'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로 냉각재 온도 감소 운전에 따른 터빈출력 영향 평가

Turbine Output Evaluation according to Operation at Reduced Reactor Coolant Temperature

최광희, 이선기, 박수기, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 문지동 103-16

요 약

증기발생기에서는 전열관 1,2차측 응력부식, 마모 등 다양한 형태의 손상이 발생한다. 이중 1차측 균열은 1차 냉각수 응력부식균열(PWSCC)에 의해서 발생되며 이에 영향을 주는 요소는 재질 특성과 가공 잔류응력 그리고 운전온도이다. 이를 효과적으로 줄이기 위해서 조절이 가능한 것이 운전온도이다. 이를 낮추어 운전하므로써 응력 부식을 상당히 줄일 수 있다. 영광 3,4호기의 모델발전소인 Palo Verde 1,2,3 등 많은 원전에서 일차 냉각재 온도를 낮추어 운전하므로 써 증기발생기의 1차 응력부식을 감소시켜 증기발생기의 수명을 관리하고 있다. 그러나 증기발생기의 손상을 줄일수 있는 반면에 터빈출력이 감소하게 되므로 적절한 온도 감소 폭을 결정하기 위해서는 정확한 터빈출력 감소량을 산출하여야 한다. 본 논문에서는 일차 냉각재 온도를 낮출 때 증기발생기 출구 조건 변화와 이로 인한 터빈출력의 변화를 평가하였다. 이번 분석에서는 출력을 회복하기 위해 터빈 Control valve를 전개도 운전(Valve Wide Open)하는 상태에서 수행하였으며, 1차측 온도를 10°F 내릴 때 주증기 압력은 약 9.3% 감소하고 이로 인해 터빈출력은 약 3.5% 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract

Steam generators usually have several kinds of damages such as primary and secondary side of tube stress corrosion cracking, fretting wear etc. Among them, Primary Water Stress Correction Cracking(PWSSC) are related with material properties, residual stress coming from manufacture and operating temperature. But only operating temperature can be controlled without hardware change. Actually, Palo verde 1,2,3 nuclear station which is model plant of Yonggwang nuclear unit 3,4 are operating at reduced RCS temperature for the reduction of the primary side corrosion cracking. The life of steam generator tube can be elongated by ORT (Operation at reduced temperature), while turbine output comes to reduction. This paper evaluated steam pressure variation from ORT and detail turbine output due to reduced steam

temperature. This evaluation is based on turbine control's valve wide open(VWO) condition for power recovery of turbine output. As a result, main steam pressure at 10°F reduced RCS temperature reduced to 9.3% of rated power, and turbine power reduced to about 3.5% of rated turbine output(1049.461MWe).

1. 서 론

영광 3,4호기의 증기발생기의 세관보호를 위해서 일차측온도를 내릴 때 증기발생기내의 열전달은 고온관 온도와 저온관 온도와의 차이에 비례하여 이차측 즉 증기발생기 출구에서의 증기 조건을 결정한다. 증기발생기 당 냉각재 유량은 60.75×10^6lb/hr이고 고온관 및 저온관의 냉각재 온도는 621.2°F, 564.5°F이며, 냉각재의 운전 압력은 2250psia이다. 증기 압력은 1070psia이고 급수 온도는 450°F이며 급수 유량은 6.36×10^6lb/hr이다. 전출력 정상운전 조건에서 증기발생기 노즐 출구의 습분 함유율은 0.25%이하가 되도록 습분분리기(moisture separator) 및 steam drier가 설치되어 있다. 증기발생기의 전열관 개수는 8214개로 제작되어 있으며 이 갯수는 8% 운전 여유도가 고려된 값이다[1]. 이러한 증기발생기의 설계값을 이용하여 증기발생기의 출구 증기조건을 일차냉각재 감소 온도별로 계산하고, 그 출구 증기조건 변화에 따른 터빈출력 변화를 계산하였다.

