2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

복수기 진공영향인자 분석을 통한 발전소 효율향상방안에 관한연구

A Study on the Improvement of Plant Efficiency by Analysing the Factors That Affect the Vacuum of Main Condenser

박순열

한국전력공사
서울특별시 강남구 삼성동 167

요 약

발전소에서 효율을 향상시키는 방법은 여러 가지가 있다. 여러 방법중 복수기 포화압력을 낮추어 터빈의 일을 최대화시키는 방법이 있다. 본 연구는 영광 원자력 발전소 3,4호기를 기본 모델로 하여 복수기 진공영향 인자를 HEI 분석방법론을 이용해 고찰 및 분석하여 진공관리를 통한 발전소 이용률 향상에 도모 하고자 한다. 그 결과는 냉각해수의 온도에 따라 순환수 펌프의 최적운전 시기를 결정하여 소내소비전력 감소를 위해 사용되고 정비를 위한 복수기 수실차단시 순환수 온도에 대한 복수기 압력의 예측, 복수기 진공영향 가변인자의 변화에 따른 진공도의 변화에 대한 부하 제어량 및 기준 진공도를 제공한다. 또한 진공에 영향을 주는 계통과 인자에 대한 신뢰성 향상방안을 수립하고 인자별 점검표를 수립하였다.

Abstract

There are several ways to improve the efficiency of a power plant. From among several ways, there is the way that can be attained by maximizing the turbine work by decreasing saturated pressure of main condenser. On the basis of Yong-Gwang nuclear power plants #3 and #4, it is intended to increase the efficiency of power plant through vacuum control by HEI analysis measure in the factors that affect a vacuum of main condenser. The result will contribute to decide optimum operating time of circulating pump complying with the decrease or increase of sea water temperature for the saving of electric power consumption in unit, to predict a pressure increase of condenser in response to respective circulating water temperature when circulating water box is blocked and solve the subsequent load control quantity and present standard vacuum corresponding to the respective variable factors that affect a vacuum of main condenser. It is also formulated a plan to improve reliability for the systems and the factors that affect a vacuum, and to manage the vacuum by using check list of the factors.

제 1 장 서 론

제 1 절 개 요

주 복수기는 발전소에서 가장 낮은 압력을 유지하고 있다. 그것은 터빈으로 공급되는 증기의

열낙차를 최대화 시키기 위해서 필수적이다. 국내외 원전 대부분의 발전소가 진공상실로 인한 이용률 저하 경험을 가지고 있다. 해수의 온도저하 및 상승에 따른 적절한 순환해수 펌프의 운전시기 결정의 문제, 공기 유입시 증상에 대한 대응방안, 진공관련 계통의 고장발생시 계통차단에 의한 복수기 압력 상승 예측, 고온 유입수 또는 저온 유입수의 유입에 의한 복수의 온도 상승 및 응축 감압현상, 순환수 유량률에 영향을 주는 요인, 진공영향 계통 및 인자의 관리방안 등 운영중 많은 어려움을 갖고 있다. 본 논문은 복수기 진공관리를 통해 터빈의 일량을 극대화시켜 발전소 효율을 향상하기 위한 실용가능한 방법론을 제시하고자 한다. 복수기의 포화압력을 낮추기 위해서는 복수기 진공에 영향을 주는 가변인자를 면밀히 고찰 및 분석해 원인 인자를 도출해야 한다. 영광 원자력 발전소 3,4호기를 기본 모델로 하여 복수기 진공영향 인자를 고찰 및 분석하여 발전소 이용률 향상에 도모 하고자 한다. 본 논문의 연구 방향은 다음과 같이 설정하였다.

첫째 현재 운영중인 영광 3,4호기의 복수기 진공 저하이력 및 진공실적 고찰
둘째 복수기 진공 저하로 인한 비계획 발전손실량을 CE형 원전과 영광 원전 3,4 호기 비교 분석
세째 복수기 튜브 열전달 메카니즘의 이론적 고찰 및 진공영향 인자 분석
네째 진공관리를 통해 소내 소비전력의 절감을 위한 최적의 기기 운영방안 수립
다섯째 복수기 진공 영향인자 체크리스트를 이용한 진공관리 방안 수립

제 2 절 연구 배경

1. 복수기의 일반적 사항

가. 복수기 일반적 기능

(1) 저압터빈에서 배출된 증기의 응축 저장 및 탈기 기능
(2) 저압급수가열기 추기응축수, 주급수펌프 구동증기 배기, SPE[1], SJAE[2] 증기 발생기 취출수 및 각종 계통에서 방출되는 배수 및 배기의 수집장소
(3) 터빈 우회계통의 최소 40%의 정격 주증기 유량률 열침원 기능
(4) 설계압력 유지로 저압터빈을 통과하는 증기의 열낙차 증대에 의한 터빈효율 향상에 기여

나. 복수기 계통의 설계평가 기준(US NRC SRP 10.4.1)

(1) 복수기 튜브를 통한 응축계통으로의 냉각수 유입 감시, 제어, 복구수단 제공
(2) 허용수준의 냉각수 유입 및 유입된 운전시간 동안 복수 및 급수의 수질이 안전 제한치 이내 보증
(3) 복수기 계통으로 유입 및 유출되는 방사성 물질이 감시되고 환경으로 허용값 이상의 방사성 물질 방출의 차단
(4) 올바른 모드로 운전됨을 결정 및 입증하기 위한 계측 및 제어설비
(5) 복수기 손상으로 인한 Flooding 현상으로 필수계통 운전의 방해여부
(6) 복수기 진공상실 감시 및 Steam source 격리 제공
(7) 터빈 우회계통으로부터 증기방출로 인한 기기 및 튜브 손상방지

2. 진공 저하이력 및 비계획 발전손실량 고찰

가. 영광 3,4호기의 주요 진공 저하이력 및 비계획 발전손실량

- 35.38원/Kwh, 1999년도 발전원가 적용

주 1) Steam Packing Exhauster
2) Steam Jet Air Ejector

진공저하 이력일	호 기	발생 원인	비계획 발전손실량	
			Kwh	원
95. 9. 21	4	복수기 A-2 튜브 1개 누설 - 증기덤프의한 충격	108,000	3,821,040
96. 2. 14	4	순환해수 펌프 02P 정지 - 보조냉각수 제어전원상실 접점고장	N/A	N/A
97. 1. 7	3	복수기 A-1 튜브 1개 누설	23,000	813,740
97. 6. 2	4	복수기 B-1 3개, B-2 1개 누설	50,642,333	1,791,725,742
98. 2. 19	3	복수기 A-2 튜브 1개 누설	8,250	291,885
98. 9. 12	3	복수기 튜브세정계통 재순환 유로(C-1) 막힘(따개비 서식)	302,250	10,693,605
98. 9. 19	4	복수기 튜브세정계통 재순환 유로(C-1) 막힘	422,400	14,944,512
99. 3. 23	4	SJAE 기능저하 - 중간 응축기 TRAP 막힘	42,300	1,496,574
99. 4. 8	3	터빈우회밸브 1008 내부누설 - 차기 예방기간중 보수	N/A	N/A
99. 7. 16	3	SJAE 기능저하 - 후단 응축기 복수유량 저하	19,811,520 (99.7.16~ 00.06.30 현재)	700,931,578
99. 10. 11	4	정비작업중 진공펌프 및 SJAE 차단 - 인적 실수	129,250	4,572,865
00. 1. 23	3	순환해수펌프 04P 모터 하부 베어링 이음발생	N/A	N/A
00. 1. 29	3	터빈우회밸브 1007 내부누설	N/A	N/A
00. 2. 1	4	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(B-2) 막힘	9,120	322,665
00. 2. 4	3	복수기 수실 프라이밍 펌프 압력스위치 고장	N/A	N/A
00. 4. 4	3	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(B-1) 막힘	14,000	495,320
00. 4. 7	3	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(B-2)막힘	36,000	1,273,680
00. 4. 8	3	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(A-2)막힘	26,400	934,032
00. 4. 9	3	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(A-1) 막힘	24,000	849,120
00. 4. 20	3	복수기 튜브 세정계통 볼순환 유로(A-1) 막힘	18,200	643,916
00. 5. 15	3	CWP 03P TRIP	1,800	63,684

