

<연구논문>

장기 예방정비로 인한 사용후연료저장조 열원 감소가 열교환기 성능평가에 미치는 영향 고찰

박 찬[†]·이성호^{*}

Consideration for Heat Exchanger Performance Evaluation with reduced spend fuel pool heat due to the long-term over-haul maintenance

Chan Park[†] and Sung Ho Lee^{*}

(Received 11 May 2020, Revised 12 June 2020, Accepted 17 June 2020)

ABSTRACT

The safety related heat exchangers have been evaluated for their performance during the operation of the nuclear power plant. The evaluation program for the safety related heat exchanger was developed in 2010 and used by KHNP based on EPRI TR-10739 algorithms. The spend fuel pool heat exchanger is one of the safety related heat exchanger in the nuclear power plant and also evaluated for their performance. Recently the performance evaluation for the spend fuel pool heat exchanger was not available because of the decreased heat in the spend fuel pool due to the long term overhaul. This paper analyzes the main cause of evaluation failure in the evaluation process and suggests the criteria for the heat exchanger performance evaluation during the long term overhaul.

Key Words : Heat Exchanger(열교환기), Heat Transfer Rate(열전달률), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Uncertainty Analysis(불확실도 평가)

기호설명

U_{Q_h}, U_{Q_c} : The Uncertainty for Hot & Cold side heat transfer rate

$U_{\dot{m}_h}, \dot{m}_h, U_{\dot{m}_c}, \dot{m}_c$: The Uncertainty for Hot & Cold side flow rate and Hot & Cold side flow rate

$U_{T_{h,i}}, T_{h,i}, T_{h,o}$: The Uncertainty for Hot side, Hot side Inlet&Outlet Temperature

$U_{T_{c,i}}, T_{c,i}, T_{c,o}$: The Uncertainty for Cold side, Cold side Inlet&Outlet Temperature

K_s : The thermal conductivity for Shell side flow

K_t : The thermal conductivity for Tube side flow

J_T : Corrective Coefficient for Shell side

j : Corrective Coefficient for tube arrangement (Colburn j factor)

$Pr_{s,w}$: Prandtl Number (corrected by Shell side surface temperature)

1. 서 론

원자력 발전소 안전관련 열교환기는 설계기준사고 시 계통 내 열원을 제거 및 제어하는 기능을 갖추고 있다. 이들 열교환기는 발전소 주기시험을 통해 일정기간 안에 성능을 평가하여 열교환기가 안전기능 수행에 있어 문제가 없는지를 확인하여야 한다. 이와 관련하여 한수원(한국수력원자력(주))에서는 2010년 EPRI TR-10739⁽¹⁾의 내용에 따라 열교환기 성능평가 프로그램을 개발⁽²⁾하여 현재까지 운영 중에

[†] 책임저자, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail: Park.Chan@khnp.co.kr

TEL: (042)870-5605 FAX: (042)870-5569

^{*} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

있다. 1차측 열교환기는 사고 시에 발생할 열원으로 평가해야 하나 대부분 가동원전에서 사고상황을 모사하기 힘들기 때문에 EPRI TR을 통해 시험 가능한 조건에서 확보한 열교환기의 유량, 입·출구 온도 등을 활용하여 오염계수를 계산하고 수치해석방법을 활용하여 사고조건에서의 열교환기 성능을 평가하고 있다.

그러나 사용후연료저장조 열교환기의 경우, 예방정비시 유입되는 사용후연료의 열원을 사용하게 되는데 장기 예방정비가 진행되면서 열원이 상실되는 상황이 발생하였다. 일반적으로 열교환기 시험 시 적절한 열원이 확보가 되지 않으면 성능평가에 문제가 될 수 있음을 예상할 수 있는데, 장기 예방정비로 인해 사용후연료저장조 열교환기 성능평가가 불가능한 사례가 되었다. 성능평가가 이루어지지 않을 경우 사용후연료의 열원이 상실되고 있기 때문에 해당 계통 안전 운영에는 영향이 없으나, 발전소에서는 주기시험 지연보고서 작성 후 차기 예방정비시 시험을 수행해야한다. 이로 인해 본 논문에서는 장기 예방정비시 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 불가 원인을 검토하고 장기 예방정비 및 기타 이유로 인해 열교환기 성능평가에 사용될 열원의 감소 또는 상실시 열교환기 성능평가 가능 조건을 도출하고자 한다.

2. 열교환기 성능평가 방법

2.1 평가방법 개요

한수원에서 개발한 열교환기 통합관리 프로그램은 1차측 쉘&튜브형 및 관형 열교환기의 성능을 평가할 수 있도록 개발되었으며, 크게 열교환기의 물리적 면적을 계산하는 파트와 시험조건에서의 열전달률(Heat Transfer Rate), 동체측&튜브측 열전달계수(Overall Heat Transfer Coefficient), 오염계수를 평가하는 파트, 그리고 최종적으로 사고조건에서의 열전달률, 동체측&튜브측 열전달계수를 계산하는 파트로 구성되어 있다. 종합적인 성능평가 프로세스는 Fig. 1과 같다.

