



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2012년 2월
석사학위논문

표준형원전 2차측 열출력 감소
인자에 대한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

차 형 호

표준형원전 2차측 열출력 감소
인자에 대한 연구

A Study on the Secondary Thermal Power Reduction Factor Of KSNP

2012년 2월 00일

조선대학교 대학원

원자력공학과

차 형 호

표준형원전 2차측 열출력 감소
인자에 대한 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 2월

조선대학교 대학원

원자력공학과

차 형 호

차형호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2012년 2월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	2
그림 목차	3
ABSTRACT	4
제 1 장 서 론	5
제 2 장 터빈 증기사이클에 대한 이해	6
제 1 절 카르노(Carnot) 사이클에서의 열효율	6
제 2 절 랭킨(Rankine) 사이클에서의 열효율	7
제 3 절 재열 사이클에서의 열효율	8
제 4 절 재생 사이클에서의 열효율	10
제 5 절 원자력발전소 증기사이클에서의 열효율	11
제 3 장 2차측 열출력 감소 인자	14
제 1 절 증기발생기 관막음에 의한 열전달 능력 감소	14
제 2 절 급수 유량 감소에 따른 열출력 감소	16
제 3 절 사이클 효율저하에 따른 열출력 감소	19
가. 급수온도 저하에 따른 열출력 감소	19
나. 복수기 진공저하에 따른 열출력 감소	23
제 4 절 2차측 열출력 감소인자 정리	26
제 4 장 2차측 열출력 감소 인자 해결방안	27
제 1 절 증기발생기 관막음에 의한 열전달 능력 감소 해결방안	27
제 2 절 급수 유량 감소에 따른 열출력 감소 해결방안	28
제 3 절 급수온도 저하에 따른 열출력 감소 해소 방안	30
제 4 절 복수기 진공저하에 따른 열출력 감소 해소 방안	31
제 5 절 2차측 열출력 감소인자 해결방안 정리	32
제 5 장 결론	33
참고문헌	34

표 목 차

표 3-1-1	영광5,6호기 증기발생기 관막음 현황	14
표 3-3-1	표준형 원전 급수가열기 고장 사례	21
표 3-4-1	2차측 열출력 감소인자 비교표	26
표 3-5-1	2차측 열출력 감소인자 해결방안 정리	32

그림 목차

그림 2-1-1	카르노 사이클 선도	6
그림 2-2-1	랭킨 사이클의 구성도	7
그림 2-2-2	랭킨 사이클 선도	8
그림 2-3-1	재열 사이클의 구성	9
그림 2-3-2	재열 사이클의 선도	9
그림 2-4-1	재생 사이클의 구성	10
그림 2-4-2	재생 사이클의 선도	11
그림 2-5-1	원자력발전소 증기 사이클 구성도	12
그림 2-5-2	원자력발전소 증기 사이클 선도	12
그림 3-1-1	증기발생기 관막음으로 인한 증기사이클 선도 변화	15
그림 3-2-1	영광 5호기 4주기 출력 변화	17
그림 3-2-2	영광 5호기 4주기 주증기 및 터빈 1단 압력 변화	17
그림 3-2-3	급수유량 감소에 따른 증기사이클 선도 변화	18
그림 3-3-1	급수가열기 효율감소에 따른 증기사이클 선도 변화	21
그림 3-3-2	고압급수가열기 개략도	22
그림 3-3-3	고압급수가열기 비정상시 주요 운전변수	23
그림 3-3-4	복수기 진공저하에 따른 증기사이클 선도 변화	23
그림 3-3-5	영광 5,6호기 복수기 진공저하에 따른 출력 변화	25
그림 3-3-3	고압급수가열기 비정상시 주요 운전변수	25
그림 4-1-1	표준형 원전 수질관리 기준	27
그림 4-1-2	영광 5호기 2차측 수질 On-line 감시 설비	28
그림 4-2-1	COLSS 열출력 계산 모듈 개념	29
그림 4-2-2	영광 6호기 6주기 2차측 열출력 변화	29
그림 4-3-1	영광 5,6호기 M/A Station 구성도	30
그림 4-3-2	영광 5,6호기 M/A Station 현장사진	31
그림 4-4-1	복수기 Debris Filter와 복수기 세정계통 개략도	32

ABSTRACT

A Study on the Secondary Thermal Power Reduction Factor of KSNP

By Cha, Hyeng Ho

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

This study describes the turbine steam cycle that applied the Rankine cycle. It also reviews the factor that caused the unplanned efficiency reduction of the secondary thermal power in KSNP plant. Although there are many reduction factor, this study reviews the four important reduction factor. Those are the Steam Generator Tube Plugging, the Feedwater Flow Depletion, Uncontrolled Level Fault of Heaters and Vacuum Depletion of Condenser. Throughout reviewing the unplanned efficiency reduction factor, the study reviews to have effects on the turbine steam cycle and tries to find the applicable solution against the unplanned efficiency reduction factor in KSNP plant.

This study also describes the applied solution in KSNP plant and the applicable solution in immediate future

제 1 장 서 론

국내의 원자력발전소 터빈 증기사이클은 랭킨사이클을 기본으로 열효율을 개선할 목적으로 재생·재열사이클을 채택하여 사용하고 있다. 즉 기본적인 랭킨사이클에서 고압증기의 일부를 추기하여 증기발생기로 가는 급수를 가열하여 효율을 높이는 재생 사이클과 터빈에서 증기를 한 번에 팽창시키지 않고 일부 팽창시킨 후 재열기에서 재가열하여 완전 팽창시킴으로써 효율을 향상 시키는 재열 사이클을 혼합하여 사용하고 있다. 이렇게 최적화된 설계를 통해 효율을 개선하고자하는 노력을 기울이고 있지만 때로는 계획적(터빈멜브 시험을 위한 출력감발)으로 때로는 비계획적으로 2차측 열손실이 일어나고 있다. 더욱이 발전소 수명이 계속될수록 비계획적인 손실이 늘어나고 있는 것이 현실이다. 전력에 대한 수요는 늘어나고 있고 국내·외적으로 탄소 배출량 규제에 의한 화석연료의 사용규제는 강화되고 있는데 원자력 발전만한 대안이 없음에도 불구하고 원자력발전에 대한 부정적인 시각으로 발전소 건설을 위한 부지확보가 점점 더 어려워지고 있는 것이 현실이다. 이러한 현실 속에서 잃어버린 발전소의 효율을 개선하기 위한 논의가 이루어지고 있고 또한 비계획적인 열손실 부분을 찾기 위한 노력들이 각 발전소마다 진행되고 있다. 실제로 미국의 SONGS 발전소는 2차측 열출력 개선을 통해 12MWe의 출력 개선 효과를 거둔 예가 있다. 만일 우리나라에서 발전소 1개호기당 10MWe만 개선해도 20개의 상업운전 발전소가 모두 적용될 경우 약 200MWe의 전력을 더 생산하는 것이 되므로 이는 한 달 200kw 쓰는 가정 10,000가구에 전기를 공급할 수 있는 전력량이다. 이는 결코 간과될 수 없는 과제이기도 하다.

본 과제 목적은 표준형 원전에서 일어나고 있는 계획되지 않은 열출력 감소 인자를 찾아내고 이에 대한 개선책에 대한 내용을 기술하고 있다.

제 2 장 터빈 증기사이클에 대한 이해

제 1 절 카르노(Carnot) 사이클에서의 열효율

열기관에서 가장 효율이 좋은 이상 사이클로서, 실제 제작이 불가능하며 2개의 등온과정과 두 개의 단열과정으로 구성된 사이클이다.

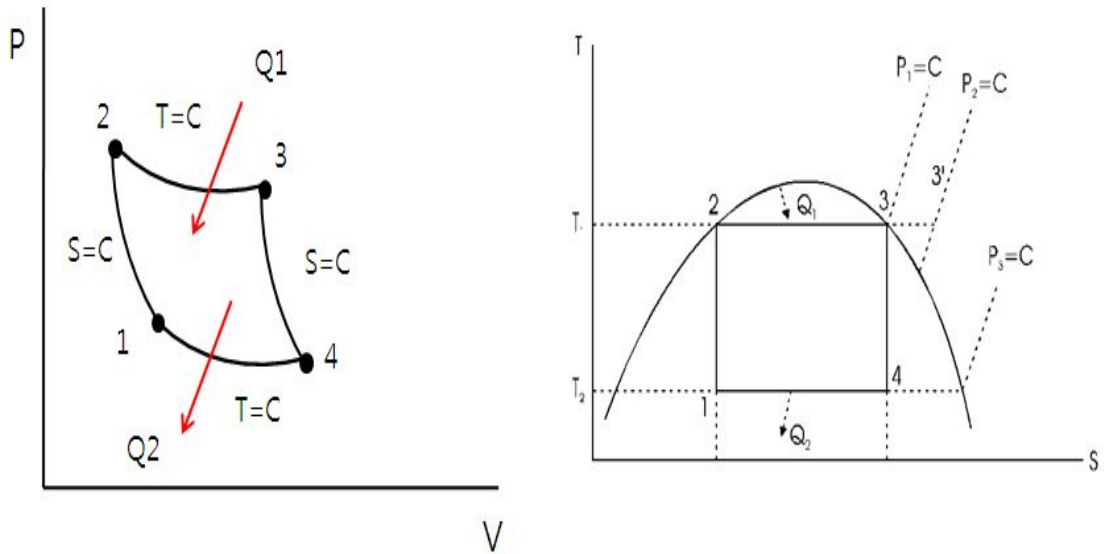


그림 2-1-1 카르노사이클 선도

사이클은 고열원의 온도 T_1 에서 열을 공급받아 저열원의 온도 T_2 에 열을 방출하며, 등온과정으로 열전환을 할 수 없으므로 카르노 사이클로 작동되는 기관은 만들 수 없고, 이 기관은 효율이 가장 좋은 이상 사이클로 다른 기관의 효율을 비교하는데 표준이 되는 사이클이다.