표 1-1 영광 3,4 호기 진공 저하이력 및 비계획 발전손실량

나. 미국내 CE형 원전의 복수기 및 관련계통 고장으로 인한 비계획 발전손실량

(1) 발전소별 상위 10위의 기여인자중 복수기의 진공과 관련된 평균 비계획 발전손실량

발전소 명	기여 인자	기여 순위	평균 비계획 발전손실량 (MWh/yr/unit)
Millstone Point #2	복수 계통(CS)	9	2,555
Calvert Cliffs #1	순환수 계통(CWS)	9	9,118
	복수 계통(CS)	10	8,613
Calvert Cliffs #2	순환수 계통(CWS)	6	19,583
St. Lucie #1	순환수 계통(CWS)	8	7,341
St. Lucie #2	순환수 계통(CWS)	3	20,346
	복수 계통(CS)	8	7,717
Palisades	순환수 계통(CWS)	8	14,685
Fort Calhiun	복수 계통(CS)	4	5,925
Arkansas Nuclear Operation #2	복수 계통(CS)	10	1,122
Entergy-Waterford #3	복수 계통(CS)	10	3,330
Palo Verde #1	복수 계통(CS)	5	39,411
Palo Verde #2	복수 계통(CS)	3	29,287
Palo Verde #3	복수 계통(CS)	6	8,842
San Onofre #2	순환수 계통(CWS)	5	32,884
	복수 계통(CS)	9	418

표 1-2 CE형 원전의 복수기 진공과 관련된 평균 비계획 발전손실량

(2) 상위 25개 기여인자중 복수기의 진공과 관련된 평균 비계획 발전손실량

기여 인자	기여 순위	평균 비계획 발전손실량 (MWh/yr/unit)	평균 비계획 발전손실량 (만원/yr/unit)
순환수 계통 (Circulating water system)	17	6,135	21,706
복수 계통 (Condensate system)	24	3,959	14,007

표 1-3 복수기의 진공과 관련된 평균 비계획 발전손실량

상기 '나'항의 자료는 99년 ABB-CE사에 의해서 핵증기공급계통(NSSS) 설계가 제공된 발전소를 대상으로 미국내에서 상업운전중인 발전소의 비계획 발전 손실량을 CEOG가 파악했다. 목적은 비계획 가동손실(UCLF)의 근본원인을 파악하고 정확한 조치를 개발하기 위함이다. 대상기간은 94년에서 97년까지 자료를 근거로 수행되었고 25개의 주요한 비계획 가동손실 기여인자 중에서 발췌한 것이다. 93년에서 96년까지의 진공관련계통의 평균 비계획 발전손실량은 17,633 MWh/unit · yr을 기록했었다.

다. 복수기 및 관련계통의 주요한 고장원인 분석

영광 원전 3,4호기의 복수기 진공관련 고장개소는 관련계통의 전 분야에 걸쳐서 넓게 나타나고 있다. 특히 복수기 튜브누설에 따른 출력감발 또는 발전 정지와 복수기 튜브 세정계통의 볼 재순환 배관의 막힘현상에 의해 정비를 위한 출력감발 빈도가 많았다. 볼 재순환 배관의 막힘현상은 관련유로가 8시간 동안 대기상태에 있는 동안에 정체되어 따개비가 부착 서식하고 뻘에의해서 나타난 것으로 밝혀졌다. 튜브세정계통의 원활하지 못한 운전은 튜브의 차압을 증대시키고 결과적으로 순환수 유량률의 감소로 이어져 진공 저하의 요인이 되었다. 또한 복수기 증기제트 공기추출기(SJAE)의 기능 저하로 인한 진공 저하는 계획예방정비 기간중 관련기기의 정비를 소홀히 하여 발생한 것으로 나타났다. 미국내 CE형 원전의 복수기관

련 비계획 발전 손실량의 주요한 기여인자는 순환수 계통과 복수계통인데 복수계통은 주로 튜브의 누설과 진공기기, 펌프, 배관, 밸브, 복수기 제어와 관련된 고장이 주요 원인으로 나타났고 운전년수의 증가로 영광3,4호기에 비해 비계획 발전손실량이 크게 나타났다.

3. 영광 3,4 호기 복수기 구간별 관막음(Plugging) 현황 (99.12.31 현재)

호기 \ 복수기	A1	A2	B1	B2	C1	C2	합계
3	157	150	141	174	160	149	931
4	140	140	137	138	152	139	846

표 1-4 영광 원전 3,4 호기 복수기 구간별 관막음 현황

상기 관막음의 주요 원인은 예방관막음이 78%로 대다수를 차지했다. 예방 관막음은 세관다발 상부 외곽과 하부에서 주로 발생하였는데 상부외곽은 고온의 습증기가 세관다발 외부의 튜브를 침식, 부품이탈 충격등 세관손상에 의한 운전영향을 사전예방하기위해 2, 3년차 예방정비기간에 주로 수행되었다. 세관다발 하부에서는 어패류에 의한 막힘현상에 의해 실시되었다. 그외의 원인으로는 튜브의 찌그러짐, 막힘등에 의해 ECT가 불가능해 관막음을 했고 수압시험 누설, 운전중 습증기 침식, Scratch, 부품 이탈 파손 등의 원인으로 관막음이 실시되었다. 아래 그림 1-1는 영광원전 3,4호기 복수기 년차별 관막음 수량을 막대그래프로 나타낸 것이다. 그림 1-2은 99년 12월 31일 기준 영광원전 3,4호기 복수기 원인별 관막음 분포를 도표로 나타낸 것이다.

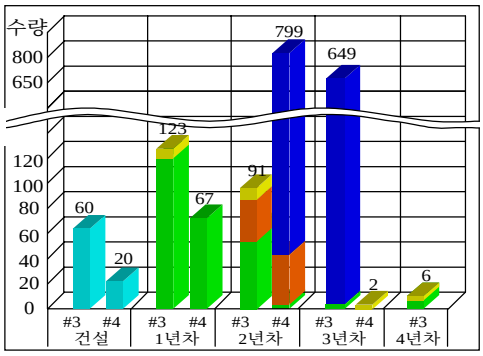

그림 1-1 영광3,4 복수기 년차별 관막음 현황

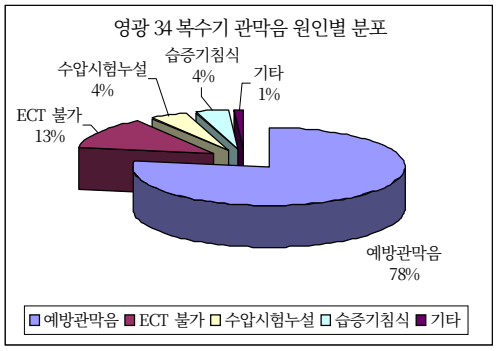

그림 1-2 영광 3,4 복수기 관막음 원인별 현황

4. 영광원전 3호기 복수기 진공 실적 및 평가

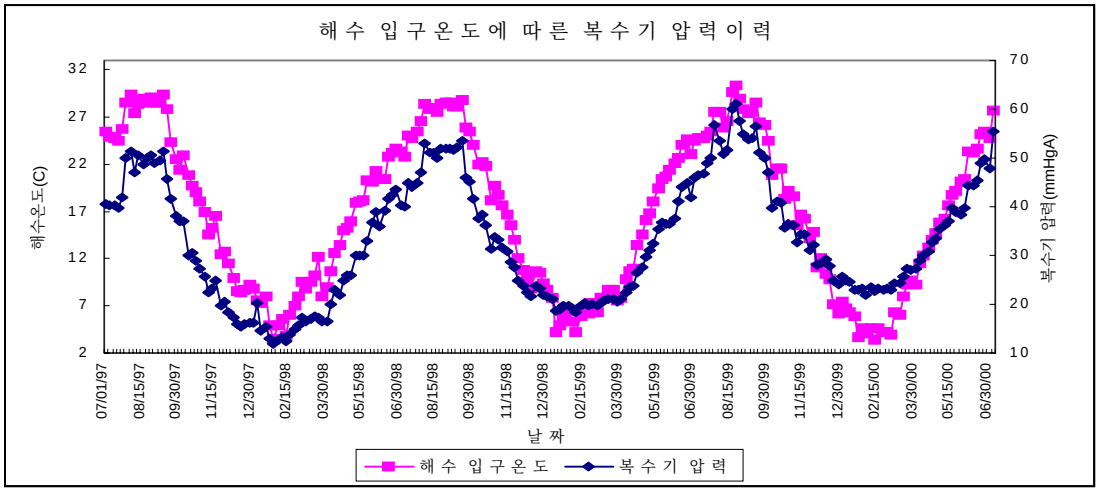

그림 1-3 영광원전 3호기 복수기 진공이력(100% 출력 기준)