열교환기의 열전달률, 총열전달계수를 계산하기 위해 LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference) 방법을 사용하였으며, 열교환기 성능평가의 신뢰도를 높이기 위해 불확실도 평가를 반영하였다. LMTD 방법은 일반적으로 열교환기 평가에 많이 활용하고 있으며, 열교환기 Hot&Cold Side의 입·출구 온도를 가지고 열교환기의 대표 온도차를 구하는 역할을 한다. 불확실도 평가는 시험조건에서의 열전달률 계산과 사고조건에서 각 입력변수에 대한 민감도 및 불확

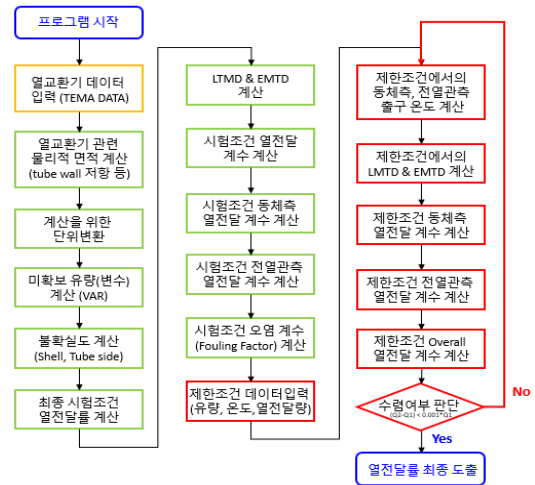
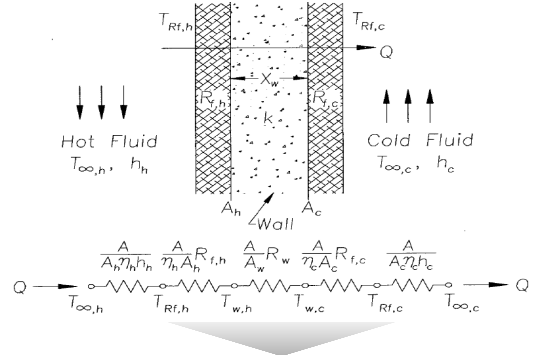


Fig. 1 The performance evaluation process for the safety related Heat Exchanger

실도를 계산하여 사고조건 시 계산된 열전달률에 그 값을 차감하여 최종열전달률을 보수적으로 평가하는데 활용한다.

2.2 시험조건에서의 평가

시험조건에서의 열교환기 성능평가 목적은 시험 가능한 조건에서의 동체측, 튜브측 입·출구 온도, 유량을 통해 총열전달계수, 동체측 열전달계수, 튜브측



$$R_f = \frac{1}{U_{test}} - \frac{A_{eff}}{A_o h_{s,c}} - \frac{A_{eff}}{A_w} R_w - \frac{A_{eff}}{A_i h_{t,c}}$$

- U_{test} : Overall heat transfer coefficient
- A_{eff} : Effective Area for Heat Exchanger
- A_o, A_i : Outside & inside area (Tube)
- A_w : Surface Area associated with the wall resistance
- $h_{s,c}$: Shell side heat transfer coefficient
- $h_{t,c}$: tube side heat transfer coefficient

Fig. 2 Thermal Circuit of Heat Exchanger and Fouling Factor Calculation

열전달계수 그리고 튜브 벽저항 등을 계산하고 Fig. 2과 같이 최종적으로 오염계수(Fouling Factor)를 계산하는데 있다.

2.2.1 시험조건 열전달률 계산

시험조건에서의 열교환기 열전달률 계산은 이론 값과 실제값의 차이로 인해 2.1 평가방법 개요에서 언급하였듯이 불확실도값을 이용하여 계산한다. 불확실도값은 Hot side와 Cold Side 모두 계산하며, 해당 Side의 유량과 온도 측정값들을 통해 결정된다. Hot side, Cold Side의 불확실도값을 이용하여 가중 평균한 시험조건 열전달률 계산방법은 EPRI TR-10739에서 아래와 같이 제시하고 있다.

$$Q = \frac{Q_c U_{Q_h}^2 + Q_h U_{Q_c}^2}{U_{Q_h}^2 + U_{Q_c}^2}$$

$$U_{Q_h} = Q_h \sqrt{\left(\frac{U_{m_h}}{m_h}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{hi}}}{T_{h,i} - T_{h,o}}\right)^2 + \left(\frac{-U_{T_{ho}}}{T_{h,i} - T_{h,o}}\right)^2}$$

$$U_{Q_c} = Q_c \sqrt{\left(\frac{U_{m_c}}{m_c}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{co}}}{T_{c,o} - T_{c,i}}\right)^2 + \left(\frac{-U_{T_{ci}}}{T_{c,o} - T_{c,i}}\right)^2}$$

시험조건에서의 평가를 위해 시험조건에서의 열전달률을 LMTD 방법으로 계산된 온도차와 유효면적으로 나눠 총열전달계수를 계산한다.

