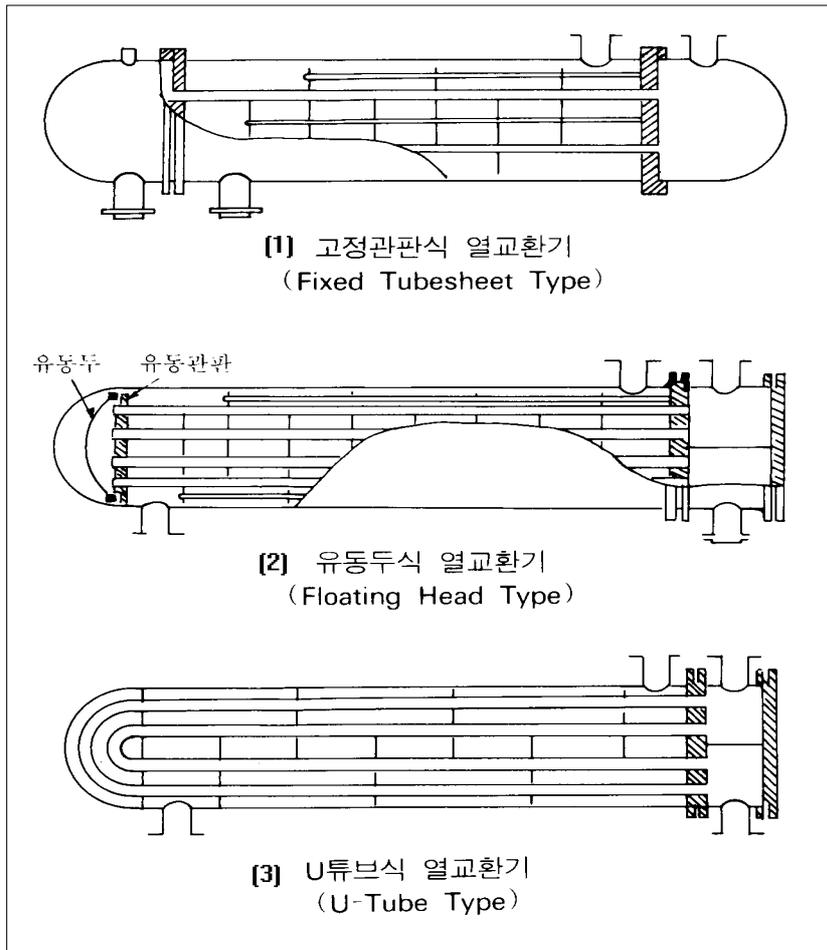


그림 2.12 다관식 열교환기 구조

표 2.7 다관식 열교환기 특징

형 식	특 징
고정판식	○ 제작이 용이하고 가격이 저렴함 ○ 셸측 세정이 어려움
유동두식	○ 튜브와 셸측 사이의 온도차가 크거나 금속의 열팽창계수가 큰 경우 적용
U 튜브식	○ 튜브 Bundle를 제거함으로써 셸측 세정이 가능함

(2) 냉 각 탑

배열회수 보일러(HRSG)에서 발생되어 증기터빈을 통과한 증기는 복수기에서 냉각 및 응축되어 배열회수보일러로 재순환된다. 복수기에서는 증기를 응축시키기 위해 다량의 냉각수가 요구된다. 수도권 복합화력발전소는 복수기 냉각수로 담수(한강)를 사용하고 있으며, 복수기를 통과하여 승온된 냉각수는 냉각탑에서 냉각시킨 후 재순환시켜 이용하고 있다.

냉각탑은 물과 공기의 접촉방식에 따라 자연통풍방식과 강제통풍방식으로 구분되는데, 자연통풍방식에서는 냉각탑 내부에서 공기가 가온되면 냉각탑 상부측과 하부측의 공기 밀도차에 의해 공기순환이 이루어지며, 강제통풍방식에서는 송풍기를 이용하여 냉각탑 내부로 공기를 강제적으로 유입시킨다. 따라서, 자연통풍방식의 냉각탑은 공기의 원활한 순환을 위하여 높이가 150m에 이르는 대형 단일구조물로 되어 있으며, 강제통풍방식

은 송풍기를 이용하여 공기와 접촉시켜 냉각탑 높이가 20~30m정도인 여러개의 복합셀(Cell)들로 구성되어 있다.

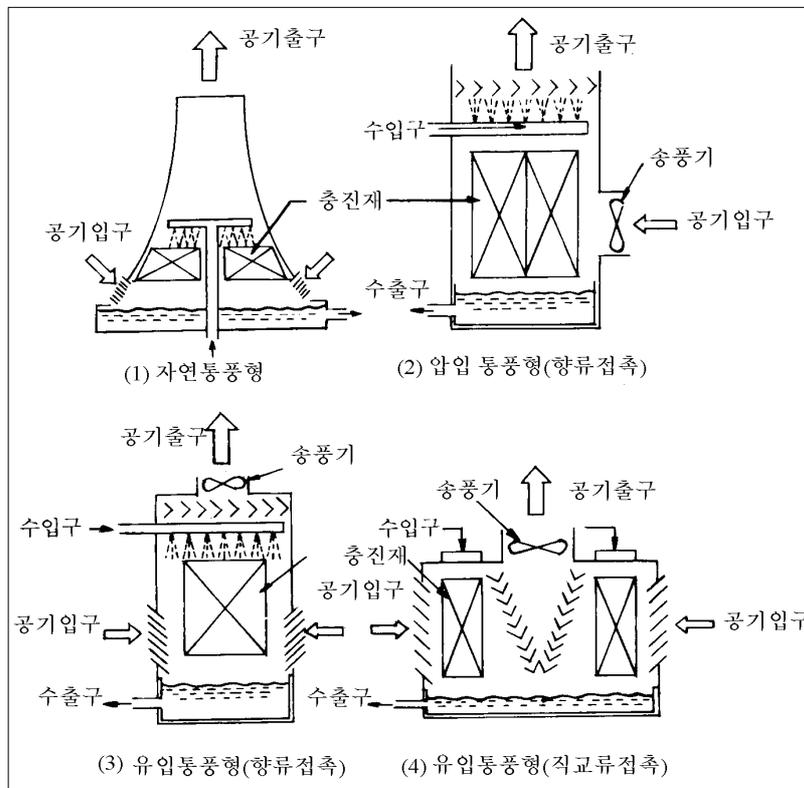


그림 2.13 냉각탑 통풍방식의 종류

강제통풍식 냉각탑에서는 공기유입을 위해 단일 송풍기나 복합송풍기를 사용하며, 송풍기에 의한 공기유량 조절이 가능하여 대기 및 부하조건 변화에 따라 쉽게 가변운전을 할 수 있다. 같은 크기의 자연통풍식 냉각탑에 비해 훨씬 많은 양의 물을 증발시킬 수 있으며, 송풍기의 설치 위치에 따라 압입 통풍방식과 유입 통풍방식으로 세분된다. 유입 통풍방식이 압

입 통풍방식에 비해 성능과 안정성이 우수할 뿐만 아니라 동절기 정지시에도 따뜻한 공기흐름속에 송풍기가 위치해 있어 기계장치의 동결을 예방하는 등 많은 장점을 지니고 있다. 유입형 강제통풍방식에는 향류형(Counter flow)와 직교류형(Cross flow)이 있는데 향류형은 가장 차가운 물과 가장 건조한 공기가 접촉하여 가장 효과적인 전열조건(물의 증발이 쉽게 일어남)이 이루어지며, 직교류형은 공기통로의 저항이 작아 동일용량의 송풍기로도 냉각수와 접촉하는 공기유량을 증진시킬 수 있는 장점이 있다. 유입형 강제통풍방식에서 냉각수유량범위는 3~160,000m³/hr로 비교적 광범위하다. 그림 2.13에는 각종 냉각탑의 유형을 나타낸 것이다. 국내 발전소에서 채택하고 있는 냉각탑은 모두 유입형 강제통풍방식(향류접촉)이다.

다. 냉각수 특성 및 용수발란스

(1) 냉각수 특성

지표면의 4분의 3이 물로 덮여 있을 만큼 지구상에는 물이 풍부하게 존재한다는 이유 이외에도 물이 냉각매체로 널리 이용되는 이유는 물분자 구조특성으로부터 연유된다. 물분자는 산소원자의 한쪽에 두개의 수소원자가 서로 105°각도로 결합되어 있어서 강한 극성을 띠고 있다. 이러한 물분자의 극성 때문에 물분자는 인접의 물분자와 수소결합에 의하여 붙어 있게 되고 이 수소결합을 파괴하기 위해서는 많은 에너지가 요구되기 때문에 증발열과 열용량이 커서 냉각 및 열매체로서 이용될 수 있다. 그러나, 물분자의 극성으로 인한 높은 유전상수(Dielectric Constant) 때문에

광물질과 접촉하게 되면 광물질내 이온간의 인력을 약화시키는 효과를 갖도록 물분자가 배치되어 그림 2.14와 같이 이온을 유리시키고 수화물을 형성하여 강한 용해력을 갖게 된다. 따라서, 자연수의 조성은 지역 및 원천에 따라 커다란 변화를 보이게 된다. 표 2.8은 각종 양이온 및 음이온 쌍의 무기화합물이 물에 녹는 용해도 정도를 표시한 것이다. 광물질과 마찬가지로 기체와 유기물도 물에 용해된다. 물에 용해되는 기체의 양은 헨리(Henry)의 법칙에 따라 물표면상에서 그 기체의 압력에 비례한다.

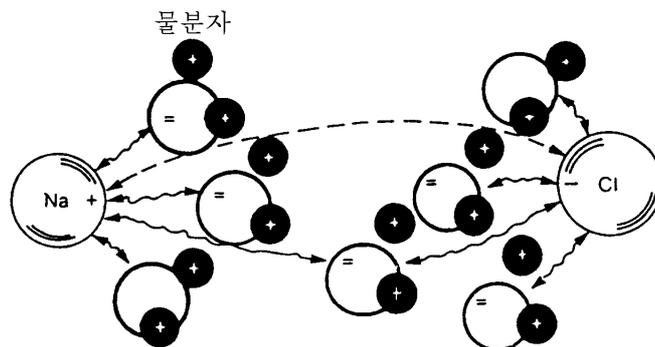


그림 2.14 물분자에 의한 광물질의 용해작용

표 2.8 각종 이온쌍의 수중 용해도 비교

Anion → ↓ Cation	Anion →												
	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻	HCO ₃ ⁻	OH ⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	S ²⁻	CrO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	
Na ⁺	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
K ⁺	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
NH ₄ ⁺	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
H ⁺	S	S	S	S	CO ₂	H ₂ O	S	CO ₂	S	H ₂ S	S	S	
Ca ²⁺	I	S	S	S	SS	VSS	S	I	VSS	X	S	I	
Mg ²⁺	VSS	S	S	S	S	I	S	VSS	S	X	S	I	
Ba ²⁺	VSS	S	S	S	VSS	S	S	VSS	I	X	I	I	
Sr ²⁺	VSS	S	S	S	VSS	SS	S	I	VSS	X	VSS	I	
Zn ²⁺	S	S	S	S	VSS	I	S	I	S	I	VSS	I	
Fe ²⁺	SS	S	S	S	SS	VSS	S	VSS	S	I	X	I	
Fe ³⁺	SS	S	S	S	I	I	S	I	S	X	X	I	
Al ³⁺	S	S	S	S	X	I	S	X	S	X	X	I	
Ag ¹⁺	I	I	I	I	I	I	S	VSS	S	I	I	I	
Pb ²⁺	VSS	S	SS	VSS	I	VSS	S	I	I	I	I	I	
Hg ¹⁺	I	I	I	I	I	I	S	S	VSS	I	VSS	I	
Hg ²⁺	SS	S	S	I	I	I	S	I	VSS	I	SS	I	
Cu ²⁺	SS	S	S	VSS	I	I	S	I	S	I	I	I	

S—Soluble, over 5000 mg/L.
 SS—Slightly soluble, 2000–5000 mg/L.
 VSS—Very slightly soluble, 20–2000 mg/L.
 I—Insoluble, less than 20 mg/L.
 X—Not a compound.

바다와 육지에서 증발된 물이 비가 되어 내려오기 전에 대기와 접촉하여 대기중의 질소와 산소를 용해시켜 약 10mg/L의 산소와 약 15mg/L의 질소를 함유하게 된다. 지상에서는 흙, 바위 등과 접촉함으로써 많은 광물 질들이 용해되어 Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, Cl⁻, SO₄⁻², HCO₃⁻, SiO₂ 등의 성분이 수중에 함유된다. 동식물 활동에 따른 자연수 조성변화도 역시 중요하며 공업시설, 관개시설, 도시폐수에 의한 수질오염 등에 의해서도 큰 영향을 받는다. 우리나라 하천수의 경우는 지역에 따라 큰 차이를 보이고 있으나 비교적 강의 길이가 짧고, 화강암이 많은 관계로 물에 함유된 광물질의

양이 대체로 적은 편이다.

(2) 냉각수계 용수발란스

(가) 증발손실량 (E)

공정유체에 의해 냉각수가 받은 전열량은 냉각탑에서 기화에 의해 방출된 총열량과 같으므로 다음식으로 표현할 수 있다.

$$R \times 10^3 \times \Delta T \times C = E \times 10^3 \times HL \quad (2.18)$$

여기서, R : 냉각순환수 유량(m³/hr), E: 증발손실 유량(m³/hr)

ΔT : 냉각탑에서 증발전후 순환수의 온도변화(°C)

C : 물의 정압비열 (kcal/kg, 수온 40°C일때 0.998)

HL : 물의 증발잠열 (kcal/kg, 수온 40°C일때 578)

위 식은 순환수 수온이 40°C일때 다음식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$E/R \times 100 = \Delta T / 5.8 \quad (2.19)$$

따라서, 순환수 유량의 1%가 증발하면 약 5.8°C의 순환수 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 기온이 높은 하절기에는 ΔT 로 부터 계산한 증발손실량이 실제 증발손실량에 근사하나, 기온이 낮은 동절기에는 차가운 공기에 의해 냉각되기 때문에 계산에 의한 이론 증발손실량은 실제의 증발손실량보다 큰 값을 갖는다. 표 2.9는 계산에 의한 증발손실량에 대한 실제의 증발손실량의 관계를 나타낸 것이다.

표 2.9 계절별 증발손실량 비교

구 분	하 절 기	춘 추 기	동 절 기
실제 증발손실량	90~100 %	70~80 %	50~60 %
이론상 증발손실량			

(나) 비산손실량 (W)

냉각탑에서 물방울로 비산하여 손실되는 수량은 냉각탑의 설계조건과 운전조건에 따라 차이가 있으나 강제통풍방식에서 보통 순환수 유량의 0.05~0.2% 정도이다.

(다) 블로우다운량 (B)

블로우다운 유량은 보급수 수질뿐만 아니라, 부식 및 스케일 등에 관한 수질관리 방법에 따라 결정되며, 순환수계통에서의 증발손실량과 운전농축도와의 관계는 다음과 같다.

$$B = M - (E + W) \quad (2.20)$$

$$B = E / (N - 1) \quad (2.21)$$

(라) 보급수량 (M)

냉각탑 순환계통내의 전체 보유수량은 일정하게 유지되는 상태에서 운전된다. 따라서, 보급수량은 계통내에서의 증발, 비산 및 배출수에 의한 손실분을 연속적으로 보충하여야 하는 수량으로서 다음식으로 표현된다.

$$M = E + B + W \quad (2.22)$$

(마) 운전농축도 (N)

운전농축도(N)는 보급수중의 용존고형물 농도에 대한 순환수중의 용존고형물 농도의 비로서 정의된다.

$$N = Cr / Cm \quad (2.23)$$

여기서, Cr : 순환수중의 용존고형물 농도(mg/L)

Cm : 보급수중의 용존고형물 농도(mg/L)

또한, 냉각수가 정상적으로 운전되는 경우 냉각탑 순환수계로 공급된 보급수중의 총 용존염류 양은 배출수와 비산수에 함유되어 계통 외부로 배출되는 용존염류의 양과 동일하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$Cm \times M = Cr \times (B + W) \quad (2.24)$$

$$N = \frac{Cr}{Cm} = \frac{M}{(B+W)} \quad (2.25)$$

$$N = \frac{(E+B+W)}{(B+W)} \quad (2.26)$$

(바) 체류시간 (Tr)

냉각수계에 유입된 보급수가 계외로 배출될 때 까지의 평균적 시간이며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Tr = \frac{H}{(B+W)} \quad (2.27)$$

배출수량을 감소시키면 체류시간은 증가하게 된다. 순환수와 처리약품

이 균일하게 혼합된 계에서 약품주입후 시간경과에 따라 수중 약품농도는 다음식으로 표현된다.

$$X = X_0 \times e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (2.28)$$

여기서, X_0 : 초기의 약품농도 (ppm)

T_R : 처리약품 반감기

(사) 보유수량 (H)

보유수량은 냉각탑 저수조, 배관 등 냉각수계 전체에 보유되어 있는 수량을 의미하며 약품처리시의 계산기준이 된다. 일반적으로 냉각탑 저수조 용량에 20~50%를 가산함으로써 얻어진다.

$H = 1.2 \times$ 냉각탑 저수조 용량 for a deep basin

$H = 1.5 \times$ 냉각탑 저수조 용량 for a shallow basin

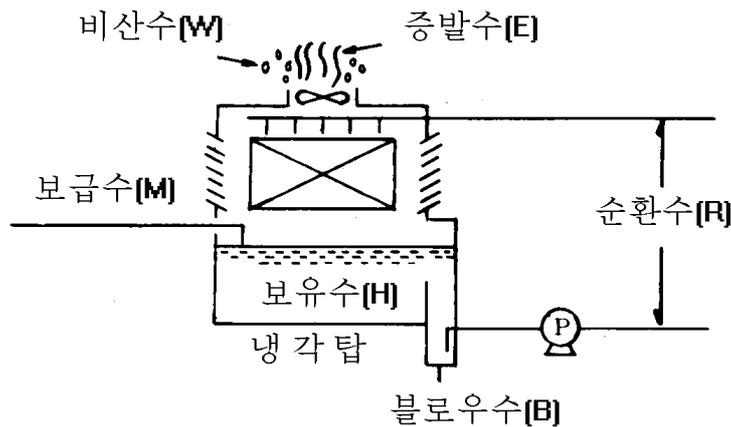


그림 2.15 냉각탑 용수발란스 개념도

상기한 각 값의 상관관계를 그림2.15에서 도식적으로 표현하였다.

2.3 기존기술의 특징 분석

2.3.1 EPRI의 온라인 파울링 감시

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 2.16은 EPRI에서 개발한 파울링 감시 센서구조를 나타낸 것이다.

