

# 증기발생기 파울링과 전기출력의 상관성 고찰

조남철<sup>†</sup>·신동만\*·김용식\*

## A Study on the Relationship between Steam Generator Fouling and the Electric Power

Nam Cheoul Cho<sup>†</sup>, Dong Man Shin\* and Yong Sik Kim\*

(Received 5 September 2017, Revised 3 November 2017, Accepted 15 December 2017)

### ABSTRACT

The heat transfer function or thermal performance is the most important function of the steam generator component in nuclear power plants. The declining of thermal performance, fouling does not affect the electric power of the nuclear power plant within a certain fouling level, but it affects the output when goes beyond the governor valve wide open of the turbine. The VWO steam pressure can be predicted through the thermal performance evaluation of steam generators in the nuclear power plant. In consideration of the fouling characteristics of the steam generator, methods of the thermal performance evaluation and fouling cases are reviewed, and also the critical VWO value is estimated through the actual thermal performance evaluation. It is necessary to apply the VWO theory based on the thermal performance of the steam generators.

**Key Words :** steam generator(증기발생기), thermal performance(열성능), fouling(파울링), fouling factor(파울링계수), VWO(밸브완전개방), electric power(전기출력)

### 1. 서 론

증기발생기는 기하학적으로 매우 복잡한 구조를 갖고 있기 때문에 열수력 측면에서도 매우 복잡하다. 증기발생기의 이차측 열유동 현상을 예측하는 해석코드가 개발되어 열유동 특성 및 파울링 분포 예측에 사용되고 있지만 운전연수의 증가에 따른 파울링 정도를 정량적으로 예측하지는 못한다. 파울링은 각 발전소의 운전 이력이나 수질 관리 등 발전소 고유의 조건에 따라 달라지기 때문이다. 그러므로 증기발생기 성능은 운전자료와 열전달 모델을 이용하여 파울링계수를 도출하여 활용한다. 국소 지점에

서의 파울링 정보를 제공하지는 못하지만 해당 발전소의 운전 연수 증가에 따른 파울링과 파울링에 의한 열성능 저하 정도를 매우 정확히 예측할 수 있다.

일반적으로 전열관 자유단(free span) 표면에 침적된 철부식생성물은 원자로 냉각재와 2차측 유체와의 열전달을 방해한다. 증기발생기 전열관의 열전달이 원활하지 않을 경우 정격출력을 유지하기 위해 2차측 포화온도가 감소하게 되어 증기발생기 출구 증기압력이 떨어진다. 증기압력 감소는 고압터빈 조절밸브 개도조절을 통해 수용할 수 있으나 밸브가 완전열림(VWO: valve wide open) 상태에 도달할 경우 터빈출력 감소현상이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 증기발생기 열성능평가 알고리즘을 살펴보고 국내 증기발생기에 대한 사례 평가를 통해 파울링에 의한 성능저하 현상을 확인하였다. 성능저하 추세를 바탕으로 VWO 증기압력 도달 시

<sup>†</sup> 회원, 한수원(주) 중앙연구원  
chonc7759@khnp.co.kr  
TEL: (042)870-5554 FAX: (042)870-5569  
\* 한수원(주) 중앙연구원

점을 예측하는 방법을 소개하고 파울링이 출력에 영향을 줄 수 있는 열성능 여유도에 대한 분석 결과를 제시한다.

## 2. 증기발생기 열성능

### 2.1 파울링(fouling)

증기발생기 전열관 표면에서 입자성 및 이온성 철 부식생성물의 침적으로 단열물질이 증가되어 열전달을 저해하는 현상을 파울링(fouling)이라 한다.

증기발생기 전열관의 열전달은 일반 열교환기의 열전달 현상과 동일하나 급수유로가 다양하고 복잡한 내부구조를 갖고 있으며, 2차 계통수가 증기발생기내에서 재순환이 이루어지므로 열전달 현상이 다소 복잡하다. 그러므로 증기발생기 열전달 성능지표로 총괄파울링계수(global fouling factor)가 활용되고 있다.