2.2.2 동체측 열전달계수 계산

동체측 열전달 계수 계산은 EPRI TR-10739에서 제시한 Delaware Correlation 방법을 활용하였다.

$$h_s = \left(\frac{K_s}{d_o}\right) \times J_T \times j \times Re_s \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{Pr_s}{Pr_{s,w}}\right)^{0.11}$$

- K_s : The thermal conductivity of the shell side fluid
- d_o : Outside diameter of the tubes
- J_T : The geometry correction factor
- j : Colburn j factor
- Re_s : Shell side Reynolds Number
- $Pr_s, Pr_{s,w}$: Prandtl Number for Shell side and Shell wall

2.2.3 튜브측 열전달계수 계산

튜브측 열전달 계수 계산은 Turbulent flow에 적합하고 EPRI TR-10739에서 제시한 Petukhov-Kirillov

Correlation 방법을 활용하였다.

$$h_t = \left(\frac{K_t}{d_i}\right) \times \left(\frac{f}{2}\right) \times \left(\frac{Re \times Pr}{1.07 + 12.7 \sqrt{f/2} \times (Pr^{2/3} - 1)}\right) \times \left(\frac{Pr_t}{Pr_{t,w}}\right)^{0.11}$$

- $f = 1 / (1.58 \times \ln(Re) - 3.28)^2$
- K_t : The thermal conductivity of the tube side fluid
- d_i : Inside diameter of the tubes
- Re : Tube side Reynolds Number
- $Pr_t, Pr_{t,w}$: Prandtl Number for Tube side and Tube wall

2.3 사고조건에서의 평가

사고조건에서 열교환기 성능평가는 사고조건에서의 오염계수(Fouling Factor)가 시험조건과 동일하다는 조건으로 사고조건에서의 동체측, 튜브측 입구 온도 및 유량 정보를 통해 최종 열전달률과 열전달계수를 계산한다. 이는 시험 당시 물리적인 열화상태를 수치적으로 평가한 오염계수가 시험 당시 사고가 발생되더라도 동일한 값을 갖게 된다는 가정 사항을 포함하며, EPRI TR-10739의 내용을 따른 것이다. 계산과정은 시험조건과 동일하나, 사고조건에서는 동체측과 튜브측의 출구온도를 모르기 때문에 출구온도를 열평형 조건에 맞춰 반복계산을 수행해야 한다. 특히 열전달계수 및 열전달률을 계산하기 위해 LMTD 방법을 활용하므로 반복적 계산은 필수적인 요소가 된다. 결국 아래 식에서 오염계수를 제외한 나머지 값은 계산과정을 통해 얻어지고 사고 시의 열전달률, 총열전달계수가 계산된다.

$$\frac{1}{U_{\text{사고조건}}} = \frac{A}{A_h \eta_h h_{h,\text{사고조건}}} + R_{f,\text{시험조건}} + \frac{A}{A_w} R_w + \frac{A}{A_c \eta_c h_{c,\text{사고조건}}}$$

2.4 불확실도 계산

시험조건에서의 오염계수, 사고조건에서의 열전달률과 총열전달계수를 얻게 되면 열교환기 성능평가의 신뢰도를 높이기 위해 불확실도 계산을 수행한다. 열교환기 성능평가에 사용된 불확실도 계산

의 목적은 시험에 영향을 주는 시험 변수들의 Errors를 정의, 평가하고 혼합하여 계산결과의 제한치를 제시하는 것이다. 이런 Errors는 크게 Precision Errors와 Bias Errors로 구분할 수 있다. Precision Error는 시험 기간 동안 다양하게 나타나는데, 반복되는 시험에서 흠어짐의 정도를 나타내고 Bias Error는 목표값에서 일정한 간격으로 떨어져 나타나는 특성을 갖고 있다. 특히 여러 가지 시험변수가 조합되어 총불확실도를 계산하고자 하면 시험변수에 대한 민감도 분석이 이루어져야 한다. 민감도 분석에는 Precision Errors와 Bias Errors에 대한 민감도 계수를 구하고 이를 반영하여 총불확실도를 계산하는데, 이와 관련된 계산 식은 다음과 같다.

