

# 발전소 응축기용 전열 축진관에 대한 연구

김내현

인천대학교 기계공학과

## A Study on the Enhanced Tubes for Electric Utility Steam Condensers

Nae-Hyun Kim, University of Incheon

### 요 약

본 연구에서는 발전소 응축기를 시뮬레이션할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 관 내의 축 열전달계수의 계산에는 기존 상관식들과 응축 모델을 사용하였고  $\epsilon-NTU$  방법을 사용하여 응축기를 해석하였다. 실제 응축기를 모사하기 위하여 관다발 보정계수 및 화올링 계수도 도입하였다. 이 프로그램을 사용하여 기존 평관을 대체할 전열축진관의 형상을 도출하였다. 시뮬레이션 결과 전열축진관을 사용하면 증기 응축 온도를 6 - 8 °C 정도 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

### 1. 개 요

최근들어 전열 축진관이 많은 열교환 기기에 사용되고 있다. 전열 축진관이란 열전달을 증가시키기 위하여 관의 표면을 성형 또는 기계가공한 관을 통칭한다. 이러한 전열 축진관은 현재 냉난방 기기에 널리 사용되고 있는데 일반적으로 축진관의 내측은 조도 표면으로 구성되고 외측에는 높이가 낮은 핀 (low fin)이 부착되어 있다. 이러한 축진관을 사용하게 되면 열전달율이 평관에 비하여 2 배 이상 증가되므로 동일한 열부하의 경우 열교환 기기의 크기를 반 이하로 줄일 수 있다.

발전소 응축기에 전열 축진관을 사용하게 되면 여러가지 잇점이 예상되는데, 우선 축진관을 장착한 응축기를 새로 시공할 경우에는 평관을 사용했을 때에 비하여 응축기의 크기를 작게 만들어도 되므로 경제적으로 유리하다. 또한, 기존 발전소에서 응축기를 그대로 두고 관만을 평관에서 축진관으로 교체한다면, 열전달율의 증가에 따른 증기 응축 온도 (또는, 터빈의 배압)가 내려가게 되므로 발전소의 효율이 증가하게 된다. 따라서 축진관을 사용하면 기존 설비를 그대로 두고서도 상당량의 전력 여유도를 확보할 수 있다.

전열 축진관의 형상은 열교환 기기의 용도 (증발기, 응축기, 절탄기 등)에 따라, 또한 운전조건 (유속, 온도, 압력등)에 따라 최적 형상이 결정된다. 발전소 응축기 내의 냉각수 유속은 약 2 m/s 이고 이 유속에서는 대략 2/3 정도의 열저항이 관 내측에 존재하게 된다. 따라서 응축기의 성능을 향상시키기 위해서는 관 외측은 물론 관 내측도 축진시킬 필요가 있다. 또한 발전소는 열용량이 매우 커서 냉각수로 바닷물이나 강물을 사용하는데, 이 경우 모래나 미생물등 이물질이 관 내에 침적되는 "화올링" 현상이 발생한다. 관 내에 침적된 이물질은 관의 열수력 성능을 저해하고, 또한 부식의 원인이 되기도하므로 가능한한 이물질의 침적이 적고 또한 이물질이 제거가 용이하여야한다. 발전소 응축기는 주로 스폰지 불을 관 내에 순환시켜 이물질을 제거한다. 따라서 관 내의 조도 형상은 가능한 한 이물질의 침적이 적게 일어나고, 또한 제거가 용이한 형상으로 선정되어야 한다. 독일의 Tapproge 사에서는 현재 많은 발전소에서 사용하고 있는 "순환용 스폰지 불 써시스템" 을 개발한 바 있다.

발전소 응축기용 전열 축진관에 대하여는 관련 문헌이 많지 않은데, 최근들어 몇몇 연구 결과가 발표된 바 있다. 1980 년 미국 TVA 에서는 Gallatin 1 호기에 외경 22.2 mm 의 미국 Wolverine 사 제품인 LPD Korodense 관을 사용한 바 있다. Korodense 관은 관 외측과 내측에 나선형 주름을 만들어 열전달을 촉진시키는 관이다. 주름의 형상은 높이가 0.5 mm, 피치가 10.2

Table 1 Design parameters of the 600 MW steam condenser

관 재질	90/10 Cu/Ni	Stainless Steel
관 외경 (mm)	22.2	22.2
관벽 두께 (mm)	1.24	0.71
관 길이 (m)	10.67	10.67
관 수	20,300	20,300
냉각수량 (m <sup>3</sup> /s)	13.43	13.88
냉각수 온도차 (°C)	15.3	14.6
펌프 헤드 (m)	22.1	21.5
관 마찰 손실 (m)	5.48	4.51