### 2.2 총괄열전달계수와 총괄파울링계수

증기발생기 모든 전열관의 열전달 면적, 1, 2차측의 온도 및 총괄 열전달율 등의 계산을 통해 가동중 총괄파울링계수의 변화추세를 관찰함으로써 운전기간에 따른 열전달 성능변화를 예측할 수 있다.

증기발생기 열성능 평가는 증기발생기 전열관의 열전달을 계산을 기초로 한다.

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (1)$$

여기서 Q는 열전달률, A는 전열관 2차측 전체면적,  $\Delta T$ 는 전열관 1차측과 2차측의 온도차로서 대수온도차로 나타낸다.

증기발생기의 2차측 열전달률  $Q_s$  및 2차측 포화온도가 결정되면 식(1)을 이용하여 총괄열전달계수 U 값을 계산할 수 있다.

총괄파울링계수 Rf는 식(2)와 같이 특정시점에서 열전달 계수의 역수 차이로 정의한다.

$$R_f = R - R_0 = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \quad (2)$$

여기서,  $R_0$ 와 R, 그리고  $U_0$ 와 U는 각각 가동 초기 및 특정 시점의 파울링계수와 열전달계수를 나타낸다. 상업운전 초기, 증기발생기 전열관에 스케일이 형성되지 않은 조건에서 계산된 열전달계수( $U_0$ )를

기준으로 매 운전기간 경과시점에 대해 총괄파울링계수(U)를 계산할 수 있다. Rf값의 증가는 증기발생기 열전달 효율이 감소함을 의미한다.

### 2.3 열성능 평가

Fig.1은 상업운전 초기부터 운전기간 경과에 따른 총괄파울링계수 변화의 일반적인 추세를 도식한 것이다. 대부분의 원전에서 유사한 증기발생기의 파울링 변화추세가 확인된다.

상업운전 초기 파울링이 급격히 증가한 이후 침적물량이 지속적으로 증가함에도 일정 기간 동안 파울링이 감소하는 현상이 나타난다. 이후 기공이 많은 스케일이 형성되면서 핵비등(nucleate boiling) 표면적이 증가하여 오히려 스케일이 전혀 없는 전열관 표면보다도 열전달 성능이 향상된다.

1996년 Allen Baum은 계획예방정비 후 기동 초기 총괄파울링계수가 급증하는 현상에 대한 원인 모델(Fig.2 참조)을 제안하였다<sup>(1)</sup>. 출력감발 등에 의해 스케일과 전열관의 열적 팽창 차이로 스케일의 일부가 박리되어 스케일과 전열관 사이의 공간에 물이 스며들면 열전달을 방해하는 현상이 발생할 수 있는 것으로

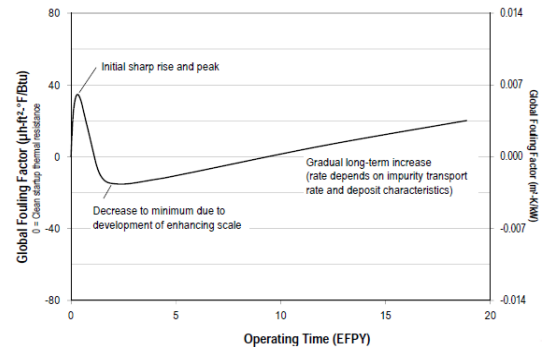


Fig. 1 SG performance trend curve<sup>(1)</sup>

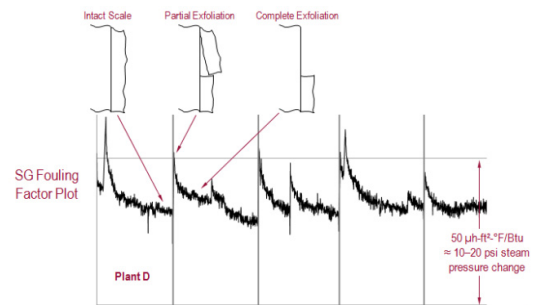


Fig. 2 Hypothesis for BOC FF transient condition<sup>(1)</sup>

추정한다. 스케일의 일부가 완전히 박리되면 다시 스케일이 형성된다. 이러한 현상은 약 1~5% 전열관에서 제한적으로 나타나는 현상이기 때문에 운전 기간의 경과에 따라 스케일량은 점차 증가한다. 대부분의 원전에서 계획예방정비 이후 기동 초기에 이러한 현상이 반복적으로 발생하고 있다.