1) 민감도 계산 : $\theta_i = \frac{\partial r}{\partial P_i}$

- r : Result
- P_i : i 번째 Parameter

2) Precision Index : $S_r = \sqrt{\sum_{i=1}^J (\theta_i S_{P_i})^2}$

- θ_i : i 번째 Parameter 민감도 계수
- S_{P_i} : i 번째 Parameter의 표준편차(평균값에 대한)

3) Bias Uncertainty : $B_r = \sqrt{\sum_{i=1}^J (\theta_i B_i)^2}$

- θ_i : i 번째 Parameter 민감도 계수
- B_i : i 번째 Parameter의 Bias Uncertainty

참고로 민감도 계산에서 시험변수에 대한 변화량은 각 시험변수의 불확실도값이다. 즉 동체측 유량이 252.36 l/s이고 불확실도값이 9.93 l/s일 경우 262.29 l/s(동체측 유량 + 9.93 l/s)과 242.43 l/s(동체측 유량 - 9.93 l/s)의 두 경우에 대한 열전달률을 가지고 민감도 계수를 구한다. 상기 Precision Index와 Bias Uncertainty를 구하면 다음과 같이 총불확실도를 구하고 사고조건의 열전달률에서 차감하면 사고조건에서의 최종 열전달률이 계산된다.

$$U_o = \sqrt{B_r^2 + (t_{95,v_r} S_r)^2}$$

- U_o : Overall Uncertainty (95% coverage)
- t_{95,v_r} : the student's t value for 95% coverage
- B_r : Bias Uncertainty
- S_r : Precision Error (Precision index)

$$Q_{final} = Q_{conver.} - U_o > Q_{ref.}$$

- Q_{final} : 사고조건에서의 최종 열전달률
- $Q_{conver.}$: 사고조건에서 수렴된 열전달률
- $Q_{ref.}$: 판정기준에서의 열전달률

3. 열교환기 열원 감소에 따른 성능평가 검토

3.1 사용후연료저장조 열교환기 열원 검토

고찰 대상 발전소 사용후연료저장조의 경우, 장기 예방정비로 인해 사용후연료저장조 열원이 감소되는 상황을 확인하였으며, 이는 열교환기 동체측과 튜브측 입·출구온도차를 통해 확인할 수 있었다.

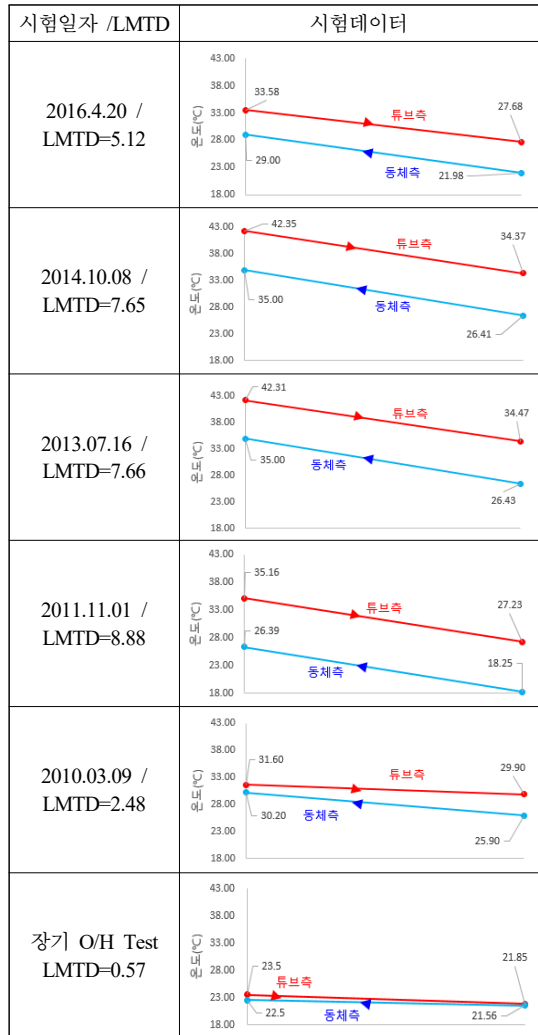


Fig. 3 Test History of the spend fuel pool Heat Exchanger

사용후연료저장조의 열원 감소에 대한 정량 평가가 불가하기 때문에 열원이 상실되는 상황을 보다 명확하게 확인하기 위해 장기 예방정비 시 사용후연료저장조열교환기 입·출구 온도를 기존 시험데이터들과 비교하였다.

Fig. 3과 같이 대상 발전소 사용후연료저장조 열교환기 시험이력을 비교한 결과, 장기 예방정비가 진행 중이었던 경우가 다른 시험 데이터들에 비해 입·출구 온도와 LMTD (0.57°C)가 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다.

3.2 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 결과

장기 예방정비가 진행 중이었던 사용후연료저장조 열교환기 동체측, 튜브측 유량 및 입·출구 온도를 입력하여 성능평가를 수행한 결과, 사고조건의 열전달률과 열전달계수가 계산되지 않은 것을 확인하였다.