### 2.1 냉각수량의 결정

Fig. 3 에 600 MW 화력발전소 응축기 펌프의 성능 곡선과 냉각수측의 압력 손실 선도가 나타나 있다. 이 경우 냉각탑을 사용하여 냉각수를 냉각하는 방식을 택하고 있다. Fig. 3 에 보여지듯이 유량은 냉각수의 총 압력 손실 곡선과 펌프의 압력 손실 곡선이 만나는 곳에서 결정된다. 평관을 축진관으로 교체하게 되면 응축기 내의 압력 손실은 증가하게 되고 따라서 유량도 감소하게 된다.

### 2.2 관내측 열전달 계수의 계산

관 내 조도 형상 중 본 연구에서 고려한 형상은 Fig.1 에 나타나 있다. 주름조도관은 관 외측에서 finning disc 를 사용하여 압력을 가하여 관 내측에 돌기물을 만든 관으로 현재 미국의 TVA 발전소에 시험 운전되고 있는 관이다. 리브블이관은 만드렐을 사용하여 관 내측에 리브형상을 전조 가공한 관으로 냉동기의 열교환관으로 널리 이용되고 있다. 삼차원 조도관은 최근에 개발된 관으로 관 내측에 삼차원 돌기가 형성되어 있는 관이다. 이들 관들의 열전달 계수와 압력 손실 계수는 실험자료로부터 도출된 조도함수를 사용하여 구할 수 있는데 상세한 내용은 김 [4] 의 보고서에 기술되어 있다. 또한 관 내측을 흐르는 냉각수는 많은 이물질들을 포함하고 이 이물질들은 관 벽에 부착되어 열전달을 방해하는데 그 영향은 화올링 계수  $R_f$  로써 평가된다. 본 연구에서는 Webb 등 [3] 이 사용한 값인  $R_f = 4.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$  를 사용하였다.

### 2.3 관외측 응축 열전달 계수의 계산

응축기용 열전달 축진관의 외측 형상으로는 주로 낮은 핀이 달린 관이 사용된다. 관 외측에 핀을 부착함으로써 열전달 면적을 증가시키는 물론, 핀 주위에서 증기가 응축할 때에 핀의 형상에 따른 표면 장력에 의하여 열전달율이 증가하게 된다. 핀이 많으면 일반적으로 열전달율이 증가하나 핀이 너무 많아져 핀 간격이 너무 작으면 응축액은 핀 표면을 따라 흘러 내리지 않고 표면장력에 의하여 핀의 하부에 매달려 있는 flooding 현상이 발생하게 된다. 특히 수증기의 경우는 냉매나 다른 용액에 비하여 표면 장력이 월등히 크기 때문에 수증기를 응축하는 발전소의 응축기에서는 flooding 을 필히 고려하여야 한다. 또 한가지 2차 축진 형상 선정시 고려하여야 할 사항은 관 재질에 따른 열전도도이다. 핀이 부착된 관의 경우 열의 일부분은 핀을 통하여서 흐르게 되므로 관 재질의 열전도도가 열전달 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 핀관의 응축 열전달을 이론적 모델을 사용하여 구하였다. 핀 주위의 응축에 관하여는 여러 모델이 존재하고 이들 대부분은 핀 주위에서 일어나는 국소 물리적 현상을 고려하여 상당히 복잡한 형태를 취한다. 그 중 Rose [5] 의 모델은 실험자료로 보정한 간단한 형태를 취하고 있고 정확도도 여타 모델들과 비슷한 정도로 알려져있다. 따라서 본 연구에서는 간편

mm 이다. Rabas 등 [1] 은 Gallatin 1 호기에 대한 성능 검토를 통하여 Korodense 관을 설치한 응축기의 열수력 성능이 평관을 설치한 응축기보다 우수하다고 평가하였다. Korodense 관은 그 가격이 평관보다 20 % 에서 25% 정도 비싸나 열전달율의 증가는 25 % 에서 60 % 정도이므로 충분히 경제성이 있다고 판단된다. Nosetani 등 [2] 는 현재 일본에서 수행 중인 발전소 응축기용 열전달 촉진관의 개발 현황을 소개하고 있다. 그들은 500 MW 응축기에 35 개의 촉진관을 설치하여 촉진관의 성능을 평가하는 중이다. 그들이 사용한 촉진관의 내측은 평관이며, 외측은 354 fin/m 의 간격으로 핀이 붙어 있다.