2. 증기발생기 출구 증기 조건 계산

증기발생기를 통하여 제거되는 일차 계통의 열부하와 증기발생기에서 증기를 발생시키는 데 소요되는 열부하는 다음 식과 같다.

$$Q_p = W_p C_p (T_h - T_c) \quad (식1)$$

$$Q_s = W_s (h_s - h_{fw}) \quad (식2)$$

여기서, T_h와 T_c는 일차 계통의 원자로 냉각재 고온관과 저온관 온도이며 h_s과 h_{fw}는 증기와 급수의 엔탈피이다. W_p와 W_s는 냉각재와 증기의 유량이며 C_p는 냉각재의 비열이다. 발전소가 출력 변화 없이 정상상태(steady state)로 운전되기 위해서는 일차 계통에서 발생된 열이 증기발생기를 통하여 이차 계통으로 균형을 이루며 전달되어야 하고, 이를 위해 증기발생기는 충분한 열전달 면적을 갖도록 설계되어야 한다. 증기발생기에서의 열전달율을 대수평균 온도차로 표현하면 다음과 같다.

$$W_p C_p (T_h - T_c) = W_s (h_s - h_{fw}) = UA\Delta T_{lm} \quad (식3)$$

여기서, U는 증기발생기의 튜브 안쪽 및 이차측 관다발에서의 열저항과 튜브에서의 열저항이

모두 고려된 총괄 열전달 계수이다. 증기발생기의 열전달 면적은 발전소가 100% 전 출력으로 운전될 때 일차측 및 이차측의 열 평형을 만족하도록 주어진 열수력 변수에 의해 위 식으로 구할 수 있으며 실제 열전달 면적은 위에서 계산된 면적에 설계 여유도를 고려하게 된다.

원자로 열출력, 냉각재 유량, 고온관 온도, 저온관 온도, 급수 온도, 급수 유량, 증기 압력 또는 증기 온도, 열전달 면적이 증기발생기 주요 열수력 변수이다. 결정하여야 할 변수의 수에 비하여 만족하여야 할 식의 수가 적으므로 일차측 및 이차측의 열 평형과 증기발생기의 열전달 성능을 만족시킬 수 있는 이론적인 조합은 무수히 많다. 이들 변수는 발전소 안전성 및 경제성, 참조발전소로부터의 설계변경에 따른 영향과 각각의 열수력 변수가 갖는 제한 조건을 종합적으로 고려하여 결정된다. 이들 열수력 변수는 중요도 및 제한 조건의 우선 순위에 따라 순차적으로 결정된다. 냉각재 고온관 온도 감소 운전에서는 증기발생기 열전달 면적이 우선적으로 고정되고 고온관 온도 감소에 따른 2차측 압력이 검토되어야 한다.

냉각재 고온관 온도에 따른 저온관 온도는 (식1)로부터 유도된 다음 식으로부터 계산된다.

$$T_c = T_h - \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{V}}\right)_{ref} \cdot \frac{v_p}{C_p} \qquad \text{(식4)}$$

여기서, v_p는 냉각재 저온관 온도(T_c)와 냉각재 운전 압력 2250 psia에서의 비체적이다. C_p는 냉각재의 비열이다. $\left(\frac{Q}{V}\right)_{ref}$ 는 영광 3,4호기 설계 조건(T_h=621.2°F, T_c=564.5°F)에서의 증기발생기 열부하 및 체적유량이다. 고온관 온도 감소에 따른 저온관 온도 계산은 냉각재의 질량 유량을 고정시키는 방법과 체적 유량을 고정시키는 방법이 있다. 발전소 안전해석 및 냉각재 펌프 설계에서 중요하게 다루어지는 변수는 냉각재의 체적 유량이다. 따라서 고온관 온도 감소 운전에 따른 검토 대상 업무 범위를 최소화하고, 주요 기기의 설계 요건에 대한 영향을 최소화하기 위하여 냉각재 체적 유량을 고정하고 저온관 온도 및 냉각재 질량 유량을 계산하였다.