1) 성능분석 입력데이터(측정값)

동체측 (평균값)		튜브측 (평균값)	
유량	250 l/s	유량	205 l/s
입구온도	21.6 °C	입구온도	23.5 °C
출구온도	22.5 °C	출구온도	21.9 °C

2) 성능분석 결과

동체측 열용량(Kcal/hr)	1,215,321.04
튜브측 열용량(Kcal/hr)	1,215,533.27
시험불확실도(Kcal/hr)	평가불가(Nan)
열전달계수(Kcal/(m ² ·hr·°C))	평가불가(Nan)
열전달률(Kcal/hr)	평가불가(Nan)

앞서 설명하였듯이 사고조건의 성능평가(열전달계수, 열전달률)는 수치해석적으로 평가하는 것으로 시험조건의 데이터를 사용한다. 상기 성능분석 결과에서 동체측 열용량과 튜브측 열용량이 계산되었으나, 사고조건의 열전달계수와 열전달률은 평가되지 않는 것을 알 수 있는데 이는 사고조건 수치해석 시 계산상의 오류가 발생한 것을 알 수 있다.

3.3 열교환기 성능평가 불가 원인 분석

장기 예방정비 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 코드를 디버깅하여 분석한 결과, 불확실도 평가 도중 오류가 발생한 것을 확인하였다.

불확실도 계산 과정은 앞서 설명하였듯이 각 측정변수에 상수(측정 불확실도)를 더하고 빼서 민감도 분석을 수행하는데, 동체측 입구온도와 튜브측 출구온도 민감도 분석 시 동체측 입구온도가 튜브측 출구온도 보다 높게 선정되어 LMTD 계산이 불가함에 따라 사고조건에서의 열전달률, 열전달계수 평가가 수행되지 않았던 것으로 분석되었다.

결국 장기 예방정비로 인해 감소된 열원으로 시험할 경우, 동체측 입구온도와 튜브측 출구온도 차이가 작은 상황이 발생하고 열교환기 성능평가 관련 민감도 분석 시 일부 시험변수로 인해 LMTD를 계산하지 못하여 오류가 발생하는 것으로 결론을 내렸다.

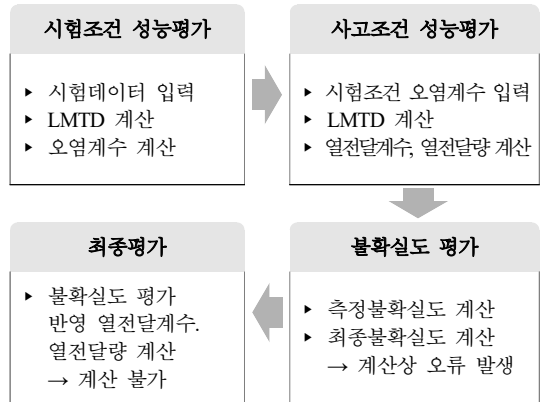


Fig. 4 Process Analysis for Heat Exchanger Performance Evaluation

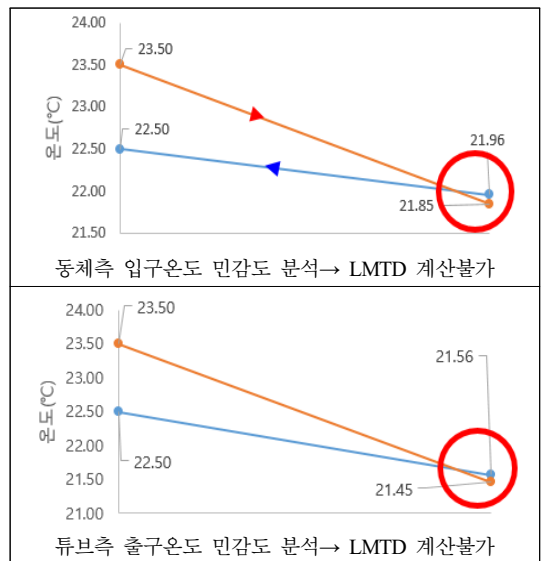


Fig. 5 Sensitivity Analysis Error for Shell & Tube side

3.4 열교환기 열원 감소 시 성능평가 가능조건 분석

고찰 대상 사용후연료저장조 열교환기는 새로운 열원을 확보하지 못하는 이상 열교환기 성능평가 수행이 불가능할 것으로 판단된다. 이에 따라 열교환기 열원 감소 시 성능평가가 불가능한 상황을 방지하고자 성능평가 가능조건을 사례분석(Case Study)을 통해 도출하였다.

본 사례 분석에 대한 가정사항은 다음과 같다.

- 사용후연료저장조 열량에 대한 조건이 없으므로 평가 불가능했던 시험조건에서의 열량(1,215,366 Kcal/hr) 보다 높은 1,500,000 Kcal/hr에서 3,500,000 Kcal/hr까지 조건 가정
- 튜브측 입구온도는 30 °C부터 떨어진다고 가정 (30 °C를 선정한 이유 : 시험 성공 데이터의 튜브측 입구온도가 31.6 °C를 지시하여 그보다 작은 30°C로 가정)
- 동체측 유량과 튜브측 유량은 장기 예방정비 열원 감소 시험 조건과 동일
 - 동체측 유량 : 250 l/s, 튜브측 유량 : 205 l/s
- 동체측 입구온도 : 21.56 °C (장기 O/H 열원 감소 시험 조건 동일)
- 동체측 출구온도와 튜브측 출구온도는 사용후연료저장조 열원에 따라 계산

상기 가정사항을 반영하여 아래와 같이 사례분석에 대한 조건을 선정하였다.