### 3. 파울링계산 알고리즘

증기발생기 파울링계산은 EPRI 열유동해석 프로그램(ATHOS3)을 바탕으로 하여 자체 개발한 열 성능 진단 프로그램을 활용하였다<sup>(2,3)</sup>. 본 프로그램은 발전소 열출력 데이터와 증기발생기 설계자료, 전열관 정비이력 등을 입력자료로 하며, 설계변경 등을 반영한 데이터 보정을 통해 파울링 계산이 이루어진다.

#### 3.1 열전달률(Q)

원자로냉각재 유량은 개별 증기발생기 냉각재 유량이며, 고온관 및 저온관의 엔탈피는 과냉 조건이기 때문에 압력과 온도의 함수로 계산한다.

증기유량은 급수유량과 증기발생기 취출수 유량의 차이로 계산한다. 증기발생기 증기는 포화상태이므로 증기압력을 이용하여 포화증기 및 포화수의 엔탈피를 계산하고 급수는 과냉 상태이므로 압력과 온도를 이용하여 엔탈피를 계산한다. 증기발생기 취출수의 물성은 포화수로 가정하고 압력을 이용하여 엔탈피를 구한다.

$$Q_p = m_p(h_h - h_c) \quad (3)$$

$$Q_s = m_s h_s + m_{bd} h_{bd} - m_{fw} h_{fw} \quad (4)$$

식(3)의  $Q_p$ ,  $m_p$ 는 각각 1차측 열전달률과 질량, 그리고  $h_h$ ,  $h_c$ 는 각각 고온관 및 저온관측 엔탈피이다. 식(4)의 2차측 열전달률( $Q_s$ )에서  $m$ ,  $m_{bd}$ ,  $m_{fw}$ 와  $h_s$ ,  $h_{bd}$ ,  $h_{fw}$ 는 각각 2차측의 증기, 취출수, 급수의 질량과 엔탈피이다.

#### 3.2 증기발생기 열전달면적(A, m<sup>2</sup>)

증기발생기 전체 전열관의 2차측 면적은 관관내부에 삽입된 부분과 관막음된 전열관을 제외하고 계산한다.

$$A = \sum_{i=1}^{N_{row}} (TN_i - PTN_i) \{2(D_i - DTS) + B_i + \pi R_i\} \pi D_i \quad (5)$$

여기서  $TN_i$ 는 증기발생기 각  $i$ 행(row)에서 설치된 전열관 수량이며,  $PTN_i$ 는 각  $i$ 행(row)에서 관막음된 전열관 수량이다.  $D_i$ 는 전열관 직관부 길이,  $D_i$ 는 전열관 외경,  $R_i$ 는 전열관 곡관부의 반경이며,  $B_i$ 는 U-bend에서 전열관 상부 수평부 길이이다.  $DTS$ 는 관관두께이다.

#### 3.3 증기발생기 총괄열전달계수(U)

증기발생기 2차측 증기는 포화상태이다. 2차측 열전달율과 증기발생기 전열면적을 알고 있는 상태이므로 식(6)을 이용하면 총괄열전달계수에 대한 계산이 가능하다.

$$Q_s = U \times A \times \frac{(T_h - T_c)}{\ln\left(\frac{T_h - T_{sat}}{T_c - T_{sat}}\right)} \quad (6)$$

$T_h$  및  $T_c$ 는 각각 고온관과 저온관 온도이며,  $T_{sat}$ 는 포화온도를 나타낸다.