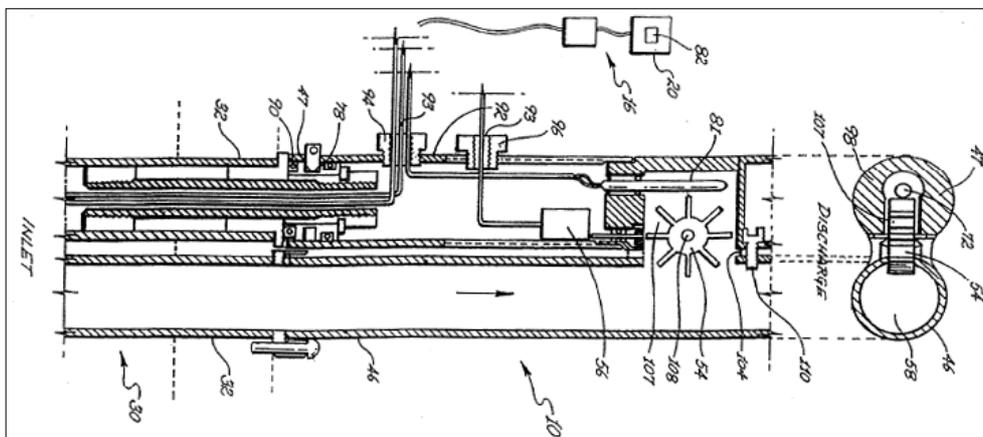


그림 2.16 EPRI fouling monitor sensor structure (US Patent 5,590,706, 1997)

2.3.2 Rohrback Cosasco사의 DATS시스템

현재까지 상용화된 제품 중 가장 대표적인 장치로서 Bridger Scientific 사의 특허기술을 개량하여 자사의 부식측정기술(Corrator)을 접목시킨 제품이며, 소정의 열교환 튜브내면에 공정용수를 일정 유량으로 통과시키고 튜브 외면에는 온도센서가 내장된 Heating block와 Non-heating block이 각각 부착되어 있는 구조로 되어 있다. Heating block은 외부 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 기술에서는 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.

그림 2.17은 Rohrback Cosasco사의 DATS시스템의 열교환튜브와 Heating block 및 Non-heating block의 배치도이다.

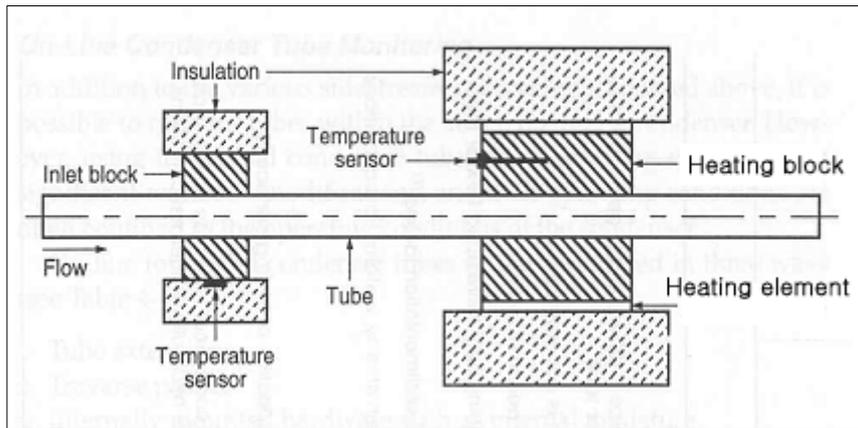


그림 2.17 Rohrback Cosasco사의 DATS시스템 구조

2.3.3 Yost & Son사의 파울링 감시

미국의 YOST & Son사에서는 히터 카트리지를 이용하여 전열면의 오염도를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 히터카트리지의 외표면에는 온도 센서(열전대)가 삽입되어 있고, 히터카트리지에 일정한 전원을 공급하여 공정 열부하(Heat flux)를 모사하도록 되어 있다. 이 기술에서는 사이트 글래스 내에 히터카트리지를 설치해 둠으로서 파울링(또는 스케일) 발생 정도를 외부에서 육안 관찰이 용이하다는 큰 장점이 있어 열교환기 오염도 감시를 위해 비교적 많이 적용하고 있다. 그러나 파울링 발생에 따른 히터카트리지 표면온도 측정감도가 매우 낮고 오차발생이 높기 때문에 오염도계수 산출 자료로는 이용되지 못하고 현장에서 육안관찰용으로 주로 이용되고 있어 측정자료의 정확도를 개선하기 위한 개량기술의 개발이 요구된다. Yost & Son사에서 생산되고 있는 파울링 모니터의 외형을 그림 2.18에 나타내었다.

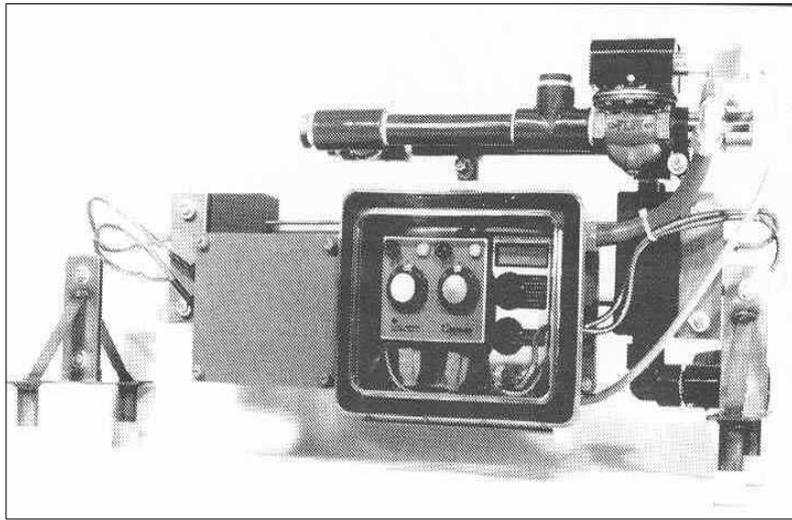


그림 2.18 Yost & Son사의 파워링 감시

이 외에도 초음파를 이용하여 전열면에 부착된 파워링의 두께를 정확히 진단하기 위한 시도 등 여러 가지 방법을 이용한 연구가 진행 중인 것으로 파악되었다. 하지만, 아직까지 전열면에 생성되는 파워링을 열교환기내에서 발생하는 양과 유사하게 측정할 수 있는 연구는 진행되지 못하고 있는 것으로 판단된다^{[12][13][14][15]}.

제 3 장 파울링 진단기술 개발

3.1 전열계수^[16]

3.1.1 열교환기 열부하

냉각수가 공정유체로부터 단위시간 및 단위면적당 받는 열량을 열부하라고 하며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \Delta t \times C \times R \times 10^3 / A \quad (3.1)$$

여기서, Q : 열부하(Kcal/m² · h)

Δt : 냉각수의 열교환기 입 · 출구 온도차(°C)

C : 물의 정압비열(kcal/kg · °C)

R : 순환수량(m³/h)

A : 전열면적(m²)

전열량이 크면 클수록 열교환기의 열부하는 높으며 스케일 발생경향도 높아진다. 열부하는 열교환기 설계인자 중 가장 기본적인 고려요소로 작용하여 파울링의 예상발생량 계산 등에 중요하게 사용된다.

3.1.2 총괄전열계수

열교환기의 성능지표로서 보통 열교환기의 U값이라 하며 다음식으로 표현된다.

$$U = 1 / (1/\alpha_1 + L/\lambda + 1/\alpha_2 + r_1 + r_2) \quad (3.2)$$

여기서, U : 총괄전열계수(kcal/m² · hr · °C)

λ : 튜브금속 열전도율(kcal/m · hr · °C)

L : 튜브금속두께(m)

α_1, α_2 : 공정측 및 냉각수측 경막전열계수 (kcal/m² · hr · °C)

r_1, r_2 : 공정측 및 냉각수측 오염도계수(m² · hr · °C/kcal)

또한, 공정유체 전열량(ΔH)을 이용하여 순수 총괄전열계수를 계산할 수 있다. 그림 3.1은 단일 튜브로 구성된 일과식 향류형 열교환기를 나타낸 것이다.

$$U = \Delta H \cdot P / \Delta t_m \cdot A \quad (3.3)$$

여기서, U : 순수총괄전열계수(kcal/m² · hr · °C)

P : 공정유체 유량(kg/hr)

ΔH : 공정유체의 T_1, T_2 에서 엔탈피차(kcal/kg)

A : 열교환기 전열면적(m²)

Δt_m : 열교환기 양단 평균온도차

또한, Δt_m 값 계산은 다음과 같이 나누어 계산한다.

- 튜브측 유체온도가 균일하게 상승하고, 쉘측 유체온도가 균일하게 감소시

$$\Delta t_m = \{(T_1 - t_2) + (T_2 - t_1)\} / 2 \quad (3.4)$$

- 보다 복잡한 다단식 열교환기에서의 Δt_m 값 계산

$$\Delta t_m = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\log_e \frac{(T_2 - t_1)}{(T_1 - t_2)}} \quad (3.5)$$

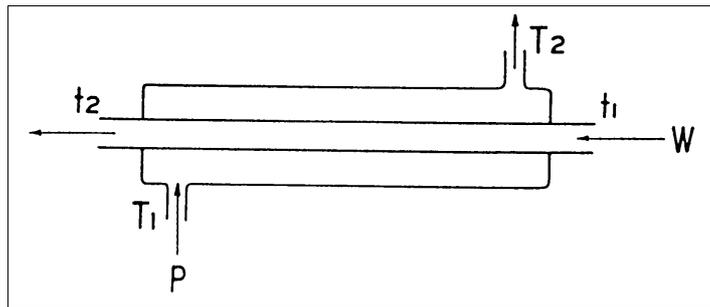


그림 3.1 간단한 수냉식 열교환기

U값은 열교환기가 운전됨에 따라 수중 불순물에 의해 감소된다. 열교환기에 이용되는 대부분의 냉각수중에는 부식생성물, 용존고형물, 부유물질 및 미생물 등이 함유되어 있어 이로 인해 열교환기 전열면이 오염되어 장치효율이 크게 감소될 수 있으나, 적절한 수처리와 냉각수 유속을 증가시킴으로써 열교환기 오염문제를 예방할 수 있다.

3.2 오염도계수^{[17][18][19]}

열교환기 오염현상은 수중의 광물질이 전열면에 부착하여 열전달을 방해하고 유체흐름을 방해하는 현상으로 정의된다. 복수기에서 유입된 열을 방출하기 위해 냉각탑에서 냉각수 일부가 증발되기 때문에 수중에는 Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , SiO_2 등의 불순물들이 농축되어 열교환기 고온부에서 스케일이 부착한다. 용수의 pH를 조절하거나 스케일억제제를 투입하는 방법이 스케일발생을 방지하기 위한 가장 일반적인 방법이다. 용수의 pH를 낮추면 광물질의 용해도가 현저하게 증가하기 때문에 부착물의 발생량은 감소하나, 낮은 pH에서는 금속부식이 증가하기 때문에 부식억제제의

사용이 필수적으로 요구된다. 현재 인산염계 부식억제제가 주로 사용되고 있으나, 과량처리시에는 2차적인 장해로 스케일(인산칼슘)이 발생하고 소량 사용시에는 금속부식이 증가될 수 있다. 따라서 인산염계 처리제 사용시에는 분산제를 함께 사용하여야 한다. 전열면의 부착물량은 열전달저항의 증가정도를 측정함으로써 관찰할 수 있다. 열전달 저항이 $0.0001\text{ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$ 미만이면 열교환기의 전열면 오염은 없는 것으로 분류한다. 표 3.1은 열교환기 설계시 적용하는 대표적인 오염도계수를 나타낸 것이다. 열교환기 설계시 이러한 수준까지 오염되어도 공정에서 요구하는 성능을 발휘할 수 있도록 열교환기 전열면적을 충분히 크게 하여 설계하여야 한다.

표 3.1 열교환기 설계시 적용되는 오염도계수($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$)

셸측 \ 튜브측	액 체	2상 유체	기 체
액 체	7.9	6.7	5.1
2상 유체	6.5	5.1	4.8
기 체	6.0	5.1	3.9

$$* 1\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W} = 5.678 \text{ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

3.3 전열면 오염현상 주요 영향인자

3.3.1 오염현상의 종류

냉각탑 용수에 의한 열교환기 오염도 발생기구는 사용하고 있는 용수의 수질과 냉각수 처리방법에 따라 크게 영향을 받는다. 냉각수계의 오염현상은 난용성 광물질, 부유물질, 금속산화물, 미생물 등으로부터 야기된다

[20]

가. 난용성 광물질의 부착

난용성 광물질에 의한 전열면 오염현상은 용존고형물의 결정화과정이 동반된다. 특히 수온증가에 따라 용해도가 감소하는 광물질이 고온의 전열면에서 과포화되어 부착물이 발생한다. 온도증가에 따라 용해도가 감소하는 광물질로는 CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 가 있다. 청결한 열교환기를 가동한 후 오염현상이 나타날 때까지 소요되는 시간을 유도기간이라고 하며, 이 기간동안에는 전열면의 오염은 무시할 수준이다. 이 기간이 지나면 오염현상이 서서히 증가하기 시작하는데 오염을 증가시키는 변수로는 수온, 불순물농도, 유속, 결정핵의 수, 전열면조건 등이 있다.

나. 부유물질의 침전

이러한 종류의 오염현상은 주로 대기로부터 유입된 먼지, 모래, 점토 등에 의해 발생되며, 용수와 함께 순환하다가 저유속의 전열면에서 침전되어 열교환기를 오염시킨다. 때에 따라서는 난용성 광물질에 의한 오염보다 더 심하게 나타날 수가 있다. 부유물질에 의한 오염은 여과장치를 설치하여 처리함으로써 방지가 가능하다.

다. 부식생성물

수중에서 금속이 부식되면 금속산화물 농도가 증가하고, 이러한 부식생성물들은 고온의 전열면에 부착하여 열교환기의 효율을 저하시킨다.

라. 미생물오염

따뜻한 열교환기의 전열면은 박테리아, 조류 및 균류의 생장에 적합하며, 미생물막은 열교환기의 전열효율을 크게 저하시킨다. 미생물 오염현상은 염소처리나 적절한 Biocide를 주입함으로써 예방할 수 있다.

3.3.2 오염도 발생단계

열교환기의 오염발생 현상은 다음의 5단계 과정으로 세분하여 설명할 수 있다.

- 초 기: 오염현상을 무시할 수 있는 유도기간에 해당되는 과정
- 이 동: 확산 또는 난류에 의한 오염물질 이동과정
- 부 착: 반데르발스힘, 전기적 인력, 표면장력 등에 의한 부착과정
- 변 형: 물리, 화학적인 변형 또는 숙성과정
- 탈 락: 이온상태로 용해 또는 침식에 의한 입자형태 탈락과정

3.3.3 오염발생 영향인자

냉각탑용수에 의한 열교환기의 오염현상은 유속, 전단응력, 표면온도, 수질, 전열면 상태에 따라 큰 영향을 받는다.

가. 유속의 영향

배관내 유속은 계면의 대류물질전달 저항에 영향을 미쳐 부착물 발생 및 탈락과 밀접한 관계를 갖는다. 부착물 탈락공정에 대한 유속영향은 일반적으로 계면에서의 전단응력과 부착물의 기계적 강도에 따라 다르다.

나. 온도의 영향

냉각수계통에서 열교환기 전열면 온도는 수온보다 더 높다. 온도증가에 따라 용해도가 감소하는 광물질은 고온부위에 쉽게 부착한다. 이때 광물질의 결정화 성장속도는 화학반응에서와 같이 Arrhenious형 온도의존 관계를 갖는다. 열교환기의 열부하가 일정하게 유지된 전열면에서 부착물량이 증가하면 증가할수록 전열면과 부착물 사이의 계면온도는 상승하게 되고 이 상승된 온도는 부착물(스케일)의 숙성과정을 촉진시킨다. 숙성과정에서 쉽게 제거할 수 없는 단단한 부착물 결정이 형성된다. 열교환기 전열면 온도뿐만 아니라 수온도 역시 광물질의 용해도 및 결정화 속도와 밀접한 관계가 있으며 온도증가에 따라 오염도계수가 증가한다.

다. 표면조건

거친 표면조건은 많은 수의 결정핵 자리를 제공하여 부착물발생을 촉진시킨다. 따라서, 매끈한 표면조건이 경우가 오염현상 발생시까지의 유도기간이 더 길다. 금속표면이 부착물로 완전히 덮히게 되면 금속 표면조건에의 영향은 더 이상 나타나지 않는다.

라. 용수 수질

냉각수계에서 수질이 오염현상 발생의 주요원인이 된다. 수중의 불순물 이온농도가 높을 경우 광물질 부착에 의한 오염현상이 발생하고, 부유물질이 많은 경우에는 열교환기의 저유속부위에서 침전물이 발생할 것이다.

3.3.4 오염도계수

오염도계수는 열교환기에서 허용되는 스케일 등의 오염정도를 나타내는 지표이다.

$$\gamma = r_1 + r_2 = 1/U_s - 1/U_o \quad (3.6)$$

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($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$)

또한, 오염도계수는 부착물의 두께와 열전도율을 이용하여 계산할 수 있다.

$$r_1 = L_1 / \lambda_1, \quad r_2 = L_2 / \lambda_2 \quad (3.7)$$

여기서, 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(설계 r_2)는 0.0002~0.0006 $m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C/kcal$ 범위내에서 설계한다. 따라서, 운전중의 r_2 값은 설계 r_2 값 이하로 유지되어야 한다. 설계 r_2 값과 λ_2 값으로부터 허용스케일 두께를 계산할 수 있는데, 이때의 λ_2 값은 냉각수 수질과 약품처리법에 따라 변화된다. 그림 3.2는 r 과 L_2 값 사이의 관계 예를 나타낸 것이다.

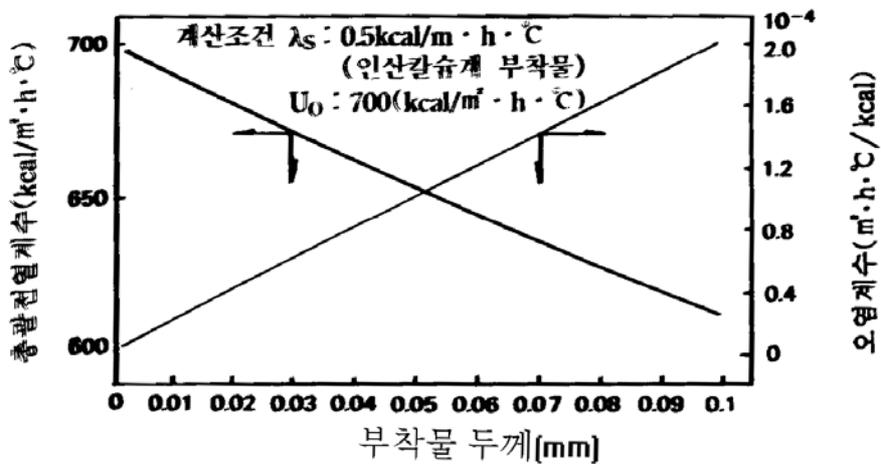


그림 3.2. 부착물 두께와 오염계수와의 관계

3.4 오염도계수 예측모델

3.4.1 열전달 관계식^[16]

열교환기설계시 전열면오염에 의해 총괄전열계수에 미치는 영향은 다음 식으로 표현된다. 다음 식은 외부전열면을 기준으로한 총괄전열계수를 나타낸 것이다.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + R_{fi} + R_w \quad (3.8)$$

여기서, U : 총괄전열계수

h : 대류열전달계수

A : 전열면적

R : 열전달저항

첨자 o : 외표면

첨자 i : 내표면

첨자 w : 전열금속

대류열전달계수(h)와 금속열전달계수 계산방법은 잘 알려져 있고 비교적 정확하게 측정할 수 있으나, 오염도계수는 다음 이유 때문에 정확하게 측정하기가 어렵다.