지난 3년간의 영광 원전 3호기 복수기 진공이력을 검토한 결과 5주기(99.7.25~00.6.30 현재)의 진공이 이전 주기의 진공이력보다 평균 3~6 mmHgA 정도 높게 나타나 원인분석결과 증기제트 공기추출기(SJAE)의 성능이 크게 저하되었다. 성능저하의 주 요인은 SJAE의 후단 응축기의 튜브가 막혀 복수의 유량이 크게 감소되어 응축이 제대로 이루어지지 않아 불응축가스의 추출이 크게 감소하여 공기의 분압이 상승한 것이다. SJAE는 25% 정도 성능이 저하된 것으로 평가된다. 또한 뻘이나 생물서식에 의한 순환수 튜브의 차압증대로 순환수유량률의 저하도 큰 원인이었다. 이것은 복수기 튜브 세정계통의 원활한 운전이 이루어지지 않았기 때문이다. 부적절한 운전 주기 및 볼 스트레이너의 막힘으로 인해 튜브 볼 재순환 라인이 막히고 이어지는 역세척 운전중 볼의 외부 누출로 이어져 튜브의 세정이 제때에 이루어지지 않았다. 따라서 자동운전 주기의 변경이 필요하고 볼 스트레이너 및 복수기 튜브의 세심한 차압감시가 요구된다. 세정계통이 8시간 대기상태에 있는 동안에 볼의 재 순환 라인이 정체되어 있기 때문에 2~3시간 간격마다 재 순환 펌프를 단독으로 운전하도록 운전주기 변경이 필요할 것으로 평가된다.

제 2 장 분석모델링 및 적용방안

제 1 절 진공 영향인자 분석모델링

1. 분석 목적

복수기 진공영향인자인 순환해수 온도, 튜브 청정도, 순환수 유량률, 출력이 진공에 영향을 미치는 정도를 분석하여 운영중에 발생하는 복수기 진공관련 사건의 신속하고 정확한 진단과 정비 기준을 제공하기 위한 기준 진공도를 마련하고자 한다. 또한 순환수 펌프 4대 운전중 1대 고장 발생시 진공변화를 분석하여 4대운영 가능 해수온도와 소내 전력량 절감의 기준 해수온도를 취득하고자 한다. 마지막으로 복수기 튜브 누설 또는 볼 재순환 배관의 정비가 필요할 때 순환수 수실을 격리할 조건에 대비하기 위해 복수기 압력을 예측하기 위함이다.

2. 분석 흐름도

3. 순환수 질량 유량률 계산

순환수 질량유량률은 일반적인 오리피스나 벤츄리 관을 이용한 차압방식을 사용하지 않는다. 배관이 크고 순환수 펌프 출구압력이 낮기 때문에 적절한 차압이 형성되지않고 정확도가 떨어지기 때문이다. 따라서 대안으로 제작업체에서 제공하는 펌프수두를 이용해 유량률을 계산한다.

○ 순환수 펌프 차압(ΔP)계산 : $\Delta P = P_d - P_s$ (2.1.1)

○ 순환수 펌프 수두계산 : $H = \Delta P/\gamma$ (2.1.2)

○ 순환수 체적유량률(M_{CW}): 펌프 특성곡선에서 수두를 이용해 구함

○ 순환수 질량유량률 계산(G_{CW}) : $M_{CW} \times \gamma$ (2.1.3)

4. 복수기 절대압력 계산

복수기 절대압력을 계산하기 위한 기본적인 복수기 열전달 이론식을 이용하고 필요한 물리적 변수 및 방법론은 HEI[3] Standard 에서 사용된 값을 이용한다. 복수기 절대압력 계산을 위

한 주요 가변인자는 해수 온도, 순환수 질량 유량률, 튜브 청정도, 발전소 출력, 물리적 변수 등이 필요하다. 다음은 복수기 열전달 이론식을 유도한 것이다.

○ 복수기의 이론적인 전열계수(U_N)는

$$U_N = C_d \cdot C_m \cdot C_t \cdot \sqrt{V_{CW}} \tag{2.1.4}$$

- $$M_{CW} = A \cdot V_{CW} \cdot N_E = \pi \frac{D_I^2}{4} \cdot V_{CW} \cdot (N_T - N_P) \tag{2.1.5}$$

- $$V_{CW} = \frac{M_{CW}}{\pi \cdot D_I^2 \cdot (N_T - N_P)} \tag{2.1.6}$$

○ 복수기의 실제 전열계수(U_A)는 복수기 튜브 열교환식에서 유도하면

$$Q_{OUT} = U_A \cdot S \cdot LMTD = M_{CW} \cdot r \cdot C_P \cdot (T_2 - T_1) = G_{CW} \cdot C_P \cdot (T_2 - T_1) \tag{2.1.7}$$

- $$LMTD = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left[\frac{T_{SAT} - T_1}{T_{SAT} - T_2}\right]} \tag{2.1.8}$$

- $$U_A = \frac{G_{CW} \cdot C_P}{S} \cdot \ln\left[\frac{T_{SAT} - T_1}{T_{SAT} - T_2}\right] = C_F \cdot U_N \tag{2.1.9}$$

○ 복수기 포화온도(T_S)는 복수기로 유입되는 열입력(Qin)과 순환수로 전달되는 열유출(Qout)은 같으므로

$$Qin = \sum (m_i h_i - m_o h_o) = Q_{OUT} \tag{2.1.10}$$

(3.1.10)식과 (3.1.7)식의 관계식에서 U_A 대신에 $C_F \cdot U_N$ 대입하고 $\sqrt{V_{CW}}$ 대신에 $\frac{\sqrt{M_{CW}}}{\sqrt{A_T}}$ 를 대입하여 정리하면

$$- \; C_d \cdot C_m \cdot C_t \cdot C_f \cdot S\sqrt{V_{CW}} \cdot \frac{\Delta T}{\ln\left[\frac{T_S - T_1}{T_S - T_2}\right]} = M_{CW} \cdot r \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

상기 관계식으로 부터 복수기 튜브 표면온도(T_S)는

$$T_S = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{1 - e^{-P_{GW}}} = T_1 + \frac{\Delta T}{1 - e^{-P_{GW}}} \tag{2.1.11}$$

- $$P_{GW} = \ln\left[\frac{T_S - T_1}{T_S - T_2}\right] = \frac{C_d \cdot C_m \cdot C_t \cdot C_f \cdot S}{\sqrt{M_{CW}\sqrt{A_T}} \cdot r \cdot C_p} \tag{2.1.12}$$

복수기 압력(P_{COND})은

$P_{COND} = P_{SATURATE}(T_S)$, 이때 응축감압 효과는 무시한다.

주 3) Heat Exchanger Institute

제 2 절 분석결과

1. 복수기 튜브 청정도의 변화에 따른 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 해수온도 20.5℃, 순환수 질량유량률 100%, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용, 전출력

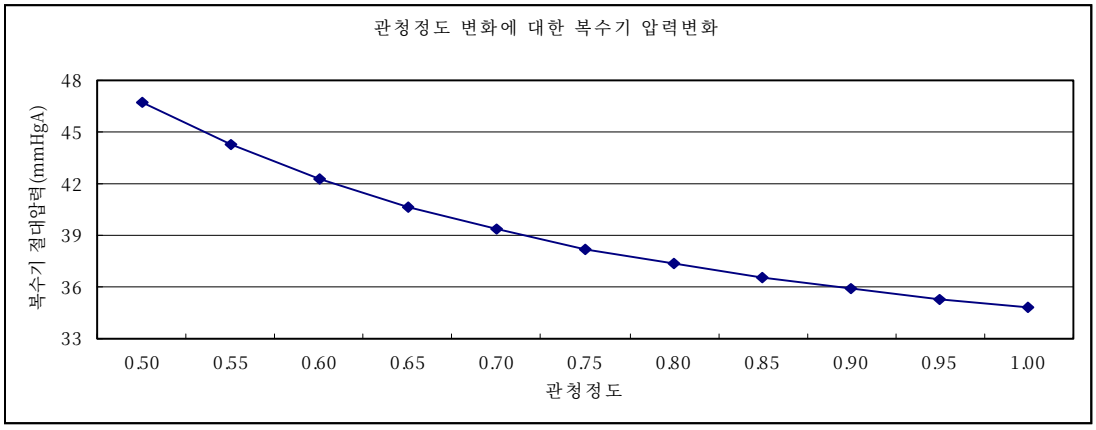

그림 2-1 관청정도 변화에 대한 복수기 압력변화

2. 순환해수 질량유량률 변화에 따른 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 해수온도 20.5℃, 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용, 전출력

