

발전소 복수기의 Fouling Factor 및 피막특성에 관한 연구

이승진 · 김장순* · 이성호*

한국전력공사 화력연구소원

*전력연구원 수화력발전연구실

A Study on the Fouling Factor and the Formation of Surface Film in the Power Plant Condenser

Sung-Jin Lee, Jang-Soon Kim*, Sung-Ho Lee*

Korea Electric Power Corporation, Thermal Power Plant Training Center

*Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

(1997년 5월 29일 받음, 1997년 7월 21일 최종수정본 받음.)

초 록 발전소 복수기의 열전달 표면에 형성되는 불순물의 fouling factor와 튜브내면에 부착되는 피막의 두께변화를 측정하여 복수기 관리에 관한 지침을 제시하고자 모델복수기를 이용하여 60일간 현장실험을 실시하였다. 복수기의 fouling factor는 시험 후 약 40일 이후부터 큰 폭으로 증가하였다. 발전용 복수기의 관정결도가 85~90%로 설계되므로 설계치를 유지하기 위해서는 약 40일 마다 복수기튜브를 세정하여 관정결도를 향상시켜야 할 것으로 판단되었다. 또한 동합금 재질을 사용하는 복수기튜브는 설치 후 보호피막이 형성되는 초기 30일 동안의 방식운전이 복수기튜브 건전성 확보에 중요한 인자임을 유추할 수 있었다.

Abstract The fouling factor of heat transfer surface and the thickness variation of protective film formed on the surface of tube in the power plant condenser were measured for 60 days with a model condenser for giving the standard of condenser control. After 40 days of testing, the fouling factor of the condenser increased greatly. According to the results, it is suggested that the cleaning of condenser tube has to be conducted every 40 days because the cleanliness factor of condenser in power plant is designed by 85~90%. Also the life of copper alloy condenser tube mostly depended on the first 30 days operation period during which protective surface films were performed.

1. 서 론

화력발전소가 랭킨사이클(rankine cycle)을 사용하여 대용량 증기원동기를 실용화할 수 있었던 것은 복수기를 최대한 이용하였기 때문이다. 저압터빈에서 일을 한 증기는 복수기 튜브 외부로 흐르면서 튜브 내부의 냉각수와 열교환을 통해 응축된다. Fig. 1의 화력발전소 열평형도(heat balance diagram)에서 보는 바와 같이 증기가 응축될 때 냉각수로 이동하는 응축열은 터빈에 공급되는 전체 열량의 약 45~50%에 해당되므로 복수기 성능이 사이클 전체 효율에 미치는 영향은 매우 크다. 복수기는 발전소의 특성과 냉각수 상태 그리고 기후 등과 같은 조건을 고려하여 제작되지만, 효율적으로 관리하지 않으면 적절한 열효율을 기대할 수 없다. 대부분의 발전소 복수기에 사용되는 Al-brass 튜브는 열전달율이 우수하고 가격이 저렴하나 해수와 암모니아에 대한 내식성이 약하다. 복수기 재질은 열전달율이 좋아야 하고 내식성이 우수해야 하므로 최근에 건설되는 발전소 복수기는 Al-brass 복수기튜브의 결점을 보완하기 위해서 Ti를 주로 사용한다.

발전소 주변의 공장 폐수나 생활하수가 유입되면 냉각수 오염이 심화되어 튜브 fouling factor의 증가를 초래하며

따라서 복수기의 적정 진공도 유지를 어렵게 만들고 튜브 부식을 촉진시킨다. 복수기 튜브가 오염되어 열교환 능력이 감소하면 진공도가 저하되어 발전소 열효율이 낮아진다. 그리고, 부식으로 인해 냉각수가 보일러내로 유입되면 보일러 튜브의 과열과 turbine blade의 스케일 퇴적으로 발전소 수명을 단축시킨다. 이러한 fouling factor는 일반적으로 매우 작은 값으로 실제 설계자는 종종 그 영향을 무시하고 있다. 그러나 복수기의 경우, fouling factor 값이 전시스템의 설계값을 바꿔주는 값으로 부각되고 있는데 많은 경우 엔지니어들은 fouling factor와 같은 안전계수를 고려하여 복수기 전열면적을 설계치보다 여유를 주어 설계하는 것으로 불순물에 의한 튜브오염의 영향을 고려하고 있다. 일반적으로 불순물은 “경계면에 퇴적하는 바람직하지 않은 고체퇴적물”로 정의되며 불순물에 대한 연구는 많은 학자들에 의하여 시도되었으나 진전은 별로 없다는 것이 사실이다. 현재까지 밝혀진 바로는 불순물을 감소시키거나 제거하기 위한 정량적인 설계기준은 없는 것으로 알려지고 있다.

본 연구에서는 모델복수기를 제작하고 Al-brass 복수기 튜브를 이용하여 튜브의 여러위치에서의 온도변화와 튜브 내면에 부착되는 피막 두께변화를 관찰하여 복수기튜브 내면의 fouling factor를 측정하였으며 SEM을 이용하여 튜

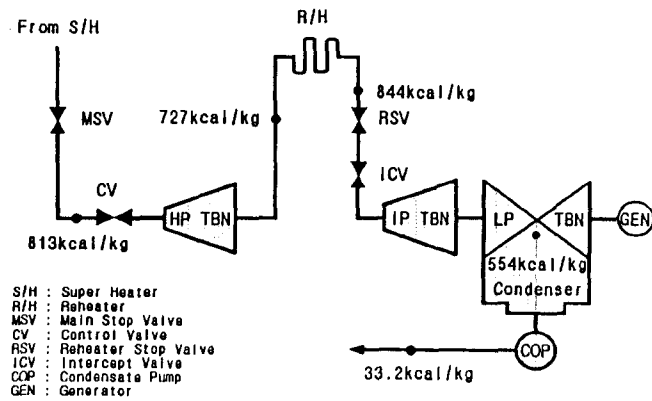


Fig. 1. Heat balance diagram of thermal power plant.