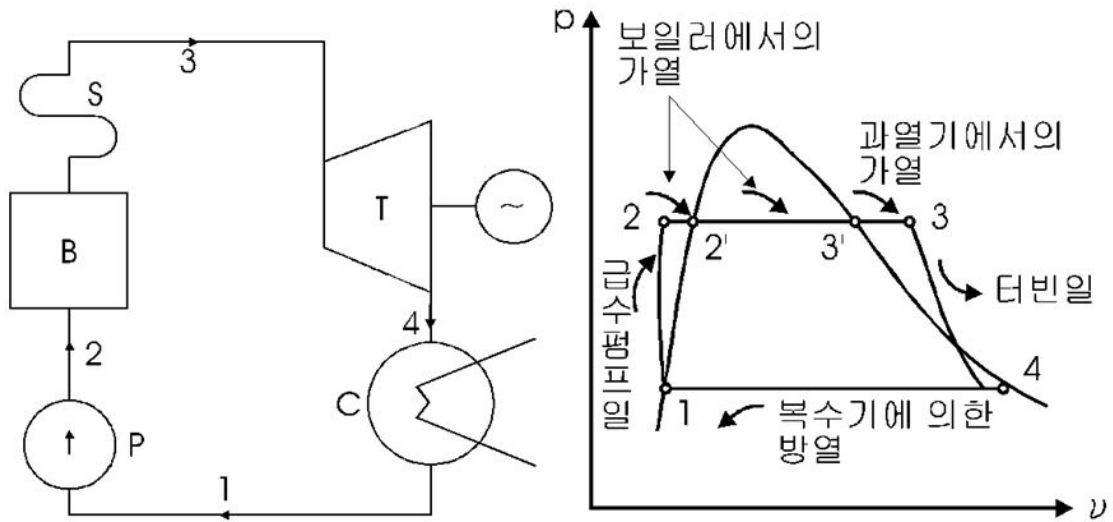
카르노 사이클의 열효율은 다음과 같은 식으로 표현 될 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\text{유효한일에 이용할 수 있는 열량}}{\text{공급된 전열량}} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

제 2 절 랭킨(Rankine) 사이클에서의 열효율

랭킨 사이클은 2개의 정압변화와 2개의 단열변화로 구성된 증기원동소의 이상 사이클이다. 랭킨 사이클은 보일러 내에서 가열된 물이 과열증기가 된 후에 터빈 노즐을 지나면서 일을 하며, 일을 한 습증기는 복수기에 유도되어 냉각, 응축하여 다시 물이 되고, 이와 같은 물은 다시 재순환되어 사이클로 완료 된다. 이 때 형성 되는 사이클이 랭킨 사이클이다.

가. 랭킨 사이클의 구성



여기서 B : 보일러(Boiler), T : 터빈(Turbine), C : 복수기(Condenser)
P : 급수펌프(Pump), S : 과열기(Superheater)

그림 2-2-1 랭킨 사이클의 구성도

- 1→2과정 : 복수기에서 나온 포화수를 급수펌프에서 단열(정적)상태로 압축하여 보일러로 보낸다.
- 2→3과정 : 급수펌프로부터 보내진 압축수를 보일러에서 가열(정압상태)하여 과열증기로 만든다.
- 3→4과정 : 과열증기는 터빈으로 들어가 단열 팽창하여 일을 하고 습증기로 된다.

○ 4→1과정 : 터빈에서 배출된 습증기는 복수기에서 정압 방열되어 포화수가 된다.

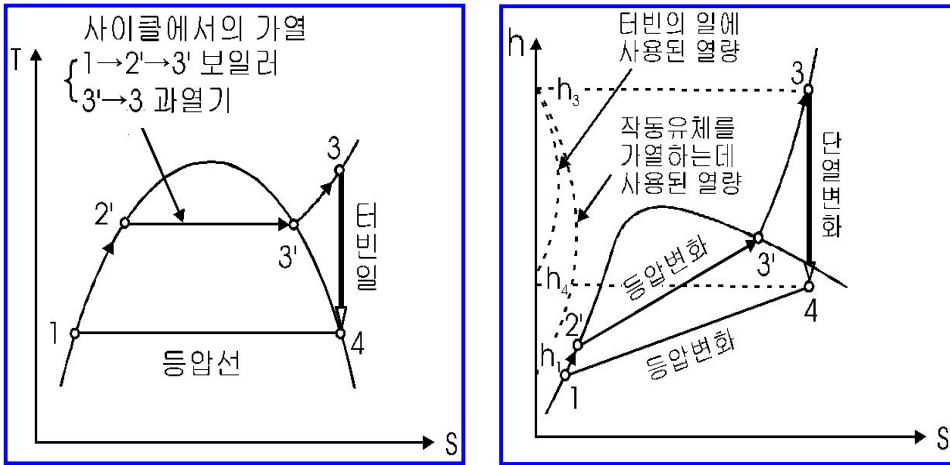


그림 2-2-2 랭킨 사이클 선도

나. 랭킨 사이클의 효율

$$\eta_R = \frac{\text{사이클에서 일에 이용된 열량}}{\text{사이클에서 가열량}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_3 - h_3')} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

제 3 절 재열 사이클에서의 열효율

랭킨 사이클의 열효율은 증기의 초압이나 초온을 높이고, 또 배기압을 낮게 함으로써 향상시킬 수 있으니 재료의 강도상 초온은 제한을 받으며, 배기압도 냉각수 온에 의해서 제한을 받으므로 초압을 높이는 방법밖에 없다. 그러나 초압을 높이면 높일수록 팽창후의 증기의 습도가 증가하며, 그 결과 마찰이나 증기 터빈의 깃(회전날개)의 부식 등을 촉진시키는 해가 생긴다. 따라서 증기의 초압을 높이면서 팽창 후의 증기의 건조도가 낮아지지 않도록 하는 재열 사이클이 고안된 것이며, 주목적이 효율증대보다 터빈의 복수장해를 방지하기 위한 것으로 수명연장에 주안점을 두고 있다.

가. 재열 사이클의 구성 및 선도

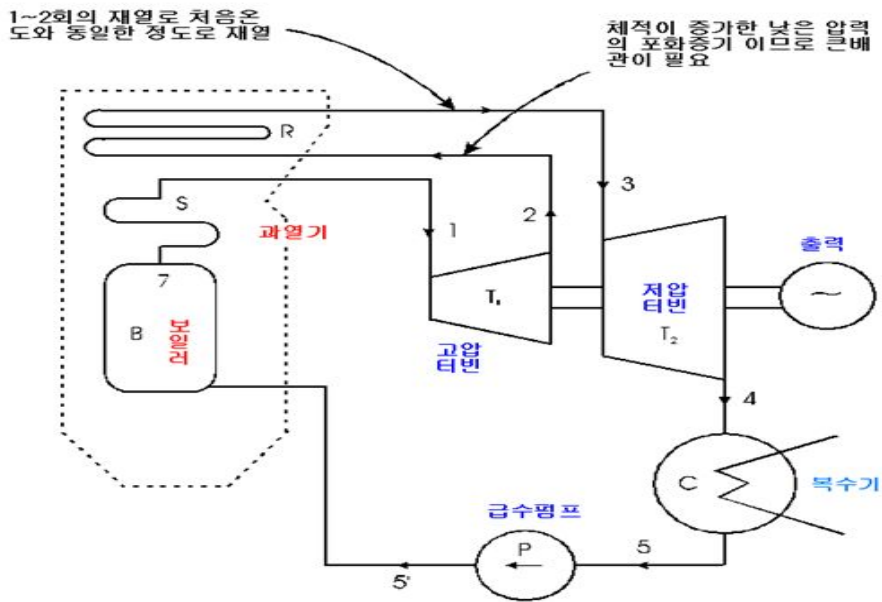


그림 2-3-1 재열 사이클의 구성

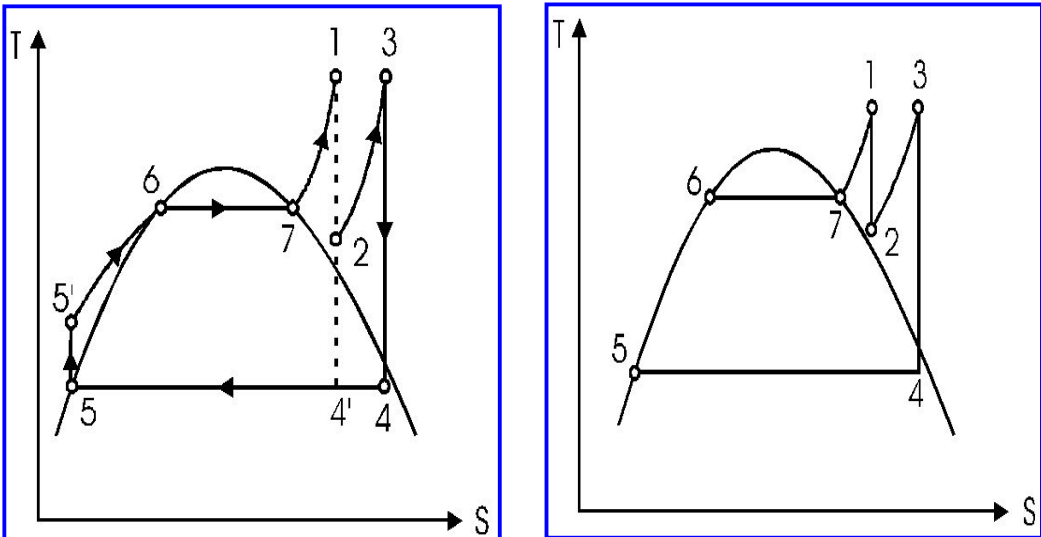


그림 2-3-2 재열 사이클의 선도

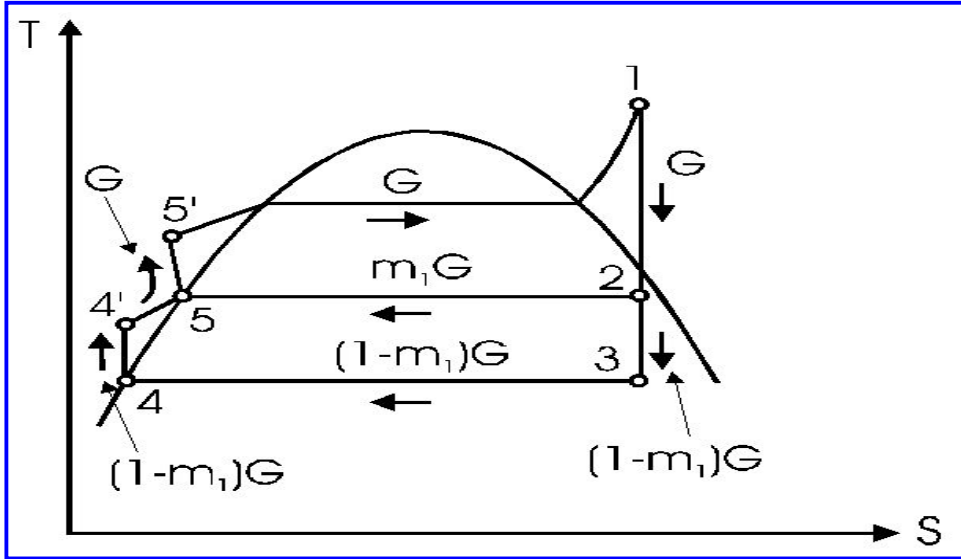


그림 2-4-1 재생 사이클의 선도

나. 재생 사이클의 효율

$$\eta_{RG} = \frac{\text{터빈에서의 일}}{\text{급수가 보일러와 과열기에서 얻은 열량}} = \frac{h_1 - h_2 + (1 - m_1)(h_2 - h_3)}{h_1 - h_5}$$

제 5 절 원자력발전소 증기 사이클에서의 열효율

원자력발전소 출력 사이클은 핵증기공급계통에서부터 시작된다. 증기는 증기발생기에서 생성되어 고압터빈으로 흐르며 고압터빈에서 열에너지가 기계적 에너지로 변환된다. 고압터빈에서 빠져나온 증기는 MSR을 거치면서 습분을 분리하고 저압터빈에 들어가기 전에 증기에너지에 열에너지를 가하여 재열시키게 되는데 저압터빈에서 열에너지는 기계적 에너지로 변환되고 고압터빈과 함께 발전기를 구동시킨다. 저압터빈은 증기가 두 방향으로 흐르는 이중팽창(Double-Expansion) 터빈의 증상으로 들어가 에너지를 잃으면서 팽창하고 최종적으로 각 끝단을 빠져나간 후에 복수기의 상부에 들어가며 순환수가 흐르는 튜브를 통과하면서 증기가 응축된다. 추기증기(Extraction Steam)는 고압 또는 저압터빈에서 추출되어 급수가 증기발생기로 들어가기 전에 급수를 재열시키는데 이용된다. 고압터빈과 저압터빈 사

이의 증기를 예열하는 것처럼 급수의 예열은 재생이라 불리는 열역학 프로세스를 통해 출력 사이클 효율을 개선시킨다.