고온관 온도 감소에 따른 냉각재의 질량 유량은 영광 3,4호기 설계 조건에서의 체적 유량과 비체적의 곱으로 다음과 같이 계산된다.

$$W_p = \dot{V}_{ref} \cdot v_p \qquad \text{(식5)}$$

여기서, 비체적은 저온관 온도 및 냉각재 운전 압력에서의 값이다.

증기발생기 압력 및 포화 온도 계산은 증기발생기 열전달 면적 설계에 이용되고 있는 SAFE 코드를 이용하여 계산하였다. SAFE는 증기발생기 열전달 면적 계산과 이차측 압력 계산에 주로 이용되는 코드로 ABB-CE의 기기설계자가 축류 이코노마이저를 갖는 증기발생기 설계에 사용하고 있는 코드이다[2]

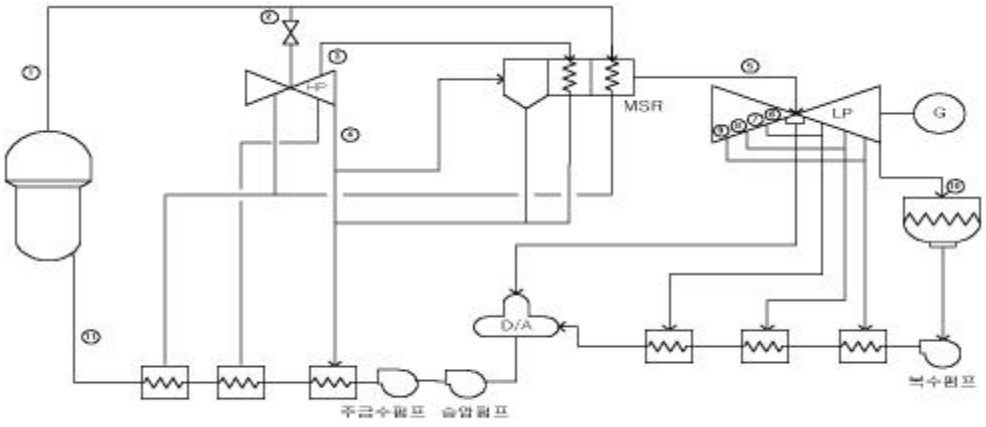
(표 1)은 고온관 온도 감소에 따른 저온관 온도, 냉각재 유량, 증기 압력 및 증기 온도, 증기 유량이다. 증기발생기 설계 제한 조건인 8% 관막음을 수행한 상태에서 계산하였다. 체적 유량을 고정시키고 저온관 온도를 계산하였으므로 냉각재 운전 온도 감소로 인한 냉각재 밀도 증가로 냉각재의 질량 유량은 증가한다. 증기 압력은 거의 선형적으로 감소하고 증기의 질량 유량은 약간 감소한다. 그러나 증기 압력 감소에 따른 증기의 밀도 감소로 체적 유량은 증가한다. 고온관 온도가 10.2°F 감소한 611°F의 경우 증기 압력은 9.3% 감소하며 증기의 체적 유량은 11.1% 증가한다.

(표 1) **고온관 온도 감소에 따른 증기 압력 및 증기유량**

고온관 온도 T_h(°F)	저온관 온도 T_c(°F)	증기압력 P_s (psia)	증기온도 T_s (°F)	증기 질량유량 m_s ($\times 10^6$ lb_m/hr)	증기 체적유량 V_s ($\times 10^6$ ft^3/hr)	체적유량 변화율
621.2	564.5	1070.0	552.8	6.363	2.624	
619	562.06	1047.2	550.2	6.356	2.685	2.3%
616	558.76	1017.6	546.7	6.346	2.743	4.5%
614	556.56	998.3	545.5	6.340	2.820	7.5%
611	553.29	970.0	540.9	6.332	2.914	11.1%
608	550.03	941.2	537.3	6.324	3.028	15.3%