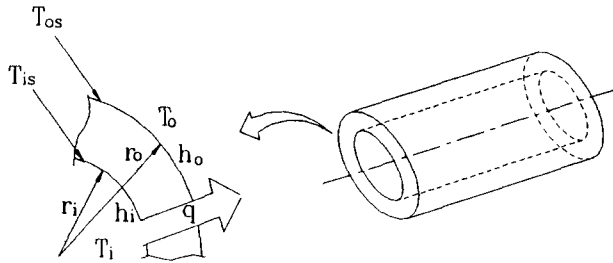


Fig. 2. Temperature distribution for a composite cylindrical wall with convection at the interior and exterior surface.

브 내면에 부착된 피막의 성분을 분석하여 최적의 복수기 튜브 관리 기준을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

1. 복수기 튜브의 fouling factor와 cleanliness factor

관내를 유동하는 유체의 가열과 냉각은 공학에서 가장 중요한 열전달 과정에 속한다. 열교환기의 설계와 해석을 위해서는 관 벽면과 그 내부를 유동하는 유체 사이의 열전달 계수를 알아야 한다. 본 연구의 대상인 복수기 튜브는 원통 파이프로서 발열이 존재하는 원통좌표계의 비정상 3차원 문제에서는 $T = T(\gamma, \phi, z, t)$ 이며 좌표계의 기호는 Fig. 2에 나타나 있다.

따라서, 원통좌표계에서 전도방정식의 일반적인 형태는

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\gamma \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) + \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_c'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

- k : 열전도도
- α : 열확산계수
- γ : 튜브 반지름
- q_c''' : 단위면적당 발생열량

이고, 만약 원통에서 1차원 정상상태이며 발열이 존재하지 않을 때 원통좌표계에 대한 전도방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{d\gamma} \left(\gamma \frac{dT}{d\gamma} \right) = 0 \quad (2)$$

따라서 Fig. 2에 보이는 것처럼 관벽을 통한 반지름방향 열유동에 의해 이 계를 이상화할 수 있다. 원통의 안쪽과 바깥쪽 표면 온도가 각각 T_{is}, T_{os} 이며 반경방향으로 적분후 경계조건

$$\gamma = \gamma_i, T = T_{is} \quad (3)$$

$$\gamma = \gamma_o, T = T_{os}$$

γ_i : 튜브내부 반지름

γ_o : 튜브외부 반지름

T_{is} : 튜브내부 표면온도

T_{os} : 튜브외부 표면온도

을 이용하여 온도분포를 구하면 아래와 같다.

$$\frac{T - T_{is}}{T_{os} - T_{is}} = \frac{\ln \gamma / \gamma_i}{\ln \gamma_o / \gamma_i} \quad (4)$$

원통 내부의 반경방향 열전달량과 바깥쪽 표면과 안쪽 표면을 통한 열전달량은

$$Q = -k \frac{dT}{d\gamma} 2\pi\gamma = -k \frac{C_1}{\gamma} 2\pi\gamma = 2\pi k \frac{T_{is} - T_{os}}{\ln \gamma_o / \gamma_i} = h_o A_o (T_{os} - T_o) = h_i A_i (T_{is} - T_i) \quad (5)$$

Q : 총전달열량

h : 열전달계수

열저항 R과 총합열전달 계수 U

$$R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \gamma_o / \gamma_i}{2\pi k} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (6)$$

$$Q = UA \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{AR} \quad (8)$$

R : 열저항도

U : 총열전달계수

A_i : 튜브내부 표면적

A_o : 튜브외부 표면적

이다. 여기서 A_i 는 원통내부 표면적, A_o 는 원통외부 표면적, 그리고 A는 기준이 되는 면적으로 총합열전달 계수는 기준면에 따라서 달라지는 성질을 가진다. 본 연구에서는 원통의 내면을 기준으로 취급하였다.

$$U_i = \frac{1}{A_i R} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\ln \gamma_o / \gamma_i}{2\pi k} A_i + \frac{A_i}{A_o} h_o} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\ln D_o / D_i}{2k} D_i + \frac{D_i}{D_o} \frac{1}{h_o}} \quad (9)$$

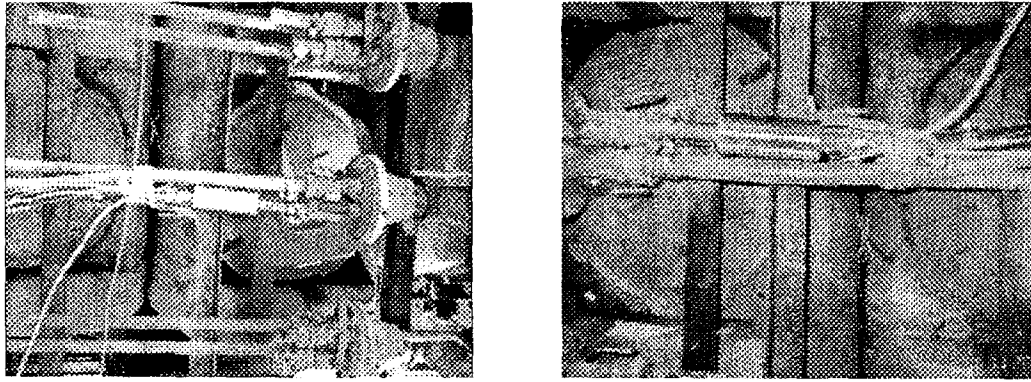


Fig. 3. Fouling meter installation in the condenser model.