- 오염현상이 시간경과에 따라 변화되어 정상상태 기준을 적용할 수 없다.
- 다양한 종류의 부착물이 있으며 오염도계수는 부착된 물질의 열전도도에 의해 영향을 받는다.

3.4.2 오염도계수 예측방법

오염도계수를 계산하기 위한 수학적 시도가 최근에 이루어지고 있다. 다음은 오염도계수 관련 물질수지식을 나타낸 것이다.

$$\frac{dR_f}{d\Theta} = \phi_d - \phi_r \quad (3.9)$$

여기서, R_f : 오염도계수 (X_f / K_f)

Θ : 경과시간

ϕ_d : 부착속도

ϕ_r : 탈락속도

X_f : 부착물두께

K_f : 부착물의 열전도도

부착물 발생속도는 오염물발생기구, 표면온도, 유속 및 수질에 의해 영향을 받으며, 부착물 탈락속도는 결정구조 경도 및 유체흐름에 의한 전단응력의 크기에 따라 변한다. 그러나, 부착물이 두꺼워짐에 따라 탈락속도가 증가하기 때문에 부착속도와 탈락속도가 일정해지는 평형상태가 존재한다. 오염도계수 관련 문제에서는 부착과 탈락의 과정에 영향을 미치는 요인들을 밝혀낸 다음 예측이 가능한 기법을 개발하는 것이 무엇보다 중요하다.

가. Kern-Seaton 모델

이 모델은 부착과 탈락이 동시에 발생하는 경우를 설명하기 위해 제안된 가장 오래된 모델로서 점근적인 오염도계수를 예측할 수 있으며 Katz에 의해 얻어진 실험데이터를 표현하기 위해 유도되었다. 전열면에 오염물질의 부착속도는 일정하다고 보며, 탈락속도는 용수의 전단응력과 부착물 두께에 따라 비례한다고 가정하고 있다. Kern과 Seaton에 의해 제안된 물질수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dX_f}{d\Theta} = K_1 C W - K_2 \tau X_f \quad (3.10)$$

여기서, $K_1 C W$: 부착속도

$K_2 \tau X_f$: 탈락속도

K_1, K_2 : 상수

C : 수중 오염물농도

W : 용수유속
 τ : 전단응력
 X_f : 부착물 두께

위식을 부착물 열전도도(K_f)로 나누어 적분 후 R_f 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$R_f = R_f^* - \exp(-\theta/\theta_c) \quad (3.11)$$

$$R_f^* = \frac{K_1 CW}{K_2 K_f \tau}, \quad \theta_c = \frac{1}{K_2 \tau}$$

여기서, R_f^* : 평형 오염도계수(부착과 탈락이 평형일 때 얻어짐)
 θ_c : 시간상수

위 식으로부터 시간이 무한히 증가하면 R_f 값이 R_f^* 값에 접근함을 알 수 있다.

나. HTRI 모델

Taborek등은 냉각탑용수의 오염현상연구에서 부착과 탈락에 대한 Kern-Seaton의 개념을 이용하여 오염도계수에 대해 수질의 영향을 고려한 모델을 만들었다. 부착물발생 관련 수식은 Arrhenious형 결정화반응 표현으로 스케일 표면온도 항과 수질관련 변수를 도입하였다.

$$\phi_d = K_3 \cdot F \cdot \Omega^n \exp(-E/R \cdot Ts) \quad (3.12)$$

여기서, K_3, n : 상수

F : 부착속도함수

- Ω : LSI의 수질함수
- E : 부착반응 활성화에너지
- R : 이상기체상수
- T_s : 스케일표면 절대온도

부착물 탈락관련 수식은 전열면에서의 유체에 의한 전단응력, 스케일두께, 부착물의 결합강도의 함수로서 표현된다.

$$\phi_r = \frac{K_4 \tau X_f}{Y} \quad (3.13)$$

여기서, K_4 : 상수

Y : 스케일강도 함수

위의 두식을 조합하면 오염속도식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dR_f}{d\theta} = K_3 F \Omega^n \exp(-E/R/T_s) - \frac{K_4 \tau K_f R_f}{Y} \quad (3.14)$$

$n=1$ 일때 위 식을 적분하여 오염도계수에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$R_f = \frac{K_5}{K_6} \exp(-E/R/T_s) [1 - \exp(-K_6 \theta)] \quad (3.15)$$

여기서, $K_5 : K_3 F \Omega^n$

$K_6 : K_4 \tau K_f / Y$

장시간 경과한 후의 오염도계수는 다음식으로 주어진다.

$$R_f^* = \frac{K_5}{K_6} \exp(-E/R/T_s) \quad (3.16)$$

따라서 오염도계수에 대한 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_f = R_f^* [1 - \exp(-\theta/\theta_c)] \quad (3.17)$$

$$\text{여기서, } \theta_c = \frac{1}{K_6} = \frac{Y}{K_4 \tau K_f}$$

3.5 파울링 진단장치 구성

3.5.1 기존 파울링 감시기술의 문제점 분석

기존 기술에 따른 열교환기의 오염도 감시 방법은 다음과 같은 두가지의 중대한 문제점을 지니고 있다.

첫째, 전열면에 설치된 온도센서를 이용하는 오염도 감시방법은 전열면에 부착물이 상당량 발생되어야 온도 증가를 관찰할 수 있기 때문에, 전열면에 미량의 부착물이 발생시에는 전열면의 온도변화를 감지하기가 어려워, 전열면에 대한 미세한 오염정도의 변화를 정확하게 감시할 수 없다는 문제점을 지니고 있다.

둘째, 실제적으로는 부착물이 전열면 전체에 걸쳐 균일한 두께로 부착되지 않기 때문에, 온도센서의 위치에 따라서 측정된 오염도 계수는 항상 큰 오차를 내포할 수 있다. 열교환기의 오염을 발생시키는 중요한 인자들로 전열면의 온도, 금속표면의 조건, 유속, 수질 등을 들 수 있는데, 이

러한 특성치들은 전열면 전체에 걸쳐 일정하게 작용하지 않기 때문에 전열면의 스케일층이 균일하게 생성되지 않는다. 아래의 그림3.3은 이러한 현상을 설명하는 것으로서 온도센서가 위치한 부분의 스케일 부착량이 다른 부위에 비해 현저하게 적으므로 실제 열교환기의 오염도가 높은데도 불구하고 잘못된 지시치를 알려주게 된다.

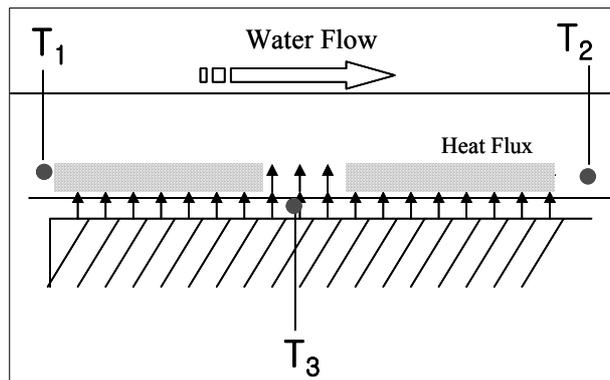


그림 3.3 불균일한 스케일의 측정

3.5.2 파울링 진단센서 제작 및 평가시험

그림3.4에 도시되어있는 제안한 파울링 센서는 기존방식과 같이 내부의 열선과 열선의 외부에 나선형으로 균일하게 감긴 전열면 온도측정용 금속선이 내장되어 열교환기 전열면의 온도변화를 금속선의 저항치 변화로 측정하는 기본원리를 이용한다. 그러나 열을 발생시키는 열선의 경우 파울링 센서의 전체 외주면에 균일한 간격으로 감겨 있으며 열선과 열선 사이에는 세라믹 절연체로 절연이 이루어져 있다. 또한, 열선의 외부에는 고순도의 백금선이 일정한 간격으로 일정한 저항 값의 길이만큼 감겨져 있으

며 이 백금선 사이 및 외부 전열면 사이에는 또한 세라믹으로 절연되어 있다. 외부 전열면의 경우에는 실제 현장의 열교환기와 같은 재질의 재료를 사용하여 더욱더 정확한 파울링 측정이 가능하도록 하고 있다.

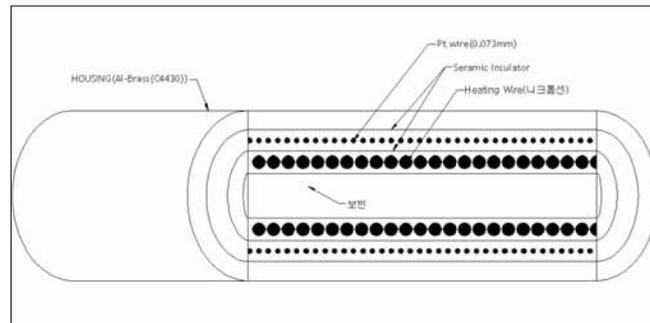


그림 3.4 개선된 파울링 센서의 구조

위에서 언급된 개선된 파울링 센서의 제작에는 발열에 필요한 니크롬선, 온도측정용 고순도 백금선, 세라믹 절연체, 외부 전열면을 위한 SUS316 파이프등이 사용되었다. 발열부의 총 길이는 12cm이며 온도측정 구간 또한 12cm이다. 제작에 사용된 니크롬선으로 가능한 최대 발열량은 직류 100V일때 600W이다. 제작 도면은 그림3.5와 같으며 그림3.6은 도면에 따라 제작된 실물을 분해한 그림이다.

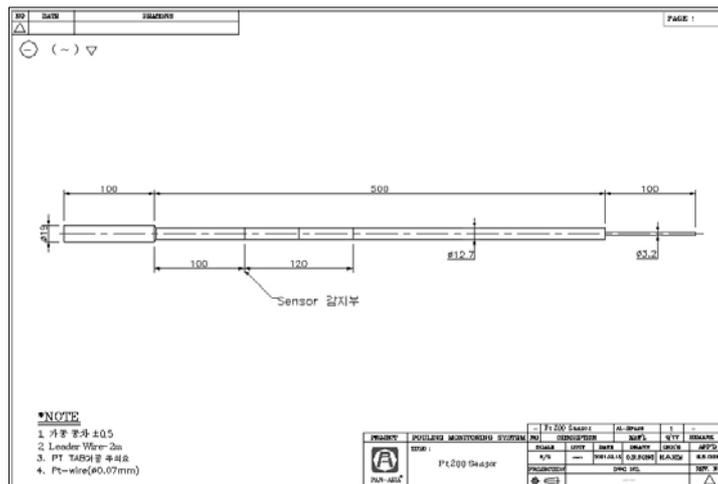


그림 3.5 파울링 센서 제작도면

그림3.6에서 볼 수 있듯이 백금선과 백금선 사이에는 세라믹 절연체로 충진을 하며 백금선과 전열선(니크롬선) 사이에도 세라믹 고형물 등으로 절연을 한다. 센서내 열선의 길이가 12cm이지만 고형물의 길이는 6cm이다. 전체 길이를 맞추어 주기 위해서는 2개를 병렬로 연결하여야 한다.

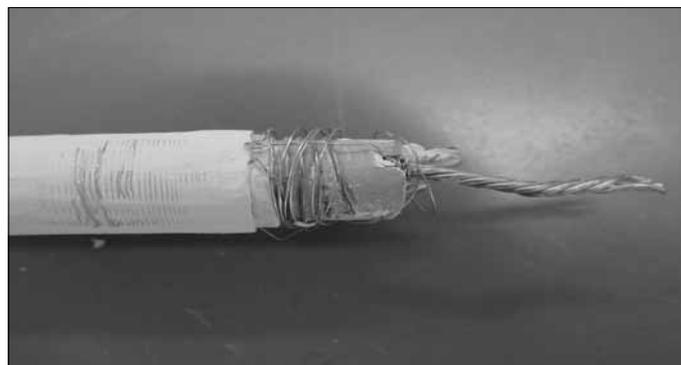


그림 3.6 분해한 파울링 센서

그림3.7은 2개를 병렬로 연결한 후의 센서 모습이다. 이 상태에서 외부 하우스징을 씌우면 완성된 파울링 센서가 제작된다.

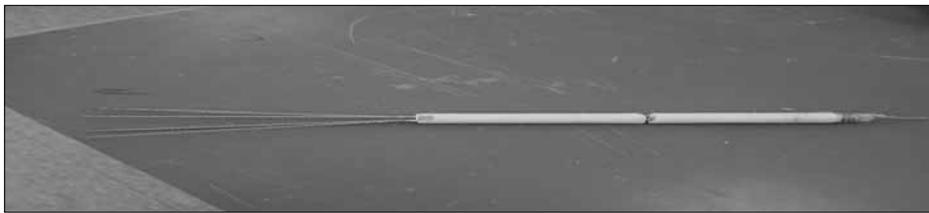


그림 3.7 연결된 2개의 센서

표 3.2는 파울링 센서의 세부사양이다. 저항 값의 측정 온도는 전원을 공급하지 않은 상태의 20℃에서 측정한 것이며 오차는 ±0.03% 이내이다.

표 3.2 Fouling 센서 사양

구분	외경(mm)	저항	감긴길이	순도
니크롬선	∅0.35	16.67Ω/m	< 1m	-
백금선	∅0.07	28.5Ω/m	7m	< 99.9%

파울링 센서의 구성 요소중 센서로 백금선을 사용할 경우 파울링 센서 백금선의 온도 보정 방법은 아래와 같다. 파울링 센서의 경우 온도에 따른 저항치가 센서의 정확도에 직접적인 영향을 미칠뿐 아니라 제작과정에서 니크롬선의 길이 변화에 따른 저항치가 편차를 보일 수 있으므로 센서의 보정이 필요하다.

먼저, 세점 이상의 임의 온도를 정하고 이때 파울링 센서 백금선의 저항값을 측정한다. 이때, 온도 센서 보정을 위해 일반적으로 사용되는 오일 배스를 사용하여 측정하거나 중탕을 하여 측정하게 된다. 임의의 온도로

오일배스의 온도를 설정한 다음, 오일배스 내에 파울링 센서를 넣고, 일정 시간이 경과한 후 백금선의 저항치를 정밀저항 측정수단을 사용하여 정확하게 측정한다.

둘째, 파울링 센서의 백금선의 온도계산 파라미터값을 계산한다. 첫 번째 실험에서 얻어진 온도 값과 저항치들을 이용하여 백금선의 저항치로부터 온도를 산출하기 위해 필요한 파라미터를 계산한다. 아래의 식에 측정된 온도와 저항값의 쌍을 대입하여 연립방정식 형태로 만든 후 이로부터 파라미터를 계산한다.

$$R_t = R_0 \times [1 + \alpha \times \{T - \delta \times (T/100) \times (T/100-1)\}] \quad (3.18)$$

식(3.18)에서 T는 온도(°C), R_t는 백금선의 저항(Ω), R₀, α, δ는 파라미터 상수를 각각 나타낸다.

3.5.3 파울링 진단기 시제품 제작

그림3.8은 본 시스템의 블록 다이어그램이고, 그림3.9는 제작된 시제품의 사진이다. 열교환기 전단으로부터 취수(side-stream) 형태로 뽑아낸 냉각수 라인을 inlet에 연결한 후 열교환기 뒷단과 outlet을 연결하거나 드레인시킨다. 다이어그램에서 볼 수 있듯이 용수 입·출구에 온도 센서를 취부하여 수온을 측정한다. 입구쪽에 flow control valve를 설치하여 유속을 일정하게 유지한다. 다만, 실제 시스템에는 flow meter만을 설치하고 수동 밸브를 설치하여 사용자가 직접 유속을 조정하도록 하였다.

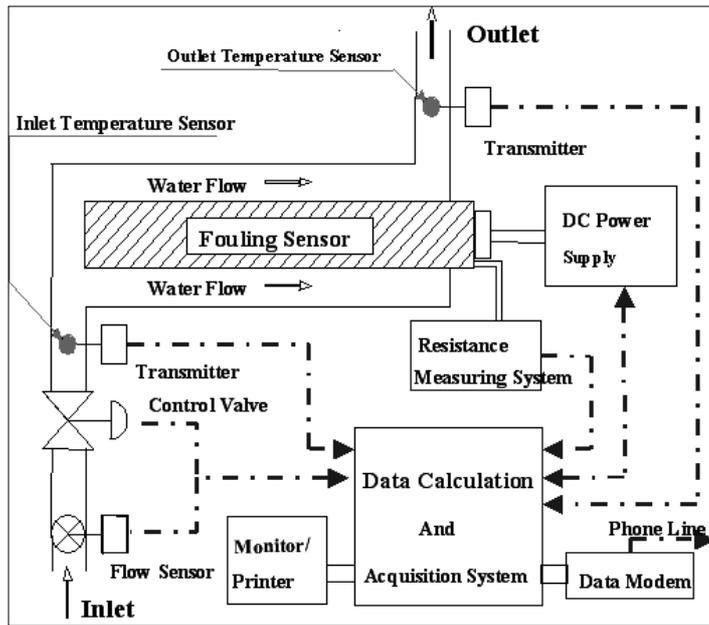


그림 3.8 시스템 블럭다이어그램



그림 3.9 파울링 진단기 시제품

가. 기계적 구성

1차 실험 시에 사용되었던 시스템 하우징의 경우는 모든 배관, 전원 및 CPU모듈 등이 함께 장착된 일체형이었으나, 이로 인해 시스템 내부의 빈공간이 많이 발생하였다. 결국, 설치 공간이 협소하거나 배관이 복잡할 경우에는 시스템의 설치가 힘든 문제가 발생하였다. 또한, 배관과 전기 배선이 함께 있어서 시스템 유지 보수시에도 어려움이 예상되어 2차 실험시에는 이를 분리하였다. 배관과 전기배선을 분리함으로써 유지 보수시 안전 및 작업 편리성을 도모하였고, 설치 공간을 최소화 하였다.