가. 증기사이클 구성 및 선도

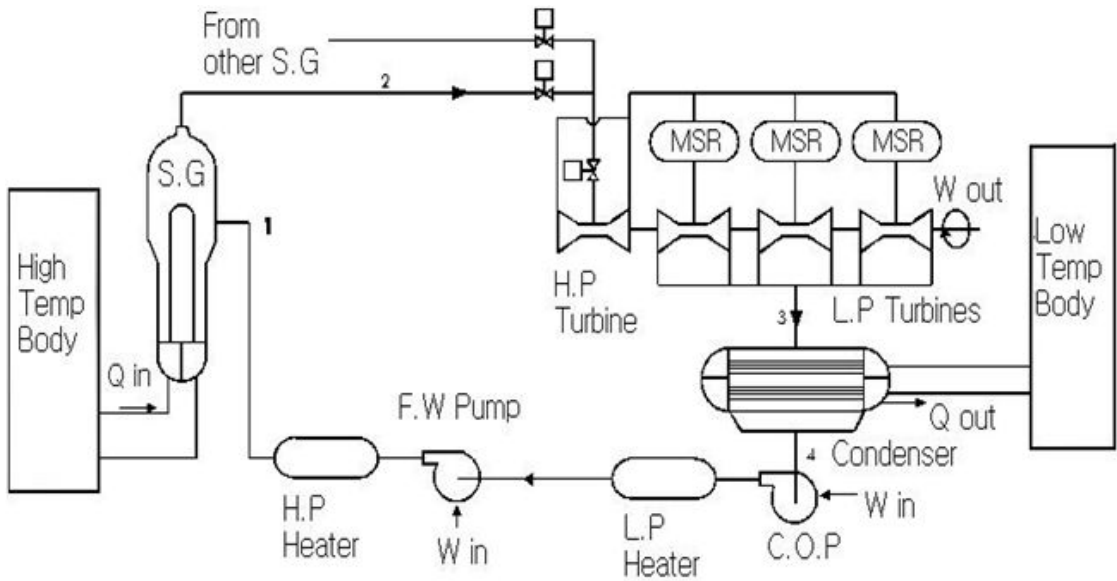


그림 2-5-1 원자력발전소 증기사이클 구성도

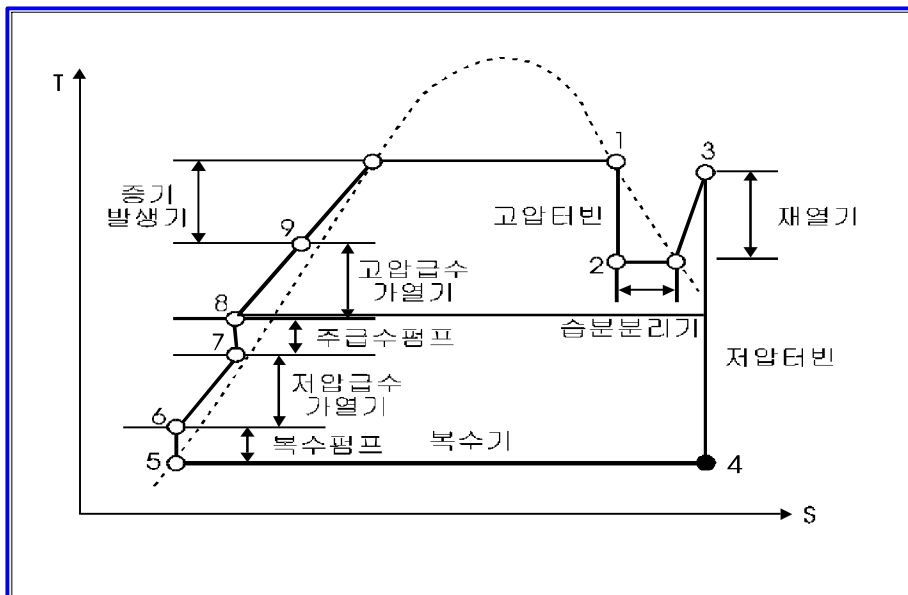


그림 2-5-2 원자력발전소 증기사이클 선도

나. 원자력발전소 증기사이클의 특성

핵증기 공급계통에서 발생한 고온의 열과 저온의 급수가 증기발생기에서 열교환을 통해 증기를 생산하여 터빈을 구동하게 된다. 즉 핵증기공급계통에서 발생한 고온의 1차계통수와 2차측에서 공급된 저온의 급수가 증기발생기에서 열교환을 하면서 습증기를 방생하게 되는데 이를 열역학적으로 해석하면 다음과 같다.

$$1차측에서 발생한 열 : Q_1 = hA\Delta T$$

(여기서 h : 열전달계수, A : 전열면적, ΔT : 온도차)

$$2차에 전달된 열 : Q_2 = mC\Delta T = m\Delta h$$

(여기서 m : 질량유량, C : 비열, ΔT : 온도차, Δh : 엔탈피 변화량)

즉 증기발생기에서의 열교환은 1차측에서 발생한 열이 2차측에 전달된 열과 같다. 하지만 1차측에서 생산되는 열 즉 ΔT Power는 항상 제한된 출력을 내고 있기 때문에 열량을 결정하는 중요한 인자는 전열면적(A)인 증기발생기 튜브에 의해 결정된다. 2차측에 전달된 열은 질량유량(m)인 급수유량에 의해 큰 영향을 받는다.

제 3 장 2차측 열출력 감소 인자

제 1 절 증기발생기 관막음에 의한 열전달 능력 감소

증기발생기는 1차측에서 생산된 열을 2차측의 급수로 열전달 시키는 동체(Shell)와 U-Tube로 구성된 열교환기다. 또한 방사성 오염 물질을 함유한 1차측과 비방사성 증기 사이클 간의 압력경계 역할을 한다. 1차측에서 2차측으로 열전달에 있어 직접적으로 영향을 미치는 2가지 인자가 있다. 하나는 증기발생기 파울링이고 다른 하나는 증기발생기 관막음이다. 파울링은 열전달 계수를 감소시키고, 관막음은 1차측에서 2차측으로 누설을 막고 RCS 압력경계로서의 기능이 저하됨을 방지하기 위해 수행되며 이는 열전달 면적을 감소시킨다. 비록 이 두 가지 인자는 동일한 원인 즉 부적절한 증기발생기 화학처리에 의해 발생될 수 있지만 둘 다 증기발생기의 열전달 기능을 감소시킨다. 몇몇의 경우에 있어 증기발생기 성능저하는 증기발생기 수명 연장을 위해 출력제한의 결과를 가져온다. 또한 증기발생기 화학처리를 위한 출력 증발 중단과 증기발생기 고 취출유량에 의한 출력 감소는 2차측 열출력 감소의 주요 원인이 된다. 참고로 국내 표준형원전의 관막음 허용 비율은 8%를 허용하고 있다. 다음의 표는 영광 5,6호기 관막음 현황이다.

(2011.07 기준)

구 분	공장 관막음		1차		2차		3차		4차		5차		6차		7차		합 계		
	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02	계
영광 5호기	4	0	2	2	2	0	2	13	6	6	4	7	0	0	0	2	20	30	50 (0.61%)
영광 6호기	1	1	4	2	11	5	4	5	13	9	13	16	0	2	3	1	49	41	90 (1.1%)

표 3-1-1 영광 5,6호기 관막음 현황

증기발생기 관막음의 증가는 열전달 면적의 감소를 의미한다. 즉 1차측에서 발생한 열 $Q_1 = hA\Delta T$ 라는 식에서 열전달 면적(A)의 감소를 의미한다. 2장에서 언급한바와 같이 1차측 출력(ΔT Power)은 일정한 부분을 유지하고 있으므로 열전달 면적의 감소는 결국 발전소 전체 출력 감소하는 방향으로 작용하게 된다. 증기 사이클에서 살펴보면 다음과 같다.

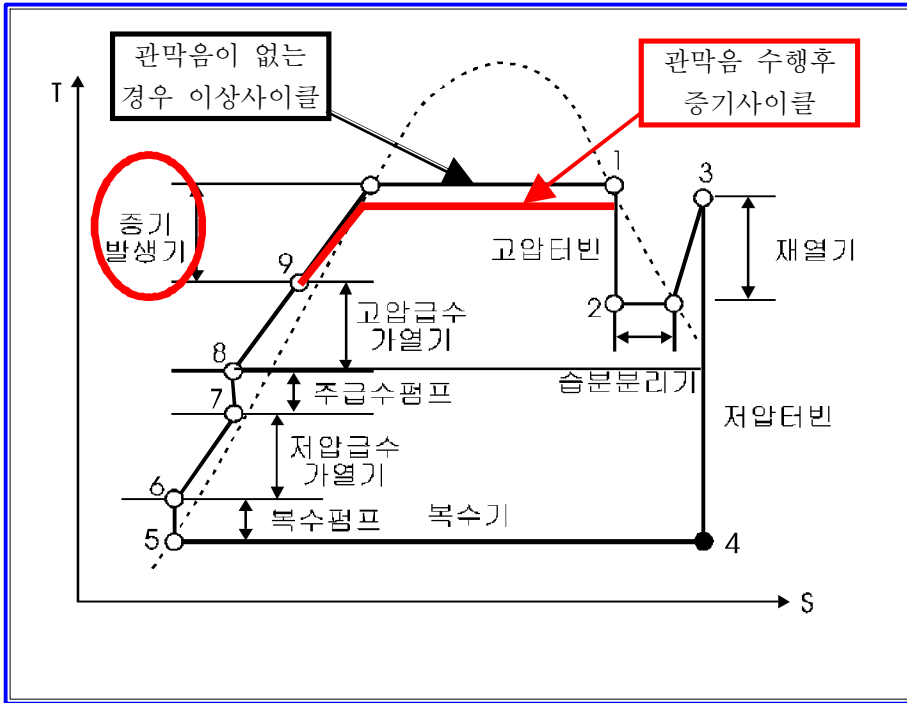


그림 3-1-1 증기발생기 관막음으로 인한 증기사이클 선도 변화

상기 그림에서와 같이 관막음으로 인한 증기 사이클의 변화는 2차측 열전달의 감소로 인해 효율로 대변될 수 있는 효율로 대변할 수 있는 사이클의 면적을 감소시키는 방향으로 작용한다. 1%의 관막음이 수행되었을 때 1MWe 정도의 전기출력 감소를 초래한다. 초기 발전소에서는 미미한 출력변화이지만 수명이 더할수록 점점 그 영향력이 커지기 때문에 발전소 수명관리에 중요한 부분을 차지하고 있다.