3. 터빈사이클 출력 계산

(그림1) **영광 3,4호기 터빈사이클 개략도**[3]



(표 2) **터빈사이클 주요 성능변수값**

입력항목	ORT 온도 / 기준값	5°F	7°F	10°F
열출력(Mw)	2825(100%)			
주증기 압력(psia)	1070(1092.8)	1039.3	1019.6	990.7
주증기건도(%)	0.9975	0.9975	0.9975	0.9975
교축 압력(psia)	1035	1005	986.2	958.3

주증기 압력은 튜브 Plugging율이 8%에서 계산된 값으로 실측시에는 차이가 있기 때문에 증기발생기 세관 Plugging 0%에서의 설계값과 측정값의 차이만큼 더한 값으로 계산하였다.

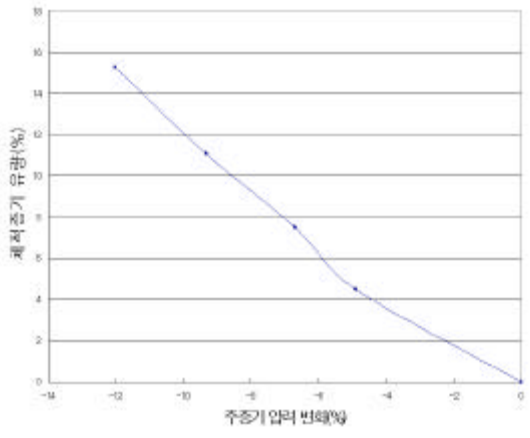
3.1 계산 방법

터빈사이클의 제작사 설계코드인 THB를 사용하여 계산하였으며 증기발생기 출구 증기조건을 제외하고 모두 발전소 설계조건을 그대로 사용하였다. 여기에서 터빈출력을 최대로 회복하기 위하여 고압터빈 입구의 Control 밸브를 완전히 개방하였을때의 조건, 즉 VWO 상태에서의 터빈출력을 계산하였다. 여기에서 적용된 주요 설계값은 복수기 압력이 1.5 in Hg, 역율은 0.9, 각 급수가열기의 종단온도차(TTD)는 2.8℃, 배수온도차(DCATD)는 5.6℃를 적용하였고 증기발생기 출구에서 고압터빈 입구까지의 압력강하는 3.27%를 적용하였다.