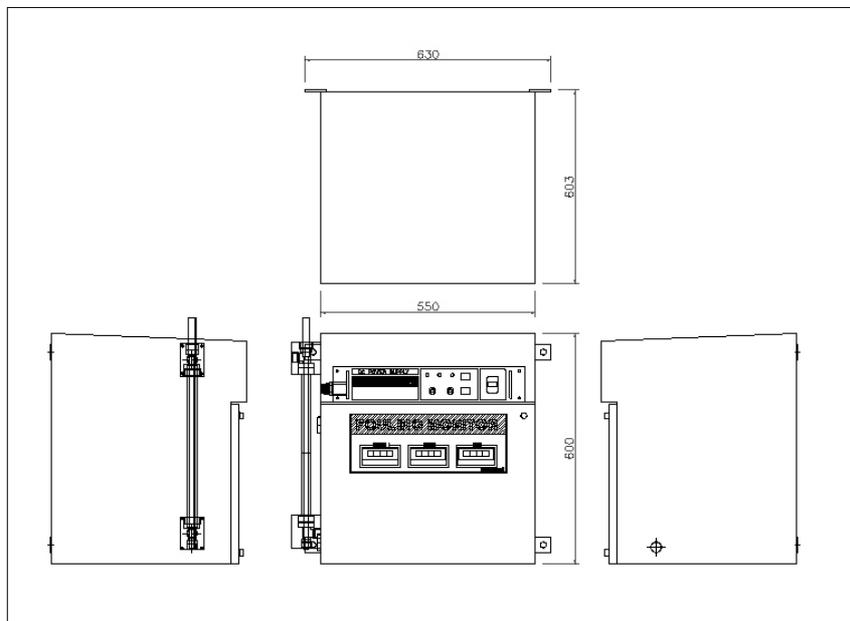


그림 3.10 시스템 하우징 설계도면

그림3.10에서 볼 수 있듯이 파울링 센서는 수직으로 설치되어 있다. 이럴 경우 배관으로 사용된 파이렉스관 내부에 침전물이 덜 쌓이는 효과가

있으나, 실제 조사하고 있는 열교환기의 설치 환경과 다른 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 파이렉스 관을 수평으로 설치하여 재실험을 진행하였다.

1차 실험의 경우 PVC배관을 일(-)자형으로 배치를 하여 모든 측정기를 설치하였다. 그리하여, 배관 자체의 저항을 최소화 하였으나 이럴 경우 시스템의 부피가 커지는 단점이 있었다. 또한, 유지보수시의 배수기능등을 고려치 않았다. 2차 실험의 경우 1차 실험시의 단점을 보완하여 각각의 PVC연결 부분은 유니온을 사용하였으며 inlet/outlet의 경우 밸브를 설치하여 배수가 쉽게 이루어 질 수 있도록 하였다.

그림3.11은 배관에 사용된 파이렉스관이다. 파울링 센서의 오염 상태를 눈으로 직접 확인하기 위해서 사용되어졌다. 열교환 작용이 파울링 센서와 냉각수와의 사이에 일어나는 것보다 파이렉스관을 통해 대기(공기)와 냉각수 사이에 더 많이 일어날 수도 있어서 육안 검사를 하지 않을 경우에는 단열재로 보강하였다. 2차 실험용 시스템에서는 배관 부분의 하우징 내부에 설치하고 투명유리를 전면에 배치하여 이를 보완하였다.

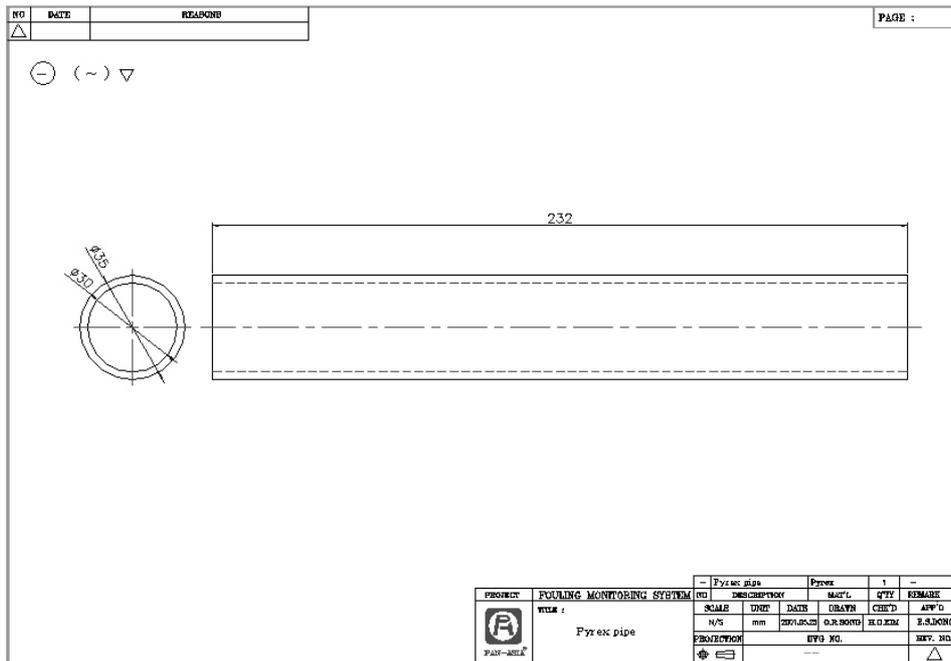


그림 3.11 센서 관찰용 pylex관

파이렉스관과 파울링 센서를 지지하는 지지대의 경우 1차 실험용으로는 PP재질을 사용하였으나 재질의 특성으로 인해 PT-tap을 내어 센서를 체결할 경우 나사산이 마모되는 현상이 발생하여 방수처리에 문제가 발생하였다. 2차 실험에서는 MC재질로 변경하여 이를 보완하였다. 그림3.12는 지지대의 제작 도면 중 일부이다.

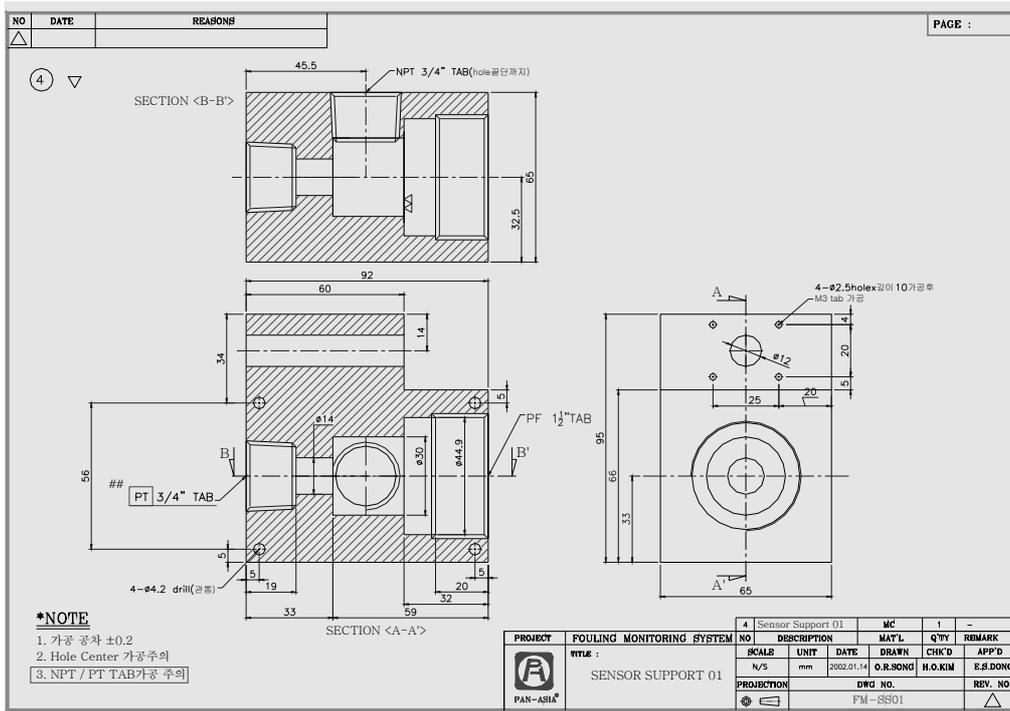


그림 3.12 pylex관 지지대

나. 전기적 구성

본 시스템을 구성하는 부품은 파울링 센서, 온도 센서, 디스플레이용 모듈 및 CPU모듈, 플로우메터 등으로 구성된다. 먼저 플로우메터를 살펴보면, Flow sensor와 Flow indicator로 구성된다. flow indicator의 경우 CPU모듈의 아나로그 입력으로 4-20mA 신호를 출력한다.

그림3.13, 3.14는 시스템 결선도 이다. 플로우량이 일정량 이하일 경우에는 파울링 센서로의 전원 공급을 차단하도록 시스템을 구성하였다.

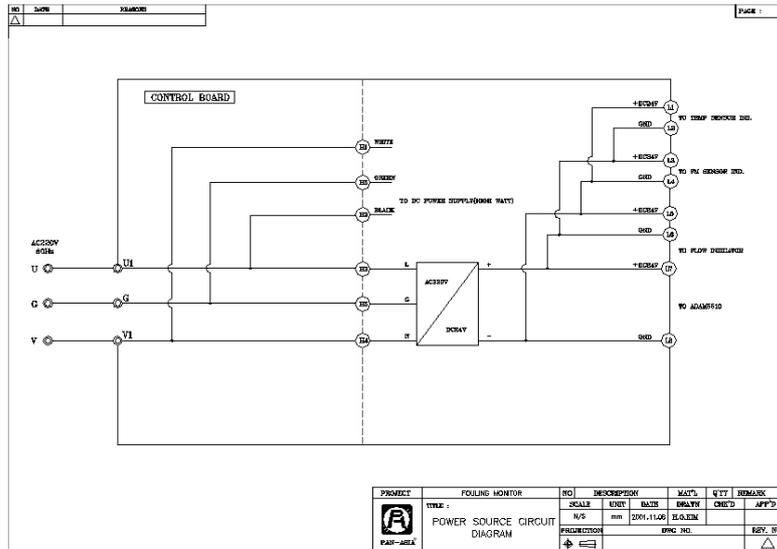


그림 3.13 전원공급부 배선도

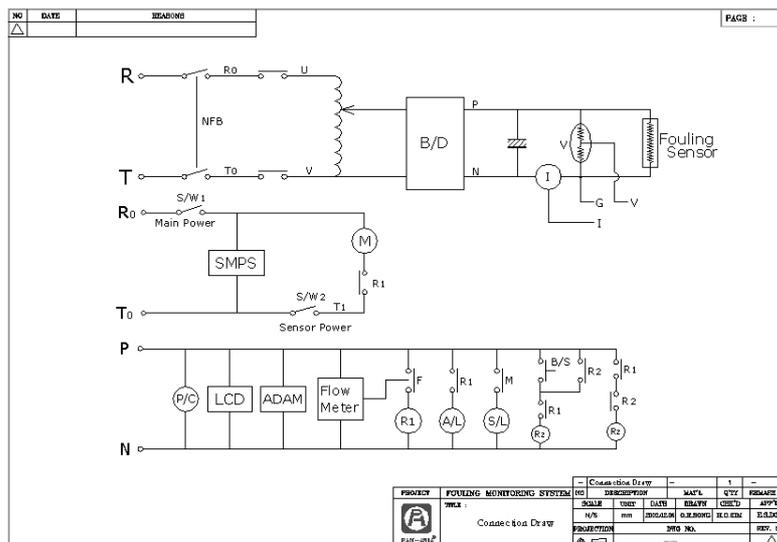


그림 3.14 전체 시스템 배선도

다. 인터페이스 구성

사용자 인터페이스의 경우 1차 실험용 시스템에서는 입구수온, 유량계 및 오염도를 디지털 인디케이터를 사용하여 표시하였고 나머지 모든 필요 데이터는 데이터 로깅용 PC프로그램으로 전송하여 데이터 저장 및 표시를 하였다. 디지털 인디케이터의 경우 데이터 가독성은 높으나 데이터 표시를 위해서는 각각의 표시기용 아날로그 또는 디지털 출력이 CPU모듈로부터 나와야하는 제한이 있다. 2차 실험용 시스템에서는 데이터 로깅 프로그램용 화면과 유사한 형태의 표시용 그래픽LCD를 채용하여 데이터 가독성은 물론 PC가 없이도 사용자가 필요한 모든 데이터를 일목요연하게 볼 수 있도록 하였다. 플로우미터 값은 특별히 배관용 모듈에 분리 위치 시켜 사용자가 유량을 조정할 경우 쉽게 볼 수 있도록 하였다. 그림 3.15는 표시되는 화면 중 일부이다.

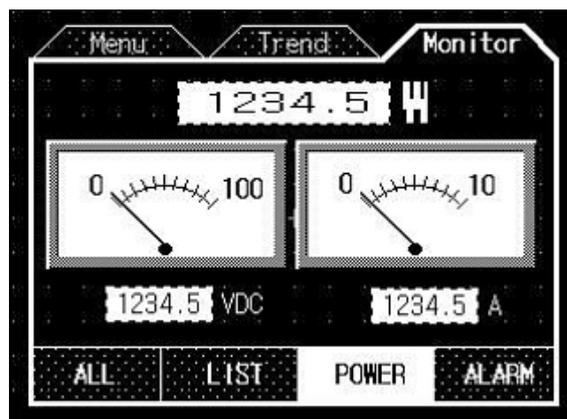


그림 3.15 진단장치 사용자 인터페이스

그림에서 볼 수 있듯이 사용자 인터페이스는 크게 Monitor, Trend 및

Menu 3화면으로 이루어져 있다. Monitor는 ALL, LIST, POWER 와 ALARM으로 나뉘어져 있다. 사용자는 자신의 필요에 따라 각각의 화면을 선택하여 볼 수 있다. 화면의 전환 및 설정 값 수정 등의 모든 기능은 터치스크린으로 동작한다. Trend는 DAY, WEEK와 MONTH로 나뉘어져 있다. 표시되는 값은 현재 오염도(%)만을 저장 표시한다. Menu는 사용자 도움말 및 시스템설정 등으로 구성되어 있다.

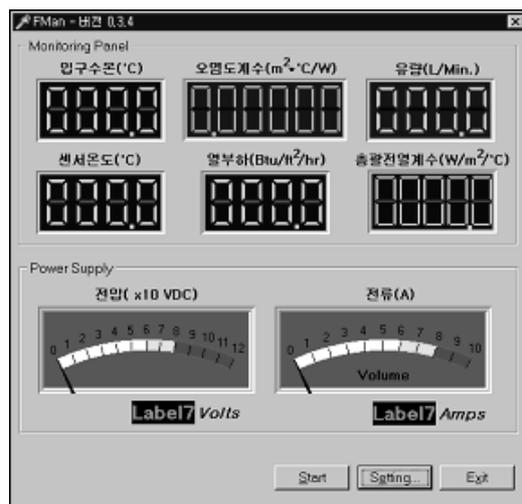


그림 3.16 PC 모니터링화면

본 시스템에서는 RS-232 시리얼 통신을 이용하여 현재 파울링 모니터링 시스템의 모든 정보를 사용자가 정의하는 시간간격으로 모니터링하며, 이를 스프레드쉬트 형태의 파일로 저장하고 있다. 파일명은 각각 일별로 구분되며 일자가 바뀔 경우 새로운 파일을 생성한다. 그리고, 시스템이 갑자기 다운되거나 정전이 일어났을 경우에는 이를 복원할 수 있도록 윈도우즈 레지스트리에 프로그램의 상태 및 최초 시작시의 전열계수를 저장한

다. 그림3.16은 PC모니터링 화면이다. 입구 수온 및 센서온도 그리고 열 부하등의 계산된 값 등을 표시한다. 아래의 버튼은 프로그램의 시작 및 종료 그리고 설정 값을 조정할 경우 사용한다. 그림3.17의 설정 화면에서는 시리얼통신과 관련된 각종 옵션을 조정할 수 있으며 데이터를 읽어 오는 주기와 이를 파일형태로 저장하는 주기를 조정할 수 있다.

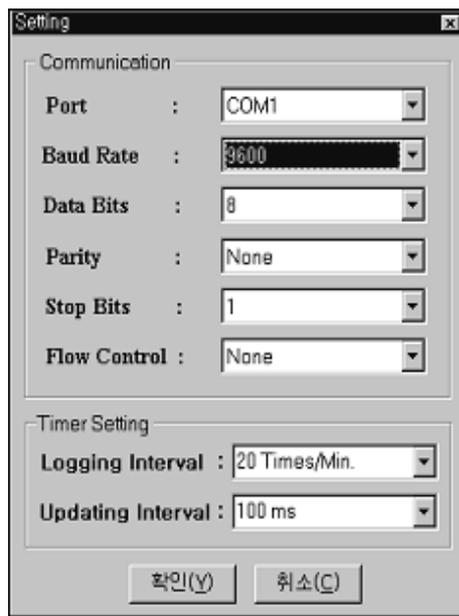


그림 3.17 모니터링 프로그램 설정 창

그림3.18은 엑셀파일 형태로 데이터를 저장하는 모습이다. 현재는 몇몇 필요사항만 설정화면에서 조정된 주기로 저장하고 있다. 일반적인 스프레드 시트 프로그램에서 데이터 처리를 편리하게 할 수 있다.

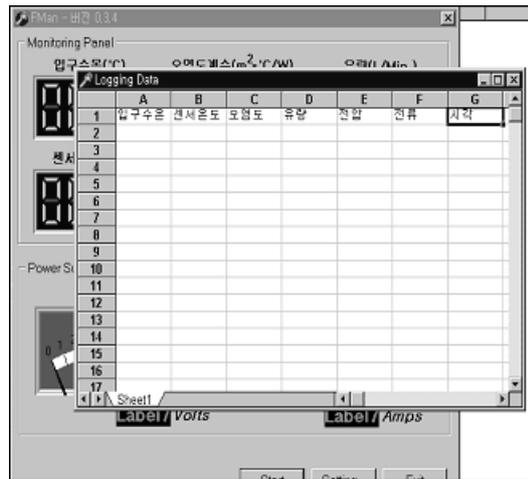


그림 3.18 모니터링 데이터 저장

제 4 장 성능실험 및 평가

4.1 성능실험

4.1.1 목적

본 실험은 산업용 열교환 설비의 냉각수 계통에서 발생하는 파울링을 진단하기 위해 제안한 기술의 기본성능 확인과 수정 및 보완사항을 도출하기 위하여 모델복수기를 이용한 성능실험장치의 형태 및 운전조건을 발전소 복수기와 유사하게 설정하였다^{[21][22][23]}. 또한, 실험기간을 단축하기 위해서 실제 발전소 현장대비 불순물이온농도를 10배로 높이고 유속을 1/2인 1m/s로 감소시켜 진행하는 것을 기본으로 하였으며, 측정장치의 각 데이터를 지속적으로 수신하고 저장하여 실험 전반에 걸친 데이터를 분석하고자 하였다.

4.1.2 실험대상 및 1차 실험

가. 파울링 진단장치

그림 4.1에 나타낸 취수형의 파울링 진단 장치로 히터 및 백금선이 내장되어있는 센서를 이용하여 입·출구 수온과 센서온도차를 측정/계산 파울링의 발생정도를 진단하는 장치로 제안한 기술의 성능 시험을 위해 제작하여 실험에 적용하였다.