#### 3.4 기동원전 증기발생기 운전자료 분석

증기발생기 총괄 파울링은 침전물이 없는 상업운전 초기 시점을 기준하여 증감으로 나타낼 수 있다.

증기발생기 설계 성능자료 분석을 통해 열성능 평가 기초자료를 확보한다. 가동중 설계변경이 이루어지면 이를 반영한 데이터 보정이 필요하다. 발전소 운전 데이터는 아날로그 계측기 판독과 수치 기록의 오류, 측정 정밀도, 운전변수 기록방법 등에 의해 파울링 계산 오류가 발생할 수 있다. 또한 원자로냉각재 온도 불균일 현상(temperature streaming) 또는 계측기 고장이 발생할 경우에도 파울링 계산에 큰 영향을 미친다. 이러한 구간은 다른 증기발생기, 유사 호기 운전자료 등을 통해 운전변수를 보정할 수 있다.

총괄파울링계수(FF) 계산에는 발전소 계측기로부터 취득된 값이 사용되므로 불확도에 대한 통계적 분석이 필요하다. ASME performance test code PTC 19.1-1985에 기초한 다음의 식(7)을 이용하여 불확도를 평가한다.

**Table 1.** Example of fouling factor uncertainties

Type	Fouling Factor Uncertainty ( $\mu\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$ )		
	Clean Startup	Recent Oper.	Change
Clean baseline	30	0	30
Short-lived measurement errors	10	5	11
Pressure transmitter drift	14	14	20
Systematic $T_{\text{cold}}$ RTD error	10	10	14
FW venturi fouling / power cal. error	3	10	11
Streaming error in $T_{\text{hot}}$	5	15	16
Added separator pressure drop	0	5	5
<b>Total Statistical Uncertainty</b>	<b>36</b>	<b>26</b>	<b>45</b>

$$\Delta_{\text{statistical}}(F) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \Delta^2(x_i)} \quad (7)$$

F : fouling factor

$\Delta(x_i)$  : 측정변량의 불확도

식(7)을 이용하여 각각의 구성 항목 오차 요소를 반영하여 총 통계적 불확도를 계산한다. Table 1은 FF (fouling factor) 평가에 활용된 통계적 불확도의 산출 예시로서 통상적인 불확도 값으로 사용할 수 있다<sup>(4,5)</sup>.

### 4. 증기발생기 파울링 평가

국내의 원전에서의 증기발생기 파울링 평가는 주기적 또는 간헐적으로 발전소별 필요에 따라 수행된다.

Fig. 3~Fig. 5는 원자력 산업계에 소개된 호기별 특성을 잘 보여주는 해외 원전의 대표적인 파울링 진단 사례의 예시이다<sup>(1,5,6)</sup>.

원자로냉각재 온도변화 및 관막음을 변화는 증기압력에 영향을 미친다. 증기발생기 운전 및 정비에서 통상적으로 활용되는 경험 값은 다음과 같다.

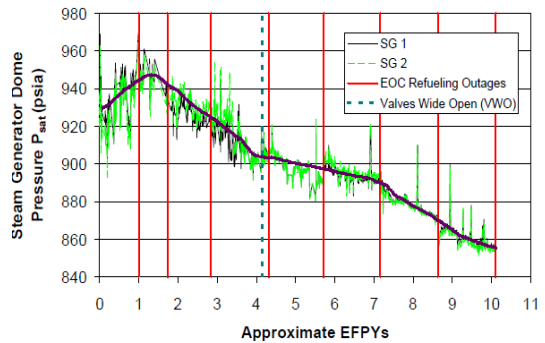
- 원자로 냉각재 평균온도 증가 :  $1^\circ\text{F} \approx 7\sim 8 \text{ psi}$  증기압력 증가
- 증기발생기 관막음을 증가 :  $1\% \approx \sim 2 \text{ psi}$  증기압력 감소