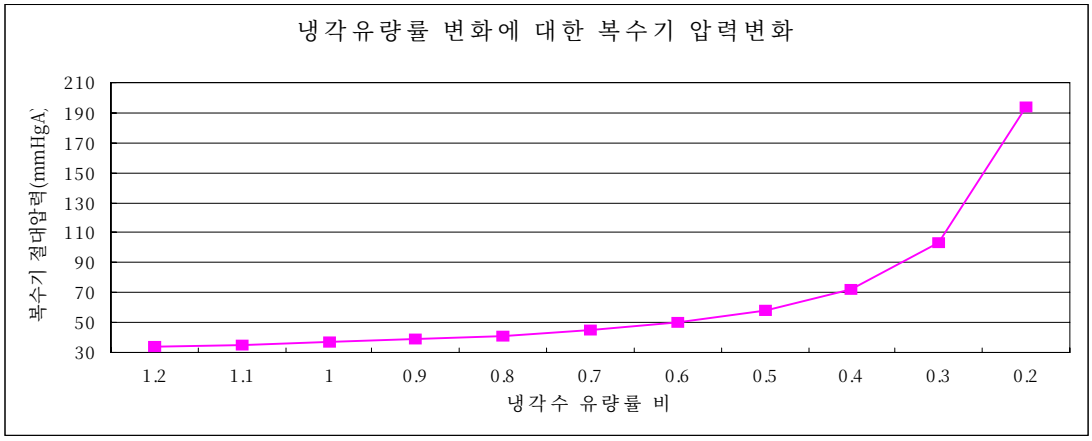

그림 2-2 순환수 질량유량률 변화에 대한 복수기 압력변화

3. 순환수 펌프 운전댓수 변화에 따른 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 해수온도 20.5℃, 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용, 전출력

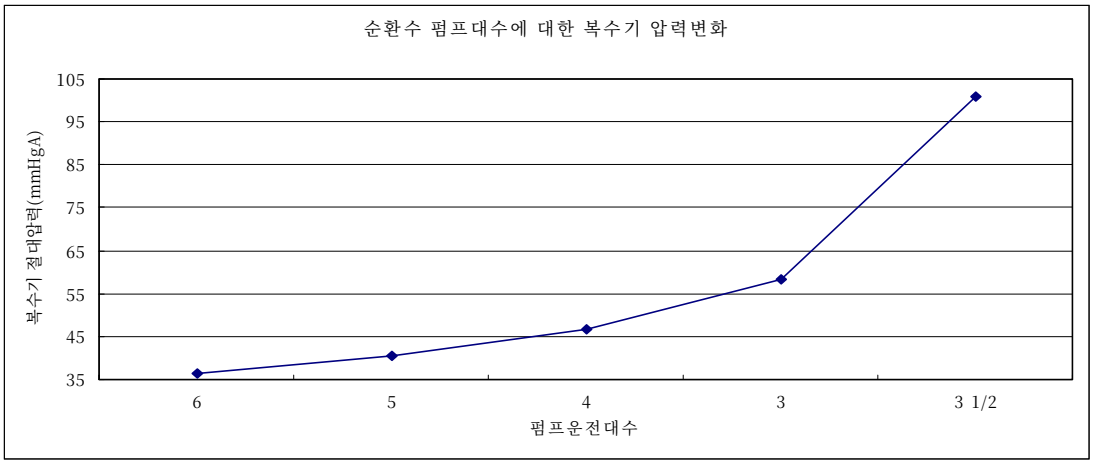

그림 2-3 순환수 펌프 운전댓수에 대한 복수기 압력변화

4. 순환해수 온도변화 및 순환수 펌프 6대 운전상태의 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용, 전출 순환수 펌프 6대

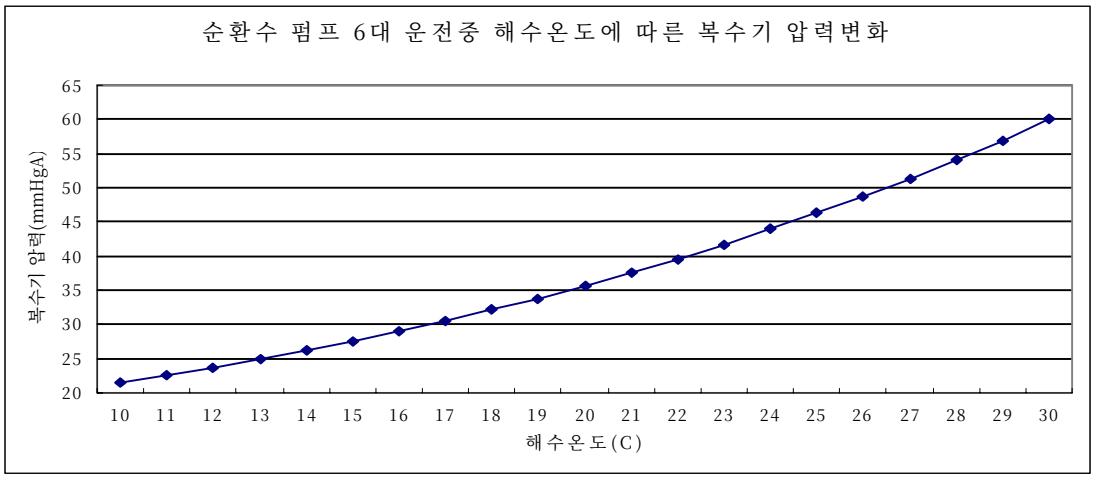

그림 2-4 순환수 펌프 6대 운전중 해수온도에 따른 복수기 압력변화

5. 순환해수 온도변화 및 순환수 펌프 5대 운전상태의 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 : 99.12.31 plugging 적용, 전출력 순환수 펌프 5대

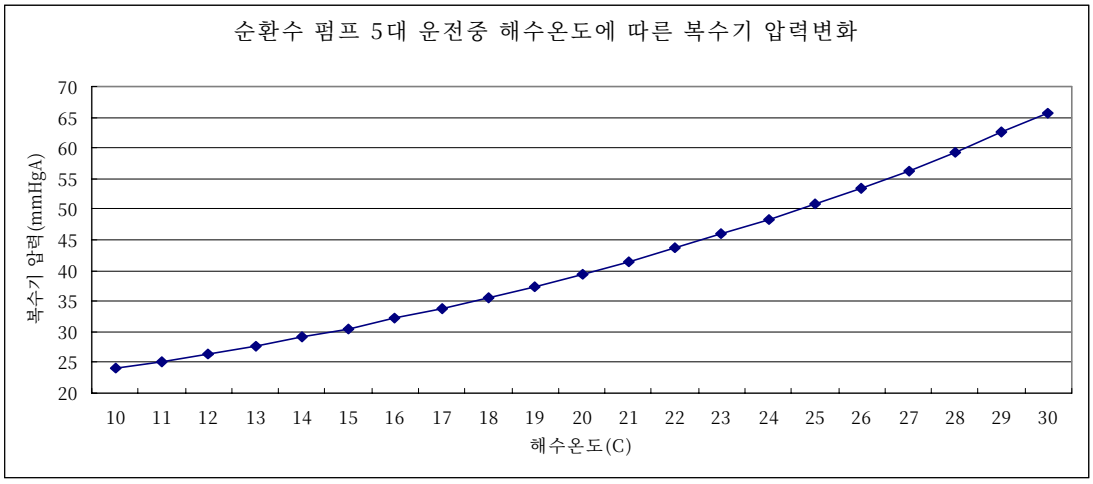

그림 2-5 순환수 펌프 5대 운전중 해수온도에 따른 복수기 압력변화

6. 순환해수 온도변화 및 순환수 펌프 4대 운전상태의 진공도 변화 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 : 99.12.31 plugging 적용, 전출력 순환수 펌프 4대