항목	Case Study				
	1	2	3	4	5
사용후연료 저장조열량(Kcal/hr)	1.5×10 ⁶	2.0×10 ⁶	2.5×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.5×10 ⁶
튜브측 입구온도(°C)	30~24	30~24	30~24	30~24	30~24
동체측 입구온도(°C)	21.56	21.56	21.56	21.56	21.56

3.4.1 Case 1 사례분석

사용후연료저장조 열량이 1,500,000 Kcal/hr일 경우, 튜브측 입구온도가 30, 25, 24.02 °C일 때 성능평가가 가능하였으며, 24.02 °C(LMTD : 0.58 °C) 미만에서는 성능평가가 불가능한 것을 알 수 있었다. 각 경우에 대한 계산결과는 Fig. 6와 같으며, 결국 사용후연료저장조 열량이 1,500,000 Kcal/hr일 경우 LMTD가 0.58 °C 미만이 되면 성능평가가 불가능한 것으로 평가되었다.

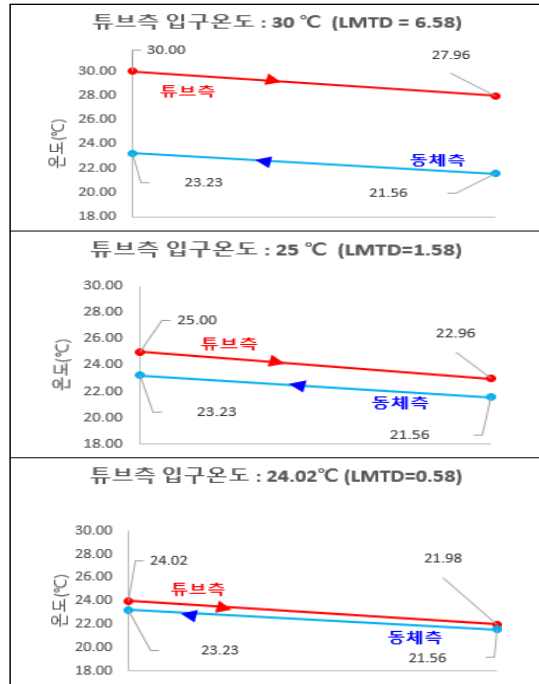


Fig. 6 LMTD Results for Case 1(SFP Heat : 1,500,000 Kcal/hr)

3.4.2 Case 2 사례분석

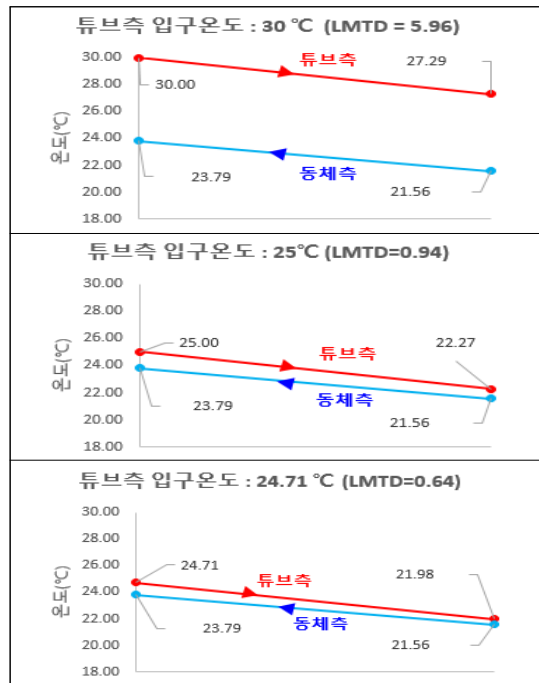


Fig. 7 LMTD Results for Case 2(SFP Heat : 2,000,000 Kcal/hr)

사용후연료저장조 열량이 2,000,000 Kcal/hr일 경우, 튜브측 입구온도가 24.71 °C일 때(LMTD : 0.64 °C) 성능평가가 가능하였으며, 24.71 °C 미만에서는 성능평가가 불가능한 것을 알 수 있다.

각 경우에 대한 계산결과는 Fig. 7과 같으며, 결국 사용후연료저장조 열량이 2,000,000 Kcal/hr일 경우 LMTD가 0.64 °C미만이 되면 성능평가가 불가능한 것으로 평가되었다.

3.4.3 Case 3 사례분석

사용후연료저장조 열량이 2,500,000 Kcal/hr일 경우, 튜브측 입구온도가 25.39 °C일 때(LMTD : 0.69 °C) 성능평가가 가능하였으며, 25.39 °C 미만에서는 성능평가가 불가능한 것을 알 수 있다. 각 경우에 대한 계산결과는 Fig. 8과 같으며, 결국 사용후연료저장조 열량이 2,500,000 Kcal/hr일 경우 LMTD가 0.69 °C미만이 되면 성능평가가 불가능한 것으로 평가되었다.