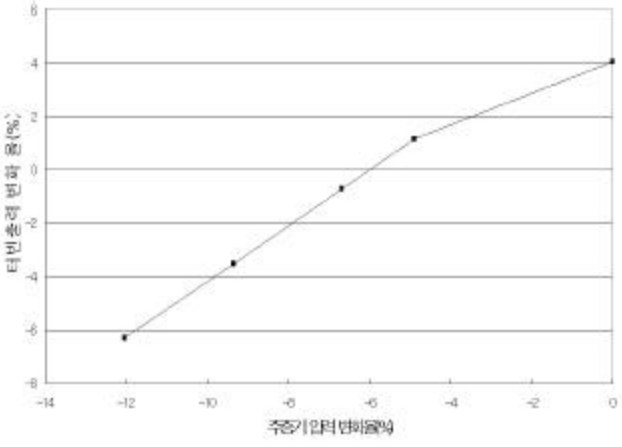
3.2 터빈출력 계산 결과

터빈출력은 다음과 같이 주증기 압력이 감소됨에 따라 감소하며 압력이 감소할수록 더 큰 폭으로 줄어드는 것으로 나타났다. 여기서는 (그림 2)는 주증기 압력이 감소함에 따라 체적 증기량이 증가되는 것을 보여 준다. 원자로 냉각재 온도를 5, 7, 10, 13°F 내릴 때 주증기 체적유량은 각각 4.5%, 7.5%, 11.1%, 15.3% 증가한다. (그림 3)에서는 VWO 조건에서 주증기 압력 변화 대비 터빈출력의 변화를 나타내었다. 기준되는 터빈출력은 100% 원자로 출력에서의 계약자 보증 전기출력값 1049.461MWe를 사용하였다. 원자로 냉각재 온도를 5, 7, 10, 13°F 내릴 때 주증기 압력은 각각 4.9%, 6.7%, 9.3%, 12.3% 감소하며, 이로 인해 터빈출력은 기준 터빈출력 대비 1.2% 증가, 0.7%감소, 3.5% 감소하는 것으로 나타난다. (그림 4)에서는 ORT 온도범위별 원자로 출력에 차이가 있음을 보여준다. 이는 일정온도 이상 감소할 때에는 체적증기유량의 증가분 만큼 터빈에서 수용하지 못하므로 원자로 출력이 100% 아래로 떨어진다. 즉 원자로 냉각재 온도가 감소 함에 따라 터빈출력이 감소하게 된다. (그림 6)은 ORT 온도 범위별 터빈출력의 변화를 보여 준다.

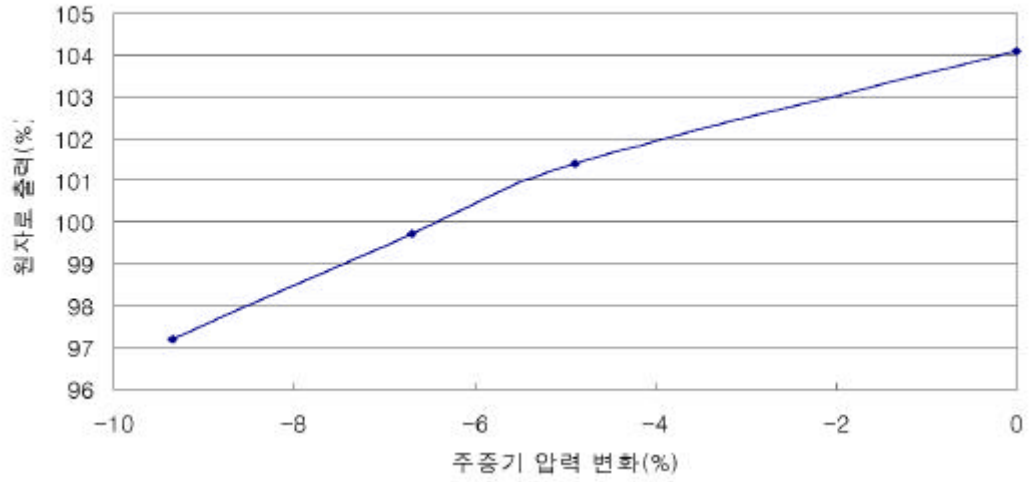
(그림 2) 주증기 압력과 체적증기 유량변화



(그림 3) 주증기 압력과 터빈출력 변화



(그림 4) 주증기 압력변화에 따른 원자로 출력변화(%)(VWO)



4. 결과 평가

4.1 터빈출력 변화 원인

주증기 압력이 감소함에 따라 터빈출력이 감소하는 이유는 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 터빈으로 유입되는 증기가 압력이 감소함에 따라 체적유량이 증가되어 터빈으로 유입되는 증기가 제한되기 때문이다. 고압터빈의 설계시 증기량의 여유용량은 약 5%로 설계되어 있다. 이 때문에 증기의 체적이 증가됨에 따라 이를 다 수용하지 못하게 되며, 앞의 (그림 2)와 (그림 4)에서 보면 10°F ORT 적용시에 1차 계통으로부터 받을 수 있는 출력은 약 97.2%로 제한되는 것으로 나타났다.