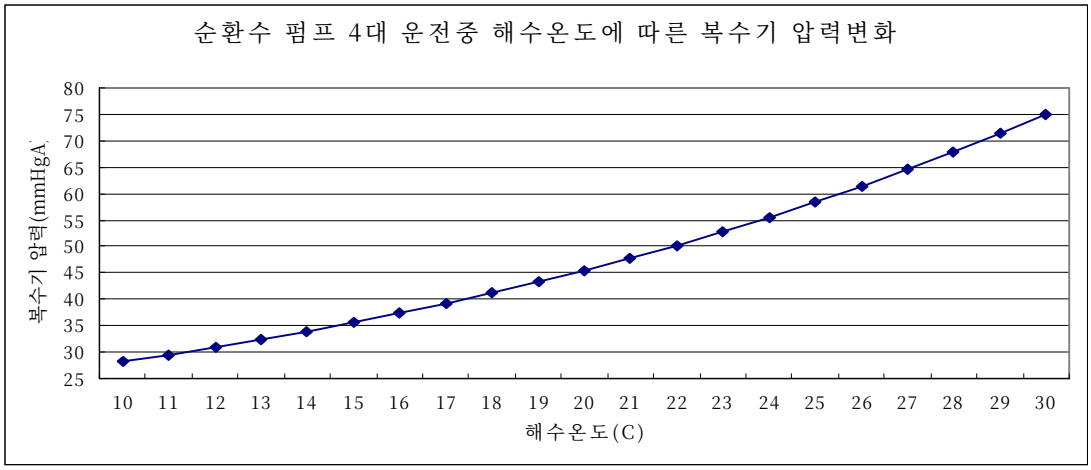

그림 2-6 순환수 펌프 4대 운전중 해수온도에 따른 복수기 압력변화

7. 순환해수의 단위온도 변화당 복수기 압력변화 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging적용, 전출력, 순환수유량률100%

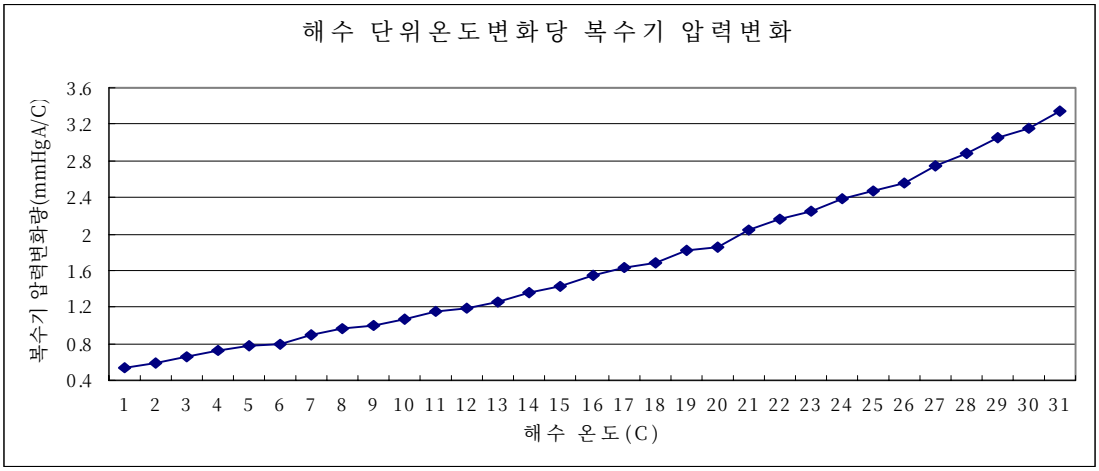

그림 2-7 해수 단위 온도 변화당 복수기 압력변화

8. 발전소 출력 변화당 복수기 압력변화 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging적용, 순환해수온도 20.5℃, 순환수 유량률 100%

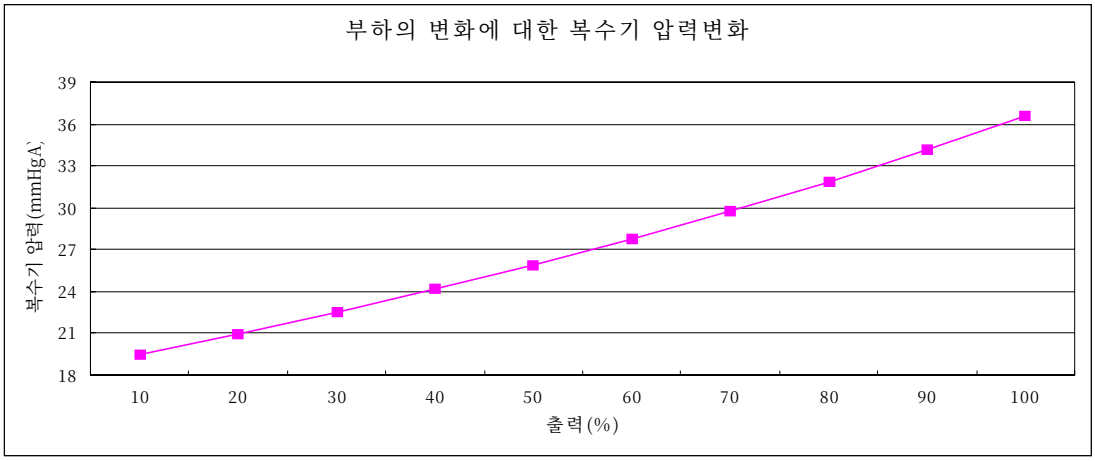

그림 2-8 발전소 출력 변화에 대한 복수기 압력변화

9. 순환수 펌프 4대 운전상태에서 1대정지시 해수온도에 따른 복수기 진공의과도상태 분석

○ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용, 순환수유량률 54510 m3/hr(30% of total flow)