D_i : 튜브내경

D_o : 튜브외경

위의 총합열전달 계수는 이상적일 경우에만 한정되며 실제 관내의 열전달 현상을 설명하기 위해서는 누적되는 퇴적물에 의한 영향을 나타내는 fouling factor를 고려해주어야 한다. 열교환기를 사용하면, 열전달 표면에 퇴적물이 축적되어 불결하게 되고, 이로 인하여 열유동 통로에 추가적인 열저항이 발생한다. 이것의 영향은 일반적으로 fouling factor의 형태로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 발전소 복수기 튜브내면에 해수로 인해 발생하는 불순물에 관한 특성을 조사하기 위하여 원통내면의 불순물만을 고려한 다음과 같은 총합열전달 계수를 유도하여 이용하였다.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\ln D_o/D_i}{2k} D_i + \frac{D_i}{D_o} \frac{1}{h_o} + F_i + F_o} \quad (10)$$

F_i : 튜브내부 fouling factor

F_o : 튜브외부 fouling factor

한편 관청결도는 신품의 열전달량에 대한 사용관의 열전달량의 비율로 나타내며

$$CF = (C/C_o) \times 100(\%) \quad (11)$$

CF : 관청결도

C : 사용튜브의 전달열량

C_o : 신티브의 전달열량

일반적으로 피막의 두께가 증가하면 열의 흐름을 방해하기 때문에 fouling factor가 커지고 더불어 관청결도는 저하한다.

2. 모델복수기 실험

화력발전소 냉각수 취수구 입구에 Fig. 3과 같이 모델복수기에 fouling factor 측정용 시편을 설치하여 약 60일간 실험을 실시하였다. 모델복수기는 Fig. 4와 같이 해수를 실험복수기 튜브내부로 순환시키는 360t/h 정도의 자흡입식 원심형 펌프, 운전중 튜브의 막힘을 방지하기 위한 여과장

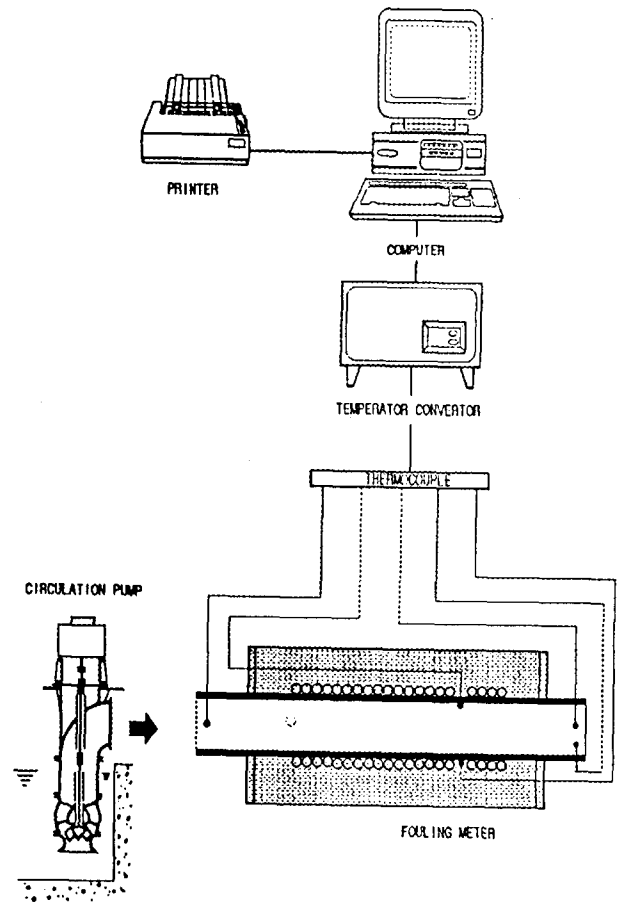


Fig. 4. Schematic diagram of the test apparatus.

치, Al-brass 복수기튜브, 100W 용량의 가열 장치, 온도를 검출하는 다섯개의 K type 열전대, thermocouple converter, 검출된 신호를 저장할 수 있는 컴퓨터, 저장된 자료를 출력할 수 있는 프린터로 구성되어있다. 그리고 복수기 운전시간에 따른 피막 두께를 측정하기 위해서 링 모양 시편을 모델복수기에 설치하여 약 15일 주기로 채취하여 전자현미경으로 두께를 측정하였다. 모델복수기 fouling factor 측정을 위해 Fig. 5와 같이 제작된 fouling meter는 발전소 복수기에 가장 많이 사용되는 Al-brass 튜브를 사용

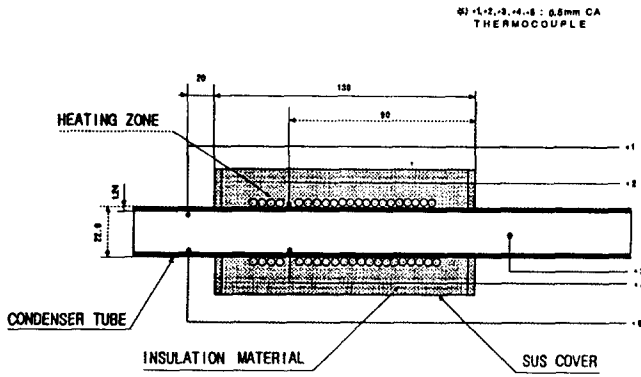


Fig. 5. Manufacturing drawings of fouling meter.