그림 4.1 제작한 파울링 진단장치

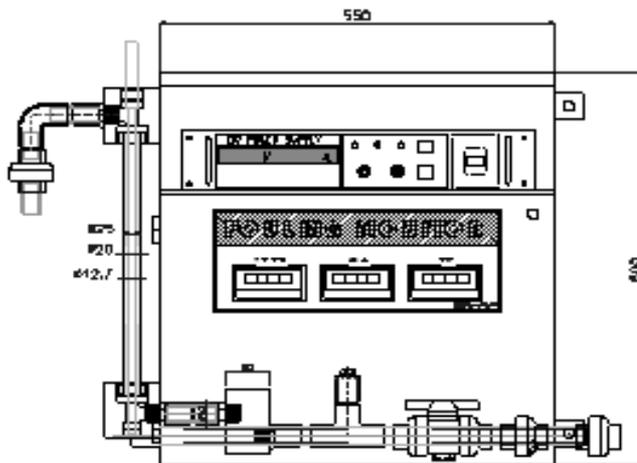


그림 4.2 제작한 파울링 진단장치의 배관도

(1) 사양

(가) D.C. Power supply : 0~100VDC

- (나) Ni-Wire : 16.67 Ω , 600W(100VDC : 600W)
- (다) Pt-Wire : 200 Ω , 측정범위(200~400 Ω : 100~500 $^{\circ}\text{C}$)
- (라) Flow Temp Sensor(Pt 100 Ω) : 측정범위(0~50 $^{\circ}\text{C}$)
- (마) Flow Meter(Paddle Wheel Type) : 측정범위(0~30 ℓ /min)
- (바) Display : 과울링 센서온도, 공급전압 및 전류, 유량, 입구수온, 오염도(%), 열부하(W/cm 2 or Btu/ft 2 · hr)

나. 모델복수기

모델복수기 실험장치로는 전기 히터로 가열을 하며, 감압증발을 시키는 방식의 콘덴서와 수증기를 응축하기 위한 냉각수를 냉각탑을 이용하여 냉각·순환시키고, 각종 데이터를 취득할 수 있도록 제작되었으며 실제 현장과 유사한 조건을 설정하여 실험을 진행 할 수 있도록 구성되었다.



그림 4.3 모델복수기 전·후면

진단기술의 성능확인을 위한 본 실험장치의 세부사양은 다음과 같다.

(1) 모델 열교환기

- 27.2 KVA 3상 변압기(1EA)
- 5 KVA 단상 변압기(1EA)
- 진공펌프, 진공게이지(1SET)

- 연관형 히터, 길이 84“, 직경 0.43”, 560V, 5300W(3EA)
- 5A/560V 3ph/3 wire 전력계(1EA)
- 25:5 전류 변환기(2EA)
- 2“ NPT 유량계, 6~60 GPM(1EA)
- 타이머(1EA)
- Hi Limit Controller(1EA)
- 유속측정기, 0~20 GPM; 폴리프로필렌 임펠러 유속센서; 유속센서 Tee (3SET)
- pH 분석기, 0~14; pH 센서(1SET)
- 전도도 분석기; 전도도 센서, 전지상수 10 및 0.5(1SET)
- 부식률 측정계(2EA)
- 펌프모듈 : 드라이브, 헤드, 아답터 키트(4SET)
- PVC 점검 밸브(4EA)
- 압력 게이지 2-1/2“, 0~100psi(4EA)
- Neptune 시리즈 펌프 2종(각 1EA)
- 1“ 소켓 게이트 밸브(3EA)
- 1“ 압력 조절기(3EA)

- 파이프 류 및 파이프 금속 샘플 류
- Thermistor(7EA), 'T' Type Thermocouple(7Set)
- 컨트롤러 : Data Acquisition Syst.(1EA)



그림 4.4 모델복수기 냉각타워

- (2) 냉각타워 및 용수저장 탱크
- 냉각타워(1EA)
 - 용수저장탱크(1EA)
 - 마그네틱 드라이브 펌프(2EA)

- 플로트 스위치 2종(각 2EA, 1EA)
 - 솔레노이드 밸브(1EA)
 - 각종 배관류
- 다. 전체 성능실험 설비 구성

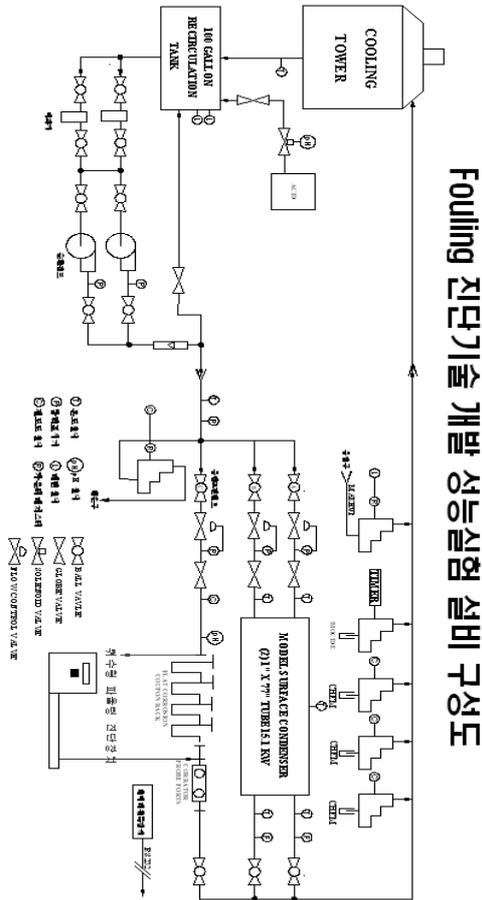


그림 4.5 전체 성능실험 설비 구성도

라. 실험조건

(1) 불순물 이온 농도 설정

- 발전소별 용수 수질을 참조하여, 발전소 농도의 10배로 적용 하였다.

- 표 4.1과 같이 각 이온별 약품주입량을 결정하였다.

표 4.1 합성수 조제시 이온 보강용 화학약품 사용량

구 분		순 도 (%)	주 입 량 (g/L)
양이온	CaCl ₂ ·2H ₂ O	99	0.6444
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	99	0.3962
음이온	Na ₂ SO ₄	99	0.3735
	NaHCO ₃	100	0.6257

※용수저장조 용량 : 100 Gallon× 3.785(美) = 378.5L(총 용적=420L)

(2) 약품 주입량 계산

(가) M(Ca) : 40.0780 g/mol, CaCl₂·2H₂O : 147.02 g/mol

$$\therefore \text{Ca 농도} = \frac{40}{147.02} \times 0.644 \approx 0.175g$$

$$\therefore 175 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 2.50 \approx 438 \text{ ppm}$$

(나) M(Na₂) = 45.9795 g/mol, M(Na₂O₄S) : 142.0431 g/mol, M(CHNaO₃) ≈ 84.0069 g/mol

$$\therefore \text{Na 농도} = \frac{45.9795}{142.0431} \times 0.3735 + \frac{45.9795}{84.0069} \times 0.6257 \approx 0.465g$$

$$\therefore 232 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 2.18 = 505.76 \text{ ppm}$$

(다) $M(\text{O}_4\text{S}) = 96.0636 \text{ g/mol}$, $M(\text{MgO}_4\text{S}) : 120.3686 \text{ g/mol}$, $M(\text{H}_{14}\text{O}_7) : 126.1070$
 g/mol , $M(\text{Na}_2\text{O}_4\text{S}) : 142.0431 \text{ g/mol}$

$$\therefore \text{SO}_4 \text{ 농도} = \frac{96.0636}{120.3 + 126.1} \times 0.3962 + \frac{96.0636}{142.0431} \times 0.3735 \approx 0.4071g$$

$$\therefore 407.1 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 1.04 \approx 432.28 \text{ ppm}$$

(라) $M(\text{Mg}) : 24.3050 \text{ g/mol}$, $M(\text{MgO}_4\text{S}) : 120.3686 \text{ g/mol}$, $M(\text{H}_{14}\text{O}_7) : 126.1070$
 g/mol

$$\therefore \text{Mg 농도} = \frac{24.3}{120.3 + 126.1} \times 0.396 \approx 0.039g$$

$$\therefore 39 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 4.1 \approx 159.9 \text{ ppm}$$

(마) $M(\text{CHO}_3) = 61.0171 \text{ g/mol}$, $M(\text{CHNaO}_3) \approx 84.0069 \text{ g/mol}$

$$\therefore \text{HCO}_3 \text{ 농도} = \frac{61.0171}{84.0069} \times 0.6257 \approx 0.4546g$$

$$\therefore 454.6 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 0.82 \approx 372.78 \text{ ppm}$$

(바) $M(\text{Cl}) = 35.4530 \text{ g/mol}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 분자량 : 147.02

$$\therefore \text{Cl 농도} = \frac{35.453}{147.02} \times 0.644 \approx 0.1552g$$

$$\therefore 155.2 \text{ ppm as CaCO}_3 \times 1.41 \times (\text{분자량})^2 \approx 437.7 \text{ ppm}$$

표 4.2 합성수 조제시 약품사용량

구 분		순도(%)	사용량 (g/L)	1회 투입량 (g/L)	연속 투입량 (시료주입 펌프사용)
양이온	CaCl ₂ ·2H ₂ O	99	0.6444	0.6444×420L = 270.648g	0.6444×20L×10배 = 128.888g
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	99	0.3962	0.3962×420L = 166.404g	0.3962×20L×10배 = 79.240g
음이온	Na ₂ SO ₄	99	0.3735	0.3735×420L = 156.870g	0.3735×20L×10배 = 75.700g
	NaHCO ₃	99	0.6257	0.6257×420L = 262.794g	0.6257×20L×10배 = 125.140g

(3) 전체 성능실험 조건

(가) 모델열교환기 열부하량 계산

$$- Q(\text{전열부하}) = \frac{W(\text{전력})}{A(\text{면적})},$$

$$12,000 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr} = W(\text{전력}) \div \frac{3,183.54 \text{ cm}^2 (\text{튜브 전열면적})}{3,125 \text{ W/cm}^2 (\text{환산계수})}$$

$$\therefore W = 1.0187 \times Q(12,000 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr}) = 12224.4 \text{ W}$$

(나) 파울링 센서 열부하량 계산

$$- Q(\text{전열부하}) = \frac{W(\text{전력})}{A(\text{면적})},$$

$$12,000 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr} = W(\text{전력}) \div \frac{47.48 \text{ cm}^2 (\text{센서 전열면적})}{3,125 \text{ W/cm}^2 (\text{환산계수})}$$

$$\therefore W = 0.0152 \times Q(12,000 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr}) = 182.28 \text{ W}$$

표 4.3 1차 성능실험 운전조건

목록		설정치
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(감시장치:튜브C)
열부하	감시장치 공급전력	9,500 Btu/ft ² /hr : 9,677.7W <u>12,000 Btu/ft²/hr : 12,224.4W</u>
	감시장치 공급전력	9,500 Btu/ft ² /hr : 144.31W <u>12,000 Btu/ft²/hr : 182.28W</u>
Make-Up		Auto
Make-Up		Auto

바. 실험순서/내용

(1) 모델복수기 시험운전

실제 실험에 앞서 모델복수기 점검 및 수리완료 후 시험운전을 수행하였다. 시험운전 중 각 장치 정상동작 여부를 확인하고 실험목적에 적합한 데이터 수집장치 설정 및 정상 데이터 수집여부확인을 실시하여 실험시에 발생할 수 있는 고장 등을 방지하였다.

(2) 파울링 진단 및 저감 1차 실험(15일)

(가) 취수형 파울링 진단장치 및 초음파 스케일 저감기 설치 후 실험을 진행하였다.

(나) 최초 실험이므로, 각 장치의 정상동작을 확인하고 기초데이터를

수집하였다.

- (다) 파워링 저감장치인 초음파 발신기는 11.10kHz 단진동자를 이용하였으며 튜브 A에는 설치하고, 튜브 B에는 저감장치를 설치하지 않았다.
- (라) 신뢰성있는 실험을 위해 모델열교환기 튜브와 감시장치의 센서 재질을 동일하게 설정하여 실험하였다.
- (마) 스케일생성약품으로 합성수 조제는 상기 자료를 근거하여 발전소 대비 약10배의 성분을 투여하였다.
- (바) 실험 시작단계에서 종료까지 모든 상황을 감독 및 모니터링하여 안전사고나 오동작을 최대한 방지하였다.
- (사) 설비가동 및 종료의 일관성을 유지(운전시간, 조건 등)하였다.
- (아) 데이터 정리 및 분석을 통해 수정 및 보완사항을 도출하였다.
- (자) 모델열교환기 튜브를 절단하여 일정면적에서 채취한 스케일과 감시장치 센서의 양을 비교·검토하였다.
- (차) 튜브 A, B의 스케일 부착량을 비교·검토하였다.



그림 4.6 1차실험 장치구성

(3) 성능실험 중 수정 및 보완사항

장치 운전 초기에 모델복수기 모니터링 프로그램을 작성하여 파일로 데이터를 수집/저장하였고 초기 운전시 파울링 모니터링 장치의 수차례 에러로 프로그램 수정을 실시하여 실험을 진행하였다. 또한, 순환수가 냉각타워에서 통과하면서 손실되는 것을 방지하기 위하여 낙수방지판을 설치하였다.

일정간격의 진공펌프 가동으로 모델열교환기 셀측 온도를 90°C 이하로 유지하고 실험 중반까지 냉각타워 쿨링팬의 지속적인 가동으로 냉각수 수온을 23°C 이하로 유지하여 실험을 진행하다가 실험 후반에 냉각타워 쿨링팬 동작온도를 40°C 로 조정하여 냉각수 수온을 36°C 로 유지시키면서 실험을 진행하였다.

성능실험 중 특이 사항으로는 냉각타워 쿨링팬의 지속적인 가동시 평균

3~4시간의 용수 자동보충(Make-Up)간격을 가지는 것을 확인하였고, 냉각타워 쿨링팬의 동작온도 40℃로 설정 후 자동보충 간격이 낙수 및 증발량 감소로 인하여 길어졌다. 또한, 열교환기의 쉘측 진공도가 낮을수록 낮은 온도에서 물이 증발하여 응축되므로 입·출구 수온 차가 커졌다.

약품투입 초기에는 전도도가 높았으나 서서히 감소하여 음·양이온 반응으로 결정화가 진행됨을 알 수 있었고 증발량에 따라 pH 및 전도도가 상승하여 운전농축도가 상승하는 상태도 알 수 있었다.

사. 실험결과

(1) 모델복수기 모니터링 데이터

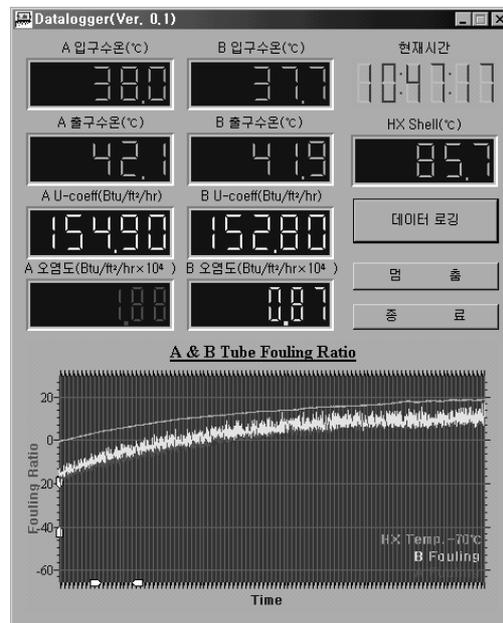


그림 4.7 모델복수기 모니터링 프로그램

Microsoft Excel - 모델복수기 1차데이터

파일(F) 편집(E) 보기(V) 삽입(I) 서식(O) 도구(T) 데이터(D) 창(W) 도움말(H)