Webb 등 [3] 은 촉진관 사용시 발전소의 효율에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그들은 기존 냉동 공조용으로 개발되어 있던 전열 촉진관을 응축기에 일대일로 대체한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였는데 응축 온도를 2 - 4 °C 정도 낮출 수 있음을 보고하였다. 이는 600 MW 화력 발전소의 경우 연 평균 약 1.2 MW, 최대 3 MW 의 전력 생산 증가를 가져올 수 있는 양이다. 이들은 기존 냉동공조용 전열관을 그대로 발전소 응축기에 사용한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였는데 만일 전열관의 촉진형상을 응축기의 운전조건에 맞도록 최적화한다면 증기 응축 온도를 더욱 낮출 수 있으리라 기대된다.

본 연구에서는 발전소 응축기를 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하고 그 프로그램을 사용하여 전열 촉진관의 최적 촉진 형상을 도출하였다. 최적 형상이란 증기 응축 온도를 가장 낮출 수 있는 형상을 의미한다. 관 내측 조도 형상으로는 주름조도, 리브조도, 그리고 최근에 각광을 받는 돌기조도를 고려하였고 관 외측 형상은 낮은 핀을 고려하였다. 관 내측 촉진 형상은 Fig. 1 에 관 외측 촉진 형상은 Fig. 2 에 보여진다. 본 연구에서는 각각의 조도에 대하여 시뮬레이션을 통하여 최적 조도 형상 (조도 배열, 조도 높이, 핀 핏치, 핀 높이등) 을 결정하였다.

## 2. 발전소 응축기 모사 컴퓨터 프로그램

발전소 응축기에 촉진관을 사용하면 증기의 응축 온도가 낮아지고, 이 낮아진 응축 온도는 터빈의 배압을 감소시켜 발전소의 효율을 증가시키는 효과를 가져온다. 촉진관 사용시 증기의 응축 온도는 아래와 같은 절차로 구한다. 본 연구에서는 우선 기존 발전소 응축기의 평관을 일대일로 촉진관으로 교체했을 때 응축 온도를 구하는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 새로운 응축기 설계시에도 간단한 수정을 통하여 이용될 수 있을 것이다.

Table 1 에 본 연구에서 고려한 발전소 응축기의 기본 사양이 나타나 있다. 이 응축기는 600 MW 화력발전소용으로 Webb 등 [3] 이 사용했던 것과 동일하다. 관의 재질로는 90/10 Cu/Ni 과 스테인레스강을 고려하였다.

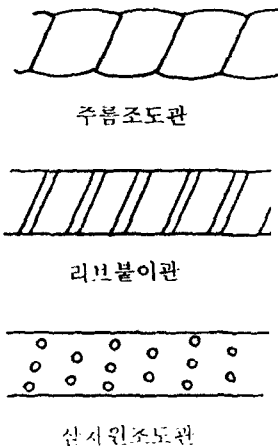


Fig. 1 Tube-side roughness shapes

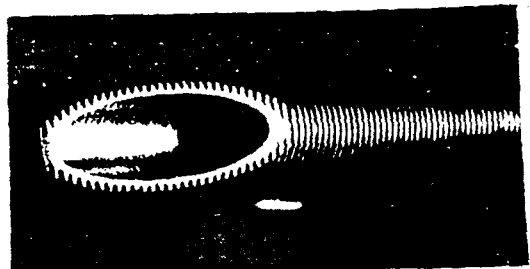


Fig. 2 Low-fin tube

한 Rose 의 모델을 사용하였다. 응축기는 관다발로 구성되고 관다발에서의 응축 열전달 계수는 단일관 값보다는 감소하게 된다. 일반적으로 관다발의 응축열전달계수는 단일관 값에 보정계수를 곱하여 구하는데 본 연구에서는 Webb 등 [3] 이 사용한 값인 0.8 을 사용하였다.

## 2.4 응축 온도의 계산

응축온도는 아래식으로부터 구해진다.

$$Q = \dot{m} c_p \varepsilon (T_s - T_{ci}) \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (2)$$

$$NTU = UA / \dot{m} c_p \quad (3)$$

여기서 Q 는 응축기에서 제거되어야할 열량,  $T_s$  는 증기 응축 온도,  $T_{ci}$  는 냉각수 입구 온도, UA 는 열관류율로 관 내외측 열전달계수, 화율링 계수들로 부터 계산된다. 이렇게 구해진 응축 온도  $T_s$  는 최종적으로 Fig. 4 의 터빈 배압 곡선에 따라 보정된다.