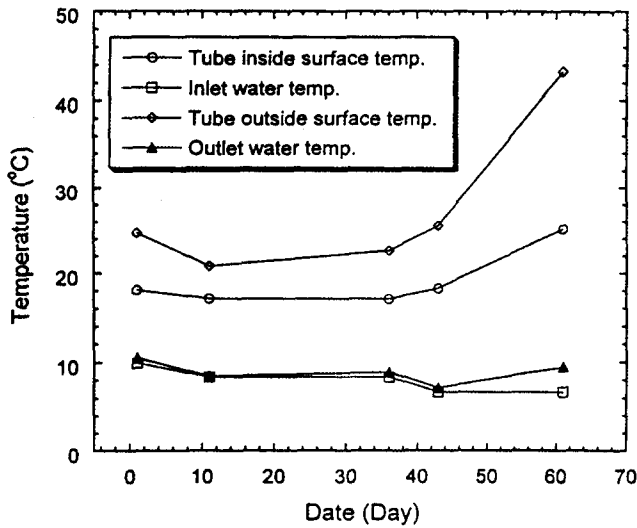


Fig. 6. Tube temperature according to the testing period.

했으며 복수기튜브 표면과 냉각수 입출구에 K type 열전대를 5개 위치에 설치하여 온도변화를 측정하였다. 전기히터를 이용하여 복수기튜브 외부에 100W의 열부하를 일정하게 공급하면서 튜브 내부로 흐르는 해수의 유속을 2.0m/s로 유지하였다. 열의 차단을 위해서 단열재를 사용하였으며 스테인레스 강관으로 보호막을 설치하였다.

3. Fouling Factor 계산

본 연구에서는 복수기튜브 내면의 fouling factor는 튜브 내면과 외면사이의 온도차이를 이용하여 주어진 기하학적 형상에서의 열전달계수를 가정한 후 계산하였다. 즉 식(10)의 h_i 를 가정하고, 식(7)의 ΔT 는 실험으로부터 측정하여 총합 열전달 계수를 구한 후, 식(10)의 fouling factor를 계산하였는데 본 연구에서는 복수기튜브의 내면에 생성된 불순물이 연구대상이므로 fouling factor를 아래와 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$F_i = \frac{1}{U_i} - \left(\frac{1}{h_i} + \ln \frac{D_o D_i}{D_i 2k} \right) \quad (12)$$

Fig. 6은 사용기간에 따른 복수기튜브의 온도변화상태로

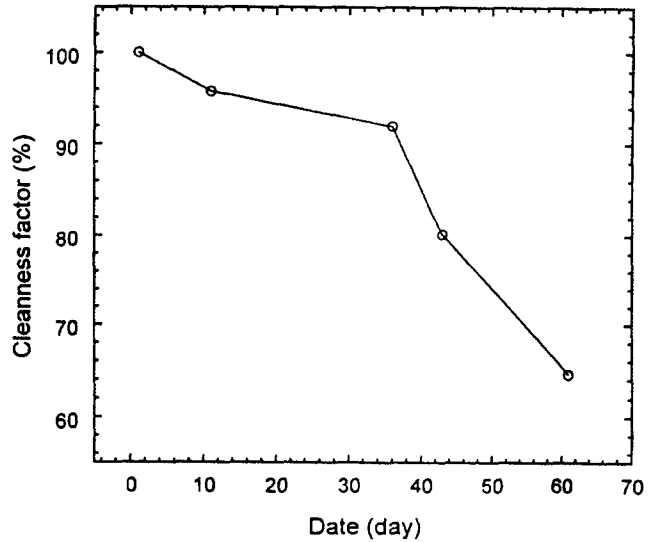


Fig. 7. Tube cleaning factor according to the testing period.

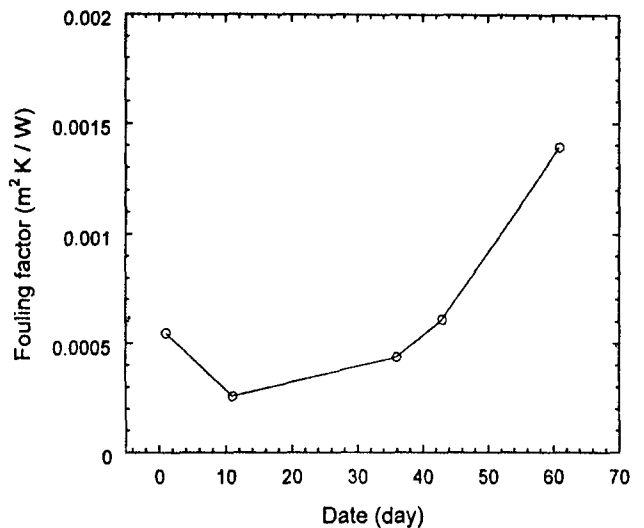
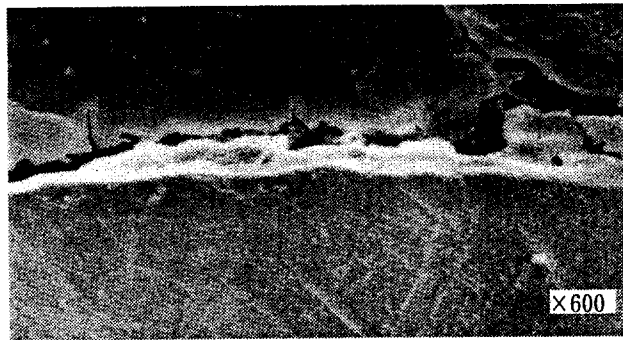