제 2 절 급수유량 감소에 따른 열출력 감소

계산된 발전소 출력에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 단연 가열된 급수가 터빈을 구동시키는 증기로 전환되는 과정이다. 증기발생기 내 모든 증기가 바로 터빈으로 가는 것은 아니다. 증기의 일부는 급수를 가열하고 고압터빈 배출 증기를 재열하기 위해 고압 및 저압터빈의 여러 단에서 추기된다. 비록 추기증기는 발전소 출력을 감소시키지만 발전소 2차측 효율을 증가시킨다. 또한 추기증기계통은 터빈을 통과하면서 증기가 팽창함에 따라 증기의 습분을 제거하는데 사용된다. 밸브 Seat, 배관결합, 증기트랩 내장품, 밸브 Packing 등 여러 경로를 통과하면서 추가적인 증기 손실을 발생할 수 있다. 또한 급수 유량의 작은 부분인 증기발생기 취출유량은 증기발생기 수질 및 용존 고형물 관리를 위해 유로가 전환된다. 취출 유량의 결과는 발전소 출력은 감소시킨다. 비록 수질관리를 위해 필요하지만 취출 유량을 최소화하여 열손실을 감소시켜야 한다.

위에서 기술한바와 같이 급수유량 측정은 발전소 열출력 계산에 있어 가장 중요한 단일 인자이다. 각 발전소는 인가출력 제한치가 있다. 노심출력을 결정하는데 있어 가장 정확한 방법은 2차측을 기준으로 수행된 열평형이다. 급수유량 측정의 정확성은 대부분 계측기 편차(Drift), 급수배관 침식, 계측관의 균열, 우회유량, 초기 교정오차 및 벤츄리 파울링 등의 인자에 의해 영향을 받는다. 이중에서도 벤츄리 파울링은 출력감소의 주요원인이 되어 있다. 벤츄리 파울링은 급수유량의 과다 계산으로 인한 2차측 열출력의 과다 계산을 초래한다. 그로인해 전기출력은 감소하는 현상이 발생하고 발전소 효율은 점점 감소하게 된다. 실제로 국내 표준형 원전에서도 여러 발전소에서 주급수 파울링 현상을 경험한 발전소가 많이 있다. 그림 3-2. 1은 영광 5호기 4주기에서 나타난 주급수 파울링 현상을 보여주고 있다. 2차측 열출력인 BSCAL 출력은 한주기 내내 일정하게 유지하고 있지만 노심 말기에 갈수록 터빈출력과 전기출력은 거의 10MWe 이상 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 주증기 및 터빈1단 압력이 주기 말에 감소하는 현상이 나타난다.

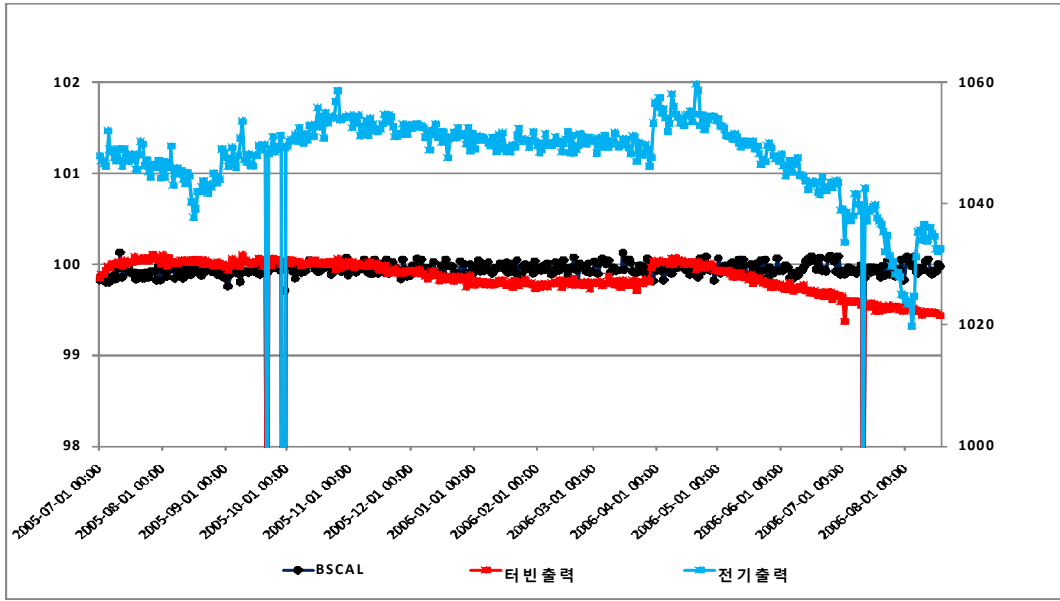


그림 3-2-1 영광 5호기 4주기 출력 변화

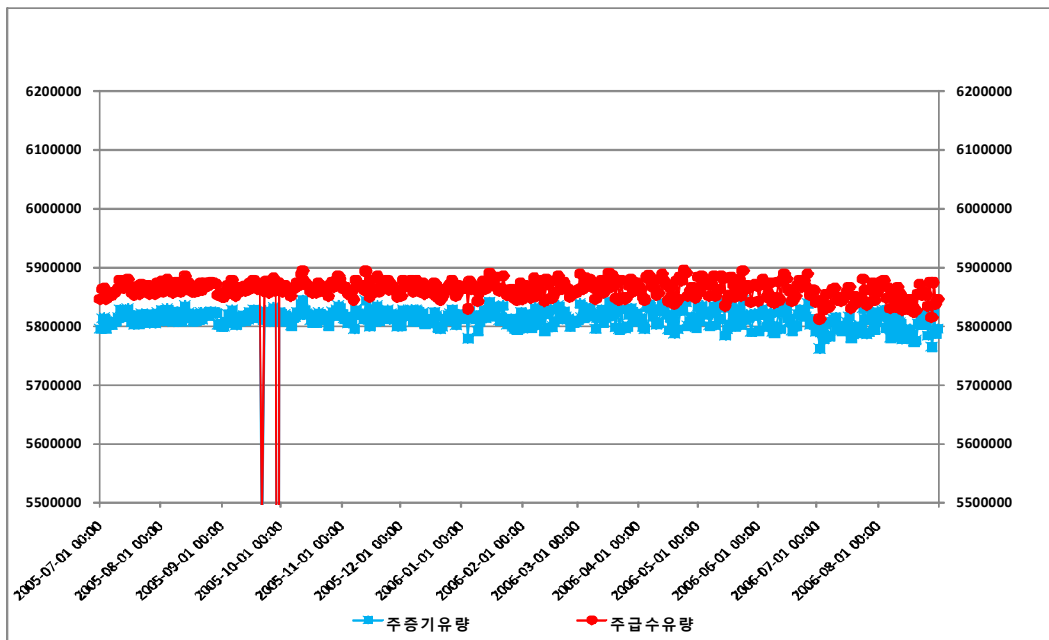


그림 3-2-2 영광 5호기 4주기 주증기 및 주급수 유량 변화

이러한 주급수 파울링의 영향으로 2차측 열출력이 감소된 상태로 4개월 정도의 출력감소 운전은 계속되었으며 이런 현상은 영광 5호기에서만 나타나는 것이 아니고 표준형 원전 대부분에서 경험한 사항이다. 급수 유량 변화가 증기 사이클에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

사이클에서 살펴보면 다음과 같다.

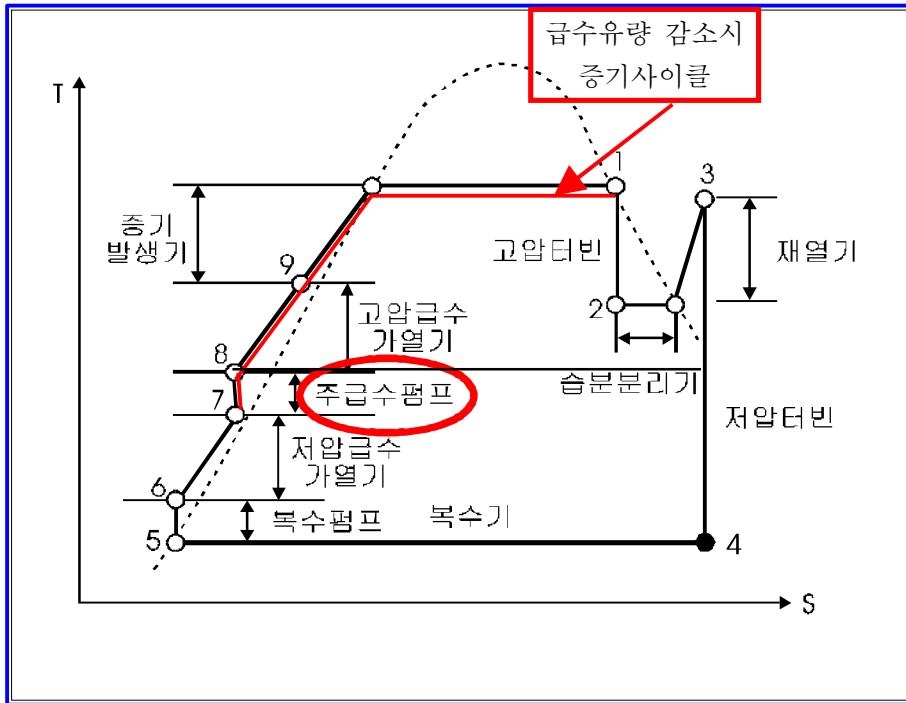


그림 3-2-3 급수유량 감소에 따른 증기사이클 선도 변화

표준형 원전에서 계산된 출력은 급수엔탈피 변화량에 급수의 질량 유량을 곱한 값으로 계산된다. 식으로 표현하면 다음과 같다

$$EG = M_f \times (h_{steam} - h_{feed}) - M_b \times (h_{steam} - h_{blowdown})$$

란 식으로 표현할 수 있다.