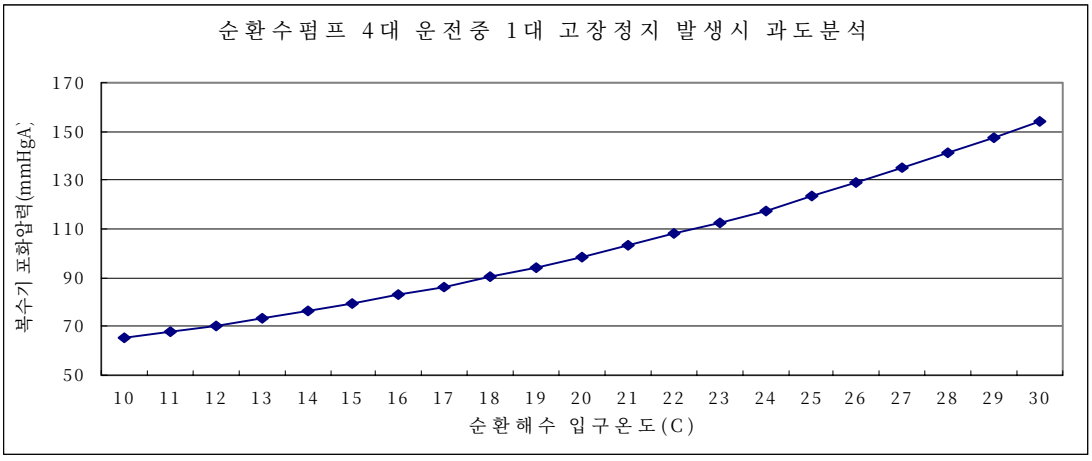

그림 2-9 순환수 펌프 4대운전중 1대 고장정지시 복수기 진공 과도상태분석

10. 순환수 펌프 5대 운전중 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 과도상태 분석

◯ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 99.12.31 plugging 적용

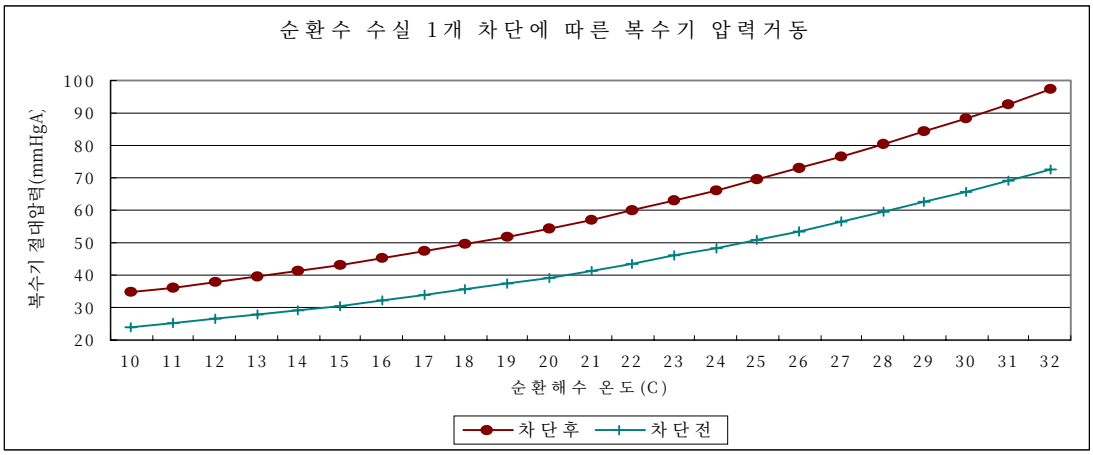

그림 2-10 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 과도상태 분석

11. 순환수 펌프 6대 운전중 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 과도상태 분석

◯ 분석기준 : 튜브청정도 0.85, 튜브표면적 : 99.12.31 plugging 적용

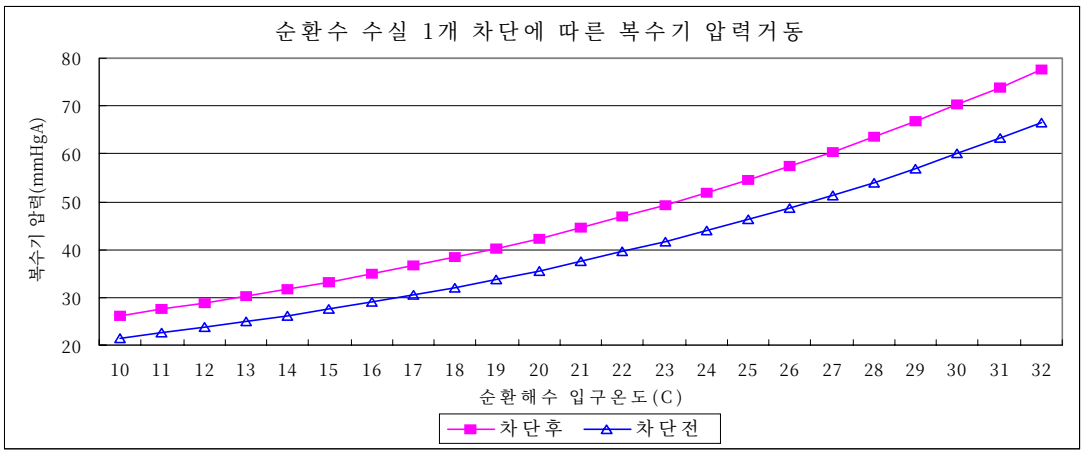

그림 2-11 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 과도상태 분석

제 3 절 분석 결과의 검증

1. 순환해수 온도에 따른 진공이력을 통한 비교검증

가. 진공 이력 대상 : 영광 원전 3호기 3, 4, 5주기 전출력 운전 진공실적

나. 순환수 펌프 운전댓수 : 해수 온도 21℃ 이상에서 6대, 미만에서 5대 적용

다. 분석 결과치 : 5주기의 복수기 튜브 Plugging 적용

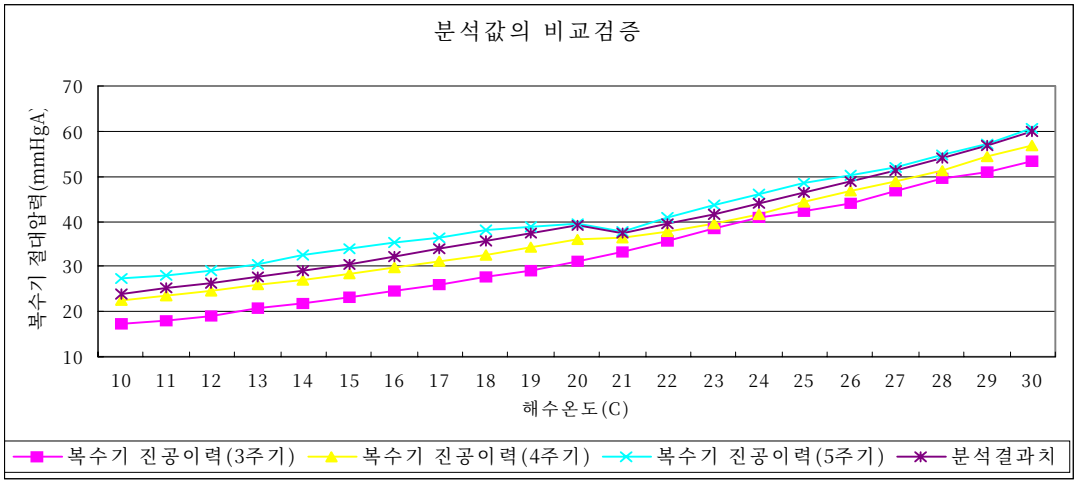

그림 2-12 진공이력과 분석값의 비교검증

2. 복수기 수실 차단시 복수기 진공이력을 통한 비교검증

가. 순환수 펌프 5대 운전중 수실 차단에 따른 복수기 진공이력

◯ 이력 일시 : 2000. 4. 20 09:10 차단후 43.16 mmHgA에서 평형

◯ 운전 조건 : 해수입구온도 13 ℃, 100% 출력

◯ 분석 결과치 : 13 ℃에서 비보정 39.51, 보정 분석결과는 41.59 mmHgA

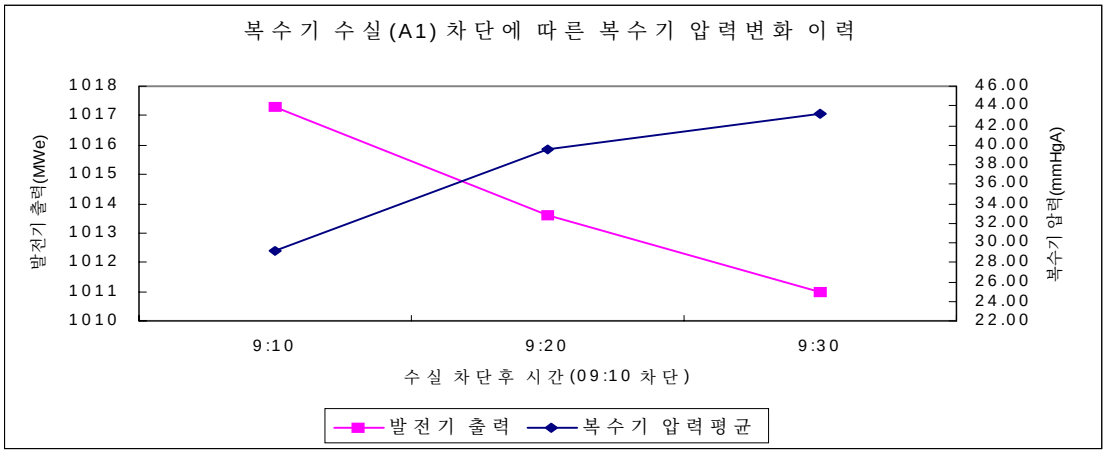

그림 2-13 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 변화 이력(5대 운전중)