증기발생기 전열관 내부 표면에 산화물이 형성될 경우 열전달을 방해할 수 있다. 1980년 후반 발표된 자료는 가압경수로 증기발생기 내부 표면 스케일 두께는  $1\mu\text{m}$  정도인 것으로 제시한다. 이 정도의 스케

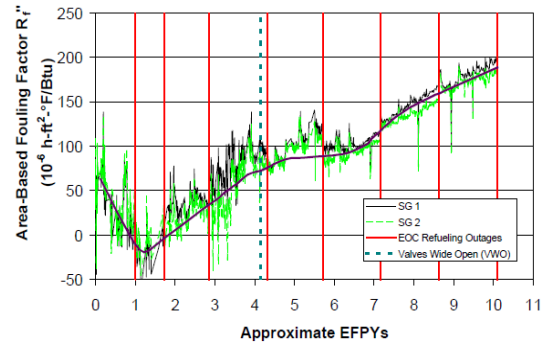
일로는  $1\sim 2 \mu\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$  정도 열손실을 유발하는 것으로서 외부 침적물의 영향에 비해 미약한 수준이다.

또한 증기발생기 2차측 유로홀에 침적된 슬러지는 2차측 유체속도를 낮추고 재순환비를 감소시켜 열전달 효율저하에 영향을 미칠 수 있다. 압력저하 효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 보고되었다.

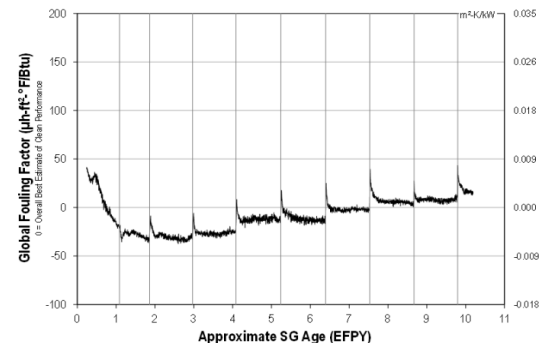
이밖에 증기발생기 상부 습분분리기 파울링, 예열기 파울링 및 증기발생기 1차 수실 분리판 누설 등도 증기압력 저하에 영향을 미칠 수 있는 요소이다.



**Fig. 3** Example A unit SG pressure<sup>(4)</sup>



**Fig. 4** Example A unit SG global fouling factor<sup>(4)</sup>



**Fig. 5** Example B unit SG global fouling factor<sup>(1)</sup>

국내 K 원전에 대하여 동일한 방법론으로 증기발생기 파울링 평가를 수행하여 예시한 해외원전 사례와 유사한 파울링 추세임을 확인하였다.

K 원전에 대해 상업운전 후 전출력 도달 시점의 파울링계수 평균값(623 $\mu\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}/\text{BTU}$ )을 계산하고 이를 전체 주기에 대한 열성능 평가기준으로 설정하였다.

가동 초기부터 ‘16년 말까지의 총괄 파울링계수와 출구 증기압력 변화추세는 각각 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 가동 연수 증가에 따라 침적물의 유입에 의한 파울링은 지속적으로 증가하고 증기압력은 점점 감소하는 추세를 보인다.

Fig.6에서 K 원전의 열성능 평가 결과는 가동 초기에 (+)로 출발하여 (-)로 낮아지다가 가동 기간 경과에 따라 다시 (+)로 점차 증가하는 전형적인 추세 경향을 보여준다. 증기발생기 연성화학세정으로 총괄 파울링계수가 약 68 $\mu\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}/\text{BTU}$  감소하고 증기압력은 약 2bar 정도 증가하는 변화를 확인하였다. 또한 출력증강으로 증기발생기 출구 증기압력이 약 3bar 정도 감소하고 총괄파울링계수도 크게 변화되었음을 보여주고 있다.