## 3. 시뮬레이션 결과

발전소 응축기 모사 컴퓨터 프로그램을 사용하여 관 외측 핀의 형상과 관 내측 조도 형상을 변화시켜가며 응축 온도의 변화를 검토하였다. Table 2 에 600 MW 화력 발전소에 22.2 mm 스테인레스관 ( $k = 15 \text{ W/mK}$ ) 을 사용하였을 때의 결과가 나타나 있다. Table 2 에는 핀의 높이 조도의 제원등을 변화시켜가며 계산한 후 응축 온도가 가장 낮게 나타나는 조도에 대한 값만을 수록하였다. Table 2 에서  $T_{sat}$  은 응축기 내의 포화 온도, W 는 냉각수 유량,  $h_i$  는 관 내측 열전달 계수,  $h_o$  는 관 외측 응축 열전달 계수이다. 평관의 관벽 두께는 0.9 mm, 낮은 핀관의 관벽 두께는 0.5 mm 이다. 낮은 핀관의 경우 핀이 관벽 재질을 성형하여 전조가공되므로 벽 두께는 작아진다. 주름잡힌관의 벽 두께는 평관과 동일하다.

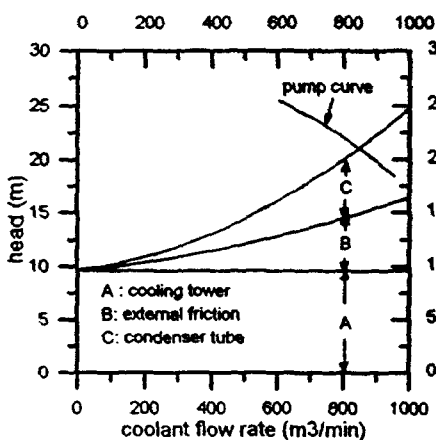


Fig. 3 Pump characteristic curve

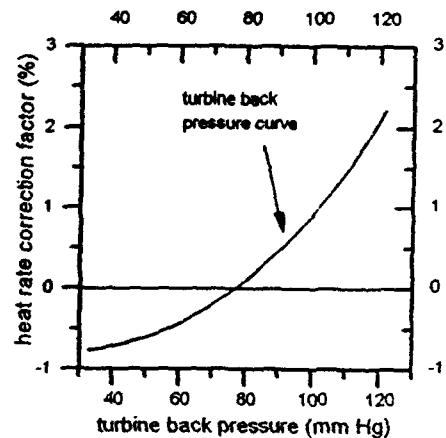


Fig. 4 Turbine back-pressure curve

Table 2 Saturation temperature for enhanced tubes (S.S tube)

외측형상	내측형상	$T_{sat}$ (°C)	W (m <sup>3</sup> /s)	$h_i$ (W/m <sup>2</sup> C)	$h_o$ (W/m <sup>2</sup> C)
smooth	smooth	44.4	15.02	9428	9172
corrugated	corrugated e/D=0.03, p/e=20	42.1	14.38	12350	10936
integral-fin h=1.0mm	ribbed e/D=0.025 p/e=10	36.3	13.69	18053	44544
integral-fin h=1.0mm	3-D e/D=0.033 p/e=14 z/e=8	37.1	12.93	15608	45356
integral-fin h=1.0mm	corrugated e/D=0.03 p/e=20	36.6	13.38	16936	44889

Table 3 Saturation temperature for enhanced tubes (Cu/Ni tube)

외측형상	내측형상	$T_{sat}$ (°C)	W (m <sup>3</sup> /s)	$h_i$ (W/m <sup>2</sup> C)	$h_o$ (W/m <sup>2</sup> C)
smooth	smooth	42.6	14.83	9969	8907
corrugated	corrugated e/D=0.03, p/e=20	40.3	14.13	12967	10788
integral-fin h=1.0mm	ribbed e/D=0.025 p/e=10	35.9	13.12	19245	43162
integral-fin h=1.0mm	3-D e/D=0.033 p/e=14 z/e=8	36.9	12.24	16495	44119
integral-fin h=1.0mm	corrugated e/D=0.03 p/e=20	36.8	13.44	14363	44855