다른하나는 주증기 압력이 감소함에 따라 열역학 2법칙에서의 유용에너지의 감소로 인해 터빈에서의 일 할수 있는 최대 잠재에너지가 감소하기 때문이다.[4,5,6]

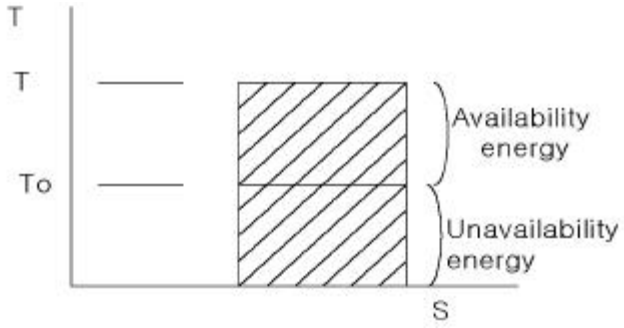
어떤 물질이 가지고 있는 에너지를 모두 사용하여 최대의 일을 할 수 있으려면 주위(surroundings)와 평형 상태 즉 주위온도(To), 압력(Po)까지 평형 상태에 도달하여 더 이상의 화학적 작용이 없을 때 그 물질이 처음 가졌던 에너지를 모두 사용했다고 볼 수 있으며 이때 최대의 일을 할 수 있다. 주위와 평형 상태에 이르면 잠재 에너지(Potential energy)는 최소가, 속도는 영(zero)이 된다. 이때 최대의 일을 할 수 있는 잠재 에너지를 유용에너지의 최대값, 유용성(Availability)이라고 부른다. 이때의 최대 잠재에너지식은 다음과 같이 카르노 사이클에서 처음계가 갖는 온도가 높을수록 최대 에너지는 증가한다.

즉, 열역학 2법칙에서

△S = Qo/To이고 , 최대일은 Wmax = Q - To△S의 식으로 표현된다.

전체에너지 Q에서 주위에 버려진 일의 차이가 된다. 따라서 계가 갖고 있는 온도가 높을수록 최대에너지는 증가하므로 포화압력이 증가될수록 유용에너지는 증가한다.

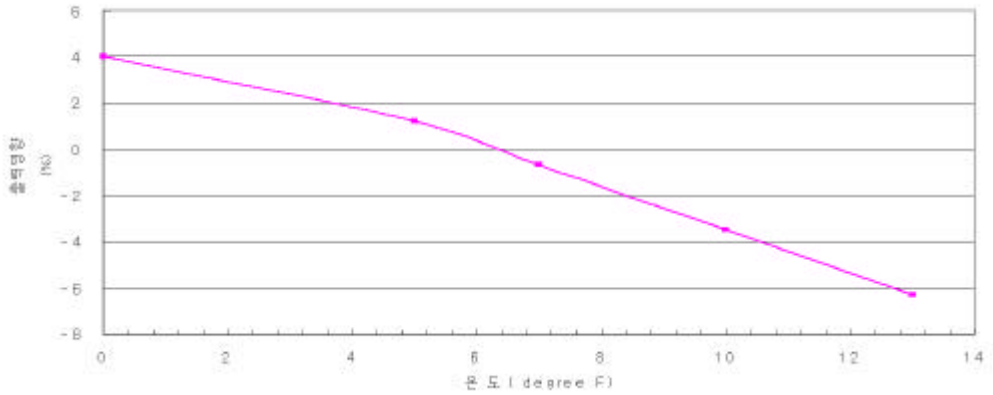
(그림 5) Carnot 사이클에서의 T-S 선도



4.2 ORT 적용온도와 출력손실 관계

아래 (그림 6)에서 보면 출력손실 없이 일차측온도를 내릴수 있는 범위는 약 6 7°F인 것으로 나타났다. 고온관 온도의 낮춤으로 인한 터빈출력 손실은 주증기 압력이 낮아짐에 따른 출력손실과 주증기 밀도의 감소로 인해 체적유량이 증가되고, 터빈으로 유입되는 증기량이 제한되어 원자로 열출력이 100% 모두 수용되지 못하는 것이 주요 원인이다. 즉 온도를 많이 내릴수록 터빈에서의 유입 증기량이 더 많이 제한되어 출력손실이 더 늘어난다. 위 분석 결과를 보면 감소온도는 6 7°F까지 감소하는 경우에는 출력회복이 가능하나 그 이상의 온도를 감소하려면 감소되는 출력을 회복하기 위한 출력 회복 방안이 필요하다. 증기발생기를 그대로 사용하면서 출력을 회복하는 방안으로는 두가지 방안이 있다. 하나는 고압터빈의 부분적인 설계변경이고, 다른 하나는 설계변경 없이 급수온도를 감소하여 운전하는 방안이 있다.