(EG : 증기발생기 에너지, M_f : 급수유량, $(h_{steam}-h_{feed})$: 급수엔탈피 변화량,

M_b : 취출수 유량, $(h_{steam}-h_{blowdown})$: 취출수 엔탈피 변화량)

증기발생기 취출수 유량은 일정하기 때문에 실제 증기발생기 에너지는 급수 엔탈피 변화로 대변할 수 있다. 표준형 원전의 100% 정상 출력 상태에서 증기발생기

에 공급되는 급수 유량은 약 2950 ton/hr 정도이다. 다른 조건이 동일하다는 가정 하에 급수유량이 20 ton/hr 변화에 대해 전기출력 기본 약 4.6MWe 정도의 변화가 생기는 것으로 계산된다. 중요한 요소는 벤츄리과울링에 의해 비정상적인 유량을 지시함에도 불구하고 2차측 열출력은 100%의 정상 운전 상태를 지시하기 때문에 증기 사이클에서 실제출력은 감소하게 된다. 이렇게 발생한 유량 감소현상은 노심 말기가 될수록 더 커지는 경향을 보이고 있다.

제 3 절 사이클 효율저하에 따른 열출력 감소

가. 급수온도 저하에 따른 열출력 감소

급수가열기는 재생이라는 열역학 프로세스를 이용하여 발전소의 효율을 개선시키는 열교환기이다. 또한 급수가열기는 저온의 급수가 증기발생기로 공급됨에 따른 열충격을 최소화하고 발전소 열효율을 향상시킨다. 급수가열을 위해 고압 및 저압터빈의 여러 단에서 추기증기가 개별 급수가열기로 공급되어 복수기에서 증기발생기로 급수를 공급하면서 점진적으로 가열시킨다. 또한 MSR에서 제거된 습분은 급수가열을 보조하기 위해 사용된다. 급수가열기 배수계통은 계통내 어느 정도의 잔열을 재이용 하는데 보조한다. 배수는 고압급수가열기에서 저압급수가열기로 단계적으로 배수되며 최종 주복수기로 배수 된다. 급수가열기는 종종 2차측 열출력 감소의 원인이 된다. 여러 가지 원인이 있지만 적절한 급수가열기 수위 유지가 되지 않으므로 급수 온도에 영향을 미쳐 이것이 결국에는 출력감소 요인으로 작용하게 된다. 급수가열기 최적 성능은 적절한 배기와 정확한 배수에 의해 좌우된다. 급수가열기 성능에 영향을 주는 인자는 일반적으로 수위제어불량, 부적절한 배기에 있다. 급수가열기 수위는 매우 짧은 수위제어 범위 내에서 유지되어야 한다. 만약 수위가 너무 높으면 어느 정도 응축표면이 없어져서 전체 열전달이 감소한다. 또한 배기 냉각기는 복수기로 배수되기 전 가열기 배수로부터 열을 흡수하여 열효율을 증가시키기 위해 사용된다. 가열기와 일체형인 냉각기인 경우 수위가 정상보다 낮다면 냉각기의 튜브는 노출될 것이다. 이러한 운전 상태에서는 과냉 응축에 있어 효과적이지 못하다. 만약 수위가 너무 낮으면 추기 증기는 배수 유로를 통해

배출 될 것이고 과냉정도는 급감한다. 급수가열기 수위는 응축부위인 튜브다발 바로 아래에 있어야하고 배수 냉각기를 완전 침수시킬 것이다. 복수기로 바로 배수되는 고수위 펌프밸브는 추기증기 배관으로 물이 유입되는 것을 막아 터빈을 보호한다. 만약 모든 수위가 상실된다면 증기가 가열기로 쌓이게 되어 응축은 거의 없고 열전달은 매우 작아진다. 가열기 배수계통에서 과냉각수를 유지하는 것은 증기화를 막고 저압급수가열기로 배수되는 동안 수충격에 의한 침식을 방지하는데 도움을 준다. 적절한 수위 유지를 위해서 정상배수 밸브와 급수가열기 수위가 높을 시에 동작되는 비상배수 밸브로 구성되어 있다. 개략도로 살펴보면 다음과 같다.

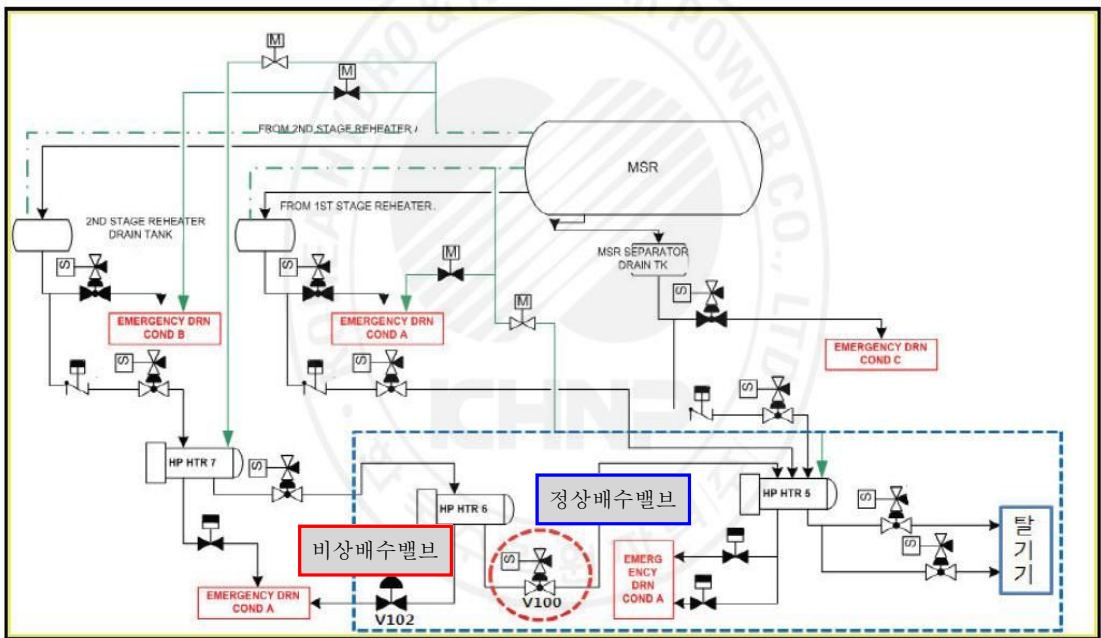


그림 3-3-1 고압급수가열기 개략도

정상운전 상태에서는 정상 배수밸브에 의해서 급수가열기에 수위가 유지되면서 운전되는데 급수가열기 수위가 높을때나 수위전송기가 Fail시 정상 배수밸브가 닫히고 비상배수 밸브가 열리게 된다. 이로 인해 하위 급수가열기로 전달되면서 급수의 온도를 가열하게 되는 유량이 감소하게 되고 배상 배수밸브 쪽으로 유로가 형성되게 되어 복수기로 배수된다. 이것은 열원의 감소를 의미하며, 이로 인해 급

수온도의 감소를 초래하게 되며, 이것을 최종적으로 급수 엔탈피를 감소시키는 결과를 초래한다. 사이클 선도로 살펴보면 다음과 같다.

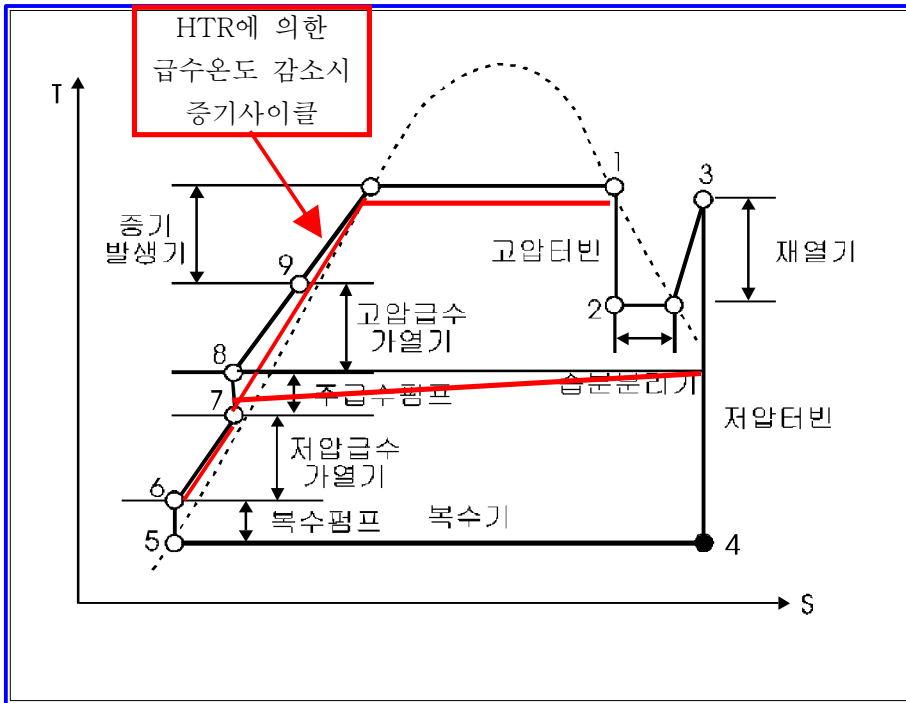


그림 3-3-2 급수온도 감소에 따른 증기사이클 선도 변화

표준형 원전에서 급수가열기 고장에 의한 출력감소 사례는 다음과 같다.

2011년 기준

발전소 구분	수위제어불량	계측기 오동작	튜브 누설	비고
영광 3발	3	1	-	
영광 2발	2	1	2	
울진 2발	1		2	
울진 3발	2	3	3	

표3-3-1 표준형 원전 급수가열기 고장 사례

위에서 언급하였듯이 급수가열기는 증기발생기에 공급되는 급수의 온도를 올림으로써 효율을 개선하는데 목적이 있다. 실제 발전소 출력에서 급수 온도 변화의 영향을 살펴보면 동일 조건에서 급수온도 1℃ 변화에 따른 출력변화를 살펴보면 엔탈피 변화량이 6×10^6 kcal/h(약 7MWe) 급수 온도 변화에 따른 영향보다 더 큰 것을 볼 수 있다.

실례로 영광 5호기에서 발생한 사례로 원자로출력 100%, 터빈발전기 1045MWe 운전 중 고압급수가열기 06B 정상 배수밸브가 비정상 닫힘으로 발전기 출력이 감소한 사례이다. 정상상태로는 고압급수가열기 06B에서 정상 배수밸브를 통하여 고압급수가열기 05B를 거쳐 탈기기로 유로가 형성되어야 하나 정상 배수밸브가 닫힘으로 비상배수밸브를 통하여 복수기로 유로가 형성된 상황이다. 이로 인해 급수 온도 감소로 인해 발전기 출력이 약 20MWe 감소하였다. 주요 운전변수를 살펴보면 다음과 같다.