Table 2 는 관 외측에 높이 1 mm 의 낮은 핀이 부착되고 관 내측 형상으로는 리브블이 나 주름잡힌 형상의 관을 사용하였을때 응축 온도를 8 K 정도 낮출 수 있음을 보여준다. 열전달 측면 외에도 관 내측 조도형상 선정시 고려되어야할 중요한 인자는 조도의 화울링 특성이다. 조도는 이물질이 적게 침적되고 또한 이물질을 용이하게 제거할 수 있는 형상으로 선정되어야 하는데 리브블이관은 조도 사이의 간격이 좁고 조도의 단면 형상이 날카로와 조도 사이의 간격이 넓고 단면 형상이 둥근 주름 잡힌 관에 비하여 이물질 침적이 많으리라 예상된다. Kim 과 Webb [6] 은 화울링 실험을 통하여 주름잡힌 관이 리브블이 관에 비하여 이물질 침적이 적고 또한 제거가 용이하다고 보고하였다. 따라서 관 내측 조도 형상으로는 주름잡힌관이 적당하다고 판단된다. Table 2 는 축진관의 경우 마찰 손실이 평관에 비하여 증가하므로 냉각수량은 감소함을

보여준다. 또한 축진관 사용시 내측 열전달 계수는 약 2 배 가량, 응축 열전달 계수는 약 4 배 가량 증가함을 보여준다.

Table 3 에 Cu/Ni 관 ( $k = 52 \text{ W/mK}$ ) 을 사용하였을 때의 결과가 나타나 있다. 이 때 평관의 관벽 두께는 1.25 mm, 낮은 핀관의 관벽 두께는 1.0 mm 이다. Cu/Ni 은 스테인레스에 비하여 경도가 다소 낮으므로 관벽두께가 다소 큰 관을 사용하는 것이 바람직하다. Table 3 은 관 외측에 높이 1 mm 의 낮은 핀이 부착되고 관 내측 형상으로는 리브블이 관을 사용하였을 때 가장 낮은 응축 온도를 얻을 수 있음을 보여준다. 하지만 리브블이관은 화물링 조절에 문제가 있으므로 내측 조도로 주름잡힌관이나 삼차원 조도관을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이 경우 응축 온도는 평관에 비하여 약 6 K 정도 낮아진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 발전소 응축기에 적용할 수 있는 열전달 축진관의 형상을 도출하였다. 본 연구의 주된 연구 내용은 다음과 같다.

- 1) 관 외측 핀의 형상으로 핀높이 1.0 mm, 핀밀도 669 fpm (fin per meter) 의 낮은 핀관이 적절하다.
- 2) 관 내측의 조도 형상으로는 주름잡힌 (corrugated) 형상이나 삼차원 조도가 바람직하다. 주름 조도의 최적 형상은 무차원 조도높이  $e/D = 0.03$ , 축방향 무차원 조도 핏치  $p/e = 20$  이고 삼차원 조도의 경우는  $e/D = 0.033$ ,  $p/e = 14$ , 반경방향 무차원 조도핏치  $z/e = 8$  이 최적 형상이다.
- 3) 기존 600 MW 화력 발전소 응축기의 평관을 상기 축진관으로 일대일 대체하면 스테인레스 강관의 경우 수증기 응축온도를 8 K, Cu/Ni 관의 경우 약 6 K 정도 낮출 수 있다.

#### 참고 문헌

1. Rabas, T., Merring, R., Schaefer, R., Lopez-Gomez, R. and Thors, P., "Heat Rate Improvements Obtained with the Use of Enhanced Tubes in Surface Condensers," EPRI Condenser Technology Conf., Boston, 1990.
2. Nositani, T., Hotta, Y., Sato, S., Onda, K., Nakamura, T., Kato, Y., "In-Situ Evaluation of Enhanced Heat Transfer Tubes for Surface Condenser," in Heat Transfer Equipment Fundamentals, Design, Applications and Operating Problems, HTD-108, Ed. R. K. Shah, pp. 97-104, 1989.
3. Webb, R. L., Haman, L. L., Hui, T. S., "Enhanced Tubes in Electric Utility Steam Condensers," Heat transfer in Heat Rejection Systems, ASME, HTD-37, ed. S. Sengupta and Y. S. Mussali, pp. 17-25, 1984.
4. 김 내현 "발전소 응축기용 열전달 축진관의 개발" 과제 관리 번호 93-21, 기초전력공학공동연구소, 1994.
5. Rose, J. W., "An Approximate Equation for the Vapour Side Heat Transfer Coefficient for Condensation on Low-Finned Tubes," Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 37, pp. 865-875, 1994.
6. Kim, N-H. and Webb, R.L., "Experimental Study of Particulate Fouling in Enhanced Water Chiller Condenser Tubes," ASHRAE Trans., Vol. 76, Pt. 2, pp. 507-515, 1989.