Fig. 8. Fouling factor variation according to the testing period.

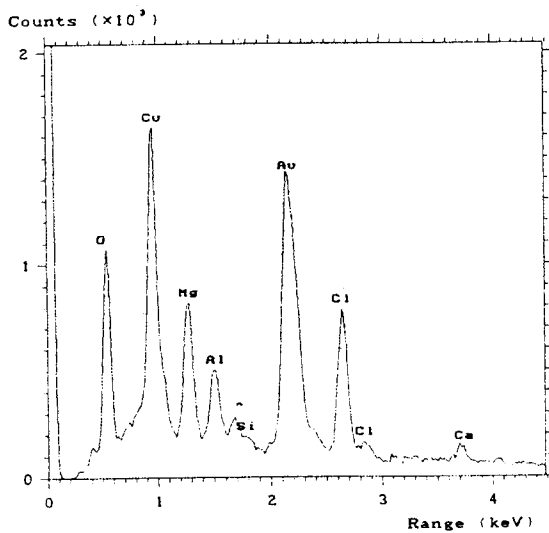
서 40일 이후부터 튜브 표면온도가 급격히 상승하는 것은 튜브내면 fouling factor가 증가했기 때문이며 시험초기에 온도상태가 경향을 벗어난 것은 실험장치 설치상태가 다소 불안정했기 때문으로 여겨진다. Fig. 7은 본 연구에서 계산된 모델복수기 사용기간에 따른 관청결도를 나타냈으며, 모델복수기 운전 후 약 45일이 경과되면 관청결도가 80% 이하로 떨어지기 때문에 복수기 세정장치를 이용하여 청결도를 개선시켜야 할 것으로 생각된다. 발전소 복수기튜브 청결도는 Table 1에서 제시한 바와 같이 대부분의 발전소가 80~90%로 설계된다. 이러한 fouling factor는 신규 튜브가 설치된 후 시간경과에 따라서 그 값이 증가하기 때문에 복수기의 열교환 성능의 저하^{1,2)}를 가져오게 되어, 결국 발전소의 성능이 낮아지게 된다. Fig. 8은 본 연구에서 대상으로한 모델복수기의 fouling factor를 계산한 값으로 시간의 경과에 따라 그 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서 계산된 fouling factor는 제작자와 사용자의 경험을 기

Table 1. Actual cleanliness factor and specification for condenser tube.

발전소		유속 (m/s)	외경 (in)	두께 (mm)	열전달율 (kcal/hr. °C.m ²)	청결도 (%)	진공도 (mmHg)
삼천포 화력	1.2호기	2.00	1	1.24	2,670	85	38.0
	3.4호기	1.96	7/8	0.51	26660.9	90	38.1
	5.6호기	1.96	7/8	0.51	2660.9	90	38.1
호남화력		1.98	1	1.24	2,865	95	38.1
보령 화력	1,2호기	2.10	7/8	0.51	2,807	90	38.1
	3.6호기	2.10	7/8	0/51	2807.9	90	38.1
서천화력		2.18	1	1.25	2,714	85	38.1
태안화력		2.10	7/8	0.51	2807.9	90	38.1
부천복합		2.10	1	0.7	2,610	90	89.0
일산복합		2.10	1	0.7	2610	90	89.0



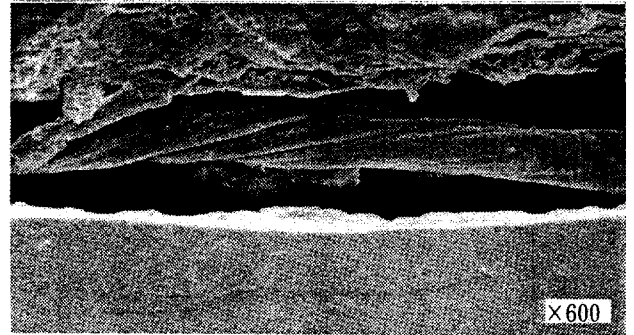
(a)



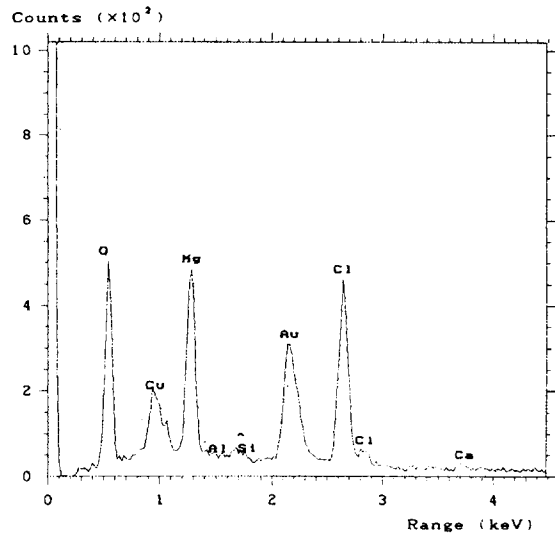
(b)