나. 순환수 펌프 6대 운전중 수실 차단에 따른 복수기 진공이력

◯ 이력 일시 : 2000. 6. 26 14:20 차단후 51.45 mmHgA에서 평형

◯ 운전 조건 : 해수입구온도 23.5 ℃, 100% 출력

◯ 분석 결과치 : 23.5 ℃에서 비보정 50.54, 보정 분석결과는 52.14 mmHgA

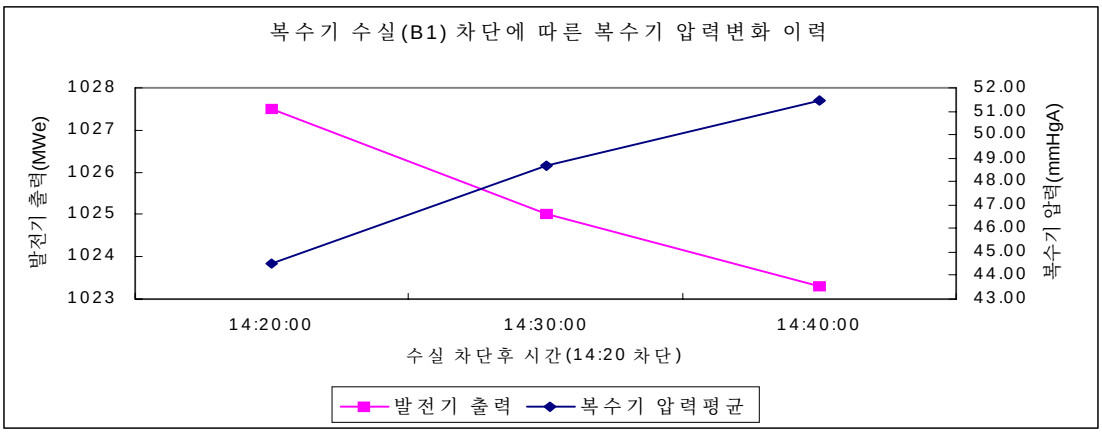

그림 2-14 복수기 수실 1개 차단시 복수기 진공의 변화 이력(6대 운전중)

제 4 절 복수기 압력대비 전기출력 변화

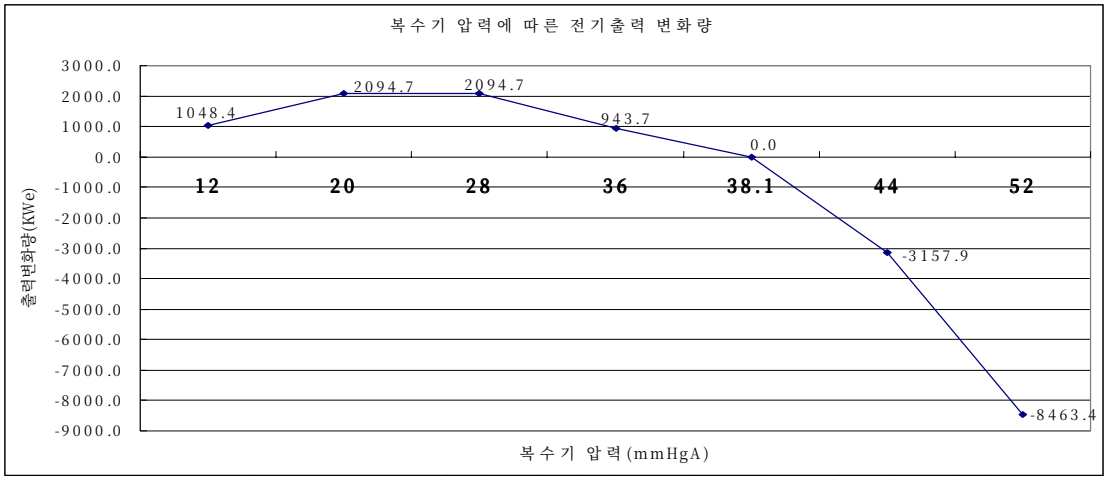

그림 2-15 영광 원전3,4호기 복수기 압력변화에 대한 전기출력 변화량

제 3 장 결 론

1. 기기의 최적운전시기 결정

복수기 절대압력이 약 28~20 mmHga로 낮아질때까지는 전기출력 향상효과가 발생하나 더 이상 낮아지면 오히려 배기손실의 증대로 전기출력의 감소가 발생한다. 순환해수 온도는 계절의 변화에 따라 온도차이가 있으므로 해수온도에 대응하는 복수기 압력기준을 설정하여 운영할 필요가 있다. 그림 2-15 영광 원전3,4호기 복수기 압력변화에 대한 전기출력 변화량과 순환수 펌프와 순환해수 온도에 따른 복수기 압력변화 분포를 이용하면 순환수 펌프의 최적운전시기를 결정하는 기준이 될 수 있다. 순환수 펌프의 최적운전시기는 순환수 펌프의 소내소비전력을 최소화하고 더불어 전기출력의 최적화를 이루어 발전소 효율을 향상하기위해 필요하다. 아래의 표 3-1은 순환수펌프 해수온도기준 최적운전시기이다. 순환수 펌프 소비전력 기준은 $\sqrt{3}\times13.8Kv\times58A\times0.9$ =1248 KWe 값을 사용하였다.

해수온도 / 기기 운전시기	기존적용 해수온도	분석결과 해수온도	복수기 압력 기준	기 준
순환수 펌프 4→5대	비 적용중	17.6 ℃	40.4 mmHgA	소내소비 절감
순환수 펌프 5→6대	19.6 ℃	20.5 ℃	40.4 mmHgA	소내소비 절감
순환수 펌프 6→5대	19.6 ℃	19.1 ℃	33.9 mmHgA	소내소비 절감
순환수 펌프 5→4대	비 적용중	17.1 ℃	33.9 mmHgA	소내소비 절감
순환수 펌프 4대 운전가능	비 적용중	23.34 ℃	114.3 mmHgA	복수기 이용 불가능 연동 발생 방지

표 3-1 순환수펌프 해수온도기준 최적 운전시기

2. 발생이득 분석

동계에 순환수 펌프를 현행보다 1대를 절감운전하면 복수의 과냉각 현상이 발생하지 않음으로서 얻는 출력증가분을 제외하더라도 추가적으로 순환수펌프 자체의 소내소비 절감의 이득이 발생한다. 다음은 소내소비 절감액을 간단히 나타낸 것이다. 현재 고리원전을 제외한 대부분의 발전소에서는 순환수 펌프 6대중에서 5대이상을 운전하도록 절차서에 명시하고 있다. 5대 운전중 1대가 불시 고장정지 발생시 복수기 이용불가능 연동신호가 발생되기 때문에 그와같은 요건을 만들지 않기 위해서이다. 순환수계통 설계요건에는 4대이상의 펌프운전이 요구된다.

가. 순환수 펌프 4대를 년간 6개월간 운영

- 발전원가 절감액은 다음과 같다.

$$6월\times\frac{30일}{월}\times\frac{24시간}{일}\times\frac{1.248MWe}{대}=5,391\,MWh\ (1억\ 9000만원)^{4)}$$

나. 순환수 펌프 4대를 년간 5개월간 운영

- 발전원가 절감액은 다음과 같다.

$$5월\times\frac{30일}{월}\times\frac{24시간}{일}\times\frac{1.248MWe}{대}=4,493\,MWh\ (1억\ 6000만원)$$