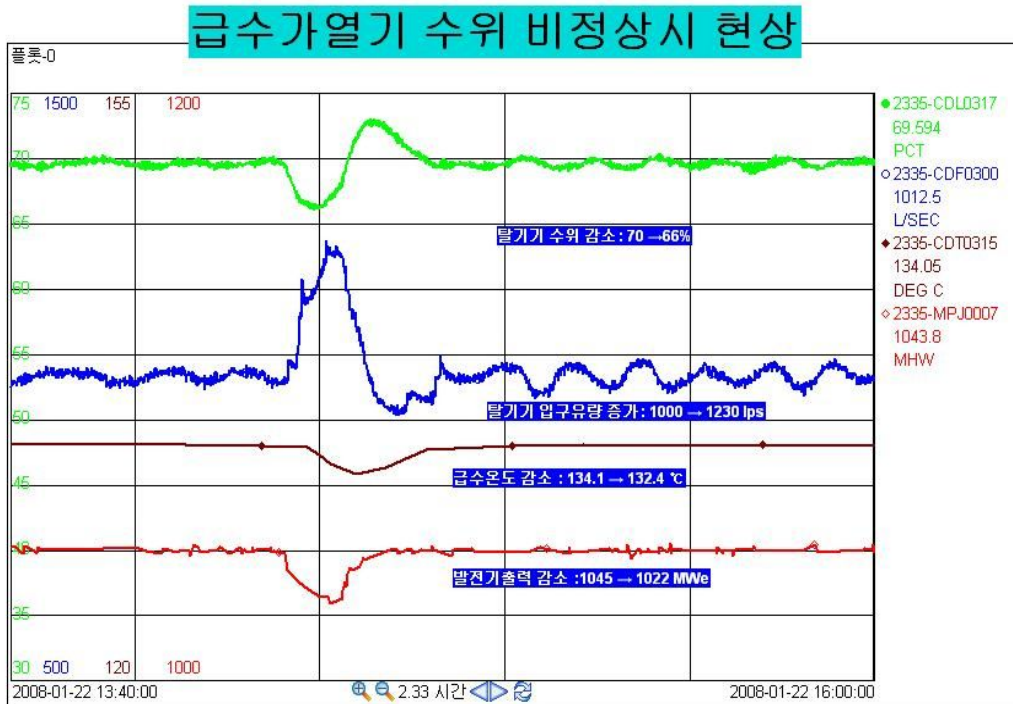


그림 3-3-3 비정상시 주요 운전변수

그림 3-3-3 그래프에서 보듯이 급수온도의 작은 변화(약1.7°C)에도 출력은 거의 23MWe의 감소를 보이고 있다. 이렇듯 급수가열기의 비정상운 2차측 열출력 감소에 주요한 요인으로 작용하고 있다.

나. 복수기 진공 저하에 따른 열출력 감소

복수기는 순환수를 이용하여 저압터빈 배기증기를 포화수 또는 과냉각수로 전환한다. 복수기는 진공상태에서 운전되며, 진공은 증기를 물로 전환하는 과정에서 형성된다. 상태변화에 의한 체적의 큰 감소로 진공이 형성된다. 복수기는 터빈 배압을 감소(터빈효율을 증가시키는)시키기 위해 진공도가 높은 상태에서 운전되어야 한다. 또한 복수기는 가능한 고온(또는 최소한의 과냉각)상태로 증기를 응축시켜야 한다. 이상적으로 복수기 집수정(Hotwell)내 유체는 포화상태에 있어야 한다. 왜냐하면 어떤 과냉각 상태도 추가 급수가열 과정에서 유지되어야하며 이는 사이클 효율을 감소시키기 때문이다. 이 같은 진공을 유지하기 위해 복수기는 증기내 공기와 용존 가스를 제거해야하고 순환수가 공급되어야 한다. 이 목적으로 진공펌프 또는 공기추출기(Air Ejector)가 사용된다. 표준형 원전에서 복수기 진공이 2차측 열출력에 미치는 영향을 살펴보면 다음 그림과 같다.

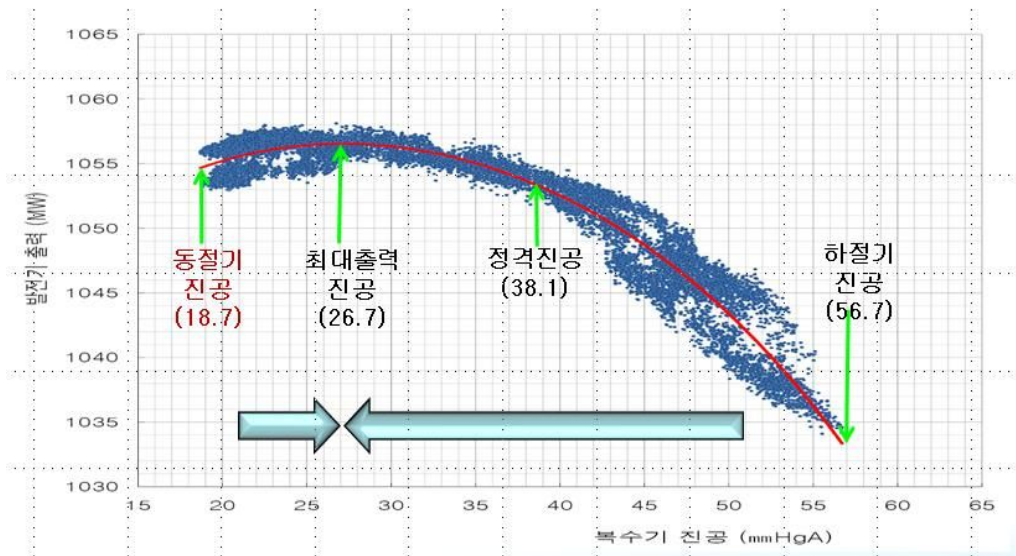


그림 3-3-4 영광 6호기 복수기 진공 저하 따른 출력 변화

증기사이클 선도와 살펴보면 다음과 같다.

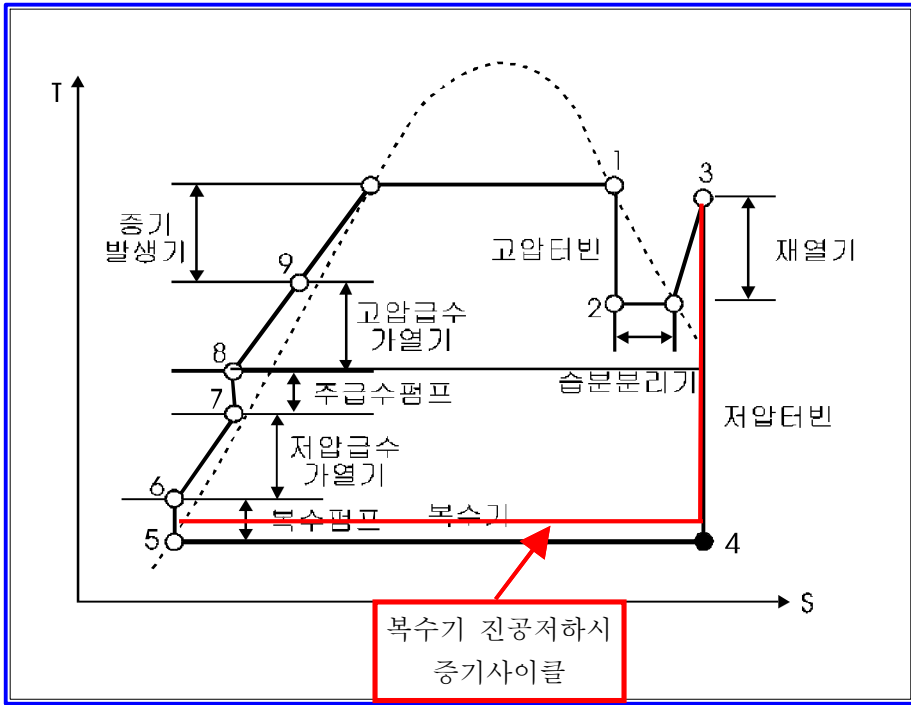


그림 3-3-5 복수기 진공 저하 따른 증기사이클 선도 변화

복수기 진공 저하에 따른 출력변화 그림에서 보듯이 복수기 진공저하는 출력 급감현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 진공이 30mmHg에서 50mmHg로 상승하였을 때 출력은 거의 15MWe 정도까지 떨어진 것을 볼 수 있다. 실제 하절기 영광 지역의 수온의 상승으로 인한 진공이 60mmHg까지 상승하는 것을 감안할 때 복수기 진공에 대한 영향은 출력감소 인자의 중요한 부분을 차지하고 있음을 보여주고 있다. 또한 그림에서 보듯이 진공이 과도하게 낮아지면 불필요한 과냉각이 발생하게 되고 오히려 출력에 마이너스 요인으로 작용하게 된다.

복수기 진공저하의 원인은 다음과 같다

- ① 복수기 순환수 계통에 있어 미생물 파울링 관리는 원자력발전소에 있어 오랫동안 지속된 문제였다. 여러 종류의 유기 퇴적물에 의한 파울링과 함께 조개류 같은 가시생물의 침적과 성장이 결합하여 미생물과 그들의 생성물질로 구

성된 유기체 막의 형성은 복수기 튜브를 막아 진공저하의 원인이 되어 발전소 성능과 필수계통의 성능에 치명적인 영향을 준다. 이러한 종류의 침적물들은 열교환기의 열전달 효율을 감소시키고 튜브표면에서 유체의 마찰저항을 증가시킨다.

- ② 낮은 순환수 유량 : 이것은 튜브 관막음이나 파울링 때문이다. 이 같은 상황은 복수기 증기온도의 증가를 가져오는 복수기 진공감소가 발생할 것이다. 순환수 입구 온도가 일정할 경우 순환수 출구온도는 증가할 것이다.
- ③ 다량의 공기 유입 : 공기유입이 많은 기간 동안 튜브표면에는 공기가 덮히고 복수기 진공이 감소되어 복수기 성능에 악영향을 미친다. 가능한 공기 유입원은 차단밸브 누설, 밸브패킹 누설, 터빈 복수기 연결부의 부적절한 밀봉, 복수기 동체측 용접부 누설 등이 있다.
- ④ 높은 복수기 순환수 입구 온도 : 특히 여름철에 문제가 되는데 복수기 성능에는 영향을 미치지 않지만 복수기 운전변수에 영향을 미쳐 복수기 온도 및 압력을 증가시키고 터빈 배압의 증가를 가져온다.
- ⑤ 복수기 튜브누설 : 복수기 튜브 누설은 2차측에 있어 주요한 오염원이 될 수 있다. 2차측 오염은 궁극적으로 증기발생기 성능에 악영향을 미치는 증기발생기 수질관리 문제에 이른다. 튜브누설은 주복수기 순환수가 증기측으로 유입하여 복수와 혼합되어 2차측 수질을 오염시키게 된다. 만약 누설량이 작으면 복수 탈염설비가 오염 물질을 제거할 수 있지만, 누설량이 많다면 출력을 감발시키고 누설부위를 격리, 배수 및 정비해야 한다. 표준형 원전에서는 영광 3, 5, 6호기에서 각 1회씩 복수기 튜브 누설사례가 보고되고 있다.