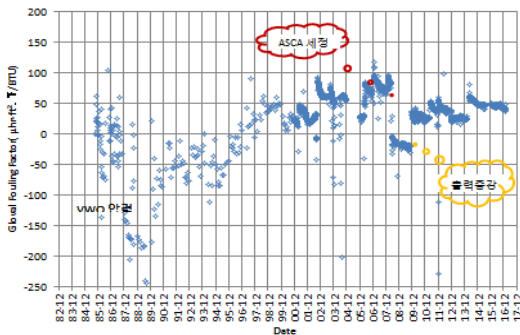


Fig. 6 K-unit sg global fouling factor ( $\mu\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}/\text{BTU}$ )

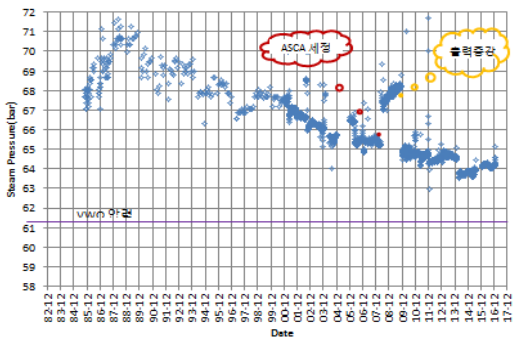


Fig. 7 K-unit SG steam pressure (bar)

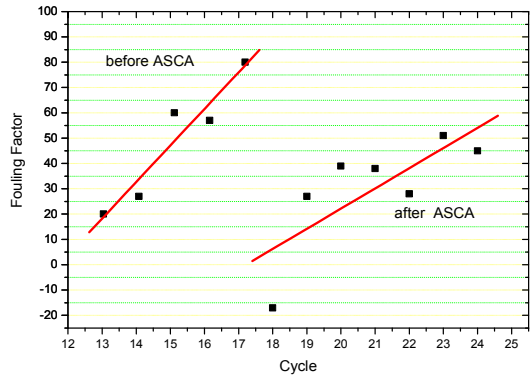


Fig. 8 K unit average fouling factor trend for cycles

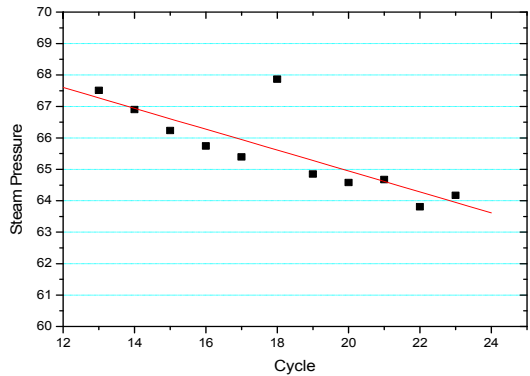


Fig. 9 K Unit average SG outlet steam pressure trend for cycles

Table 2. K unit average SG outlet steam pressure for cycle

주기	13	14	15	16	17	18
압력 (bar, abs)	67.5	66.9	66.2	65.7	65.4	67.9
주기	19	20	21	22	23	-
압력 (bar, abs)	64.8	64.6	64.7	63.8	64.2	-

Fig. 8은 세정 전·후 주기별 평균 파울링계수의 변화추세를 나타낸 것이다. 파울링은 한주기에 약 8 FF 이상 증가하는 것으로 나타났다. 파울링을 짧은 시간에 개선 또는 완화시키는 방법으로 세정기술이 일반적으로 활용된다. K 원전의 경우 ASCA 세정을 수행한 후 파울링 증가속도가 다소 완화되었음을 알 수 있다.

같은 방법으로 증기발생기 출구 증기압력을 분석하였다. 주기별 평균 증기압력 추세는 Fig.9와 같다. 평균 출구증기압력은 한주기에 약 0.33bar 감소하는 것으로 나타났다. Table 2는 주기별 평균 증기발생기 출구 증기압력을 정리한 것이다.