T24

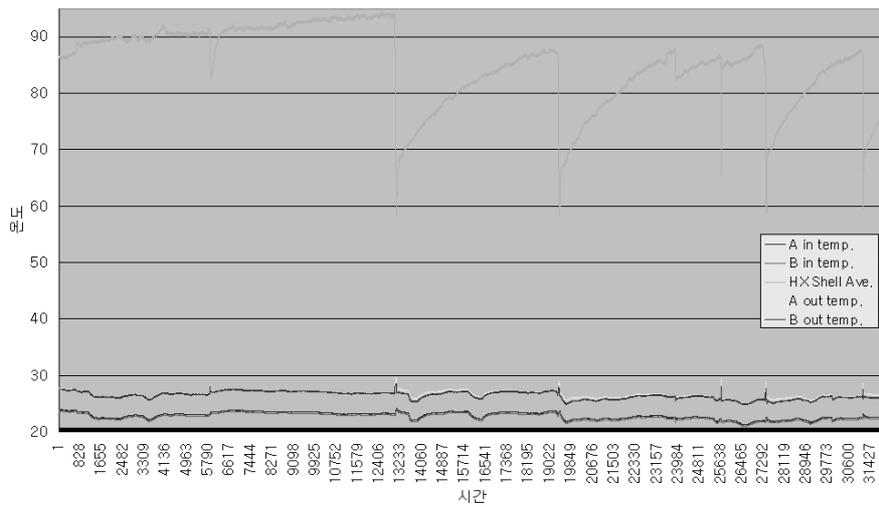
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	pH	Conductivity	A flow	B flow	C flow	A in temp.	B in temp.	HX shell #1	HX shell #2	HX shell #3	HX Shell Ave.	A out temp.	B out temp.	A LTMD	B LTMD	A U-coeff	B U-coeff
1	8.215	1.8575	23.084	21.998	0.54978	23.912	23.647	86.07	86.898	86.598	86.492	27.681	27.598	60.666	60.868	110.5	108.05
2	8.215	1.8595	22.928	21.998	0.54978	23.912	23.647	86.259	86.898	86.598	86.545	27.658	27.554	60.741	60.828	106.1	108.4
3	8.215	1.8598	22.407	22.595	0.54978	23.912	23.647	86.259	86.259	86.992	86.30393	27.658	27.554	60.489	60.681	106.89	111.9
4	8.215	1.8592	22.407	22.249	0.54978	23.912	23.647	86.07	86.451	86.992	86.30493	27.681	27.522	60.489	60.899	107.59	109.4
5	8.215	1.8554	22.024	22.155	0.54978	23.912	23.627	86.259	86.898	86.992	86.48699	27.658	27.57	60.592	60.876	104.79	110.61
6	8.215	1.8548	22.949	22.921	0.55121	23.912	23.647	86.07	86.451	86.245	86.25593	27.684	27.598	60.484	60.442	108.89	110.95
7	8.215	1.8598	22.635	21.998	0.54978	23.912	23.647	86.07	86.644	86.598	86.41793	27.658	27.57	60.519	60.787	107.78	109.08
8	8.215	1.8596	22.407	22.992	0.54978	23.912	23.647	86.07	86.644	86.598	86.41793	27.684	27.598	60.625	60.808	106	110.41
9	8.215	1.8592	22.792	22.249	0.55121	23.912	23.647	86.07	86.451	86.598	86.393	27.684	27.598	60.581	60.799	107.94	109.79
10	8.215	1.8548	22.407	21.57	0.54978	23.925	23.667	86.07	86.898	86.245	86.98499	27.681	27.602	60.582	60.728	107.05	107.71
11	8.215	1.8596	22.649	22.008	0.54978	23.925	23.647	86.07	86.644	86.245	86.91957	27.681	27.598	60.487	60.706	108.9	109.69
12	8.215	1.8598	22.935	21.117	0.54978	23.925	23.647	86.07	86.644	86.245	86.91957	27.681	27.554	60.487	60.698	109.7	104.79
13	8.215	1.855	22.635	22.4	0.55121	23.925	23.647	86.259	86.644	86.598	86.48699	27.684	27.598	60.681	60.807	106.59	110.39
14	8.215	1.8556	22.102	21.255	0.54978	23.925	23.667	86.07	86.644	86.992	86.6867	27.658	27.554	60.598	60.797	104.95	104.87
15	8.215	1.8545	23.019	22.847	0.55121	23.925	23.647	86.07	86.644	86.992	86.6867	27.658	27.598	60.598	60.795	109.29	112.74
16	8.215	1.8595	22.407	21.998	0.54978	23.999	23.667	85.981	86.451	86.598	86.28	27.658	27.565	60.472	60.642	106.16	109.25
17	8.215	1.8572	22.407	22.249	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.992	86.30493	27.704	27.619	60.489	60.64	107.51	111.68
18	8.215	1.8705	22.494	22.4	0.54978	23.999	23.667	85.992	86.644	86.684	86.94	27.681	27.586	60.511	60.692	107.17	111.46
19	8.215	1.8719	22.486	21.711	0.54978	23.999	23.667	85.981	86.259	86.598	86.226	27.704	27.619	60.985	60.951	109.02	109.15
20	8.215	1.8722	22.259	22.548	0.54978	23.925	23.667	86.259	86.451	86.245	86.91959	27.681	27.554	60.486	60.687	106.46	111.29
21	8.215	1.8714	22.719	21.407	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.259	86.245	86.91939	27.681	27.57	60.982	60.952	108.48	108.32
22	8.215	1.8617	22.935	21.274	0.54978	23.925	23.667	86.07	86.644	86.684	86.465	27.684	27.554	60.668	60.895	108.09	104.74
23	8.215	1.8646	22.792	21.867	0.54978	23.999	23.667	85.981	86.451	86.245	86.9299	27.704	27.602	60.591	60.596	109.59	109.59
24	8.215	1.8684	22.486	21.867	0.55121	23.999	23.667	86.07	86.259	86.598	86.299	27.681	27.602	60.46	60.698	107.22	108.94
25	8.215	1.8909	22.784	21.867	0.54978	23.999	23.647	86.07	86.451	86.598	86.959	27.658	27.554	60.596	60.791	107.84	108.99
26	8.215	1.8908	21.5	21.867	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.992	86.30493	27.681	27.586	60.475	60.657	102.5	108.87
27	8.215	1.891	22.494	22.015	0.54978	23.999	23.667	86.259	86.259	86.992	86.30393	27.658	27.586	60.486	60.655	106.55	108.61
28	8.215	1.8925	22.937	21.997	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.259	86.245	86.91939	27.704	27.586	60.95	60.949	107.57	106.48
29	8.215	1.8998	22.486	22.992	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.987	86.15999	27.681	27.602	60.99	60.908	107.45	112.22
30	8.215	1.8995	22.102	22.555	0.55121	23.999	23.667	85.981	86.644	86.598	86.95499	27.704	27.586	60.519	60.706	109.95	112.21
31	8.215	1.8976	22.486	21.109	0.55121	23.999	23.667	86.07	86.259	86.992	86.24099	27.658	27.522	60.416	60.616	106.24	102.9
32	8.215	1.9	22.635	22.4	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.245	86.25593	27.681	27.554	60.426	60.614	107.99	110.12
33	8.215	1.9027	22.935	22.155	0.54978	23.999	23.667	86.259	86.898	86.245	86.44799	27.658	27.598	60.65	60.924	109.89	109.7
34	8.215	1.905	22.407	21.997	0.55121	23.959	23.667	86.07	86.898	86.919	86.24099	27.658	27.57	60.416	60.601	105.87	105.89
35	8.215	1.9115	22.719	22.705	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.245	86.25593	27.704	27.602	60.414	60.6	109.06	119.61
36	8.215	1.9111	22.259	21.117	0.54978	23.999	23.667	85.981	86.644	86.992	86.30567	27.681	27.586	60.476	60.648	106.11	104.61
37	8.215	1.9119	22.929	22.595	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.259	86.992	86.24099	27.684	27.57	60.495	60.601	109.19	111.94
38	8.215	1.9187	22.407	22.172	0.55121	23.999	23.667	86.07	86.451	86.992	86.30499	27.658	27.554	60.487	60.678	109.14	108.46
39	8.215	1.9155	22.102	21.998	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.259	86.245	86.91939	27.658	27.586	60.374	60.548	104.89	108.48
40	8.215	1.9186	22.084	21.875	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.451	86.598	86.959	27.658	27.554	60.529	60.722	104.2	107.9
41	8.215	1.9184	23.019	21.998	0.54978	23.999	23.667	85.981	86.451	86.992	86.24199	27.658	27.57	60.424	60.602	108.12	108.87
42	8.215	1.9212	22.102	22.249	0.54978	23.999	23.667	85.992	86.451	86.992	86.17999	27.658	27.586	60.581	60.591	104.91	110.87
43	8.215	1.9226	22.824	22.627	0.54978	23.999	23.667	86.259	86.451	86.598	86.476	27.658	27.598	60.598	60.789	104.19	111.02
44	8.215	1.9268	22.251	22.249	0.54978	23.925	23.667	86.07	86.451	86.992	86.30499	27.684	27.586	60.506	60.657	105.09	109.4
45	8.215	1.9282	22.635	20.812	0.54978	23.999	23.667	86.07	86.259	86.245	86.91939	27.658	27.554	60.374	60.56	107.42	107.42
46	8.215	1.9301	22.935	22.595	0.55121	23.999	23.667	86.259	86.259	86.245	86.25499	27.684	27.554	60.448	60.628	108.02	108.02
47	8.215	1.9306	22.935	22.249	0.55121	23.925	23.667	86.644	86.992	86.992	86.49167	27.658	27.598	60.621	60.808	108.9	108.9

준비

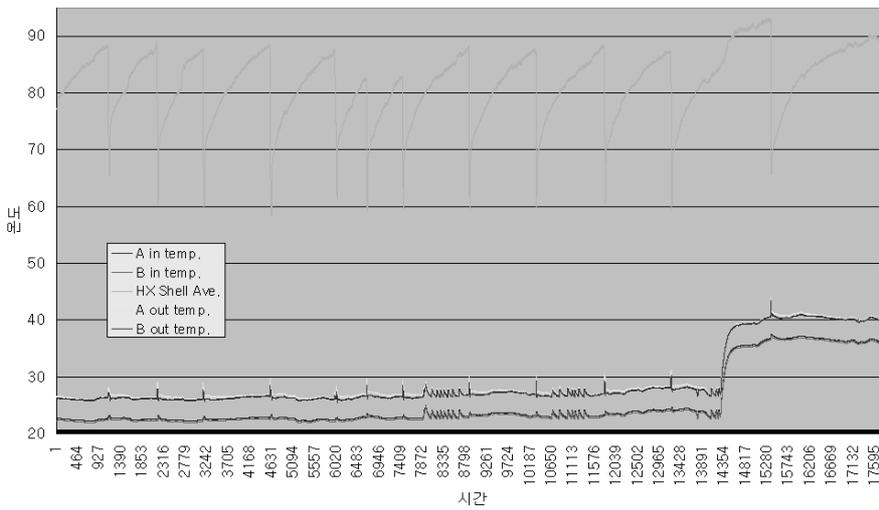
그림 4.8 모델복수기 모니터링 프로그램 취득 데이터

그림 4.7에 성능실험장치의 모니터링 화면을 나타내었고, 이를 통해 수집된 데이터인 "*.dat"를 "*.xls"형식으로 그림 4.8과 같이 변경하고 그래프를 작성하여 성능실험장치의 상태를 분석하였다. 작성된 그래프 중 그림 4.9는 HX(열교환기)온도와 냉각수 온도의 관계를 파악하기 위한 차트인데, 각 곡선중의 급격한 상승 및 하강 곡선은 진공도를 조정하기 위하여 진공펌프를 가동하였을 때 셀측 압력이 낮아지므로 증발온도가 하강하여 셀측 수증기 온도가 하강했을 때 취득된 데이터이다. (1)과 (2)로 나눈

것은 엑셀 상에서 차트표현의 제한으로 인하여 나누었다.

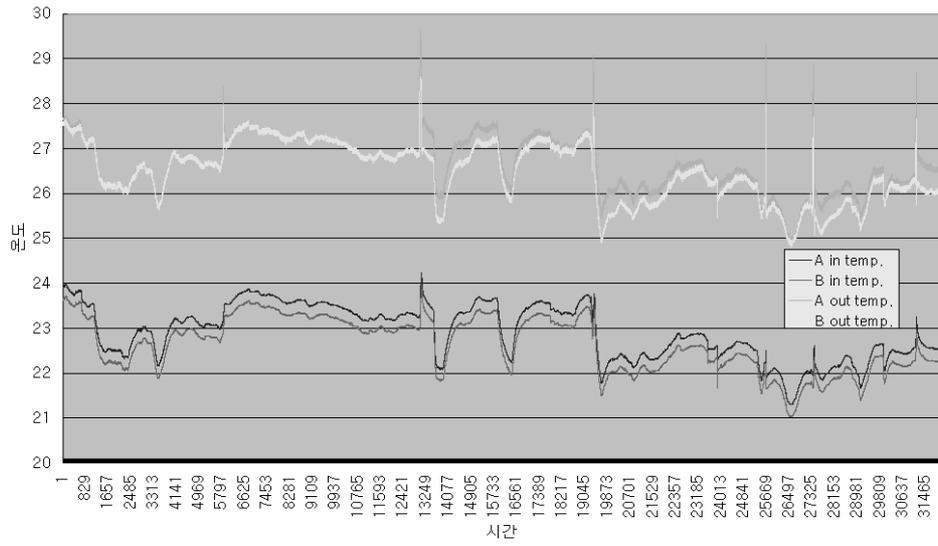


(1)

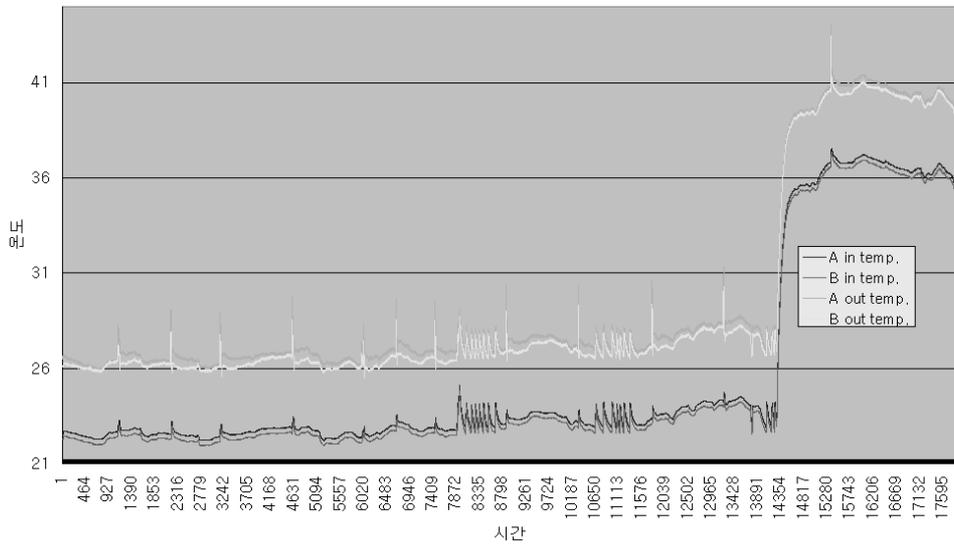


(2)

그림 4.9 모델복수기 1차실험 HX 온도 및 입·출구 수온



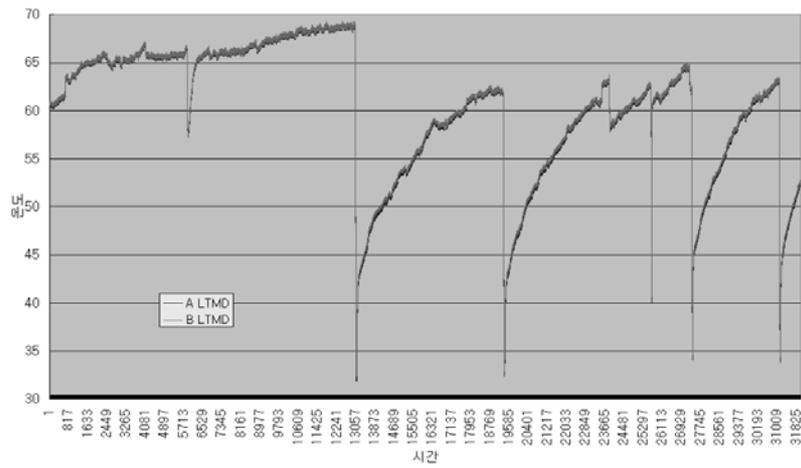
(1)



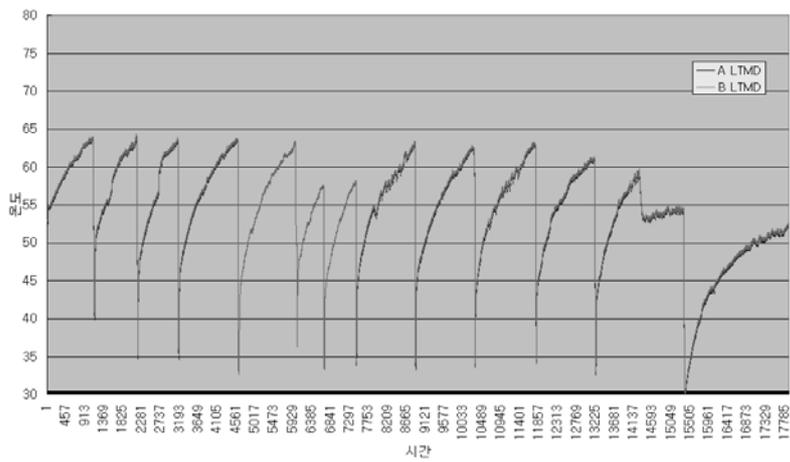
(2)

그림 4.10 모델복수기 1차 실험 입·출구 수온

그림 4.10은 A, B 튜브냉각수 온도 관계를 파악하기 위한 차트인데, 마지막 부분의 갑작스런 상승곡선은 냉각타워 동작 온도를 40°C에 설정한 후 취득된 데이터이다.



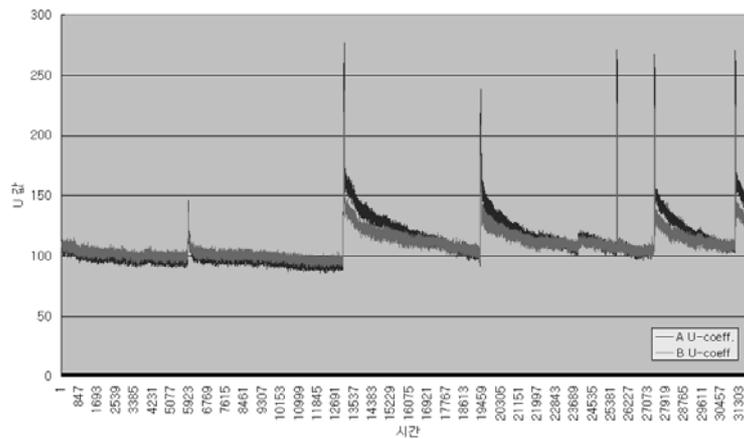
(1)



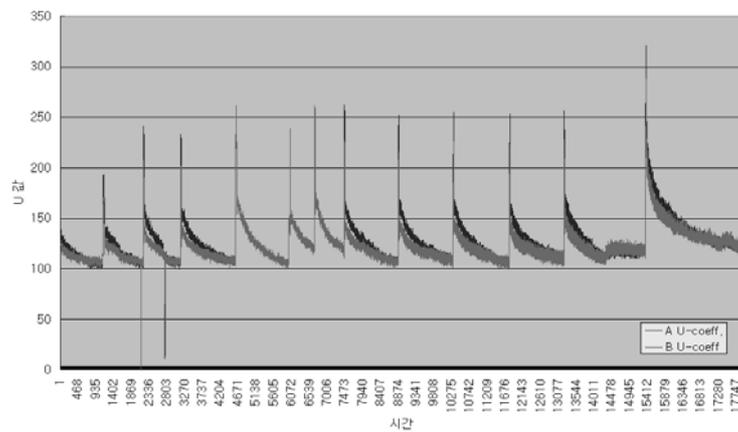
(2)

그림 4.11 모델복수기 1차실험 대수평균온도차

그림 4.11은 A, B 튜브 냉각수의 대수평균온도차를 구하여 그래프로 나타낸 것으로 파악하기 힘들었던 파울링에 의한 온도차이를 확인하기 위한 차트인데, 본 실험에서 부수적으로 장착한 초음파 파울링 저감장치를 부착함으로써 인해 시간에 따라 미세하게 간격이 벌어짐을 알 수 있었다.



(1)



(2)

그림 4.12 A & B Tube U-coefficient

그림 4.12는 A, B 튜브 각각 파울링에 의한 U값의 감소를 확인하기 위한 차트인데, 시간이 지남에 따라 파울링 저감장치를 장착하지 않은 B 튜브의 U값이 더 감소하였음을 알 수 있었다.

성능실험장치인 모델복수기의 전체적으로 수집된 데이터를 분석하여 대수평균온도차(LTMD)는 시간이 경과할수록 하강하는 경향을 알 수 있었고, U-Coefficient는 시간이 경과할수록 수온의 상승과 관련하여 상승하는 경향을 나타내었다. 하지만, 셀측 온도변화로 일정계수의 오염도 계산이 어려워 진단장치와의 데이터를 정량적으로 비교하는 것은 힘든 것으로 판단되었다.