Fig. 9. (a) Surface film formation after 9days test. (b) EDS spectrum of surface film in the photo(a)

초로 하여 관장치 제조협회(Tubular Equipment Manufacturers Association, TEMA)에서 제시하는 fouling factor인 Table 2에 제시된 값과 근사적으로 일치하고 있



(a)



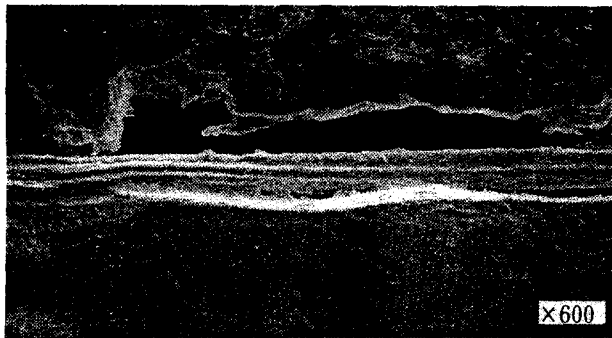
(b)

Fig. 10. (a) Surface film formation after 21days test (b) EDS spectrum of surface film in the photo (a)

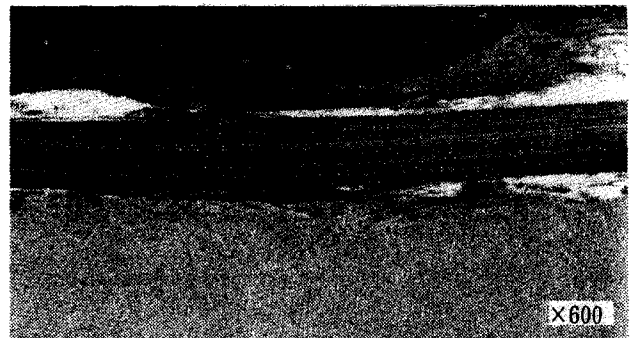
음을 알 수 있다. 불순물이 형성되는 과정은 매우 복잡하여, 이를 예측할 수 있는 어떤 신뢰성있는 기술이 아직은 존재하지 않는다. 복수기가 장시간 운전되면 열전달 표면에 여러 종류의 퇴적물이 누적되어 열저항의 증가로 열전달율이 감소한다. 불순물로 인한 경제적인 손실은 과대한 장치

Table 2. Fouling factor of heat exchangers

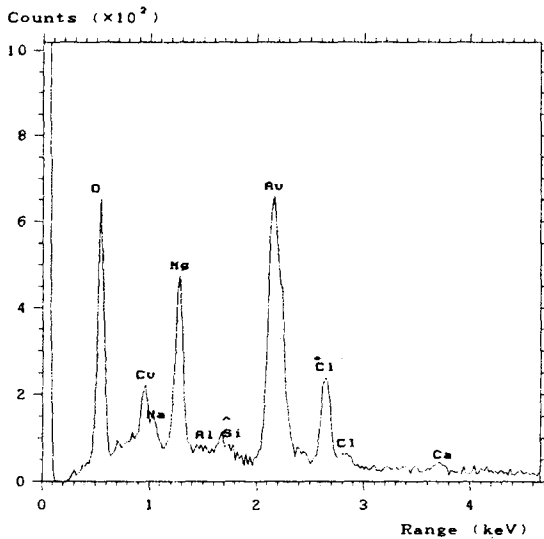
작동유체	온도 52℃ 이하	
	속도 1 m/s 이하	속도 1 m/s 초과
	m ² · C/W	m ² · C/W
해수	0.000088	0.000088
증류수	0.000088	0.000088
기관냉각수	0.00018	0.00018
진흙 혹은 침전토	0.00053	0.00053



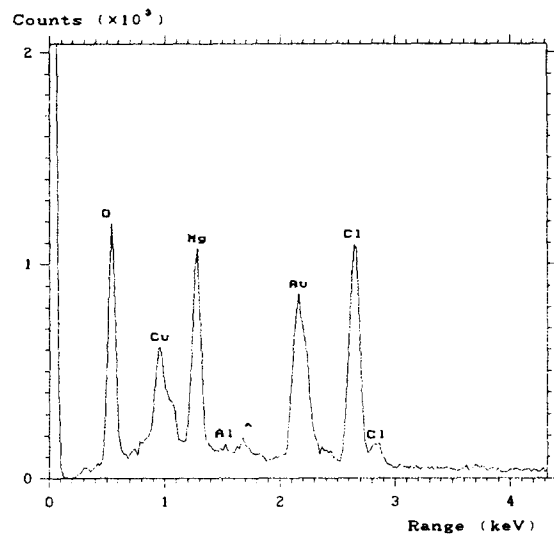
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 11. (a) Surface film formation after 32 days test (b) EDS spectrum of surface film in the photo (a)

Fig. 12. (a) Surface film formation after 43 days test (b) EDS spectrum of surface film in the photo (a)