## 5. 증기발생기 열성능과 발전소 출력

### 5.1 열출력 여유도와 VWO 운전

발전소는 출력운전 중 증기압력이 고압터빈 조절밸브가 완전히 열린 상태(VWO)의 압력보다 높은 영역에서 운전되도록 설계되며, 그 차이만큼의 운전압력 여유를 갖는다. 이를 도식으로 나타내면 식(8)과 같다.

$$P_{margin} = P_{current} - P_{VWO} \quad (8)$$

여기서,  $P_{current}$ 는 현재 운전시점의 증기압력이며,  $P_{VWO}$ 는 밸브 완전열림상태에서의 증기압력을, 그리고  $P_{margin}$ 은 여유 운전압력을 나타낸다.

통상 고압터빈 조절밸브는 완전열림 상태의 압력보다 높은 압력에서 운전되고 있기 때문에 정상출력 운전 중 증기압력 감소는 전기출력에 영향을 미치지 않으나 VWO 조건보다 낮은 상태에서의 증기압력 변화는 발전소 출력에 직접적인 영향을 미친다.

Fig. 10은 전기출력과 증기발생기 관다발 영역 압력과의 관계를 나타낸 그래프이다<sup>(5)</sup>. 보는 바와 같이 고압터빈 VWO 조건에 도달하지 않은 상태에서 압력저하 현상은 발전소 전기출력에 미치는 영향이 미미하지만 증기압력이 VWO 조건에 도달할 경우 전기출력 감소에 직접적으로 영향을 미치기 시작한다.

그러므로 증기발생기 출구압력이 고압터빈 VWO 조건에 도달하지 않도록 증기발생기 열성능을 관리할 필요가 있다.

### 5.2 VWO(valve wide open) 증기압력

일반적으로 터빈밸브 완전개방(VWO) 압력으로 터빈밸브 입구 설계기준 압력을 적용하게 된다. 제작사별로 다소 차이는 있지만 최근에는 통상 ~3%의 마진을 가지도록 설계된다.

터빈밸브 완전개방(VWO) 증기압력은 실질적으로 경험하지 않으면 정확한 값을 알 수가 없다. 발전소별 정확한 VWO 증기압력을 알기 위해서는 실제 성능시험을 통해 VWO 증기압력을 확인하는 방법이 좋으나 원자력발전소는 설계특성상 과출력을 낼 수 없으므로 운전여유를 확인할 방법이 없다. 이를 보완할 수 있는 방법은 장기간의 출력운전 데이터와 파울링에 의한 출력감소 경험사례 또는 폭넓은 터빈밸브 열림

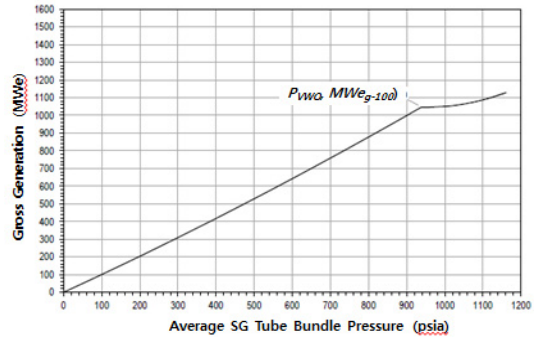


Fig. 10 Relationship between VWO condition and electrical generation<sup>(5)</sup>

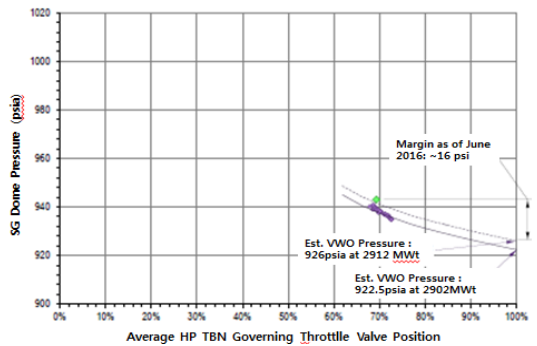


Fig. 11 K unit characteristic GV position - steam pressure curve<sup>(5)</sup>

운전데이터 등을 조합하여 상관관계를 도출하게 되면 VWO 증기압력을 보다 정확하게 예측할 수 있게 된다.