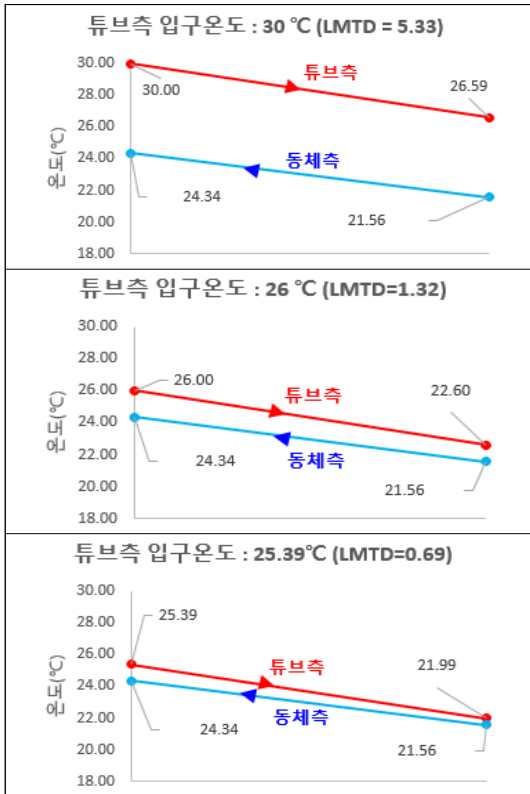


Fig. 8 LMTD Results for Case 3(SFP Heat : 2,500,000 Kcal/hr)

3.4.4 Case 4 사례분석

사용후연료저장조 열량이 3,000,000 Kcal/hr일 경우, 튜브측 입구온도가 26.07 °C일 때(LMTD : 0.74 °C) 성능평가가 가능하였으며, 26.07 °C 미만에서는 성능평가가 불가능한 것을 알 수 있다. 결국 사용후연료저장조 열량이 3,000,000 Kcal/hr일 경우 LMTD가 0.74 °C미만이 되면 성능평가가 불가능한 것으로 평가되었다.

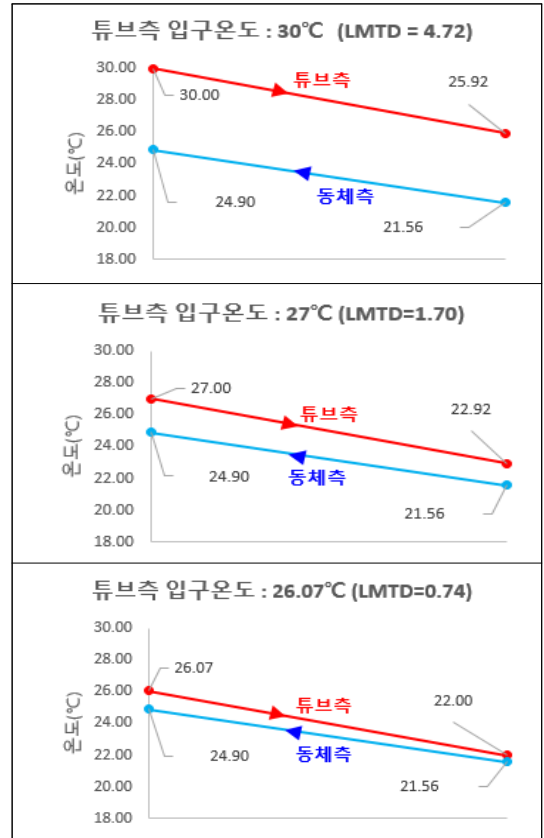


Fig. 9 LMTD Results for Case 4(SFP Heat : 3,000,000 Kcal/hr)

3.4.5 Case 5 사례분석

사용후연료저장조 열량이 3,500,000 Kcal/hr일 경우, 튜브측 입구온도가 27.76 °C일 때(LMTD : 0.79 °C) 성능평가가 가능하였으며, 27.76 °C 미만에서는 성능평가가 불가능한 것을 알 수 있다. 결국 사용후연료저장조 열량이 3,500,000 Kcal/hr일 경우 LMTD가 0.79 °C 미만이 되면 성능평가가 불가능한 것으로 평가되었다.