에 대한 자본투자, 열적 비효율로 인한 에너지 손실, 복수기의 주기적 청소와 관련된 비용, 청소로 인한 발전 중단 혹은 발전기의 출력감발 등이 있을 수 있다. 이와 같은 경제적 손실을 회수하기 위해서 fouling factor에 관한 상당한 연구가 행해졌다³⁻⁹⁾. Fouling 저항은 어느 한 방식에 의해 결정되는 것이 아니고 제작자의 실험자료나 설계자에 의해 결정되기 때문에 일반적으로 조업조건의 불확실성을 이유로 안전율을 높여 실제보다 큰 fouling factor 값을 적용한다⁹⁾. Fouling 저항은 물리적인 측면과 경제적인 측면에서 동시에 고려되어야 한다. 이러한 인자가 알려지면 관

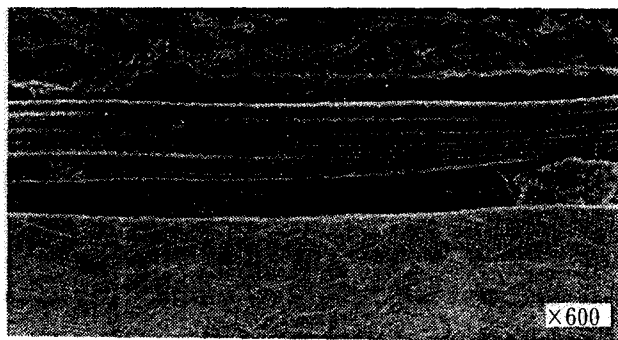
장치 제조협회(TEMA)에서 제시한 값을 기준으로 하여 조정한다.

4. 스케일의 두께측정 및 조직분석

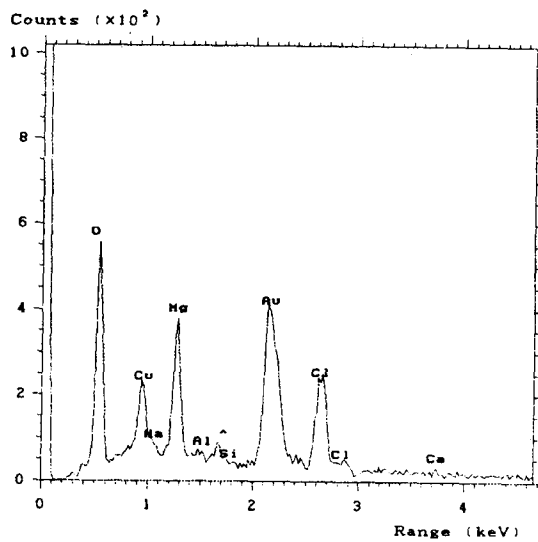
Al-brass 복수기튜브를 모델복수기에 설치하여 시험개시 후 9일이 지난후 시편 내면에 형성된 피막의 상태를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 표면에 3~4μm 정도의 아주 얇은 피막이 형성되어 있음을 알 수 있었다. 하지만 이 피막은 튜브내면을 보호하기에는 불안정하게 생성되어 있음을 알 수 있다. 이 피막의 성분을 EDS로 정성 분석한 결과는 Fig. 9(b)와 같다. 그림에서 Au는 시편을

Table 3. EDS quantitative analysis of tube inside film(단위 : at%)

	9일 이후	21일 이후	32일 이후	43일 이후	62일 이후
Cl	3.721	8.216	4.352	8.662	5.147
O	21.705	43.046	50.985	42.794	45.922
Mg	9.740	20.179	18.760	17.624	15.744
Al	7.134	-	-	-	-
Si	0.951	0.585	1.364	0.656	0.680
Ca	0.462	0.231	0.517	0.162	0.117
Cu	56.286	27.761	24.042	30.139	32.401



(a)



(b)

Fig. 13. (a) Surface film formatio after 62 days test (b) EDS spectrum of surface film in the photo (a)

gold 코팅하여 생성된 성분이다. 한편 Mg, Cl, Ca는 해수 성분으로서 금속과 접촉하여 생성된 원소이다. 이에 대한 정량분석결과는 Table 3에 나타내었다. 피막의 주성분은 Al-brass Cu 성분이며 실험초기에는 Cu와 O가 아직 부동태 피막인 Cu₂O나 Cu₂O를 형성하지 못하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 10(a)는 실험 21일후에 튜브 내면에 형성된 피막의 양상을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 피막의 두께는 대략 15 μ m 정도임을 알 수 있다. 또한 이 피막의 성분은 Fig. 10(b)와 같이 9일 이후에 형성된 피막의 성분과

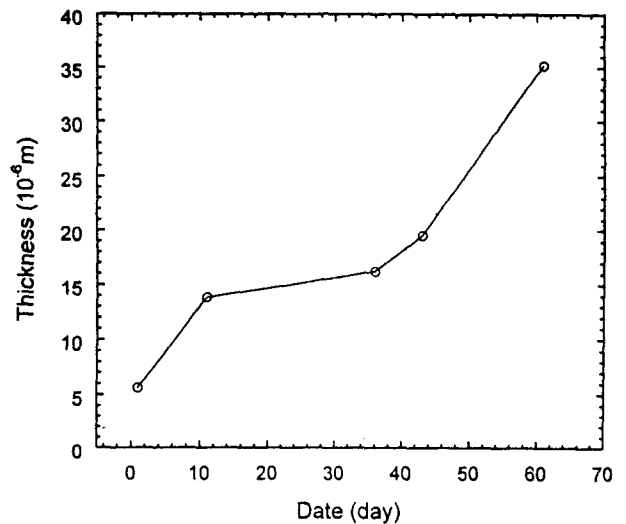


Fig. 14. Surface film thickness variation according to testing period.