(2) 파울링 진단장치 모니터링 데이터

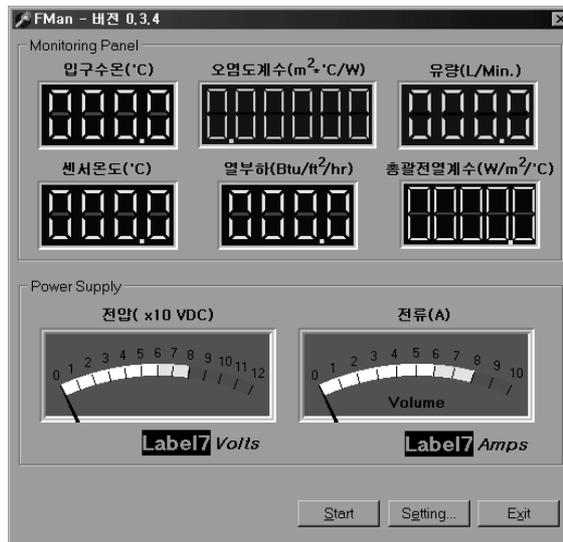


그림 4.13 파울링 진단장치 모니터링 프로그램 인터페이스

	A	B	C	D	E	F	G
1	입구수온	센서온도	오염도	유량	전압	전류	시각
2	23.2	0	11.2	49.79	2.87	01-12-03 18:52:04	
3	23.2	0	11.3	49.79	2.87	01-12-03 18:51:04	
4	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:50:04	
5	23.2	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:49:04	
6	23.2	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:48:04	
7	23.2	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:47:04	
8	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:45:04	
9	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:44:04	
10	23.2	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:43:05	
11	23.2	0	11.3	49.79	2.87	01-12-03 18:42:04	
12	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:41:04	
13	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:40:04	
14	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:39:04	
15	23.2	0	11.2	49.79	2.87	01-12-03 18:38:05	
16	23.2	0	11.3	49.78	2.87	01-12-03 18:37:04	
17	23.1	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:35:05	
18	23.2	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:34:04	
19	23.1	0	11.2	49.78	2.87	01-12-03 18:33:05	

그림 4.14 모니터링 데이터

1차실험 모니터링 프로그램이 최종으로 완성된 시기가 실험 중반에 이루어짐으로 초기 데이터가 존재하지 않아 정상동작의 여부만 확인할 수 있었다. 다만, 추정치로 초기값 입력 후 경향 파악을 수행하여 일부구간의 데이터를 분석한 결과 추정치 설정으로 파악하여도 오염도계수가 모델복수기의 모니터링 데이터와 마찬가지로 상승폭을 나타내었고 일정 수온으로 유지하였을때 오염도 계수 계산의 안정화가 이루어지는 것을 확인하였다.

아. 실험종료 후 파울링 부착 경향확인

진단장치 분리 및 배수 후 냉각튜브와 파울링센서를 분리하여 건조를 시키고 냉각튜브 파울링 발생정도와 센서에 부착된 파울링의 양을 육안으

로 확인하고 비교하였다. 냉각튜브내에 부착된 파울링의 양은 그림 4.15와 같이 상당한 양이 부착되었음을 확인하였고, 그림 4.16에 나타난 것과 같이 센서에 부착된 파울링의 양은 백금선이 감긴 부분과 그렇지 않은 부분을 따로 끊어내어 질량비교를 수행하였다.

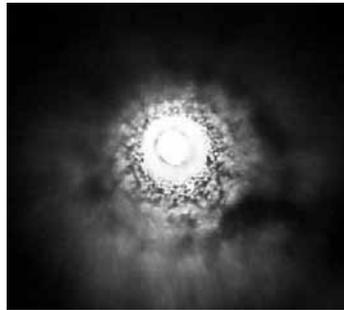


그림 4.15 냉각튜브 내의 파울링(스케일) 부착량 확인

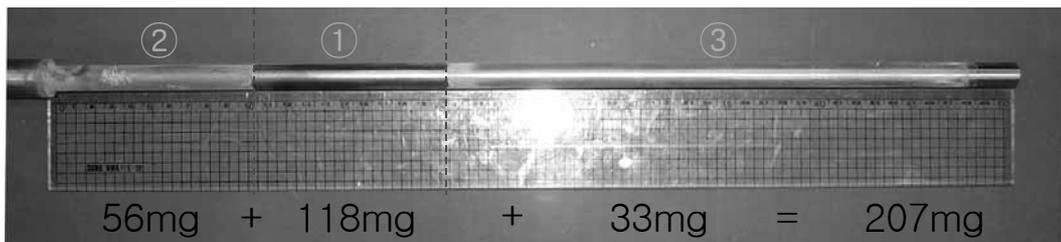


그림 4.16 스케일 일부제거 후 센서 사진

스케일 제거 순서는 ① → ② → ③ 번호순으로 하였으며, 제거된 각 부분의 스케일을 OHP 필름 (1.341g)위에 얹어서 질량을 측정하였다. 측정결과 ①번 부분에 센서 및 열선이 있어 가장 스케일이 많이 부착된 것을 확인하였으며, 측정량은 다음과 같다.

- 스케일 부착된 센서 질량 측정 : 466.524g
- 스케일 제거 후 센서 질량 측정 : 466.285g
- 질량 차 : 239mg

4.1.3 2차 실험

가. 실험준비

(1) 모델복수기 점검

성능실험장치의 각종 측정데이터의 신뢰성 확보를 위해 온도센서를 그림 4.17과 4.18과 같이 점검한 결과 모니터링용 센서는 보정 없이 사용할 정도의 정확성을 보였고 판넬용 센서는 오차가 있으나 인디케이터 설정값의 변경이 불가하여 참조 값으로 사용하도록 하였다.

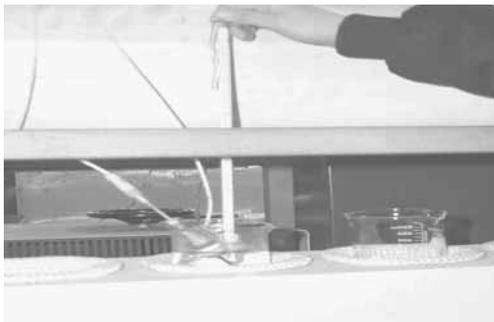


그림 4.17 모니터링용 온도센서 검량



그림 4.18 판넬용 온도센서 검량

HX셀의 진공도를 조정할 때 사용하는 진공펌프는 진공을 조절하기 위해 가동할 경우 수증기도 함께 배출되어 오일내에 수증기 함량이 높아짐에 따라 효율이 떨어지고 펌프의 수명도 단축되므로 사용한 진공 오일을

배출시키고 새로운 오일을 1pint/1shot(0.47L:美/1회)으로 주입하여 2차 실험 진행을 이상 없이 수행할 수 있도록 하였다.

또한, 증발이나 낙수로 인한 부족 용수공급시에 사용하는 용수자동보충선을 수조를 통하여 공급되도록 변경하여 실험인원 부재시에 차질없이 공급될 수 있도록 하였다. 냉각튜브를 새로 교체하면서 HX 셀측 증류수가 부족한 것을 확인하고 보충하였고 기타 전체 설비가 정상운전이 가능한지의 여부를 점검하였다.

(2) 용수의 임의 수질 조정용 약품 준비

스케일 생성 약품을 1차와 동일한 양으로 투입할 수 있도록 준비하였다.

(3) 냉각수 튜브 교체

1차 실험에 사용한 SUS304재질의 튜브를 제거하고 열전도율이 더 좋은 Al-Brass 튜브 2개를 장착하였다.

나. 2차 실험순서/내용

(1) 실험장치 운전(15일)

(가) 스케일생성약품으로 합성수 조제는 발전소대비 약10배의 성분을 투여하였다.

(나) 설비가동 및 종료의 일관성을 유지(운전시간, 조건 등)하였다.

(다) 데이터 정리 및 분석을 통해 수정 및 보완사항을 도출하였다.

(라) 모니터링 장치의 형태를 변경하여 출구 수온측정 센서를 추가로 설치하였고, 그림 4.19와 같이 센서의 냉각수 통과형태를 수직에서 수평으로 변경하였다.

(마) 그림 4.20과 같이 전체실험설비를 준비하고 실험을 수행하였다.



그림 4.19 2차 실험시 진단장치 형태



그림 4.20 2차 실험 장치구성

(2) 성능실험 중 특기사항

- (가) 실험 초기에 모델복수기의 누진/누수로 냉각튜브 조임 작업을 수행하였다. 이를 위해 시스템을 2회 정지시키고, 작업완료 후 즉시 재시작 하였다.
- (나) 불순물 이온약품 투입 전 모델복수기의 초기 U값을 A Tube (159.544 Btu/ft²/hr), B Tube (154.851 Btu/ft²/hr)로 설정하였으며, 진단장치 초기 U값을 93.4 W/cm²/°C로 설정하였다.
- (다) 정전으로 인해 시스템이 정지되었으며, 십분 만에 재가동하여 실험에 지장이 없도록 조치하였다.

다. 2차 실험결과

(1) 모델복수기의 모니터링 데이터

- (가) 1차와 동일한 프로그램으로 데이터를 취득하였으며, “날짜.dat”형식으로 저장하였다.
- (나) 취득한 데이터의 차트작성/분석을 수행하였다.
 - 1차 실험과 동일한 방법으로 분석하였으나 본 실험에서 부수적으로 진행한 파울링 저감실험의 경향을 파악하기 위하여 초반과 중반의 한 주기씩을 비교하였다.
 - 본 실험 중 모델복수기에서 취득한 데이터는 진단장치가 동작하는 환경에서 작용하는 각종 변수 등의 여부를 확인하기 위해서 참조값으로 사용하였다.
 - 1차 실험과 동일한 형태의 실험 결과를 가져왔으나, 중반 오염도와

초반 오염도를 비교하였을 때 일정 구간별 값을 비교하면 오염도가 상당히 증가함을 그림 4.21을 통해 확인하였다.

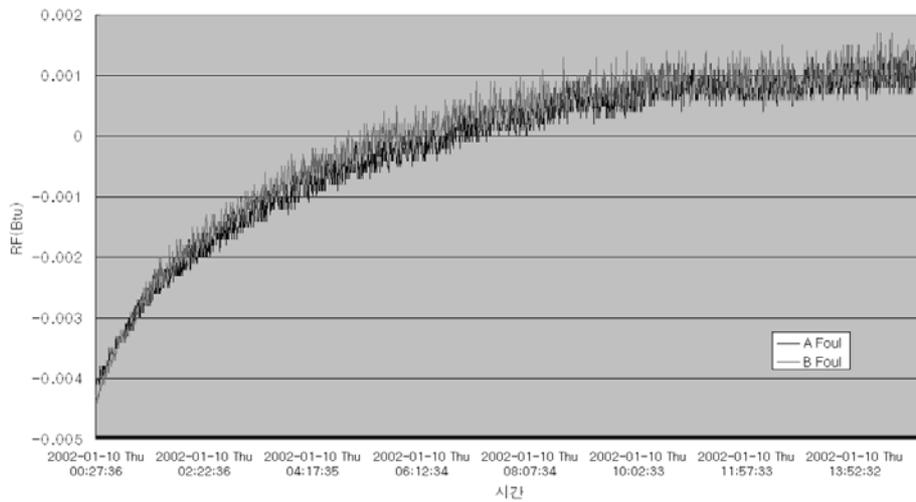


그림 4.21 오염도 차트

(2) 진단장치 모니터링 데이터

(가) 1차와 동일한 프로그램으로 데이터를 취득하였다.

- 그림 4.22에 나타내었듯이 모델복수기에서 저감기를 부착하지 않은 튜브의 오염도 발생 경향과 유사하게 측정된 것을 확인할 수 있었으며, 데이터의 취득이 상당히 안정적으로 취득된 것을 확인할 수 있었다.
- 가운데의 굵은 선은 전체적인 경향을 나타내기 위한 지수선이다.
- 그림 4.23과 같이 센서의 질량을 취득한 결과를 데이터와 비교하여 유사함을 확인하였다.

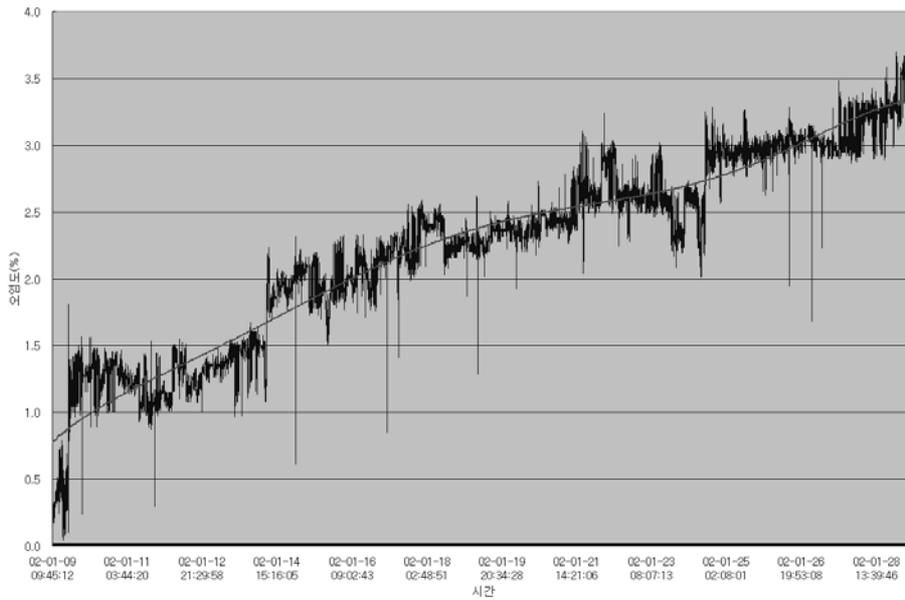


그림 4.22 파울링 진단기의 2차 오염도 차트

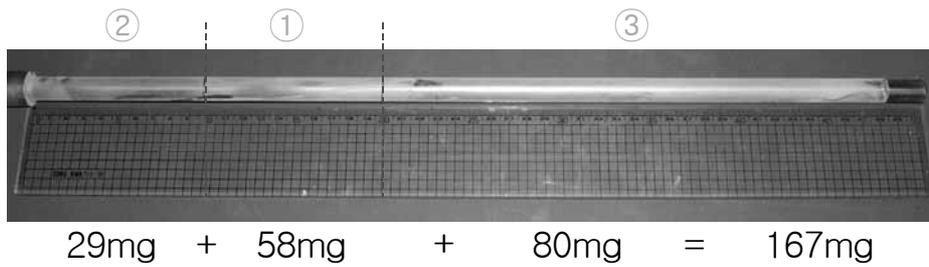


그림 4.23 센서 질량 측정 결과

4.1.4 3차 실험

가. 실험준비

2차 실험 준비와 마찬가지로 모델복수기 점검을 실시하고 진공펌프 정

비로 진공 오일을 1pint/1shot(0.47L:美/1회)으로 교체 주입하였다. 또한, 실험을 실시한 튜브를 발취하고 HX 셀측 증류수의 부족분을 보충하였다. 기타 전체 설비 정상운전 가능여부를 점검하고 순환수의 임의 수질 조정 용 약품을 1차와 동일한 양으로 준비하였다. 냉각수 튜브는 2차 실험과 같은 재질의 Al-Brass 튜브 2개를 장착하고 실험준비를 완료하였다.

나. 3차 실험순서/내용

(1) 실험장치 운전(15일)

- (가) 스케일생성약품으로 합성수 조제는 발전소대비 약10배의 성분을 투여하였다.
- (나) 설비가동 및 종료의 일관성을 유지(운전시간, 조건 등)하였다.
- (다) 데이터 정리 및 분석을 통해 수정 및 보완사항을 도출하였다.
- (마) 전체 실험 장치를 가동하고 실험을 수행하였다.



그림 4.24 3차 실험 장치 구성

(2) 성능시험중 특기사항

실험 중반 이후에 과열로 인한 히터 전원 차단으로 냉각 후 즉시 재 시작하여 실험진행에 큰 지장이 없도록 하였다. 다만, 순환수의 온도가 다소 떨어짐으로 실험 중반에 정상적인 오염도를 측정하지 못하였으나 초반과 비교하여 중반의 데이터를 정상적인 환경에서 측정하였으므로 결과분석에서 문제가 없었다.

다. 3차 실험결과

(1) 모델복수기 모니터링 데이터

(가) 2차와 동일한 프로그램으로 데이터를 취득하였으며, “날짜.dat” 형식으로 저장하였다.

(나) 취득한 데이터의 차트작성/분석을 수행하였다.

- 3차실험결과의 그래프 분석에서 초반·중반·종반의 평균값을 취하여 그림 4.25에 나타낸 바와 같이 전체적인 변화를 파악하였다.

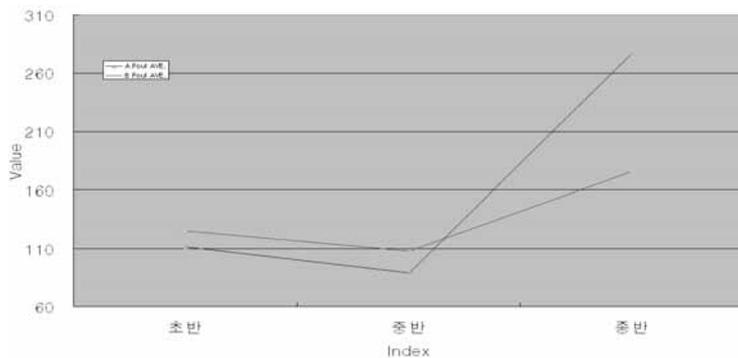


그림 4.25 모델복수기의 초·중·종반 오염도 평균 차트

(2) 파울링 실험장치 모니터링 데이터

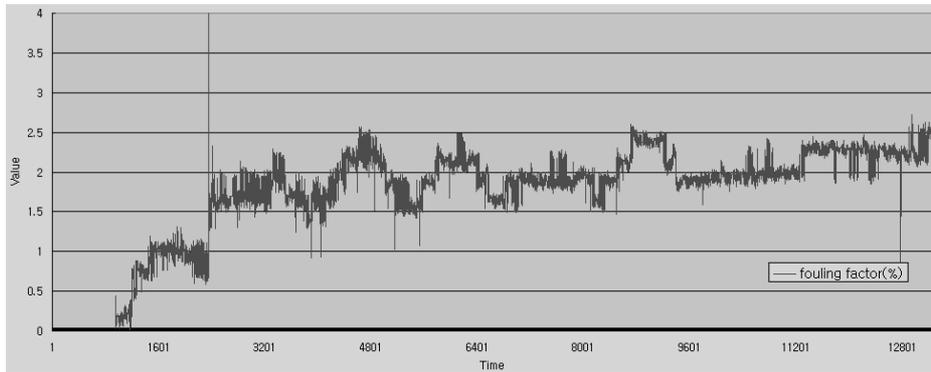


그림 4.26 파울링 실험장치 3차 오염도 데이터(전반)

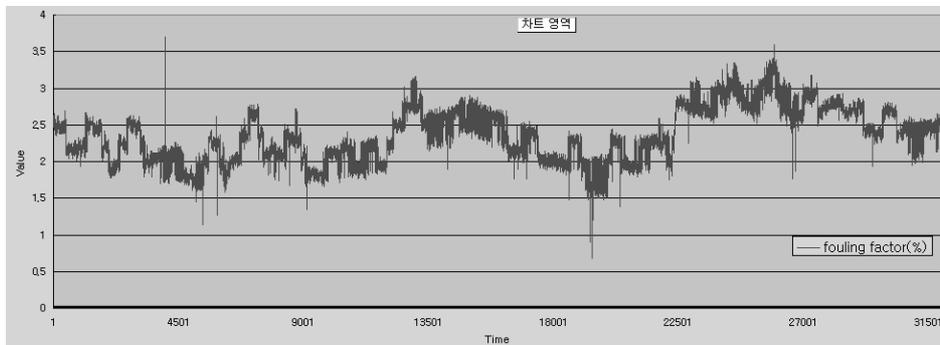


그림 4.27 파울링 실험장치 3차 오염도 데이터(후반)

- 파울링 실험장치의 모니터링 데이터를 그림 4.26과 4.27에 나타내었 으며, 전체적인 오염도의 변화는 모델복수기에서 취득한 데이터보다 좀 더 민감하게 측정되는 경향을 나타내었다.