제 4 절 2차측 열출력 감소인자 정리

제3장에서 살펴본바와 같이 여러 가지 원인에 의해 2차측 열출력 감소에 원인들 중에서 열전달 능력 감소, 급수유량 감소 그리고 증기사이클의 효율저하의 부분에서 MSR의 습분제거효율 감소, 급수가열기 효율 감소, 복수기 진공저하 등의 관점에서 살펴보았다. 이를 정리하면 다음과 같다.

출력감소 인자	출력 감소 원인	출력 감소 정도	지속정도	비고
증기발생기	증기발생기 관막음	관막음 1% 1MWe	장기적영향	
급수유량	급수유량 감소(파울링)	20 ton/hr 감소시 4.6MWe	증장기적 영향	
MSR	습분제거효율 감소	정량화된 Data 없음	-	
급수가열기	수위제어 불량	급수온도 1℃ 변화시 7MWe	일시적 영향	
복수기	진공저하	20mmHg 증가시 15MWe	단기적 영향	

표 3-4-1 2차측 열출력 감소 인자 비교표

제 4 장 2차측 열출력 감소 인자 해결방안

제 1 절 증기발생기 관막음에 의한 열전달 능력 감소 해결방안

수많은 미국 발전소는 다량의 관막음 또는 튜브누설 때문에 증기발생기를 교체했다. 실제 국내 최초 원자력 발전소인 고리1호기에서도 수명연장을 위해 증기발생기를 교체하여 상업운전을 시작하였다. 위에서 언급한 바와 같이 국내 원자력발전소의 증기발생기는 8%의 관막음을 허용하고 있다. 증기발생기 튜브의 관막음의 가장 주된 요인은 마모와 부식이다. 이를 극복하기 위해 표준형 원전에서는 2차측 수질관리 기분을 강화하였고, 또한 즉각적인 대처를 위해 실시간 수질관리 감시 프로그램을 운영 중이다. 증기발생기 수질관리에 대한 일환으로 또한 증기발생기 수명관리 프로그램을 개발하여 운영 중이며 관막음 최소화를 위한 다각적인 노력을 기울이고 있다. 아래 그림은 강화된 2차측 수질관리기준과 실시간 수질관리 프로그램을 보여주고 있다.

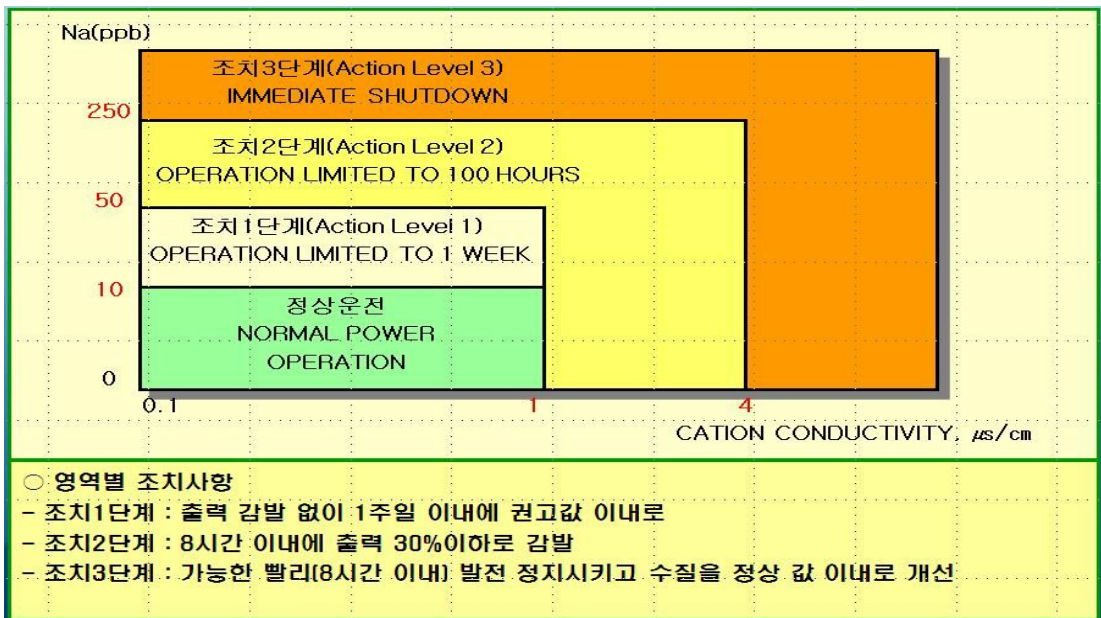


그림 4-1-1 표준형 원전 수질관리 기준

5호기 수질계통도

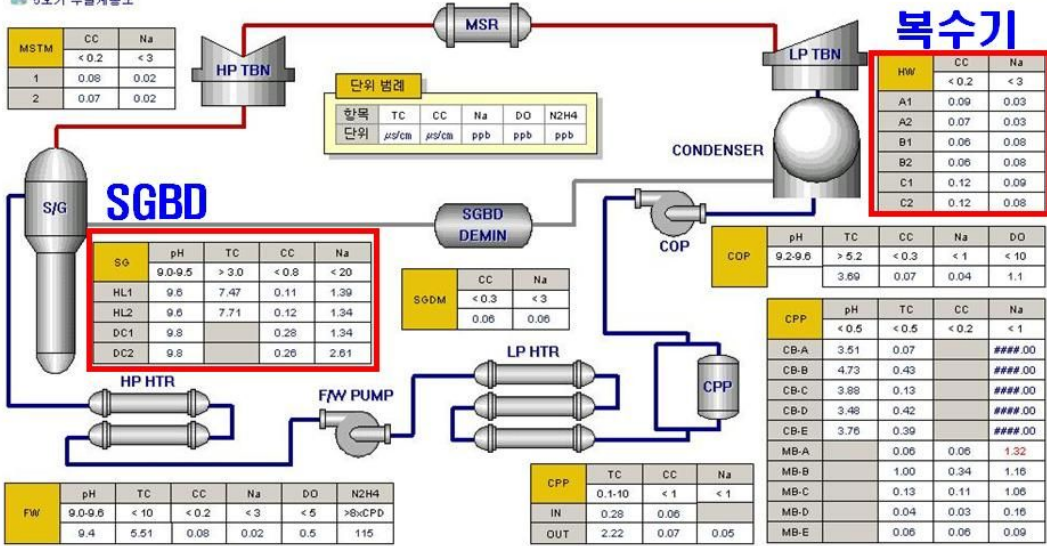


그림 4-1-2 영광 5호기 2차측 수질 On-line 감시설비

제 2 절 급수유량 감소에 따른 열출력 감소 해결방안

위에서 지적한 바와 같이 급수유량 측정은 발전소 출력계산에 있어 단일요소 중 가장 큰 원인이다. 이 원인을 해결한다는 것은 2차측 열출력 손실의 많은 부분을 해결 하는 것이나 다름이 없다. 이에 대한 해결책을 찾기 위해 표준형 원전은 노심준전제한치감시계통(COLSS)에서 계산되는 2차측 기준열출력을 주급수 유량 측정 기반 열출력 계산방법에서 더하여 주증기 유량 측정기반 열출력 계산 방법을 추가하였다. 이렇게 함으로써 주급수 파울링 현상이 나타날 때(주기말) 2차측 기준 열출력을 주급수 유량 측정기반 열출력에서 주증기 유량 측정기반 열출력 계산 방법으로 전환함으로써 주급수 파울링에 따른 2차측 열효율 감소현상을 완화시키려는 노력을 기울이고 있다. 그림 4-2-1을 노심준전제한치감시계통에 추가된 2차측 열출력 선택에 대한 추가 내용을 보여주고 있다.

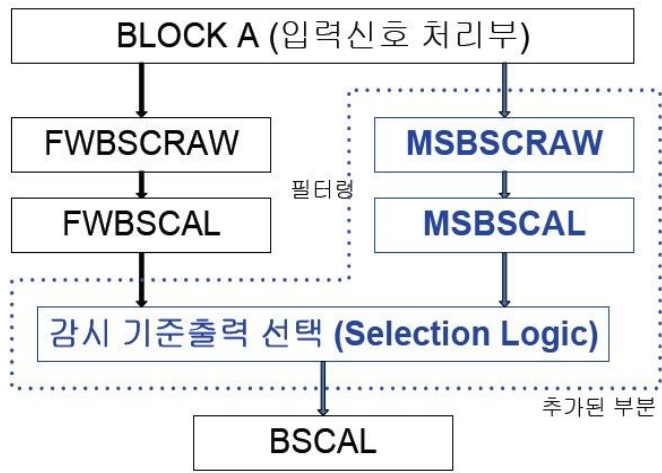


그림 4-2-1 COLSS 열출력 계산모듈 개념

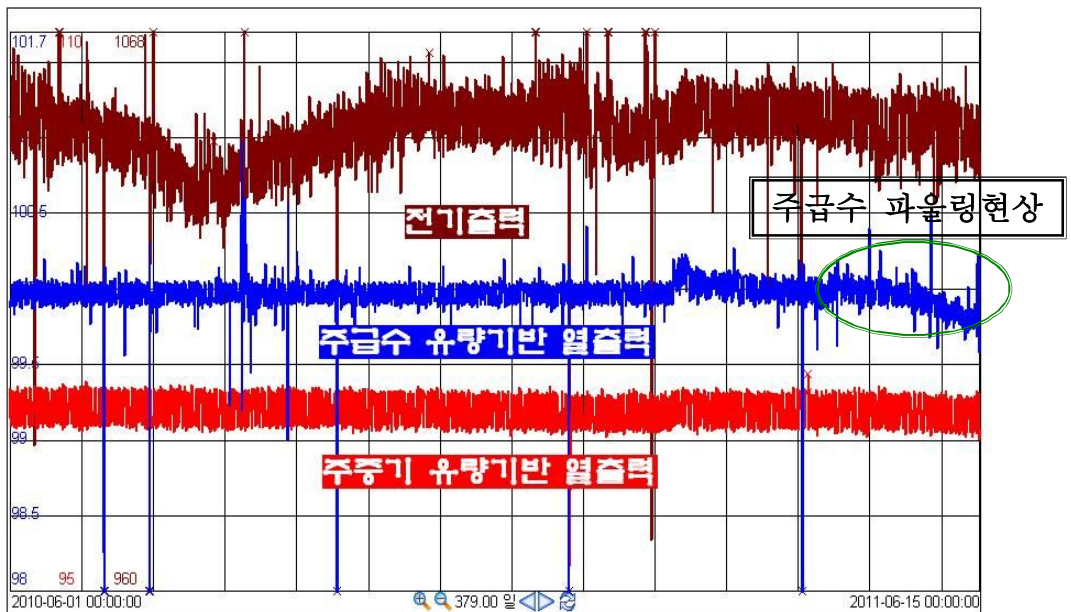


그림 4-2-2 영광 6호기 6주기 2차측 열출력 변화

그림 4-2-2에서 보여주는 바와 같이 동일한 주급수 파울링 현상이 나타났음에도 불구하고 주증기유량기반 열출력을 선택함으로써 영광 4주기와 비교했을 때 전기 출력 감소가 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다.