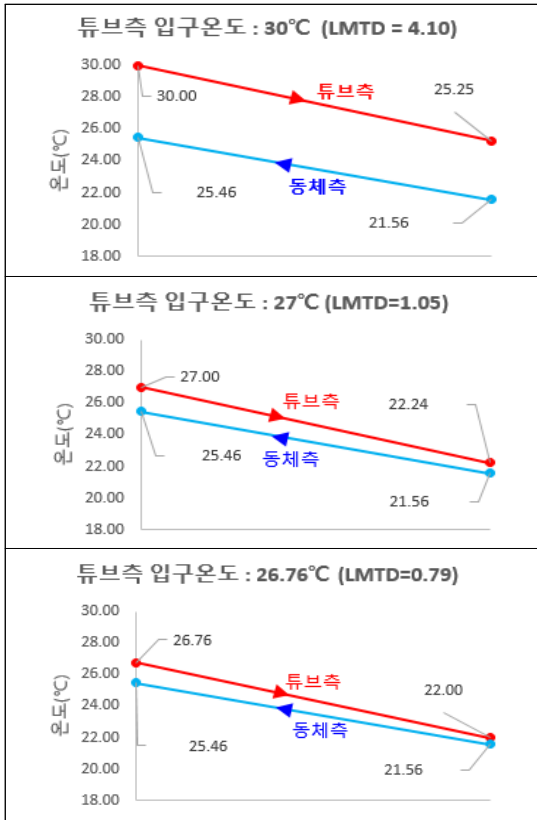


Fig. 10 LMTD Results for Case 5(SFP Heat : 3,500,000 Kcal/hr)

3.4.6 사례분석 결과 요약

본 사례분석의 목적은 앞서 언급하였듯이 장기 예방정비 등 사용후연료저장조 열원이 감소되는 상황에서 열교환기 성능평가 가능조건을 파악하는 것이다. 이에 따라 발전소에서 매 시험 시 측정하고 있는 동체측, 튜브측 입·출구온도로 계산할 수 있는 LMTD로 조건을 도출하였으며, 아래 사례분석의 결과와 같이 LMTD가 1.0이하가 되면 성능평가가 불가능한 것으로 분석되었다.

항목	Case Study				
	1	2	3	4	5
사용후연료 저장조열량(Kcal/hr)	1.5×10 ⁶	2.0×10 ⁶	2.5×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.5×10 ⁶
LMTD (°C)	0.58	0.64	0.69	0.74	0.79
동체측 입구온도(°C)	21.56	21.56	21.56	21.56	21.56

해당 발전소의 사용후연료저장조 설계 LMTD가 13.8°C⁽⁵⁾이며, 운전이력을 고려하면 일반적인 사용후연료저장조의 LMTD는 대략 2.48 ~ 13.8°C 분포를 가지는 것으로 조사되었다. 상기 표에 정리된 것과 같이 장기 예방정비 진입 혹은 기타 사유로 열원이 상실되고 있을 경우, 사용후연료저장조 유량이 일정한 조건(동체측 : 250 l/s, 튜브측 :205 l/s)에서 사용후연료저장조 열교환기 LMTD 정상범위를 벗어나 LMTD가 1.0이하 되기 전에 시험을 수행해야 열교환기 성능평가가 가능한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문을 통해 장기 예방정비로 인해 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 불가 원인을 검토하고 열교환기 성능평가에 사용될 열원 감소 시 열교환기 성능평가 가능조건을 도출하였다.

- 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 불가 원인
 - 장기 예방정비로 사용후연료저장조의 열원이 감소됨에 따라 열교환기 온도차가 낮아짐 (낮은 LMTD)
 - 이로 인해 사용후연료저장조 열교환기의 동체측 입구온도와 튜브측 출구온도 차이가 확연히 줄어 열교환기 성능평가 시에 수행되는 불확실도 평가 불가 → 사고조건 열전달률, 열전달계수 평가 불가
 - 열원 감소 시 사용후연료저장조 열교환기 성능평가 가능조건
 - 열원 감소 시 사용후연료저장조 동체측, 튜브측 유량이 각각 205 l/s, 250 l/s로 시험 가능한 경우, 열교환기 LMTD가 1.0이하 되기 전에 시험 수행
- 향후 사용후연료저장조 열교환기와 같이 열원이 시간에 따라 감소되는 상황에서 열교환기 LMTD를 계산하여 성능평가가 불가하게 되는 LMTD 전에 시험을 수행한다면 1차측 열교환기 성능평가 업무를 보다 체계적으로 관리 및 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 계획 중인 열교환기 성능평가 프로그램 고도화 연구과제를 통해 발전소에서 능동적으로 대처할 수 있도록 추가 검토할 예정이다.

참고문헌

(1) Electric Power Research Institute, 1998, "Service

- Water Heat Exchanger Testing Guideline", EPRI TR-107397
- (2) KHNP, 2010, "The development of Integrated heat exchanger management program for Nuclear power plants", Korea Hydro and Nuclear Power Corporation LTD., Daejeon, NETEC-HEX-000-SE-G005
- (3) Electric Power Research Institute, 1991, "Heat Exchanger Performance Monitoring Guidelines", EPRI NP-7552
- (4) The American Society of Mechanical Engineers, 1994, "Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants", ASME OM-S/G-Part 2
- (5) KHNP, 1992, "Instruction Manual of ASME SEC. III Heat Exchanger for YGN #3/4", Korea Hydro and Nuclear Power Corporation LTD., N923-OM-001-01