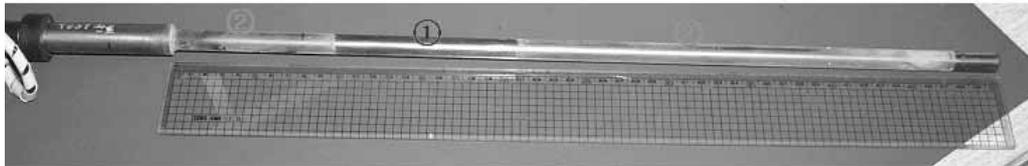
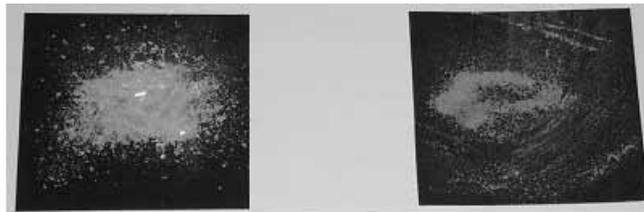


그림 4.28 센서에 부착된 스케일의 사진



① 0.235 g

② 0.058 g

그림 4.29 부착된 스케일을 부분별로 떼어낸 결과

- 그림 4.28와 4.29에서 확인할 수 있듯이 부착된 스케일의 질량 확인 결과 2차 실험과 유사한 경향으로 스케일이 부착되었음을 확인하였다.

4.1.5 4차 실험

가. 실험준비

지난 실험들과 마찬가지로 모델복수기 점검을 실시하여 진공펌프 오일 교체와 HX 셀측 증류수를 보충하고 기타 전체 설비의 배관 및 장비의 정상운전 가능여부를 점검하였다.

또한, 용수의 임의 수질 조정용 약품을 1차와 동일한 양으로 준비하고 냉각수 튜브를 SUS304재질의 튜브 2개로 교체하여 실험진행에 차질이 없도록 하였다.

나. 4차 실험순서/내용

(1) 파울링 진단 및 저감 4차 실험 내용

(가) 스케일생성약품으로 합성수 조제는 발전소대비 약10배의 성분을 투입하였다.

(나) 설비가동 및 종료의 일관성을 유지(운전시간, 조건 등)하였다.

(다) 데이터 정리 및 분석을 통해 수정 및 보완사항 도출하였다.

(라) 그림 4.30에서 확인할 수 있듯이 센서부와 제어부를 분리하는 등의 보완된 시제품을 장착하여 실험하였다.



그림 4.30 4차 실험 장치 구성

(2) 성능실험 중 특기사항

기존 진단기의 문제점과 성능향상을 위해 수정·보완한 제품을 장착하여 실험을 진행하였다. 그림 4.30과 4.31에서 확인할 수 있듯이 센서부와 제어부를 분리하여 장착할 수 있도록 제작하였고, 시각적인면과

효율적인면을 고려한 디자인을 적용하여 기존센서의 길이를 최소화하고 공간축소 및 보수가 용이하도록 제작한 시제품을 최종성능실험에 적용하였다.



그림 4.31 4차실험에 적용한 최종 시제품

다. 4차 실험결과

(1) 모델복수기 모니터링 데이터

(가) 3차와 동일한 프로그램으로 데이터를 취득하였으며, “날짜.dat”형식으로 저장하였다.

(나) 취득한 데이터의 차트작성 및 분석을 수행하였으며, 3차 실험과 동일한 방법으로 분석하였다.

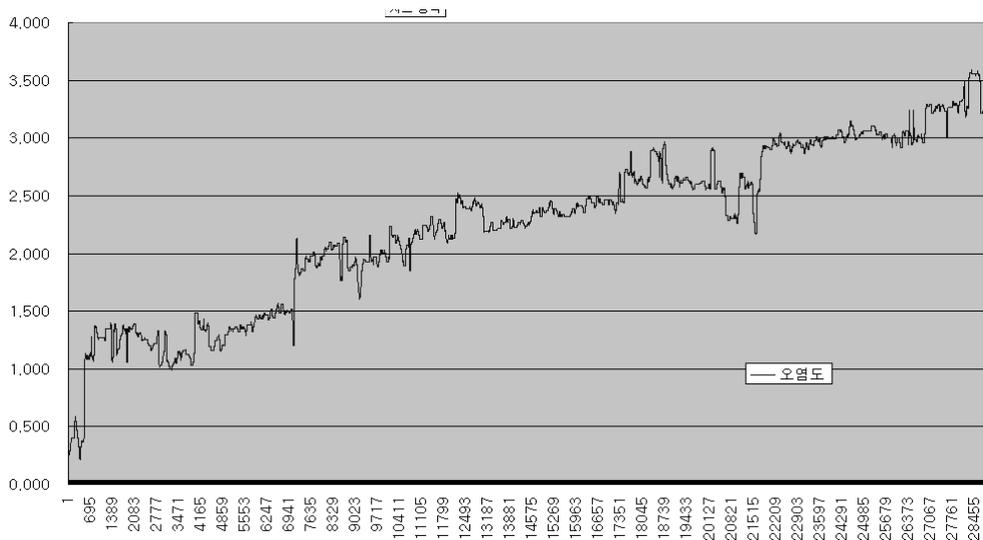


그림 4.32 진단장치 4차 실험결과

- 그림 4.32에 나타난 그래프는 수정·보완한 진단장치의 결과로서 기존의 데이터보다 간섭잡음이 상당히 제거되어 나타난 것을 확인할 수 있었다.

4.2 필드테스트

본 논문을 통해 제안한 파울링 진단기술의 성능실험을 마친 시제품을 실제 현장에 장착하고 실험을 진행하여 실제현장 적용가능여부를 판단하였다. 현장에 직접 장착하여 실험을 하기 위한 시제품은 성능실험을 수행한 제품을 별도의 수정 없이 적용하여 진행하였다.

진단장치를 현장에 설치한 블록다이아그램은 그림 4.33에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 FS01이 파울링 측정 센서이고 TS01은 비전열면

에 부착되는 파울링의 육안관찰을 위해 추가로 설치한 부분이다.

필드테스트 수행을 위해 시제품을 장착한 장면은 그림 4.34에 나타내었다. 그림에 보이는 것처럼 측정하려는 부분과 직접 연결한 것이 아니고 취수(side-stream)방식으로 설치하여 실험을 진행하였다. 설치 현장은 P 社の 현장가운데 스프레이 냉각수에서 발생하는 파울링의 양을 측정하기 위한 실험이었다. 실험은 실제 운전조건으로 변경 없이 진행하였으며 파울링 진단기의 조건 또한 측정하고자 하는 부분의 조건과 동일하게 설정하여 실험을 진행하였다.

그림 4.35는 필드테스트를 27일간 수행한 결과를 그래프로 나타낸 것으로 파울링 실험장치로 측정한 데이터 값인 청결도와 오염도를 동시에 저장한 값인데, 외란이 심한 현장에서도 정확하고 선형적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었고, 새로운 주기가 시작하여 계속적으로 진행하여도 이상이 없는 것이 확인되었다.

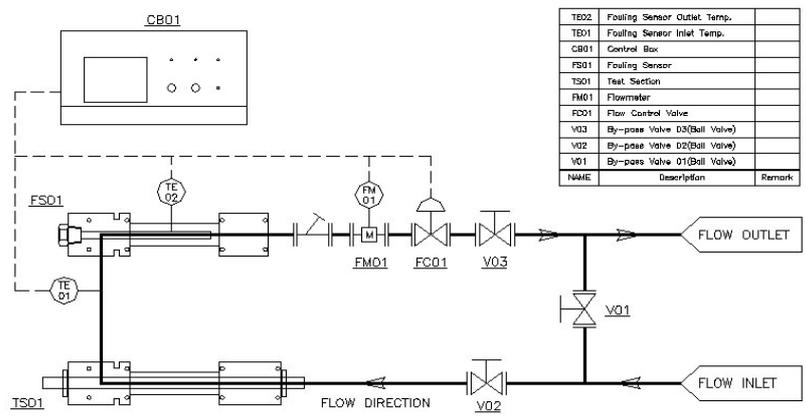


그림 4.33 파울링 실험장치의 필드테스트 블록다이어그램

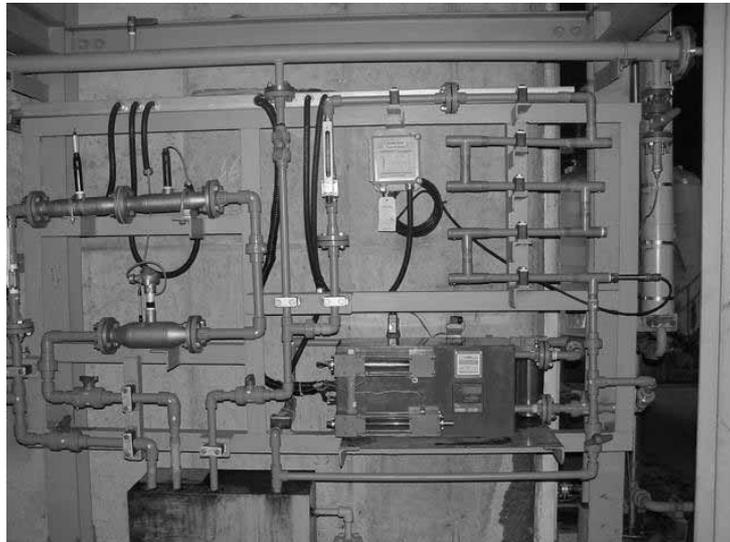


그림 4.34 파울링 실험장치의 필드테스트 장면

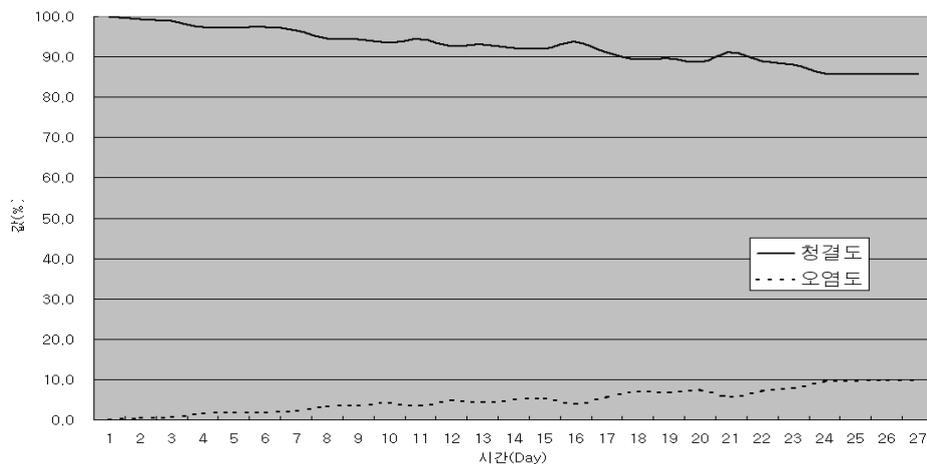


그림 4.35 파울링 실험장치의 필드테스트 결과 그래프

4.3 성능평가

본 논문에서 제안한 기술의 성능평가를 위해 성능실험 장치를 꾸미고 여러 차례 실제와 유사한 조건으로 실험을 한 결과 전반적으로 기대한 만큼의 성능이 입증되었다. 이는 상기의 성능실험 결과를 분석하여 얻어낸 것으로, 기존전열계수를 이용한 진단기술을 개선하여 실험에 적용한 장치가 모델복수기에서 측정되는 데이터 값과 유사하나 좀더 정밀하고 안정된 값의 분포를 보였다. 이는 전열면 전체에서 스케일의 부착량에 대하여 변화하는 온도 값을 정확하게 측정함으로써 얻어진 값으로 판단된다.

또한, 필드테스트를 위해 P社의 제철설비 중 스프레이 냉각수에서 발생하는 파울링을 측정하는 현장에 적용하였다. 적용한 장치는 최종성능실험을 마친 제품을 수정 없이 현장에 장착한 것으로 지속적인 실험을 진행한 결과 열악한 환경에도 불구하고 선형적이고 안정적인 데이터를 취득할 수 있었다.

제 5 장 결 론

본 논문은 주로 산업용 열교환설비에서 발생하는 파울링을 전열계수를 이용하여 정확히 진단하는 기술에 대한 검토가 이루어졌다. 파울링의 정확한 진단을 위해서 기존기술의 분석을 수행하고 각 기술의 장단점을 파악하였으며, 이를 토대로 기존의 진단 기술보다 더욱 정확하고 안정성 있는 기술을 개발하였다.

먼저 파울링이 발생하는 현상과 원인을 면밀히 분석하고 실제 현장에서 제기되는 문제점 등을 수집하여 기술개발의 목표로 삼았다. 기존기술들의 분석에서 나타났던 단일지점의 측정 포인트를 이용하여 진단하면서 생기는 오차를 측정 범위 및 지점을 늘리면서 효율을 증대시키는 방향으로 연구를 진행하였다. 또한 전열계수를 이용한 방법에서 전열면 전체의 온도 변화를 민감하고 정확하게 측정할 수 있도록 개선하였으며, 소형화 및 최적설계를 통하여 다양한 현장에 바로 적용할 수 있는 기술을 얻을 수 있었다. 이로써, 본 논문을 통해 전열계수를 이용한 파울링 진단기술을 기존기술보다 더욱 정확하고 신뢰성을 높이는 결과를 가져올 수 있게 되었다. 더욱이 현장적용을 바로 수행함에 따라서 기술의 성능 및 완성도는 기존기술과 비교하여 더욱 진보한 기술력으로 인정받을 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구방향으로는 정밀한 파울링 측정을 통해 얻어지는 데이터를 이용하여 전체 설비를 효율적으로 제어하기 위한 기술과 상온 및 기타의 유체에서도 측정이 가능한 기술을 연구하여 파울링으로 인해 발생하는 여러

가지의 문제를 해결하기 위한 기반을 마련해야 할 것이다. 이를 위해선 각기 성격이 다른 현장에서의 기술적용과 새로운 방법의 접근을 통한 상온수의 파울링 측정기술을 고찰해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 이윤표 외 3인, “순환유동층 열교환기 내의 화울링 저감 및 열전달 향상기구”, 공기조화·냉동공학학회지, 제7권, 제3호, pp.450-460, 1995.
- [2] 이윤표, 이신표, “열교환기 Fouling의 저감 대책”, 대한기계학회지, 제35권, 제9호, pp.836-847, 1995.
- [3] 이윤표 외 3인, “순환유동층 열교환기를 이용한 Fouling 저감기술 개발 및 고농도 난분해성 폐수처리장치 개발”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B pp.212-217, 1998.
- [4] McCoy, J.W. The Chemical Treatment of Cooling Water, Chemical Publishing Co., N.Y., pp.31-46 , 1984.
- [5] NACE, Standard Recommended Practice On-line Monitoring of Cooling Water, RP0189-95, pp.22-57 , 1995.
- [6] EPRI, "Condenser Microbiofouling Control Handbook", Final Report, TR-102507, 1993
- [7] J. C. Cowan & D. J. Weintritt, Water-Formed Scale Deposits, Gulf Publishing Co., pp.1-39, 1976.
- [8] Special Report, "Cooling-Water treatment for control of scaling, fouling, corrosion.", Power, 1984
- [9] Abdullah A. Abu-Al-Saud, "The Effect of Copolymer and Iron on the Fouling Characteristics of Cooling Tower Water Containing Corrosion Inhibitors.", UMI. pp.4-21, 1988.

- [10] Richard C. Schwarz, "The Operation of Auxiliary Heat Exchangers for Optimum Useful Life and Efficiency", ASME/IEEE Power Generation Conference Philadelphia, pp.25-29, 1988.
- [11] H. Sanatgar & E. F. C. Somerscales, "Account for Fouling in Heat Exchanger Design.", Chemical Engineering Progress, pp.53-58, 1991.
- [12] Anurag P.Mairal & Alan R. Greenberg, William B. Krantz, "Investigation of membrane fouling and cleaning using ultrasonic time-domain reflectometry", Desalination, Elsevier, pp.45-pp.60, 2000.
- [13] Anurag P.Mairal, et al., "Real-time measurement of inorganic fouling of RO desalination membranes using ultrasonic time-domain reflectometry.", Journal of Membrane Science 159, pp.185-196, 1999.
- [14] Fred R. Rollins, Jr., et al., "Ultrasonic detection of calcium sulfate scale on metal surfaces.", U.S. Dept. of Interior, Office of Saline Water, Research and Development Progress Report No.444, pp.39, 1969.
- [15] Hans-Curt Flemming, et al., "Monitoring of fouling and biofouling in technical systems.", Wat. Sci. Tech. Vol.38, No.8-9, pp.291-298, 1998.
- [16] James M. Chenoweth, "Final Report of the HTRI/TEMA Joint Committee to Review the Fouling Section of the TEMA Standards",

- Heat transfer engineering, Vol.11, No.1 pp.73-107. 1990.
- [17] A. M. Konigs, "Guide Values for the Fouling Resistances of Cooling Water with Different Types of Treatment for Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers.", Heat Transfer Engineering, Vol.10, No.4, pp.54-61, 1989.
- [18] 김민수, 윤석범, "직렬 관군에서 지열수 스케일의 파울링 영향에 관한 연구.", 한국박용기관학회지, 제23권, 제2호, pp.131-139, 1999.
- [19] 이승진 외 2인, "발전소 복수기의 Fouling Factor 및 피막특성에 관한 연구.", 한국재료학회지, Vol.7, No.9, pp.750-757, 1997.
- [20] Chadwick, Bruce L., "Development and application of an on-line fouling guage for brown coal power stations.", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.38, Issue 3, pp.1159-1162, 1999.
- [21] EPRI, "Service Water heat Exchanger Testing Guidelines", Final Report, TR-107397, 1998.
- [22] EPRI, "Heat Exchanger Performance Monitoring Guidelines", Final Report, NP-7552, 1991.
- [23] NACE, "Test Method : Cooling Water Test Units Incorporating Heat Transfer Surfaces.", Standard TM-02-86, Item No.53058, 1986.