제 3 절 급수온도변화 감소에 따른 열출력 감소 해결방안

급수온도 감소의 원인은 급수가열기의 수위제어의 실패에 있다. 표준형 원전에서도 급수가열기에 대해 중요한 이슈중의 하나는 급수가열기 수위제어 부분이다. 이 부분에 대한 연구과제가 진행되고 있으며 신속한 대응을 위해 급수가열기 수위 비정상 상황이 발생되었을 때 현장에서 직접 밸브를 제어할 수 있는 M/A Station을 설치하여 비정상 상황에 대처하도록 하고 있다. 다음 그림은 실제 영광 5,6호기 현장에 설치된 M/A Station 사진과 설치 구성도를 나타내고 있다.

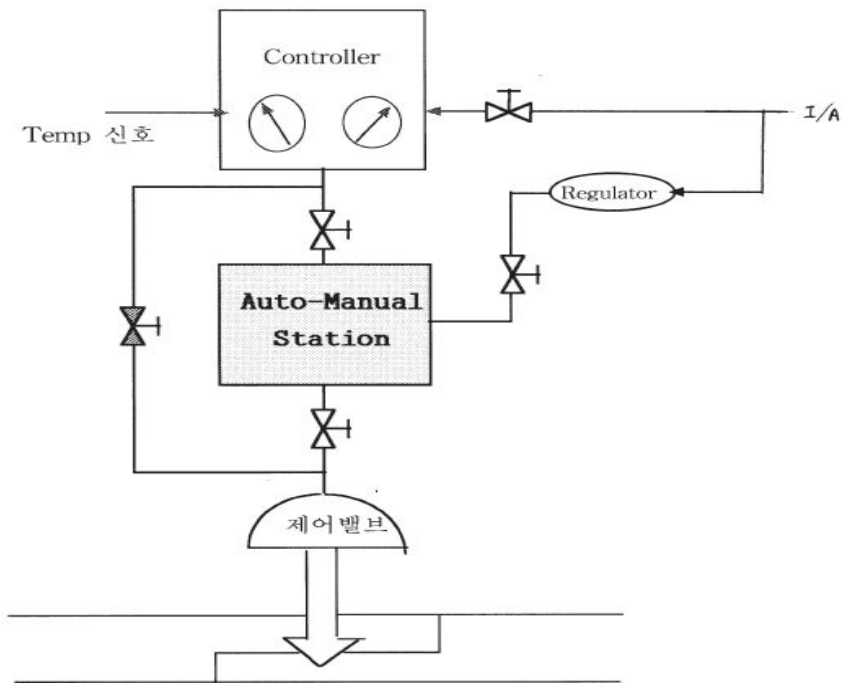


그림 4-3-1 영광5, 6호기 M/A Station 구성도



그림 4-3-2 영광5, 6호기 M/A Station 현장 사진

제 4 절 복수기 진공저하에 따른 열출력 감소 해결방안

복수기 진공에 대해 최적의 운전을 위한 다각적인 노력이 이루어지고 있다. 영광 5,6호기의 진공 최적점은 약 27mmHg 파악되고 있다. 해수 온도 영향을 많이 받는 영광 5,6호기에서 최적의 복수기 진공을 유지하기 위해 여름철에 진공 저하를 막기 위해 순환수 유량을 증가시키는 운전을 수행하고 있고 과진공을 상태를 줄이기 위해 겨울철에는 순환수 유량을 줄임으로써 최적의 진공을 유지하기 위한 노력을 기울이고 있다. 또한 복수기 튜브 누설이나 막힘을 줄이기 위해 영광 5,6호기는 초기 설계단계에 설치되어 있지 않았던 Debris Filter를 설치함으로써 이물질 유입에 의한 복수기 진공저하 및 복수기 튜브 손상에 상당한 취약점을 개선하였다. Debris Filter 설치 후 매주 운전을 했던 복수기 세정계통의 운전 시간이 현격히 줄어 한 달에 한번 정도의 운전으로도 충분히 이물질을 제거할 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 복수기 튜브 세정을 위해 사용하는 스폰지 볼 회수율이나 세정되어지는 이물질양도 많이 줄일 수 있게 되었다. 다음 그림은 복수기의 Debris Filter와 복수기 세정계통이다.

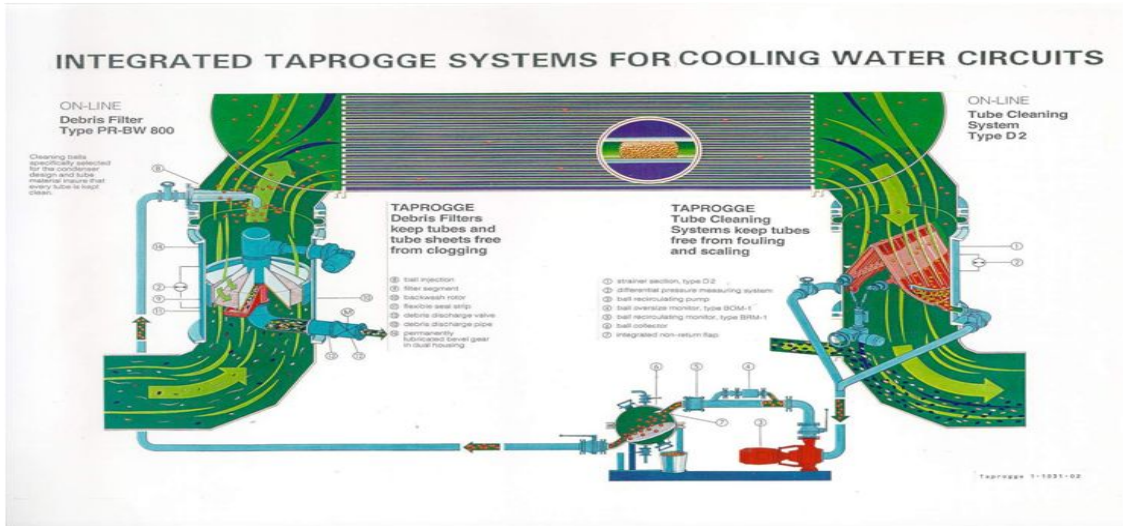


그림 4-4-1 복수기 Debris Filter와 복수기 세정계통 개략도

제 5 절 2차측 출력감소인자 해결방안 정리

2차측 열출력 감소인자에 표준형 원전에서의 대처방안들을 살펴보았다. 이를 정리하면 다음과 같다.

출력 감소 인자	출력 감소 원인	지속 정도	해결 방법	비고
증기발생기 관막음	부식과 마모에 의한 관막음	장기적 영향	급수 수질관리강화 실시간 수질감시 SG 수명관리 프로그램 운영	
Feedwater 유량 감소	벤츄리파울링에 의한 유량감소	중장기적 영향	출력계산 방식변경 (급수유량→증기유량)	
Feedwater 온도 저하	급수가열기 수위제어 불량	일시적 영향	M/A Station 설치로 신속한 대응절차 마련	
복수기 진공 저하	순환수 유량 감소에 의한 진공저하	단기적 영향	Debris Filter 설치로 이물질 유입 방지	

표 4-5-1 2차측 열출력 감소인자 해결방안 정리

제 5 장 결 론

본 연구에서는 증기사이클에 대한 이해를 돕기 위하여 카르노 사이클, 랭킨 사이클, 재생·재열 사이클과 더불어 원자력발전소에서 적용하고 있는 터빈증기사이클에 대한 구성과 열효율에 미치는 영향에 대해 기술하였다.

또한 본 연구에서는 국내 표준형 원자력 발전소에서 나타나고 있는 2차측 열출력 감소에 영향을 미치는 인자들에 대해 실제 발전소 터빈 증기사이클에서의 역할을 기술하였고, 또한 2차측 열출력 감소의 대한 실패들을 통해 비계획적인 2차측 열출력 감소 정도와 영향에 대해서 기술하였다.

비계획적인 2차측 열출력 감소 인자들 각각에 대해서 현재 국내 표준형 원전에서 열출력 감소를 줄이고 효율을 개선하기 위해 적용하고 있는 시스템을 검토하고 그 효과에 대해 논하였고, 또한 앞으로 적용을 하기 위해 연구가 진행 중인 사항에 대해 기술하였다.

참고문헌

- [1] Fundamentals of Power Plant Performance for Utility Engineers, Volumes 1, 2, and 3
- [2] CE NPSD-1162, Summary of Contributors to Unplanned Capacity Loss at CE Plants, July 1999
- [3] EPRI TR-101388, Feedwater Flow Measurement in U.S Nuclear Power Generation Stations, EPRI, 1992.11.
- [4] EPRI-1003472, Level Control Guide for Feedwater Heater, Moisture Separator/Reheaters, and Other Equipment, 2002. 12

감사의 글

조선대학교와 영광원자력 본부가 산학 협력을 맺은 이후 많은 고민 속에서 2010년에 대학원에 등록한 이후 어느 덧 종점을 향하고 있습니다. 그 동안의 대학원 생활이 내 기억 속 한 구석에 당당히 자리 잡을 정도로 재미있고 즐거웠던 추억임에 틀림이 없는 것 같습니다. 2년의 대학원 생활 동안 시간적 여유 부족으로 힘들 때가 많았지만 주위에서 많은 분들이 도움을 주셔서 유종의 미를 거둘 수 있었습니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어 주신 이경진 교수님께 진심으로 감사를 드린다. 그리고 또한 논문 심사 과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 김진원 교수님, 나만균 교수님께도 감사드리며 매 학기 마다 큰 열정으로 심도 있는 강의를 해주신 정운관 교수님, 송종순 교수님, 김승평 교수님 및 영광원자력 본부 내 김대겸 본부장님, 전재근 소장님, 김경구 소장님, 김홍우 소장님께도 진심어린 감사를 드립니다.

또한 가정에서 항상 응원해주고 적극적인 지원을 아끼지 않았던 아내와 항상 밝은 아이들로 자라면서 응원해준 아이들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

2년 동안 멋있고 즐거운 추억을 만들어 주신 학우들과, 바쁜 대학원생이라고 많은 시간적 배려를 해주신 팀장님 이하 부서 직원들, 그리고 한 차원 높은 수업을 받을 수 있도록 귀중한 시간을 아끼지 않고 도와주신 김준섭 차장님께도 감사를 드립니다.