Fig.11은 증기발생기 돔 압력 특성곡선을 나타낸 것이다<sup>(5,7)</sup>. 특정 기간인 K 원전의 터빈밸브 개도 68%~72% 구간에서의 열출력 변동에 따른 증기발생기 돔 압력 데이터를 정리하고 동일 유형의 터빈밸브 제어방식을 갖고 있는 또 다른 원전의 터빈밸브 개도 70%~95% 구간에서의 증기발생기 돔 압력 데이터를 조합하여 정규화한 후 이를 K 원전에 적용하였다.

이렇게 도출된 K 원전의 터빈밸브-증기발생기 돔 압력 특성곡선에서 VWO 돔 압력은 926 psig인 것으로 계산되었다.

### 5.3 K 원전 VWO(valve wide open)

K 원전에 대하여 VWO 설계 기준압력과 파울링에 의한 VWO 예측 압력을 비교해 보았다.

K 원전의 최근 주기 평균 출구증기압력은 64.17

bar(930.7psia)이므로 증기발생기 돔 압력은 약 943 psia이다. 터빈 제작사가 제시하는 VWO 터빈 입구 압력<sup>7)</sup>은 61.94bar(898psia)이고 이에 해당하는 돔 증기압력 62.77bar(910psia)이므로 VWO 압력 여유는 약 2.2 bar가 된다. 앞서 파울링 평가에서 제시한 바와같이 현재의 수질관리 수준에서 한주기 평균 출구 증기압력의 감소는 약 0.33bar이므로 약 6주기 후에 VWO 증기압력에 도달할 것으로 예측된다.

한편 운전데이터 기준 터빈벨브개도-증기압력 특성곡선 평가를 통해 확인된 VWO 증기압력은 926psia [63.8bar(abs)]이므로 VWO 증기압력 여유는 약 1.1bar이다. 그러므로 운전데이터 기준으로는 3주기 이후 VWO 압력에 도달할 것으로 예상된다. 설계 기준 터빈 입구압력보다 VWO 마진이 크지 않은 것으로 분석되었다.

## 6. 결 론

증기발생기 열성능 평가방법에 대하여 살펴보고 열성능 평가를 통해 파울링 추세를 진단하였다. 증기발생기 파울링이 터빈출력에 영향을 미치기 시작하는 VWO 증기압력 평가방법을 제시하고 평가를 통해 VWO 증기압력 도달 시점을 예측하였다. 보다 정확한 VWO 증기압력을 예측한다면 유용한 관리기준이 될 것이다.

증기발생기 출구압력이 VWO 압력에 도달하는 시점을 고려한 파울링 관리가 필요하다.

## 참고문헌

- (1) Kreider, M. A., Moroney, V. D., Varrin, R. D. and White, G. A., 2014, "Steam Generator Thermal Performance Transients," *Proc. of Steam Generator Management Program 2014 Steam Generator Secondary Side Management Conference (EPRI No. 3002002756)* Baltimore, MD, Session 4, Paper No.7.
- (2) EPRI, 1986, "ATHOS 3 : A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators," *NP-4604-CCM*.
- (3) KHNP, 2007, Steam generator thermal-performance evaluation program (SGTEP).
- (4) EPRI, 1998, "Steam Generator Thermal Performance Degradation Case Studies", *TR-110018*, pp. 4-1~3, 7-15.
- (5) Domininon Engineering Inc., 2016, "Economic Assessment of tube Deposit Management Options for the Steam Generator at K Unit," *R-4892-00-01, Rev.0*, pp. 4-49
- (6) Kreider, M. A., White, G. A., Varrin, R. D., Jr., et al., 2003, "Thermal Performance Trends in Replacement Steam Generators," *Proc. of 2003 Steam Generator Secondary Side Management Conference (EPRI No. 1008468)*, Savannah, GA, pp.838-875.
- (7) Lee, W. K., 2015, "Difference of the TBN Performance between Design and Actual in NPP," *KHNP 5th Workshop on Improvement of the Performance and Efficiency in NPP*, pp. 3-10.