대략 일치하지만 그 양에는 차이가 있다. Table 3에서 보면 주로 이 피막은 동합금이 해수와 접촉하여 생성되는 부동태 피막인 Cu₂O가 형성되어 가고 있음을 알 수 있다. 한편 9일 이후에 형성된 표면피막은 불안정하게 형성되었지만 20여일 이후에는 보호성 피막이 형성되어 튜브를 보호해줄 수 있음을 알 수 있다. Fig. 11(a)는 32일 이후에 형성된 피막의 상태이다. 대략 두께는 17 μ m 정도이다. 즉 시간이 지날수록 피막의 두께가 약간씩 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11(b)의 성분분석 결과는 9일, 21일 이후에 형성된 피막의 성분과 거의 유사하였으나 Table 3의 정량 분석결과에서 알 수 있듯이 그 성분은 주로 Cu₂O로서 동합금의 부동태 피막인 Cu \rightarrow Cu₂O \rightarrow CuO단계를 거치고 있음을 확인할 수 있었다. 실험 43일 후의 Al-brass 튜브 내면에 형성된 표면피막의 상태를 Fig. 12(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 피막의 두께는 대략 17~20 μ m 정도였다. 이것은 다른부분에 비해 Cu와 O와의 접촉이 원활하게 진행되어 피막이 두껍게 형성되었음을 나타내준다. Fig. 13(a)는 실험한지 62일 이후의 결과로서 피막이 35 μ m 정도로 매우 두껍게 형성되어 있음을 보여준다. 피막의 성분은 동합금의 부동태피막인 CuO로서 구성되어 있음을 나타내준다. 위의 결과로서 알 수 있는 것은 동합금이 흐르는 해수와 접촉하여 보호성 부동태피막의 중간단계인 Cu₂O를

형성하는 데 30여일, 마지막 단계인 CuO를 형성하는 데는 40여일 정도 소요됨을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 동합금 복수기튜브를 사용하는 경우에는 부동태피막을 형성하기 전에 동합금의 부식을 방지하기 위한 대책이 필요하다. Fig. 14은 모델복수기 운전기간에 따른 스케일 두께 변화상태를 나타낸 그림으로 40일이 경과되면서 스케일 부착량이 급격히 증가됨을 알 수 있다. 따라서 40일 전후로 스케일 세정장치를 운전하여 스케일을 제거하여 관청결도를 향상시켜야 할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 모델복수기의 열전달 표면에 형성되는 불순물의 fouling factor와 부식상태를 관찰하여 발전소 복수기 관리에 관한 지침을 제시하고자 모델복수기를 이용하여 60일간 현장 실험을 실시하였으며, 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 복수기의 fouling factor는 시험 후 약 40일 이후부터 큰 폭으로 증가하였다.
- 2) 발전용 복수기의 관청결도가 85~90%로 설계되므로 설계치를 유지하기 위해서는 약 35일 마다 복수기를 세정하여 관청결도를 향상시켜야 할 것으로 판단되었다.
- 3) 동합금 재질을 사용하는 복수기튜브는 설치 후 보호 피막이 형성되는 초기 30일 동안의 방식 운전이 복수기의 건전성 확보에 매우 중요할 것으로 추측되었다.

참 고 문 헌

1. Fujii, T. Koyama, S. Shinzato, K., 1987, "Theoretical Consideration of Simultaneous Measurement of Flow Rate and Fouling Factor", Transactions of the Japan Society of mechanical Engineers B Tokyo, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol

53, No 495, p. 3323~3328.

2. Fujii, T. Koyama, S. Shinzato, K., 1989, "Experimental Verification of a Method for Simultaneous Measurement of the Fouling Factor and Water Velocity Inside a Condenser Tube", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Tokyo, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol 55, No 520, p. 3772~3777.
3. Watkinson. A. P., and N. Epstein, 1969, "Gas Oil Fouling in a Sensible Heat Exchanger", Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 65(92), p 84~90.
4. Bott. R. R., and R. A. Walker, 1971, "Fouling in Heat Transfer Equipment", Chem. Eng. 255, p. 391~393.
5. Taborek. J., T. Aoki. R. Ritter. J. Pallen and J. Knudsen, 1972, "Predictive Methods for Fouling Behaviour", Chem. Eng. Prog. 68, p. 69.
6. Sutor. J. W. Marnar and R. B. Ritter, 1977, "The History and status of Research in Fouling of Heat Exchangers in Cooling Water Service", Can. J. Chem. 55, p. 374~380.
27. Klaren, D. G., 1981, "Fluid Bed Heat Exchangers", Resources and Conservation, Vol. 7, p. 301~314.
8. Rautenbach, R., Erdmann, C. and Kolbach, J. St., 1991, "The Fluidized Bed Technique in the Evaporation of Wastewaters with Severe Fouling/Scaling Potential-Latest Developments, Application, Limitations", Desalination, Vol. 81, p. 285~298.
9. 이운표외, 1995, "열교환기 Fouling의 저감 대책", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 9.