(그림 6) ORT 온도 범위별 터빈출력 변화(VWO 조건)



4.2 터빈출력 회복을 위한 방안

4.2.1 부분적인 터빈 설계 변경

터빈출력을 회복하기 위해서는 고압터빈 설비를 일부 개선함으로써 출력을 회복할 수 있다. 미국 ANO-2 원전의 경우 고압터빈1,2단 설비개선으로 약4%의 출력을 회복하였고, San Onofre 2,3 원전의 경우 고압터빈 1,2,3단의 고정단 교체 및 고압터빈 입구밸브를 개선하여 터빈출력을 100% 회복한 사례가 있다. 이와 유사한 방법으로 부분적인 터빈 설계변경 방법을 적용할 수 있다. 그러나 이에 대한 투자비용과 소요기간을 고려하여야 한다.

4.2.2 급수 온도 감소 운전 방안

이 방법은 1차측 출력을 더 많이 얻고 이로 인해 터빈출력을 증가시키기 위한 방법으로서 주증기 압력은 일정하게 유지시킨 상태에서 주급수 온도를 감소시킬 때 원자로 출력을 증가시킬 수 있다. 이는 고압터빈에서 첫 번째 추기 되어 고압급수 가열기로 가는 증기를 공급하지 않고 터빈출력에 사용하는 방법이다. 10°F ORT 적용시 고압급수 가열기로의 급수 유량을 약 55% By-pass 시킬 때 원자로로부터 100%의 출력을 수용하는 것으로 나타났다. 이때 주급수 온도는 약 27°F를 감소하며, 터빈출력은 약 2.2% 증가되는 것으로 계산되었다. 이는 전기출력 손실을 3.5%에서 1.3%로 줄일 수 있게 된다.

5. 결론

영광 3,4호기 증기발생기의 일차응력부식을 줄이기 위해 원자로 냉각재 온도를 낮출때 터빈출력의 변화 정도를 계산하고 이의 원인과 대책에 대해 검토하였다. 원자로 냉각재 온도를 5, 7, 10, 13°F 내릴 때 주증기 압력은 각각 4.9%, 6.7%, 9.3%, 12.3% 감소하며, 이때 VWO 운전시의 터빈출력은 정격 터빈출력 대비 1.2% 증가, 0.7% 감소, 3.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이의 원인으로는 체적증기 유량 증가에 따른 터빈유입의 제한으로 원자로 출력을 다 받아 들일수 없는 것이 주요한 원인이다. 또한 주증기 압력 감소에 따라 증기가 보유하고 있는 최대에너지가 감소하기 때문이다. 터빈출력을 회복하기 위한 방안으로 급수 온도의 감소 운전을 통해 원자로 출력을 모두 받아들였을 때 터빈출력은 98.7% 까지 회복할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1) 영광 3&4 FSAR 5.4.2
2) U-튜브 증기발생기 열수력 설계 및 성능해석 코드, TM.95ZJ16.P1998.785
3) 영광2발전소 "영광 3,4호기 인수성능시험보고서" 1996.8
4) Richard E. Sonntag , Gordon J.Van Wylen "Introduction to thermodynamics " 3rd 1990
5) J.B.Jones and G.A. Hawkins, "Engineering Thermodynamics", John willey & Sons, 1960
6) K.H.Choi, "Thermal performance analysis of Yonggwang unit 1 according to reactor coolant temperature change", 1996

(그림7) **영광 3,4호기 터빈열평형 계산 결과(주증기 압력 9.3% 감소시, VWO 조건)**