주 4) 1999년 원자력 발전원가 기준 : 35.38원/KWh

3. 고장모드 및 영향분석(FMEA), 고장이력을 통한 진공영향인자 신뢰도 향상 방안

항 목 / 인 자	계 통	고장 모드	영향 분석	신뢰도 향상방안
복수기 튜브 청정도	순환해수계통	이물질 여과기 기능저하 - 모터 과부하 - 제어회로 고장 - 차압전송기 고장 - 여과기 구동 기어박스 내부 고장	이물질(따개비, 뻘)이 튜브내부에 부착 및 서식, scale, fouling 형성되어 청정도 저하	- 이물질 여과기 동시 운전 방지 연동 신설 - 이물질 여과기 주기적인 수동 운전 - 이물질 여과기 모터용량 증대 - 차압전송기 주기적 교정 및 제어회로 점검 - PMS 내의 BOP 성능프로그램으로 사용되는 순환수 펌프 입구압력 상수 제거 및 현장에서 실시간 제공되도록 설계변경
	복수기 튜브 세정 계통	튜브세정계통 건전성 상실 - 볼 재순환 배관의 막힘 현상 - 튜브를 세정하기 위한 볼의 유실 - 세정계통 제어전원 상실	튜브 청정도 개선 운전 불량으로 청정도 저하	- 주기적인 수동 재순환 운전 필요 - 볼 수집기 스트로크 교정으로 볼 유실방지 - 볼 계수기 교정 - 자동운전 회로의 운전주기 변경 필요 - 볼수량 및 크기 적기교체
	염소주입계통	정지되어있는 순환수 일부 배관 염소주입 안됨	복수기 튜브내부의 생물 서식 증대로 청정도 저하요인 됨	- 나머지 순환수 펌프(2,4,6P) 출구에도 염소 주입라인 신설 필요
순환 해수 유량률	순환해수계통	- 순환수 펌프 정지 - 이물질 여과기 막힘	순환수 유량률 감소로 복수기 포화온도 증가	순환수 펌프 건전성 확보 - 축밀봉 냉각수 건전성 확보 (단순화 및 제어 전원 이중화로 설계변경 필요) - 순환수 펌프 예방정비 철저 및 모터 일상점검
	복수기 튜브 세정 계통	튜브내부에 이물질 부착	튜브내부 유로 협소로 순환수 유량률 감소	- 튜브세정계통 건전성 유지
	복수기 수실 공기제거계통	출구 수실 진공저하 - 수실 프라이밍 펌프 건전성 상실 - 압력스위치 고장 - 수실로 공기유입	순환수 사이펀 저하로 유량률 저하	- 수실 프라이밍 펌프 예방정비 철저수행 - 수실 압력스위치 주기적 교정 - 공기유입부위 점검 - 차단기 점검강화
	취수구 회전망 및 회전망 세척 계통	- 회전망모터 및 회전망 세척펌프 고장 - 스크린 막힘	회전망 스크린 막힘으로 순환수 유량률 저하	- 회전망 세척펌프 용량 증대 및 해수 수위에 따라 운전방법 개선 - 환경변화에 대응하는 주기적 운전 강화
순환해수 온도	순환수 계통	해수온도 높음 또는 낮음	진공이 저하 또는 복수 과냉각	- 진공관리의한 최적기기 운전 - 해수온도 기준한 적정 진공도 운영
복수온도 상태	증기발생기 취출수 계통 및 순환수 계통	- 비재생 열교환기 출구 온도 낮음 - 순환해수 저온	복수의 과냉각	- 비재생 열교환기 출구 온도가 복수의 포화온도와 같도록 기기냉각수 조절하는 절차서 수립 - 진공기준한 순환수 펌프 운전 댓수 조절
발전소 출력	발전소 출력 제어계통	급작스런 출력 증감발로 글랜드 밀봉압력 상실	복수기 진공이 저하	- 급작스런 출력 증감발시 대응 능력 확보 - 진공도 저하 사건발생시 출력 감발시기 및 감발량 절차 확보 필요

항 목 / 인 자	계 통	고장 모드	영향 분석	신뢰도 향상방안
공기 유입	복수기 공기 제거 계통	- 증기제트 공기 추출기 고장 - 진공펌프 고장	복수기 공기제거 기능저하로 진공저하	- 증기제트 공기추출기 예방정비 및 관리 철저 - 진공펌프 건전성 유지
	터빈글랜드 밀봉 증기 계통	글랜드 밀봉증기 압력 상실	터빈글랜드로 공기유입으로 복수기내 공기분압 증가	- 밀봉압력제어밸브 주기적 점검 - 고장시 대응능력 유지
	복수 계통	- 복수기 집수정 수위제어 상실 - 복수기 압력경계 밸브 스템 밀봉수 공급차단 - 저압터빈 및 복수기 구조물 건전성 상실 - 복수기 Expansion Joint 밀봉상태	공기유입에 의한 복수기 진공이 저하	- 집수정 수위제어 계통 주기적 교정 및 점검 - 압력경계밸브 스템 밀봉 유지능력 주기적확인 - 압력경계 배기밸브 주기적인 차단상태 점검 - 저압터빈 및 복수기 구조물 주기적인 건전성 점검 (He 누설시험 적용필요) - Expansion Joint 밀봉수 보충 주기 점검

표 3-2 고장모드 및 영향분석(FMEA), 고장이력을 통한 진공영향인자 신뢰도 향상방안

4. 진공관리를 위한 체크 리스트

항 목		지시계	단 위	3 호기 지시값	4호기 지시값
발전소 상 태	전기 출력	PMS MPJ0001	MWe		
튜 브 청정도	PMS BOP Performance Program 청정도	PMS CDYXCF	없 음		
	튜브세정계통 운전상태	없 음	없 음		
	복수기 튜브 볼수량	CW-7/8/9/10/11/12J	개		
	순환수 튜브 차압	CW-PDI-127	cmH_2O		
		CW-PDI-128	cmH_2O		
		CW-PDI-129	cmH_2O		
		CW-PDI-130	cmH_2O		
		CW-PDI-131	cmH_2O		
		CW-PDI-132	cmH_2O		
해 수 온 도	복수기 입구온도(A-1)	PMS CWT0103	℃		
	복수기 입구온도(A-2)	PMS CWT0104	℃		
	복수기 입구온도(B-1)	PMS CWT0105	℃		
	복수기 입구온도(B-2)	PMS CWT0106	℃		
	복수기 입구온도(C-1)	PMS CWT0107	℃		
	복수기 입구온도(C-2)	PMS CWT0108	℃		
	복수기 출구온도(A-1)	PMS CWT0157	℃		
	복수기 출구온도(A-2)	PMS CWT0158	℃		
	복수기 출구온도(B-1)	PMS CWT0159	℃		
	복수기 출구온도(B-2)	PMS CWT0160	℃		
	복수기 출구온도(C-1)	PMS CWT0161	℃		
	복수기 출구온도(C-2)	PMS CWT0162	℃		
	복수기 입구 평균온도	계산 평균	℃		
	복수기 출구 평균온도	계산 평균	℃		

항 목		지시계	단 위	3호기 지시값	4호기 지시값
복 수 온 도 상 태	복수기 압력(A)	PMS CDP0355	mmHgA		
	복수기 압력(B)	PMS CDP0356	mmHgA		
	복수기 압력(C)	PMS CDP0357	mmHgA		
	복수 온도	PMS CDT0081	℃		
	복수 온도	PMS CDT0082	℃		
	복수 온도	PMS CDT0083	℃		
	복수 온도	PMS CDT0084	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(A)	TA-TI-4A	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(A)	TA-TI-4B	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(B)	TA-TI-5A	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(B)	TA-TI-5B	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(C)	TA-TI-6A	℃		
	저압터빈 배기후드 온도(C)	TA-TI-6B	℃		
	증기발생기 취출수 비재생 열교환기 후단온도	SD-TI-041	℃		
	복수기 압력에 대한 포화온도	증기표	℃		
	저압터빈 배기후드 온도에 대한 포화압력	증기표	mmHgA		
	복수의 과냉각 상태	계 산	℃		
순환해수 유량률	순환수 펌프 01P 출구압력/전류	CW-PI-039/HS-001	Kg/㎠		
	순환수 펌프 02P 출구압력/전류	CW-PI-040/HS-002	Kg/㎠		
	순환수 펌프 03P 출구압력/전류	CW-PI-043/HS-003	Kg/㎠		
	순환수 펌프 04P 출구압력/전류	CW-PI-044/HS-004	Kg/㎠		
	순환수 펌프 05P 출구압력/전류	CW-PI-047/HS-005	Kg/㎠		
	순환수 펌프 06P 출구압력/전류	CW-PI-048/HS-006	Kg/㎠		
	순환수펌프 입구압력	CW-LI-079 환산	Kg/㎠		
	순환수 질량유량률	PMS CWFXFCW	Kg/hr		
	순환수 질량유량률	펌프용량 곡선	Kg/hr		
	해수 수위	CW-LI-079	%		
	순환수 01P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-181	mbar		
	순환수 02P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-182	mbar		
	순환수 03P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-183	mbar		
	순환수 04P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-184	mbar		
	순환수 05P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-185	mbar		
	순환수 06P 이물질 여과기 차압	CW-PDI-186	mbar		
	순환수 출구수실 압력	CW-PI-193	mmHg″vac		
	수실 프라이밍 펌프 운전주기	CW-HS-195/196	없 음		
공 기 유 입	증기제트 공기추출기 성능	PI-061	bar		
		중간/후단응축기 배수온도	℃		
		중간/후단응축기 배출온도	℃		
		FI-020	scfm		
	진공 펌프 정상 대기상태	없 음	없 음		
	터빈 밀봉증기 압력	TA-PG-001	Kg/㎠		
	터빈 밀봉증기 추출기 압력	TA-PG-002	cmH_2Ovac		
	복수기 압력경계밸브 스템밀봉	해당 밸브상태	없 음		
	복수기 압력경계 배기밸브 격리	해당 밸브상태	없 음		
	저압터빈 파열판 상태	없 음	없 음		
	저압터빈 구조물 상태	없 음	없 음		
	복수기 구조물 상태	없 음	없 음		

표 3-3 진공관리를 위한 체크 리스트